

DANIEL MUÑOZ VELASCO

**CIELO DE CRISTAL,
SONIDO INDOMABLE**



CIELO DE CRISTAL,
SONIDO INDOMABLE

DANIEL MUÑOZ VELASCO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Daniel Muñoz Velasco

Cielo de Cristal, Sonido Indomable

Estudio acústico de la Galería de Cristal

Título TFG: Cielo de Cristal, Sonido Indomable
Subtítulo TFG: Estudio acústico de la Galería de Cristal

Estudiante
Daniel Muñoz Velasco

Tutora
María de los Ángeles Navacerrada Saturio
Departamento de estructuras y Física de la edificación

Aula TFG 1
David Mencías Carrizosa, *coordinador*
Esther Moreno Fernández, *adjunta*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Universidad Politécnica de Madrid

Junio 2025

Las imágenes de la portada y contraportada son de elaboración propia

«La acústica creativa es un concepto interesantísimo en arquitectura: puede sorprender, envolver, acompañar y crear sensaciones.»

Emilio Tuñón

Índice

Resumen

Abstract

1. Motivación y objetivos
2. Marco Teórico
 - 2.1. Problemática acústica en grandes espacios
 - 2.2. Fundamentos de Acústica
3. Caso de estudio: Galería de Cristal del Palacio de Cibeles
 - 3.1. El corazón de Cibeles. Tradición y transformación
 - 3.2. La traza histórica. Del patio a la galería
 - 3.3. El lenguaje de la Galería. Forma y estructura
4. Metodología
 - 4.1. La escucha activa. Mediciones en la Galería de Cristal La
 - 4.2. Galería virtual. Levantamiento del modelo 3D
 - 4.3. El software. Importación de modelo a ODEON
 - 4.4. La identidad virtual. Validación del modelo digital
 - 4.5. Una nueva percepción. Estrategias de acondicionamiento
5. Mediciones In-Situ
6. Proceso de modelado y validación 3D
 - 6.1. El modelo 3D
 - 6.2. Asignación de materiales
 - 6.3. Validación del modelo
7. Estrategias de acondicionamiento acústico
 - 7.1. Selección de materiales
 - 7.2. Desarrollo de estrategias
 - 7.3. Estudio comparativo de propuestas
8. Conclusiones
9. Bibliografía

Procedencia de figuras y tablas

Anexo

Resumen

La Galería de Cristal del Palacio de Cibeles, situada en pleno centro de Madrid, es un espacio arquitectónico de gran valor patrimonial. En las últimas décadas ha sido transformado y reconvertido en un espacio polivalente que alberga eventos sociales, culturales y empresariales. Esta transformación responde a una búsqueda de nuevos lugares de interés en la ciudad y, plantea nuevos retos, entre otros, el reto acústico.

En este Trabajo Fin de Grado, se aborda el estudio acústico de este espacio, caracterizado por su gran altura, volumen y, sobre todo, su gran cúpula de vidrio. Estas superficies, todas reflectantes, hacen que las condiciones acústicas no sean las óptimas por su alta reverberación, lo que compromete la comprensión del habla y del sonido.

A partir de la toma de datos in situ y la creación de un modelo digital validado mediante un software acústico, se analizan los principales parámetros acústicos del espacio y se proponen estrategias de mejora compatibles con su valor patrimonial del edificio. Estas propuestas plantean diversas configuraciones espaciales y materiales, adaptadas a los usos reales de la Galería.

El objetivo último del trabajo no es solo mejorar el comportamiento acústico del espacio, sino considerar cómo la arquitectura puede incorporar nuevas condiciones sin sacrificar el valor simbólico de lo construido. El estudio demuestra que es compatible combinar la monumentalidad de la Galería con una estética moderna adaptada a sus necesidades.

PALABRAS CLAVE

Galería de Cristal · Simulación acústica ·
Acondicionamiento acústico · Espacios multifuncionales · Valor patrimonial.

Abstract

The Galería de Cristal del Palacio de Cibeles, located in the heart of Madrid, is an architectural space of great heritage value. In recent decades it has been transformed into a multi-purpose space that hosts social, cultural and business events. This transformation responds to a search for new places of interest in the city and poses new challenges from the acoustic point of view.

This Final Degree Project deals with the acoustic study of this space, characterised by its great height, volume and, above all, its large glass dome. These surfaces, all of which are reflective, mean that the acoustic conditions are not optimal due to their high reverberation, which compromises the understanding of speech and sound.

By taking data in situ and creating a digital model validated by acoustic software, the fundamental acoustic parameters are analysed, and improvement strategies are suggested based on their compatibility with the building's heritage value. These proposals propose different spatial and material configurations, adapted to the real uses of the Gallery.

The aim of the work is not only to improve the acoustic performance of the work, but to consider how architecture can incorporate new conditions without sacrificing the symbolic value of the building. The study demonstrates that it is compatible to combine the monumentality of the Gallery with a modern aesthetic adapted to its needs.

KEYWORDS

Galería de Cristal · Acoustic simulation · Acoustic conditioning · Multifunctional spaces · Heritage value.

1. Motivación y objetivos

En el año 2020, al iniciar la carrera de Fundamentos de la Arquitectura, mi percepción acerca de qué aspectos se iban a estudiar comenzó a transformarse. Desde el colegio, había concebido la arquitectura como una disciplina más técnica que artística. Sin embargo, el primer año, comprendí que la formación artística era clave para tener recursos y herramientas para encarar los sucesivos proyectos. Esta orientación hizo que, de forma inconsciente, dejase de lado aquello que me hizo elegir arquitectura, la técnica.

Con el objetivo de recuperar ese enfoque, opte por el Taller Experimental II de Acústica, lo que me permitió volver a la senda más analítica de la arquitectura. A través del estudio del comportamiento del sonido, descubrí una nueva forma de interpretar los proyectos. Ya no solo desde lo visual o funcional, sino también considerando el estudio de la acústica, que implica otra dimensión sensorial.

A esto, se suma el hecho de que, en las últimas décadas, se ha observado una tendencia creciente a reutilizar y convertir espacios arquitectónicos singulares (como plazas, estadios, estaciones o antiguas iglesias) en escenarios polivalentes para actividades culturales, sociales y comerciales. Este recurso responde tanto a la voluntad de dinamizar y aprovechar el patrimonio arquitectónico obsoleto, como a la necesidad de dotar a las ciudades de espacios para acoger diversos eventos.

Existe un gran número de estos espacios de gran escala, originalmente concebidos para funciones de representación y de tránsito que progresivamente han sido destinados a usos polivalentes como conciertos, desfiles, exposiciones, etc. No obstante, esta transformación funcional casi nunca se acompaña de una adaptación acústica adecuada del espacio, lo que genera problemas en cuanto al confort acústico de estos.

El desafío descrito, se replica en multitud de lugares que, a pesar de ser arquitectónicamente imponentes, carecen de condiciones acústicas óptimas para usos musicales o escénicos. Esta problemática evidencia una tensión entre el valor arquitectónico, la polivalencia de su uso y las exigencias técnicas de la acústica que se va a abordar y analizar en este trabajo.

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Grado representa una gran oportunidad, ya que permite colaborar directamente con el Ayuntamiento de Madrid en el estudio acústico de la Galería de Cristal. Esta colaboración aporta al trabajo un enfoque práctico, y permite abordar el análisis acústico de un espacio de gran envergadura desde una perspectiva real.

El objetivo general de este trabajo es analizar la problemática acústica que presentan los grandes espacios cuando son destinados a usos distintos para los que fueron originalmente concebidos. Esta problemática se aborda en el estudio de un caso particular de la Galería de Cristal.

En él, se evaluarán los principales desafíos acústicos en este tipo de espacios y se propondrán estrategias de mejora, si es posible. Además, en la Galería de Cristal supone un desafío, debido a que deben ser compatibles con el hecho de ser una edificación sujeta a protección patrimonial.

En la arquitectura contemporánea existe una tendencia de reutilización y adaptación de grandes espacios para diversos eventos (culturales, sociales, empresariales). Entre los espacios que se presentan como escenarios versátiles se incluyen estadios, antiguas fábricas, museos y galerías. No obstante, la flexibilidad de usos lleva implícito importantes desafíos acústicos ya que estos espacios, en su origen, no fueron diseñados para albergar eventos de tanta variabilidad de condición sonora.

Esto desemboca en varios problemas, pero uno fundamental: la excesiva reverberación, derivada de la volumetría de los espacios, a menudo con superficies de materiales reflectantes. Esto afecta a la claridad musical e inteligibilidad del habla, lo cual impide el correcto desarrollo acústico para ciertos usos y compromete directamente la experiencia de los usuarios.

En este trabajo, además de analizar la acústica de la Galería de Cristal del Palacio de Cibeles, se abordará un breve estudio de otros espacios de carácter representativo con diferentes características arquitectónicas. En este estudio se incluye el Estadio Santiago Bernabéu, un recinto de gran escala donde la propagación del sonido y su geometría juegan un papel fundamental. También se analizará la Capilla de Museo de Historia de Madrid, un espacio de menor escala, pero con particularidades en su acústica debido a su diseño y materiales.

2. Marco teórico

2.1 Problemática acústica en grandes espacios

En las últimas décadas, la arquitectura moderna ha evolucionado hacia la renovación, reutilización y cambio de grandes espacios para usos muy variados, que a menudo no están vinculados con el propósito original para el que fueron creados. Estaciones, capillas, estadios o construcciones históricas se han transformado en lugares frecuentes para conciertos, exposiciones o eventos institucionales y de espectáculo.

Esta flexibilidad de uso, a pesar de ser beneficiosa desde un punto de vista cultural y funcional, presenta importantes desafíos desde la perspectiva sonora, ya que estos espacios no fueron diseñados para las demandas de estos nuevos usos.

Uno de los conflictos más frecuentes en este tipo de espacios es el exceso de reverberación, un fenómeno generalmente vinculado con el volumen y geometría de los espacios. A esto, se suma la utilización de materiales reflectantes, como el vidrio, el hormigón o la piedra. Estas circunstancias limitan la comprensión de la palabra, perjudican la nitidez musical y obstaculizan una correcta difusión del sonido, lo que disminuye su calidad y, por tanto, la del evento y de la experiencia de los asistentes.

En este estudio, se realiza el análisis del comportamiento acústico de la Galería de Cristal del Palacio de Cibeles, un conjunto de gran envergadura, con carácter patrimonial y una geometría complicada que ilustra con precisión esta problemática. Se sugiere no solo caracterizar las condiciones acústicas actuales, sino también proponer soluciones concretas que mejoren el confort acústico sin poner en riesgo su valor patrimonial.

Adicionalmente, se han escogido otros lugares de referencia con características arquitectónicas que permiten comprender este fenómeno. El estadio Santiago Bernabéu, recién reformado, funciona como modelo de espacio de gran envergadura en el que se debe manejar el sonido en relación con su experiencia interna y su impacto en su entorno inmediato.

Por otro lado, se analiza la Capilla del Museo de Historia de Madrid, de un menor tamaño, pero con una acústica definida por su origen eclesiástico. A continuación, se expone una comparativa de algunos de los parámetros arquitectónicos que implican un cambio en la acústica de los espacios. Esto, permite comprender cómo cada decisión de diseño condiciona la experiencia del usuario, y a su vez, como determinadas configuraciones pueden requerir estrategias con alto grado de sofisticación, para lograr acondicionarlos.

Del estadio a la capilla.

Desde el siglo pasado, el Estadio Santiago Bernabéu ha acogido eventos. En cambio, estos últimos años, ha pasado de ser un emblema del mundo del fútbol a convertirse en un espacio polivalente respecto a usos. Con su nueva remodelación, la institución optó por darle una nueva identidad al “Bernabéu”.

Ahora, cuando se nombra al estadio, su identidad cultural permite asociarlo no solo a partidos, sino a conciertos o espectáculos. Su transformación funcional ha implicado una serie de afecciones referidas a la acústica, que ponen de manifiesto las dificultades implícitas en la transformación de espacios concebidos con fines diferentes.



Figura 2.1. Vista exterior del Santiago Bernabéu desde el Paseo de la Castellana

Figura 2.1

Desde el punto de vista formal, la intervención incorporó una nueva cubierta retráctil, con una característica envolvente continua de acero y una plataforma móvil que permite la recogida del césped, liberando esa superficie si se precisase en otros eventos. Si bien la intervención ha supuesto una mejora en la funcionalidad, las deficiencias acústicas, como la reverberación, se han acentuado debido al uso de nuevas superficies reflectantes, implementadas sin una estrategia acústica que contrarrestara este efecto.

*Figura 2.2**Figura 2.3*

Figura 2.2. Vista exterior de la construcción de la cubierta retráctil

Figura 2.3. Vista interior de la nueva cubierta retráctil del Estadio Santiago Bernabéu

La forma en óvalo del estadio, junto a su altura y reflectividad de los materiales, da lugar a múltiples reflexiones y focos de concentración. Esto, genera una acústica con escaso control y desigualdad dependiendo de la ubicación. En los conciertos, estas deficiencias suponen un mayor problema, ya que la nitidez del sonido e inteligibilidad de las letras son claves; mientras que esos defectos, se traducen en menor calidad, ecos e interferencias.

Las malas experiencias de los usuarios no tardaron en manifestarse. Tras la celebración de eventos a principios del 2024, se produjeron quejas por parte de los vecinos del entorno cercano, por el exceso de ruido transmitido al exterior. Pero no fue lo único, algunos usuarios hicieron referencia en sus reseñas, su mala experiencia en el interior, con el que aseguraban que desde sus localidades el sonido carecía de la nitidez necesaria.

Como respuesta, en el estadio un equipo de ingenieros acústicos (ARUP) elaboró un estudio acústico y un posterior plan de acondicionamiento. Entre las medidas, se incluyeron una instalación de paneles fonoabsorbentes dispuestas en fachada y sistemas de control de sonido directo e indirecto en la celebración de los espectáculos. Se seleccionaron materiales que combinan membranas textiles y soluciones con aerogel, logrando atenuar el sonido en frecuencias medias-altas.

En conjunto, este caso muestra el conflicto entre el diseño funcional y visual de un proyecto y el confort acústico en este tipo de espacios, y plantea el reto de incorporar la acústica como factor determinante de proyecto que, en ocasiones, como la previamente explicada, condiciona la viabilidad de esos nuevos usos.

La Capilla del Museo de Historia de Madrid fue objeto de estudio acústico en el Taller Experimental II de Acústica, que cursé en el año 2024. En ella, se muestran los desafíos que suponen realizar intervenciones acústicas en espacios de carácter histórico de escala media. Originalmente fue diseñada para funciones relacionadas con la iglesia, pero hoy en día, se acogen en ella actividades culturales y eventos musicales o institucionales. Este caso, a pesar de ser una arquitectura eclesíástica, no implica un volumen tan elevado como el estadio, pero presenta condiciones como su geometría o su configuración espacial que implican una determinada acústica.

Figura 2.4. Vista exterior de la portada del Museo de Historia de Madrid



Figura 2.5. Vista exterior de la parte posterior del antiguo hospicio, año 1993

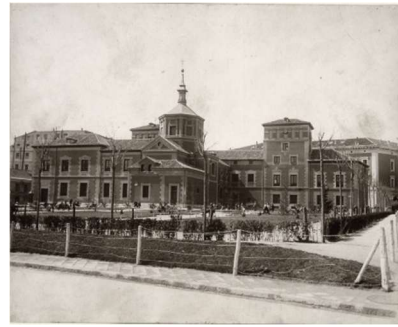


Figura 2.4

Figura 2.5

Portal de cultura y ocio del Ayuntamiento de Madrid. Museo de historia de Madrid.

La capilla formó parte del antiguo hospicio de San Fernando y conserva parte de su arquitectura barroca, propia del siglo XVII, en la que se construyó. En su configuración, presenta una nave central de proporciones alargadas, con una cúpula semiesférica sobre el crucero de esta. Los muros de fábrica son de ladrillo que, tras su posterior reforma, se enlucieron de yeso. El conjunto, se completa con un pavimento de losas pétreas, lo que constituye un recinto con alta reflectividad que junto a la ausencia de elementos absorbentes intensifica los efectos de la reverberación.

Figura 2.6. Concierto en el interior de la capilla. Músicos bajo la cúpula y espectadores bajo la bóveda de cañón



Figura 2.6

En su origen, las condiciones de la capilla resultaban favorables para la reverberación prolongada de la música sacra o cantos gregorianos, en las que la permanencia de dicho sonido resultaba clave. Sin embargo, en la reconversión del espacio en sala para conferencias o recepciones institucionales, la reverberación se vuelve problemática. En particular, se ve comprometida la inteligibilidad del habla, limitando así, la funcionalidad del espacio si no se implementan unas estrategias de mejoras acústicas.

Uno de los puntos de conflicto acústico es la cúpula central, en la que se generan fenómenos de focalización del sonido. En la superficie curva de

la cúpula se producen reflexiones múltiples, lo que tiende a concentrar la energía en puntos concretos del espacio, provocando ecos y mala escucha. Esto, junto a la geometría longitudinal de la nave, implica una propagación heterogénea del sonido.



Figura 2.7

Figura 2.7. Cúpula encamionada del interior de la capilla

Dado que es un espacio protegido por su valor patrimonial, las intervenciones en estos espacios deben ser reversibles, no invasivas y compatibles con el grado de protección de dicho lugar. Este motivo, hizo que las soluciones acústicas planteadas junto a los compañeros del taller fueron muy localizadas. Se optó por paneles absorbentes, distribuidos en ciertas superficies de la capilla teniendo en cuenta siempre, el juego de molduras que caracterizaba la capilla.

Con esas estrategias, se alcanzó una acústica óptima sin comprometer el carácter del espacio. En este sentido, la Capilla del Museo Nacional de Historia ejemplifica la necesidad de adaptar las estrategias de acondicionamiento acústico del espacio, preservando el carácter patrimonial de la misma.

2.2 Fundamentos de acústica

El contenido de este apartado se ha elaborado a partir de libro de *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, de Antoni Carrión Isbert y publicada por la Universidad Politécnica de Catalunya.

Sonido y su comportamiento

El sonido es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico —normalmente el aire— como resultado de una perturbación que genera variaciones de presión en dicho medio. Esta propagación requiere de la existencia de un soporte, ya que no puede transmitirse en el vacío. Las propiedades del sonido y su comportamiento dependen directamente de las características físicas del medio en el que se desplaza.

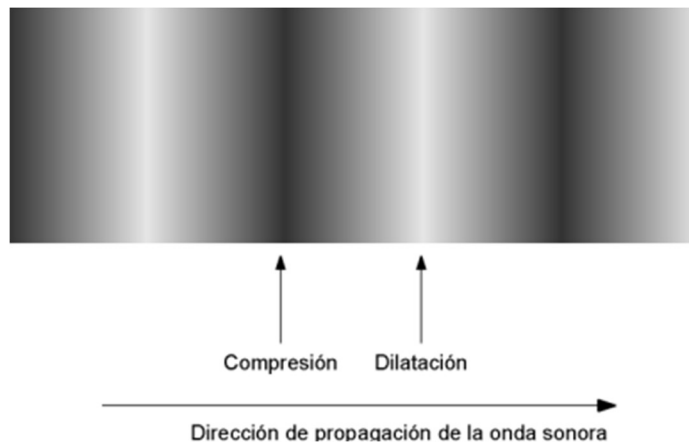


Figura 2.8. Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora.

Figura 2.8

Naturaleza y características del sonido

Físicamente, el sonido puede describirse como una oscilación de partículas en torno a su posición de equilibrio. Estas oscilaciones provocan zonas alternadas de compresión y dilatación en el medio, lo que se traduce en la transmisión de energía sonora. Esta energía puede presentarse en forma de onda, cuyo análisis permite describir el sonido mediante parámetros que se pueden medir.

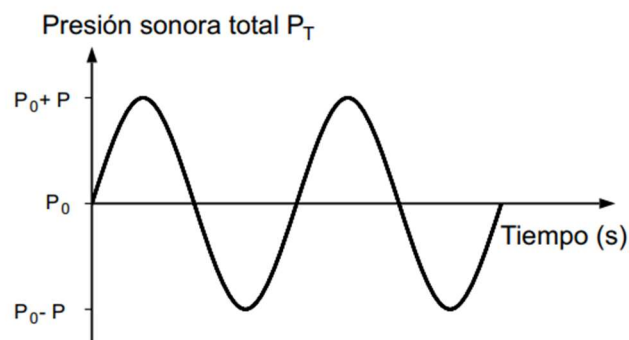


Figura 2.9. Evolución de la presión sonora total (PT) en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio..

Figura 2.9

Las magnitudes que caracterizan el sonido son:

La frecuencia (f) que representa el número de oscilaciones por segundo, y se expresa en hercios (Hz). Determina la altura del sonido, esto es, sonidos agudos tienen frecuencias elevadas, y sonidos graves, frecuencias bajas. El oído humano tiene la capacidad de percibir frecuencias entre 20 y 20000 Hz.

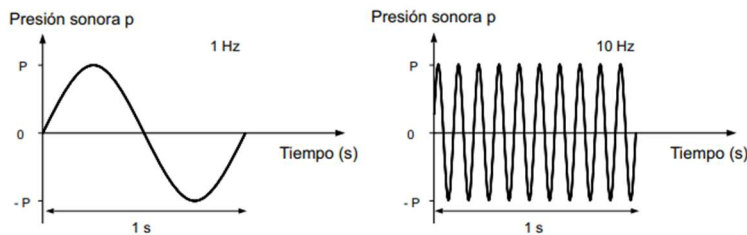


Figura 2.10

Figura 2.10. Ejemplos de oscilaciones de frecuencias 1 y 10 Hz

La velocidad de propagación (c) en el aire a 1 atm de presión y 22 °C es de aproximadamente 345 m/s. Esta velocidad es variable y se ve influenciada por factores como humedad, temperatura o densidad del medio por el que se propaga.

La longitud de onda (λ) es la distancia que recorre una onda durante un ciclo completo. El hecho de ser una distancia implica que su unidad de medida sean metros (m). Mediante la siguiente relación, se observa que la frecuencia y la longitud de onda son magnitudes inversamente proporcionales. $\lambda = c / f$

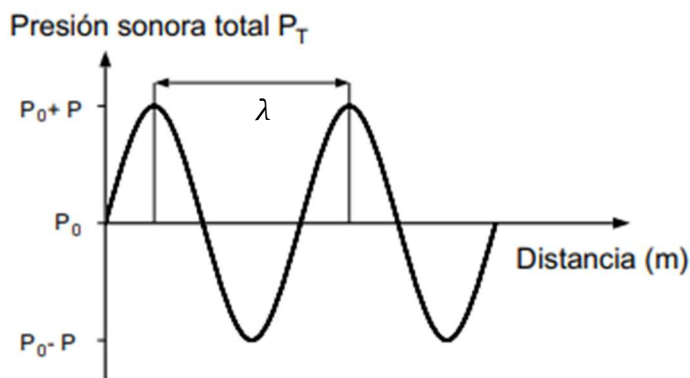


Figura 2.11

Figura 2.11. Longitud de onda (λ) del sonido

La amplitud se utiliza como medida de la variación máxima de presión respecto al estado de equilibrio. Tiene relación directa con la intensidad de percepción del sonido, es decir, de su volumen.

El nivel de presión sonora (L_p) es una magnitud expresada en decibelios (dB), que cuantifica la presión sonora relativa respecto al umbral de referencia.

Para conocer la composición frecuencial del sonido, se lleva a cabo un análisis espectral, que permite descomponerlo en las distintas frecuencias. Esta información resulta fundamental, ya que los materiales responden de manera diferente según la frecuencia del sonido incidente. Por ello, es esencial identificar las frecuencias críticas, que deben ser tratadas para el diseño eficaz de soluciones.

Dado el amplio rango de frecuencias audibles, se recurre a una agrupación normalizada en bandas para facilitar su análisis. La que va a ser empleada en esta investigación para su análisis es la banda de octava. De forma habitual en construcción, las frecuencias clave son las comprendidas entre 125 y 4000 Hz. Cada banda se identifica por su frecuencia central, y estas frecuencias están estandarizadas dentro del espectro audible y son las siguientes :

Figura 2.12. Frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas según la norma ISO 266, en Hz.

FRECUENCIAS CENTRALES DE LAS BANDAS DE OCTAVA ESTANDARIZADAS (ISO 266)										
16	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000

Figura 2.12

Fenómenos de propagación del sonido

En un recinto cerrado, el sonido emitido por una fuente alcanza al oyente por dos vías principales: el sonido directo, que llega sin interacción con el entorno, y el sonido reflejado, resultado de múltiples reflexiones sobre las superficies del espacio. Mientras que la intensidad del sonido directo depende únicamente de la distancia entre fuente y receptor, la energía de las reflexiones se ve afectada tanto por el trayecto recorrido como por las propiedades acústicas de los materiales que conforman los cerramientos.

El sonido reflejado puede clasificarse temporalmente en dos: las primeras reflexiones, que llegan al receptor en los primeros 100 ms tras el sonido directo, y las reflexiones tardías, generadas por múltiples reflexiones en las superficies adyacentes. Estas reflexiones sucesivas conforman la denominada cola reverberante, cuya duración y comportamiento influyen notablemente en la calidad acústica.

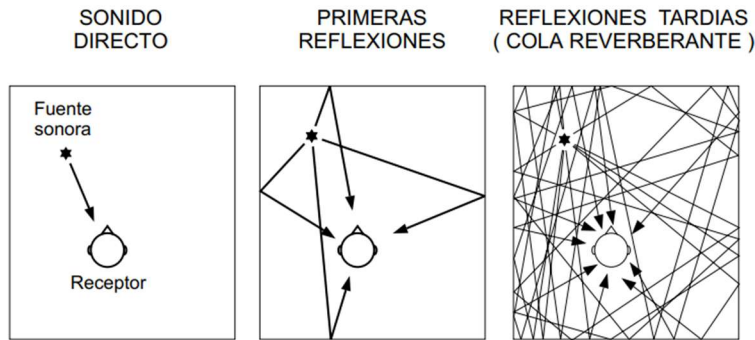


Figura 2.13. Esquema del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante

Figura 2.13

Una vez descrito como el sonido se propaga en un recinto cerrado, resulta fundamental detenerse en el análisis de las primeras reflexiones, cuya influencia en la percepción acústica es especialmente relevante. Su comportamiento, condicionado por la geometría y los materiales permiten establecer las bases para técnicas predictivas como la acústica geométrica.

El estudio de estas primeras reflexiones se basa en el principio de la ya mencionada acústica geométrica, que asume que las ondas sonoras se comportan como rayos de luz, reflejándose sobre las superficies del recinto. Esta aproximación, a pesar de ser idealizada, es válida siempre que las superficies cuyas dimensiones sean significativamente mayores que la longitud de onda del sonido analizado; y que dichas superficies sean lisas y altamente reflectantes.

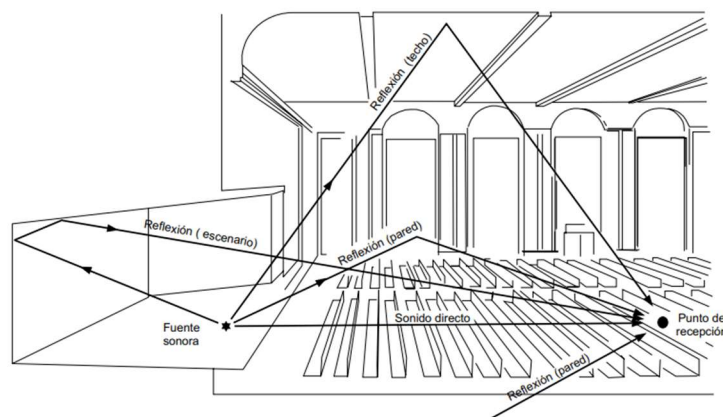


Figura 2.14. Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor en una sala

Figura 2.14

Para optimizar la contribución de las primeras reflexiones en un recinto, es fundamental prestar atención tanto a la configuración geométrica de sus superficies como a los materiales utilizados en sus revestimientos. Este tipo de intervención, orientada a mejorar el comportamiento acústico del espacio, se conoce como acondicionamiento acústico.

Los materiales presentan comportamientos diferenciados frente a la incidencia de ondas sonoras. Aquellos que disipan una proporción significativa de la energía acústica incidente se clasifican como

materiales absorbentes. Por el contrario, los materiales que reflejan la mayor parte de la energía acústica se denominan reflectantes.

La capacidad de un material para absorber sonido se cuantifica mediante el coeficiente de absorción acústica (α), una magnitud adimensional definida como la razón entre la energía absorbida y la energía incidente. Dado que la energía absorbida no puede medirse de forma directa, el valor de este coeficiente se determina indirectamente a partir de la diferencia entre la energía incidente y la reflejada.

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}} = 1 - \frac{\text{Energía reflejada}}{\text{Energía incidente}}$$

Para analizar de manera objetiva la influencia conjunta de los materiales y de la forma del recinto sobre la calidad sonora percibida, se recurre a una serie de parámetros acústicos fundamentales que describen la evolución temporal de la energía sonora en el interior del espacio.

En este Trabajo Fin de Grado, se analizarán el Tiempo de reverberación (TR), el tiempo de decaimiento inicial (EDT), la definición de la palabra (D_{50}) y la claridad musical (C_{80}). La experiencia acumulada en el diseño y análisis de espacios eficientes acústicamente ha permitido establecer valores de referencia óptimos para estos parámetros, que se detallan a continuación.

Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (TR) se define como el intervalo necesario para que el nivel de presión sonora disminuya 60 Decibelios (dB) una vez cesa la emisión de la fuente sonora. Debido a la dificultad de registrar esta caída completa, especialmente debido a la presencia del ruido de fondo, es habitual recurrir a la medición de intervalos parciales de 20 dB o 30 dB. A partir de estas mediciones, y bajo el supuesto de un comportamiento de decaimiento lineal del sonido, se extrapola al valor total del TR mediante los siguientes métodos:

- T_{20} se calcula multiplicando el tiempo de caída de 20 dB por 3.
- T_{30} se obtiene al duplicar el tiempo de caída de 30 dB.

La comparación entre T_{20} , T_{30} y *Early Decay Time* (EDT) permite evaluar el grado de homogeneidad de la difusión sonora en un espacio. Cuando estos tres valores son similares, se puede considerar que la propagación de la energía sonora es uniforme.

A continuación, se presenta una tabla extraída del Carrión Isbert, que establece los rangos recomendados del valor medio del tiempo de reverberación (TR mid) en función del uso previsto del recinto, con el fin de garantizar unas condiciones acústicas adecuadas.

TIPO DE SALA	RT _{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Figura 2.15

Figura 2.15. Intervalo de valores recomendados de TR mid en función del tipo de sala (recintos ocupados)

El T₂₀ es el valor de referencia más utilizado ya que es el más fácil de medir en entornos con mayor ruido de fondo, y del que haremos uso en este trabajo. A pesar de que el tiempo de reverberación varía en función de la frecuencia, es habitual trabajar con un único valor global, calculado como el promedio del TR a 500 Hz y 1000Hz. Este valor, denominado TR mid, se define con la siguiente expresión:

$$TR_{mid} = \frac{T_{20}(500 \text{ Hz}) + T_{20}(1000 \text{ Hz})}{2}$$

Un TR elevado implica una lenta disipación del sonido, lo que favorece la permanencia de las reflexiones y, por tanto, el predominio del campo reverberante sobre el sonido directo. Por el contrario, un TR reducido sugiere una rápida atenuación de la energía sonora, características en los que el campo directo es dominante. Como ya se ha comentado previamente en varias ocasiones, una u otra situación vienen determinadas por el campo directo y campo reverberante. Están determinados por la distancia respecto a la fuente y por las propiedades del entorno, particularmente la absorción de los materiales empleados.

Figura 2.16. Comparativa entre dos espacios con distintos niveles de acondicionamiento acústico

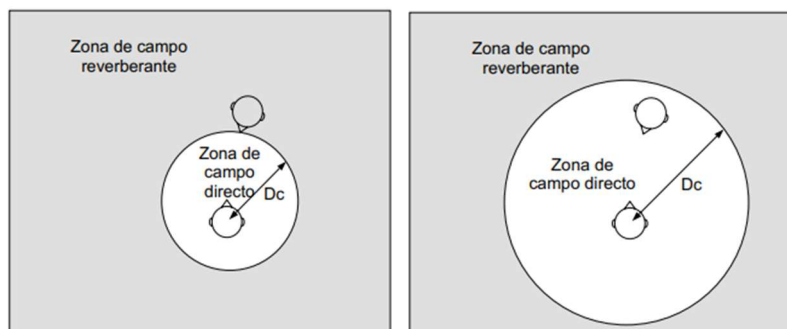


Figura 2.16

Izquierdo: recinto con escaso tratamiento acústico, el oyente se sitúa a fuera de la zona de predominio del campo directo

Derecha: mayor grado de acondicionamiento acústico, y el receptor se ubica dentro del campo directo

Además, la propagación de la energía sonora difiere notablemente en cada campo. En el campo directo, el nivel de presión sonora decrece de manera significativa con la distancia, mientras que el campo reverberante mantiene ese nivel de manera constante.

Avilés López, Rodrigo y Perera Martín, Rocío. (2017). *Manual de acústica ambiental y arquitectónica*. Paraninfo.

Higini Arau, doctor en ciencias físicas en la especialidad de acústica, desarrolló unas fórmulas que indican cual es el Tiempo de reverberación óptimo para tres espacios.

$$\text{Teatro - Sala de Conferencias} \quad T_{opt \max} = 0,368 \cdot V^{0,1505}$$

$$T_{opt \min} = 0,368 \cdot V^{0,1505}$$

Ópera

$$T_{opt \max} = 0,509 \cdot V^{0,1325}$$

$$T_{opt \min} = 0,396 \cdot V^{0,1273}$$

Figura 2.17. Fórmulas para determinar el Tiempo de Reverberación óptimo de una sala según su uso. Higini Arau

Conciertos

$$T_{opt \max} = 0,600 \cdot V^{0,1325}$$

$$T_{opt \min} = 0,425 \cdot V^{0,1331}$$

Figura 1.17

Early Decay Time (EDT)

El EDT representa el tiempo estimado de reverberación calculado a partir de la caída inicial de 10 dB del nivel de presión sonora, utilizando la siguiente expresión:

- EDT se calcula multiplicando el tiempo de decaída de 10 dB por 6.

Este parámetro evalúa la fase inicial del decrecimiento energético del sonido, caracterizada por la llegada de las primeras reflexiones individuales. Este parámetro está estrechamente vinculado a la percepción subjetiva de la viveza del sonido en un espacio.

Un valor reducido del EDT puede inducir sensación de sala apagada, incluso si el TRmid se encuentra dentro de los rangos recomendados para su uso. Por este motivo, es recomendable que ambos parámetros mantengan valores similares. En contextos como auditorios o salas de conciertos, se considera adecuado que el EDT supere en torno a un 10% al valor de TRmid.

La comparación entre T_{20} , T_{30} y *Early Decay Time* (EDT) permite evaluar el grado de homogeneidad de la difusión sonora en un espacio. En este sentido, cuando el EDT es similar al T_{20} , T_{30} , suele indicar que el decaimiento del sonido es uniforme y que la distribución de la absorción en la sala es equilibrada. Si el EDT difiere mucho de T_{20} o T_{30} , puede indicar que la absorción no está uniformemente distribuida o que existen diferencias notables entre decaimiento inicial y final.

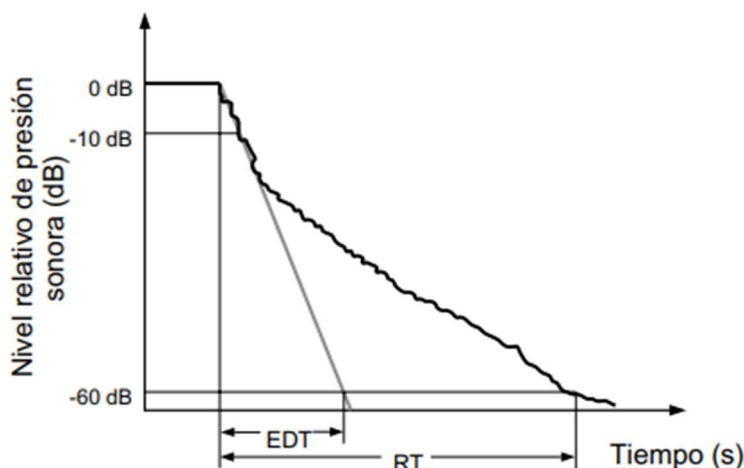


Figura 2.18

Figura 2.18. Este ejemplo ilustra cómo la comparación entre el EDT y el TR está vinculada con la distribución uniforme del sonido en el recinto. Se aprecia como la curva de decaimiento del nivel de presión sonora muestra dos pendientes distintas, lo que da lugar a valores diferentes de EDT y TR. Esto evidencia una distribución no uniforme de la difusión sonora en el espacio.

Definición de la palabra D50

El parámetro D50 mide el grado de claridad con que se percibe un mensaje hablado, proporcionando una estimación objetiva de su inteligibilidad por parte del oyente. Su valor está condicionado por la ubicación del receptor respecto a la fuente sonora.

Matemáticamente, este índice se expresa como el cociente entre la energía sonora recibida en los primeros 50 milisegundos tras la llegada del sonido directo y la energía total captada por el oyente (en forma porcentual).

$$D50 = \frac{\text{Energía recibida (50 primeros ms)}}{\text{Energía total recibida}} * 100$$

Un valor elevado de D50 indica un predominio de las primeras reflexiones, favoreciendo una mejor comprensión del habla, mientras que valores reducidos reflejan una mayor presencia de reflexiones tardías, lo que puede comprometer la inteligibilidad. A partir de la recopilación de datos obtenidos en diversos proyectos, se ha concluido que un espacio presenta buena escucha cuando el valor de este parámetro se sitúa en torno a los 0,5.

Claridad musical C80

El parámetro C80 evalúa el grado de definición con el que el oyente percibe los distintos elementos de una interpretación musical, permitiendo valorar tanto la distinción de notas consecutivas como la coherencia armónica del conjunto. Es esencial para determinar si el espacio favorece una audición nítida y articulada de las piezas musicales.

Este índice se calcula como la razón entre la energía captada por el oyente en los primeros 80 milisegundos tras la llegada del sonido directo y la energía percibida posteriormente, es decir, tras ese espacio temporal:

$$C80 = \frac{\text{Energía en los 80 primeros ms}}{\text{Energía posterior los 80 ms}}$$

En espacios destinados a la música en directo como auditorios o salas de concierto se recomiendan que los valores de $C80$ oscilen, para una sala ocupada entre -2 y +2 dB, en todos los puntos de escucha; mientras que en salas polivalentes se estiman recomendables valores entre -4 y 0 dB, para garantizar un equilibrio entre claridad y riqueza reverberante del sonido.

Figura 2.19. Comparativa entre valores de $C80$ (sala vacía) y TR_{mid} (sala ocupada) en 36 auditorios según Beranek. La tendencia muestra que, a mayor reverberación, mayor claridad sonora. Esto evidencia la importancia de controlar el TR medio para usos musicales

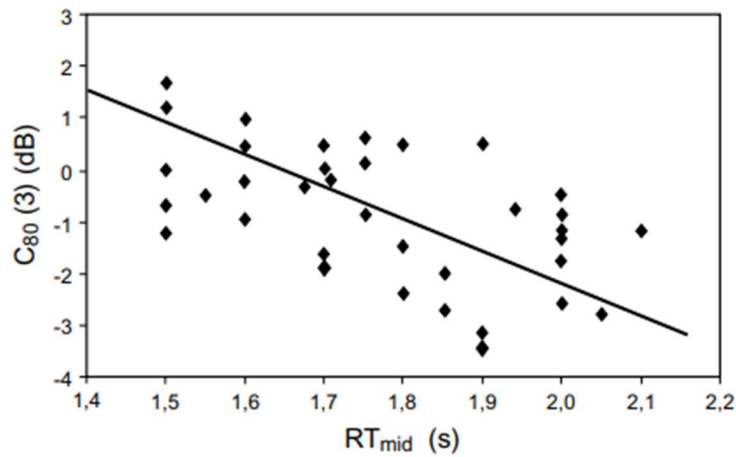


Figura 2.19

3. Caso de estudio: La Galería de Cristal

3.1. El corazón de Cibeles. Tradición y transformación.

La Galería de Cristal se ubica en el interior del Palacio de Cibeles, uno de los edificios más reconocibles del paisaje urbano de la ciudad de Madrid. Situado en la intersección entre el distrito Centro y el barrio de Justicia, el edificio se ubica en un punto neurálgico de la ciudad, en plena confluencia entre el Paseo del Prado y la calle Alcalá, dos ejes históricos que estructuran la trama urbana de Madrid.



Figura 3.1

Figura 3.1. Vista exterior de la antigua sede central de Correos y Telégrafos tras su inauguración en 1919

Este enclave posee un alto valor simbólico y cultural, no solo por su centralidad geográfica, sino por su proximidad a instituciones como el Instituto Cervantes o el Círculo de Bellas artes, además de su conexión visual y funcional con la propia Plaza de Cibeles. El edificio, concebido en su origen como sede de la Sociedad de Correos y Telégrafos, articula su planta en torno a un gran patio central, actualmente reconvertido en la Galería de Cristal.

La intervención contemporánea que dio lugar a esta galería supuso una reinterpretación del espacio original. La cubierta acristalada que hoy la caracteriza no solo permite la entrada de luz natural, sino que también establece una conexión visual con el entorno urbano, aunque desde puntos estratégicos en altura. Esta nueva configuración hace referencia a un modelo de arquitectura que apuesta por la activación del patrimonio a través de sus usos contemporáneos y públicos, manteniendo al mismo tiempo su carácter institucional.

Desde su rehabilitación, la galería funciona como un espacio polivalente abierto al uso activo de los ciudadanos y vinculado a la programación cultural gestionada por el Ayuntamiento de Madrid. Su situación estratégica dentro del edificio, la convierte en un punto de conexión entre los dos cuerpos del Palacio. Esta transformación muestra un ejemplo de cómo un espacio inicialmente concebido para funciones técnicas puede adaptarse a las nuevas demandas sociales, manteniendo su esencia y valor patrimonial.

3.2. La traza histórica. Del patio a la galería

Navascués Palacio, Pedro. (1962). *Jaime Marquet y la Antigua Casa de Correos de Madrid*. Villa de Madrid (n.24), pp. 68-70

Concebido a comienzos del siglo XX como la ya mencionada sede de la Sociedad de Correos y Telégrafos, el palacio se levantó entre los años 1907 y 1919, en plena transformación hacia la modernidad. El proyecto fue obra de los arquitectos Antonio Palacios y Joaquín Otamendi, quienes hicieron que el edificio tenga un lenguaje monumental y simbólico, intercalando elementos del plateresco renacentista con influencias del modernismo. Estos, tenían un propósito claro: crear un edificio que representase progreso técnico y el carácter propio de un organismo de Estado.

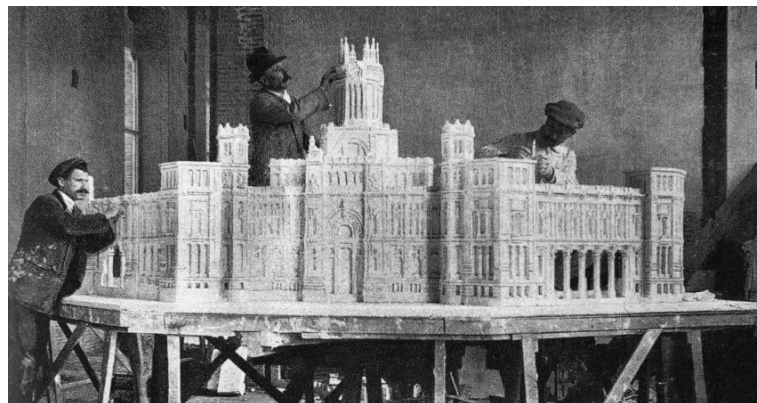


Figura 3.2. Fotografía de la maqueta del Palacio de Telecomunicaciones

Figura 3.2.

En su concepción original, el conjunto giraba en torno a un amplio patio interior, concebido como núcleo operativo para la clasificación y distribución de las cartas. Este vacío respondía a necesidades funcionales, criterios urbanísticos (fondo edificable y frente de alineación) y, de ventilación y luminosidad. Con el paso del tiempo, y a medida que los usos cambiaban, este espacio fue perdiendo su papel, y pasó a un segundo plano dentro del conjunto.

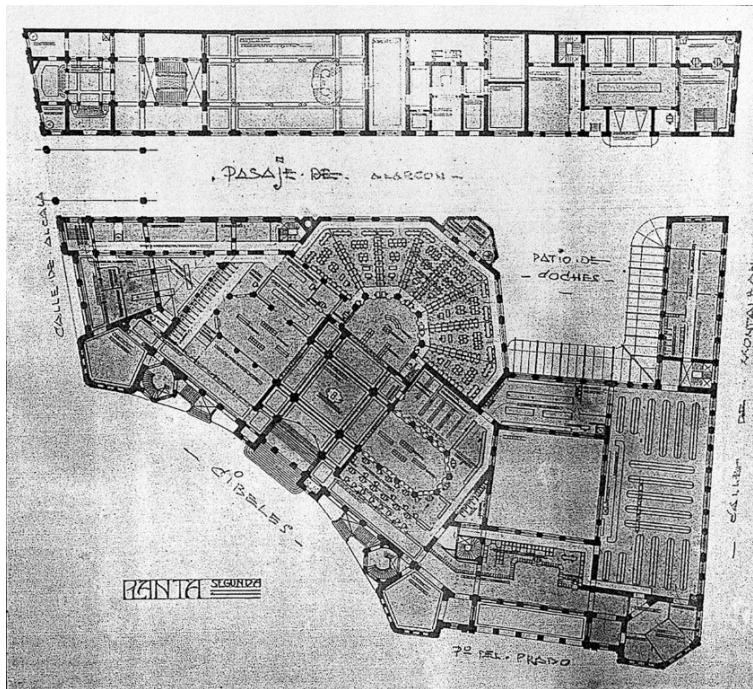


Figura 3.3

Figura 3.3. Plano de la segunda planta de la antigua sede de Correos y Telégrafos



ENTREPLANTA INSTALADA SOBRE EL MUELLE DE CARGA Y DESCARGA DE CORRESPONDENCIA, EN LA CENTRAL DE MADRID, SIN DISMINUCION DE LA SUPERFICIE UTIL DE AQUEL.
ENTRÉE-ÉTAGE INSTALLÉ SUR LE QUAI DE CHARGEMENT ET DÉCHARGEMENT DES CORRESPONDANCES, AU BUREAU DE POSTE PRINCIPAL DE MADRID, SANS DIMINUER LA SURFACE UTILE DU QUAI.

Figura 3.4

Figura 3.4. Antiguo patio interior usado como muelle de carga y descarga de la correspondencia, sobre el que se organizaba la antigua sede central de Correos y Telégrafos. Actualmente es el espacio en el que se encuentra la actual Galería de Cristal.

No fue hasta la rehabilitación llevada a cabo entre 2003 y 2011, promovida por el Ayuntamiento de Madrid, cuando se planteó una reestructuración integral del edificio. Tenían como objetivo dotarlo de una nueva función institucional, la nueva sede del consistorio. Para ello, se convocó un concurso, el cual fue ganado por el estudio Linazosoro y Sánchez. Su propuesta permitía un equilibrio entre el respeto por la arquitectura original y la adaptación a las nuevas exigencias.

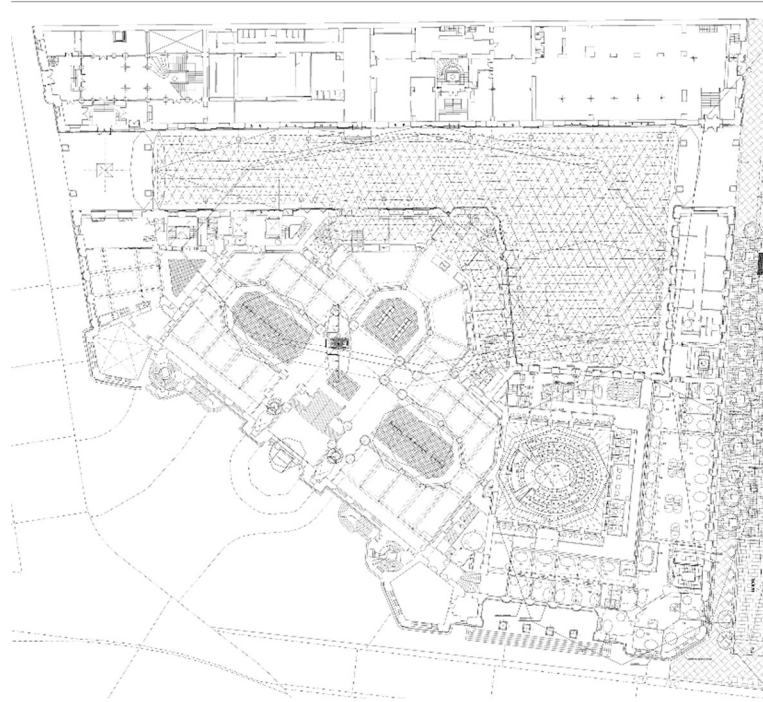


Figura 3.5. Plano del proyecto de ejecución de la segunda planta de la rehabilitación del Palacio de Cibeles del año 2005

Figura 3.5

Una de las intervenciones con más significado de esta transformación fue cubrir el antiguo patio con una compleja estructura metálica revestida de vidrio, que dio lugar a la actual Galería de Cristal. Esta nueva cubierta alcanza una altura máxima de unos treinta metros y configura una gran bóveda que se caracteriza por su ligereza y transparencia permitiendo la entrada de luz natural. El resultado es un espacio diáfano con la versatilidad de acoger actividades muy diversas sin perder su poder representativo.



Figura 3.6

Figura 3.6. Imagen global exterior de la estructura de cubierta de la Galería de Cristal, tras su construcción

Desde su inauguración en el año 2011, la galería se ha consolidado como un espacio multiusos dentro del panorama cultural de la ciudad de Madrid. En ella, se han celebrado actos institucionales, exposiciones, ferias, desfiles y proyecciones de cine, convirtiéndose en un espacio abierto a la ciudadanía y adaptable a diferentes formatos público-privados.



Figura 3.7

Figura 3.7. Imagen del montaje de un banquete nocturno corporativo en la Galería de Cristal

Figura 3.8. Imagen panorámica de la feria Art Madrid 2022, donde se recrea un espacio con las de 50 galerías expositivas



Figura 3.8

Figura 3.9. . Imagen de la celebración de los premios Laureus World Sports en la Galería de Cristal



Figura 3.9



Figura 3.10. Imagen de la pista de hielo que se instala en época navideña en la Galería de Cristal

Figura 3.10



Figura 3.11. Imagen de la disposición del cine de verano en la Galería de Cristal. Es destacable el hecho que la escucha del audio sea por auriculares regulables en tamaño y volumen

Figura 3.11



Figura 3.12. Imagen de la celebración de un cóctel nocturno en la Galería de Cristal

Figura 3.12

La intervención ha redefinido el papel de este conjunto arquitectónico dentro del tejido urbano, haciendo de él un referente cultural. La propia cubierta se ha convertido en un símbolo de la ciudad actual, por introducir innovación técnica y activación patrimonial. Esta operación ha sido reconocida en el mundo de la arquitectura por su capacidad de integrar pasado y presente en una solución coherente con aquello que se quería realizar.

En definitiva, la Galería de Cristal representa un caso paradigmático de reactivación de un espacio patrimonial a través de recursos contemporáneos, sin perder su historia. Dicha transformación plantea cuestiones relevantes del aspecto acústico, al convertirse en un espacio abierto pero cubierto, de gran escala y usos polivalentes. Estos factores hacen de la galería un caso especialmente apropiado para el estudio y reflexión sobre los retos acústicos que implica la adaptación de espacios a usos diferentes de los previstos en su estado original.

3.3 El lenguaje de la Galería. Forma y estructura

La Galería de Cristal ocupa una superficie aproximada de 1200 metros cuadrados, al cual se adhieren espacios de carácter funcional situados en niveles inferiores. Bajo el nivel principal de esta, se encuentra una planta técnica que permite y garantiza la operatividad del conjunto, siendo indispensable en un edificio de gran envergadura como es el Palacio de Cibeles. En ella se encuentran zonas de instalaciones, núcleos de servicios y accesos de logística son algunos de los recursos que se encuentran en ella.

Este recurso de planta inferior técnica se materializa en la propia galería en forma de mobiliario, particularmente como bancos. Como se puede observar en la figura 3.13, las cuatro caras laterales de estos, son rejillas para ventilación y climatización de la galería.



Figura 3.13. Detalle bancos dentro de la galería. En la visita se comprobó que estos funcionan a modo de difusor-rejilla con el objetivo de esconder elementos de impulsión-extracción, mostrándolo como mobiliario. Elaboración propia

Figura 3.13

Formalmente, la Galería se desarrolla en planta con una forma en “L”, definida por un espacio central que se complementa con una nave lateral estrecha y alargada. A pesar de tener esta forma muy marcada, se puede apreciar en ella una ligera disimetría, fruto de la estructura original. Todo el espacio se encuentra delimitado por unas crujiás laterales que acotan su perímetro, y establecen un ritmo que muestra en ellas, la estructura del conjunto edificatorio que la rodea.



Figura 3.14

Figura 3.14. Imagen del espacio central de la Galería de Cristal, lugar donde se celebran los eventos de forma habitual. Elaboración propia



Figura 3.15

Figura 3.15. Imagen del ala lateral de la Galería de Cristal, lugar de acceso y complementario al espacio central en eventos. Elaboración propia

El elemento que dota de carácter a la galería y hace que sea un espacio singular es su cubierta. La ingeniería encargada de realizar la estructura fue Schlaich Bergermann Partner. Los componentes que ensalzan la cubierta son una estructura metálica ligera revestida por paños de vidrio. Esta envolvente se construye con un entramado de 2996 perfiles metálicos con 1034 nudos, que conforman esa estructura tridimensional con unos módulos triangulares.

Aproximadamente, son 2000 los paneles triangulares de vidrio laminado, diseñados individualmente para adaptarse a las curvaturas de la cubierta. Esta estructura, se apoya sobre un anillo perimetral, en forma de perfil tubular, que permite garantizar la transición de dicha estructura con el sistema de muros preexistentes del edificio.

*Figura 3.16. Imagen global de la estructura metálica de cubierta.
Elaboración propia*



Figura 3.16

*Figura 3.17. Detalle de unión entre el anillo perimetral y la estructura triangular.
Elaboración propia*



Figura 3.17

Este sistema constructivo hace que este espacio sea diáfano, luminoso y con permeabilidad visual, lo que permite celebración de eventos, al tiempo que se conserva el carácter institucional del conjunto. Esta solución de cubierta no solo resuelve el cerramiento del antiguo patio, sino que dota de identidad al conjunto, siendo la Galería el nuevo centro de este.

4. Metodología

La metodología de este trabajo se apoya en una estrategia combinada, que tiene como base la observación directa del comportamiento acústico de la Galería de Cristal y en el desarrollo de un modelo digital tridimensional como herramienta de simulación. Esta doble aproximación permite tener un enfoque global de la acústica de este espacio, y así evaluar y proponer diferentes estrategias de acondicionamiento compatibles con su valor patrimonial implícito en el grado de protección que presenta.

En primer lugar, se realizó una visita en la que se realizaron las mediciones in situ. Estas pruebas permitieron obtener datos reales sobre las características acústicas del recinto. Se incluyen parámetros como el tiempo de reverberación (TR), definición de la palabra (D50) o claridad musical (C80) descrito con anterioridad en la sección 2.2

En paralelo a las mediciones, se elaboró un modelo tridimensional detallado del interior del espacio, que fue posteriormente importado al software de simulación acústica, ODEON.

Ambos enfoques, mediciones y simulación, fueron utilizados de manera complementaria. Las mediciones in situ sirven para evaluar las características acústicas del recinto en su estado actual y validar el modelo geométrico. Este modelo sirve de base para evaluar la viabilidad de las soluciones que se propongan.

4.1. La escucha activa.

Mediciones en la Galería de Cristal.

La colaboración con el Ayuntamiento se ha gestionado con CentroCentro, la empresa que gestiona la Galería de Cristal. Con dicha empresa, hemos tenido contacto directo durante los meses de investigación, con el objetivo de conocer cuál era el estado actual de la galería. Esta información permitió caracterizar la geometría del espacio, sus limitaciones e información adicional como espacios de almacenamiento y usos.

La primera fase consistió en realizar una serie de mediciones acústicas in-situ. En la visita, los alumnos del Taller Experimental II de Acústica formaron parte del equipo de medición, toma de datos y análisis de detalles clave del espacio.

Las mediciones se llevaron a cabo mediante la emisión de señales sonoras (globos) desde distintas posiciones y la recogida de dichas

respuestas impulsivas (con una grabadora binaurales) en puntos receptores inmediatamente después de esas emisiones.

Las posiciones de emisión y recepción (fuente-receptor) se distribuyeron a lo largo de todo el espacio de tal forma que permitieron barrer homogéneamente toda la superficie de la galería. Este método permitió obtener un diagnóstico objetivo del estaco acústico actual del recinto.

4.2. La galería virtual.

Levantamiento del modelo 3D.

Paralelamente a las mediciones y con el propósito de hacer una réplica digital, se levantó un modelo tridimensional de la galería, que reproduce fielmente las dimensiones, proporciones y formas. En la elaboración del modelo, se desestimaron elementos de dimensiones menores a 50 cm, ya que su tamaño es considerablemente inferior a la longitud de onda del sonido en el rango de frecuencias analizado. Esto implica que dichos elementos no afectan significativamente en la propagación y, por tanto, pueden omitirse en la simulación sin comprometer la precisión de los resultados.

Cada una de las superficies del modelo fueron clasificadas según su materialidad, con el fin de asignar valores reales del coeficiente de absorción de las superficies interiores del espacio, extraídas de la base de datos del programa ODEON. Esta caracterización incluye los coeficientes de absorción sonora para las diferentes frecuencias, lo que permite simular con precisión la interacción del sonido con los materiales existentes.

4.3. El software.

Importación del modelo a ODEON.

Una vez elaborado, el modelo fue exportado en formato .dxf y trasladado a la interfaz de ODEON. Durante este proceso, se configuró el sistema de coordenadas de forma coherente para ubicar las fuentes sonoras y los puntos de receptores en posiciones equivalentes a las empleadas en las mediciones reales. Esta correspondencia espacial entre el modelo digital y las mediciones físicas facilita la validación de los resultados, permitiendo una comparación rigurosa entre los datos simulados y los obtenidos experimentalmente.

4.4. La identidad virtual.

Validación del modelo digital.

Con el modelo ya configurado, se procedió a su validación mediante la comparación de los valores obtenidos in-situ con los simulados en ODEON. Para ello, se replicaron las mismas condiciones físicas en el espacio digital. Entre estas condiciones estaban la posición de fuentes y receptores y condiciones de emisión.

Esta comparación permite ajustar los materiales y parámetros hasta conseguir una correspondencia lo más fiel posible con los datos obtenidos de las mediciones in situ del espacio. El riguroso proceso de validación constituyó el aspecto clave para confiar en el modelo como herramienta predictiva para la formulación de soluciones de acondicionamiento.

4.5. Una nueva percepción.

Estrategias de acondicionamiento.

Finalmente, con el modelo validado, se exploraron distintas propuestas de acondicionamiento acústico mediante simulaciones acústicas. Se probaron diferentes configuraciones espaciales y materiales (incluyendo soluciones reversibles y adaptables). Con el objetivo de mejorar los valores de los parámetros de estudio, se trató en todos los casos, de que estén dentro de los objetivos y sean adaptables al uso polivalente del espacio.

Las propuestas fueron evaluadas cuantitativamente a partir de los parámetros acústicos, y se consideró también su compatibilidad con el carácter institucional y el valor patrimonial de la galería. En los siguientes apartados se describe en detalle el proceso desarrollado en cada una de las etapas contempladas en la metodología.

5. Mediciones In-Situ

Con el objetivo de caracterizar de forma precisa el comportamiento acústico de la Galería de Cristal, se llevó a cabo la toma de datos in-situ. Esta fase experimental permitió conocer los valores concretos de los parámetros acústicos del espacio de estudio, algo fundamental tanto para el diagnóstico inicial del recinto como para la validación del posterior modelo virtual del espacio en el software de simulación acústica ODEON.

Las mediciones, realizadas el 19 de marzo de 2025, se llevaron a cabo en colaboración con los alumnos del Taller Experimental II de Acústica de la escuela (ETSAM). La coordinación para la visita y acceso al recinto se organizó con la empresa gestora de la Galería de Cristal, bajo el control del Ayuntamiento de Madrid, que facilitó un horario a primera hora de la mañana, con el espacio libre para la correcta toma de medidas en presencia de ruido de ambiente que pudiera alterar los datos tomados.

La metodología empleada se basó en la emisión de señales acústicas impulsivas y la inmediatamente posterior captación de respuestas en diversos puntos del recinto. Este procedimiento permitió registrar cómo se propaga el sonido a través del volumen interior desde una fuente hasta las ubicaciones de recepción, situadas de tal forma que se cubrió toda la superficie del recinto.

A partir de las respuestas impulsivas obtenidas se calcularon los principales parámetros acústicos del espacio, como el tiempo de reverberación (TR), la definición de la palabra (D_{50}) o la claridad musical (C_{80}), de acuerdo con las recomendaciones normativas de la UNE-EN ISO 3382-2:2008, aplicable a recintos no diseñados específicamente para usos musicales.

La generación de la señal sonora se llevó a cabo mediante la explosión de globos en los puntos identificados como fuente o emisor. Las señales fueron registradas con una grabadora binaural profesional, a la que se conectaban dos micrófonos externos que registran la percepción espacial del oído humano.

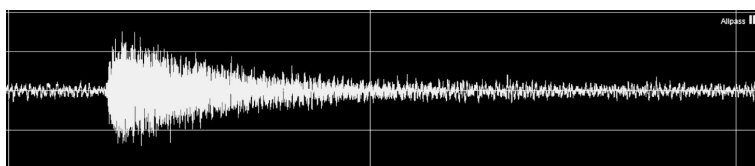


Figura 5.1

La representación en forma piramidal representa la uniformidad apropiada del sonido.

UNE-EN ISO 3382-2:2008
Acústica. Medición de
parámetros acústicos en
recintos. Parte 2: Recintos
con fines distintos de la
música (ISO 3382-2:2008).

Figura 5.1. Respuesta
impulsiva de uno de los
canales auditivos tomadas
en la Galería de Cristal.
Elaboración propia

Las posiciones de emisor y receptor seleccionadas para las mediciones in situ se definieron con el objetivo de abarcar todo el espacio y los usos posibles del mismo, siempre que cumplieran con los criterios establecidos en la norma correspondiente.



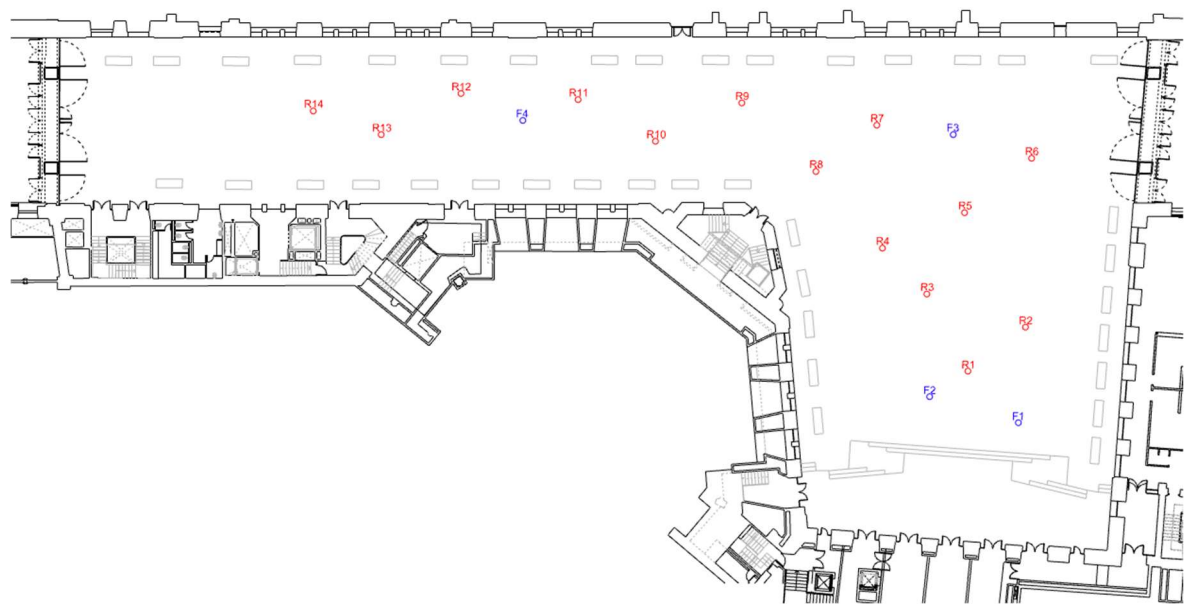
Figura 5.2. Grabadora binaural con dos canales auditivos empleada

Figura 5.2

En este sentido, se procuró lo siguiente:

- Incluir entre tres y cuatro ubicaciones para la fuente sonora, distribuidas en diferentes zonas.
- Seleccionar entre doce y quince puntos de medición, repartidos de forma que se barriera adecuadamente la superficie total del espacio.
- Se aseguró una distancia mínima de 1,00 m entre cada micrófono y cualquier superficie reflectante próxima conforme a lo establecido en la norma ISO 3382. Esta separación garantiza la minimización de la influencia de reflexiones tempranas en las mediciones, asegurando la validez de los parámetros acústicos evaluados.
- Se estableció una separación mínima de 1,5 m entre posiciones de micrófono consecutivas, con el objetivo de evitar el solapamiento espacial de los campos sonoros captados en cada punto. Este criterio permite una correcta representación espacial de los parámetros acústicos y facilita la detección de variaciones en el campo acústico a lo largo del espacio evaluado.
- Se trató de evitar configuraciones simétricas que pudieran amplificar las condiciones de simetría propias del espacio y distorsionar los resultados.

Para registrar la ubicación exacta de las posiciones de emisor y receptor, se utilizó un medidor laser tomando como referencia una esquina del espacio. Se fijó una de las esquinas del espacio central de la galería como origen de coordenadas, lo que permitió un traslado exacto de estos puntos al modelo digital desarrollado posteriormente. Las posiciones definitivas empleadas en la toma de mediciones se recogen en el plano mostrado en el plano dispuesto a continuación.



Plano 5.1

Plano 5.1. Planta con la distribución espacial de los 4 puntos de emisión y 14 de receptor. Las posiciones de emisor se encuentran en azul y se enumeran de F1 a F4. Las posiciones de receptor se encuentran en rojo, son un total de catorce y aparecen nombradas de R1 a R14.

A continuación, se muestran una serie de fotografías de elaboración propia del día de la visita y toma de mediciones. En ellas se muestra el proceso completo de medición paso a paso.



Figura 5.3. Preparación del equipo de medidas previo a estas. Elaboración propia

Figura 5.3



Figura 5.4. Preparación del equipo de medidas previo a estas. Elaboración propia

Figura 5.4



Figura 5.5. Recorrido y análisis del equipo de medición por la galería. Elaboración propia.

Figura 5.5



Figura 5.6

Figura 5.6. Proceso de medición y toma de datos. Deflagración del globo. Elaboración propia.



Figura 5.7

Figura 5.7. Proceso de medición y toma de datos. Medición con grabadora binaural. Elaboración propia

Descripción del estado acústico de la Galería

El análisis de las respuestas impulsivas recogidas durante la toma de mediciones en la Galería de Cristal, procesadas con el software DIRAC, permite obtener los parámetros acústicos que permitirán establecer las condiciones acústicas actuales del recinto.

Se calcularon los siguientes parámetros, definidos en apartados previos: el tiempo de decaimiento inicial (*Early Decay Time*, EDT), el tiempo de reverberación (T_{20}), así como los índices de definición (D_{50}) y claridad (C_{80}), asociados a la inteligibilidad de la palabra y música, respectivamente.

Los resultados se organizan por parámetro acústico para facilitar el análisis de cada variable en función de la posición de las fuentes sonoras durante las mediciones. En el Anexo final se adjuntarán todos los datos y las tablas en detalle de las mediciones realizadas.

Tiempo de reverberación (T₂₀) y Early Decay Time (EDT)

Las figuras CC a CC mostradas a continuación muestran los valores de T₂₀ y EDT para cada una de las cuatro posiciones de fuente en función de la frecuencia. Se ha calculado para cada posición de fuente el valor promedio de las medidas realizadas en todas las posiciones de receptor. Las curvas mostradas en las figuras de 5.8 a 5.11 representan el promedio de las cuatro posiciones de fuente. En ella, se incluye la desviación estándar como método rápido para evaluar las diferencias existentes entre las mediciones en el espacio cuando se varía la posición de emisor o fuente.

A modo de referencia, se ha incluido una línea que indica el umbral superior recomendado para salas de música, establecido en los dos segundos, a pesar de que este valor puede llegar a un máximo de 2,68 segundos como expresa la fórmula de Hignini Arau:

$$T_{opt\ max} = 0,6 \cdot V^{0,1331} = 0,6 \cdot 80.000^{0,1325} = 2,68\ s$$

Las fórmulas de Hignini Arau, establecen un TR óptimo máximo. Se opta por la fórmula de sala de música, introduciendo el dato de 80.000 m³ de volumen de recinto.

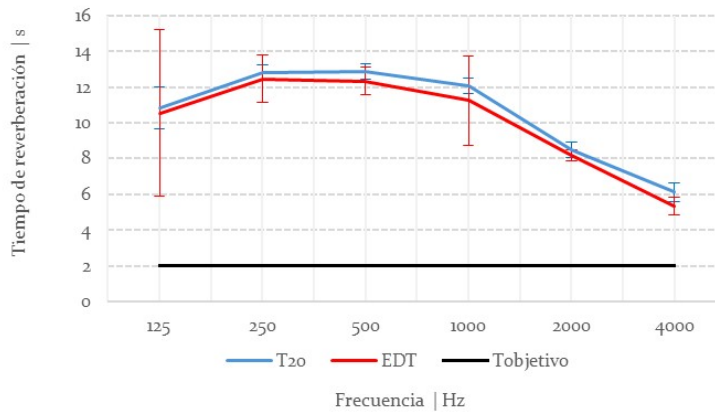


Figura 5.8. Representación gráfica del T₂₀ y EDT correspondiente a la Fuente 1

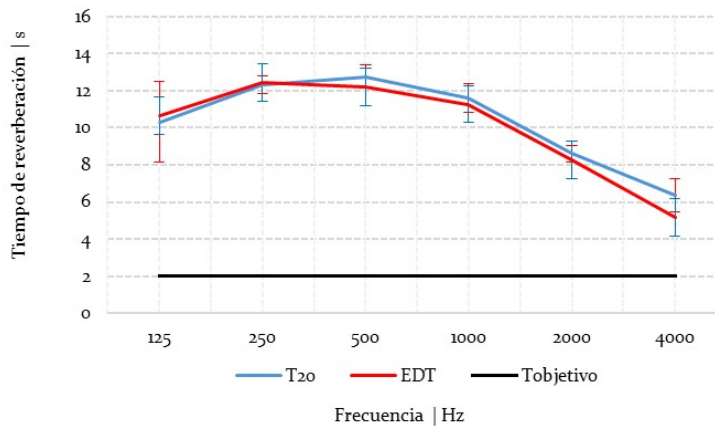


Figura 5.9. Representación gráfica del T₂₀ y EDT correspondiente a la Fuente 2

Figura 5.8

Figura 5.9

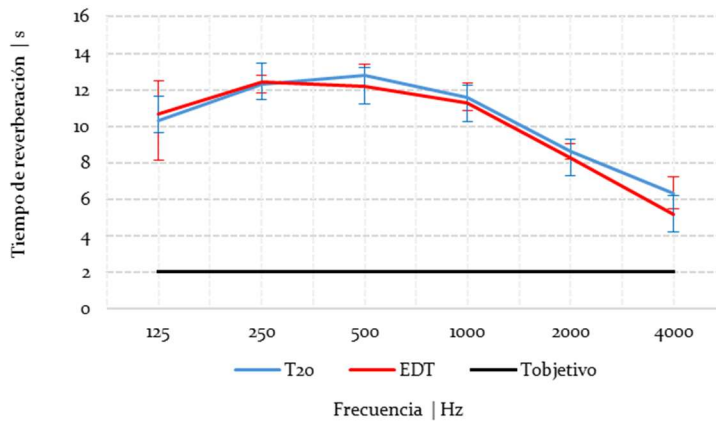


Figura 5.10. Representación gráfica del T₂₀ y EDT correspondiente a la Fuente 3

Figura 5.10

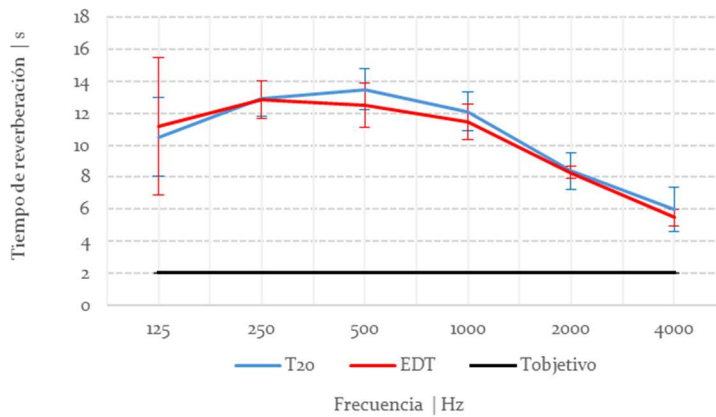


Figura 5.11. Representación gráfica del T₂₀ y EDT correspondiente a la Fuente 4

Figura 5.11

Los resultados, mostrados en las figuras 5.8 a 5.11 , evidencian una prolongación de la energía sonora del espacio en el interior, aspecto que había sido perceptible notablemente durante la visita y, que se traduce en un tiempo de reverberación muy alto. La reverberación se ve favorecida por los materiales reflectantes de la envolvente, especialmente el vidrio de la cubierta, que atenúa poco la energía sonora. Además, el gran volumen del recinto alarga el tiempo entre reflexiones, prolongando la reverberación.

La comparación entre EDT y T₂₀ no muestra divergencias entre ambos parámetros. Las cuatro fuentes presentan una cierta regularidad entre sus curvas. Esta proximidad sugiere que la energía sonora decae de forma homogénea tanto en los primeros instantes como a lo largo de todo el proceso. Esto es característico en recintos donde la absorción, en este caso baja, está bien repartida y no existen zonas de concentraciones de materiales absorbentes o reflectantes.

La figura ultima resume los valores medios de T_{20} por fuente y su promedio global, destacando una heterogeneidad acusada por debajo de los 1000 Hz. En todos los casos, el tiempo de reverberación supera los límites recomendados para una correcta percepción musical y comunicativa, reforzando la necesidad de estrategias de acondicionamiento acústico adaptadas a la polivalencia del espacio.

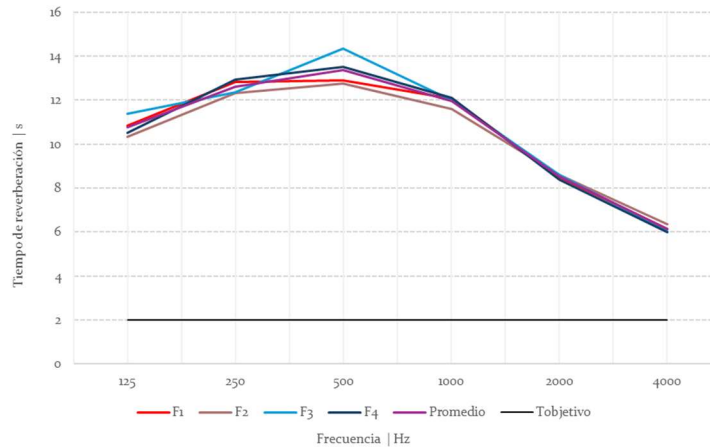


Figura 5.12. Representación gráfica comparativa del T_{20} medido para cada una de las cuatro fuentes

Figura 5.12

Inteligibilidad de la palabra. D_{50}

Se analizó el comportamiento del índice D_{50} , el cual evalúa la claridad con la que se percibe el mensaje oral, que es más difícil de entender. El umbral mínimo recomendado para una comunicación clara se sitúa en 0,5.

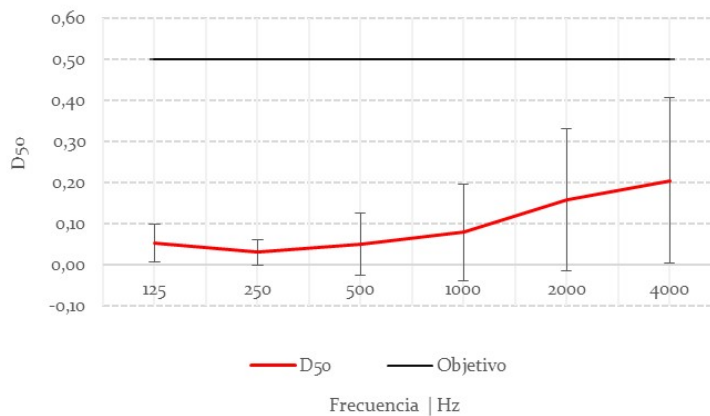


Figura 5.13. Representación gráfica del D_{50} correspondiente a la Fuente 1

Figura 5.13

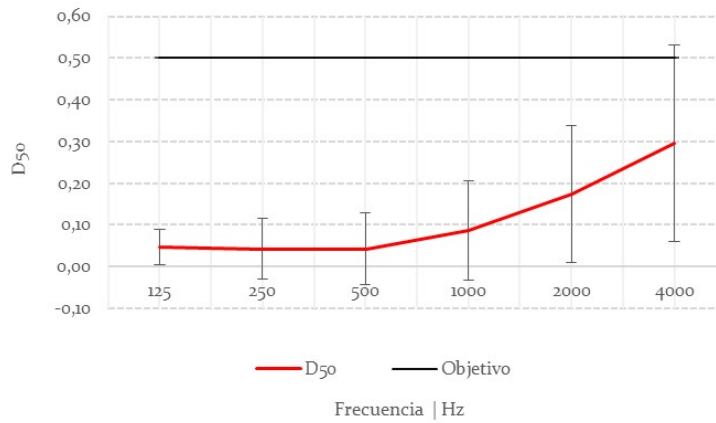


Figura 5.14. Representación gráfica del D_{50} correspondiente a la Fuente 2

Figura 5.14

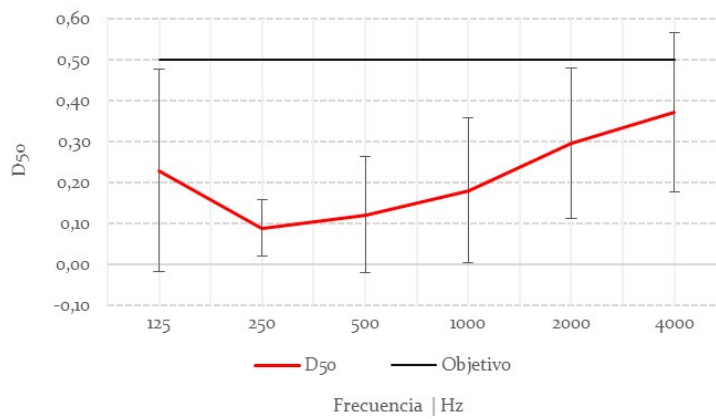


Figura 5.15. Representación gráfica del D_{50} correspondiente a la Fuente 3

Figura 5.15

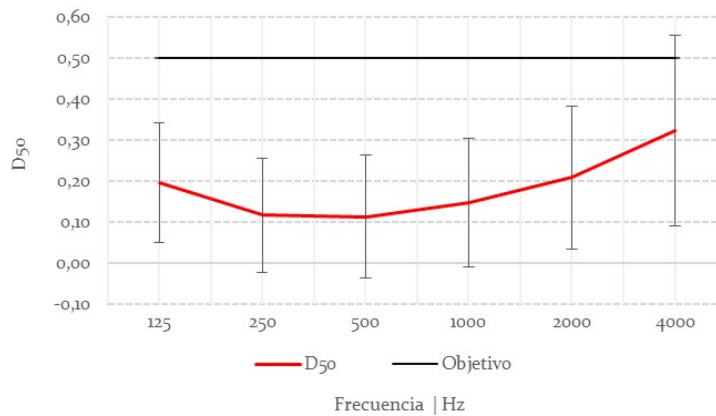


Figura 5.16. Representación gráfica del D_{50} correspondiente a la Fuente 4

Figura 5.16

Las figuras de la 5.13 a 5.16 evidencian que ninguna de las fuentes logra alcanzar este umbral, lo que implica una inteligibilidad deficiente en la totalidad del recinto. Esta limitación es especialmente en los rangos de frecuencia de 125 Hz a 500 Hz, aunque se aprecia una ligera mejora a partir de los 1000 Hz.

La figura que confirma esta tendencia es la figura 5.17 y en ella destacan las fuentes 1 y 2 que son las situadas en el ala lateral, que ofrecen un comportamiento más favorable en términos de inteligibilidad, aunque insuficiente para garantizar una adecuada comprensión del habla. Esta mejora relativa puede atribuirse a la posibilidad de crear, en esa zona concreta, una configuración local más acotada, que presenta condiciones acústicas más favorables que las del espacio en su conjunto.

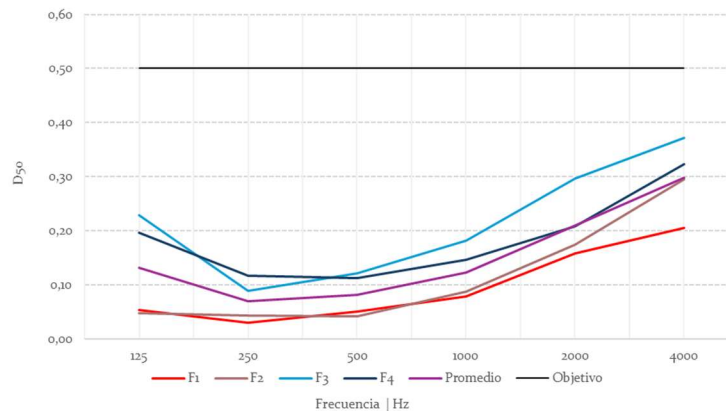


Figura 5.17. Representación gráfica del D_{50} correspondiente a cada una de las cuatro fuentes.

Figura 5.17

Estos resultados corroboran la importancia de abordar el acondicionamiento de la galería si se pretende consolidarla como un espacio polivalente eficaz también en eventos discursivos.

Claridad musical. C_{80}

El parámetro C_{80} fue también calculado y representado para cada fuente sonora en función de la frecuencia. Al igual que con los parámetros anteriores, los valores hacen referencia a valores promedios obtenidos en los puntos de escucha. Las líneas de referencia que delimitan el rango óptimo para la claridad musical, establecido entre 0 dB y -4 dB.

Las siguientes figuras muestran que para ninguna de las posiciones de fuente consideradas en el estudio in situ alcanza valores adecuados, lo que indica un deficiente acondicionamiento, al igual que el resto de los parámetros. Esto también refleja el predominio de reflexiones tardías sobre la energía directa. Esto, mantiene una coherencia con los elevados tiempos de reverberación ya descritos.

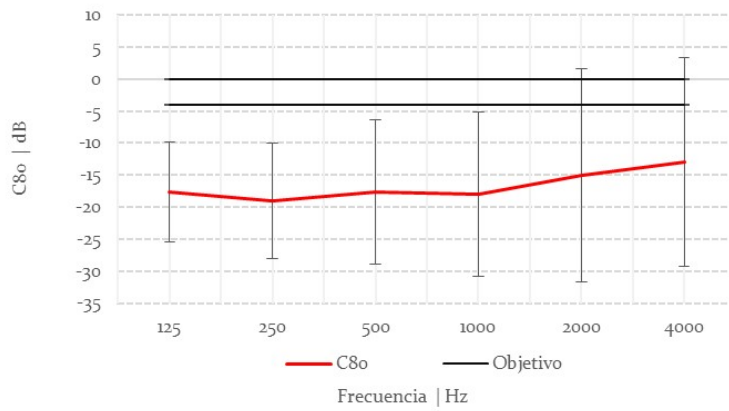


Figura 5.18. Representación gráfica del C_{80} correspondiente a la Fuente 1

Figura 5.18

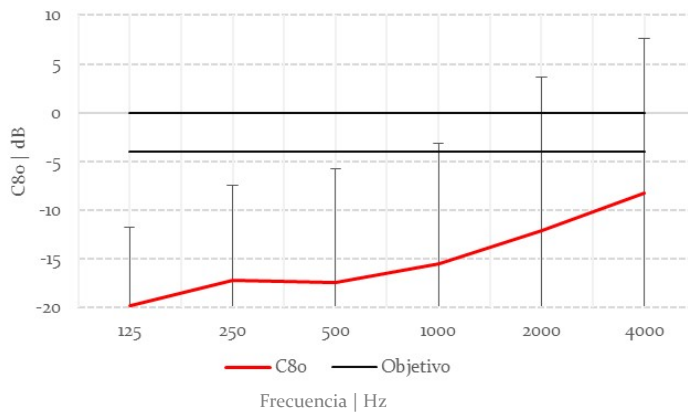


Figura 5.19 Representación gráfica del C_{80} correspondiente a la Fuente 2

Figura 5.19

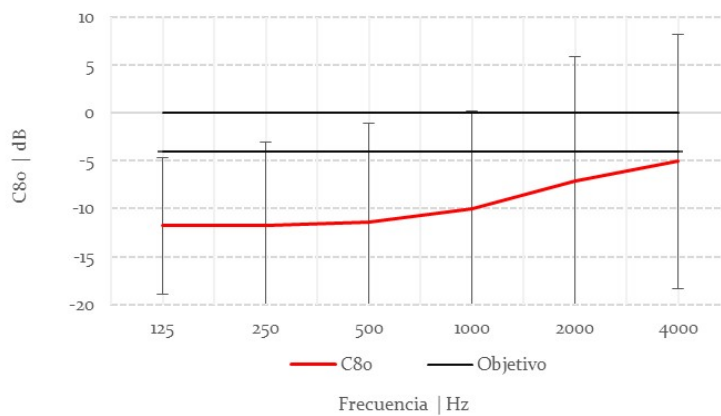


Figura 5.20 Representación gráfica del C_{80} correspondiente a la Fuente 3

Figura 5.20

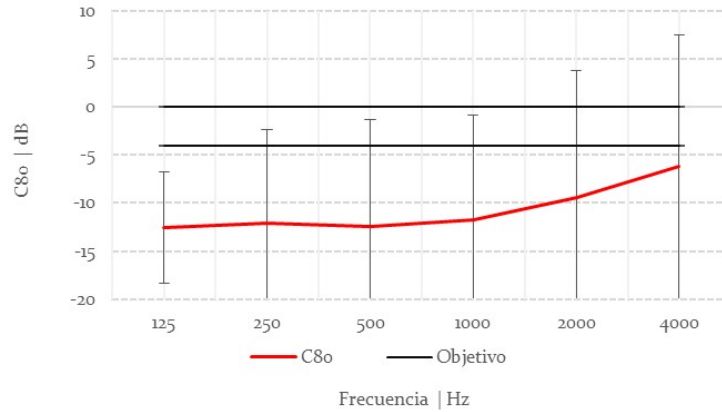


Figura 5.21. Representación gráfica del C_{80} correspondiente a la Fuente 4

Figura 5.21

Al igual que para el resto de los parámetros la figura 5.22, que resume y agrupa las curvas para todas las fuentes, confirma una respuesta acústica diferenciada para las fuentes 1 y 2, de las 3 y 4 situadas en el espacio central y el ala lateral, respectivamente. Las situadas en el ala lateral presentan valores algo más cercanos al ideal, lo cual sugiere una posible idoneidad para la ubicación de fuentes en eventos musicales a pesar de que sus características espaciales no son las óptimas.

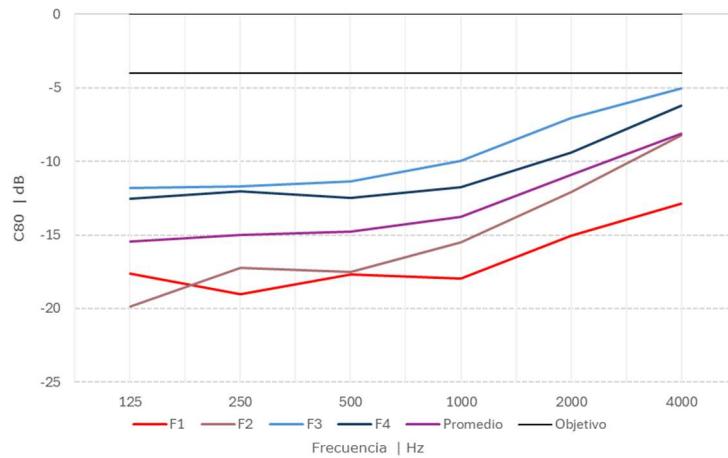


Figura 5.22. Representación gráfica del C_{80} correspondiente a cada una de las cuatro fuentes y el promedio de todas ellas.

Figura 5.22

A continuación, se muestra una tabla resumen con los valores globales de los parámetros del estudio acústico. Junto a ellos, se incluyen los valores recomendados, que podrían fijarse como el objetivo al que llegar con el desarrollo de las propuestas.

Parámetro	Proyecto	Objetivo
T ₂₀ (s)	12,66	entre 2 y 2,5
EDT (s)	11,86	similar al T ₂₀
D ₅₀	0,10	>0,5
C ₈₀ (dB)	-14,27	entre 0 y -4

6. Proceso de modelado y validación 3D

Este capítulo detalla el procedimiento seguido para la elaboración del modelo tridimensional de la Galería de Cristal del Palacio de Cibeles, así como su posterior importación al software de simulación acústica ODEON. Todo ello, posible gracias a la licencia académica proporcionada por el grupo de la ETSAM encargado de la Acústica Arquitectónica.

Asimismo, se expone el proceso de validación del modelo generado, paso indispensable para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos a través de las distintas propuestas de acondicionamiento acústico implementadas durante el desarrollo del trabajo.

6.1. El modelo 3D

El primer paso consistió en la elaboración de un modelo virtual del espacio, necesario para simular el comportamiento acústico. Para ello, se empleó el software de dibujo 2D y modelado 3D, Rhinoceros 7, a partir de la documentación gráfica facilitada por Centro Centro (empresa encargada de la gestión de la Galería) y, complementada con observaciones tomadas in situ. El modelado se centró exclusivamente en el volumen interior de la Galería, omitiendo elementos exteriores como los accesos.

Para garantizar una adecuada simulación acústica de la propagación del sonido en el interior del espacio, el modelo geométrico debe ser sencillo. Se eliminaron todos los detalles con dimensiones inferiores a 0,50 metros, como molduras y anclajes estructurales. Esta decisión responde a consideraciones técnicas ya que para las frecuencias más altas que se analizan en acústica arquitectónica, la longitud de onda es de 0,5 metros; por lo tanto, los elementos de menor tamaño no influyen en la simulación acústica.

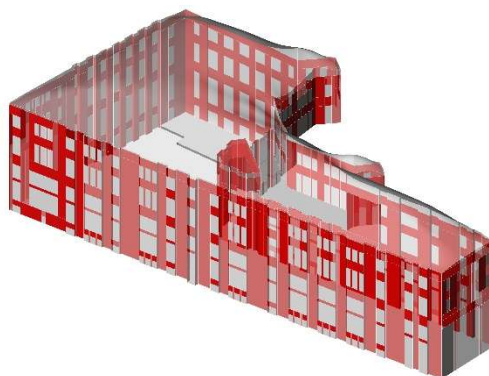


Figura 6.0

Figura 6.0. Axonometría general del modelo 3D, realizado con Rhinoceros.

La geometría se organiza por capas según los materiales que presenta el espacio. Se agrupan todas las superficies con el mismo comportamiento acústico en una misma categoría, asociando a estos el mismo coeficiente de absorción acústica (véase en figura 6.1). Esta clasificación por capas resultó de gran utilidad para la posterior asignación de propiedades materiales en ODEON, optimizando así el proceso de preparación del modelo para la simulación.

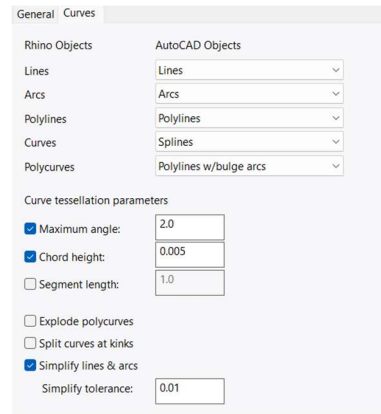
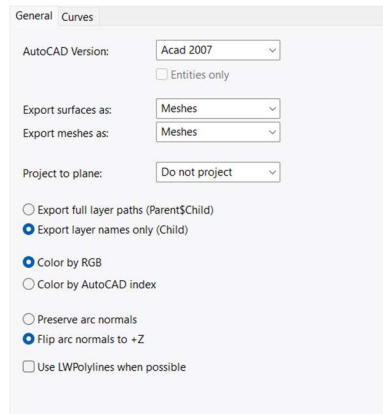
Layer	Material	Linetype	Print Width
VIDRIO		Continuo...	◇ Default
CUBIERTA		Continuo...	◆ Default
OPACO		Continuo...	◆ Default
SUELO		Continuo...	◆ Default
PUERTAS		Continuo...	◇ Default

Figura 6.1. Capas utilizadas en el desarrollo del modelo en Rhinoceros

Figura 6.1

Con el modelo finalizado, se procedió a su exportación en formato .dxf, ya que este es el compatible con el software de ODEON. El formato de Rhinoceros (.3dm) no se reconoce por el software, por lo que resulta clave realizar la conversión.

Para la exportación, se ajustó el sistema de coordenadas del modelo para hacer coincidir su origen con uno de los vértices de la Galería, punto de referencia utilizado durante las mediciones y que permite alinear el modelo digital con la disposición real de fuentes y receptores en el espacio físico (véase plano 5.1).



Figuras 6.2 y 6.3 Sistema y ajustes de exportación del modelo

Figura 6.2

Figura 6.3

La importación se realizó desde el propio ODEON utilizando la opción “Import from file”. Tras seleccionar el archivo en formato .dxf previamente generado, el programa solicita una carpeta de destino en la que almacenar los archivos de proyecto .par y otros datos necesarios para la simulación.

Dado que la geometría de la Galería se caracteriza por una cubierta de forma curva, se seleccionó la opción de importación “Small

tolerancias”, que permite cerrar con mayor precisión los volúmenes complejos y evita la pérdida de energía sonora durante la simulación. Esta configuración es especialmente recomendable cuando se trabaja con geometrías no planas, ya que el software debe aproximar dichas superficies mediante mallas poligonales, y una tolerancia más estricta reduce el riesgo de errores en el trazado de rayos acústicos.

Además, se aseguró que se conservaran las unidades originales del modelo (metros), así como el origen de coordenadas previamente definido, para garantizar la coherencia entre la información geométrica y acústica.

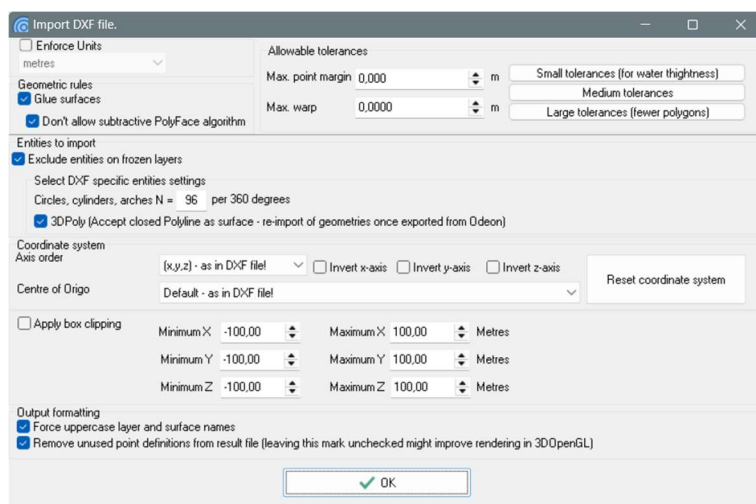


Figura 6.4

Figura 6.4. Sistema y ajustes de importación del modelo en ODEON

Una vez que el modelo ha sido correctamente importado en ODEON, se procede a verificar que el origen de coordenadas se haya situado adecuadamente en el punto de referencia establecido, y que la geometría del modelo esté completamente cerrada. Esta comprobación es fundamental, ya que cualquier discontinuidad en la malla tridimensional puede generar pérdidas de rayos trazados durante la simulación, que invaliden los resultados.

Para ello, el software dispone del comando “3D Billard”, que permite realizar una simulación gráfica preliminar del comportamiento interior del sonido. Esta función genera una serie de trayectorias aleatorias de rayos acústicos representados mediante esferas en movimiento, que simulan las reflexiones de los rayos sobre las superficies del modelo.

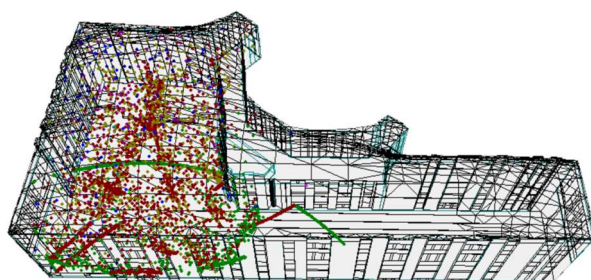


Figura 6.5

Figura 6.5. Visualización del funcionamiento del comando 3D Billard en ODEON.

Si durante esta simulación las esferas se mantienen contenidas dentro del volumen y no escapan del modelo, se considera que este se encuentra correctamente cerrado y, por tanto, está listo para el desarrollo de simulaciones acústicas fiables

6.2. Asignación de materiales

Una vez finalizada la importación del modelo geométrico en ODEON, el siguiente paso fundamental consiste en asignar los coeficientes de absorción acústica a las superficies del espacio. Este proceso se basa en seleccionar, dentro de la biblioteca de materiales incorporada en el software, aquellos que más se asemejan a los materiales reales que configuran la Galería de Cristal.

Los materiales presentan comportamientos acústicos distintos frente a la incidencia del sonido, y dicha respuesta varía en función de la frecuencia. Por este motivo, los materiales se caracterizan mediante sus coeficientes de absorción acústica por bandas de octava, que describen numéricamente la proporción de energía sonora absorbida. Los valores del coeficiente de absorción en función de la frecuencia del material, comprendidos entre 0 (reflexión total) y 1 (absorción total), permiten simular con precisión el comportamiento acústico de su superficie.

Figura 6.6. Listado de superficies del modelo y biblioteca de materiales de ODEON

Number	Material	Scatter	Transp.	Type	Surface name	Layer	Area (m²)
4277	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	7.79
4278	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	8.68
4279	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	57.06
4280	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	2.83
4281	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	9.49
4282	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	57.06
4283	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	8.21
4284	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	5.97
4285	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	3.47
4286	4041	0.010	0.000	Normal	CRACI0	CRACI0	3.63
4287	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	4.82
4288	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	4.72
4289	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.73
4290	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.78
4291	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.78
4292	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.78
4293	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.78
4294	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.41
4295	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	3.00
4296	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	3.41
4297	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	2.48
4298	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.43
4299	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.44
4300	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.44
4301	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	5.44
4302	30	0.010	0.000	Normal	PUERTAS	PUERTAS	3.03

Figura 6.6

Dichos coeficientes se obtienen mediante ensayos normalizados. En este sentido, la biblioteca de ODEON solo incluye materiales cuya caracterización acústica ha sido previamente validada, lo que garantiza una alta fiabilidad.

Retomando la estructura por capas utilizada en la elaboración del modelo 3D, se identificaron cuatro tipos de materiales presentes en la Galería de Cristal. En la tabla CC se detallan los materiales asignados a cada capa, así como sus respectivos coeficientes de absorción.

Una vez completada la asignación de materiales, se procedió a ejecutar la herramienta “Quick Estimate”, que permite obtener de forma inmediata una estimación preliminar del tiempo de reverberación del espacio en función de la frecuencia. El gráfico generado (figura 6.7) proporciona una visión general del comportamiento acústico del modelo, sirviendo como primera aproximación a los valores reales medidos.

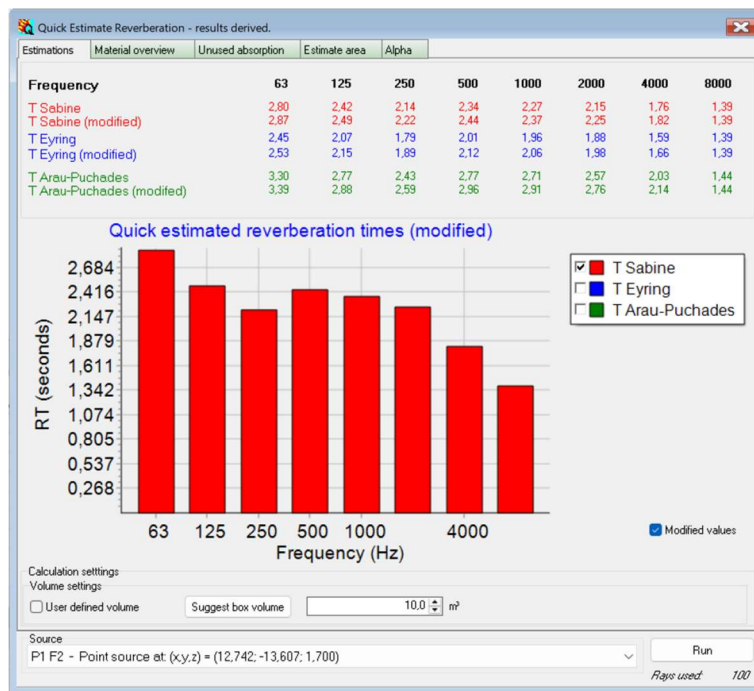


Figura 6.7. Resultados del comando Quick Estimate de ODEON

Figura 6.7

6.3. Validación del modelo

La validación del modelo tiene como objetivo comprobar que el comportamiento acústico simulado reproduce con fidelidad el comportamiento real del espacio. Para ello, se replican en el modelo digital las mismas condiciones empleadas durante las mediciones in situ, de modo que los resultados puedan ser comparados y analizados de forma precisa.

Ubicación Fuentes-Receptores

Como ya se ha introducido en capítulos previos, en las mediciones de dispusieron cuatro posiciones de fuente sonora. Para mantener la coherencia entre el modelo digital y el recinto real, estas mismas posiciones deben configurarse en ODEON utilizando la herramienta "Source-Receiver List". A través de esta función, se selecciona la opción de fuente puntual, se introducen manualmente las coordenadas de cada posición y se define una directividad omnidireccional con una ganancia establecida en 60 dB.

Figura 6.8. Herramienta de colocación de fuentes de emisión

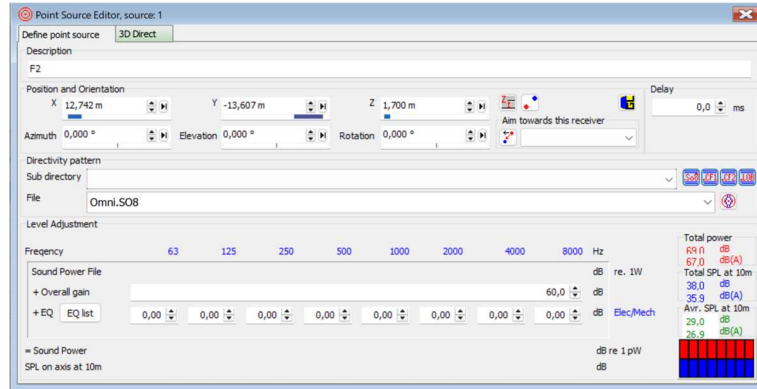


Figura 6.8

En esa misma herramienta se incorporan las catorce posiciones de receptor utilizadas durante las mediciones reales. Al igual que en el caso anterior, se introducen las coordenadas previamente definidas y se comprueba que su distribución se corresponda con la configuración espacial del modelo tridimensional.

Figura 6.9. Herramienta de colocación de receptores

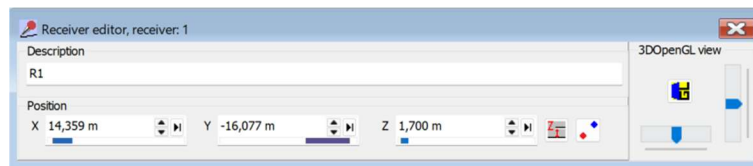


Figura 6.9

Una vez insertadas todas las posiciones, ODEON genera una visualización de las ubicaciones de emisores y receptores. Con ella, se facilita la revisión previa a la simulación.

Figura 6.10. Vista global de las posiciones de fuentes (rojo) y receptores (azul) en el modelo

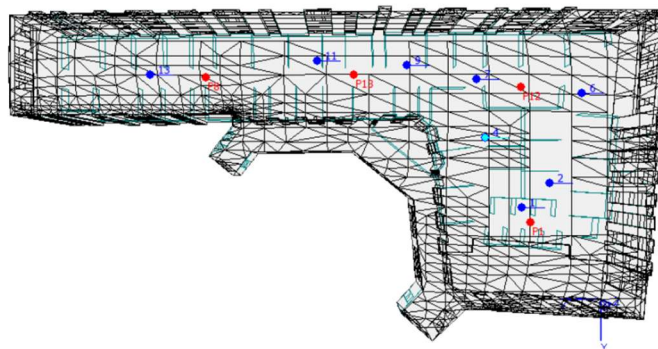


Figura 6.10

Configuración de la simulación y validación

Con las posiciones de emisor y receptor ubicados correctamente, se procede a la configuración del entorno de simulación. Para ello, se utiliza la herramienta “Room Setup”, que permite establecer el nivel de precisión con el que el programa llevará a cabo la simulación. En este caso, se selecciona el modo “Engineering”, ya que proporciona un equilibrio óptimo entre el rigor y el tiempo requerido para el proceso de simulación.

Dentro de la misma interfaz se define también la duración de la respuesta impulsiva simulada, en este caso se fija en 10000 ms teniendo en cuenta tanto los valores obtenidos en las mediciones reales como la estimación inicial del tiempo de reverberación realizada mediante el comando “Quick Estimate”.

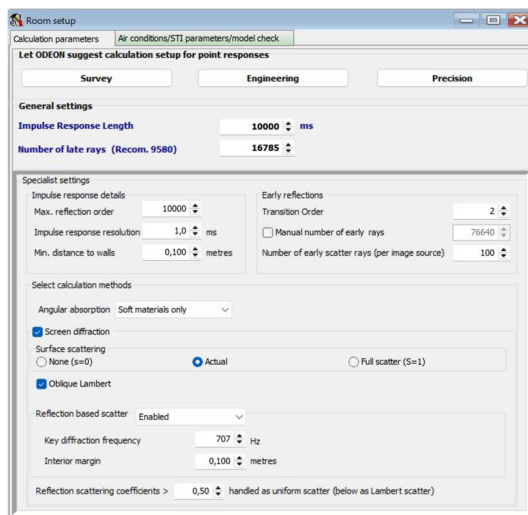


Figura 6.11

Figura 6.11. Vista interna del comando Room Setup de ODEON

Para ejecutar la simulación, se crean múltiples tareas de análisis, con la herramienta “Multi Jobs”, que combina cada posición de fuente con todas las posiciones de receptor. En este caso, se programan cuatro trabajos independientes, cada uno asociado a cada fuente, utilizando la función “Job List”. Una vez definidos, se ejecutan en bloque mediante el comando “Run All Jobs”.

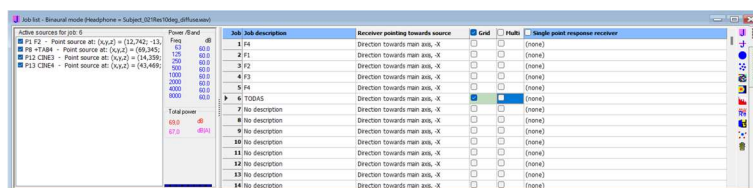


Figura 6.12

Figura 6.12. Vista del comando Jobs de ODEON. El trabajo marcado en verde indica que ya ha sido calculado, en este caso “Grid” indica que se ha tomado la superficie del plano del suelo para hacer el cálculo

Finalizada la simulación, se procede a importar las respuestas impulsivas registradas durante las mediciones in situ, para poder realizar la comparación. Este paso se realiza mediante la herramienta “Load Impulse Response”, que permite vincular cada archivo de grabación real con la fuente y receptor correspondientes en ODEON. A través del comando “Add Measured Parameters to Multi Point Job and Close”, se asocia cada medición a su par virtual.

Una vez incorporados todos los datos reales, el programa permite visualizar de forma gráfica la comparación entre valores simulados y medidos mediante la opción “View Multi Point Response”. Esta comparación se realiza para cada combinación fuente-receptor, representando conjuntamente los datos medidos y simulados para facilitar una comparación inmediata. Los valores simulados se indican con cuadrados rojos, mientras que los valores medidos se muestran con cruces azules.

El modelo se considera válido cuando la diferencia entre los resultados obtenidos en la simulación y los datos reales es inferior al 15%. En este trabajo los parámetros tomados como referencia son EDT, T₂₀, D₅₀ y C₈₀, evaluados por bandas de octava y para cada una de las posiciones de emisor y receptor. Si no se cumplen los criterios de validación, se ajustan los coeficientes de absorción asignados a los materiales del modelo y se repite el proceso hasta alcanzar un grado de coincidencia satisfactorio.

En las figuras siguientes que se muestran a continuación (figuras 6.13 a 6.18), para una frecuencia de 1000 Hz, la comparación entre los valores medidos y simulados de EDT y T₂₀ en cada posición de fuente y en las 14 posiciones de receptor.

Figuras 6.13. y 6.14
Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación (rojo) y las medidas in situ (azul) para la Fuente 1.

Se representan el EDT y T₂₀ en la frecuencia de 1000 Hz.

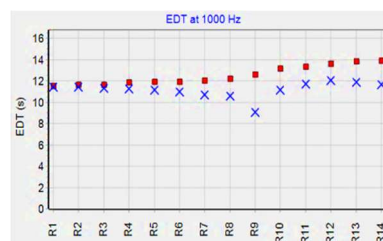


Figura 6.13

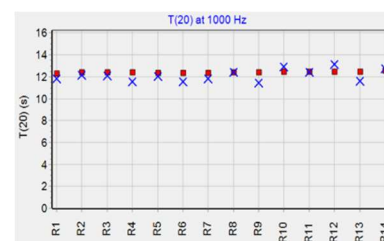


Figura 6.14

Figuras 6.15. y 6.16
Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación (rojo) y las medidas in situ (azul) para la Fuente 2.

Se representan el EDT y T₂₀ en la frecuencia de 1000 Hz.

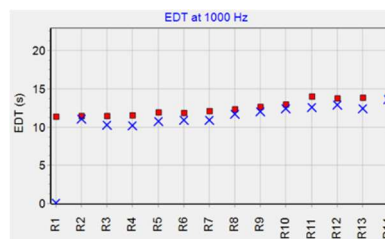


Figura 6.15

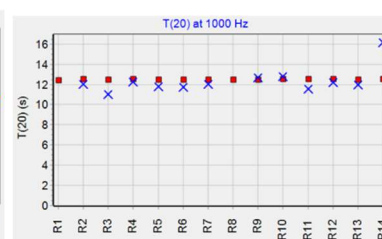


Figura 6.16

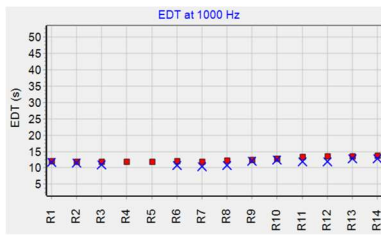


Figura 6.17

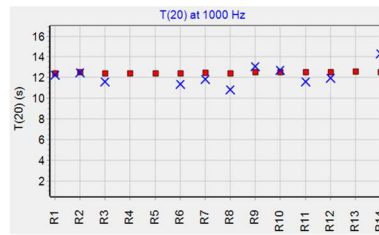


Figura 6.18

Figuras 6.17. y 6.18. Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación (rojo) y las medidas in situ (azul) para la Fuente 3.

Se representan el EDT y T₂₀ en la frecuencia de 1000 Hz.

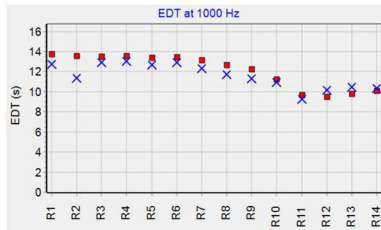


Figura 6.19

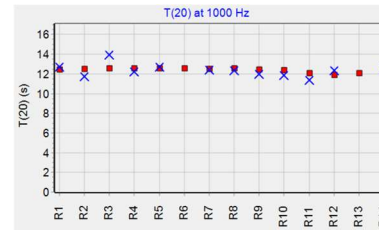


Figura 6.20

Figuras 6.19. y 6.20. Comparación entre los valores obtenidos mediante simulación (rojo) y las medidas in situ (azul) para la Fuente 4.

Se representan el EDT y T₂₀ en la frecuencia de 1000 Hz.

La alta similitud observada entre la gran mayoría de todos los datos medidos y simulados en la Galería de Cristal garantiza un buen grado de correlación entre el espacio real y el modelo virtual, por lo que este último puede considerarse validado. A partir de este punto, cualquier modificación que se introduzca en el espacio y se simule acústicamente reflejará de manera fiable lo que sucedería si dicho cambio se realizara en el espacio real.

7. Estrategias de acondicionamiento acústico

Tras un análisis detallado de los parámetros acústicos de la Galería de Cristal, los resultados evidencian que el espacio no está acondicionado para albergar eventos sin antes modificar su acústica actual.

Con este diagnóstico como punto de partida, se elaboran unas propuestas de intervención. Estas tienen como objetivo dotar al espacio de mayor funcionalidad, para que los eventos que se celebran puedan hacerlo con unas condiciones acústicas adecuadas.

Se han planteado tres estrategias de intervención que abordan la mejora acústica desde diferentes enfoques. Estas propuestas consideran la disposición y el uso actual del espacio, y también exploran nuevas formas de intervención material y conceptual:

- La primera, tiene como punto de partida la disposición actual de los eventos que se celebran allí. Con la base espacial de dichos eventos, se procede a intervenir en la materialidad de los elementos constructivos empleados. Para ello, se opta por un sistema de paneles acústicos absorbentes que sirven como material alternativo al empleado, o bien, como añadido sobre los ya utilizados.
- En la segunda de las propuestas, se hace una reinterpretación de estos eventos, teniendo en cuenta el funcionamiento acústico en el paso de diseño previo, es decir, la disposición espacial de estos eventos se diseña en primera instancia siguiendo reglas que pueden mejorar la acústica de estos. Para ello, se adopta un sistema flexible de pilares y telas, que permita ajustar la cantidad y ubicación de los materiales sin modificar permanentemente los valores arquitectónicos del espacio. que serán utilizados para establecer las nuevas configuraciones.
- La tercera y última estrategia, se presenta como la más rotunda. No se limita solo a resolver la problemática acústica, sino que propone una reinterpretación global de la Galería, basada en una estrategia de intervención textil inspirada en Christo y Jeanne-Claude. Esta solución transforma el perímetro interior en una doble piel textil, que convierte el acondicionamiento del espacio en un gesto arquitectónico, teniendo en cuenta luz, escala e historia del edificio.

Las estrategias se expondrán en detalle en el siguiente apartado.

Las propuestas incluyen un análisis detallado del impacto acústico de cada intervención, simulada mediante el comando “Grid” de ODEON, que permite realizar un mapeo 2D acústico. Estos mapas son una representación visual, por medio de una escala cromática, del rango de valores para cada parámetro acústico en cada punto de la planta de la Galería. Con ello, se evalúa de forma precisa y gráfica la distribución del sonido en el espacio, lo que permite determinar qué áreas funcionan mejor y peor acústicamente.

Para establecer ese mapeo, se define una malla de 1x1 metro en la superficie del suelo en el modelo, para tener una imagen en detalle de los parámetros acústicos en todas las zonas del espacio. Se estudiarán el Early Decay Time (EDT), Tiempo de reverberación a 20 dB (T20), y dependiendo del evento Definición de la palabra (D50) y Claridad musical (C80).

El enfoque adoptado, no busca una solución única y definitiva, sino un enfoque que permita optimizar el comportamiento acústico de la Galería según el tipo de evento, sin dejar de lado su valor patrimonial. En definitiva, el objetivo es demostrar que es posible combinar la conservación de la singularidad de la Galería de Cristal con una mejora del comportamiento acústico mediante soluciones prácticas, reversibles, y sobre todo, efectivas

7.1. Selección de materiales

En el desarrollo de las propuestas de acondicionamiento acústico para la Galería de Cristal, se ha trabajado con una serie de elementos nuevos. Estos elementos se han seleccionado no solo por su impacto acústico, sino también por su compatibilidad con el valor patrimonial de la Galería. Las estrategias diseñadas se reducen a cinco nuevos elementos: los paneles absorbentes, los textiles acústicos, el público, la moqueta y el escenario.

Paneles absorbentes:

Se ha considerado añadir paneles absorbentes acústicos, con valores altos del coeficiente de absorción, en los eventos que se celebran en la Galería para mejorar su comportamiento acústico sin cambiar ni disminuir su valor patrimonial. Entre las opciones disponibles se ha elegido el sistema Ecophon Akusto TM Wall C, un panel diseñado para su instalación tanto vertical como horizontal.

Desde el respeto del valor patrimonial, su acabado texturizado y su sistema de encaje modular, hace que este tipo de paneles sean ideales en aplicaciones reversibles. Estos paneles pueden funcionar adheridos a otras superficies, pero en la Galería se disponen de forma aislada y autoportante.



Figura 7.1

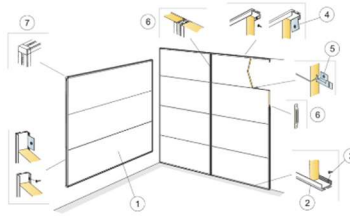


Figura 7.2

Figura 7.1. Imagen del estado final del panel adherido sobre una pared

Figura 7.2. Sistema de montaje de paneles para que sean autoportantes

Mat. 3: Ecophon Akusto™ Wall C Extra Bass								
63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	
0,50000	0,65000	1,00000	0,95000	1,00000	1,00000	0,95000	0,10000	

Figura 7.3

Figura 7.3. Coeficientes de absorción por bandas de octava de los paneles de Ecophon

Textiles:

En el análisis acústico de la Galería, se ha observado una gran reverberación debido a superficies en su mayoría reflectantes. Se sugiere utilizar textiles, por su facilidad de montaje y su compatibilidad visual con la arquitectura interior del espacio, sin comprometer el valor patrimonial.

El tejido por el que se ha optado es Showtex, un tejido microperforado y translucido Acoustic Sheer CS light con gran capacidad absorbente. La ligereza de su aspecto permite preservar la visibilidad de la Galería.



Figura 7.4

f(Hz)	α_s
100	0.05
125	0.06
160	0.13
200	0.31
250	0.33
315	0.54
400	0.60
500	0.63
630	0.64
800	0.67
1000	0.67
1250	0.65
1600	0.66
2000	0.68
2500	0.70
3150	0.71
4000	0.74
5000	0.75
ISO 11654	
$\alpha_w = 0.65$	

Figura 7.4. Imagen de una muestra del tejido

Figura 7.5. Imagen de la aplicación del tejido microperforado en un espacio diseñado por María del Pilar Nuzzolese

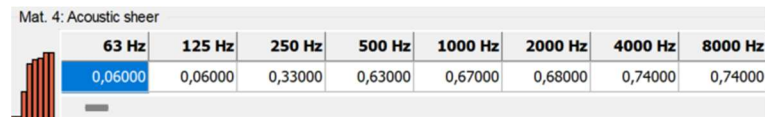


Figura 7.5

Figura 7.6

Figura 7.6 Coeficientes de absorción por bandas de tercio de octava del tejido

Figura 7.7. Coeficientes de absorción por bandas de octava de los paneles de Showtex en ODEON

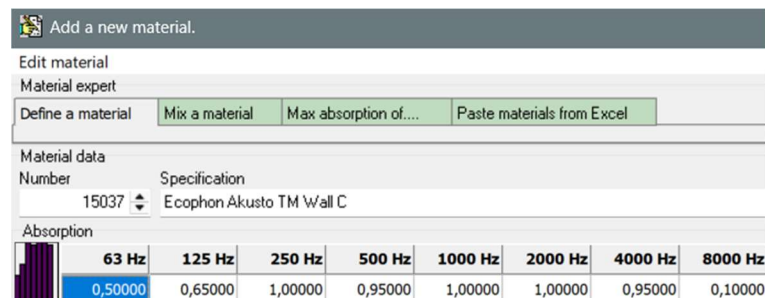


	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,06000	0,06000	0,33000	0,63000	0,67000	0,68000	0,74000	0,74000	

Figura 7.7

Tanto los paneles de Ecophon como el textil de Showtex se han introducido manualmente en el programa de simulación ODEON mediante el comando “Add Material”, incorporando sus coeficientes de absorción por bandas de frecuencia según lo especificado en las fichas técnicas de cada fabricante. La asignación precisa de estos materiales permite simular con mayor exactitud el comportamiento acústico del espacio al incorporar las propuestas y evaluar su respuesta en los distintos eventos previstos

Figura 7.8. Importación de un nuevo material con el comando “Add Material”



Material data	
Number	Specification
15037	Ecophon Akusto TM Wall C

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
0,50000	0,65000	1,00000	0,95000	1,00000	1,00000	0,95000	0,10000	

Figura 7.8

Público:

La presencia del público se simula en ODEON asignando a la zona de audiencia un material cuyas propiedades acústicas replican el comportamiento del público real. Esta superficie simula el efecto acústico de un gran número de personas y su capacidad absorbente, especialmente en las bandas medias y altas.

Siguiendo las recomendaciones para los eventos que allí se celebran, se opta por una densidad de una persona por metro cuadrado. Dicho material y sus correspondientes coeficientes de absorción se eligen de la biblioteca de materiales de ODEON y permiten simular con precisión cómo afecta el público a la reducción del tiempo de reverberación.

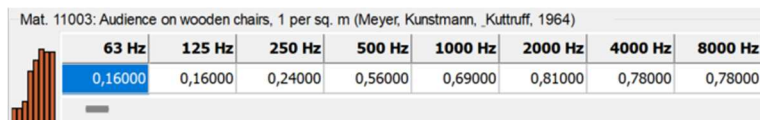


Figura 7.9

Figura 7.9. Coeficientes de absorción por bandas de octava del público previsto

Moqueta:

En algunos de los eventos, como el cine, se opta por añadir moqueta en la zona en la que se encuentra el público como estrategia complementaria de bajo impacto visual. La moqueta funciona como absorbente eficiente a frecuencias medias y altas, además de bloque las reflexiones del plano del suelo.

Se toma el material de la biblioteca de materiales de ODEON, con sus correspondientes coeficientes de absorción en bandas de octava.

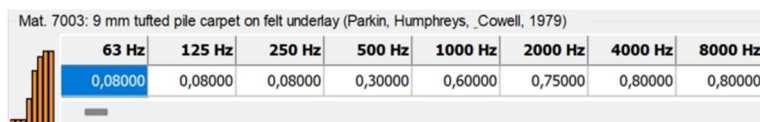


Figura 7.10

Figura 7.10. Coeficientes de absorción por bandas de octava de la moqueta

Escenario:

Con el fin de optimizar la visibilidad de los asistentes hacia los oradores y galardonados durante las ceremonias, se incorpora al modelo digital de ODEON un escenario elevado sobre el nivel del suelo. Esta plataforma se ha modelado como un volumen de madera situado en uno de los extremos del espacio central de la Galería, de acuerdo con la configuración del evento.

A nivel acústico, se ha escogido un material que se asemeja al real, de la biblioteca de ODEON.

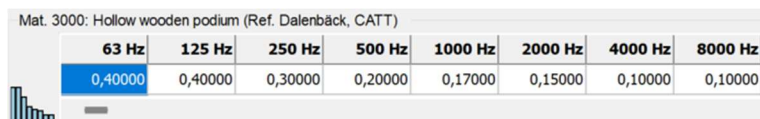


Figura 7.11

Figura 7.11. Coeficientes de absorción por bandas de octava del escenario

7.2. Desarrollo de estrategias

Como ya se ha introducido al inicio de este apartado, se desarrollan tres estrategias diferentes para eventos que se celebran habitualmente en la Galería de Cristal. Para validar las diferentes estrategias, se tiene en cuenta todo el estudio acústico previo, tanto la información recogida el día de las mediciones in situ, como la posterior simulación en el software de ODEON. Además, se cuenta con documentación de la disposición de los tres eventos en formato .pdf, facilitada por la empresa que gestiona dicho espacio.

En el siguiente esquema se muestra el proceso de desarrollo de las estrategias para los tres eventos seleccionados, ordenadas de menor a mayor nivel de intervención.

-ART MADRID -CINE DE VERANO -CÓCTEL AUDI

1. *Sistema actual*
2. *Misma disposición + Paneles fonoabsorbentes*
3. *Reinterpretación del evento + Sistema telas y pilares*
4. *Una nueva Galería para eventos*

A continuación, este esquema será desarrollado de forma detallada indicando el funcionamiento y sistema utilizado para cada estrategia, es decir, su disposición, materiales y cambios en los parámetros acústicos.

ART MADRID

1. *Sistema actual*

Art Madrid es una de las principales ferias de arte contemporáneo celebradas en España. Cada año, la Galería de Cristal, se convierte en sede de esta feria, en la que el espacio diáfano que lo caracteriza se transforma en un recorrido con expositores de distintas galerías y artistas.

El espacio se convierte en una retícula de stands modulares, en la que su configuración, crea pasillos y núcleos de mayor superficie. Las particiones se realizan mediante tabiques autoportantes, que permiten una instalación y desmontaje rápido y flexible. Desde el punto de vista acústico, el mobiliario y tabiquería del evento, no presenta ningún material absorbente acústico.

Con el objetivo de visualizar y cuantificar el funcionamiento de cada parámetro, se realizan unos “Grids”, que son representaciones gráficas o mapas de color que muestran, de manera visual, los valores de los parámetros acústicos sobre la superficie del espacio. En este primer caso, se quiere establecer el punto de partida de la acústica de esta exposición de arte. Para ello, se introduce la tabiquería, a la que se asocia un material, en este caso pladur. Esta tabla muestra el resumen del punto de partida de ART MADRID, que incluye la superficie absorbente, disposición del evento y los parámetros acústicos.



Figura 7.12.

Figura 7.12. Imagen panorámica de la feria Art Madrid 2022, donde se recrea un espacio con las de 50 galerías expositivas

EVENTO		ART MADRID
SISTEMA ACTUAL	Superficie Absorbente (m ²)	-
		Paneles absorbentes
		Textil
		-
		Disposición
		Actual
Parámetros acústicos	EDT (s)	11,6
	T ₂₀ (s)	10,86
	D ₅₀	0,04
	C ₈₀ (dB)	-39,2

Tabla 7.1

Tabla 7.1. Tabla resumen del evento ART MADRID en su estado actual

A continuación, se presentan las gráficas Grid obtenidas para los cuatro parámetros acústicos fundamentales: EDT, T₂₀, C₈₀ y D₅₀. De cada una de ellas se ha extraído el valor promedio en el recinto, y se indica también entre paréntesis el rango de valores que alcanzan estos parámetros en el espacio de la Galería. Las condiciones acústicas menos favorables se localizan siempre en el ala lateral estrecha, probablemente debido a la mayor proximidad entre las dos fachadas con materiales fundamentalmente reflectantes.

- EDT es de 11,60 s (entre 1,16 s y 14,39 s)
- T_{20} es de 10,86 s (entre 9,63 s y 17,37 s)
- D_{50} es de 0,04 (valores entre 0 y 0,83)
- C_{80} es de -39,20 dB

Figura 7.13. Mapeo del EDT para el evento Art Madrid en su estado actual

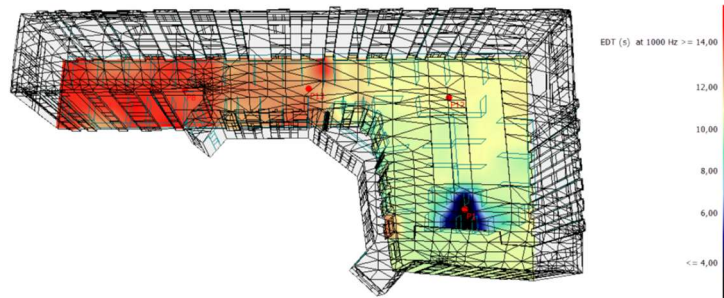


Figura 7.13

Figura 7.14. Mapeo del T_{20} para el evento Art Madrid en su estado actual

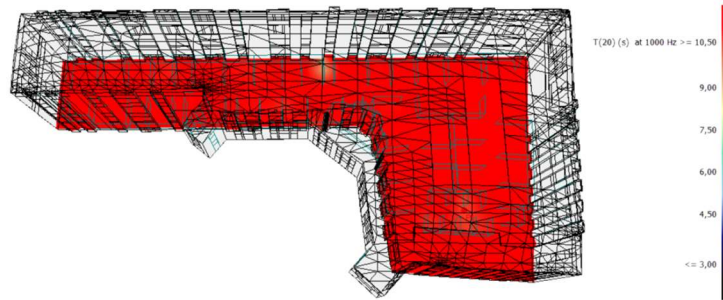


Figura 7.14

Figura 7.14. Mapeo del D_{50} para el evento Art Madrid en su estado actual

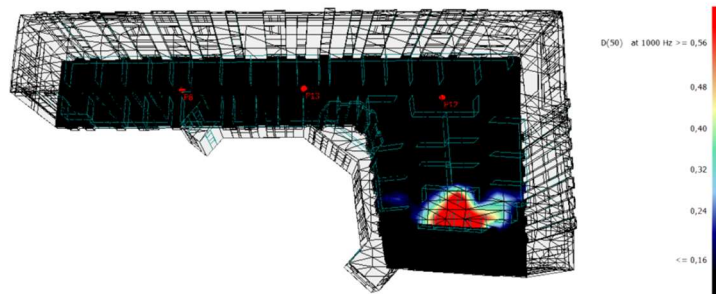


Figura 7.15

Figura 7.16. Mapeo del C_{80} para el evento Art Madrid en su estado actual

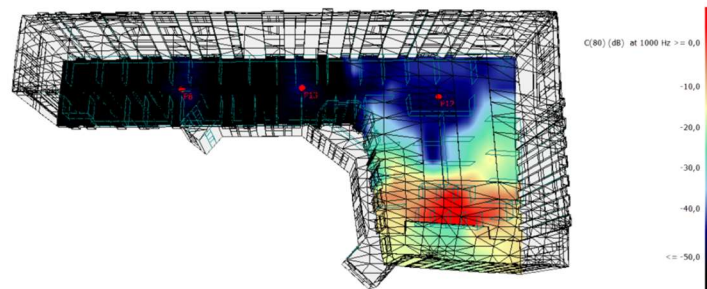
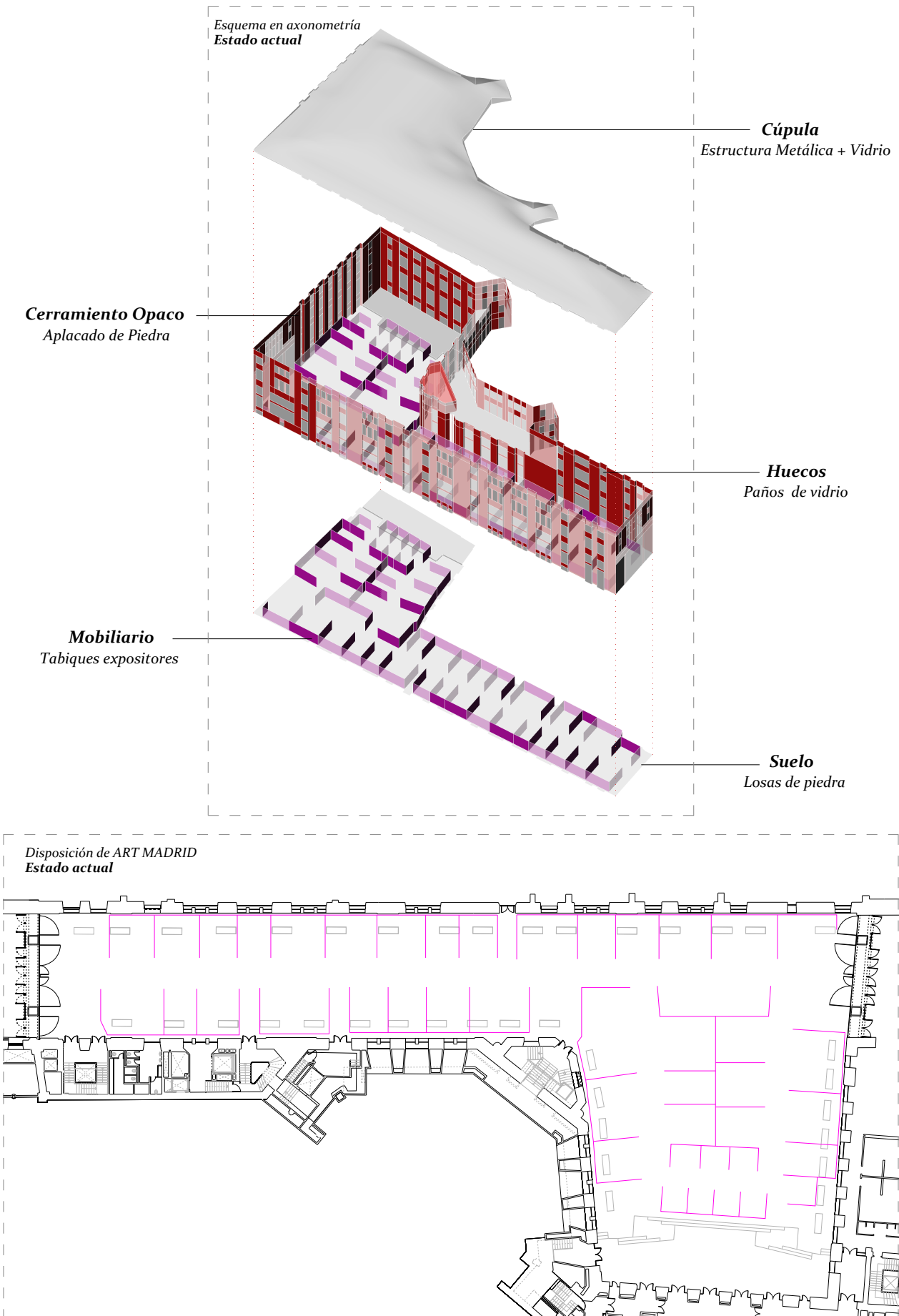


Figura 7.16



ART MADRID*2. Misma disposición + Paneles absorbentes*

La arquitectura interior de la Galería exige soluciones que respeten su estética, y que dialoguen con su valor patrimonial y visual. Esto, junto a lo expuesto en el apartado previo respecto a la reflectividad de las superficies de la tabiquería, plantea una posible solución que se puede adoptar de modo inmediato.

Esta propuesta plantea sustituir la tabiquería convencional por paneles acústicos verticales Ecophon Akusto Wall C (cuyas propiedades acústicas se describen en el apartado 7.1). El sistema, al igual que el original, es de montaje modular lo que facilita su instalación y permite que la intervención sea efímera. Además, la modulación y formalidad de estos paneles permite su integración en el espacio sin competir con la envolvente.

El catálogo proporcionado por la empresa Ecophon, muestra una variedad de acabados y colores, y permite personalizarlos mediante impresión o grabado de dibujos, lo que los convierte en elementos con una gran capacidad de integración en el diseño de la feria.

Una vez establecido el punto de partida de los parámetros acústicos de estudio para este evento, se muestran cómo la implementación de esta estrategia contribuye a mejorar la acústica en el evento.

	<i>EVENTO</i>	<i>ART MADRID</i>	
SISTEMA ACTUAL + PANELES ABSORBENTES	<i>Superficie Absorbente (m2)</i>	<i>Paneles absorbentes</i> 1874	
		<i>Textil</i> -	
		<i>Moqueta</i> -	
	<i>Disposición</i>	<i>Actual</i>	
	<i>Parámetros acústicos</i>	<i>EDT (s)</i>	4,25
		<i>T20 (s)</i>	3,86
		<i>D50</i>	0,06
		<i>C80 (dB)</i>	-35,7

Tabla 7.2

Tabla 7.2. Tabla resumen del evento ART MADRID con la Estrategia 1 de Paneles absorbentes

Al igual que en el punto de partida se visualiza y cuantifica el funcionamiento de cada parámetro con unos “Grids”, que establecen el rango de valores. Para este segundo caso, la disposición espacial se mantiene y es la tabiquería empleada la que se convierte en material absorbente, en este caso los paneles acústicos de Ecophon.

Estos son los valores medios extraídos de la simulación, acompañado de los valores mínimo y máximo entre paréntesis:

- EDT es de 4,25 s (entre 0,02 s y 9,49 s)
- T_{20} es de 3,86 s (entre 2,85 s y 11,17 s)
- D_{50} es de 0,06 (valores entre 0 y 0,99)
- C_{80} es de -35,70 Db

Figura 7.17. Mapeo del EDT para el evento Art Madrid con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

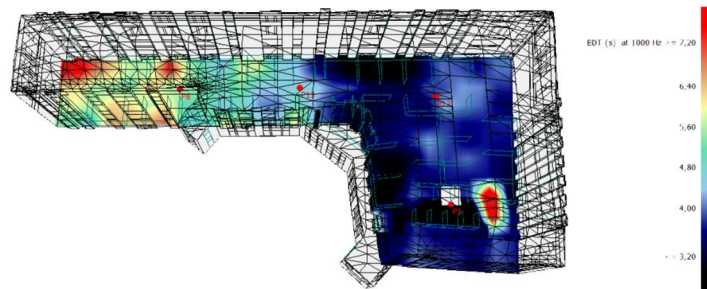


Figura 7.17

Figura 7.18. Mapeo del T_{20} para el evento Art Madrid con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

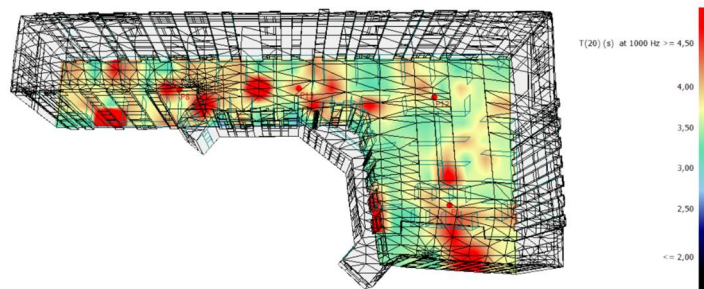


Figura 7.18

Figura 7.19. Mapeo del D_{50} para el evento Art Madrid con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

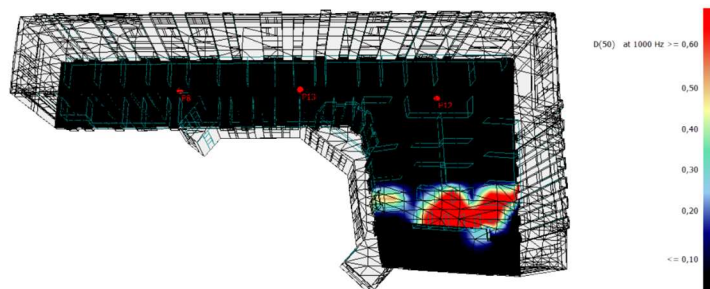


Figura 7.19

Figura 7.20. Mapeo del C_{80} para el evento Art Madrid con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

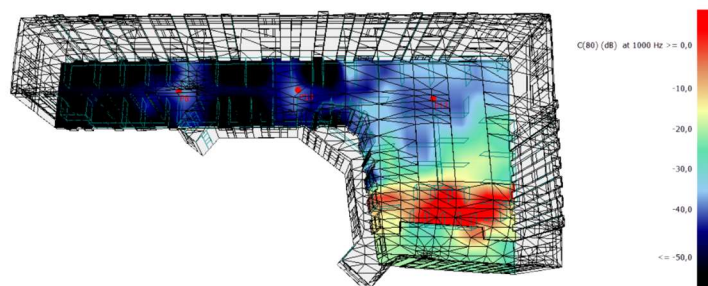
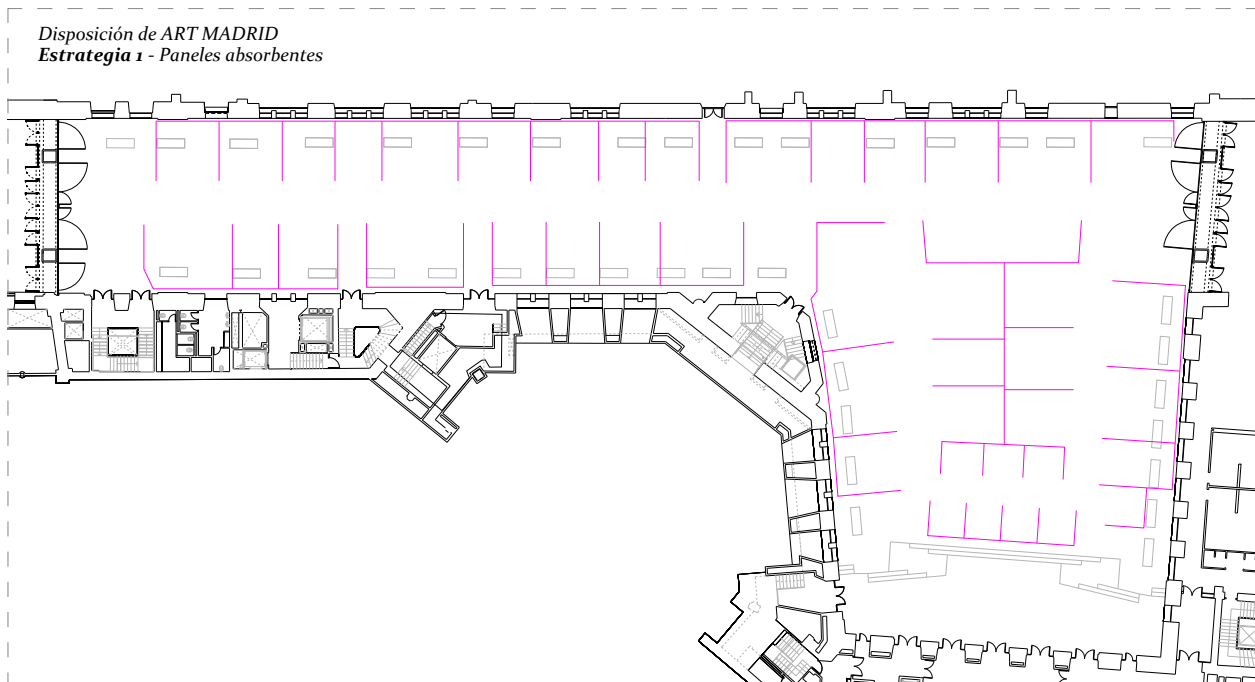
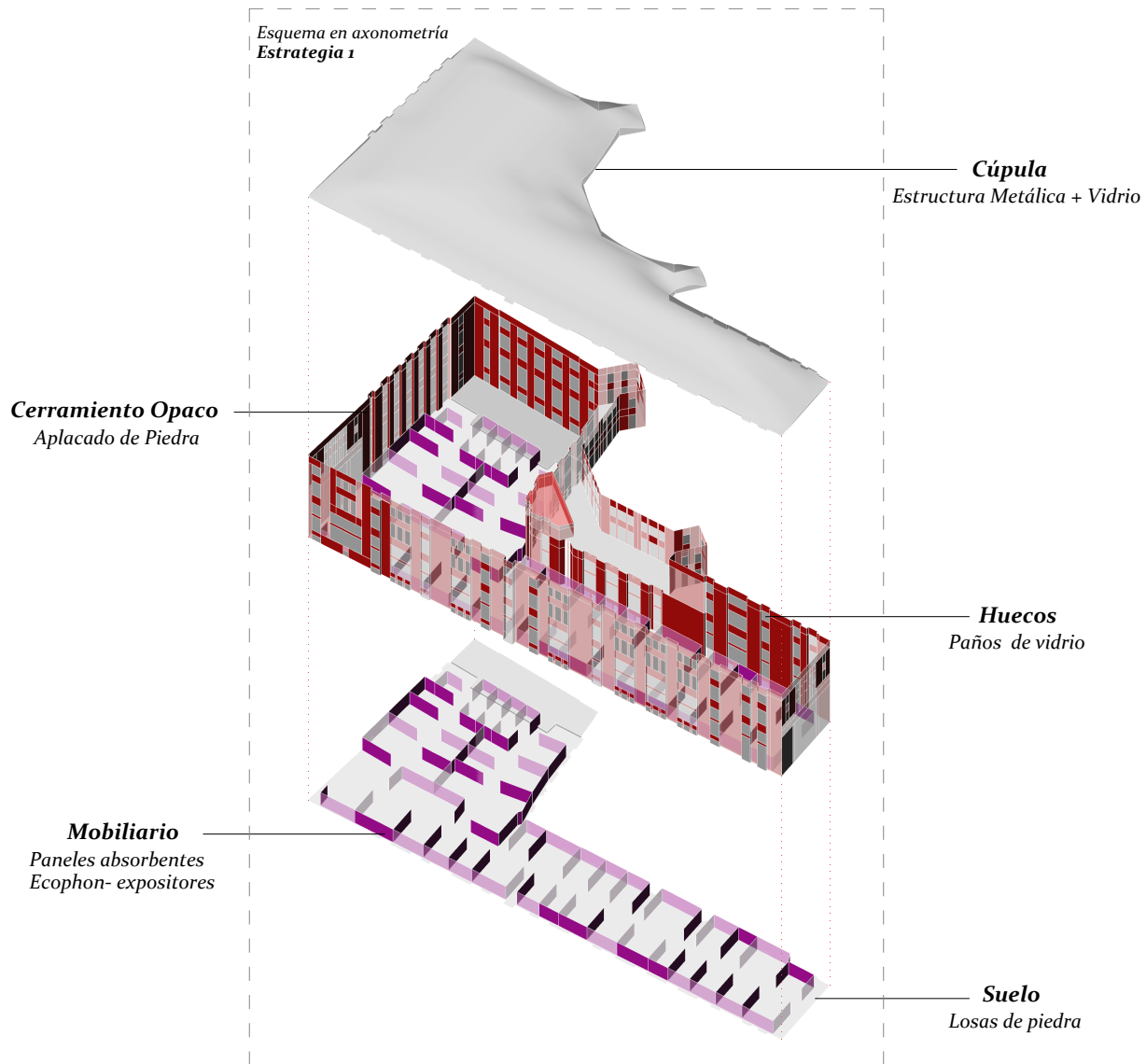


Figura 7.20



ART MADRID

3. Reinterpretación del evento + Sistema telas y pilares

En la búsqueda de estrategias para abordar la problemática acústica sin comprometer la arquitectura de la galería, se propone una reinterpretación personal del espacio desde una lógica espacial. La intervención basada en un sistema de pilares y telas. Los pilares se traducen en guías que articulan el nuevo espacio y se utilizan carriles que van de pilar a pilar y, se integran para permitir el desplazamiento y ajuste de las telas según la disposición del evento.

Se eligen telas blancas con alto grado de translucidez (cuyas propiedades acústicas se describen en el apartado 7.1), que se disponen en planos verticales para no solo preservar la percepción del espacio original, sino también realzarla, respetando el perímetro existente. Dado que el evento cuenta con amplias superficies que delimitan los espacios interiores, la transformación de una mayor extensión de tabiques reflectantes en elementos de tela absorbente resulta fundamental, ya que cuanto más se amplíe esta superficie absorbente, más se mejora el acondicionamiento acústico del recinto.

Además, existe la posibilidad de grabar motivos y aplicar gráficos en el tejido, lo que abre la puerta a una posible interacción entre arquitectura y arte. La disposición que se pretende de telas y pilares se introduce en el modelo virtual de los planos adjuntos a continuación. A continuación, se establece el estado del evento con los valores finales de esta estrategia. Con ello, se muestra cómo este sistema de pilares y telas impulsa una mejora en el comportamiento acústico en el evento.

		<i>EVENTO</i>	<i>ART MADRID</i>
REINTERPRETACIÓN + SIST. TELAS Y PILARES	<i>Superficie Absorbente (m2)</i>	<i>Paneles absorbentes</i>	-
		<i>Textil</i>	1400
		<i>Moqueta</i>	-
		<i>Disposición</i>	<i>Reinterpretación</i>
	<i>Parámetros acústicos</i>	<i>EDT (s)</i>	4,06
		<i>T20 (s)</i>	4,23
		<i>D50</i>	0,22
		<i>C80 (dB)</i>	-11,8

Tabla 7.3

Tabla 7.3. Tabla resumen del evento ART MADRID con la Estrategia 2 del Sistema de telas y pilares

Esta tercera estrategia se mapea con los “Grids” al igual que las anteriores, para mostrar cómo la incorporación del sistema de pilares y telas. Este sistema permite la mejora de los valores de los parámetros. Como se muestra claramente en las figuras de 7.21 a 7.24, el propio sistema de telas introducido, además de mejorar acústicamente, genera en partes del espacio zonas de mayor tranquilidad e intimidad.

Estos son los valores medios extraídos de la simulación, acompañado de los valores mínimo y máximo entre paréntesis:

- EDT es de 4,06 s (entre 0,04 s y 5,57 s)
- T_{20} es de 4,23 s (entre 3,55 s y 4,86 s)
- D_{50} es de 0,22 (valores entre 0 y 0,97)
- C_{80} es de -11,80 dB

Figura 7.21. Mapeo del EDT para el evento Art Madrid con la Estrategia 2 con sistema de telas y pilares

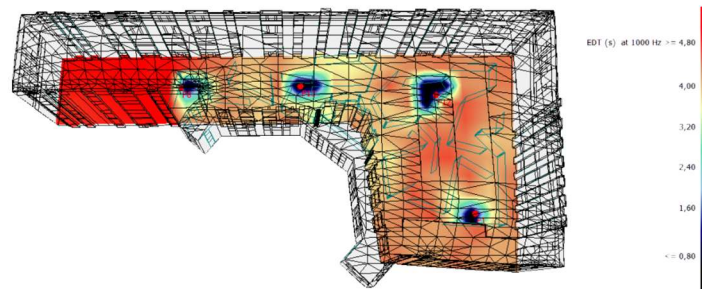


Figura 7.21

Figura 7.22. Mapeo del T_{20} para el evento Art Madrid con la Estrategia 2 con sistema de telas y pilares

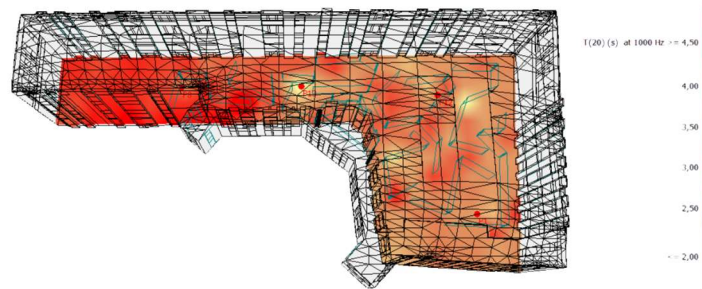


Figura 7.22

Figura 7.23. Mapeo del D_{50} para el evento Art Madrid con la Estrategia 2 con sistema de telas y pilares

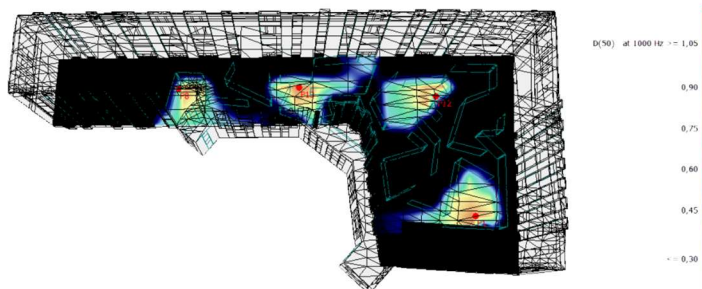


Figura 7.23

Figura 7.24. Mapeo del C_{80} para el evento Art Madrid con la Estrategia 2 con sistema de telas y pilares

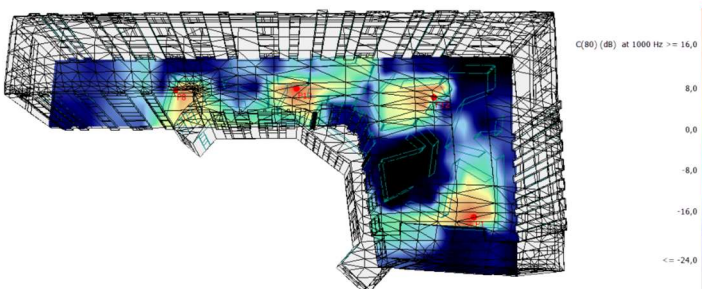
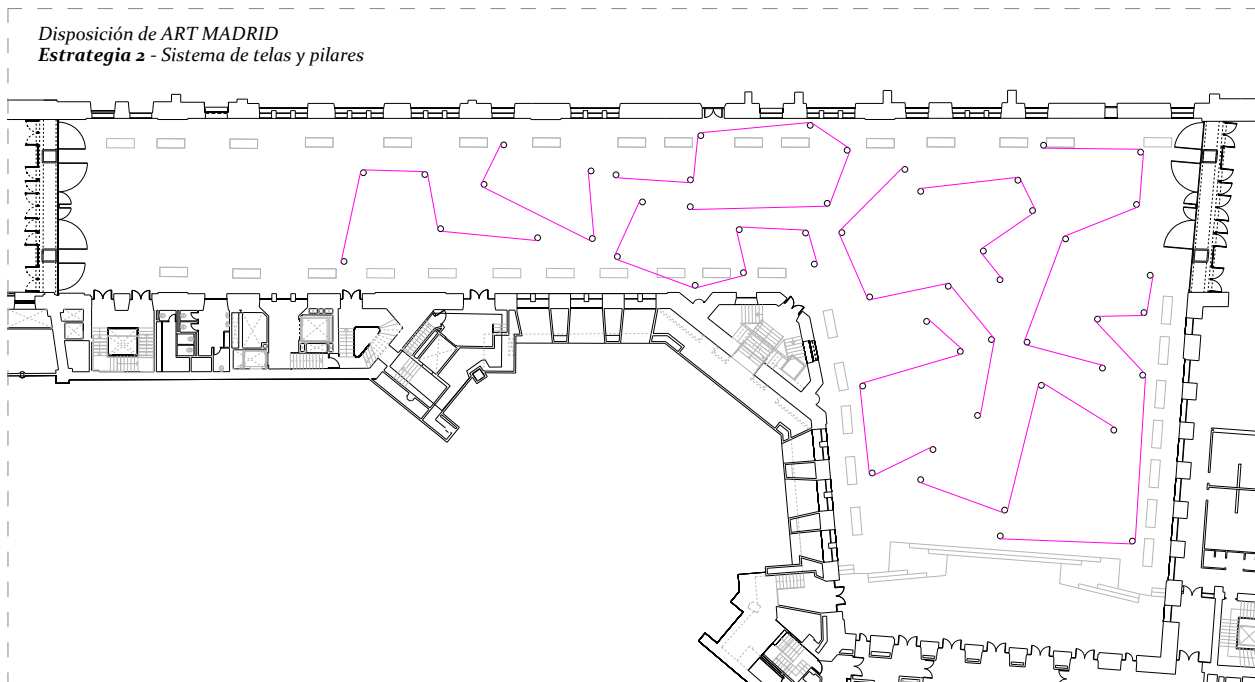
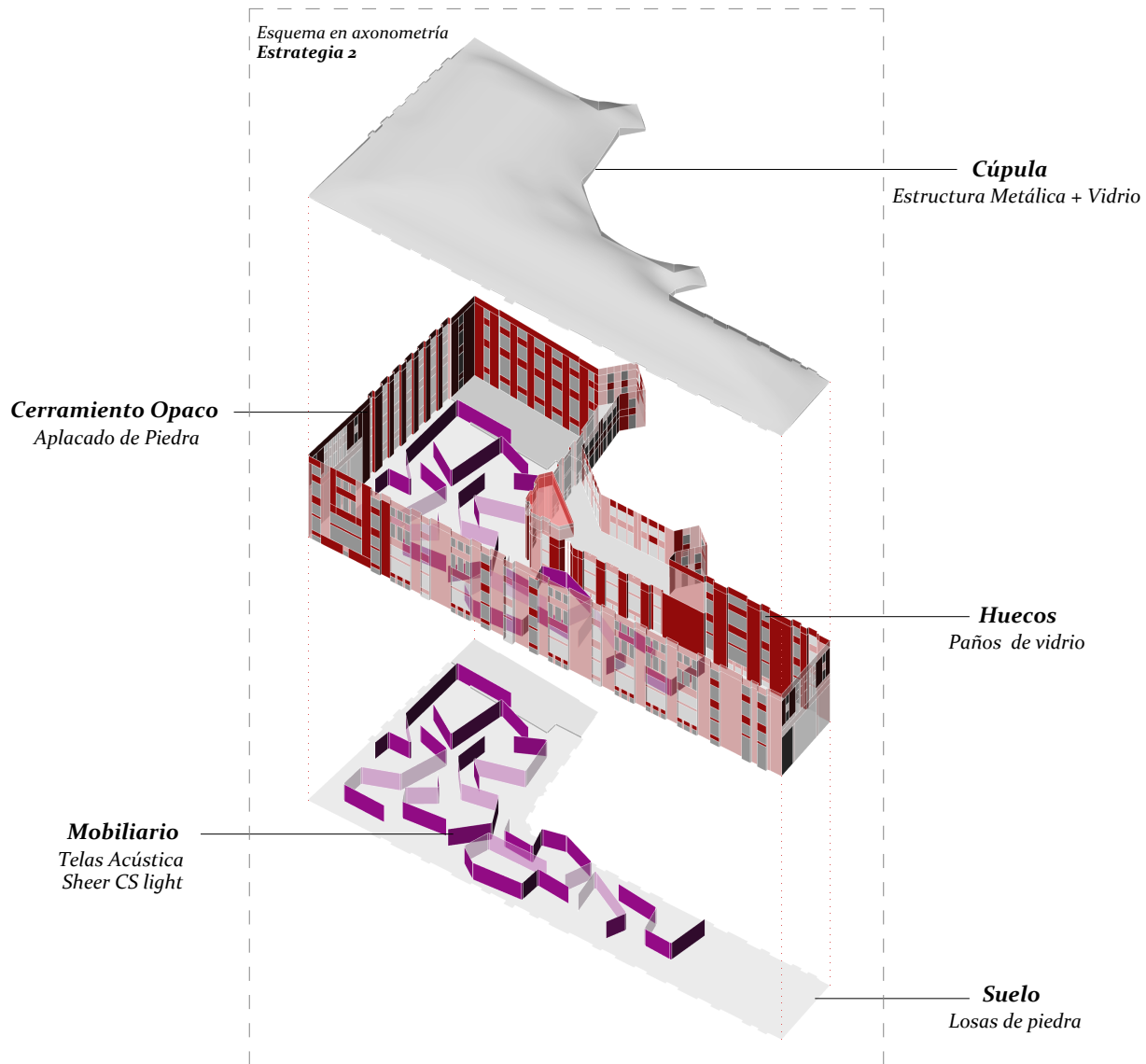


Figura 7.24



CINE DE VERANO

1. Sistema actual

Cada verano, la Galería de Cristal se transforma en un escenario cinematográfico en el que se reproducen clásicos del cine. Es uno de los eventos clave del verano madrileño. Frente al modelo convencional de sala de cine, este evento reinterpreta el espacio de cine, apostando por un espacio monumental y una gran cúpula de vidrio. Esto hace que la experiencia vaya más allá de simplemente ver la película, se trata de disfrutar del lugar donde se proyecta.

La disposición del cine es sencilla. Una gran pantalla colocada en una de las fachadas del espacio central y el resto del espacio se llena de sillas enfrentadas a ella. El espacio no presenta barreras físicas, lo que permite una percepción de la Galería en su totalidad.

Como se ha comprobado con las mediciones in situ el comportamiento del espacio es “indomable”. Por ello, la clave del cine reside en su estrategia de sonido; en lugar de utilizar altavoces de forma general, lo cual entorpecería aún más el sonido, el audio se transmite a través de un sistema inalámbrico de auriculares. Esto evita equipos de amplificación y los problemas de alta reverberación en la Galería. Por ello, este sistema de reproducción cinematográfica es un gran ejemplo de cómo se pueden realizar este tipo de eventos a pesar de las dificultades del lugar en el que se realiza.

Esta tabla muestra el estado actual del CINE DE VERANO, indicando superficies, disposición y parámetros acústicos. Este será el punto de partida para el desarrollo de propuestas.

		<i>EVENTO</i>	<i>CINE DE VERANO</i>
P1. SISTEMA ACTUAL	<i>Superficie Absorbente (m2)</i>	<i>Paneles absorbentes</i>	-
		<i>Textil</i>	-
	<i>Disposición</i>		<i>Actual</i>
	<i>Parámetros acústicos</i>	<i>EDT (s)</i>	7,73
		<i>T20 (s)</i>	8,25
		<i>D50</i>	0,17
<i>C80 (dB)</i>		-11,9	

Tabla 7.4



Figura 7.25

Figura 7.25. Imagen de la disposición del cine de verano en la Galería de Cristal.

Tabla 7.4. Tabla resumen del evento CINE DE VERANO en su estado actual

Se visualiza y cuantifica cada parámetro con los “Grids”, que muestra la variación espacial de los valores de los parámetros acústicos. Se establece el punto de partida como si el cine fuese expuesto de forma tradicional, con equipos de sonido, y no auriculares.

Estos son los valores medios junto a los valores mínimo y máximo:

- EDT es de 7,73 s (entre 0,04 s y 10,44 s)
- T_{20} es de 8,25 s (entre 6,24 s y 8,32 s)
- D_{50} es de 0,17 (valores entre 0 y 0,94)
- C_{80} es de -11,90 dB

Figura 7.27. Mapeo del EDT para el Cine de Verano en su estado actual

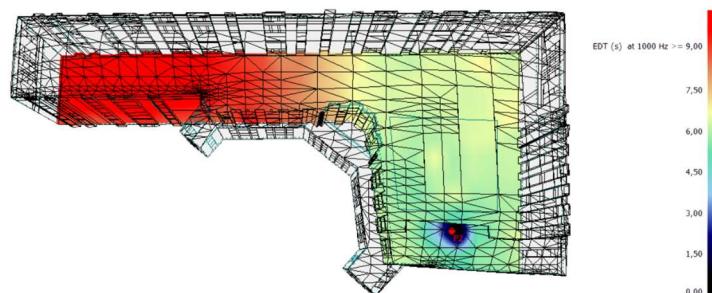


Figura 7.27

Figura 7.27. Mapeo del T_{20} para el Cine de Verano en su estado actual

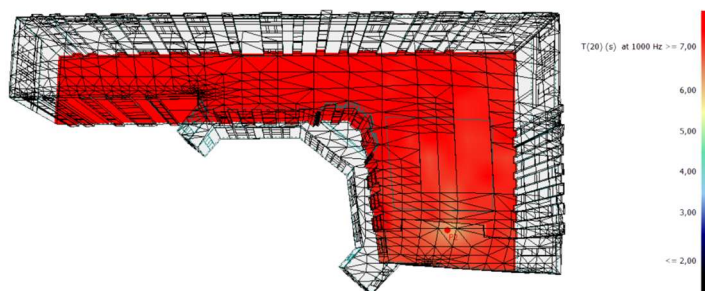


Figura 7.28

Figura 7.27. Mapeo del D_{50} para el Cine de Verano en su estado actual

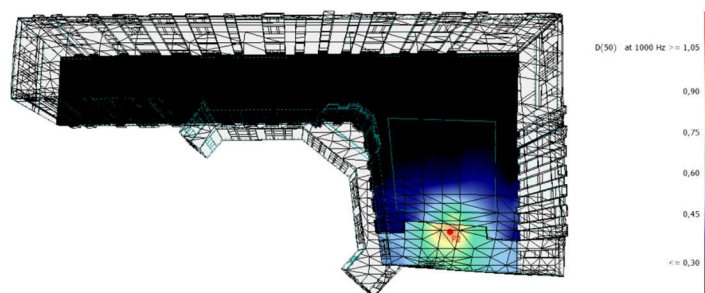


Figura 7.29

Figura 7.27. Mapeo del C_{80} para el Cine de Verano en su estado actual

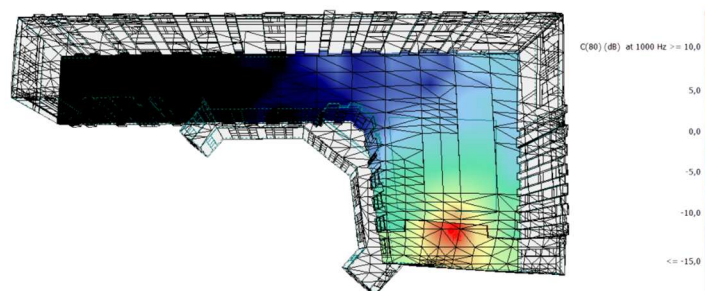
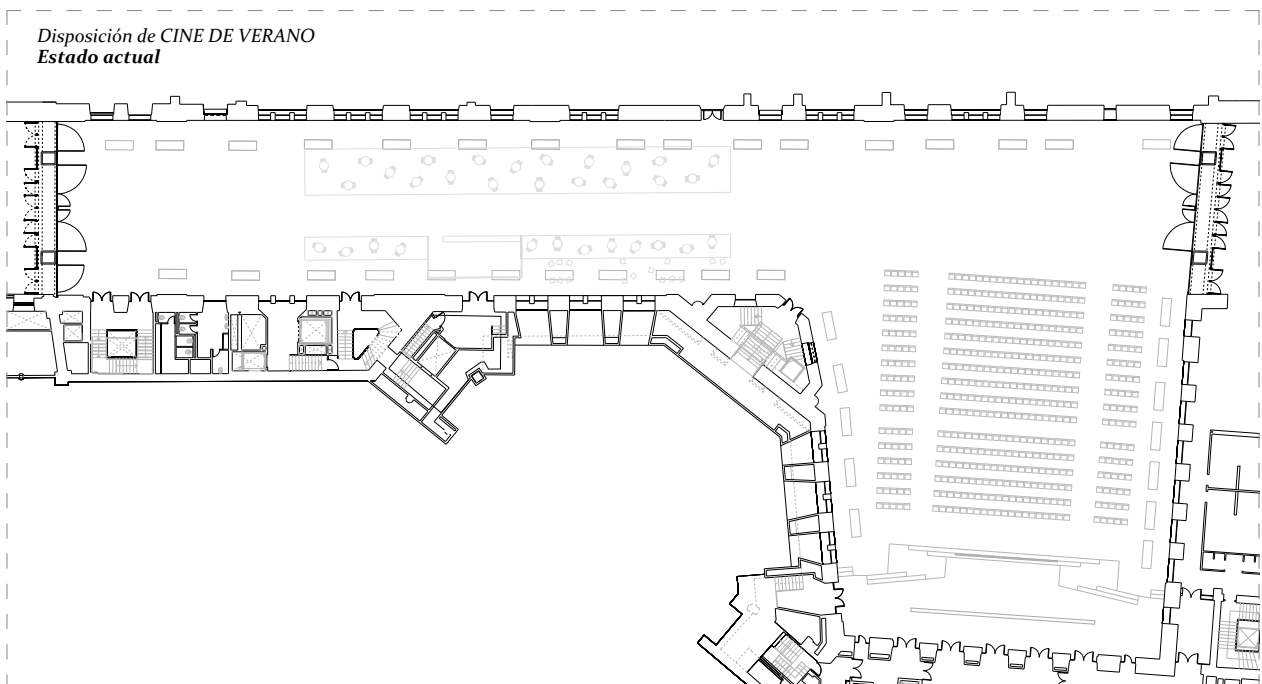
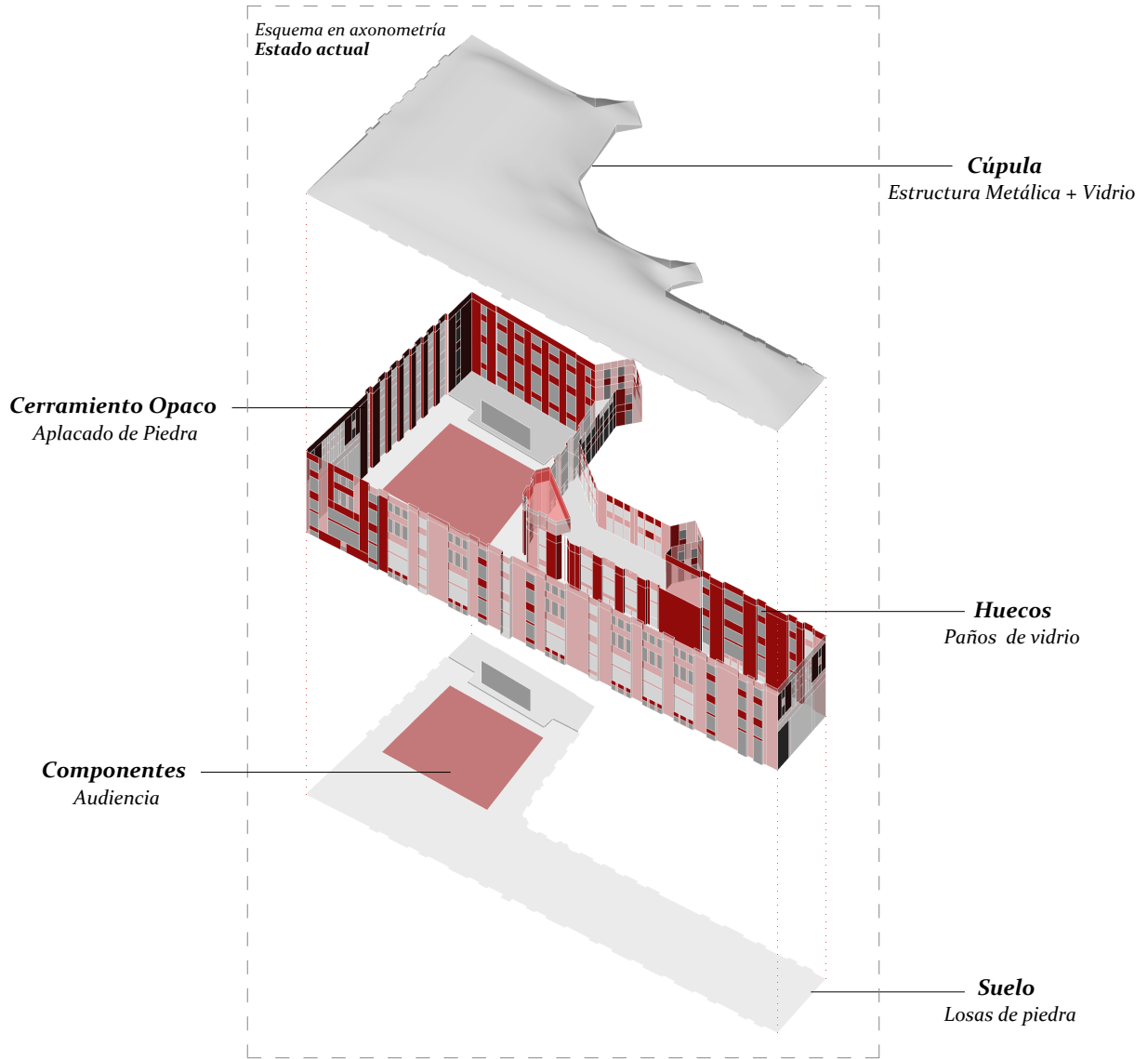


Figura 7.30



CINE DE VERANO*2. Misma disposición + Paneles absorbentes*

Entre las estrategias de mejora, se propone una solución discreta pero eficaz. Mantiene la disposición central de cine con la pantalla frontal y espectadores frente a ella, y se añaden paneles absorbentes verticales en el perímetro del espacio. Esta solución que es aparentemente mínima permite volver al modelo tradicional de cine con un sistema general de sonido, sin necesidad de utilizar auriculares individuales.

El uso de los paneles perimetrales Ecophon Akusto TM Wall C, añade una nueva capa absorbente, que reduce la reverberación y mejora un aspecto acústico clave en el cine como es la inteligibilidad de la palabra. El volumen es el mismo, pero la percepción sonora mejora. Además, y como se vienen mencionando en las distintas propuestas, los paneles pueden personalizarse con grafismos relacionados con el programa, sirviendo como herramientas informativas y/o publicidad del evento.

Esto se ve reflejado en la siguiente tabla resumen, donde los valores de los respectivos parámetros acústicos sufren una mejoría con respecto a su estado inicial, pero aún alejados de los valores óptimos.

	EVENTO		CINE DE VERANO	
	SISTEMA ACTUAL + PANELES ABSORBENTES	<i>Superficie Absorbente (m2)</i>	<i>Paneles absorbentes</i>	89,1
		<i>Textil</i>	-	
		<i>Moqueta</i>	421	
		<i>Disposición</i>	<i>Actual</i>	
<i>Parámetros acústicos</i>		<i>EDT (s)</i>		6,93
		<i>T20 (s)</i>		7,05
		<i>D50</i>		0,17
		<i>C80 (dB)</i>		-13,6

Tabla 7.5

Tabla 7.5. Tabla resumen del evento CINE DE VERANO con la Estrategia 1 de Paneles absorbentes

Al igual que en el punto de partida se visualiza y cuantifica en la variación espacial de cada parámetro con los "Grids". Para este segundo caso, la disposición espacial se mantiene y es el perímetro del cine donde se sitúan los paneles acústicos de Ecophon.

Estos son los valores medios extraídos de la simulación, acompañado de los valores mínimo y máximo entre paréntesis:

- EDT es de 6,33 s (entre 0,04 s y 10,56 s)
- T_{20} es de 6,45 s (entre 5,4 s y 7,88 s)
- D_{50} es de 0,17 (valores entre 0 y 0,94)
- C_{80} es de -13,60 dB

Figura 7.31. Mapeo del EDT para el Cine de Verano con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

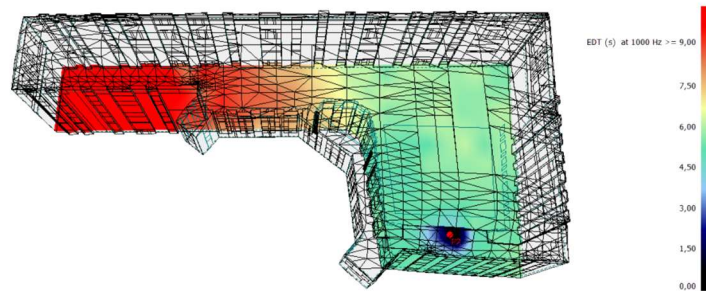


Figura 7.31

Figura 7.32. Mapeo del T_{20} para el Cine de Verano con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

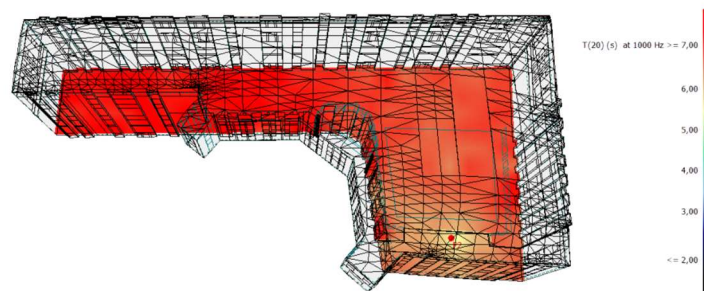


Figura 7.32

Figura 7.33. Mapeo del D_{50} para el Cine de Verano con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

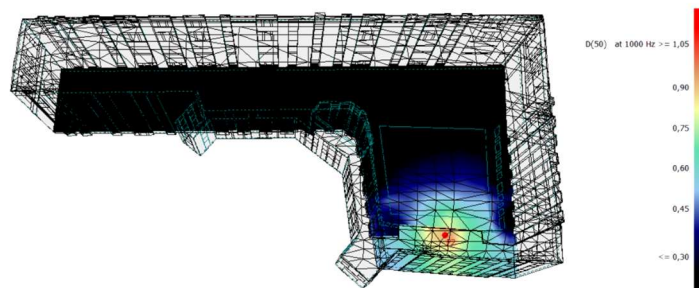


Figura 7.33

Figura 7.34. Mapeo del C_{80} para el Cine de Verano con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

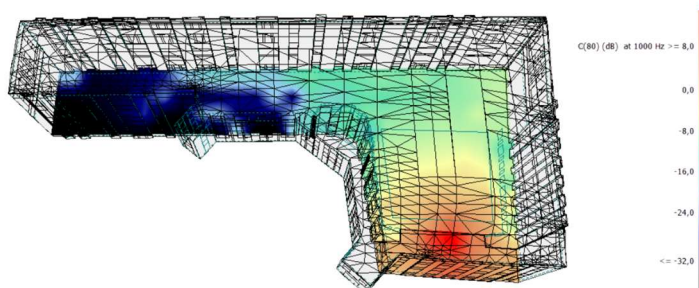
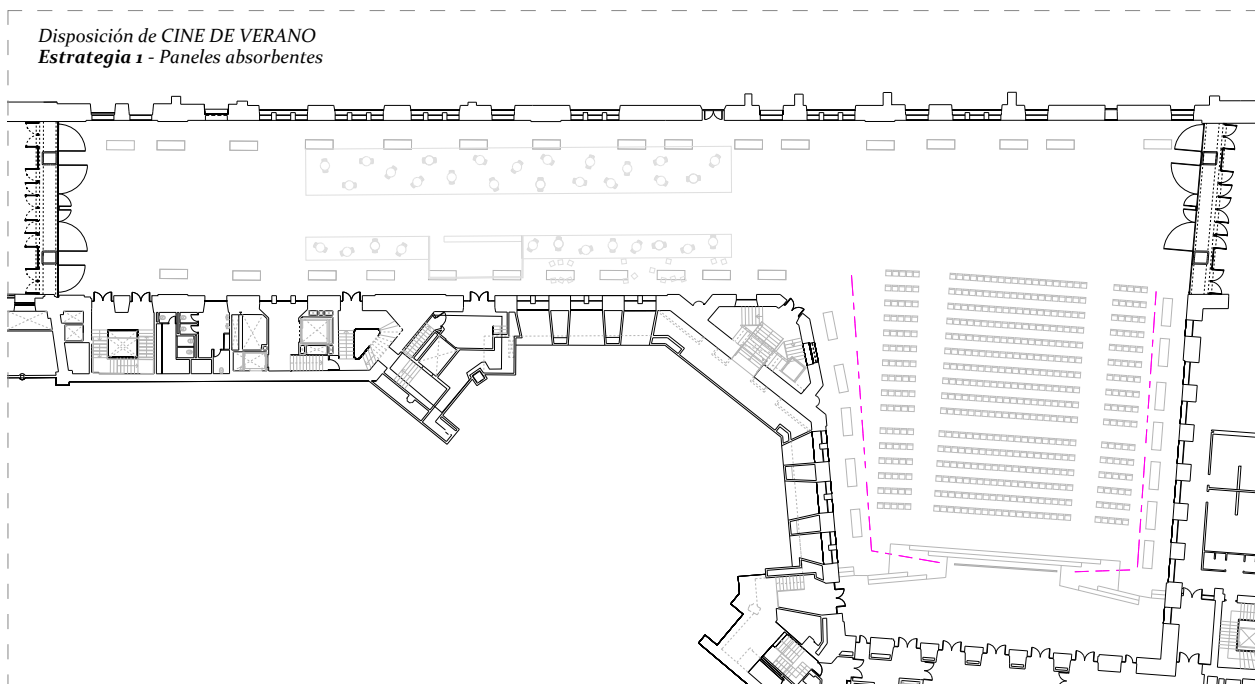
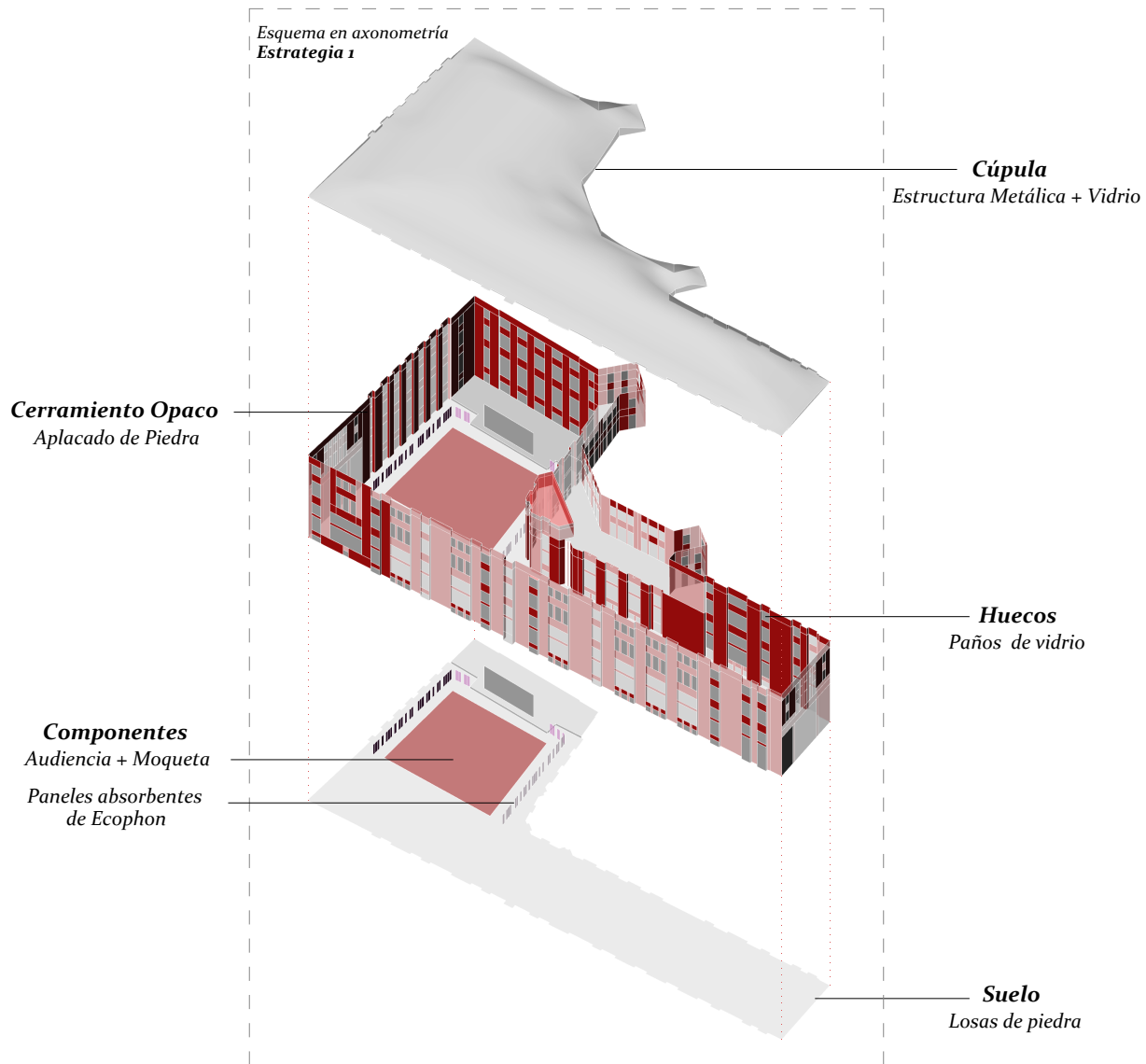


Figura 7.34



CINE DE VERANO

3. Reinterpretación del evento + Sistema telas y pilares

Una de las estrategias para mejorar la experiencia acústica en el cine de la Galería consiste en modificar radicalmente la distribución espacial del cine. El gran espacio diáfano se divide en varias unidades de menor tamaño construidas con el sistema de pilares y textiles verticales, ya explicado. La idea se puede visualizar en el esquema del modelo virtual, a continuación.

Cada una de estas salas reproduce simultáneamente la misma película, lo que elimina cualquier posible interferencia sonora y permite eliminar los auriculares inalámbricos para volver al sistema de sonido convencional de altavoces distribuidos.

Este cambio no solo mejora la calidad acústica, sino que también recupera la película como experiencia compartida. A nivel material, las salas incorporan moqueta en las zonas de espectadores, o que ya reduce la reflectividad de una de sus superficies, el suelo.

Desde una perspectiva arquitectónica, esta propuesta no pretende imponer una nueva arquitectura en la Galería, sino que mantiene su estructura. Lo que antes era un único volumen con superficies reverberantes, ahora son una serie de volúmenes acotados con telas que funcionan como filtro visual y acústico y, que redefine la escala y las conexiones del espacio.

Esto un implica una mejoría respecto al estado actual del cine. Los valores que muestran dicha mejoría se muestran en la siguiente tabla, donde también se incluyen las nuevas superficies absorbentes.

		EVENTO	CINE DE VERANO
REINTERPRETACIÓN + SIST. TELAS Y PILARES	<i>Superficie Absorbente (m²)</i>	<i>Paneles absorbentes</i>	-
		<i>Textil</i>	74 ¹
		<i>Moqueta</i>	424
		<i>Disposición</i>	<i>Reinterpretación</i>
	<i>Parámetros acústicos</i>	<i>EDT (s)</i>	5,14
		<i>T20 (s)</i>	5,32
		<i>D50</i>	0,26
		<i>C80 (dB)</i>	-7,9

Tabla 7.6. Tabla resumen del evento CINE DE VERANO con la Estrategia 2 del Sistema de telas y pilares

Tabla 7.6

Esta tercera estrategia se mapea con los “Grids” al igual que las anteriores, para mostrar cómo mejora la acústica con la incorporación del sistema de pilares y telas.

Estos son los valores medios extraídos de la simulación, acompañado de los valores mínimo y máximo entre paréntesis:

- EDT es de 5,14 s (entre 0,04 s y 8,70 s)
- T_{20} es de 5,52 s (entre 3,94 s y 7,21 s)
- D_{50} es de 0,26 (valores entre 0 y 0,98)
- C_{80} es de -7,90 dB

Figura 7.35. Mapeo del EDT para el Cine de Verano con la Estrategia 2 con sistema de telas y pilares

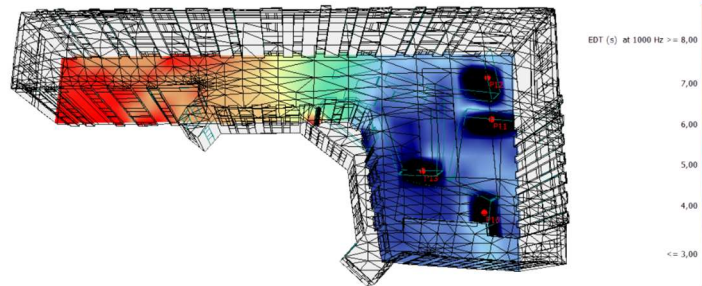


Figura 7.35

Figura 7.36. Mapeo del T_{20} para el Cine de Verano con la Estrategia 2 con sistema de telas y pilares

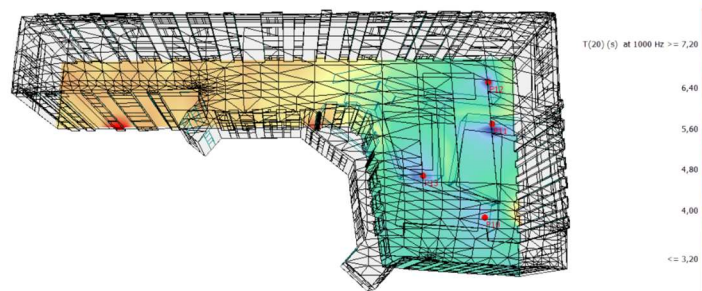


Figura 7.36

Figura 7.37. Mapeo del D_{50} para el Cine de Verano con la Estrategia 2 con sistema de telas y pilares

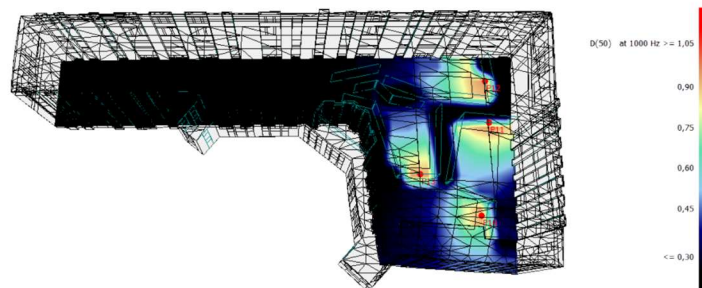


Figura 7.37

Figura 7.38. Mapeo del C_{80} para el Cine de Verano con la Estrategia 2 con sistema de telas y pilares

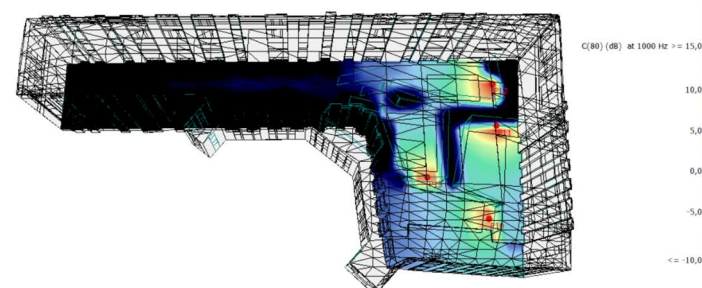
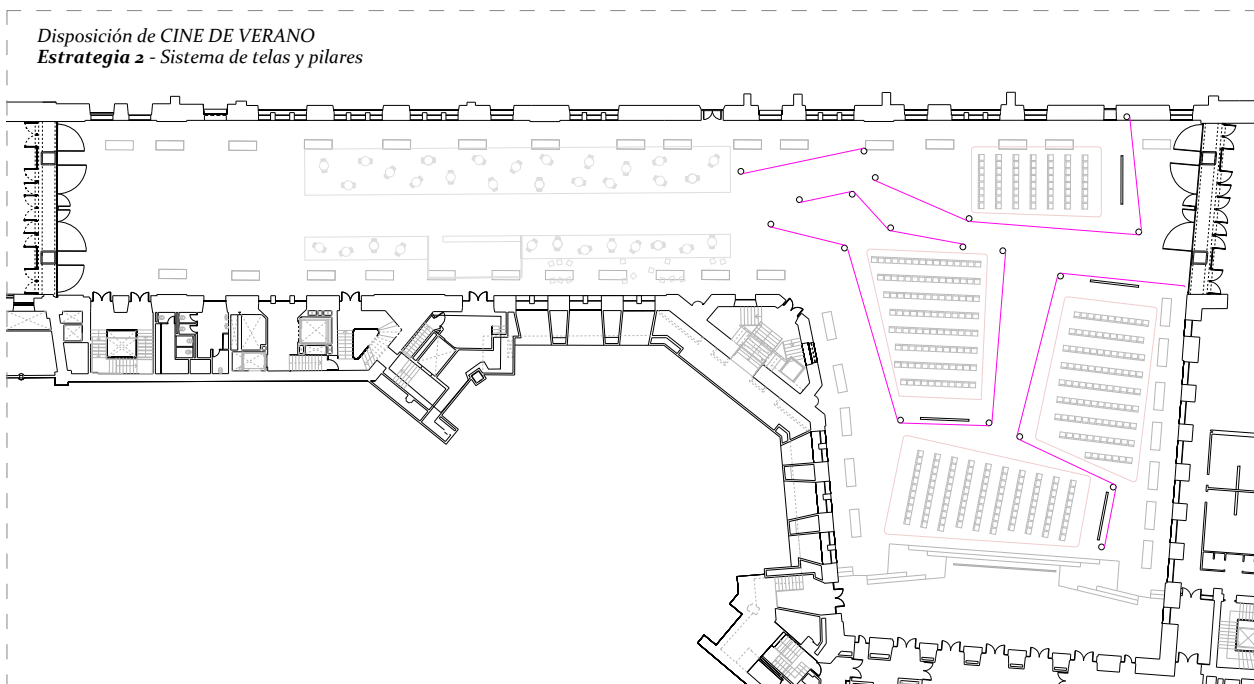
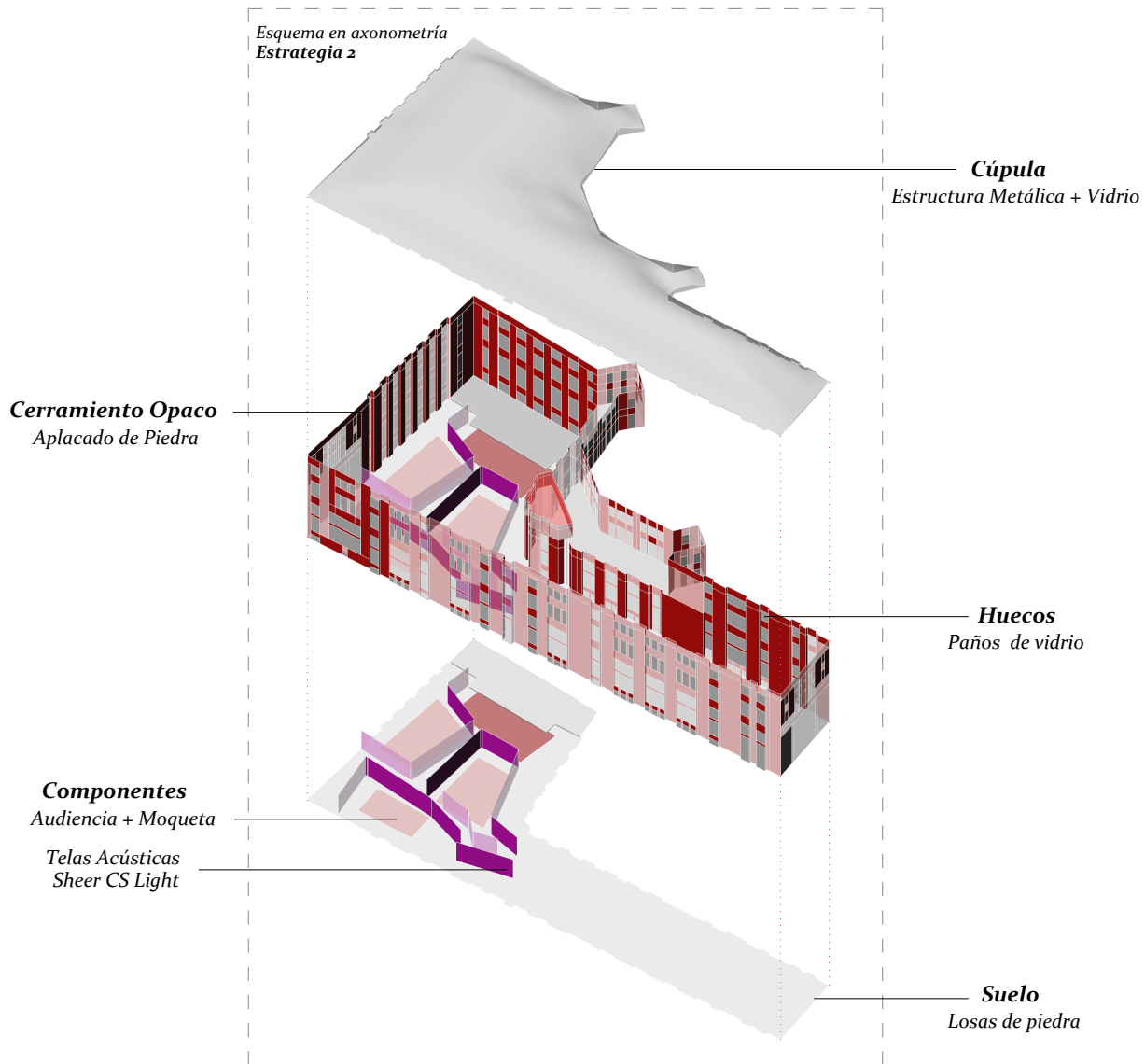


Figura 7.38



CÓCTEL AUDI

1. Sistema actual

En la Galería de Cristal se realizan regularmente reuniones de carácter corporativo, que muchas veces se combinan con cenas de gala y presentaciones de marcas. El evento que se describe y que se toma como caso es un cóctel y una presentación de coches de la marca Audi. El espacio se adapta a las características del evento mejorando la funcionalidad.



Figura 7.40

El ala longitudinal se presenta como el espacio de recepción que precede al gran espacio central donde se incluye el escenario, y mesas redondas para la cena y el cóctel. Estos eventos incorporan estructuras auxiliares mediante el uso de bastidores metálicos triangulados, que permiten suspender la iluminación, equipos de sonido o elementos que complementan el escenario.

Figura 7.40. Imagen de la disposición del cóctel y la presentación de vehículos Audi en la Galería

El sistema actual no incorpora ningún elemento acústico, por lo que el comportamiento acústico del espacio está determinado exclusivamente por la geometría y las superficies reflectantes de la Galería.

Estas condiciones acústicas se resumen en la siguiente tabla, asociando valores a los respectivos parámetros. Esto sirve para mostrar el punto de partida para el desarrollo de estrategias.

		<i>EVENTO</i>	<i>CÓCTEL AUDI</i>
SISTEMA ACTUAL	<i>Superficie Absorbente (m2)</i>	<i>Paneles absorbentes</i>	-
		<i>Textil</i>	-
		<i>Disposición</i>	<i>Actual</i>
	<i>Parámetros acústicos</i>	<i>EDT (s)</i>	6,45
		<i>T20 (s)</i>	6,2
		<i>D50</i>	0,17
	<i>C80 (dB)</i>	-23,1	

Tabla 7.7. Tabla resumen del evento CÓCTEL AUDI en su estado actual

Tabla 7.7

Como se muestra a continuación, no intervenir acústicamente en la Galería, implica un mal funcionamiento acústico, reflejado en los cuatro parámetros de estudio:

- EDT es de 6,45 s (entre 0,1 s y 9,57 s)
- T_{20} es de 6,20 s (entre 5,22 s y 9,63 s)
- D_{50} es de 0,17 (valores entre 0 y 0,90)
- C_{80} es de -23,10 dB,

Figura 7.41. Mapeo del EDT para el evento Cóctel Audi en su estado actual

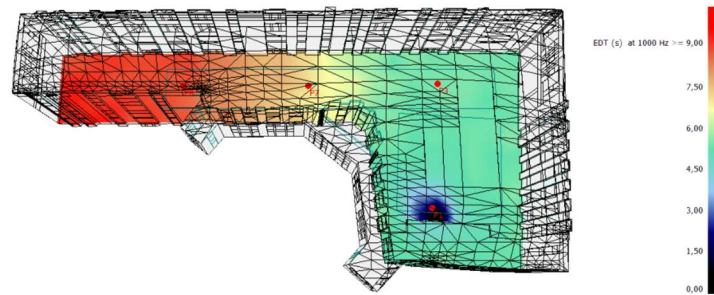


Figura 7.41

Figura 7.42. Mapeo del T_{20} para el evento Cóctel Audi en su estado actual

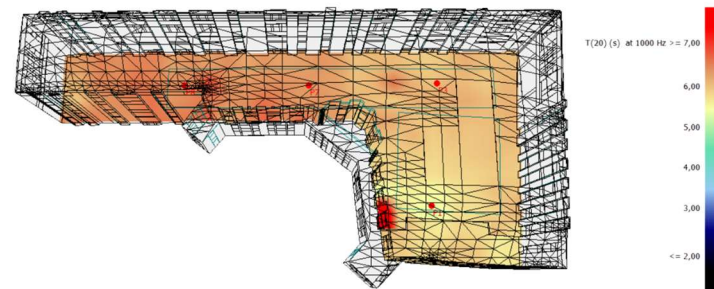


Figura 7.42

Figura 7.43. Mapeo del D_{50} para el evento Cóctel Audi en su estado actual

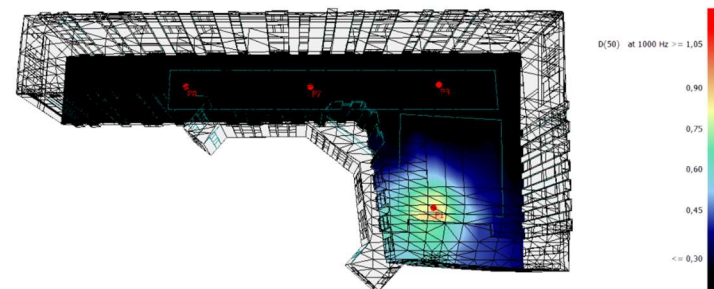


Figura 7.43

Figura 7.44. Mapeo del C_{80} para el evento Cóctel Audi en su estado actual

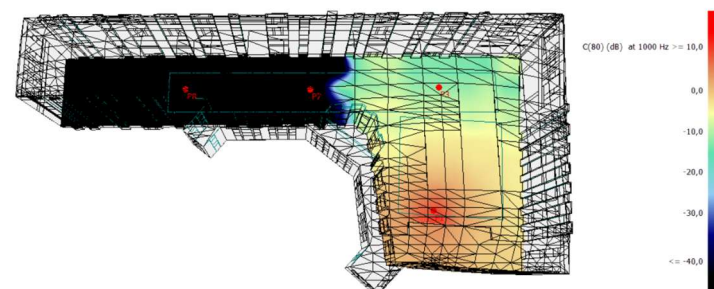
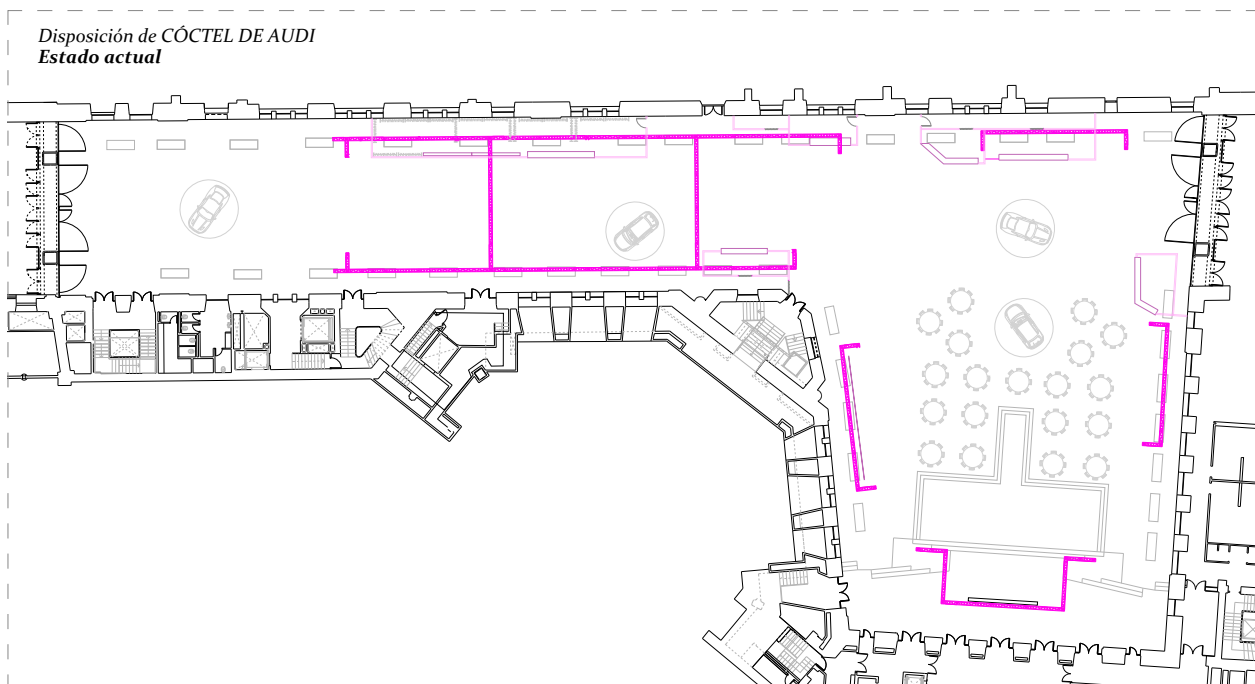
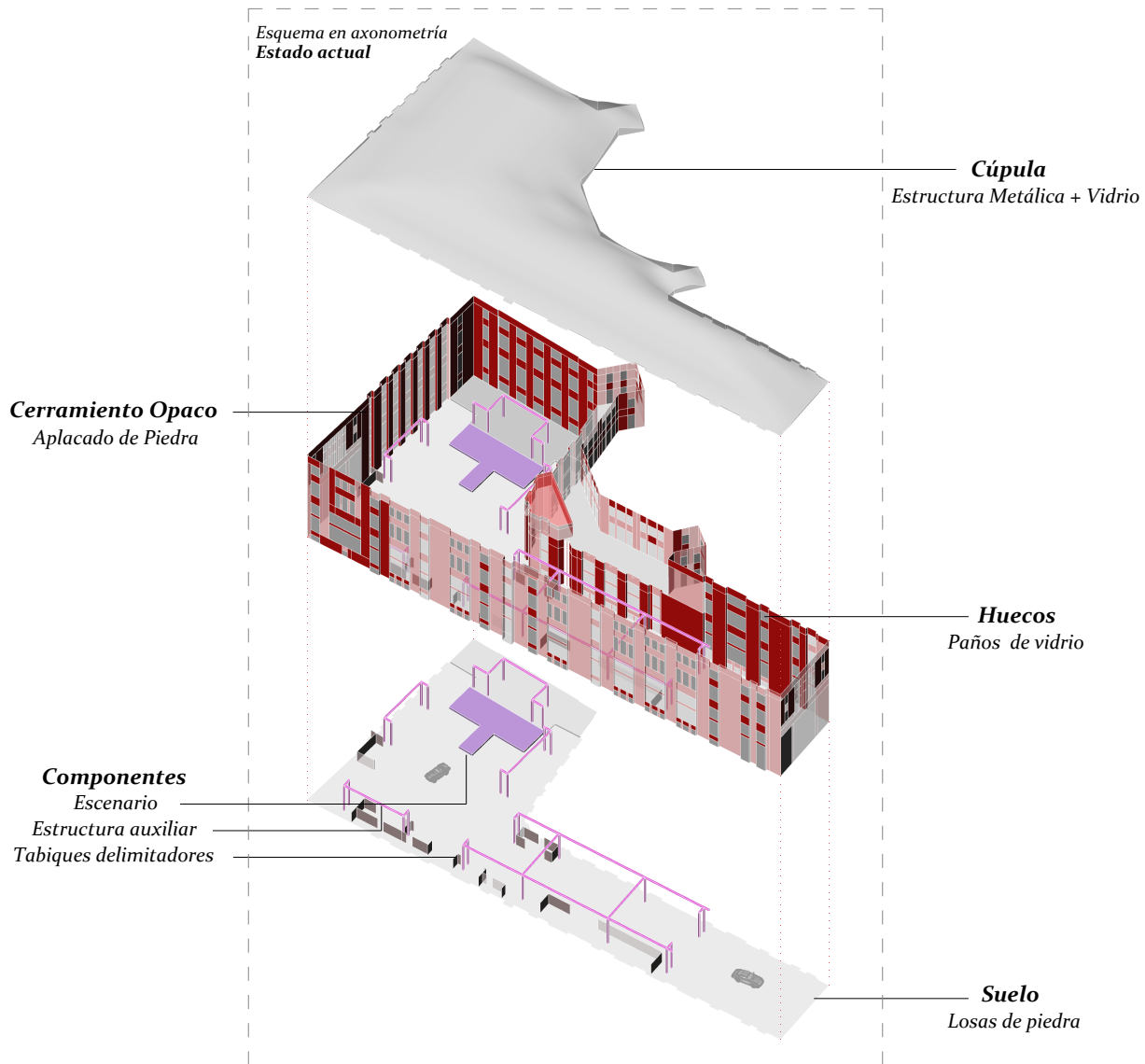


Figura 7.44



CÓCTEL AUDI

2. *Misma disposición + Paneles absorbentes*

Esta estrategia surge de la necesidad de incorporar superficie absorbente a la Galería. Por ello, se recurre a las estructuras auxiliares, sobre las que se añaden paneles absorbentes Ecophon Akusto TM Wall C, dispuestos tanto en vertical como en horizontal.

Estos paneles se suspenden verticalmente de los bastidores metálicos que actúan como delimitadores espaciales sin impedir la visibilidad del escenario ni del volumen interior de la Galería.

En el ala longitudinal, los paneles se agrupan siguiendo un diseño geométrico que conforma un tapiz absorbente elevado. Esto se presenta en el esquema mostrado tras el desarrollo de la propuesta. El tapiz se dispone en formato horizontal en la zona superior de los bastidores auxiliares, donde se produce la recepción y el tránsito de asistentes.

Esta estrategia busca mantener el carácter monumental interior, de modo que la percepción de la altura y de su gran cúpula permanecen siempre presentes ya que se trabaja con planos efímeros, modulares y, cuya modulación crea aberturas que refuerzan dicha percepción.

Estas modificaciones sobre el estado actual implican mejoría, como muestra la siguiente tabla. En parámetros como el T20, implica menos de 2 segundos diferencia, lo que indica que esta estrategia funciona, sin llegar aún a los valores óptimos. Además, se añade el dato de la superficie, en este caso de los paneles absorbentes.

	EVENTO		CÓCTEL AUDI
	SISTEMA ACTUAL + PANELES ABSORBENTES	Superficie Absorbente (m2)	Paneles absorbentes
		Textil	-
		Moqueta	450
		Disposición	Actual
Parámetros acústicos		EDT (s)	4,44
		T20 (s)	4,16
		D50	0,26
		C80 (dB)	-20,9

Tabla 7.8

Tabla 7.8. Tabla resumen del evento CINE DE VERANO con la Estrategia 1 de Paneles absorbentes

Con lo ya mencionado y como muestra el mapeo, la estrategia de adición de superficie absorbente implica una ligera mejora, sin embargo, los valores obtenidos no alcanzan el rango óptimo de valores para los parámetros acústicos.

- EDT es de 4,44 s (entre 1,45 s y 7,66 s)
- T_{20} es de 4,16 s (entre 3,01 s y 5,30 s)
- D_{50} es de 0,26 (valores entre 0 y 1)
- C_{80} es de -20,90 dBx

Figura 7.45. Mapeo del EDT para el evento Cóctel Audi con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

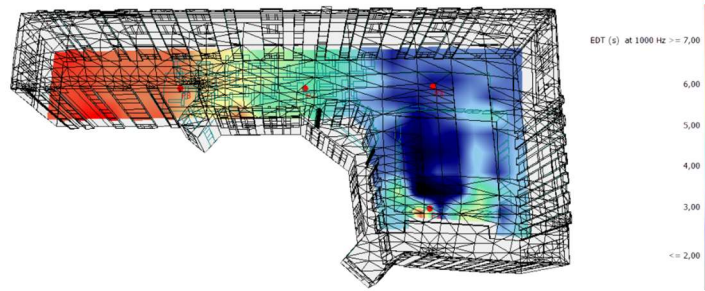


Figura 7.45

Figura 7.46. Mapeo del T_{20} para el evento Cóctel Audi con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

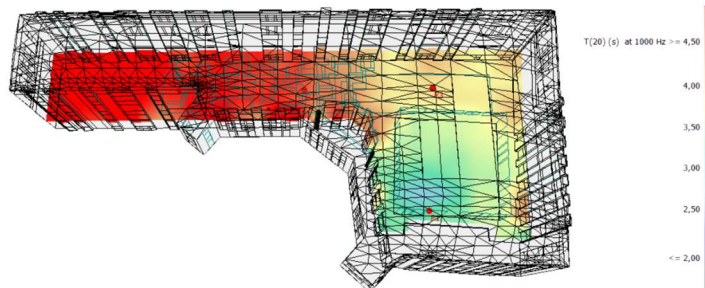


Figura 7.46

Figura 7.47. Mapeo del D_{50} para el evento Cóctel Audi con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

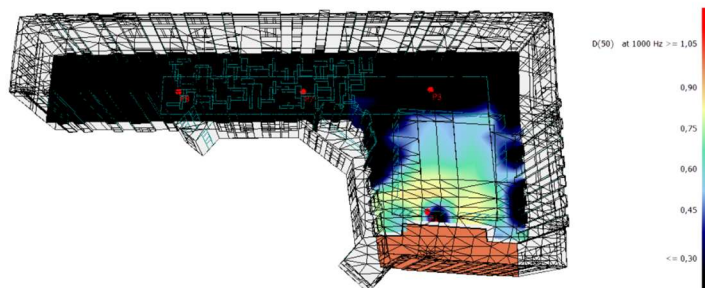


Figura 7.47

Figura 7.48. Mapeo del C_{80} para el evento Cóctel Audi con la Estrategia 1 de paneles absorbentes

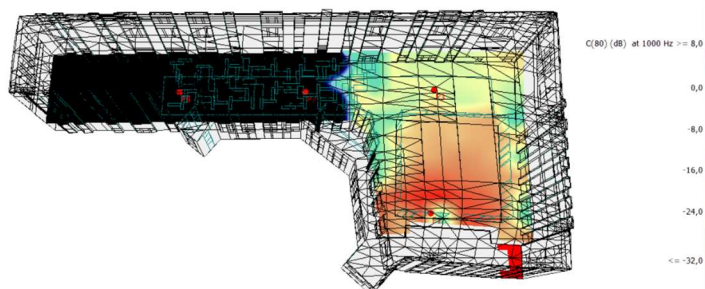
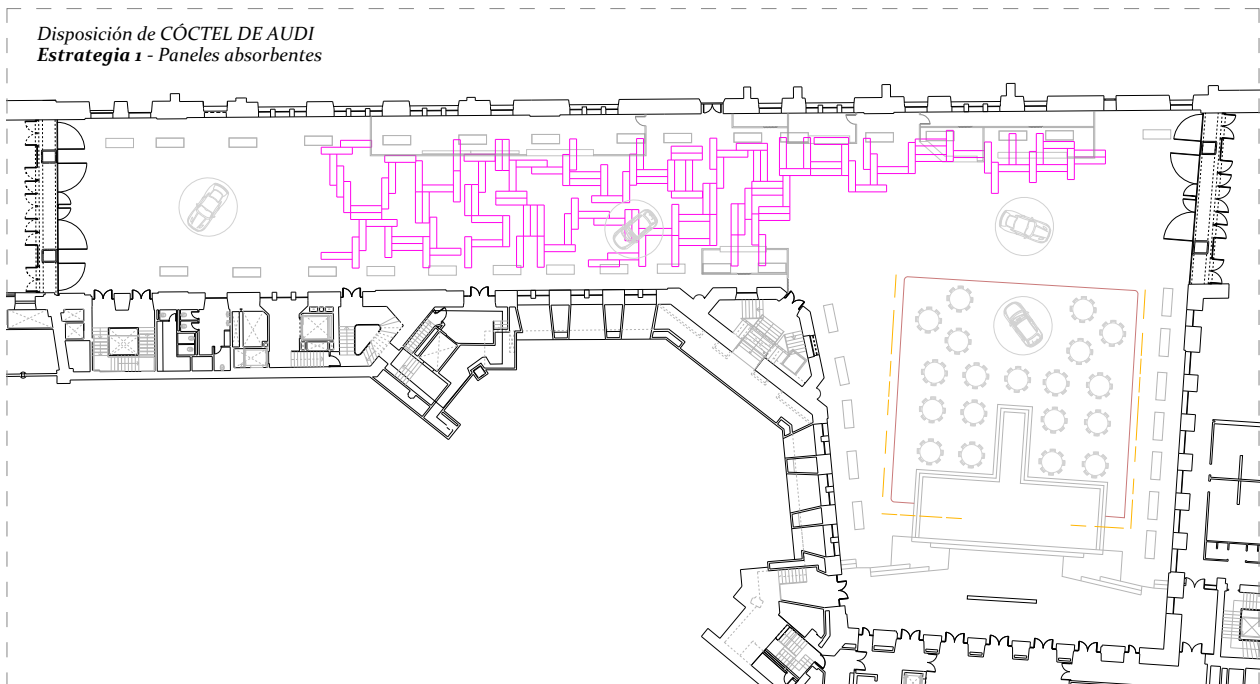
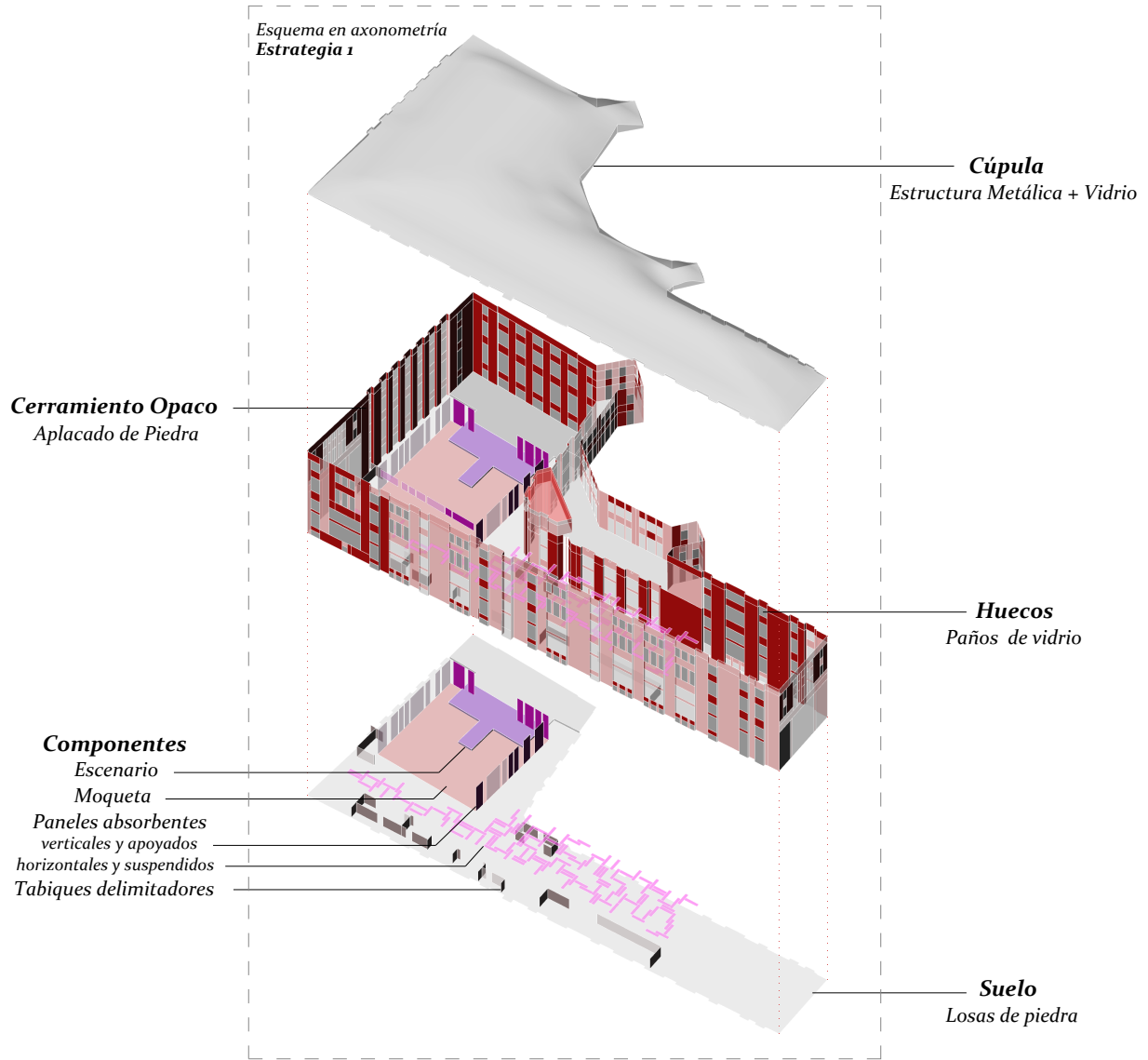


Figura 7.48



CÓCTEL AUDI

3. Reinterpretación del evento + Sistema telas y pilares

Esta estrategia propone una reinterpretación del sistema tradicional, optando por telas suspendidas entre pilares. Esta propuesta no modifica el sistema funcional, es decir, se mantiene la recepción en el ala lateral mientras que el espacio de cena y escenario se mantiene en el espacio central. No obstante, se propone una nueva forma de completar ese volumen.

La llegada de asistentes y exhibición de vehículos tiene lugar por el ala longitudinal, donde las telas se disponen en serie, generando una secuencia visual de elementos que marcan zonas de encuentro, sin crear barreras físicas, como se muestra en el esquema incluido tras el desarrollo de la estrategia. Los planos textiles actúan como umbrales que anteceden al espacio central, donde se focaliza el escenario.

En el espacio central, se colocan las telas perimetralmente para definir la zona de escenario y cóctel. Con ello, se logra controlar acústicamente el evento sin crear un nuevo volumen cerrado. La transparencia de las telas enfatiza las fachadas interiores y su gran cúpula.

El desarrollo de esta estrategia implica una gran evolución en la mejora acústica. Como indican los valores de los parámetros incluidos en la siguiente tabla la mejoría es más que notable. Parámetros como el entendimiento de la palabra (D50) se acerca al objetivo fijado.

	EVENTO	CÓCTEL AUDI	
REINTERPRETACIÓN + SIST. TELAS Y PILARES	Superficie Absorbente (m ²)	-	
		Paneles absorbentes	
		Textil	656
		Moqueta	305
		Disposición	Reinterpretación
	Parámetros acústicos	EDT (s)	4,84
		T20 (s)	4,25
		D50	0,26
		C80 (dB)	-26,1

Tabla 7.9

Tabla 7.9. Tabla resumen del evento CÓCTEL AUDI con la Estrategia 2 del Sistema de telas y pilares

Esta tercera estrategia se mapea con los “Grids” al igual que las anteriores, para mostrar cómo la incorporación del sistema de pilares y telas mejora los parámetros acústicos.

Estos son los valores medios extraídos de la simulación, acompañado de los valores mínimo y máximo entre paréntesis:

- EDT es de 4,484 s (entre 1,74 s y 9,18 s)
- T_{20} es de 4,25 s (entre 3,64 s y 5,20 s)
- D_{50} es de 0,16 (valores entre 0 y 0,95)
- C_{80} es de -26,10 dB

Figura 7.49. Mapeo del EDT para el evento Cóctel Audi con la Estrategia 2 del sistema de telas y pilares

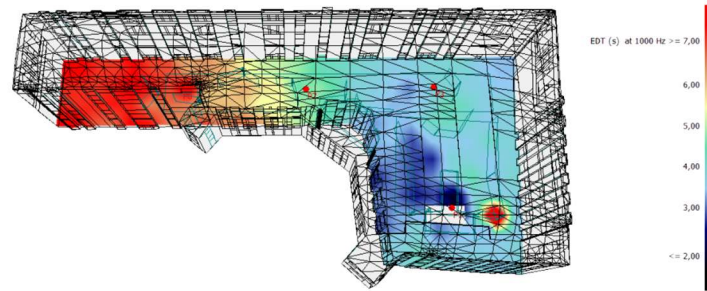


Figura 7.49

Figura 7.50. Mapeo del T_{20} para el evento Cóctel Audi con la Estrategia 2 del sistema de telas y pilares

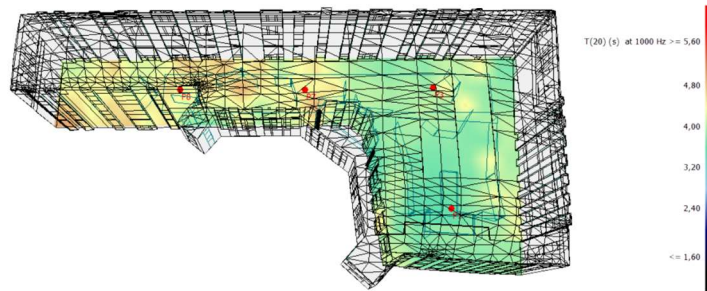


Figura 7.50

Figura 7.51. Mapeo del D_{50} para el evento Cóctel Audi con la Estrategia 2 del sistema de telas y pilares

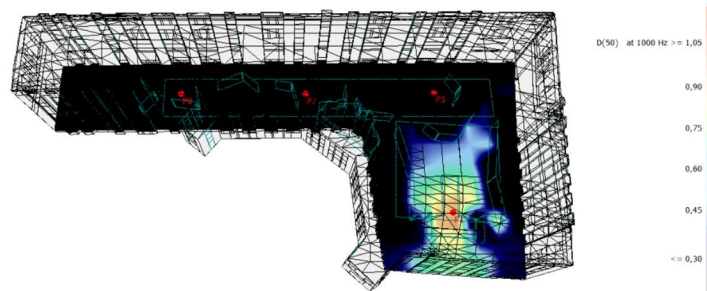


Figura 7.51

Figura 7.52. Mapeo del C_{80} para el evento Cóctel Audi con la Estrategia 2 del sistema de telas y pilares

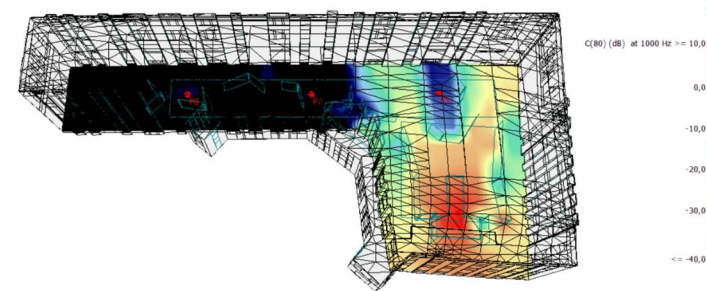
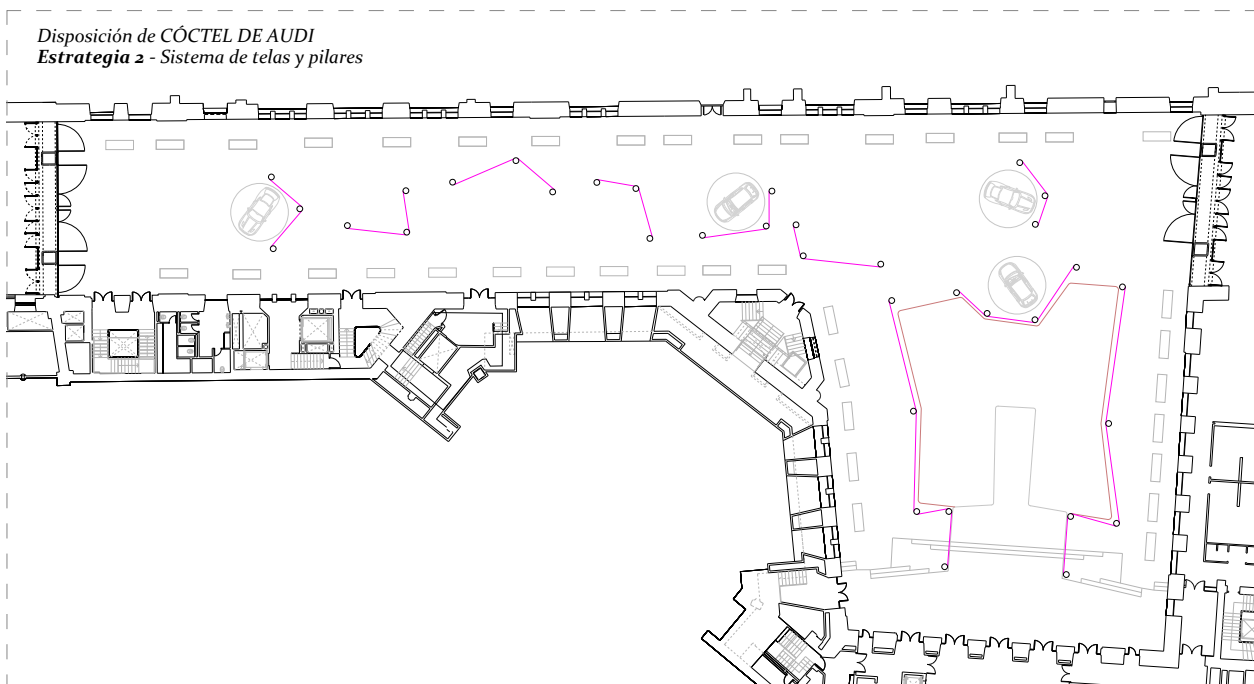
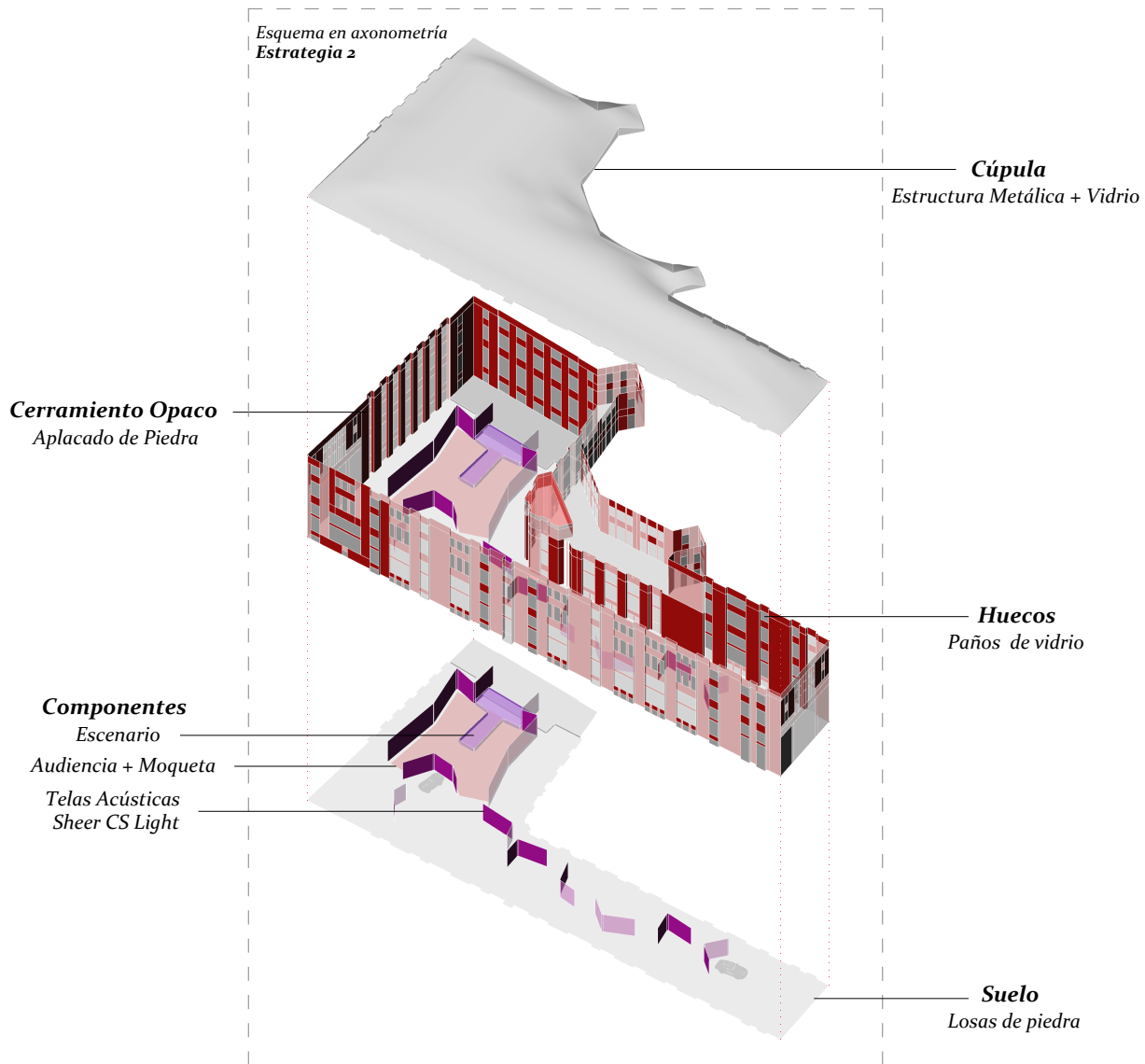


Figura 7.52



ART MADRID CINE DE VERANO CÓCTEL DE AUDI

4. "Una nueva Galería para eventos"

La estrategia más reciente no solo busca optimizar el comportamiento acústico de la Galería de Cristal, sino que también sugiere una interpretación expresiva de la arquitectura del espacio.

Es una intervención rotunda, la envolvente interior de la Galería se convierte en la clave de la nueva atmósfera. Utilizando la estructura metálica perimetral, que sustenta la cúpula de vidrio, identificada durante la visita al espacio, se propone la suspensión de un sistema continuo de tejidos absorbentes que cubren toda la superficie de fachada interior.

Esta operación se inspira directamente en la obra de Christo y Jeanne-Claude, figuras que a pesar de no ser arquitectos son muy mencionadas en el ámbito académico de la arquitectura. Sus envolventes efímeras nos han demostrado que la cobertura de un edificio no es una negación de su forma sino una manera diferente de expresarla.



Figura 7.53. Vista exterior del diseño "Wrapped Reichstag", una instalación temporal de Christo y Jeanne-Claude en Berlín, año 1995

Figura 7.53

Si ellos envolvían fachadas desde el exterior para alterar nuestra percepción del objeto arquitectónico, esta propuesta propone una operación contraria: revestir el interior con otra capa para mejorar el comportamiento acústico del gran volumen. La intervención no enmascara el espacio, lo transforma desde el interior, creando un nuevo vacío en el que el sonido, la luz y la materia se mantienen en equilibrio.

Desde el ámbito técnico, esta es la estrategia más efectiva. El hecho de cubrir toda la superficie de la fachada interior del recinto con material absorbente permite disminuir considerablemente la reverberación, optimizando todos los parámetros acústicos de estudio. Es la única alternativa que posibilita alcanzar valores óptimos de Early Decay Time (EDT), tiempo de reverberación (T20), definición de la palabra (D50) y claridad musical (C80), sin modificar la geometría de la Galería, ni la disposición espacial de los eventos que se celebran en ella.

En términos visuales, el problema se soluciona a través de tejidos translucidos colgados, descritos en el apartado 7.2, desde los más de veinte metros de altura, que garantiza siempre la imagen de la cubierta de vidrio, manteniéndola como el escenario protagonista de la Galería.

Poniendo en valor la arquitectura, esta propuesta no se reduce a solucionar un problema funcional, sino que es la evidencia de que en arquitectura se puede intervenir con firmeza. El hecho de envolver desde dentro no sólo se fundamenta en la mejora acústica, es una postura de cómo intervenir en arquitectura de valor histórico; con precisión, delicadeza y en ciertos casos, con valentía.

Además, el desarrollo de esta estrategia permite que el comportamiento acústico de la “Nueva Galería” sea el mejor de todas las estrategias desarrolladas. La siguiente tabla muestra la superficie absorbente introducida y los valores promedio de los parámetros acústicos.

	<i>ART MADRID</i>	<i>CINE DE VERANO</i>	<i>CÓCTEL AUDI</i>	
UNA NUEVA GALERÍA	<i>Superficie Absorbente (m2)</i>	<i>Paneles absorbentes</i>	-	
		<i>Textil</i>	5624	
		<i>Moqueta</i>	-	
		<i>Disposición</i>	<i>Actual</i>	
	<i>Parámetros acústicos</i>	<i>EDT (s)</i>		2,62
		<i>T20 (s)</i>		2,53
		<i>D50</i>		0,27
		<i>C80 (dB)</i>		-17,6

Tabla 7.10. Tabla resumen de la Estrategia “Todo Telas” para la NUEVA GALERÍA DE EVENTOS

Tabla 7.10

Se logra alcanzar valores dentro del rango óptimo para los parámetros de estudio, como se ve a continuación.

- EDT es de 2,62 s (entre 0,05 s y 4,42 s)
- T_{20} es de 2,53 s (entre 2,09 s y 3,41 s)
- D_{50} es de 0,27 (valores entre 0 y 0,98)
- C_{80} es de -17,6 dB.

Figura 7.54. Mapeo del EDT para la :
"Nueva Galería para eventos"

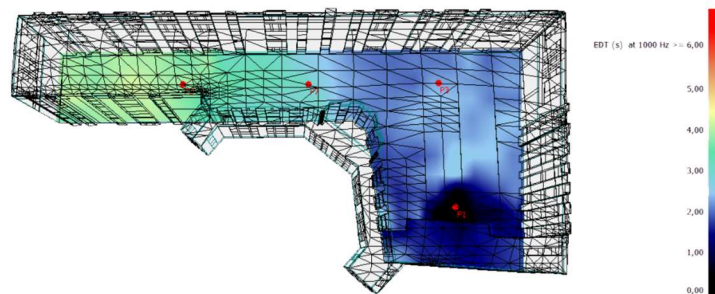


Figura 7.54

Figura 7.55. Mapeo del T_{20} para la :
"Nueva Galería para eventos"

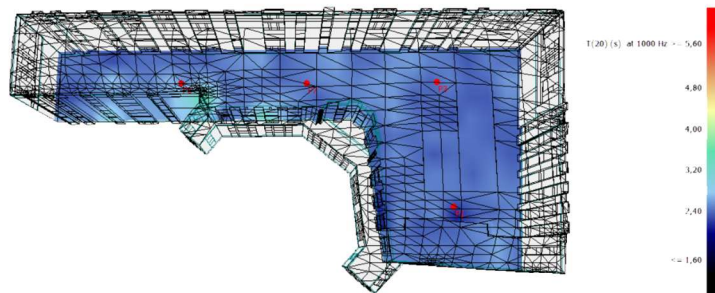


Figura 7.55

Figura 7.56. Mapeo del D_{50} para la :
"Nueva Galería para eventos"

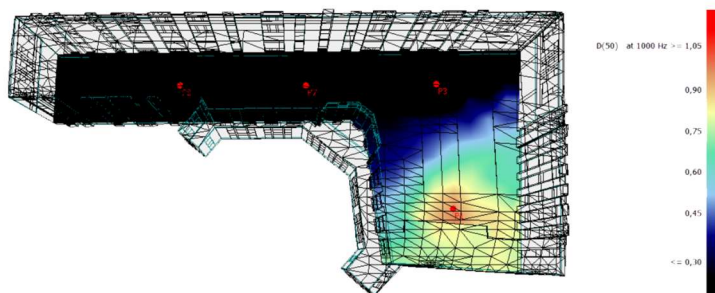


Figura 7.56

Figura 7.57. Mapeo del C_{80} para la :
"Nueva Galería para eventos"

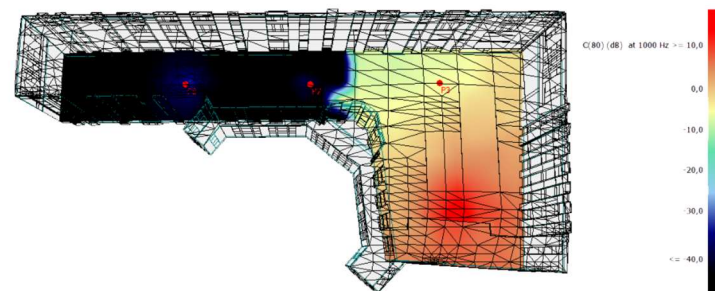
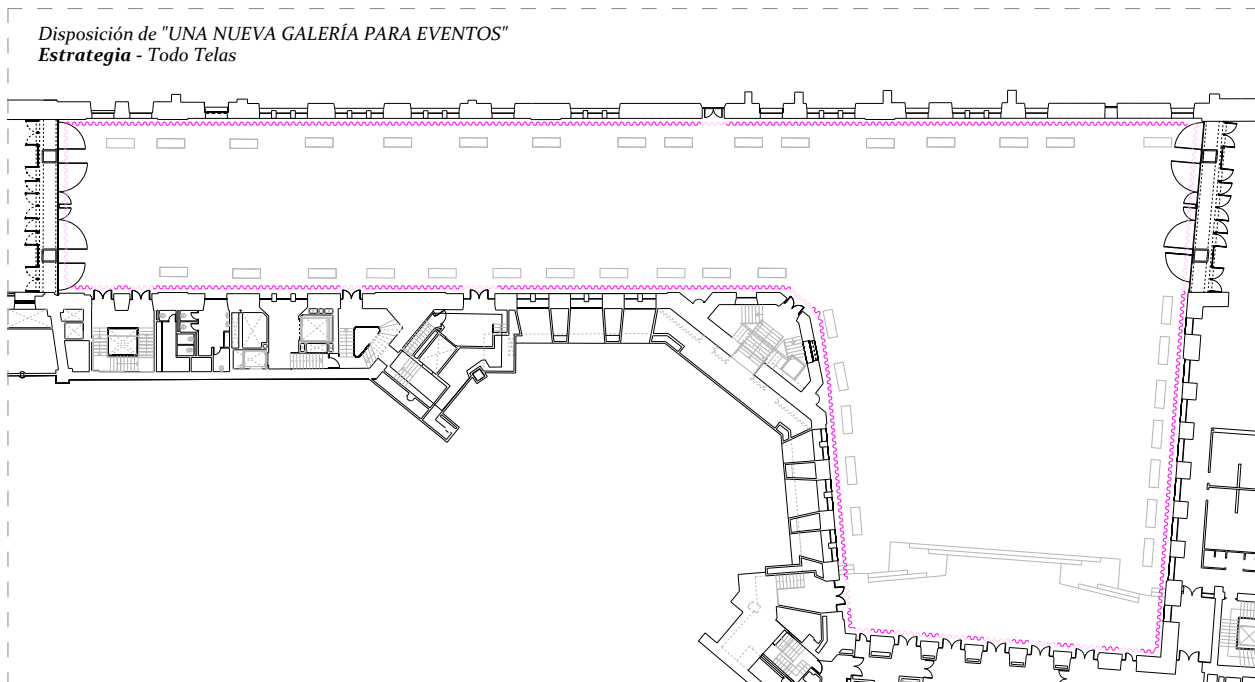
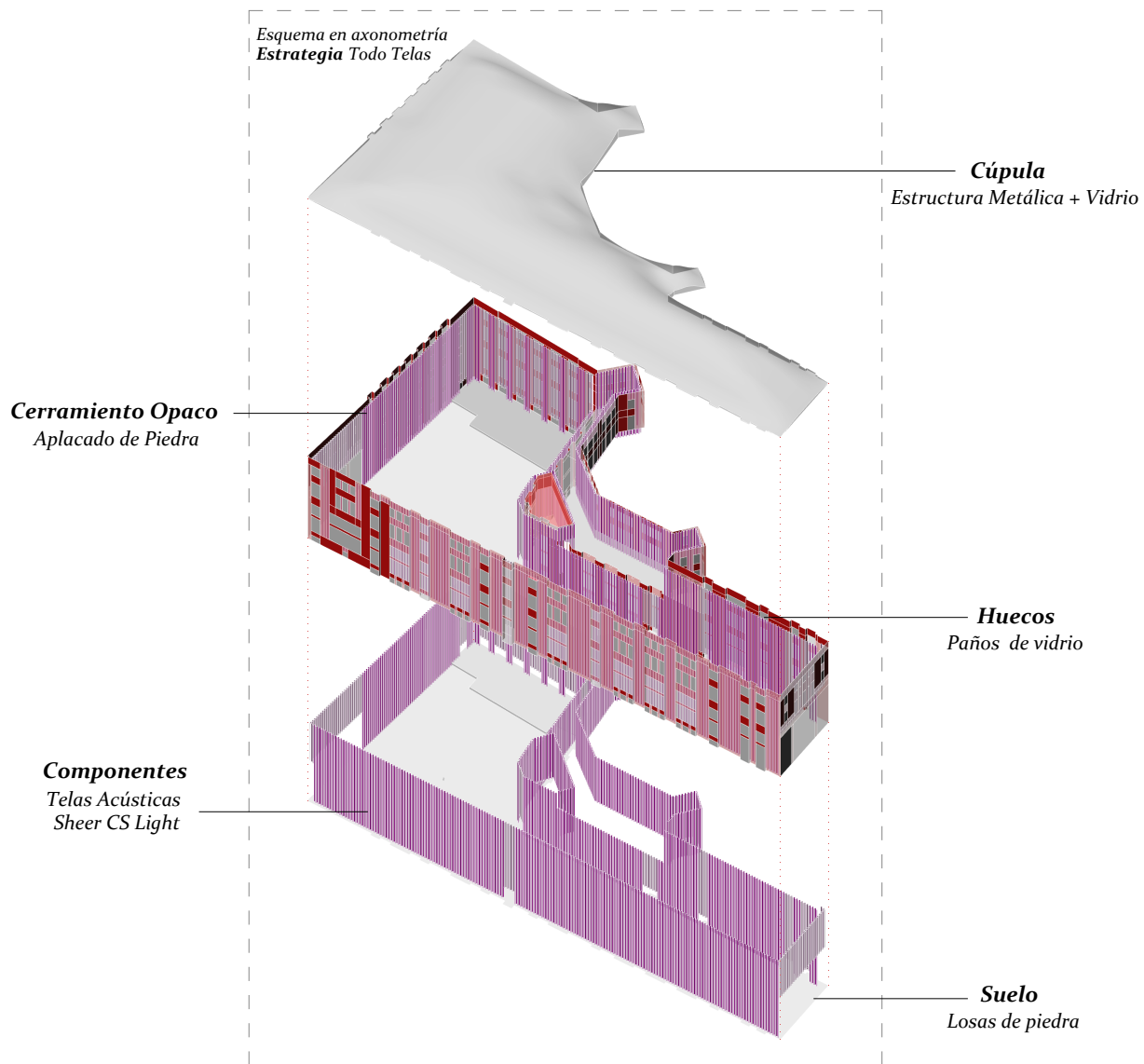


Figura 7.57



7.3. Estudio comparativo de propuestas

A continuación, se presenta un resumen y un estudio comparativo de todas las propuestas basados en los valores promedio. Se resaltan las diferencias en la distribución espacial de los eventos correspondientes a los tres tipos analizados y, además, se incluye una tabla comparativa con los valores de los principales parámetros y la superficie de material absorbente incorporada en cada caso.

Tabla de parámetros acústicos promedios para los tres tipos de eventos en el estado actual y tras las intervenciones propuestas:

	EVENTO		ART MADRID	CINE DE VERANO	CÓCTEL AUDI
P1. SISTEMA ACTUAL	Superficie Absorbente (m ²)	Paneles absorbentes	-	-	-
		Textil	-	-	-
	Disposición		Actual	Actual	Actual
	Parámetros acústicos	EDT (s)	11,6	7,73	6,45
		T20 (s)	10,86	8,25	6,2
		D50	0,04	0,17	0,17
		C80 (dB)	-39,2	-11,9	-23,1
P2. SISTEMA ACTUAL + PANELES ABSORBENTES	Superficie Absorbente (m ²)	Paneles absorbentes	1874	89,1	503,7
		Textil	-	-	-
		Moqueta	-	421	450
	Disposición		Actual	Actual	Actual
	Parámetros acústicos	EDT (s)	4,25	6,93	4,44
		T20 (s)	3,86	7,05	4,16
		D50	0,06	0,17	0,26
C80 (dB)		-35,7	-13,6	-20,9	
P3. REINTERPRETACIÓN + SIST. TELAS Y PILARES	Superficie Absorbente (m ²)	Paneles absorbentes	-	-	-
		Textil	1400	741	656
		Moqueta	-	424	305
	Disposición		Reinterpretación	Reinterpretación	Reinterpretación
	Parámetros acústicos	EDT (s)	4,06	5,14	4,84
		T20 (s)	4,23	5,32	4,25
		D50	0,22	0,26	0,26
C80 (dB)		-11,8	-7,9	-26,1	
P4. UNA NUEVA GALERÍA	Superficie Absorbente (m ²)	Paneles absorbentes	-	-	-
		Textil	-	5624	-
		Moqueta	-	-	-
	Disposición		Actual		
	Parámetros acústicos	EDT (s)	2,62		
		T20 (s)	2,53		
		D50	0,27		
C80 (dB)		-17,6			

8. Conclusiones

La Galería de Cristal del Palacio de Cibeles ejemplifica a la perfección los desafíos que enfrenta la arquitectura contemporánea al adaptar espacios históricos para nuevos usos distintos a los originalmente concebidos. Este espacio multifuncional, cubierto por una imponente bóveda acristalada de 30 metros de altura y formado por casi 2.000 cristales triangulares es un referente en la reutilización de patrimonio arquitectónico.

En este Trabajo Fin de Grado, se ha abordado una investigación que combina la técnica del análisis acústico con la sensibilidad arquitectónica teniendo en cuenta los valores identitarios del edificio. Con las mediciones in situ, el levantamiento del modelo, su posterior validación y la simulación de propuestas en ODEON, se ha podido concluir que el comportamiento acústico y por tanto, los parámetros de estudio se encuentran muy alejados de los valores considerados óptimos.

Esto, ha dado lugar al desarrollo de estrategias, que ligan la espacialidad del espacio con la materialidad de su interior. Se han utilizado materiales modulares, de instalación sencilla y por tanto, efímeros, como son los paneles absorbentes, textiles acústicos y moquetas. Estas propuestas han permitido desplegar el potencial artístico propio del diseño, sin comprometer el valor patrimonial ni la monumentalidad de la Galería. Algunas de estas estrategias se inspiran en artistas, comúnmente mencionados en la carrera como Christo y Jeanne-Claude, reinterpretando sus intervenciones como herramientas para el diseño de alguna de las propuestas.

La necesidad de preservar la integridad histórica del espacio ha limitado las posibilidades de intervención, obligando a buscar un equilibrio entre la innovación y la conservación patrimonial. En este contexto, se ha profundizado en el uso de unas herramientas de simulación acústica, que, especialmente cuando es posible validar el modelo, permiten al arquitecto explorar con facilidad diferentes propuestas y enfoques antes de intervenir físicamente en el espacio. La acústica virtual es una herramienta muy útil para el análisis y la optimización acústica de recintos.

Sin embargo, la eficacia de estas herramientas depende en gran medida de la calidad de los datos de partida, la validación de los modelos y la disponibilidad de información precisa sobre los materiales originales, aspectos complicados a veces de abordar en edificios históricos. A pesar de esto, la simulación acústica facilita la toma de decisiones. La integración de la acústica virtual en el proceso de diseño abre nuevas posibilidades para el arquitecto.

En conjunto, las estrategias demuestran que es posible combinar la riqueza patrimonial de la Galería de Cristal con una mejora de las condiciones acústicas en los eventos que allí se celebran. En este sentido, la arquitectura no se limita a ser el espacio donde tienen lugar los eventos, sino que participa en su mejora. Este trabajo demuestra que integrar criterios acústicos en el diseño no solo mejorará la acústica del espacio, sino que es una forma diferente de encarar un proceso proyectual y, por tanto, de hacer arquitectura.

9. Bibliografía

- Alonso Pereira, José Ramón. (1980). *El Palacio de Comunicaciones en la arquitectura madrileña*. Villa de Madrid.
- Archdaily. *L35 Architects sobre la remodelación del Estadio Santiago Bernabéu, a pocos meses de finalizar*. <https://www.archdaily.cl/cl>
- Avilés López, Rodrigo y Perera Martín, Rocío. (2017). *Manual de acústica ambiental y arquitectónica*. Paraninfo.
- AA.VV. (2001). *Antonio Palacios, constructor de Madrid*. La librería.
- Carbajo Rebollo, Andrea. (2021). Centro de Arte Reina Sofía: El Patio Nouvel como espacio acústico. [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. E-Archivo. <https://oa.upm.es/66380/>
- Carrión Isbert, Antoni. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- CentroCentro. *Galería de Cristal*. <https://www.centrocentro.org/la-sede/espacios/galeria-de-cristal?utm>
- Diario de Madrid. *Tramas, la mirada personal de David Bestué sobre el palacio de Cibeles y su historia*. <https://diario.madrid.es/blog/notas-de-prensa/tramas-la-mirada-personal-de-david-bestue-sobre-el-palacio-de-cibeles-y-su-historia/>
- González Alonso, Hernán. (2023). *De seis a dos segundos: acústica efímera del Palacio de Cristal*. [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. E-Archivo. <https://oa.upm.es/72512/>
- National Geographic España. (2023) Megaestructuras: El Bernabéu del siglo XXI. [Vídeo]. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com.es/>
- Navascués Palacio, Pedro. (1962). *Jaime Marquet y la Antigua Casa de Correos de Madrid*. Villa de Madrid (n.24), pp. 68-70
- Portal de cultura y ocio del Ayuntamiento de Madrid. *Museo de historia de Madrid*. <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Cultura-ocio-y-deporte/Cultura-y-ocio/Museo-de-Historia-de-Madrid/?vgnextfmt=default&vgnextoid=ab18a1ead63abo10VgnVC>

[M100000d90ca8coRCRD&vgnnextchannel=c937f073808fe410VgnVCM2000000c205a0aRCRD&idCapitulo=10779295](https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Cultura-ocio-y-deporte/Cultura-y-ocio/CentroCentro/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=5ff519cd7bcee210VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=c937f073808fe410VgnVCM2000000c205a0aRCRD&idCapitulo=10779295)

Portal de cultura y ocio del Ayuntamiento de Madrid. *CentroCentro*.
<https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Cultura-ocio-y-deporte/Cultura-y-ocio/CentroCentro/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=5ff519cd7bcee210VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=c937f073808fe410VgnVCM2000000c205a0aRCRD>

Web de Estadio Santiago Bernabéu.
<https://www.nuevoestadiobernabeu.com/>

Web Odeon Room Acoustics Software. <https://odeon.dk/>

Web de Ecophon. <https://www.ecophon.com/es-lat/>

Web de Showtex. <https://www.showtex.com/es>

Procedencia de figuras y tablas

Son de elaboración propia aquellas figuras o tablas NO mostradas a continuación.

Capítulo 2

Figura 2.1. <https://www.archdaily.cl/cl/1018697/l35-architects-esta-cerca-de-terminar-la-remodelacion-del-estadio-santiago-bernabeu/668e5f6a1f854a017cb7c46e-the-remodeling-of-santiago-bernabeu-stadium-by-l35-architects-nears-completion-photo>

Figura 2.2. <https://www.marca.com/futbol/real-madrid/2021/03/06/60435f0b22601d422c8b4625.html>

Figura 2.3. <https://www.iasoglobal.com/es/historias/cubierta-retractil-santiago-bernabeu/>

Figura 2.4. a Figura 2.7.

<https://patrimoniopaisaje.madrid.es/portales/monumenta/es/Monumentos-y-Edificios-Singulares/Edificios-singulares/Museo-de-Historia-de-Madrid-Museo-Municipal-de-Madrid/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=4208f7d9560a4510f7d9560a45102e085a0aRCRD&vgnnextchannel=83bc3cb702aa4510VgnVCM1000008a4a900aRCRD>

Figuras de 2.9. a 2.16. y de 2.18. a 2.19. Carrión Isbert, Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Universidad Politécnica de Catalunya

Figura 2.17. Avilés López, Rodrigo y Perera Martín, Rocío. (2017). *Manual de acústica ambiental y arquitectónica*. Paraninfo.

Capítulo 3

Figura 3.1. <https://www.centrocentro.org/centrocentro/prensa/centrocentro-dedica-una-exposicion-permanente-la-historia-del-palacio-de>

Figura 3.2. <https://diario.madrid.es/blog/notas-de-prensa/tramas-la-mirada-personal-de-david-bestue-sobre-el-palacio-de-cibeles-y-su-historia/>

Figura 3.3. <https://patrimoniopaisaje.madrid.es/portales/monumenta/es/Monumentos-y-Edificios-Singulares/Edificios-singulares/Palacio-de-Comunicaciones-Palacio-de-Cibeles-Ayuntamiento-de-Madrid-/?vgnnextchannel=83bc3cb702aa4510VgnVCM1000008a4a900aRCRD&vgnnextfmt=default&vgnnextoid=4128f7d9560a4510f7d9560a45102e085a0aRCRD>

Figura 3.4.

<https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Actualidad/Noticias/CentroCentro-dedica-una-exposicion-permanente-a-la-historia-del-Palacio-de-Cibeles/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=f4827ee81852c810VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnnextchannel=a12149fa40ec9410VgnVCM100000171f5a0aRCRD>

Figura 3.5 <https://patrimoniopaisaje.madrid.es/portales/monumenta/es/Monumentos-y-Edificios-Singulares/Edificios-singulares/Palacio-de-Comunicaciones-Palacio-de-Cibeles-Ayuntamiento-de-Madrid-/?vgnnextchannel=83bc3cb702aa4510VgnVCM1000008a4a900aRCRD&vgnnextfmt=default&vgnnextoid=4128f7d9560a4510f7d9560a45102e085a0aRCRD>

Figura 3.6. <https://behindagreatproject.com/es/structure/cubierta-palacio-cibeles/>

Figura 3.7. <https://micecatering.com/espacio/palacio-de-cibeles/>

Figura 3.8. <https://www.experimenta.es/eventos/art-madrid-2022-se-celebrara-en-la-galeria-de-cristal-del-palacio-de-cibeles/>

Figura 3.9. <https://diario.madrid.es/blog/notas-de-prensa/el-palacio-de-cibeles-recibe-a-los-mejores-deportistas-del-mundo-al-acoger-por-primera-vez-en-su-historia-los-premios-laureus-en-su-250-aniversario/>

Figura 3.10. <https://www.centrocentro.org/centrocentro/prensa/centrocentro-dedica-una-exposicion-permanente-la-historia-del-palacio-de>

Figura 3.11. <https://madridfree.org/cibeles-de-cine-2023/>

Figura 3.12. <https://micecatering.com/espacio/palacio-de-cibeles/>

Capítulo 5

Figura 5.2. <https://tascam.com/>

Capítulo 7

Figuras 7.1 y 7.2. <https://www.ecophon.com/es-lat/products/wall-applications/akusto/akusto-wall-c-extra-bass/>

Figuras 7.4 y 7.6. <https://www.showtex.com/es/productos/telas-ignifugas/tejidos-acusticos/acoustic-sheer-cs-colour>

Figura 7.5. <https://nuzzolesepilar.myportfolio.com/girona>

Figura 7.12. <https://www.experimenta.es/eventos/art-madrid-2022-se-celebrara-en-la-galeria-de-cristal-del-palacio-de-cibeles/>

Figura 7.25. <https://madridfree.org/cibeles-de-cine-2023/>

Figura 7.40. https://www.larazon.es/motor/aparicio-audi-movilidad-debe-ser-premium-sostenible-conectada-autonoma_20231026653a20f332dc750001454876.html

Figura 7.53. <https://www.britannica.com/topic/Christo-and-Jeanne-Claude>

Anexo

A continuación, se adjuntan las tablas de datos procesadas y extraídas de las grabaciones tomadas in situ. Estas tablas, han sido fundamentales en el proceso de elaboración de gráficas insertadas en el desarrollo del Trabajo Fin de Grado.

Fuente 1

Receptor 1	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	10,65	12,41	12,89	11,19	7,56	4,83	12,04 s
T20 [s]	10,38	12,61	12,84	11,02	8,24	5,98	11,93 s
C80 [dB]	-10,22	-12,14	-7,89	-1,32	-1,11	0,25	-4,60 dB
D50 [-]	0,09	0,06	0,14	0,43	0,44	0,52	0,28

Receptor 2	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,26	12,44	12,59	11,48	7,63	4,72	12,04 s
T20 [s]	14,18	12,91	12,88	11,63	8,13	5,73	12,25 s
C80 [dB]	-7,69	-10,16	-4,13	-5,46	0,34	0,34	-4,79 dB
D50 [-]	0,15	0,09	0,28	0,22	0,52	0,52	0,25

Receptor 3	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,36	12,51	12,91	11,22	8,11	5,70	12,07 s
T20 [s]	21,88	13,58	12,90	11,30	8,32	6,37	12,10 s
C80 [dB]	-15,04	-15,75	-13,34	-12,10	-11,65	-9,38	-12,72 dB
D50 [-]	0,03	0,03	0,05	0,06	0,07	0,10	0,06

Receptor 4	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	10,96	12,97	12,35	11,11	8,38	4,77	11,73 s
T20 [s]	7,50	11,99	11,92	11,82	8,61	5,60	11,87 s
C80 [dB]	-15,16	-13,08	-12,99	-9,98	-3,92	-0,41	-11,49 dB
D50 [-]	0,03	0,05	0,05	0,10	0,30	0,48	0,07

Receptor 5	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,52	12,66	12,61	11,38	8,07	5,05	12,00 s
T20 [s]	11,72	13,36	12,32	12,27	8,19	5,96	12,29 s
C80 [dB]	-7,86	-10,63	-10,47	-11,52	-4,96	-2,66	-10,99 dB
D50 [-]	0,14	0,08	0,09	0,07	0,25	0,36	0,08

Receptor 6	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,18	12,87	12,59	10,96	8,22	5,88	11,78 s
T20 [s]	12,01	13,54	13,23	11,25	8,43	6,48	12,24 s
C80 [dB]	-14,44	-16,04	-15,27	-9,05	-4,96	-4,59	-12,16 dB
D50 [-]	0,03	0,02	0,03	0,11	0,25	0,26	0,07

Receptor 14	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,11	12,52	13,48	11,30	9,15	5,85	12,39 s
T20 [s]	14,56	12,83	12,90	10,57	8,81	5,62	11,74 s
C80 [dB]	-25,67	-34,71	-37,84	-39,02	-46,04	-41,47	-38,43 dB
D50 [-]	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	EDT		T20		C80		D50
R1	12,036	s	11,929	s	-4,6025	dB	0,2825
R2	12,03625	s	12,25175	s	-4,7925	dB	0,25
R3	12,067	s	12,0985	s	-12,72	dB	0,055
R4	11,72825	s	11,86775	s	-11,485	dB	0,0725
R5	11,997	s	12,2925	s	-10,9925	dB	0,0775
R6	11,77525	s	12,23775	s	-12,1575	dB	0,07
R7	11,64825	s	12,04425	s	-14,1025	dB	0,0375
R8	11,955	s	12,469	s	-34,5675	dB	0
R9	11,37775	s	12,041	s	-18,4	dB	0,0125
R10	12,32875	s	14,792	s	-17,5875	dB	0,01
R11	12,32875	s	12,73525	s	-16,315	dB	0,01
R12	12,50075	s	14,618	s	-28,4125	dB	0,0025
R13	12,27825	s	11,537	s	-39,625	dB	0
R14	12,3865	s	11,739	s	-38,425	dB	0

Fuente 2

Receptor 1	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	9,52	11,28	11,25	9,99	7,39	4,69	10,62 s
T20 [s]	8,64	11,83	12,30	11,23	8,08	5,91	11,77 s
C80 [dB]	-10,26	-3,26	-2,68	-1,37	-0,16	0,26	-2,02 dB
D50 [-]	0,14	0,27	0,34	0,40	0,48	0,50	0,37

Receptor 2	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,09	13,31	12,85	10,96	8,35	4,56	11,90 s
T20 [s]	9,47	12,40	13,33	11,39	8,64	5,58	12,36 s
C80 [dB]	-13,49	-10,61	-8,90	-5,49	-4,01	0,32	-7,19 dB
D50 [-]	0,10	0,03	0,05	0,18	0,24	0,41	0,11

Receptor 3	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	10,25	10,80	11,09	10,10	7,62	3,29	10,59 s
T20 [s]	10,94	12,46	12,71	11,03	8,51	5,36	11,87 s
C80 [dB]	-10,92	-15,44	-10,05	-4,33	-2,08	2,62	-7,19 dB
D50 [-]	0,08	0,03	0,09	0,26	0,33	0,50	0,17

Receptor 4	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	9,92	11,34	11,79	9,96	7,26	4,28	10,88 s
T20 [s]	9,94	12,41	12,63	11,77	8,12	6,03	12,20 s
C80 [dB]	-16,00	-14,68	-14,75	-10,69	-3,43	0,04	-12,72 dB
D50 [-]	0,03	0,03	0,03	0,07	0,31	0,48	0,05
Receptor 5	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	10,52	11,91	12,38	10,54	8,21	5,08	11,46 s
T20 [s]	8,63	12,19	13,22	11,86	8,71	5,71	12,54 s
C80 [dB]	-14,96	-12,43	-12,24	-8,77	-6,77	-1,20	-10,50 dB
D50 [-]	0,08	0,04	0,02	0,09	0,15	0,37	0,05
Receptor 6	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	10,32	11,72	12,20	11,20	8,61	5,59	11,70 s
T20 [s]	10,10	11,96	12,61	11,42	9,44	9,12	12,02 s
C80 [dB]	-14,72	-11,41	-14,21	-9,20	-6,50	-1,22	-11,71 dB
D50 [-]	0,07	0,06	0,03	0,10	0,14	0,38	0,06
Receptor 7	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,66	11,65	12,14	10,49	7,36	4,80	11,31 s
T20 [s]	8,96	12,05	12,99	11,40	8,14	6,13	12,19 s
C80 [dB]	-19,02	-15,17	-15,81	-14,86	-6,41	-4,00	-15,33 dB
D50 [-]	0,04	0,02	0,02	0,03	0,13	0,22	0,02
Receptor 8	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	8,76	12,27	12,11	11,02	8,22	4,84	11,57 s
T20 [s]	7,15	11,63	11,43	10,17	8,64	5,89	10,80 s
C80 [dB]	-13,94	-8,56	-13,02	-12,72	-4,50	-1,30	-12,87 dB
D50 [-]	0,06	0,09	0,02	0,04	0,28	0,42	0,03
Receptor 9	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	12,20	12,94	13,36	11,58	8,39	5,53	12,47 s
T20 [s]	11,80	12,39	13,14	11,60	8,22	6,26	12,37 s
C80 [dB]	-19,68	-15,14	-16,24	-15,27	-5,28	-1,18	-15,76 dB
D50 [-]	0,02	0,03	0,02	0,02	0,22	0,41	0,02
Receptor 10	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	5,68	14,56	14,12	12,36	8,84	5,49	13,24 s
T20 [s]	11,42	13,48	13,61	13,05	9,40	6,38	13,33 s
C80 [dB]	-35,34	-23,32	-25,29	-23,71	-16,45	-8,23	-24,50 dB
D50 [-]	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03	0,24	0,01

Receptor 11	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	10,26	13,27	13,51	12,36	9,14	5,85	12,93 s
T20 [s]	11,44	12,36	12,85	11,52	8,44	6,52	12,19 s
C80 [dB]	-28,94	-27,13	-29,68	-27,57	-28,53	-25,42	-28,62 dB
D50 [-]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,05	0,01

Receptor 12	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,77	13,24	13,53	12,77	8,65	6,10	13,15 s
T20 [s]	9,57	11,98	12,68	12,63	8,76	6,51	12,66 s
C80 [dB]	-30,80	-21,62	-20,29	-15,67	-12,07	-9,29	-17,98 dB
D50 [-]	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00

Receptor 13	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	9,52	13,05	13,63	12,29	8,94	6,43	12,96 s
T20 [s]	9,98	12,74	12,42	11,04	8,40	6,58	11,73 s
C80 [dB]	-27,59	-36,27	-41,74	-39,98	-46,38	-42,29	-40,86 dB
D50 [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Receptor 14	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	25,02	12,84	13,73	12,87	9,42	6,67	13,30 s
T20 [s]	16,47	12,65	12,78	12,37	9,03	6,77	12,58 s
C80 [dB]	-26,53	-34,61	-40,04	-38,67	-41,20	-39,82	-39,35 dB
D50 [-]	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	EDT	T20	C80	D50
R1	10,6205 s	11,76625 s	-2,0225 dB	0,3675
R2	11,90475 s	12,36125 s	-7,1925 dB	0,11
R3	10,59425 s	11,86975 s	-7,19 dB	0,17
R4	10,87525 s	12,2015 s	-12,72 dB	0,0475
R5	11,4595 s	12,53975 s	-10,5025 dB	0,0525
R6	11,698 s	12,0175 s	-11,705 dB	0,06
R7	11,31275 s	12,19175 s	-15,3325 dB	0,02
R8	11,5665 s	10,79975 s	-12,87 dB	0,03
R9	12,4705 s	12,3675 s	-15,755 dB	0,02
R10	13,23875 s	13,33025 s	-24,5 dB	0,005
R11	12,934 s	12,18525 s	-28,6225 dB	0,005
R12	13,153 s	12,659 s	-17,98 dB	0
R13	12,958 s	11,73 s	-40,86 dB	0
R14	13,29875 s	12,57575 s	-39,35 dB	0

Fuente 3

Receptor 1	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	12,11	13,36	12,80	11,57	7,73	5,35	12,19 s
T20 [s]	11,66	12,45	12,89	11,96	8,05	5,73	12,42 s
C80 [dB]	-10,16	-8,48	-13,22	-10,36	-2,44	-0,18	-11,79 dB
D50 [-]	0,17	0,05	0,03	0,06	0,33	0,44	0,05
Receptor 2	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	9,73	12,52	12,78	11,64	7,86	5,55	12,21 s
T20 [s]	10,64	13,26	12,83	12,05	8,32	6,10	12,44 s
C80 [dB]	-11,68	-11,66	-12,58	-6,11	0,76	-0,23	-9,34 dB
D50 [-]	0,11	0,03	0,03	0,18	0,50	0,41	0,10
Receptor 3	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	10,70	13,05	12,52	11,02	8,02	4,73	11,77 s
T20 [s]	8,75	12,03	12,69	11,85	8,61	5,88	12,27 s
C80 [dB]	-7,11	-9,91	-9,54	-5,34	-3,32	-1,49	-7,44 dB
D50 [-]	0,18	0,06	0,06	0,21	0,23	0,30	0,13
Receptor 4	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	6,62	13,50	12,86	10,12	8,40	4,89	11,49 s
T20 [s]	0,02	4,57	13,28	8,33	8,21	5,66	10,80 s
C80 [dB]	--	-7,11	-6,56	-7,05	-4,58	-0,22	-6,80 dB
D50 [-]	1,00	0,09	0,12	0,16	0,22	0,36	0,14
Receptor 5	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,33	12,97	12,39	10,58	7,47	4,89	11,48 s
T20 [s]	11,75	13,24	13,51	12,44	7,98	6,11	12,97 s
C80 [dB]	-4,64	-3,98	-0,92	-0,19	-1,52	2,26	-0,55 dB
D50 [-]	0,29	0,22	0,44	0,48	0,38	0,60	0,46
Receptor 6	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	9,87	11,66	12,05	11,11	7,77	4,43	11,58 s
T20 [s]	9,47	12,51	12,95	11,54	8,49	5,59	12,24 s
C80 [dB]	-5,98	-5,74	-2,11	1,83	3,88	1,93	-0,14 dB
D50 [-]	0,24	0,21	0,37	0,55	0,67	0,47	0,46
Receptor 7	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	9,51	11,78	12,35	10,70	7,85	4,50	11,52 s
T20 [s]	8,65	12,33	12,82	11,49	8,52	5,46	12,15 s
C80 [dB]	-8,36	-6,73	-2,11	-1,69	-1,32	2,54	-1,90 dB
D50 [-]	0,41	0,14	0,32	0,38	0,41	0,62	0,35

Receptor 8	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,30	13,03	12,89	11,12	8,21	4,94	12,01 s
T20 [s]	12,23	12,47	13,58	10,42	8,52	5,64	12,00 s
C80 [dB]	-9,43	-8,87	-9,01	-4,81	-3,36	0,93	-6,91 dB
D50 [-]	0,28	0,10	0,10	0,23	0,30	0,54	0,17
Receptor 9	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	12,96	12,59	12,78	11,93	8,51	5,66	12,36 s
T20 [s]	27,06	12,34	13,56	12,17	8,58	6,30	12,86 s
C80 [dB]	-8,02	-6,71	-9,74	-9,96	-3,64	-1,65	-9,85 dB
D50 [-]	0,17	0,16	0,09	0,08	0,30	0,39	0,08
Receptor 10	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	13,43	12,48	13,28	12,28	8,14	6,28	12,78 s
T20 [s]	9,99	12,99	13,31	12,31	8,19	6,29	12,81 s
C80 [dB]	-10,97	-10,57	-10,51	-10,76	-2,00	-1,41	-10,63 dB
D50 [-]	0,17	0,07	0,08	0,07	0,37	0,40	0,07
Receptor 11	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	10,92	14,14	14,58	11,99	9,14	6,06	13,28 s
T20 [s]	9,91	17,09	31,16	18,33	8,69	6,07	24,75 s
C80 [dB]	-13,15	-10,15	-11,24	-11,67	-5,27	-4,16	-11,45 dB
D50 [-]	0,07	0,07	0,06	0,05	0,22	0,26	0,05
Receptor 12	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	11,76	13,11	13,50	11,93	9,27	6,06	12,71 s
T20 [s]	10,48	11,62	12,27	10,66	9,19	6,17	11,46 s
C80 [dB]	-16,97	-15,89	-14,13	-15,21	-8,56	-3,84	-14,67 dB
D50 [-]	0,03	0,02	0,03	0,02	0,11	0,25	0,03
Receptor 13	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	13,29	12,82	13,51	12,71	9,27	6,99	13,11 s
T20 [s]	8,59	13,48	13,03	13,59	10,24	7,32	13,31 s
C80 [dB]	-27,69	-34,74	-38,23	-35,87	-42,64	-40,27	-37,05 dB
D50 [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Receptor 14	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	14,14	13,14	13,73	12,52	8,74	6,88	13,12 s
T20 [s]	20,12	12,63	13,09	10,55	7,92	6,32	11,82 s
C80 [dB]	-22,22	-24,92	-26,40	-23,17	-25,53	-25,66	-24,78 dB
D50 [-]	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,05	0,01

	EDT		T20		C80		D50
R1	12,1865 s		12,42375 s		-11,785 dB		0,045
R2	12,211 s		12,43875 s		-9,34 dB		0,1
R3	11,7715 s		12,26775 s		-7,4375 dB		0,13
R4	11,4905 s		10,8045 s		-6,8025 dB		0,1375
R5	11,48425 s		12,974 s		-0,5525 dB		0,455
R6	11,57925 s		12,244 s		-0,14 dB		0,46
R7	11,52475 s		12,15275 s		-1,8975 dB		0,35
R8	12,00625 s		12,002 s		-6,905 dB		0,165
R9	12,356 s		12,86325 s		-9,845 dB		0,0825
R10	12,782 s		12,8095 s		-10,6325 dB		0,07
R11	13,2835 s		24,74825 s		-11,4525 dB		0,0525
R12	12,713 s		11,463 s		-14,6675 dB		0,025
R13	13,111 s		13,3115 s		-37,045 dB		0
R14	13,1245 s		11,82 s		-24,7825 dB		0,01

Fuente 4

Receptor 1	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	6,75	13,01	13,48	12,32	8,99	6,00	12,901 s
T20 [s]	2,17	13,01	13,94	11,14	8,37	6,30	12,539 s
C80 [dB]	-17,28	-36,00	-40,76	-37,42	-44,14	-42,52	-39,09 dB
D50 [-]	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0

Receptor 2	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	13,20	13,79	13,07	11,50	9,15	6,41	12,28525 s
T20 [s]	16,18	11,58	13,78	11,72	9,13	6,63	12,748 s
C80 [dB]	-21,18	-15,23	-17,67	-15,10	-11,33	-8,86	-16,3825 dB
D50 [-]	0,05	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,005

Receptor 3	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	13,19	13,95	13,84	12,56	8,81	6,73	13,19725 s
T20 [s]	9,68	12,04	13,34	12,35	8,25	6,42	12,84525 s
C80 [dB]	-23,57	-26,02	-28,44	-27,90	-27,90	-24,51	-28,165 dB
D50 [-]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,10	0,005

Receptor 4	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA
EDT [s]	13,26	13,59	13,93	12,90	8,81	6,70	13,41675 s
T20 [s]	18,34	14,10	12,95	12,31	8,73	6,44	12,62675 s
C80 [dB]	-12,04	-13,90	-15,67	-15,96	-10,41	-6,95	-15,81 dB
D50 [-]	0,08	0,03	0,02	0,02	0,06	0,14	0,02

Receptor 5	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	11,97	14,11	14,12	12,42	8,60	6,49	13,2705	s
T20 [s]	11,41	12,30	12,50	12,01	8,19	6,32	12,25425	s
C80 [dB]	-12,02	-12,38	-12,92	-14,67	-6,34	-6,09	-13,7925	dB
D50 [-]	0,08	0,03	0,03	0,02	0,16	0,17	0,025	
Receptor 6	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	12,52	13,35	14,01	12,51	9,18	6,55	13,26025	s
T20 [s]	13,20	12,90	12,81	11,94	8,58	6,62	12,37475	s
C80 [dB]	-14,60	-14,09	-12,00	-14,33	-7,76	-6,17	-13,16	dB
D50 [-]	0,06	0,03	0,03	0,02	0,12	0,16	0,0225	
Receptor 7	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	12,26	13,70	13,95	12,20	8,65	6,15	13,07625	s
T20 [s]	8,85	12,66	13,07	11,85	8,32	6,24	12,46375	s
C80 [dB]	-7,57	-7,95	-9,60	-11,47	-6,30	-2,61	-10,5325	dB
D50 [-]	0,22	0,13	0,09	0,06	0,17	0,32	0,07	
Receptor 8	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	12,37	13,01	13,65	11,73	8,73	5,59	12,68975	s
T20 [s]	14,25	12,68	13,77	11,10	8,54	6,18	12,4385	s
C80 [dB]	-11,39	-10,75	-12,37	-5,26	-4,95	-0,34	-8,815	dB
D50 [-]	0,16	0,06	0,04	0,22	0,22	0,45	0,1275	
Receptor 9	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	9,42	12,33	12,93	10,75	8,18	4,52	11,83875	s
T20 [s]	9,27	11,38	11,27	12,43	8,43	5,83	11,84725	s
C80 [dB]	-6,97	-6,40	-8,16	-4,72	-4,26	0,87	-6,435	dB
D50 [-]	0,25	0,15	0,10	0,22	0,25	0,50	0,16	
Receptor 10	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	9,29	11,17	12,05	10,75	6,98	3,55	11,4025	s
T20 [s]	8,87	12,81	12,89	11,96	8,13	5,49	12,4245	s
C80 [dB]	-6,29	-8,15	-5,26	-4,46	1,02	3,06	-4,8575	dB
D50 [-]	0,32	0,10	0,20	0,23	0,50	0,53	0,21	
Receptor 11	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	6,36	10,82	9,95	8,79	5,74	2,88	9,371	s
T20 [s]	9,41	15,15	15,93	14,75	8,07	5,27	15,342	s
C80 [dB]	-10,03	-0,05	0,41	0,71	2,26	3,28	0,56	dB
D50 [-]	0,40	0,45	0,46	0,48	0,57	0,61	0,47	

Receptor 12	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	8,42	11,67	11,22	10,05	6,40	3,68	10,63675	s
T20 [s]	7,86	13,38	12,47	12,24	7,53	5,23	12,353	s
C80 [dB]	-12,43	-1,46	-0,52	-1,01	-1,11	2,21	-0,76	dB
D50 [-]	0,46	0,40	0,44	0,41	0,38	0,52	0,4225	

Receptor 13	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	8,85	12,58	12,35	10,23	7,39	3,55	11,2885	s
T20 [s]	7,64	13,50	15,51	11,15	8,32	5,26	13,32875	s
C80 [dB]	-11,33	-6,79	-7,51	-3,60	-2,84	4,87	-5,555	dB
D50 [-]	0,32	0,13	0,13	0,26	0,29	0,72	0,1925	

Receptor 14	125	250	500	1000	2000	4000	MEDIA	
EDT [s]	9,60	11,62	11,42	10,55	6,90	4,47	10,9845	s
T20 [s]	10,18	13,70	14,94	12,51	8,86	5,50	13,7275	s
C80 [dB]	-6,37	-6,76	-8,69	-7,27	-4,94	-1,35	-7,975	dB
D50 [-]	0,34	0,15	0,09	0,13	0,20	0,33	0,1075	

	EDT	T20	C80	D50
R1	12,901 s	12,539 s	-39,09 dB	0
R2	12,28525 s	12,748 s	-16,3825 dB	0,005
R3	13,19725 s	12,84525 s	-28,165 dB	0,005
R4	13,41675 s	12,62675 s	-15,81 dB	0,02
R5	13,2705 s	12,25425 s	-13,7925 dB	0,025
R6	13,26025 s	12,37475 s	-13,16 dB	0,0225
R7	13,07625 s	12,46375 s	-10,5325 dB	0,07
R8	12,68975 s	12,4385 s	-8,815 dB	0,1275
R9	11,83875 s	11,84725 s	-6,435 dB	0,16
R10	11,4025 s	12,4245 s	-4,8575 dB	0,21
R11	9,371 s	15,342 s	0,56 dB	0,47
R12	10,63675 s	12,353 s	-0,76 dB	0,4225
R13	11,2885 s	13,32875 s	-5,555 dB	0,1925
R14	10,9845 s	13,7275 s	-7,975 dB	0,1075

Resumen de valores promedio por parámetro

<i>T</i> ₂₀	125	250	500	1000	2000	4000
<i>F</i> ₁	10,83	12,81	12,88	12,07	8,48	6,13
<i>F</i> ₂	10,32	12,32	12,76	11,61	8,61	6,34
<i>F</i> ₃	11,38	12,36	14,36	11,98	8,61	6,05
<i>F</i> ₄	10,52	12,94	13,51	12,10	8,39	5,98
Desviación estándar	0,46	0,31	0,73	0,23	0,11	0,16

<i>EDT</i>	125	250	500	1000	2000	4000
<i>F</i> ₁	10,55	12,47	12,35	11,24	8,19	5,31
<i>F</i> ₂	10,65	12,44	12,20	11,27	8,27	5,17
<i>F</i> ₃	11,17	12,86	12,50	11,46	8,30	5,47
<i>F</i> ₄	10,60	12,81	12,45	11,41	8,08	5,26
Desviación estándar	0,29	0,22	0,13	0,11	0,10	0,12

<i>D</i> ₅₀	125	250	500	1000	2000	4000
<i>F</i> ₁	0,05	0,03	0,05	0,08	0,16	0,20
<i>F</i> ₂	0,05	0,04	0,04	0,09	0,17	0,30
<i>F</i> ₃	0,23	0,09	0,12	0,18	0,30	0,37
<i>F</i> ₄	0,20	0,12	0,11	0,15	0,21	0,32
Desviación estándar	0,09	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07

<i>C</i> ₈₀ (dB)	125	250	500	1000	2000	4000
<i>F</i> ₁	-17,62	-19,00	-17,69	-17,96	-15,05	-12,88
<i>F</i> ₂	-19,85	-17,24	-17,50	-15,48	-12,12	-8,25
<i>F</i> ₃	-11,79	-11,71	-11,34	-9,95	-7,06	-5,06
<i>F</i> ₄	-12,55	-12,04	-12,47	-11,76	-9,38	-6,24
Desviación estándar	3,91	3,68	3,32	3,61	3,45	3,44

