

## PROYECTO FIN DE GRADO

**TÍTULO:** Diseño y Validación de un Modelo Geométrico para el Estudio Acústico del Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid.

**AUTOR/A:** Ana Pascual Porras

**TITULACIÓN:** Sonido e Imagen

**DIRECTOR/A:** Juan José Gómez Alfageme

**TUTOR/A:** Elena Blanco Martín

**DEPARTAMENTO:** Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones

VºBº TUTOR/A

**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE/A:** Sury Bravo Lasprilla

**TUTOR/A:** Elena Blanco Martín

**SECRETARIO/A:** Daniel de la Prida Caballero

**Fecha de lectura:** 9 de julio de 2025

**Calificación:**

El Secretario/La Secretaria,



### **Resumen**

Este proyecto tiene como fin el diseño y validación de un modelo geométrico para el estudio acústico del Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid. Este análisis acústico ilustra el comportamiento acústico que tiene la sala y ayuda a mejorar la acústica en su interior con el uso de software de simulación acústica.

El procedimiento que se lleva a cabo se realiza en distintas fases. Primero, se realizaron una campaña de mediciones acústicas *in situ* siguiendo las directrices de la norma UNE-EN ISO 3382-1:2009. Segundo, se procesaron los valores medidos de los parámetros acústicos. Tercero, se diseñó el modelo geométrico tridimensional del Aula Magna con un software especializado en el modelo en 3D llamado SketchUp. Cuarto, se importó este modelo a un software de simulación acústica llamado EASE. Con este programa, se realizaron distintas simulaciones, obteniendo unos datos simulados de los parámetros. Quinto, estos datos se compararon con los valores medidos. Con esta comparación se pudo evaluar el modelo creado y comprobar su validez. Si resulta una validación satisfactoria, este modelo se incluirá a una base de datos que recoge otros trabajos como este para facilitar investigaciones futuras.

Mientras tanto, también se ha realizado el estudio acústico del recinto tanto para los valores métricos como para los datos simulados. Este procesado de datos, de ambos, se ha ejecutado con la herramienta Excel.



### **Abstract**

This project has as its purpose, the validation and design of a geometrical model for the acoustic study of the Great Hall in the "Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid". This analysis shows the acoustic behaviour of this room, and helps improving the acoustic inside, using an acoustic simulation software.

This procedure is carried out in several stages. First of all, a campaign of acoustic measurements were taken on site following the indications described in the UNE-EN ISO 3382-1:2009. In second place, the acoustic parameters of the values previously measured were processed. The third step was designing the three-dimensional model of the Great Hall using a specialized 3D modeling software called SketchUp. In fourth place, the 3D model was imported in an acoustic simulation software called EASE. In this program, many simulations were made, obtaining simulated data from the parameters. In fifth place, this data were compared to the measured values. Using this comparison, the created model was evaluated, and its validity was tested. If it results in a satisfactory validation, this model will be included in a database that collects projects like this one, to help in future investigations.

Meanwhile, an acoustic study of the enclosure was done to take measured values and simulated data as well. This data processing, in both cases, has been executed with Excel.



### Índice de figuras

Figura 1. Fotografía del Aula Magna, vista la parte izquierda del escenario. ....	2
Figura 2. Fotografía del Aula Magna, vista de la galería izquierda. ....	2
Figura 3. Formación campo directo (negro) y campo reverberante (rosa). ....	7
Figura 4. Comportamiento de un material absorbente. ....	8
Figura 5. Parámetros temporales. ....	10
Figura 6. Gráfica de Peutz. ....	13
Figura 7. MOTU UltraLite mk3. ....	18
Figura 8. Amplificador de potencia Crown CLS 2002 DriveCore. ....	18
Figura 9. Fuente Omnidireccional AVM DO-12. ....	18
Figura 10. Micrófono AKG CK 92. ....	19
Figura 11. Micrófono CKG CK 94. ....	19
Figura 12. Preamplificador SE300B. ....	19
Figura 13. Sonómetro B&K 2260. ....	19
Figura 14. Calibrador B&K 4231. ....	20
Figura 15. Diagrama de bloques de la instrumentación empleada en las medidas. ....	20
Figura 16. Plano del aula con todas las posiciones marcadas según las formas y colores anteriormente mencionados. ....	22
Figura 17. Fotografía del Aula Magna desde el lado izquierdo del escenario. ....	23
Figura 18. Fotografía del Aula Magna desde delante de la zona de pupitres derecha, justo detrás de la posición F02. ....	23
Figura 19. Fotografía del Aula Magna desde la parte derecha del escenario con visualización de la posición F02. ....	24
Figura 20. Clasificación de los datos en Excel, planta 0 en verde y planta 1 en naranja. ....	25
Figura 21. Máscara INR. ....	26
Figura 22. Campana de Gauss. ....	27
Figura 23. Resultado final tras ambos filtrados del parámetro LFC. ....	28
Figura 24. Resultado final tras ambos filtrados del parámetro C80. ....	28
Figura 25. Promedio total y por zonas del parámetro EDT [s] medido in situ. ....	30
Figura 26. Promedio total junto su desviación del parámetro EDT [s] medido in situ. ....	30
Figura 27. Promedio total y por zonas del parámetro T20 [s] medido in situ. ....	31
Figura 28. Promedio total junto su desviación del parámetro T20 [s] medido in situ. ....	31
Figura 29. Promedio total y por zonas del parámetro T30 [s] medido in situ. ....	32
Figura 30. Promedio total junto su desviación del parámetro T30 [s] medido in situ. ....	32
Figura 31. Promedio total y por zonas del parámetro RT [s] medido in situ. ....	33
Figura 32. Promedio total junto su desviación del parámetro RT [s] medido in situ. ....	33
Figura 33. Promedio total y por zonas del parámetro C50 [dB] medido in situ. ....	34
Figura 34. Promedio total junto su desviación del parámetro C50 [dB] medido in situ. ....	34
Figura 35. Promedio total y por zonas del parámetro C80 [dB] medido in situ. ....	35
Figura 36. Promedio total junto su desviación del parámetro C80 [dB] medido in situ. ....	35
Figura 37. Promedio total y por zonas del parámetro D50 [-] medido in situ. ....	36
Figura 38. Promedio total junto su desviación del parámetro D50 [-] medido in situ. ....	36

Figura 39. Promedio total y por zonas del parámetro Ts [ms] medido in situ.....	37
Figura 40. Promedio total junto su desviación del parámetro Ts [ms] medido in situ. ....	37
Figura 41. Promedio total y por zonas del parámetro LF [-] medido in situ.....	38
Figura 42. Promedio total junto su desviación del parámetro LF [-] medido in situ.....	38
Figura 43. Promedio total y por zonas del parámetro Alcons [%] medido in situ. ....	39
Figura 44. Promedio total y por zonas del parámetro STI [-] medido in situ. ....	39
Figura 45. Plano con acotaciones aportado por la Facultad de Ciencias Químicas.....	41
Figura 46. Diseño del suelo de la parte frontal y el primer escalón. ....	42
Figura 47. Diseño de toda la escalera con la zona de audiencia. ....	42
Figura 48. Diseño de las paredes laterales y el poyete. ....	43
Figura 49. Diseño de la planta 1.....	43
Figura 50. Diseño del techo.....	43
Figura 51. Diseño de puertas y ventanas.....	44
Figura 52. Diseño de los detalles del escenario.....	44
Figura 53. Asignación de etiquetas a cada capa.....	44
Figura 54. Diseño del muro interno entre las últimas dos filas.....	45
Figura 55. Diseño simplificado del pupitre con el asiento (arriba izquierda), de la mesa y el atril del escenario (arriba derecha) y de las cortinas (abajo). ....	45
Figura 56. Etiquetas creadas junto con su color en SketchUp. ....	46
Figura 57. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista desde la galería derecha lateral. ....	46
Figura 58. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista desde el ultimo asiento a la derecha hacia el escenario.....	47
Figura 59. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista desde la última fila hacia el escenario.....	47
Figura 60. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista desde la galería izquierda lateral. ....	47
Figura 61. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista del techo.....	48
Figura 62. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista del techo desde el escenario. ....	48
Figura 63. Primera asignación de los materiales a las capas en EASE.....	49
Figura 64. Vistas del Aula Magna tras la primera asignación de materiales.....	50
Figura 65. Recreación del error (izquierda) y aplicación de <i>Check Holes</i> (derecha).....	51
Figura 66. Caras destacadas del techo al mismo nivel. ....	51
Figura 67. Tabla de las caras con la asignación de materiales. ....	52
Figura 68. Orientación de la posición de micrófono M10.....	52
Figura 69. Menú <i>Optimize RT</i> con el tiempo de reverberación inicial.....	53
Figura 70. Tiempo de reverberación inicial calculado por EASE (azul) y tiempo de reverberación real (gris). ....	54
Figura 71. Curva de absorción del material 150 (izquierda) y del material 160 (derecha). ....	55
Figura 72. Curva de absorción del material 274 (izquierda) y del material 275 (derecha). ....	56
Figura 73. Tiempo de reverberación de la modificación 1.....	56

Figura 74. Curva de absorción del material 061 (izquierda) y del material 062 (derecha).	57
Figura 75. Tiempo de reverberación de la modificación 2.	57
Figura 76. Curva de absorción del material 062 (izquierda) y del material 076 (derecha).	58
Figura 77. Tiempo de reverberación de la modificación 3.	59
Figura 78. Curva de absorción del material 076 (izquierda) y del material 077 (derecha).	60
Figura 79. Tiempo de reverberación de la modificación 4.	60
Figura 80. Tiempo de reverberación final (modificación 3) en representación gráfica (arriba) y en formato tabla (abajo).	62
Figura 81. Configuración <i>Standard Mapping</i> .	63
Figura 82. Configuración AURA Mapping de alta resolución.	63
Figura 83. Valores simulados del parámetro T30 (arriba) y el resultado tras el filtrado (abajo).	64
Figura 84. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) del parámetro RT.	65
Figura 85. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro EDT.	66
Figura 86. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro T20.	67
Figura 87. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro T30.	68
Figura 88. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) y en AURA (amarillo) del parámetro C50.	69
Figura 89. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) y en AURA (amarillo) del parámetro C80.	70
Figura 90. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro D50.	71
Figura 91. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro Ts.	72
Figura 92. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro LF.	73
Figura 93. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) y en AURA (amarillo) del parámetro Alcons.	74
Figura 94. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) y en AURA (amarillo) del parámetro STI.	75
Figura 95. Comparación de los valores medidos en cada par de posiciones del parámetro C50.	77
Figura 96. Comparación de los valores medidos en cada par de posiciones del parámetro LF.	78
Figura 97. Comparación de los valores medidos en cada par de posiciones del parámetro T30.	79
Figura 98. Comparación de los valores simulados en cada par de posiciones del parámetro C50.	79

Figura 99. Comparación de los valores simulado en cada par de posiciones del parámetro LF.	80
Figura 100. Comparación de los valores simulado en cada par de posiciones del parámetro T30.	81
Figura 101. Ruido de fondo del Aula Magna.	91
Figura 102. Promedio total y por zonas del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava.	94
Figura 103. Promedio y desviación total del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava.	94
Figura 104. Promedio total y por zonas del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava.	95
Figura 105. Promedio y desviación total del parámetro T20 [s] medido in situ en bandas de octava.	95
Figura 106. Promedio y desviación total del parámetro T30 [s] medido in situ en bandas de octava.	96
Figura 107. Promedio total y por zonas del parámetro RT [s] medido in situ en bandas de octava.	97
Figura 108. Promedio y desviación total del parámetro RT [s] medido in situ en bandas de octava.	97
Figura 109. Promedio total y por zonas del parámetro C50 [dB] medido in situ en bandas de octava.	98
Figura 110. Promedio y desviación total del parámetro C50 [dB] medido in situ en bandas de octava.	98
Figura 111. Promedio total y por zonas del parámetro C80 [dB] medido in situ en bandas de octava.	99
Figura 112. Promedio y desviación total del parámetro C80 [dB] medido in situ en bandas de octava.	99
Figura 113. Promedio total y por zonas del parámetro D50 [-] medido in situ en bandas de octava.	100
Figura 114. Promedio y desviación total del parámetro D50 [-] medido in situ en bandas de octava.	100
Figura 115. Promedio total y por zonas del parámetro Ts [ms] medido in situ en bandas de octava.	101
Figura 116. Promedio y desviación total del parámetro Ts [ms] medido in situ en bandas de octava.	101
Figura 117. Promedio total y por zonas del parámetro LF [-] medido in situ en bandas de octava.	102
Figura 118. Promedio y desviación total del parámetro LF [-] medido in situ en bandas de octava.	102
Figura 119. Promedio total y por zonas del parámetro Alcons [%] medido in situ en bandas de octava.	103

Figura 120. Promedio total y por zonas del parámetro STI [-] medido in situ en bandas de octava.....	103
Figura 121. Curva de absorción de los materiales de arriba a abajo e izquierda a derecha: 73, 061, 062, 076, 077 y 140. ....	106
Figura 122. Curva de absorción de los materiales de arriba a abajo e izquierda a derecha: 150, 160, 180, 182, 188 y 195.....	107
Figura 123. Curva de absorción de los materiales de arriba a abajo e izquierda a derecha: 274, 275, 330, 331, 360 y 1855.....	108



**Índice de Tablas**

Tabla 1. Valoración de los valores de Alcons %.....	13
Tabla 2. Valoración de los valores de STI .....	14
Tabla 3. Umbral de los escalones JND .....	14
Tabla 4. Escalones JND.....	16
Tabla 5. Condiciones ambientales de las medidas in situ.....	21
Tabla 6. Coordenadas de las posiciones de fuente y micrófonos.....	22
Tabla 7. Porcentaje de valores descartados tras cada filtrado y el total.....	29
Tabla 8. Número de muestras eliminadas tras cada filtrada y el total .....	29
Tabla 9. Promedio y desviación total del parámetro EDT [s] medido in situ.....	30
Tabla 10. Promedio y desviación total del parámetro T20 [s] medido in situ.....	31
Tabla 11. Promedio y desviación total del parámetro T30 [s] medido in situ.....	32
Tabla 12. Promedio y desviación total del parámetro RT [s] medido in situ.....	33
Tabla 13. Promedio y desviación total del parámetro C50 [dB] medido in situ.....	34
Tabla 14. Promedio y desviación total del parámetro C80 [dB] medido in situ.....	35
Tabla 15. Promedio y desviación total del parámetro D50 [-] medido in situ.....	36
Tabla 16. Promedio y desviación total del parámetro Ts [ms] medido in situ.....	37
Tabla 17. Promedio y desviación total del parámetro LF [-] medido in situ.....	38
Tabla 18. Promedio y desviación total del parámetro Alcons [%] medido in situ.....	39
Tabla 19. Promedio y desviación total del parámetro STI [-] medido in situ.....	39
Tabla 20. Valores JND de la modificación 0.....	55
Tabla 21. Valores JND de la modificación 1.....	56
Tabla 22. Valores JND de la modificación 2.....	58
Tabla 23. Valores JND de la modificación 3.....	59
Tabla 24. Tiempo de reverberación de la modificación 4.....	61
Tabla 25. Comparación de los valores medidos y simulados en STD del parámetro RT.....	65
Tabla 26. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro EDT.....	66
Tabla 27. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro T20.....	67
Tabla 28. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro T30.....	68
Tabla 29. Comparación de los valores medidos y simulados en STD (izquierda) y en AURA (derecha) del parámetro C50.....	69
Tabla 30. Comparación de los valores medidos y simulados en STD (izquierda) y en AURA (derecha) del parámetro C80.....	70
Tabla 31. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro D50.....	71
Tabla 32. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro Ts.....	72
Tabla 33. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro LF.....	73
Tabla 34. Comparación de los valores medidos y simulados en STD del parámetro Alcons.....	74
Tabla 35. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro Alcons.....	74
Tabla 36. Comparación de los valores medidos y simulados en STD del parámetro STI.....	74
Tabla 37. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro STI.....	74
Tabla 38. Resultados de los datos simulados.....	76
Tabla 39. Parejas de micrófonos elegidas para comprobar la simétrica.....	77

Tabla 40. Comparación de los escalones JND de los valores medidos (izquierda) y simulados (derecha) del parámetro C50. ....	81
Tabla 41. Comparación de los escalones JND de los valores medidos (izquierda) y simulados (derecha) del parámetro LF. ....	82
Tabla 42. Comparación de los escalones JND de los valores medidos (izquierda) y simulados (derecha) del parámetro T30. ....	82
Tabla 43. Presupuesto del Proyecto. ....	83
Tabla 44. Medidas in situ del ruido de fondo. ....	91
Tabla 45. Promedio por zonas y total del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava. ....	94
Tabla 46. Promedio y desviación total del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava. ....	94
Tabla 47. Promedio por zonas y total del parámetro T20 [s] medido in situ en bandas de octava. ....	95
Tabla 48. Promedio y desviación total del parámetro T20 [s] medido in situ en bandas de octava. ....	95
Tabla 49. Promedio por zonas y total del parámetro T30 [s] medido in situ en bandas de octava. ....	96
Tabla 50. Promedio y desviación total del parámetro T30 [s] medido in situ en bandas de octava. ....	96
Tabla 51. Promedio por zonas y total del parámetro RT [s] medido in situ en bandas de octava. ....	97
Tabla 52. Promedio y desviación total del parámetro RT [s] medido in situ en bandas de octava. ....	97
Tabla 53. Promedio por zonas y total del parámetro C50 [dB] medido in situ en bandas de octava. ....	98
Tabla 54. Promedio y desviación total del parámetro C50 [dB] medido in situ en bandas de octava. ....	98
Tabla 55. Promedio por zonas y total del parámetro C80 [dB] medido in situ en bandas de octava. ....	99
Tabla 56. Promedio y desviación total del parámetro C80 [dB] medido in situ en bandas de octava. ....	99
Tabla 57. Promedio por zonas y total del parámetro D50 [-] medido in situ en bandas de octava. ....	100
Tabla 58. Promedio y desviación total del parámetro D50 [-] medido in situ en bandas de octava. ....	100
Tabla 59. Promedio por zonas y total del parámetro Ts [ms] medido in situ en bandas de octava. ....	101
Tabla 60. Promedio y desviación total del parámetro Ts [ms] medido in situ en bandas de octava. ....	101
Tabla 61. Promedio por zonas y total del parámetro LF [-] medido in situ en bandas de octava. ....	102

Tabla 62. Promedio y desviación total del parámetro LF [-] medido in situ en bandas de octava.....	102
Tabla 63. Promedio por zonas y total del parámetro Alcons [%] medido in situ en bandas de octava.....	103
Tabla 64. Promedio por zonas y total del parámetro STI [-] medido in situ en bandas de octava.....	103
Tabla 65. Materiales asignados al modelo.....	105



**Lista de acrónimos**

<b>Acrónimo</b>	<b>Significado</b>	<b>Meaning</b>
<b>ALCONS</b>	Pérdida de Inteligibilidad de Consonantes	Percentage Loss of Consonants
<b>C</b>	Claridad	Clarity
<b>COITT</b>	Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación	Official College of Telecommunications Technical Engineers
<b>D</b>	Definición	Definition
<b>EDT</b>	Tiempo de Reverberación Temprano	Early Decay Time
<b>FCQ</b>	Facultad de Ciencias Químicas	Faculty of Chemical Sciences
<b>INR</b>	Relación entre la respuesta impulsiva y el ruido	Impulse Response to Noise Ratio
<b>JND</b>	Diferencia Mínima Notable	Just Noticeable Difference
<b>LF</b>	Eficiencia Lateral	Lateral Fraction
<b>LFC</b>	Eficiencia Lateral Coseno	Lateral Fraction Cosine
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible	Sustainable Development Goals
<b>RT</b>	Tiempo de Reverberación	Reverberation Time
<b>SNR</b>	Relación Señal a Ruido	Signal to Noise Ratio
<b>SPL</b>	Nivel de Presión Sonora	Sound Pressure Level
<b>STI</b>	Transmisión del Habla	Speech Transmission Index
<b>TS</b>	Tiempo Central	Central Time
<b>UCM</b>	Universidad Complutense de Madrid	Complutense University of Madrid
<b>XLR</b>	Línea de Retorno Externa	External Line Return



**Índice de contenidos**

<b>Resumen</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>vii</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de acrónimos</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Índice de contenidos</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Especificaciones y restricciones de diseño</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Introducción Teórica</b> .....	<b>7</b>
4.1. Conceptos fundamentales .....	7
4.2. Aproximaciones Acústicas .....	8
4.2.1. Acústica Estadística .....	8
4.2.2. Acústica Geométrica .....	9
4.3. Parámetros Acústicos .....	9
4.3.1. Parámetros temporales .....	9
4.3.2. Parámetros energéticos .....	11
4.3.3. Parámetros espaciales .....	12
4.3.4. Parámetros de inteligibilidad .....	12
4.4. Métrica JND .....	14
<b>5. Medidas in situ</b> .....	<b>17</b>
5.1. Norma UNE-EN ISO 3382-1 .....	17
5.2. Instrumentación utilizada .....	17
5.3. Procedimiento de medida .....	20
<b>6. Procesado de Datos</b> .....	<b>25</b>
6.1. Criterios de procesamiento .....	25
6.2. Resultados de los Parámetros acústicos .....	29
6.2.1. Parámetros temporales .....	30
6.2.2. Parámetros energéticos .....	34
6.2.3. Parámetros espaciales .....	38
6.2.4. Parámetros de inteligibilidad .....	39
<b>7. Diseño 3D del Modelo Arquitectónico Simplificado del Aula Magna</b> .....	<b>41</b>
<b>8. Importación y Configuración inicial del Modelo Geométrico en EASE</b> .....	<b>49</b>
<b>9. Validación del Modelo geométrico en EASE</b> .....	<b>53</b>
9.1. Fase I: Ajuste del tiempo de Reverberación inicial .....	53
9.2. Fase II: Ajuste de Materiales .....	54
9.2.1. Modificación 1 .....	55
9.2.2. Modificación 2 .....	57
9.2.3. Modificación 3 .....	58

9.2.4. Modificación 4 .....	60
9.2.5. Tiempo de Reverberación final .....	61
9.3. Simulación de los parámetros acústicos. ....	62
9.4. Resultado de la validación.....	64
9.5. Simetría de la sala. ....	77
<b>10. Presupuesto .....</b>	<b>83</b>
<b>11. Impacto del proyecto .....</b>	<b>85</b>
<b>12. Conclusiones .....</b>	<b>87</b>
<b>13. Referencias .....</b>	<b>89</b>
<b>Anexo I: Ruido de Fondo. ....</b>	<b>91</b>
<b>Anexo II: Estudio acústico del Aula Magna en octavas.....</b>	<b>93</b>
<b>Anexo III. Materiales .....</b>	<b>105</b>

## **1. Introducción**

Desde las civilizaciones antiguas, como la griega y la romana, la acústica arquitectónica ya era un aspecto para tener en cuenta a la hora de diseñar teatros, donde se quería favorecer la propagación adecuada del sonido. No obstante, el físico Wallace Clement Sabine es quien impuso esta ciencia gracias a sus estudios sobre el concepto de tiempo de reverberación. Hoy en día, este parámetro acústico sigue siendo uno de los más importantes a la hora de evaluar el comportamiento acústico de un recinto. Con el avance de tanto la instrumentación para medir como de la tecnología de simulación, se ha conseguido relacionar parámetros subjetivos con los valores medidos *in situ* y así poder diseñar entornos con una mejor acústica [1].

Este documento desarrolla un Proyecto de Fin de Grado del Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen de la Universidad Politécnica de Madrid, centrado en el ámbito de la acústica arquitectónica. La finalidad principal de este proyecto es estudiar el comportamiento acústico del Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid, mediante un procedimiento que incluye medidas *in situ*, diseño de un modelo en 3D y simulaciones acústicas.

Este proyecto está integrado dentro de una línea de investigación, orientado a la creación de una base de datos que recopile toda la información de los modelos geométricos de diferentes salas, teatros o recintos de valor históricos, como sus propiedades acústicas. Esta base de datos, en el futuro, permitirá analizar, cambiar o comparar el comportamiento acústico de estos espacios sin la necesidad de presencialidad.

El proyecto se desarrolla en tres fases principales: en primer lugar, mediciones acústicas *in situ* de los parámetros acústicos y su procesado; en segundo lugar, modelado geométrico en 3D del aula; y, en tercer lugar, la validación de este modelo comparando las simulaciones acústicas de los parámetros con las medidas. A lo largo de esta memoria, se expondrán detalladamente cada paso realizado, los criterios que se han seguido, los parámetros utilizados en la validación y los resultados obtenidos en esta.

El Aula Magna es una sala bastante amplia que cuenta con dos pisos, una planta baja, tipo platea y una galería que rodea la parte trasera y lateral de la sala. Sus dimensiones máximas son 23,8 m de ancho, 20,5 m de largo y 8,82 m de alto, lo que hace que cuente con una superficie de 2936,75 m<sup>2</sup> y un volumen de 3088,5 m<sup>3</sup>.

La zona de audiencia se dispone en terradas, equipadas con pupitres y asientos individuales fijos. Hay en total once filas con 30 asientos cada una, divididas en tres bloques: izquierdo, derecho y central, separadas por dos pasillos. Tiene una galería trasera y lateral, como se mencionó antes, a una altura de 3,41 m que ofrece una visibilidad desde arriba al escenario.

El techo está formado por casetones cuadrados, los cuales contribuyen a disipar el sonido. La mayoría de las superficies de la sala son lisas y rígidas, aunque también predominan las que están formadas por materiales que absorben el sonido como, las cortinas o el techo. En la parte del escenario, hay un escalón de tarima que se destina para el orador.



**Figura 1. Fotografía del Aula Magna, vista la parte izquierda del escenario.**



**Figura 2. Fotografía del Aula Magna, vista de la galería izquierda.**

## **2. Objetivos**

El principal objetivo de este Proyecto de Fin de Grado es realizar el diseño y la validación de un modelo geométrico para el estudio acústico del Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (FCQ-UCM). Este modelo tiene que reproducir con la mayor fidelidad las características acústicas reales de la sala.

Para realizar este objetivo, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Reunir información para el estudio del recinto: se han recopilado documentos sobre la arquitectura del Aula Magna. Se estudió de la norma UNE-EN ISO 3382-Parte 1: Sala de Espectáculos [2] y se familiarizó con la instrumentación y el software que se utilizará a posteriori.
- Mediciones in situ: se llevaron a cabo las medidas in situ siguiendo la norma anterior mencionada, obteniendo los parámetros acústicos necesarios para realizar el estudio.
- Procesado de datos: se procesaron los resultados obtenidos de las medidas mediante la herramienta Excel.
- Diseño del modelo arquitectónico simple en 3D de la sala: a partir de los planos conseguidos y de algunas fotografías y notas realizadas presencialmente en la sala, se creó el modelo arquitectónico del recinto en SketchUp.
- Simulación acústica: se importó el modelo 3D a EASE, software de simulación acústica, se comprobó que no haya ningún problema y se asignaron materiales apropiados a los reales a cada capa y se simularon las medidas obteniendo los parámetros acústicos.
- Validación del modelo acústico: se compararon los valores simulados con los valores medidos in situ.
- Redacción de la memoria: se describe todo lo realizado en este proyecto.



### **3. Especificaciones y restricciones de diseño**

En este apartado se detallan las especificaciones y restricciones de diseño que deben considerarse para la realización del proyecto, cumpliendo con los objetivos mencionados en el apartado anterior.

#### **ESPECIFICACIONES**

- **Modelo arquitectónico en 3D:** Mediante herramientas de modelado 3D (SketchUp) se ha creado una representación tridimensional básica del diseño arquitectónico de la sala.
- **Modelo geométrico y análisis acústico:** Mediante un software especializado en simulación acústica llamado EASE. Este permite elaborar un modelo geométrico minucioso del recinto y realizar un análisis acústico completo.
- **Medidas in situ según la norma UNE-EN ISO 3382:** Las mediciones se han realizado a siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 3382, norma reconocida internacionalmente para la medición de parámetros acústicos en recintos. Esto ha garantizado la precisión y la consistencia de los datos obtenidos.
- **Validación del modelo según las medidas in situ:** La validación del modelo geométrico se ha realizado comparando sus resultados con las medidas in situ realizadas conforme la norma UNE-EN ISO 3382. Esta validación ha asegurado que el comportamiento acústico del modelo simulado representa con precisión las características acústicas reales del recinto.

#### **RESTRICCIONES**

- **Simplificación del modelo 3D:** El modelo geométrico en 3D se ha simplificado para reducir el número de caras cumpliendo con los criterios acústicos y facilitando su procesamiento en el software de simulación.
- **Rango de frecuencia del software de simulación:** El software de simulación acústica, EASE, limita el trabajo a las bandas de frecuencia comprendidas entre 100 Hz y 10 kHz. En consecuencia, se desconoce la información de los parámetros acústicos fuera de ese rango.
- **Adaptación de la norma a la geometría del auditorio:** En la toma de medidas in situ, fue necesario adaptar los requisitos de la norma UNE-EN ISO 3382 a la geometría y disposición específica del auditorio, para garantizar la coherencia y relevancia de los resultados.
- **Validación del modelo con respecto a medidas in situ:** La validación del modelo se ha realizado comparando sus resultados con los valores promedio de los parámetros acústicos medidos in situ en el auditorio, lo que ha permitido asegurar su fiabilidad y precisión en la simulación acústica del recinto.



## 4. Introducción Teórica

Para realizar el análisis acústico de una sala se requiere de una base teórica que permita comprender el comportamiento físico del sonido en el recinto y su propagación en él. En este apartado se van a explicar los conceptos fundamentales, las teorías acústicas arquitectónicas y los parámetros acústicos imprescindibles para entender el comportamiento acústico del Aula Magna y poder interpretar de manera adecuada los datos obtenidos y validar el modelo.

### 4.1. Conceptos fundamentales

El sonido puede definirse como la propagación de ondas mecánicas a través de un medio elástico, como el aire. En el campo de la acústica arquitectónica, se estudia cómo esas ondas interactúan con el espacio a su alrededor.

El Nivel de Presión Sonora (*Sound Pressure Level, SPL*) es la presión sonora que hay en un momento y punto determinado, expresado en unidades logarítmicas. Este parámetro es uno de los más importantes ya que está directamente relacionado con la sonoridad que escucha el receptor. Se calcula con la siguiente formula:

$$SPL = 20 * \log \left( \frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) [dB] \quad (1)$$

Donde:

$p_{rms}$ : presión sonora RMS.

$p_{ref}$ : presión sonora de referencia, 20  $\mu$ Pa.

Como se va a estudiar cómo se propaga el sonido dentro del Aula Magna, este se va a transmitir a través del aire en un recinto cerrado. Esto hace que las ondas sonoras se propaguen rebotando en las superficies de la sala creando reflexiones, pudiendo distinguir entre campo directo y campo reverberante. El campo directo consta de las ondas sonoras que llegan al receptor directamente, sin sufrir reflexiones. Es decir, son de orden 0 ya que no se han encontrado con ningún obstáculo ni superficie antes de llegar al receptor. El campo reverberante está formado por todas las ondas sonoras que antes de llegar al receptor han sufrido una o más reflexiones. Su orden depende de la cantidad de rebotes que haya sufrido la onda.

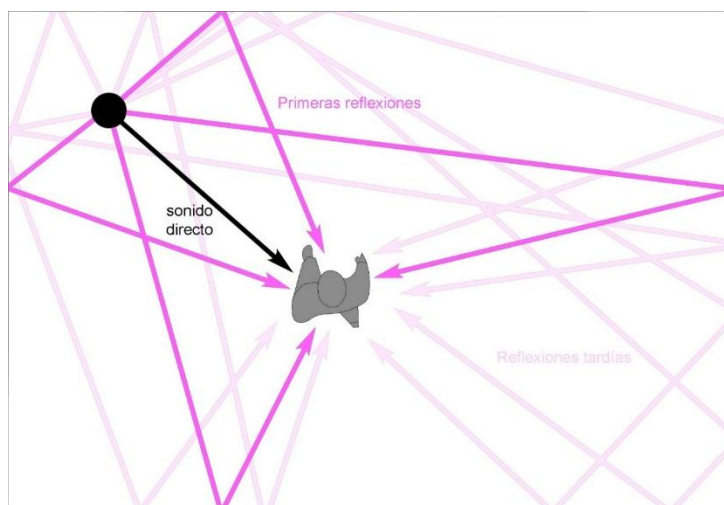


Figura 3. Formación campo directo (negro) y campo reverberante (rosa).

En algunos puntos el campo directo y el campo reverberante pueden aportar la misma energía. A esta distancia desde la fuente al receptor se la denomina distancia crítica y se calcula de la siguiente manera:

$$r_c = \frac{1}{4} * \sqrt{\frac{R * Q}{\pi}} [m] \quad (2)$$

Donde:

R: constante de la sala, equivalente a la absorción de los materiales de la sala [m<sup>2</sup>].

Q: factor de directividad de la fuente.

En el análisis acústico de una sala es fundamental tener en cuenta los materiales presentes y, en consecuencia, el coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) de cada uno. La absorción se refiere a la capacidad de los materiales para atenuar la energía sonora de las ondas que inciden sobre ellos. Este parámetro, esencial para la caracterización acústica del recinto, puede variar entre 0 (ausencia total de absorción) y 1 (absorción total). El valor del coeficiente de absorción  $\alpha$  depende de distintos factores como la composición, el espesor o la colocación del material y su comportamiento a distintas frecuencias (baja, media y alta).

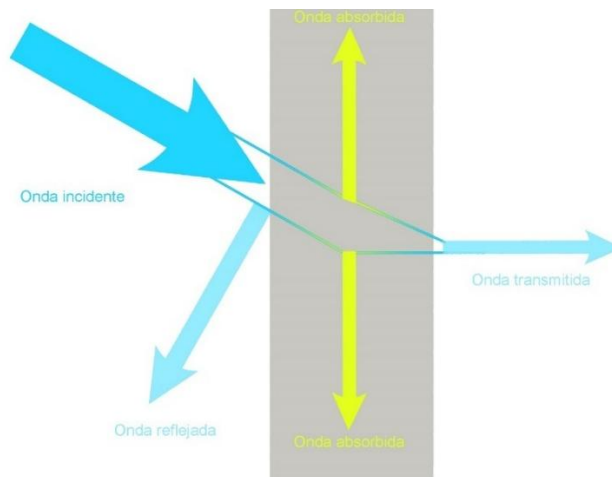


Figura 4. Comportamiento de un material absorbente.

## 4.2. Aproximaciones Acústicas

Para analizar el comportamiento acústico de la sala, existen distintas aproximaciones como la ondulatoria, la estadística o la geométrica. En este proyecto, el estudio del Aula Magna se centra en las aproximaciones estadística y geométrica, ya que el software de simulación solo emplea esas dos para los cálculos y la evaluación de las características acústicas de la sala.

### 4.2.1. Acústica Estadística

La acústica estadística es una aproximación que permite estimar los parámetros acústicos de forma sencilla a partir del tiempo de reverberación. Se utiliza en el análisis de recintos cerrados. Esta aproximación parte del principio de que las ondas sonoras se propagan de forma uniforme en todas las direcciones desde una fuente omnidireccional, generando un campo difuso. En este campo difuso, la energía es igual en todos los puntos de la sala, es decir, esta distribuida homogéneamente, de modo que la energía en un punto es igual a la suma de todas las ondas incidentes en él. Asimismo, se tiene en cuenta que las fases de las ondas se distribuyen de forma aleatoria, aunque no se tienen en cuenta en los cálculos.

Sin embargo, como esta aproximación utiliza métodos de cálculo simples, su precisión se ve limitada en recintos sin un campo sonoro lo suficientemente difuso. En este proyecto, se usa

esta aproximación a través del software EASE, que aplica la fórmula de Eyring para calcular el tiempo de reverberación [3].

#### **4.2.2. Acústica Geométrica**

La acústica geométrica se basa en el concepto de rayo sonoro, que se crea a partir del frente de onda, superficie en la que todos los puntos alcanzados simultáneamente por la onda están en fase. A medida que este frente de onda se propaga, se traza una trayectoria espacial que se representa como el rayo sonoro. El estudio acústico de esta aproximación consiste en examinar el recorrido de estos rayos y analizar las interacciones que tienen con las distintas superficies del recinto.

A diferencia de la aproximación estadística, que estima una distribución uniforme de energía, la aproximación geométrica individualiza cada reflexión, diferenciando entre la señal directa y las reflexiones. También considera el orden de las reflexiones, la trayectoria que hacen y la atenuación que sufre la señal con cada choque con los materiales. Esta pérdida de energía depende de las propiedades absorbentes de los materiales. La precisión de los resultados depende de la diferencia que haya entre la longitud de onda del sonido y las dimensiones de la sala.

En esta aproximación se emplean métodos como el trazado de rayos o las fuentes imagen, lo que la convierte en una herramienta muy eficaz para encontrar los problemas que tenga el recinto y proponer una solución. Para realizarlo todo correctamente, los cálculos son más complejos y no aporta una visión global del campo sonoro como en la acústica estadística, en cambio, proporciona una gran resolución temporal y espacial. En este proyecto, el software EASE utiliza esta aproximación a partir de la simulación de respuestas al impulso desde diferentes posiciones de fuente y receptor. Esto ayuda al análisis detallado de la sala y a la selección de los materiales adecuados para obtener un tiempo de reverberación lo más parecido posible al tiempo de reverberación real, medido in situ [4].

### **4.3. Parámetros Acústicos**

Para analizar el comportamiento acústico de una sala es necesario conocer ciertos parámetros. Estos describen como responde el recinto a una fuente sonora y tienen información clave sobre el campo acústico. Estos parámetros se agrupan en cuatro clases: temporales, energéticos, espaciales y de inteligibilidad. A continuación, se explican cada uno.

#### **4.3.1. Parámetros temporales**

Los parámetros temporales son aquellos que indican el tiempo que tarda la energía sonora en desaparecer dentro de un recinto cuando se apaga la fuente sonora.

##### **Tiempo de Reverberación, RT [s]**

Este parámetro es el más importante ya que define el tiempo que transcurre desde que cesa la emisión de la fuente sonora (emisor) hasta que el nivel de presión sonora disminuye 60 dB respecto al valor inicial, equivalente a una reducción de la presión sonora a una millonésima parte de su valor original.

El valor de este parámetro depende en función del uso del recinto y de su volumen. Como se está realizando este proyecto sobre un aula magna de una universidad, el tiempo de reverberación debería tener un valor entre 0.5 s y 2 s. Hay varias formas de calcular el tiempo de reverberación:

- Fórmula de Sabine:

$$RT = \frac{0,161 * V}{A} = \frac{0,161 * V}{S * \bar{\alpha}} \text{ [s]} \quad (3)$$

- Fórmula de Eyring:

$$RT = \frac{0,161 * V}{-S * \ln(1 - \bar{\alpha})} \text{ [s]} \quad (4)$$

Donde:

V: volumen del recinto [m<sup>3</sup>].

A: área de absorción sonora equivalente [m<sup>2</sup>].

S: superficie del recinto [m<sup>2</sup>].

$\bar{\alpha}$ : coeficiente medio de absorción del recinto [-].

### Estimadores del tiempo de Reverberación, T<sub>20</sub> y T<sub>30</sub> [s]

Poder medir una caída de 60 dB puede ser complicado en escenarios reales, por razones como que haya ruido de fondo o que la fuente sonora no tiene suficiente potencia. Por ello, se emplean los estimadores T<sub>20</sub> y T<sub>30</sub>. Estos miden una disminución de 20 y 30 dB, respectivamente, en vez de 60 dB. Estos estimadores facilitan la tarea de medir ya que no es necesario que haya una caída completa y dan un valor aproximado del tiempo de reverberación. Si se utilizan los estimadores en vez de RT, hay que multiplicar por 3 y 2, respectivamente, para igual la caída de 60 dB. También, se permite un margen de 5 dB desde que la fuente deja de emitir (nivel estacionario).

### Tiempo de Reverberación Temprano, EDT [s]

El EDT representa el tiempo que transcurre hasta que caen los primeros 10 dB del nivel de presión sonora desde que la fuente se apaga. Su valor se calcula multiplicando por 6 para igualar la caída de 60 dB. En este parámetro no hay margen de 5 dB. Este parámetro está más relacionado con la percepción subjetiva de la reverberación en la sala en los primeros segundos. Con él se puede evaluar la calidad acústica. Si el valor de EDT es significativamente menor que el de RT, la sala se percibe más seca. Esto ayuda a la inteligibilidad, que es lo indicado para un aula magna.

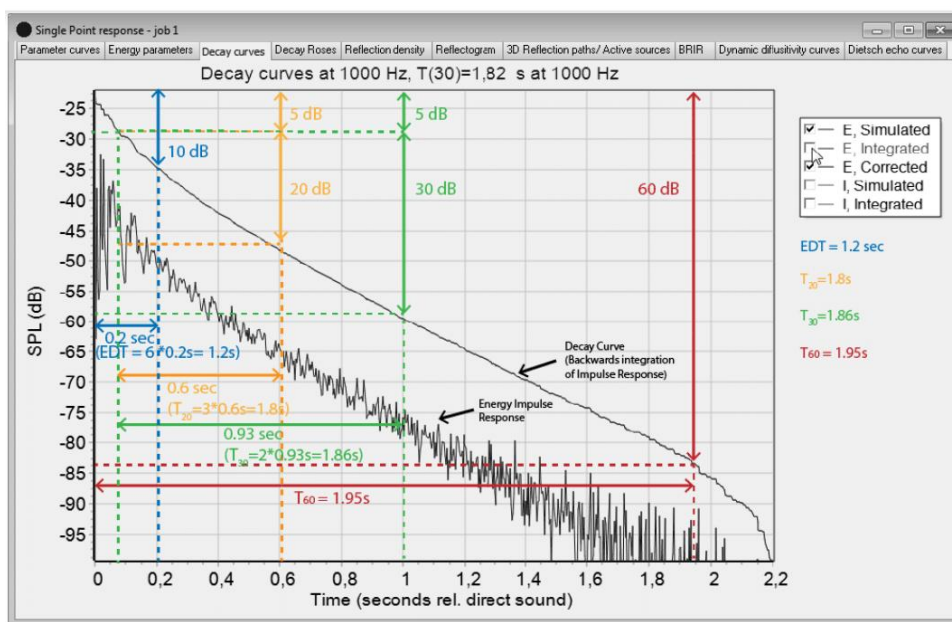


Figura 5. Parámetros temporales

### 4.3.2. Parámetros energéticos

Los parámetros energéticos están relacionados con la energía sonora de las reflexiones e influyen en cómo se percibe el sonido. Estos comparan la energía que capta el receptor en los primeros segundos en los que emite la fuente (campo temprano) con la que llega más tarde (campo tardío). A continuación, se van a describir los principales parámetros de este tipo:

#### Claridad de la voz, C 50 [dB]

Este parámetro tiene en cuenta la energía que llega durante los primeros 50 ms tras la señal directa al receptor en relación con la energía que llega a partir de ese tiempo. Se utiliza para evaluar la inteligibilidad del habla en la sala.

Cuando el valor de  $C_{50}$  es mayor a 2 dB en todos los puntos de medida significa que hay buena inteligibilidad del habla en el recinto.

$$C_{50} = \frac{\text{Energía primeros 50 ms}}{\text{Energía tras primeros 50 ms}} [dB] \quad (5)$$

$$C_{50} = 10 * \log \left( \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad (6)$$

Donde:

$p(t)$ : nivel de presión sonora instantánea.

#### Claridad musical, C 80 [dB]

Este parámetro es parecido al anterior, pero el límite temporal se alarga hasta los 80 ms.  $C_{80}$  se centra más en estimar la percepción de la música.

Un valor alto de este parámetro indica que hay mayor claridad, por lo tanto, la música será más perceptible. El valor óptimo de este parámetro es dentro del rango de -2 dB hasta 6 dB, aunque depende de las características de la sala y su uso.

$$C_{80} = \frac{\text{Energía primeros 80ms}}{\text{Energía tras primeros 80ms}} [dB] \quad (7)$$

$$C_{80} = 10 * \log \left( \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad (8)$$

Donde:

$p(t)$ : nivel de presión sonora instantánea.

#### Definición, D 50 [-]

Este parámetro determina la definición del habla y la claridad de su percepción. Para calcularlo se compara la energía que se percibe en los primeros 50 ms respecto a la energía total. Cuanto mayor sea el valor de  $D_{50}$ , mayor es la claridad del sonido. Su valor óptimo es cuando este es superior a 0.5. Este parámetro está estrechamente relacionado con  $C_{50}$ .

$$D_{50} = \frac{\text{Energía primeros 50ms}}{\text{Energía total}} [-] \quad (9)$$

$$D_{50} = \left( \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [-] \quad (10)$$

### **Tiempo central, Ts [ms]**

El tiempo central es el instante donde la energía que se ha acumulado en ese tiempo es igual a la mitad de la energía total. Representa la nitidez que tiene la sala y también se le nombra centro de gravedad. El valor óptimo debe estar en torno a 130 ms.

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t * p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} [ms] \quad (11)$$

### **4.3.3. Parámetros espaciales**

Los parámetros espaciales proporcionan información sobre la espacialidad del recinto partiendo de la energía lateral (reflexiones laterales) que llega a los receptores (oyentes). Para obtenerlos se emplea un micrófono bidireccional.

#### **Eficiencia lateral, LF [-]**

La eficiencia lateral se define como la relación entre la energía que llega lateralmente a los oyentes (micrófono bidireccional) entre los primeros 5 y 80 ms y la energía total que llega en todas las direcciones (micrófono omnidireccional) en los primeros 80 ms.

$$LF = \frac{\text{Energía lateral de primeros 5ms a 80ms}}{\text{Energía total primeros 80ms}} [-] \quad (12)$$

$$LF = \left( \frac{\int_5^{80} p_l^2(t) dt}{\int_0^{80} p^2(t) dt} \right) [-] \quad (13)$$

Donde:

$p_l(t)$ : presión captada por el micrófono bidireccional.

$p(t)$ : presión captada por el micrófono omnidireccional.

#### **Eficiencia Lateral Coseno, LFC [-]**

Este parámetro es una mejora del anterior ya que tiene en cuenta el coseno del ángulo con el que incide la onda sonora en el micrófono. El valor que se obtiene es mucho más real que el que puede captar el oído.

$$LFC = \left( \frac{\int_5^{80} p_L(t) * p(t) dt}{\int_0^{80} p^2(t) dt} \right) [-] \quad (14)$$

### **4.3.4. Parámetros de inteligibilidad**

Los parámetros de inteligibilidad son los que miden el grado de comprensión de la señal emitida que captan los oyentes. Cuanto de inteligible y entendido es el sonido que llega a los oyentes sin impedimentos. Hay dos parámetros importantes.

#### **Alcons [%]**

La pérdida de articulación de consonantes o *Articulation Loss of Consonants* (Alcons) expresa el porcentaje de consonantes perdidas del mensaje que se ha emitido. Este parámetro es obtenido por el tiempo de reverberación y la diferencia de niveles de presión sonora entre los campos directos y reverberante en un punto. Para calcular su valor se usa la gráfica de Peutz que se muestra en la siguiente figura y las dos fórmulas que se indican después de esta.

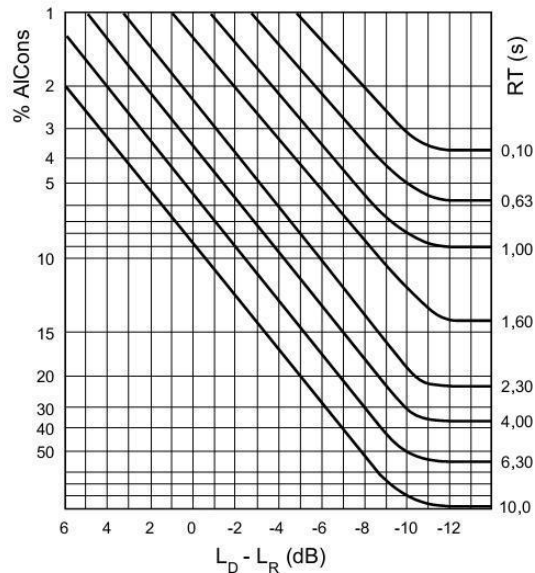


Figura 6. Gráfica de Peutz

$$Alcons = \left( \frac{N^{\circ} \text{ Consonantes Entendidas}}{N^{\circ} \text{ total Consonantes Emitidas}} \right) [\%] \quad (15)$$

$$LD - LR = 10 * \log \left( \frac{Q * R}{r^2} \right) - 17 [dB] \quad (16)$$

$$(17)$$

$$R = \left( \frac{S * \alpha}{1 - \alpha} \right) [-]$$

Donde:

LD: nivel de presión sonora campo directo [dB].

LR: nivel de presión sonora campo reverberante [dB].

Q: factor directividad de la fuente [-].

R: consta acústica de la sala [m<sup>2</sup>].

r: distancia entre la fuente y el punto de medida [m].

S: superficie de la sala [m<sup>2</sup>].

$\alpha$ : coeficiente de absorción medio de la sala [-].

Cuanto más bajo se el valor de Alcons, más inteligibilidad hay. Esto ocurre cuando la distancia entre fuente-receptor se reduce y hay un tiempo de reverberación pequeño. En la siguiente tabla se muestra una valoración crítica de este parámetro [5].

Tabla 1. Valoración de los valores de Alcons %

ALCONS [%]	VALORACIÓN
0 – 3 %	Excelente
3 – 8 %	Muy Buena
8 – 11 %	Buena
11 – 15 %	Regular (Adecuado)
15 – 18 %	Pobre
>18 %	Inaceptable

## STI [-]

El índice de transmisión del habla o *Speech Transmission Index* (STI) indica la inteligibilidad del habla, es decir, la degradación de la señal del habla en la sala. Esto está influenciado por la reverberación, el ruido de fondo, los ecos y la distorsión que puede haber en el recinto. El valor de este parámetro está dentro del rango de 0 a 1. 0 indica inteligibilidad nula y 1 inteligibilidad perfecta [6].

**Tabla 2. Valoración de los valores de STI**

STI	VALORACIÓN
<b>&lt; 0,30</b>	Malo
<b>0,30 – 0,45</b>	Pobre
<b>0,45 – 0,60</b>	Regular
<b>0,6 -0,75</b>	Bueno
<b>0,75 - 1</b>	Excelente

### 4.4. Métrica JND

La métrica JND (Umbral diferencial o *Just Noticeable Difference*) es clave para evaluar la disconformidad apreciable entre los valores medidos y los simulados de los parámetros acústicos. Se trata de clasificar la “distancia” que hay entre las dos medidas, es decir, se comparan los valores medidos *in situ* con los simulados. Esta distancia expresa la percepción de un cambio entre esos valores. Esta se representa con una métrica en escalones (lineal).

Para aplicar esta métrica en los parámetros del apartado anterior, hay que tener en cuenta que cada uno tiene un tipo de umbral diferencial propio que se aplica cuando se realiza la comparación. En la siguiente tabla se muestran estos umbrales según el parámetro acústico.

**Tabla 3. Umbral de los escalones JND**

PARAMETROS ACÚSTICOS	UMBRAL JND
<b>RT, EDT, T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub></b>	5 %
<b>C<sub>50</sub>, C<sub>80</sub></b>	1 dB
<b>D<sub>50</sub>, LF, LFC</b>	0,05
<b>T<sub>s</sub></b>	10 ms
<b>Alcons</b>	2
<b>STI</b>	0,03

El cálculo de JND es sí es sencillo siguiendo una fórmula básica. Salvo en los parámetros temporales, para el resto basta con hacer el valor absoluto de la resta del valor medido y el simulado. A continuación, se muestra el cálculo de los valores de la distancia en métrica JND para los distintos parámetros.

**RT, EDT, T<sub>20</sub> y T<sub>30</sub>**

$$Escalón_{JND} = \frac{\left(\frac{|Medido - Simulado|}{Medido}\right)}{5} * 100 \quad (18)$$

Los escalones representan un intervalo de 5 %. Con lo cual, si la distancia entre los dos valores es casi imperceptible, el escalón correspondiente es el escalón 1, donde se encuentran los valores entre 0 y 5 %. Si la distancia esta entre el 5 y 10 %, el escalón es el segundo y de la misma manera hasta el último escalón.

**C50 y C80:**

$$Escalón_{JND} = \frac{|Medido - Simulado|}{1} \quad (19)$$

En este caso cada escalón es de 1 dB de distancia.

**D50, LF y LFC**

$$Escalón_{JND} = \frac{|Medido - Simulado|}{0,05} \quad (20)$$

En este caso cada escalón es de 0,05 de distancia.

**Ts:**

$$Escalón_{JND} = \frac{|Medido - Simulado|}{10} \quad (21)$$

En este caso cada escalón es de 10 ms de distancia.

**Alcons:**

$$Escalón_{JND} = \frac{|Medido - Simulado|}{2} \quad (22)$$

En este caso cada escalón es de 2 de distancia.

**STI:**

$$Escalón_{JND} = \frac{|Medido - Simulado|}{0,03} \quad (23)$$

En este caso cada escalón es de 0,03 de distancia.

Para tratar de representar de una forma más simple la distancia en métrica JND se ha diseñado una escala lineal en métrica JND, común para todos los parámetros. Esta escala está dividida en 10 niveles o "escalones". Para que la interpretación de los datos sea más rápida y visual, a cada escalón se le ha asignado un color diferente.

Tabla 4. Escalones JND.

ESCALONES JND	R; G; B
1	0;176;80
2	146;208;80
3	198;224;180
4	255;253;189
5	255;255;0
6	255;220;100
7	255;192;0
8	255;0;0
9	192;0;0
10	104;0;0

Al final, el objetivo es ver cuánto de cerca están los valores que se han simulado en el modelo geométrico con los que se midieron *in situ*.

## **5. Medidas in situ**

En este apartado, se va a describir todo el proceso que se ha realizado para tomar las medidas in situ de los parámetros acústicos en el Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Politécnica de Madrid el 22 de mayo de 2024. Los datos recogidos en estas mediciones serán la referencia para crear y validar el modelo geométrico.

Estas mediciones se realizan siguiendo lo estipulado en la norma UNE-EN ISO 3382-1 [2], cumpliendo con las condiciones que dicta. En los siguientes subapartados se explica el proceso completo seguido para obtener las medidas válidas y correctas.

### **5.1. Norma UNE-EN ISO 3382-1**

La primera parte de la norma UNE-EN ISO 3382-1 explica cómo han de realizarse las medidas de los parámetros acústicos en salas de espectáculos, detallando el equipo de medida y su colocación, el procedimiento a seguir, las condiciones ambientales y los requisitos que hay que cumplir. Se utiliza métodos de ruido interrumpido y respuesta impulsiva.

Según la normativa, se deben registrar las condiciones ambientales de la sala antes y después de realizar las medidas, en particular, la temperatura y la humedad relativa, con una precisión de  $\pm 1$  °C y  $\pm 5$  %, respectivamente. El sonómetro debe tener las características de Clase 1.

La fuente emisora, fuente de ruido, debe ser tan omnidireccional como sea posible, con capacidad para cubrir todas las bandas de octava desde 1 a 5 kHz y generar un nivel lo suficientemente alto para medir el tiempo de reverberación. El parámetro Relación Impulso a Ruido (INR) tiene que ser mayor de 45 dB y el parámetro Relación Señal a Ruido (SNR) mayor a 50 dB.

Para medir los parámetros, se debe utilizar un micrófono omnidireccional, lo más diminuto posible, con un diafragma máximo de 13 mm junto a un micrófono bidireccional de respuesta en forma de ocho (Parámetros LF y LFC).

Respecto a las posiciones de la fuente y los micrófonos:

- Se miden mínimo 2 posiciones de fuente a 1,5 metros de altura respecto al suelo. Se colocan donde estarían las fuentes de sonido reales.
- Según la norma, para esta sala debe haber mínimo 6 posiciones de micrófono. Se han utilizado 23 posiciones de micrófono. Estos deben tener una altura de 1,2 metros respecto al suelo y estar a una distancia mínima de 2 metros entre ellos. Se reparte por toda la zona de audiencia de forma uniforme, simulando al público.
- La distancia mínima entre el micrófono y cualquier superficie reflectante tiene que ser de 1 metro.
- La distancia mínima entre la fuente y el micrófono tiene que ser de 1,5 metros.

### **5.2. Instrumentación utilizada**

Para la realización de las mediciones in situ se han utilizado el siguiente equipamiento de medidas que cumplen con la norma anterior mencionada. Todos ellos han sido facilitados por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y sistemas de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

A continuación, se describe el instrumental utilizado:

- Ordenador portátil ASUS: se ha utilizado tanto para la generación de señales como para el registro de estas. Controla y registra.
- Software Dirac 6.0: es un software desarrollado por Brüel & Kjaer que está instalado en el ordenador portátil. Es el programa que genera las señales de excitación (barrido exponencial). Para utilizar este software es necesario una llave física, un pendrive donde está la licencia del programa [7].
- Interfaz de sonido MOTU UltraLite mk3: tarjeta de sonido que se conecta al ordenador mediante USB y transmite la señal digitalizada al resto de equipos. Consta con dos preamplificadores micro/línea y ocho salidas analógicas. Mediante este equipo se envía la señal al amplificador por una de sus salidas. Se pueden ajustar las ganancias de entrada y salida, aunque la última se dejara a 0 dB.



**Figura 7. MOTU UltraLite mk3.**

- Amplificador de potencia Crown XLS 2002 DriveCore: es un amplificador de potencia de dos canales y 650W/4 $\Omega$ , o, en modo bridge, 1300W/8 $\Omega$ , que es el que se va a utilizar. A este dispositivo se le envía la señal de excitación desde la interfaz de sonido MOTU, la amplifica y la envía a la fuente [8].



**Figura 8. Amplificador de potencia Crown CLS 2002 DriveCore.**

- Fuente Omnidireccional AVM DO-12: es un altavoz dodecaédrico de 600W de potencia máxima de entrada y 10  $\Omega$  de impedancia. Este puede generar un nivel de 120dB SPL en bandas de octava desde 80 Hz hasta 6.3 kHz.



**Figura 9. Fuente Omnidireccional AVM DO-12.**

- Micrófono AKG CK 92: es un micrófono de condensador omnidireccional con una sensibilidad 10mV/Pa, 77dBA de relación señal a ruido e impedancia de 200  $\Omega$ . Su rango de respuesta en frecuencia es entre 20 Hz y 20 kHz.



**Figura 10. Micrófono AKG CK 92.**

- Micrófono AKG CK 94: es un micrófono de condensador bidireccional con una sensibilidad 10mV/Pa, 72dBA de relación señal a ruido e impedancia de 200  $\Omega$ . Su rango de respuesta en frecuencia es entre 20 Hz y 20 kHz [9].



**Figura 11. Micrófono CKG CK 94.**

- Preamplificador de micrófono SE300B: los micrófonos anteriores son únicamente en una cápsula. Estos se deben conectar a este preamplificador, apto para ambos. Tiene una relación señal a ruido de 77 dBA, con posibilidad de atenuación y de filtro paso alto. Para estas mediciones se utiliza en modo respuesta plana [10].



**Figura 12. Preamplificador SE300B.**

- Sonómetro Brüel & Kjaer 2260: es un sonómetro de Clase 1 con su propio micrófono, filtros, convertor y analizador. Sus características cumplen con la norma UNE-EN 61672-1 Sonómetros Parte 1: Especificaciones [11]. Se emplea para medir el ruido de fondo de la sala.



**Figura 13. Sonómetro B&K 2260.**

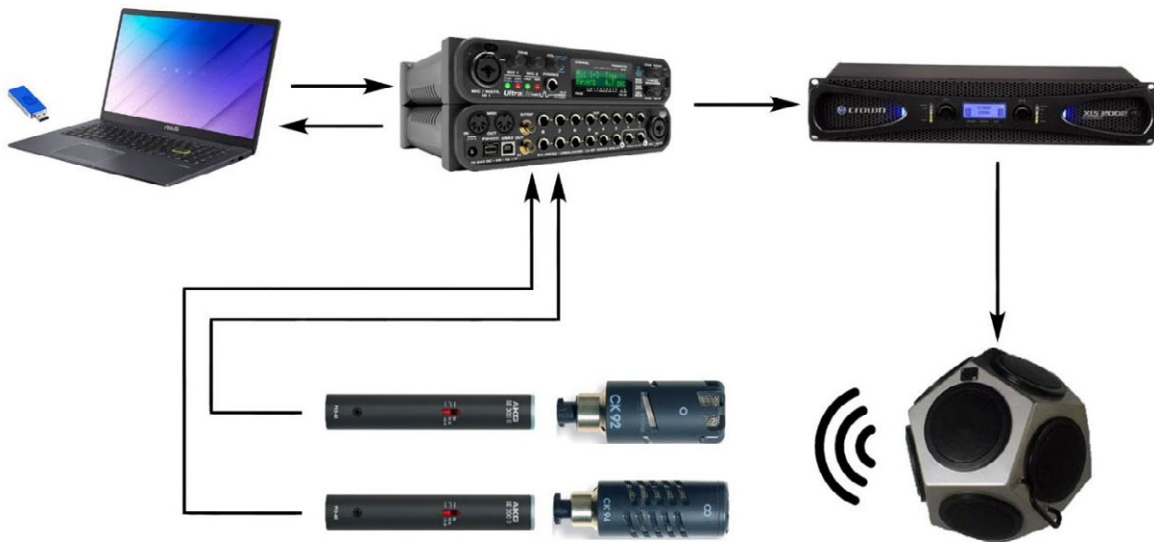
- Calibrador B&K 4231: es un calibrador de Clase 1 cumpliendo con la norma UNE-EN 60942 [12]. Se emplea para comprobar y ajustar la calibración del sonómetro antes y después de las medidas.



**Figura 14. Calibrador B&K 4231.**

Además de la instrumentación mencionada anteriormente, también, se utilizaron pie y pinza doble para micrófonos, un trípode para la fuente, una alargadera doble XLR- XLR, una alargadera de red, un medidor laser y un medidor de temperatura y humedad.

Por último, en este apartado, se muestra un diagrama de bloques con las conexiones de los equipos.



**Figura 15. Diagrama de bloques de la instrumentación empleada en las medidas.**

### **5.3. Procedimiento de medida**

Antes de realizar las medidas, el día 19 de mayo de 2025 se empezó a estudiar cómo era el procedimiento, los equipos y la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010. También se seleccionaron las posiciones de la fuente y los micrófonos para no desperdiciar el tiempo el día de la medición ya que se disponía de los planos de la sala. El día de las mediciones fue el 22 de mayo de 2025 en el Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid. Se quedó a las 9:00 en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación para comprobar que todo el equipo funcionaba bien y estaba calibrado. Después, se transportó toda la instrumentación a la Facultad de Químicas.

Para estas medidas, el método que se va a utilizar es el de ingeniería y precisión. Este obtiene una respuesta al impulso integrada de la señal emitida por la fuente sonora. Esta señal de excitación es un barrido exponencial de todos puros con un rango de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz con una duración de 10,9 s ya que si no el parámetro Relación Impulso a Ruido (INR)

sería menor a 35 dB y por lo tanto las medidas no serían válidas. Este parámetro tiene que ser superior a 35 dB sobre todo entre 125 Hz y 10 kHz.

Cuando se llegó al Aula Magna, se preparó todo el equipo para las medidas y se dejaron marcadas todas las posiciones para que a la hora de medir fuera todo más ágil. Las medidas empezaron a las 14:15 y finalizaron a las 17:30. Durante este tiempo se tomaron cotas y fotografías para realizar el modelo geométrico. Como dicta la norma se anotaron las condiciones ambientales de la sala antes y después de las medidas, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 5. Condiciones ambientales de las medidas in situ.**  
**Hora**                      **Temperatura [°C]**                      **Humedad relativa [%]**

Hora	Temperatura [°C]	Humedad relativa [%]
<b>14:15 (inicio)</b>	22,9 °C	39,0 %
<b>17:30 (fin)</b>	22,5 °C	37,7 %

Dadas las características de la sala, se va a suponer que es simétrica, por lo tanto, el eje Y se va a colocar en la mitad del recinto.

Se van a usar dos posiciones de fuente (F01 y F02) posicionadas en el centro del escenario y delante de la zona de audiencia de la derecha (triángulo azul).

Para las posiciones de micrófono, se han repartido por la zona de audiencia, en puntos clave, como dice la norma. Como se ha mencionado antes, la sala es simétrica, por lo tanto, se van a poner las posiciones de micrófono solo en la mitad derecha según el escenario. Para comprobar esa simétrica se van a colocar micrófonos de control, es decir, se van a colocar posiciones de micrófonos simétricas en la mitad izquierda. También se van a posicionar micrófonos en el eje de la sala. Para distinguir cual es cual, se le han asignado diferentes nombres:

- Posiciones de Micrófono “Normales”: estos son los que se ubican en la mitad derecha de la audiencia. M01, M02, ..., M14. Hay 14 posiciones (punto rojo).
- Posiciones Micrófono de Control: estos son los que se ubican en la mitad izquierda de la audiencia, son los simétricos de los otros. Solo se han colocado para algunos y sirven para comprobar si la sala es simétrica y verificar las medidas de su simétrico. MC01, MC04, etc. Hay 6 posiciones (punto morado).
- Posiciones de Micrófono del Eje: estos son los que se ubican en el eje de la sala. ME01, ME02 y ME03 ..., M14. Hay 3 posiciones (punto verde).

Se fueron cambiando las posiciones de fuente y micrófono para realizar todas las combinaciones fuente-micrófono que hay. Además, se realizaron dos medidas por cada una para asegurar que los datos obtenidos eran válidos, como se mencionó antes.

En la siguiente tabla se muestran todas las posiciones de fuente y micrófono, con la fila y asiento que le corresponde y con sus coordenadas en metros.

Tabla 6. Coordenadas de las posiciones de fuente y micrófonos.

COORDENADAS						
PLANTA	N.º MICRO	FILA	BUTACA	X	Y	Z
0	F01	-	-	0,00	1,50	0,16
	F02	-	-	8,00	1,50	0,00
	M01	1	29	11,10	3,85	0,31
	M02	1	9	2,60	4,30	0,31
	M03	3	23	8,20	6,00	0,93
	M04	4	3	0,90	7,25	1,24
	M05	5	13	5,90	8,20	1,55
	M06	7	5	1,35	12,20	2,17
	M07	8	21	7,50	10,90	2,48
	M09	9	1	0,20	13,00	3,09
	MC01	1	30	-11,10	3,85	0,31
	MC04	4	4	-0,90	7,25	1,24
	MC07	8	22	-7,50	10,90	2,48
	ME01	2	-	0,00	5,20	0,62
	ME02	6	-	0,00	9,20	1,06
1	M08	10	11	5,00	13,00	3,40
	M10	11	9	2,10	15,30	3,40
	M11	-	-	7,70	16,40	3,40
	M12	-	-	12,80	15,90	3,40
	M13	-	-	12,80	7,80	3,40
	M14	-	-	12,80	1,50	3,40
	MC10	11	10	-2,10	15,30	3,40
	MC12	-	-	-12,80	15,90	3,40
	MC13	-	-	-12,80	1,50	3,40
	ME03	11	-	0,00	16,30	3,40

A continuación, se muestra el plano de la sala con las posiciones que se ven en la tabla 6 junto y fotografías de la sala.

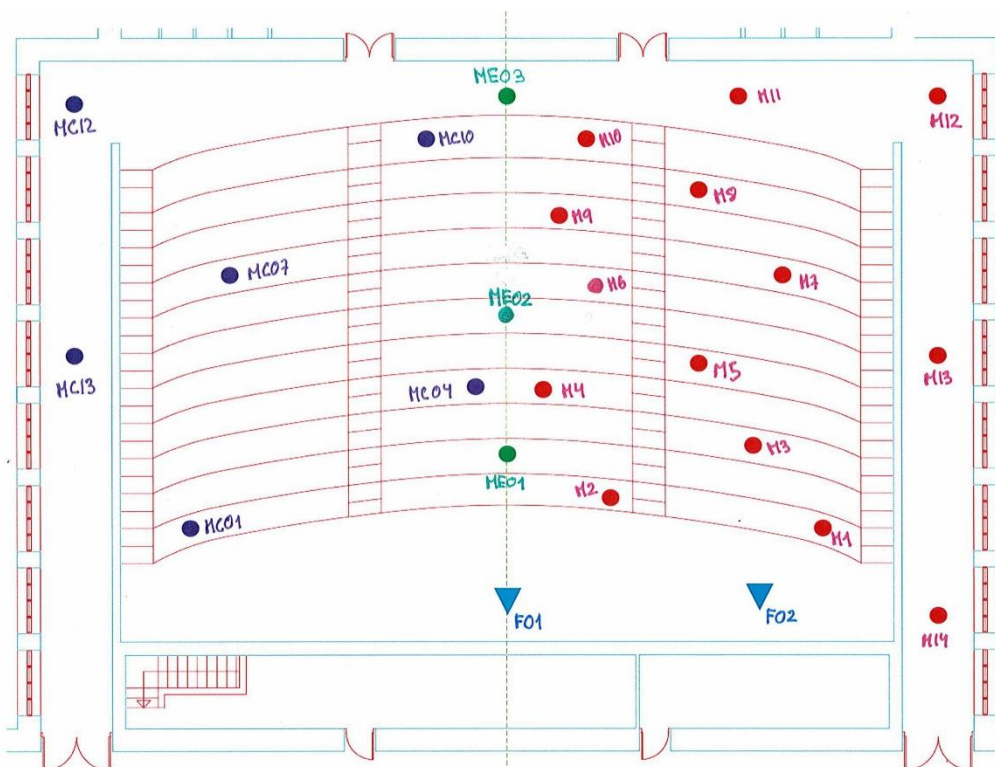


Figura 16. Plano del aula con todas las posiciones marcadas según las formas y colores anteriormente mencionados.



**Figura 17. Fotografía del Aula Magna desde el lado izquierdo del escenario.**



**Figura 18. Fotografía del Aula Magna desde delante de la zona de pupitres derecha, justo detrás de la posición F02.**



**Figura 19. Fotografía del Aula Magna desde la parte derecha del escenario con visualización de la posición F02.**

## 6. Procesado de Datos

Tras realizar las medidas *in situ*, el software DIRAC genera un fichero de texto que incluye todos los parámetros acústicos que se mencionaron en el apartado 4.3. La información que contiene este archivo hay que pasarla a Excel para poder tratar y analizar los datos medidos.

Para este proceso, los datos se organizan en dos ficheros de Excel diferentes, uno para tercios de octava y otro para bandas de octavas. Los datos en tercios de octava son los que se usan para realizar la validación del modelo geométrico. Aunque los datos en bandas de octava no se han utilizado, se han procesado de la misma manera y se puede ver con detalle en el Anexo II.

En Excel se pueden filtrar los datos para ordenarlos y facilitar su procesamiento. Se van a aplicar los siguientes filtros:

- Parámetro acústico (Medida).
- Posición de fuente.
- Posición de micrófono.
- Bandas de frecuencias (Tercios).
- Canal, 1 para el micrófono omnidireccional y 2 para el bidireccional.
- Punto de medida, combinación de fuente-micrófono.
- Zona, planta 0 (verde) y planta 1 (naranja).
- Repetición, 1 para la primera medida y 2 para la repetición de esta.
- Directorio donde se guardan los datos.

Medida	Fuente	Micrófono	Frecuencia	Canal	Punto	Distancia	Zona	Repetición	Directorio
RT [s]	F01	M01	Tercios	1	F01M01		PLANTA 0	_1	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 0\F01M01_1.wav
RT [s]	F01	M01	Tercios	1	F01M01		PLANTA 0	_2	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 0\F01M01_2.wav
RT [s]	F01	M02	Tercios	1	F01M02		PLANTA 0	_1	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 0\F01M02_1.wav
RT [s]	F01	M02	Tercios	1	F01M02		PLANTA 0	_2	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 0\F01M02_2.wav
RT [s]	F01	M03	Tercios	1	F01M03		PLANTA 0	_1	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 0\F01M03_1.wav
RT [s]	F01	M03	Tercios	1	F01M03		PLANTA 0	_2	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 0\F01M03_2.wav
RT [s]	F01	M08	Tercios	1	F01M08		PLANTA 1	_1	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 1\F01M08_1.wav
RT [s]	F01	M08	Tercios	1	F01M08		PLANTA 1	_2	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 1\F01M08_2.wav
RT [s]	F01	M10	Tercios	1	F01M10		PLANTA 1	_1	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 1\F01M10_1.wav
RT [s]	F01	M10	Tercios	1	F01M10		PLANTA 1	_2	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 1\F01M10_2.wav
RT [s]	F01	M11	Tercios	1	F01M11		PLANTA 1	_1	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 1\F01M11_1.wav
RT [s]	F01	M11	Tercios	1	F01M11		PLANTA 1	_2	C:\Users\Prestamo\Desktop\PFG JJGA\PFG Ana Pascual Porras\PLANTA 1\F01M11_2.wav

**Figura 20. Clasificación de los datos en Excel, planta 0 en verde y planta 1 en naranja.**

Con la herramienta Excel también es posible asignar colores para las dos zonas, verde para la Planta 0 y naranja para la Planta 1. Así resulta más rápida y clara la lectura de los datos.

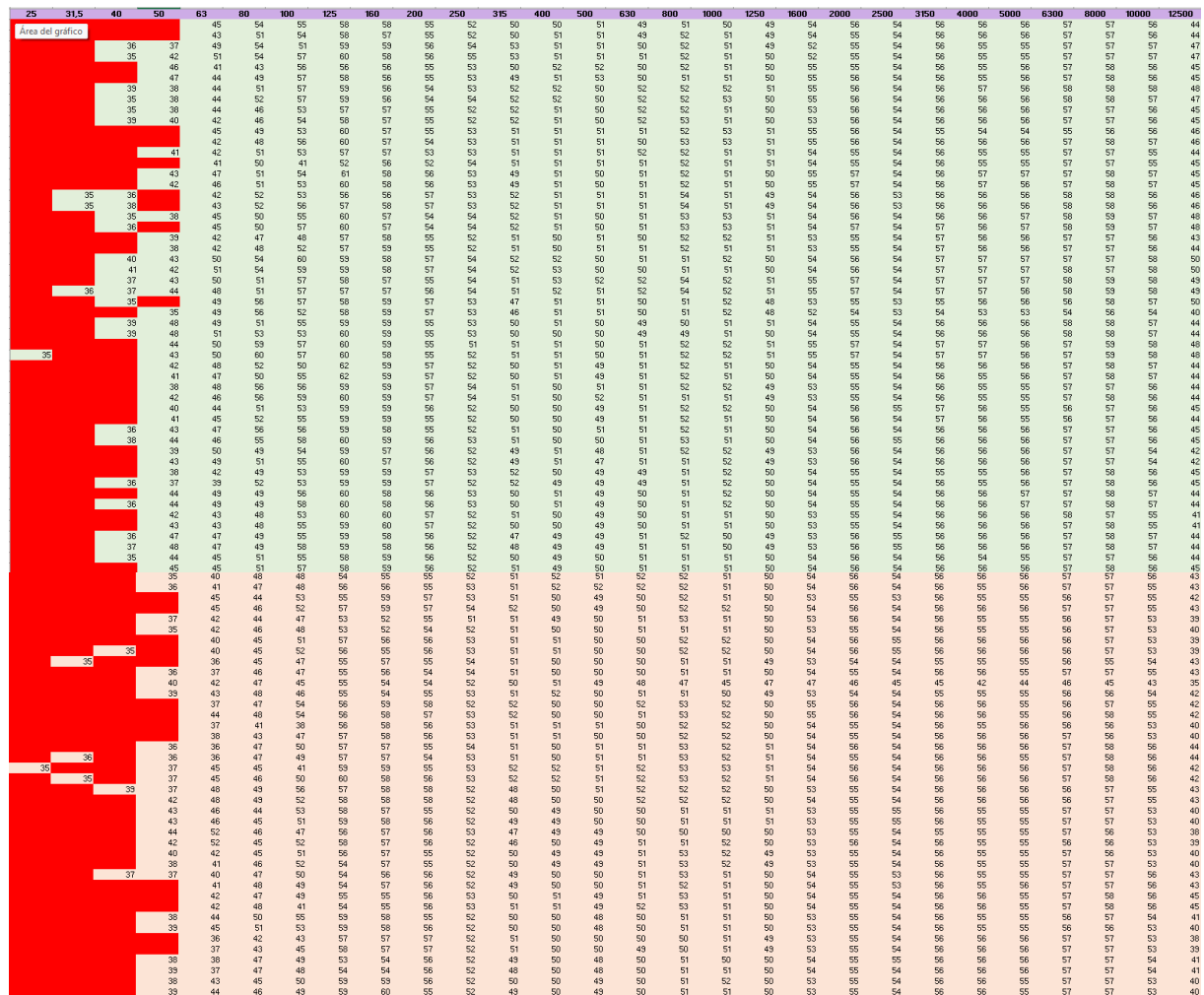
Una vez se han organizado todos los datos, se crea una hoja por cada parámetro acústico para procesarlo individualmente. Como se ha mencionado antes, todo el proceso se va a realizar tanto para bandas de octavas (Anexo II), como para tercios de octavas, el cual se va a explicar a continuación.

### 6.1. Criterios de procesamiento

Tras ordenar los datos obtenidos en las medidas acústicas y para asegurar su validez, se van a establecer dos criterios. Esto consiste en un doble filtrado. El primero basado en el parámetro INR (relación impulso a ruido) y el segundo aplicando el criterio estadístico de Chauvenet. Ambos filtrados se han aplicado a todos los parámetros tanto en bandas de octava como en tercios de octava por separado. Solamente se tienen en cuenta los datos en tercios de octava para la validación del modelo.

En el primer filtrado de los datos, se trabaja con el parámetro INR. Este es clave ya que compara el nivel de presión sonora emitido por la fuente respecto el ruido de fondo. Cuando el INR es superior a 35 dB, se da por válida la medida. Por debajo de este valor, se descarta.

En Excel este criterio se puede realizar utilizando el formato condicional. Este elimina todas las muestras de este parámetro con valores inferiores a 35 dB y pinta la celda correspondiente en rojo creando una “máscara INR”. Esta máscara se aplica a todos los parámetros acústicos y se puede ver su forma en la siguiente figura.



**Figura 21. Máscara INR.**

Como se puede apreciar en la figura anterior, este filtrado afecta principalmente a las bandas de frecuencias más bajas, de 50 Hz para abajo. Esto se debe a que la fuente omnidireccional que se utilizó no excita idóneamente la sala a ese rango de frecuencias. Como el software EASE solo trabaja con un rango de frecuencias de 100 Hz a 10 kHz, estas pérdidas no afectan a la validación y son irrelevantes.

Tras aplicar este filtrado el porcentaje de muestras eliminadas no debe superar el 20% ya que si no las medidas no serían válidas. En este caso el porcentaje es del 16,23 %, por lo que se puede continuar con procesamiento de los datos. En la siguiente tabla se ve un resumen de este criterio.

Con el segundo criterio se quieren eliminar las muestras que se distancian considerablemente del valor promedio del parámetro con el que se está trabajando, es decir, que elimina las muestras que estadísticamente no se consideran representativas de este parámetro. Todo este proceso se basa en la distribución normal de Gauss, que se muestra en la siguiente figura.

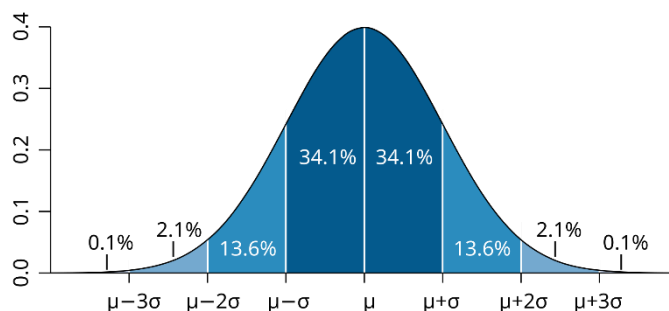


Figura 22. Campana de Gauss.

Como se ve en la gráfica, el promedio total está centrado y se fija el intervalo de confianza que establece las muestras que se van a eliminar y las que no.

Para hacer uso de este criterio, hay que calcular el promedio y la desviación estándar en cada tercio de octava. Tras esto, se aplica el criterio de Chauvenet a todas las muestras para descartar las que cuyo valor se aleja bastante del promedio calculado. Después, se va comparando el valor absoluto de la resta de cada muestra y el promedio con el producto de la constante de Chauvenet y la desviación estándar.

$$K_n = 0,3704 * Ln(n) + 1,06903 \quad (24)$$

$$|\bar{x} - x_i| > K_n * \sigma \quad (25)$$

Donde:

$K_n$ : constante de Chauvenet.

$n$ : número de muestras que hay en cada banda (las que quedan después de INR).

$\bar{x}$ : promedio total del tercio de octava correspondiente.

$x_i$ : muestra a evaluar.

$\sigma$ : desviación estándar.

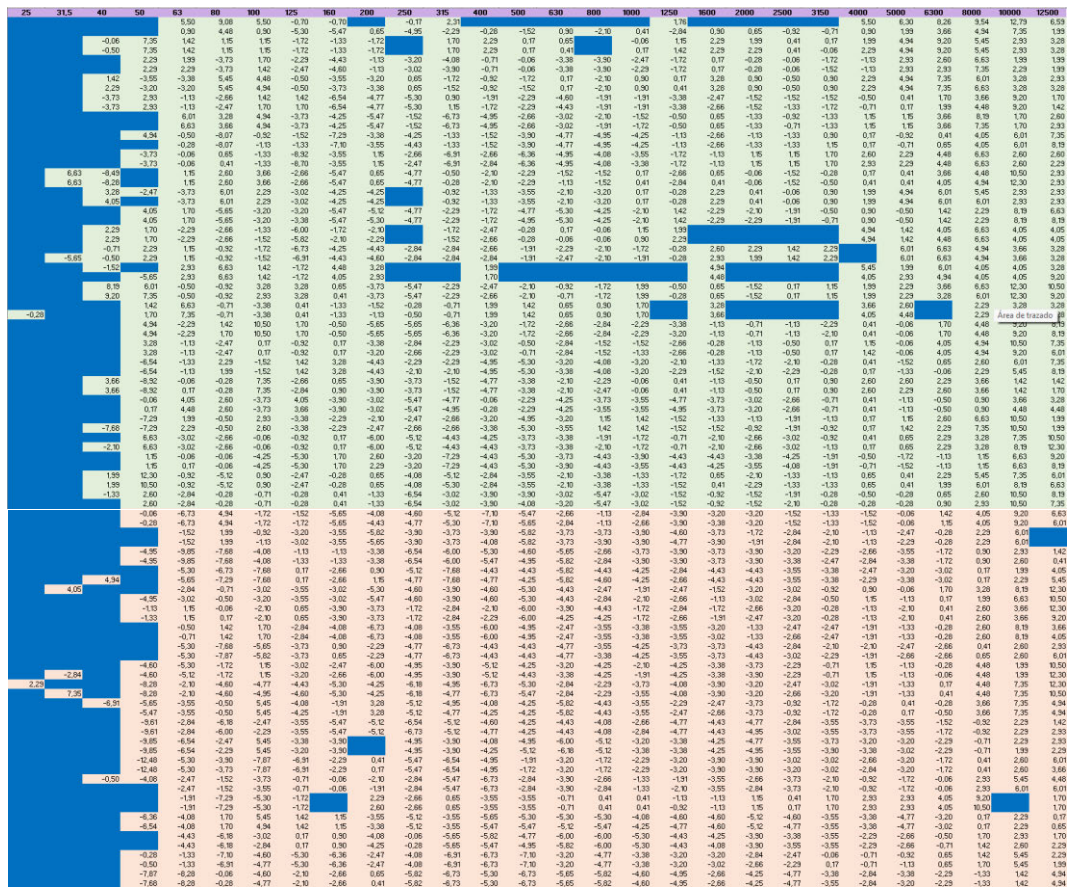
Si se cumple la ecuación 25, se elimina esa muestra. Este criterio se va repitiendo a través de un proceso iterativo hasta que ya no se descartan más. En cada iteración que pasa hay que volver a calcular la media y la desviación estándar ya que, al eliminar valores, su valor cambia. Se ha repetido este proceso hasta que se han dejado de perder muestras. Es importante tener en cuenta que el porcentaje de muestras eliminadas por este criterio no supere el 3% ya que de lo contrario las medidas que se obtuvieron no serían válidas.

En la figura 23 se puede ver el resultado tras ambos filtrados del parámetro LFC. El porcentaje de Chauvenet supera el 3%, esto se debe a que se produjo un error a la hora de calcular este parámetro por parte del software de medida DIRAC. Aun así, tampoco afecta mucho, ya que más o menos la mitad de las muestras que se pierdan están a frecuencias fuera del rango con el que se trabaja. (100 Hz – 10 kHz). Asimismo, en la figura 24, se representa el resultado de la aplicación conjunta de los dos filtrados para el parámetro C80.

*Diseño y Validación de un Modelo Geométrico para el Estudio Acústico del Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid*



**Figura 23. Resultado final tras ambos filtros del parámetro LFC.**



**Figura 24. Resultado final tras ambos filtros del parámetro C80.**

A continuación, se muestra dos tablas resumen de todo este proceso, una en porcentaje y otra en muestras.

**Tabla 7. Porcentaje de valores descartados tras cada filtrado y el total.**

PLANTA 0 Y PLANTA 1			
PARÁMETRO	% ELIMINADO POR INR	% ELIMINADO POR CHAUVENET	% TOTAL ELIMINADO
EDT [-]	16,23	1,23	17,46
C50 [dB]	16,23	1,74	17,97
C80 [dB]	16,23	2,36	18,59
D50 [-]	16,23	1,45	17,68
T20 [s]	16,23	0,87	17,10
T30 [s]	16,23	1,05	17,28
LF [-]	16,23	3,12	19,35
LFC [-]	16,23	21,16	37,39
TS [s]	16,23	1,12	17,36
RT [s]	16,23	2,61	18,84

**Tabla 8. Número de muestras eliminadas tras cada filtrada y el total**

PLANTA 0 Y PLANTA 1				
PARÁMETRO	MUESTRAS TOTALES	MUESTRAS ELIMINADAS POR INR	MUESTRAS ELIMINADAS POR CHAUVENET	MUESTRAS TOTALES ELIMINADAS
EDT [-]	2760	448	34	482
C50 [dB]	2760	448	48	496
C80 [dB]	2760	448	66	514
D50 [-]	2760	448	40	488
T20 [s]	2760	448	24	472
T30 [s]	2760	448	29	477
LF [-]	2760	448	86	534
LFC [-]	2760	448	584	1032
TS [s]	2760	448	31	479
RT [s]	2760	448	72	520

## 6.2. Resultados de los Parámetros acústicos

Una vez filtrados los datos conforme a los criterios descritos previamente, los resultados quedan listos para servir como referencia en la validación del modelo.

A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos de todos los parámetros acústicos, organizados por tipología, en función de la frecuencia. En concreto, las bandas de los tercios de octava comprendidos entre 100 Hz y 10 kHz, rango con el que trabaja EASE. Para complementar este análisis, los resultados en bandas de octavas están disponibles en el Anexo II. En las gráficas, se muestran tanto los resultados por zonas del recinto (planta 0 y planta 1) como los globales.

Para cada parámetro se indica el valor medio en cada banda, la desviación estándar asociada y su valor en métrica JND correspondiente.

### 6.2.1. Parámetros temporales

- EDT [s]

Tabla 9. Promedio y desviación total del parámetro EDT [s] medido in situ.

Frecuencia (Hz)	EDT [s]		
	Promedio [s]	$\sigma$ [s]	$\sigma$ JND
100	1,92	0,59	7
125	2,33	0,56	5
160	2,38	0,45	4
200	2,35	0,35	3
250	2,58	0,42	4
315	2,88	0,40	3
400	3,04	0,29	2
500	3,03	0,26	2
630	3,09	0,23	2
800	2,93	0,24	2
1000	3,01	0,19	2
1250	2,83	0,16	2
1600	2,82	0,20	2
2000	2,70	0,14	2
2500	2,49	0,15	2
3150	2,26	0,13	2
4000	1,93	0,11	2
5000	1,51	0,11	2
6300	1,20	0,11	2
8000	0,91	0,11	3
10000	0,68	0,11	4

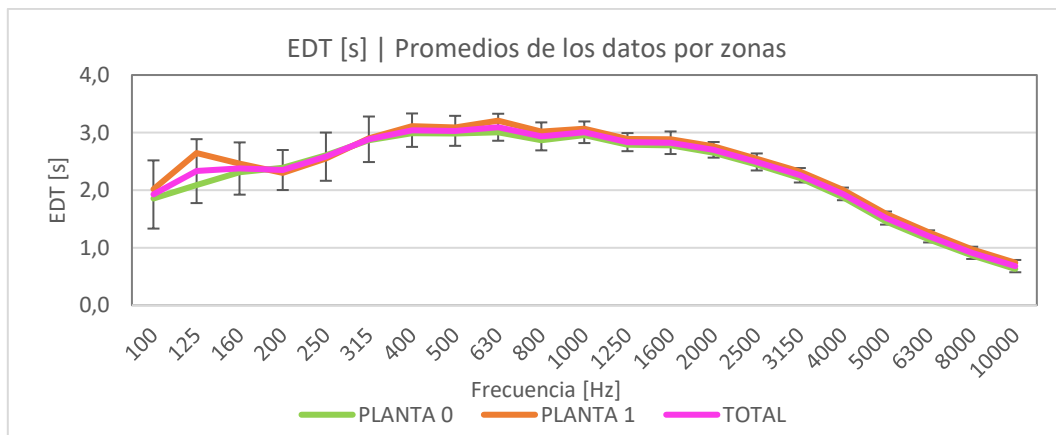


Figura 25. Promedio total y por zonas del parámetro EDT [s] medido in situ.

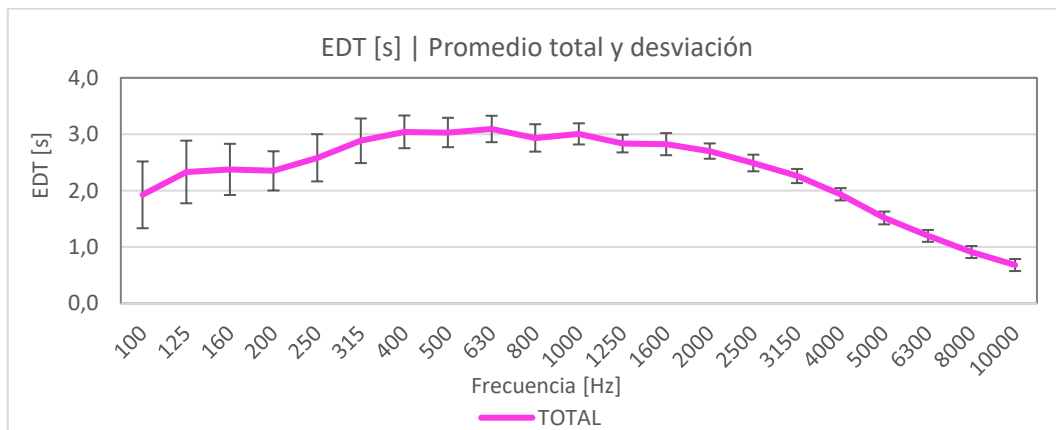


Figura 26. Promedio total junto su desviación del parámetro EDT [s] medido in situ.

-  $T_{20}$  [s]

Tabla 10. Promedio y desviación total del parámetro  $T_{20}$  [s] medido in situ.

T20 [s]			
Frecuencia (Hz)	Promedio [s]	$\sigma$ [s]	$\sigma$ JND
100	1,90	0,21	3
125	2,23	0,21	2
160	2,29	0,19	2
200	2,34	0,19	2
250	2,53	0,19	2
315	2,80	0,18	2
400	3,08	0,20	2
500	3,02	0,18	2
630	3,08	0,15	1
800	2,96	0,12	1
1000	2,93	0,10	1
1250	2,84	0,08	1
1600	2,81	0,06	1
2000	2,70	0,06	1
2500	2,49	0,06	1
3150	2,25	0,05	1
4000	1,97	0,04	1
5000	1,58	0,03	1
6300	1,26	0,04	1
8000	0,98	0,03	1
10000	0,76	0,04	2

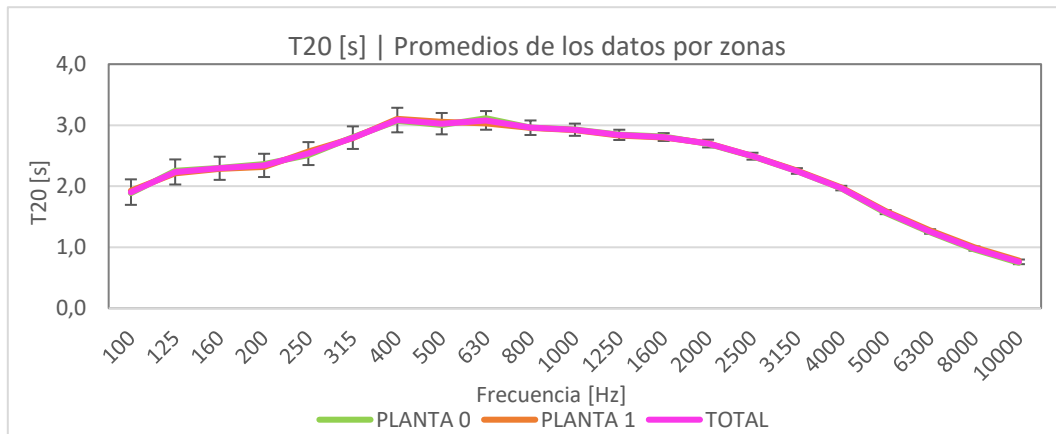


Figura 27. Promedio total y por zonas del parámetro  $T_{20}$  [s] medido in situ.

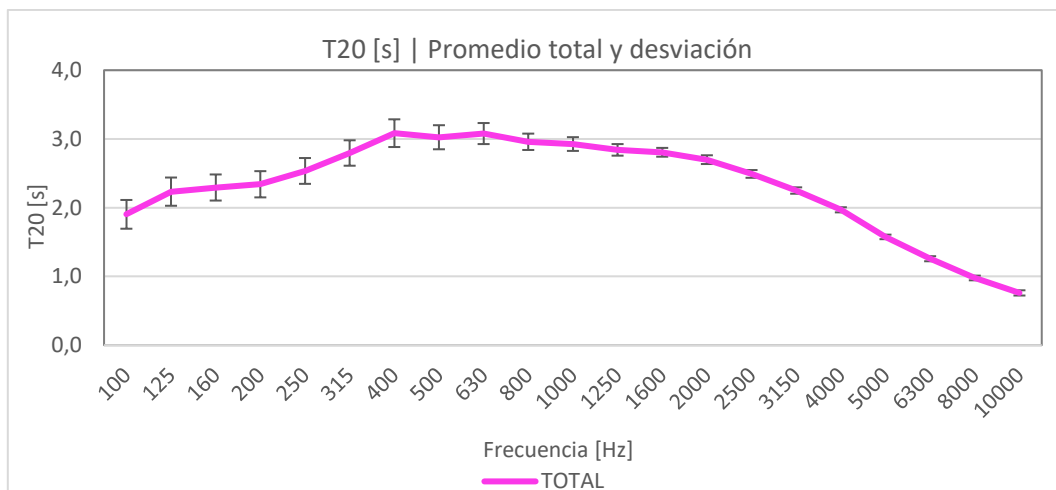


Figura 28. Promedio total junto su desviación del parámetro  $T_{20}$  [s] medido in situ.

-  $T_{30}$  [s]

Tabla 11. Promedio y desviación total del parámetro  $T_{30}$  [s] medido in situ.

T30 [s]			
Frecuencias (Hz)	Promedio [s]	$\sigma$ [s]	$\sigma$ JND
100	1,92	0,13	2
125	2,20	0,17	2
160	2,28	0,17	2
200	2,35	0,16	2
250	2,59	0,13	2
315	2,80	0,10	1
400	3,08	0,11	1
500	3,08	0,09	1
630	3,05	0,09	1
800	2,96	0,07	1
1000	2,92	0,07	1
1250	2,83	0,06	1
1600	2,80	0,05	1
2000	2,68	0,04	1
2500	2,47	0,04	1
3150	2,25	0,03	1
4000	1,96	0,03	1
5000	1,58	0,03	1
6300	1,26	0,03	1
8000	0,99	0,03	1
10000	0,77	0,03	1

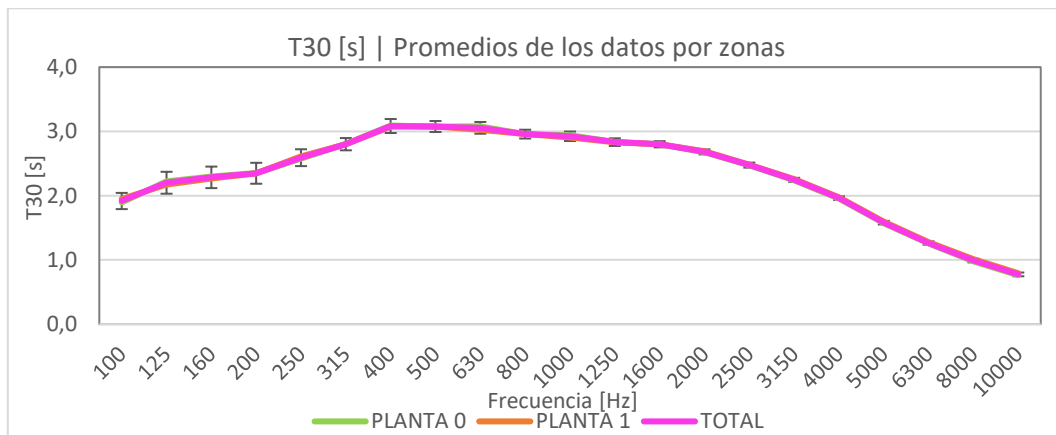


Figura 29. Promedio total y por zonas del parámetro  $T_{30}$  [s] medido in situ.

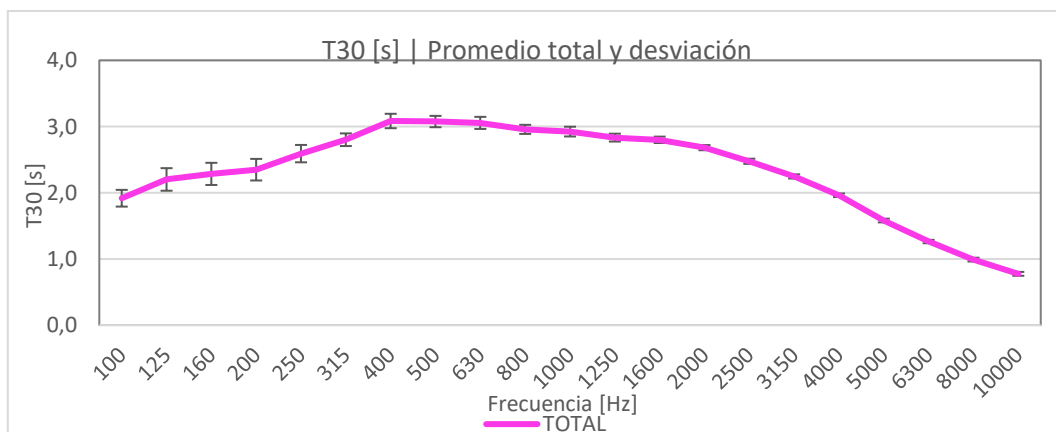


Figura 30. Promedio total junto su desviación del parámetro  $T_{30}$  [s] medido in situ.

- RT [s]

Tabla 12. Promedio y desviación total del parámetro RT [s] medido in situ.

RT [s]			
Frecuencias (Hz)	Promedio [s]	$\sigma$ [s]	$\sigma$ JND
100	1,87	0,20	3
125	2,20	0,21	2
160	2,30	0,17	2
200	2,34	0,16	2
250	2,58	0,14	2
315	2,80	0,08	1
400	3,08	0,12	1
500	3,07	0,09	1
630	3,05	0,09	1
800	2,97	0,08	1
1000	2,92	0,07	1
1250	2,82	0,06	1
1600	2,80	0,05	1
2000	2,68	0,04	1
2500	2,48	0,04	1
3150	2,25	0,03	1
4000	1,96	0,03	1
5000	1,58	0,03	1
6300	1,26	0,03	1
8000	0,99	0,03	1
10000	0,77	0,03	1

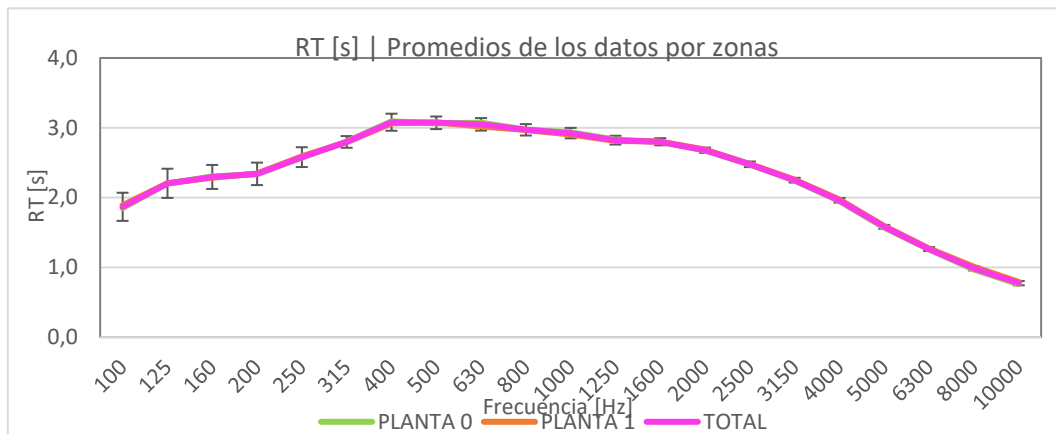


Figura 31. Promedio total y por zonas del parámetro RT [s] medido in situ.

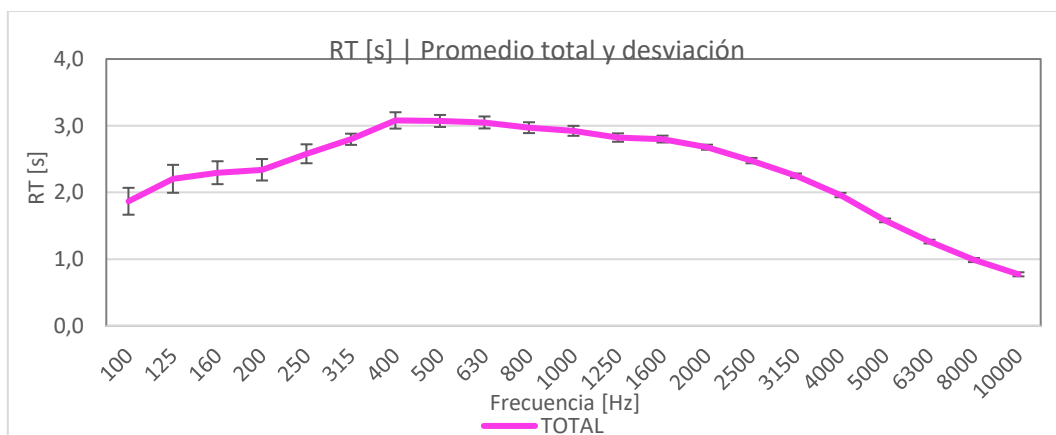


Figura 32. Promedio total junto su desviación del parámetro RT [s] medido in situ.

### 6.2.2. Parámetros energéticos

- **C<sub>50</sub> [dB]**

Tabla 13. Promedio y desviación total del parámetro C50 [dB] medido in situ.

C50 [dB]			
Frecuencias (Hz)	Promedio [dB]	$\sigma$ [dB]	$\sigma$ JND
100	-2,29	3,27	4
125	-3,68	2,28	3
160	-4,09	2,71	3
200	-4,54	2,57	3
250	-6,08	2,01	3
315	-6,16	2,78	3
400	-6,11	2,31	3
500	-6,42	2,18	3
630	-6,13	2,00	2
800	-5,88	2,07	3
1000	-6,07	1,87	2
1250	-5,75	1,81	2
1600	-5,09	2,46	3
2000	-4,90	2,22	3
2500	-5,05	1,46	2
3150	-4,32	1,69	2
4000	-3,41	1,56	2
5000	-1,44	2,30	3
6300	0,37	2,42	3
8000	1,99	2,26	3
10000	4,33	2,76	3

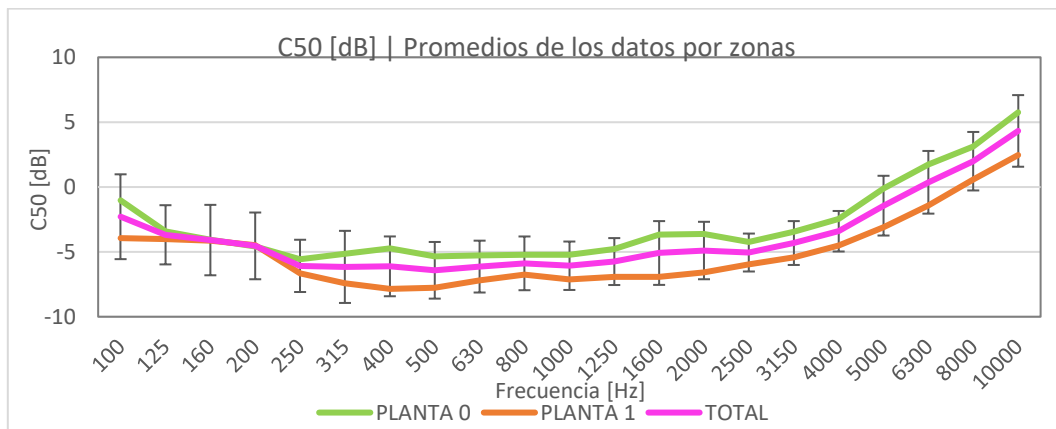


Figura 33. Promedio total y por zonas del parámetro C50 [dB] medido in situ.

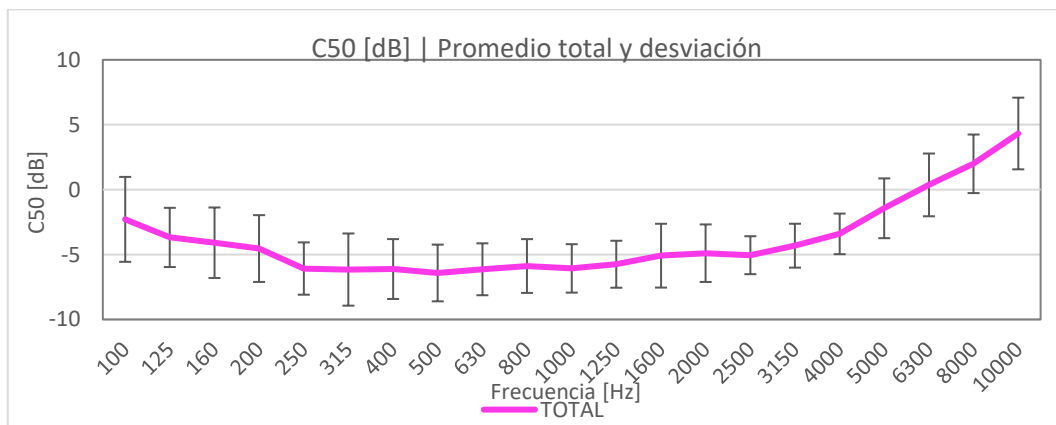


Figura 34. Promedio total junto su desviación del parámetro C50 [dB] medido in situ.

- **C<sub>80</sub> [dB]**

Tabla 14. Promedio y desviación total del parámetro C<sub>80</sub> [dB] medido in situ.

C <sub>80</sub> [dB]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [dB]	$\sigma$ [dB]	$\sigma$ JND
100	-0,34	4,01	5
125	-2,13	2,63	3
160	-2,32	2,69	3
200	-2,56	2,68	3
250	-3,99	1,78	2
315	-3,67	2,43	3
400	-3,43	2,26	3
500	-3,66	1,96	2
630	-3,27	1,82	2
800	-3,05	1,73	2
1000	-2,07	1,87	2
1250	-2,27	1,88	2
1600	-1,58	2,44	3
2000	-2,02	1,93	2
2500	-1,90	1,54	2
3150	-1,11	1,62	2
4000	0,09	2,20	3
5000	0,05	2,65	3
6300	1,53	2,94	3
8000	3,56	2,57	3
10000	5,43	3,18	4

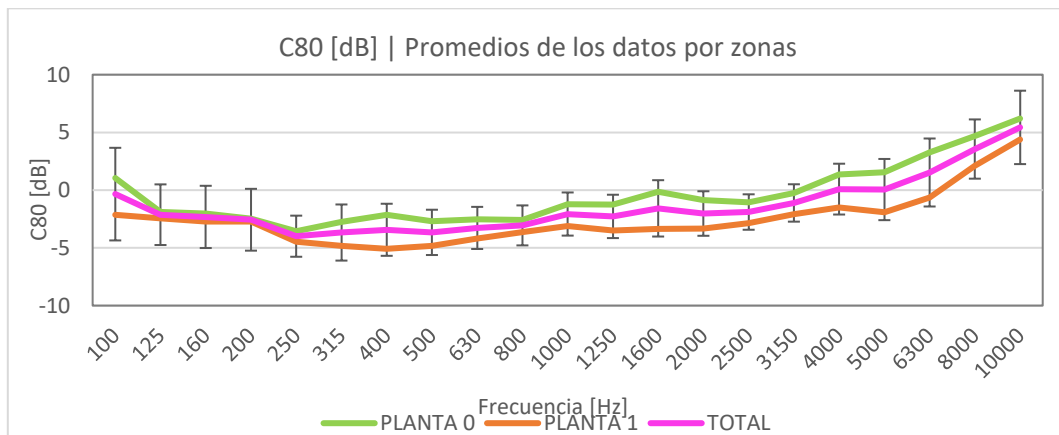


Figura 35. Promedio total y por zonas del parámetro C<sub>80</sub> [dB] medido in situ.

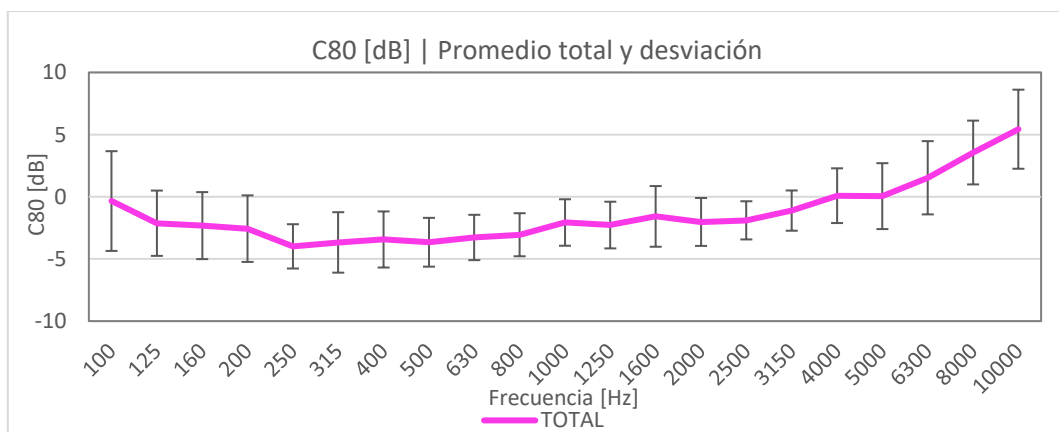


Figura 36. Promedio total junto su desviación del parámetro C<sub>80</sub> [dB] medido in situ.

-  $D_{50}$  [-]

Tabla 15. Promedio y desviación total del parámetro  $D_{50}$  [-] medido in situ.

$D_{50}$ [-]			
Frecuencias (Hz)	Promedio [dB]	$\sigma$ [dB]	$\sigma$ JND
100	0,38	0,12	3
125	0,32	0,09	2
160	0,31	0,10	3
200	0,30	0,10	2
250	0,23	0,07	2
315	0,23	0,09	2
400	0,24	0,08	2
500	0,23	0,08	2
630	0,24	0,07	2
800	0,24	0,07	2
1000	0,24	0,07	2
1250	0,25	0,07	2
1600	0,28	0,09	2
2000	0,28	0,08	2
2500	0,27	0,06	2
3150	0,29	0,06	2
4000	0,35	0,08	2
5000	0,42	0,09	2
6300	0,48	0,08	2
8000	0,53	0,07	2
10000	0,59	0,05	2

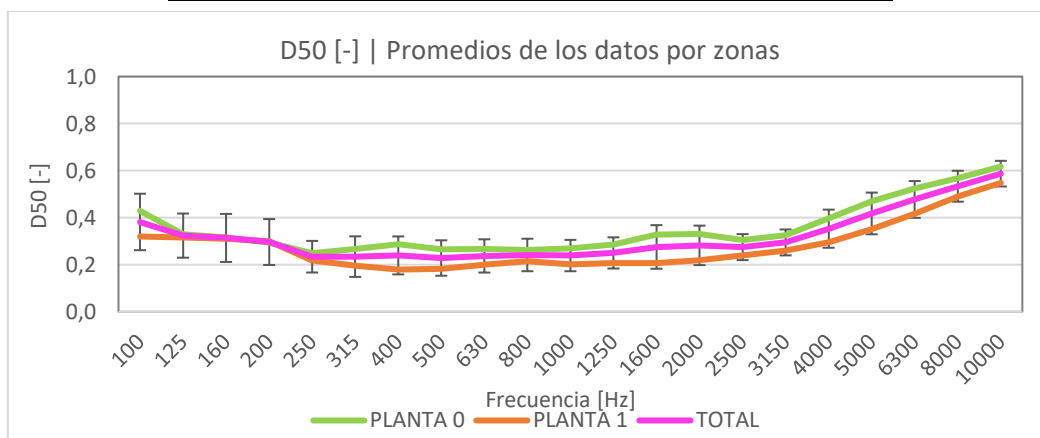


Figura 37. Promedio total y por zonas del parámetro  $D_{50}$  [-] medido in situ.

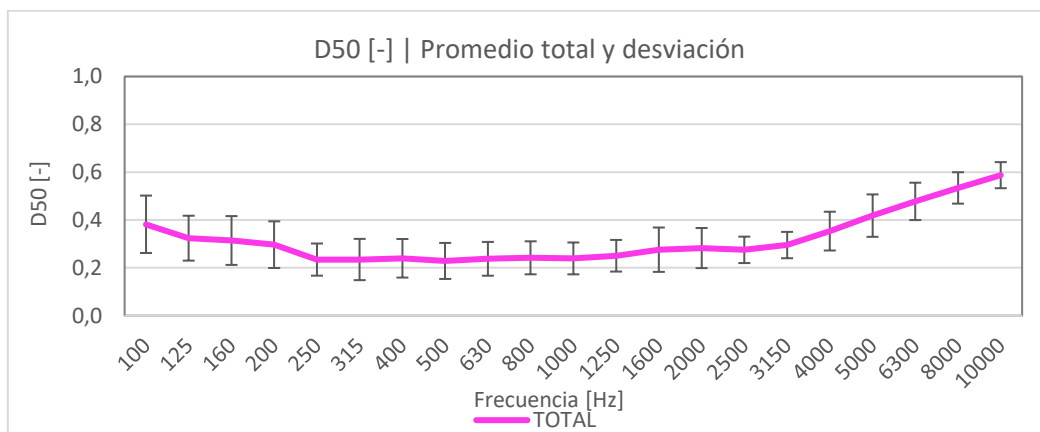
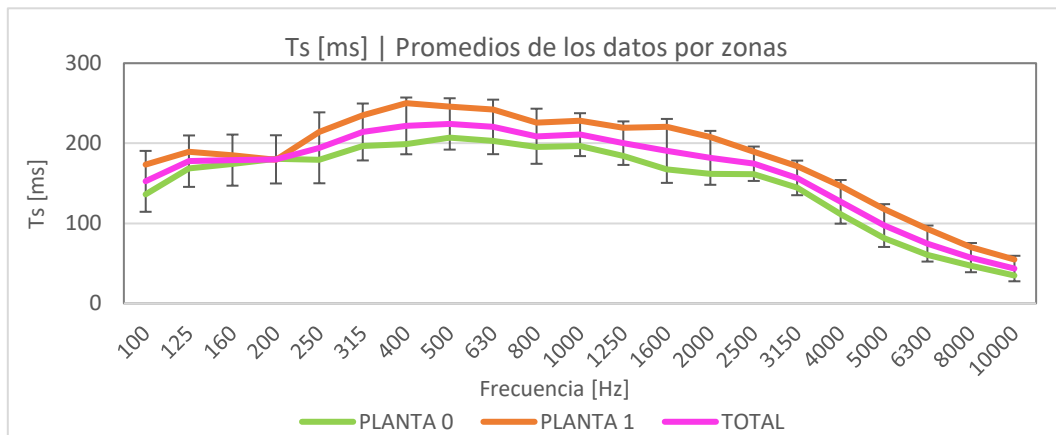


Figura 38. Promedio total junto su desviación del parámetro  $D_{50}$  [-] medido in situ.

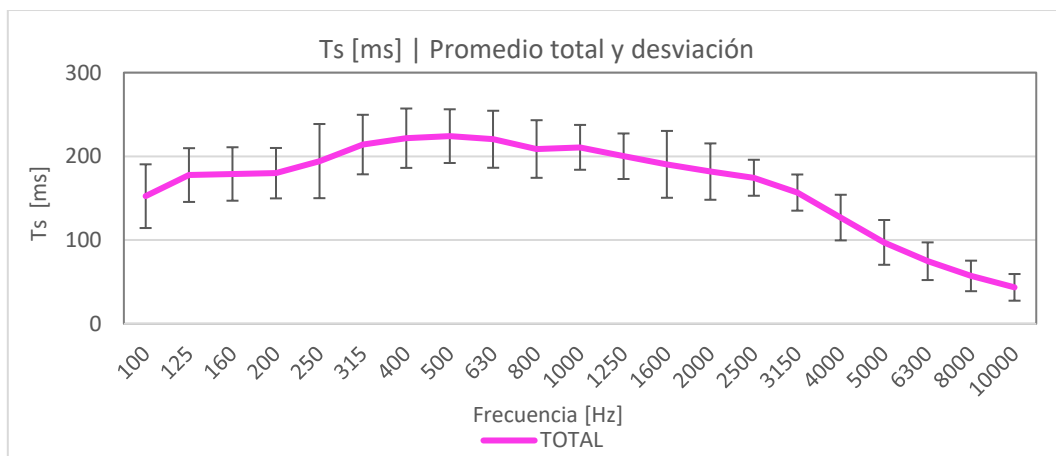
- **Ts [ms]:**

**Tabla 16. Promedio y desviación total del parámetro Ts [ms] medido in situ.**

Ts [ms]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [ms]	$\sigma$ [ms]	$\sigma$ JND
100	152,45	38,04	4
125	177,66	32,11	4
160	178,95	31,91	4
200	179,91	30,10	4
250	194,33	44,29	5
315	214,10	35,55	4
400	221,68	35,46	4
500	224,15	32,07	4
630	220,42	34,04	4
800	208,76	34,40	4
1000	210,77	26,78	3
1250	200,14	27,19	3
1600	190,46	39,92	4
2000	181,79	33,66	4
2500	174,43	21,49	3
3150	156,75	21,61	3
4000	126,86	27,25	3
5000	97,25	26,74	3
6300	74,76	22,49	3
8000	57,21	18,25	2
10000	43,56	15,93	2



**Figura 39. Promedio total y por zonas del parámetro Ts [ms] medido in situ.**



**Figura 40. Promedio total junto su desviación del parámetro Ts [ms] medido in situ.**

### 6.2.3. Parámetros espaciales.

- LF [-]

Tabla 17. Promedio y desviación total del parámetro LF [-] medido in situ.

LF [-]			
Frecuencias [Hz+]	Promedio [-]	$\sigma$ [-]	$\sigma$ JND
100	0,01	0,01	1
125	0,01	0,01	1
160	0,02	0,01	1
200	0,03	0,02	1
250	0,04	0,03	1
315	0,04	0,03	1
400	0,06	0,04	1
500	0,07	0,04	1
630	0,07	0,04	1
800	0,09	0,04	1
1000	0,09	0,03	1
1250	0,10	0,04	1
1600	0,10	0,04	1
2000	0,11	0,05	1
2500	0,12	0,05	1
3150	0,14	0,05	1
4000	0,15	0,07	2
5000	0,12	0,05	1
6300	0,10	0,04	1
8000	0,13	0,06	2
10000	0,20	0,10	2

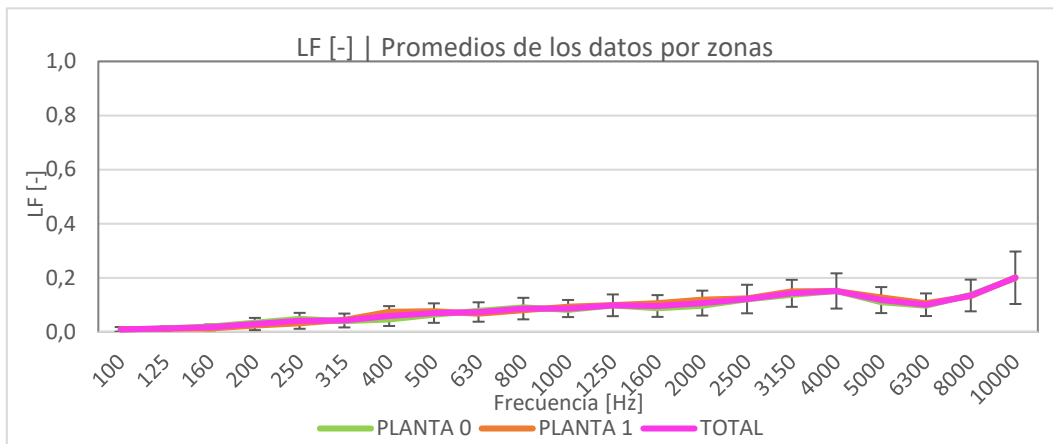


Figura 41. Promedio total y por zonas del parámetro LF [-] medido in situ.

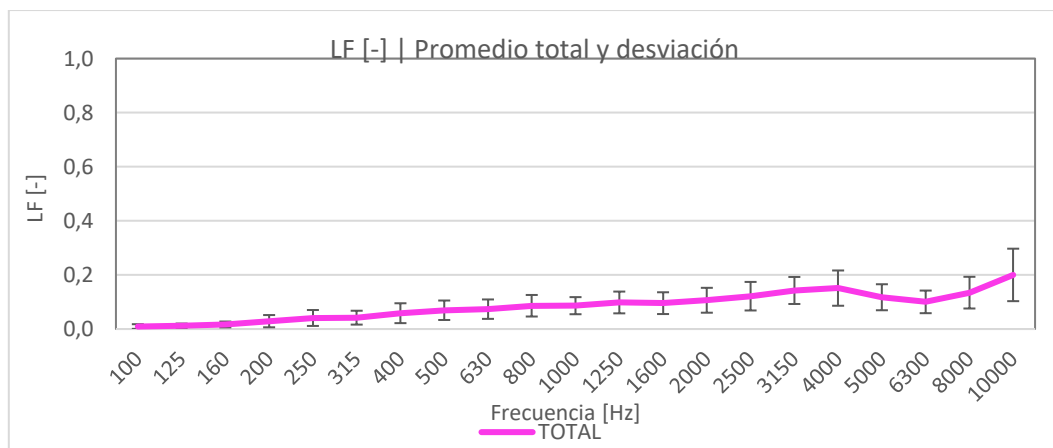


Figura 42. Promedio total junto su desviación del parámetro LF [-] medido in situ.

## 6.2.4. Parámetros de inteligibilidad

### - Alcons [%]

Tabla 18. Promedio y desviación total del parámetro Alcons [%] medido in situ.

Alcons [%]		
Promedio [%]	$\sigma$ [%]	$\sigma$ JND
17,22	4,22	3

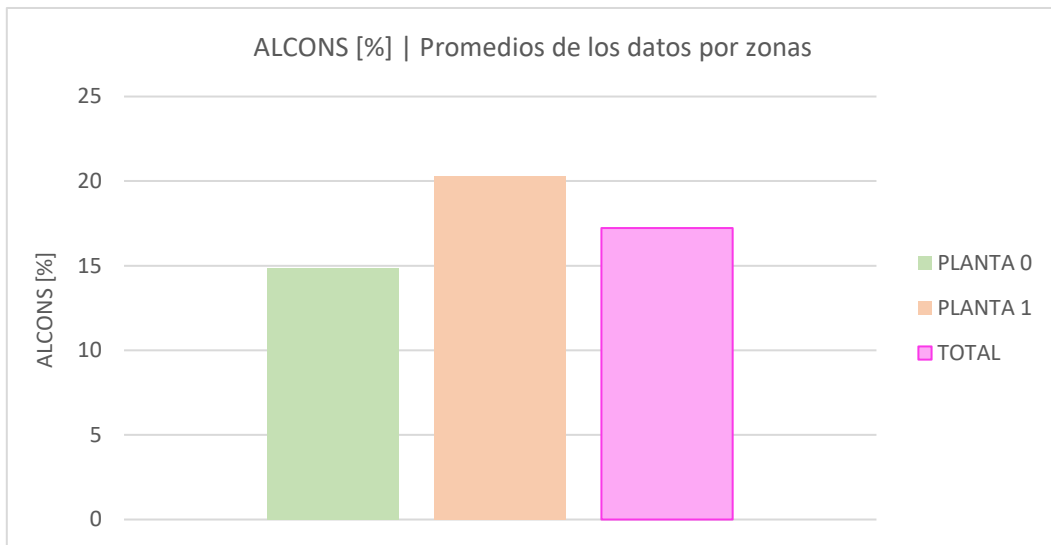


Figura 43. Promedio total y por zonas del parámetro Alcons [%] medido in situ.

### - STI [-]

Tabla 19. Promedio y desviación total del parámetro STI [-] medido in situ.

STI		
Promedio [-]	$\sigma$ [-]	$\sigma$ JND
0,44	0,05	2

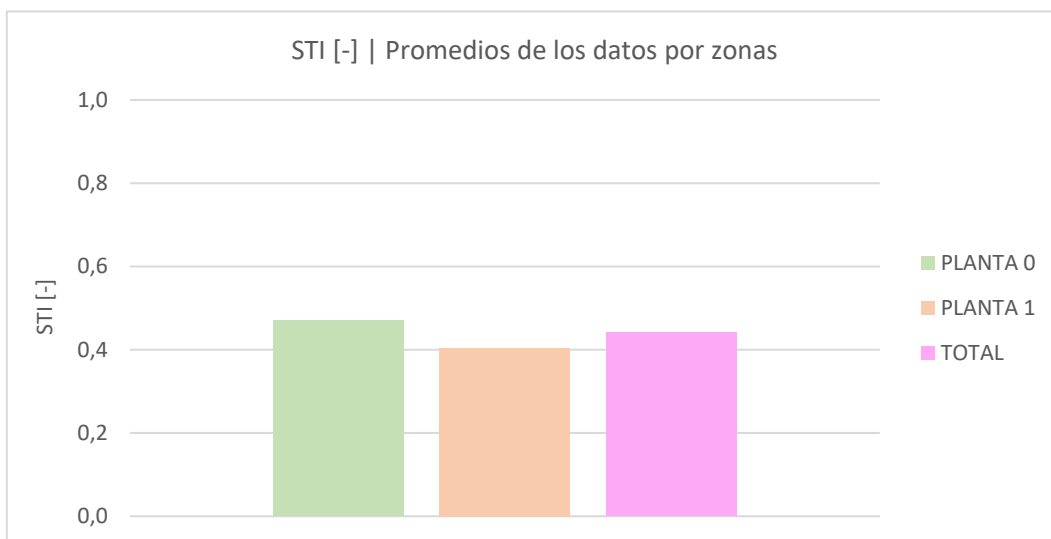


Figura 44. Promedio total y por zonas del parámetro STI [-] medido in situ.

Tras presentar los resultados, se van a exponer algunas conclusiones sobre los resultados obtenidos en las medidas *in situ*.

Como se puede ver en las figuras anteriores, en frecuencias medias en donde el EDT tiene un valor mayor. Se observa que la curva crece hasta 400 Hz, luego es más o menos estable y empieza a decaer a partir de 1250 Hz. En baja frecuencia, los valores de EDT están más distanciados entre sí, sobre todo en la banda de tercio de 100 Hz, con escalón JND 7, y la de 125 Hz, con escalón JND 5.

El parámetro  $T_{20}$  tiene el mismo comportamiento que EDT, y aunque se analizan la caída de los primeros 20 dB, los resultados no se distancian tanto como con el EDT.

Con  $T_{30}$  ocurre lo mismo que con el parámetro  $T_{20}$ , pero se calcula con una caída de 30 dB.

El tiempo de reverberación RT mantiene la forma de la curva que tiene EDT, pero con un valor menor ya que el parámetro EDT se calcula con la caída de los primeros 10 dB.

Para que el valor de C50 sea adecuado tiene que ser mayor de -1,5 dB. Esto solo ocurre en frecuencias altas y apunta a que en algunas posiciones la claridad del lenguaje no es la adecuada.

Para que el valor de C80 sea adecuado tiene que estar dentro del rango de -2 dB y 6 dB. Esto se cumple en el tercio de octava de 100 Hz y a partir del tercio de octava de 1000 Hz.

Se puede ver tanto en la tabla como en las gráficas que el valor de  $D_{50}$  varía mucho de unas frecuencias a otras. Esto se puede deber a los materiales y su distribución en la sala. Cuanto mayor sea el valor de  $D_{50}$ , mejor calidad acústica se percibe, que en este caso es en alta frecuencia.

El rango óptimo de valores de  $T_s$  es en torno a 130 ms, dejando un margen de  $\pm 20$  ms. En este caso, a frecuencias bajas y medias los valores están por encima y a frecuencias altas por debajo. Se puede decir que la nitidez del sonido no es de gran calidad.

Como se puede ver en las gráficas de LF, la curva de este parámetro va creciendo con la frecuencia, aunque a la frecuencia de 6300 Hz desciende un poco el valor, pero luego vuelve a crecer.

Según la tabla 1 del apartado 4, el valor obtenido de Alcons se considera "regular".

Según la tabla 2 del apartado 4, el valor obtenido de STI se considera "pobre".

## 7. Diseño 3D del Modelo Arquitectónico Simplificado del Aula Magna

Durante este apartado se va a describir el proceso por el cual se ha diseñado el modelo arquitectónico simplificado en 3D del Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid para su posterior utilización en la simulación. Este proceso se ha realizado con el software SketchUp.

Para empezar, al contactar con la Facultad, se proporcionó un plano en planta acotado. Este documento fue una referencia útil, ya que permitió hacerse una idea preliminar de las dimensiones del recinto y realizar un primer boceto a mano del diseño del modelo.

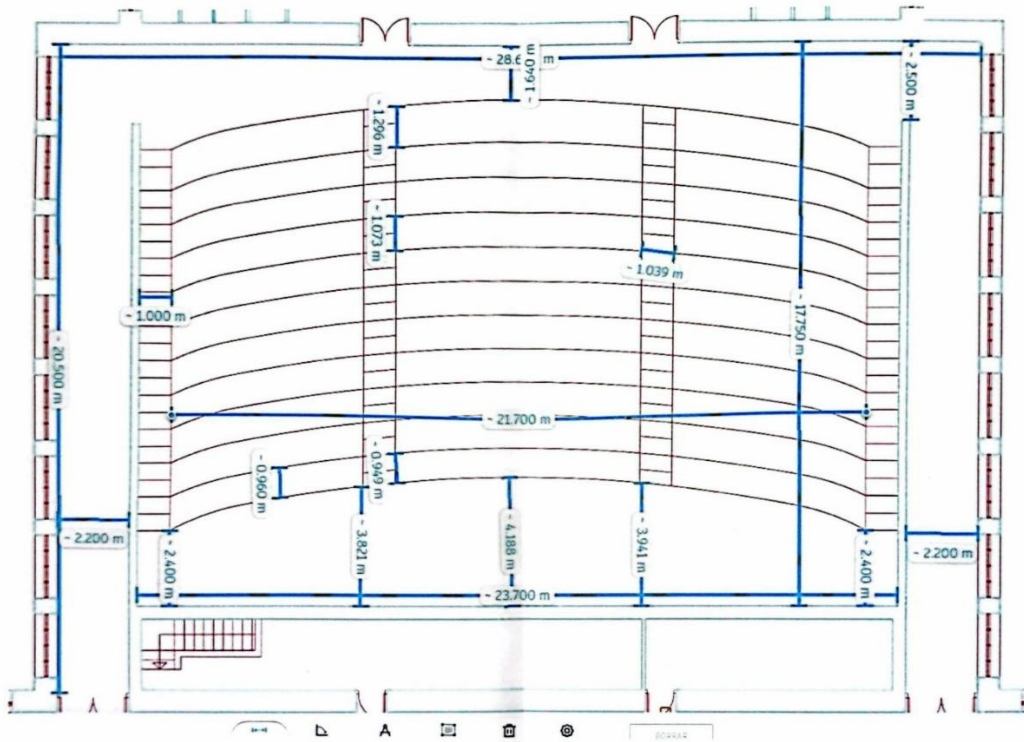


Figura 45. Plano con acotaciones aportado por la Facultad de Ciencias Químicas.

El Aula Magna posee una simétrica. Esto agilizó el trabajo de modelado ya que lo que los elementos que se creaban en un lado se podían replicar en el lado opuesto respecto el eje de simetría. Se optó por un modelo simplificado eliminando elementos decorativos como focos, proyector o plantas, ya que no afectan al comportamiento acústico de la sala puesto que su superficie representa un porcentaje ínfimo de absorción.

Cuando se haya terminado el modelo, se asignarán unos materiales que serán lo más parecidos posibles a los reales. Estos se irán ajustando a medida que se avanza en el modelado.

Antes de empezar con el modelado, hay que conocer algunos aspectos de SketchUp para entender su funcionamiento. Cuando se dibuja una superficie se debe cerrar correctamente ya que de lo contrario el programa detectaría que el modelo está abierto, asociándolo a problemas de "agujeros". Hay que asegurarse de que todas las superficies estén bien definidas para que este error se reduzca a la hora de importar el modelo en EASE. SketchUp no siempre detecta los "agujeros" por lo cual, cuanta más precisión se tenga durante el diseño, menores

errores se acumularán para la siguiente fase. Aunque tampoco hay problema si quedan algunos “agujeros” ya que EASE si los detecta con una gran fiabilidad.

También, hay que tener en cuenta la orientación de las caras. El color azul indica que la cara es interna y el color amarillo que es externa. Según se dibuje la cara, tiene una orientación u otra. Esto se puede cambiar fácilmente con la herramienta de inversión de caras, *Reverse*. Con la herramienta de *Push/Pull* se puede levantar una cara la altura que se requiera para darla el volumen necesario.

Se puede decir que esta sala tiene tres alturas. La primera corresponde a la planta 0, la segunda a la planta 1 y la tercera altura a la “planta del techo”. Se comienza a diseñar el modelo de abajo a arriba.

Primero se dibujó el suelo a “nivel 0”, parte delantera de la sala, y el primer escalón. Esto se puede ver en la siguiente figura.

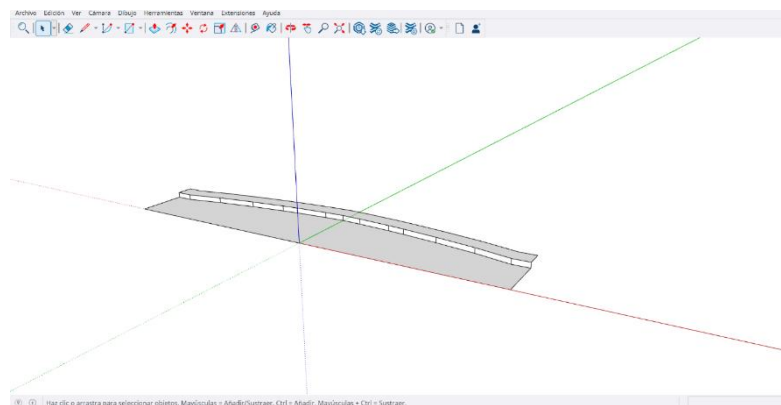


Figura 46. Diseño del suelo de la parte frontal y el primer escalón.

Para completar todo el suelo de la planta 0, la zona de audiencia, se seleccionó todo el primer escalón y se copió y pegó hasta tener las 9 filas que comprende la escalera. Luego se añadió un último escalón y un ancho de este mismo para crear las últimas filas de asientos, la 10 y la 11, que se encuentran en la planta 1.

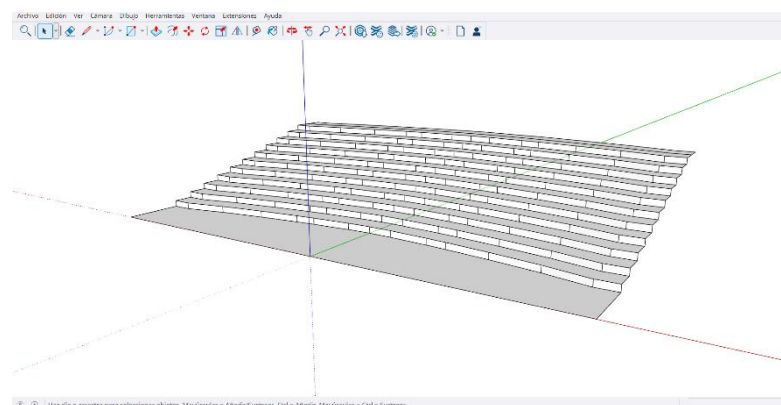
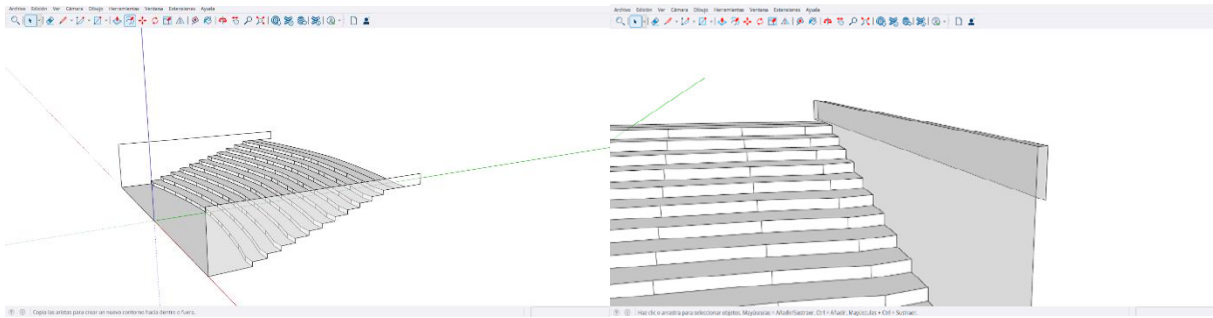


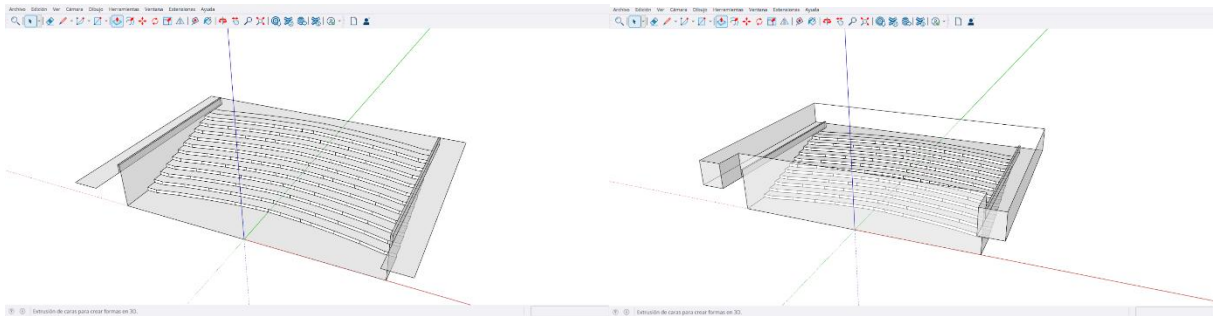
Figura 47. Diseño de toda la escalera con la zona de audiencia.

A continuación, se dibujaron las paredes laterales de esta planta 0 hasta la altura del poyete y posteriormente se creó este mismo. En las siguientes figuras se puede ver este paso, aunque solo se muestre un lado de la sala, se realizó simétricamente en el otro lado.



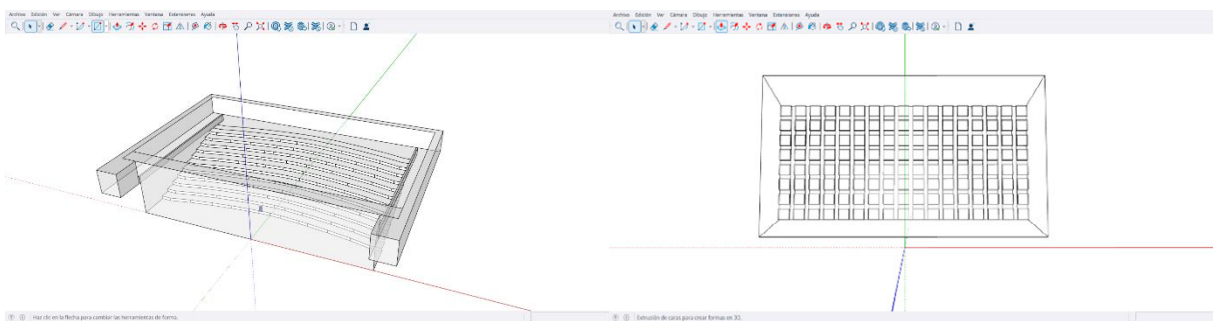
**Figura 48. Diseño de las paredes laterales y el poyete.**

Ahora se procedió como en la planta 0 pero con la planta 1. Primero se modeló el suelo y luego todas las paredes laterales incluida la pared frontal del escenario con su altura correspondiente.



**Figura 49. Diseño de la planta 1.**

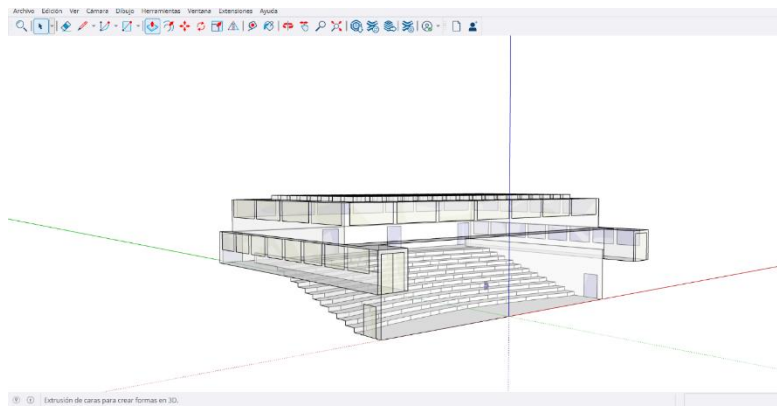
En este momento se tienen las plantas 0 y 1, que son las que se corresponden a las zonas de audiencia, terminadas. Para terminar el modelo en bruto de la sala, se procede a crear el techo. Como este está a una tercera altura, se ha tratado como si fuera una planta más, creando su suelo, que corresponde con el techo de la planta 1, sus paredes y finalmente la geometría del techo casetonado. Esto se puede observar en las siguientes figuras.



**Figura 50. Diseño del techo.**

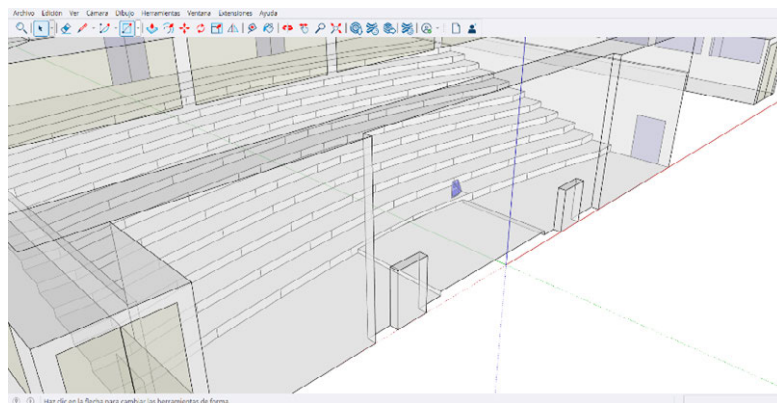
Ya se tiene un modelo en bruto del recinto por lo que a continuación se van a empezar a modelar los demás elementos constructivos de la sala.

Primero se completaron las paredes trazando las ventanas y las puertas de acceso laterales y traseras.



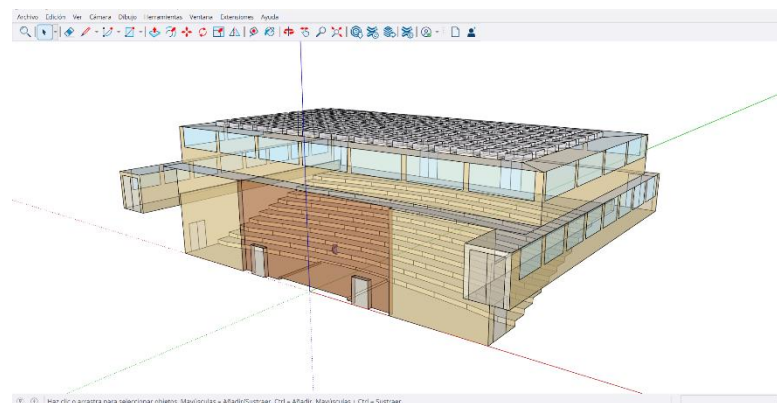
**Figura 51. Diseño de puertas y ventanas.**

Después se dibujó el escenario y el relieve de la pared del escenario con las puertas que tiene.



**Figura 52. Diseño de los detalles del escenario.**

A continuación, se asignaron etiquetas a cada capa con el nombre del material del que están formadas junto con un color característico.



**Figura 53. Asignación de etiquetas a cada capa.**

Para terminar las superficies de la sala, se creó el muro que separa la fila de asientos 10 y 11. Se dibujo en planta y se elevó (*Push/Pull*) hasta la altura correspondiente.

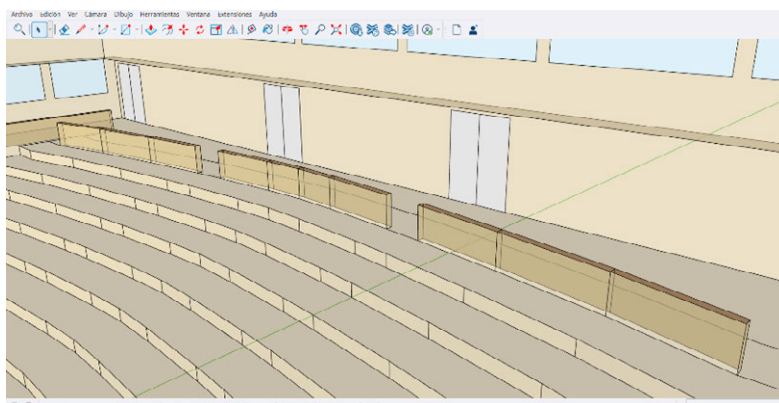


Figura 54. Diseño del muro interno entre las últimas dos filas.

Por último, se modelaron los elementos esenciales que están dentro de la sala como los pupitres con su asiento, las cortinas y la mesa y el atril del escenario.

Para facilitar el diseño de los pupitres, se eligió la combinación de dos capas, una que simulara el frente del pupitre y otra la mesa con su inclinación. En el caso de los asientos, estos solamente son una capa.

A la hora de diseñar la mesa, se optó por un diseño básico, una cara por cada lado de la mesa. En cuanto al atril, se siguió la misma lógica. Ambos elementos sin la cara de abajo ni la frontal.

Estos elementos se colocaron en la sala separándolos de todas las superficies 5 cm, es decir, quedaban suspendidos en el aire, como se puede ver en la siguiente figura. Esto se debe a que la sala tiene que ser un único volumen para que el comportamiento acústico sea correcto. No deben existir volúmenes cerrados dentro del modelo. Por esto se ha dejado la mesa abierta o los pupitres son así de sencillos.

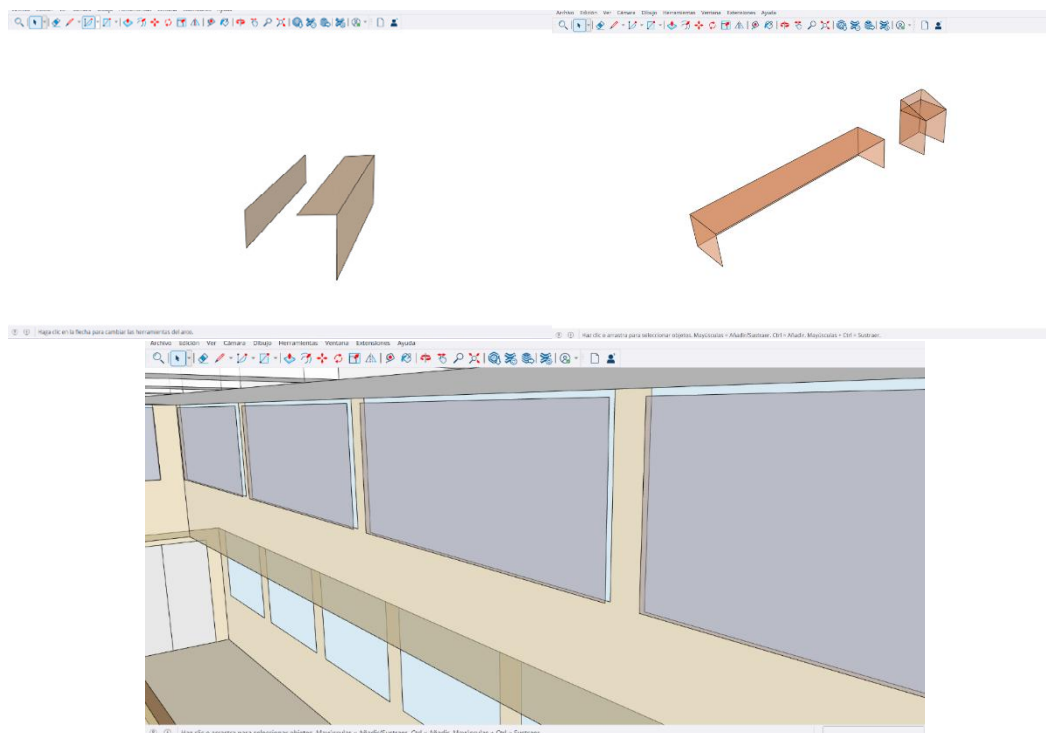


Figura 55. Diseño simplificado del pupitre con el asiento (arriba izquierda), de la mesa y el atril del escenario (arriba derecha) y de las cortinas (abajo).

Para comprobar que el diseño del modelo geométrico es válido, es decir, no existen volúmenes cerrados dentro del modelo y la orientación de las caras es la correcta, se utiliza la herramienta *Solid Inspector*. Esta herramienta permite ver dónde están los agujeros o los errores posibles.

Como se mencionó antes, a cada capa del modelo se le ha asignado una etiqueta con el nombre del material correspondiente. También se le ha asignado un color a cada etiqueta para que visualmente el modelo se parezca a la sala real. En la siguiente figura se pueden observar las capas creadas. También, se puede ver que las capas que representan elementos dentro del recinto tienen un formato de nombre concreto usando el símbolo \$. Esto se debe a que son superficies de doble cara y al nombrar así a la capa EASE detecta directamente que se trata de un elemento de doble cara.

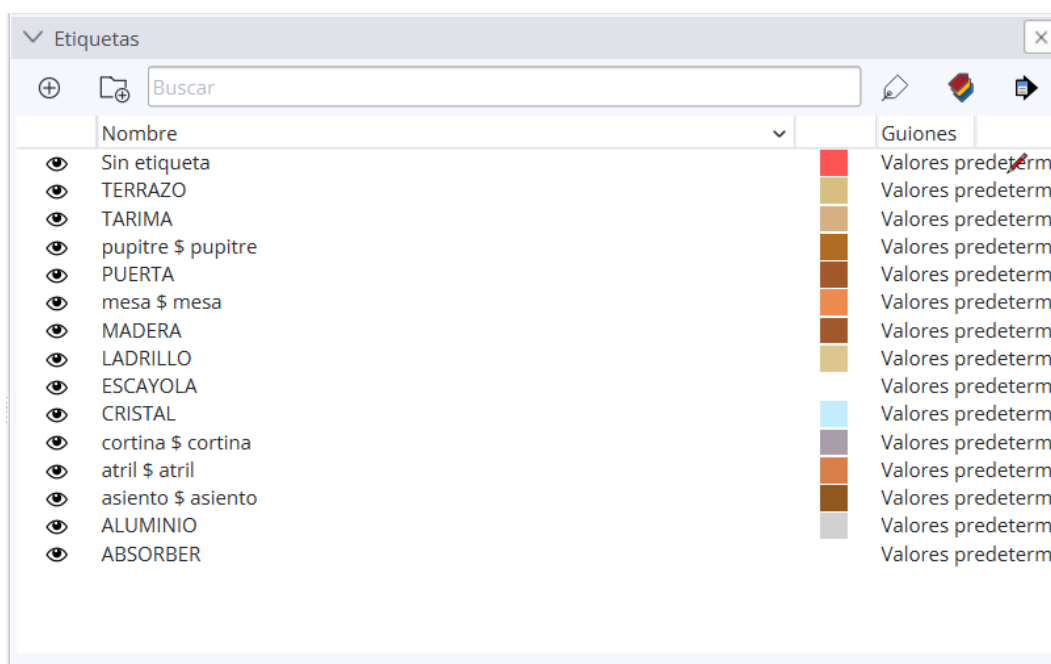


Figura 56. Etiquetas creadas junto con su color en SketchUp.

Para terminar con este apartado se van a presentar una serie de imágenes tomadas en la sala comparándolas con el modelo diseñado para poder ver cuanta similitud se ha conseguido.

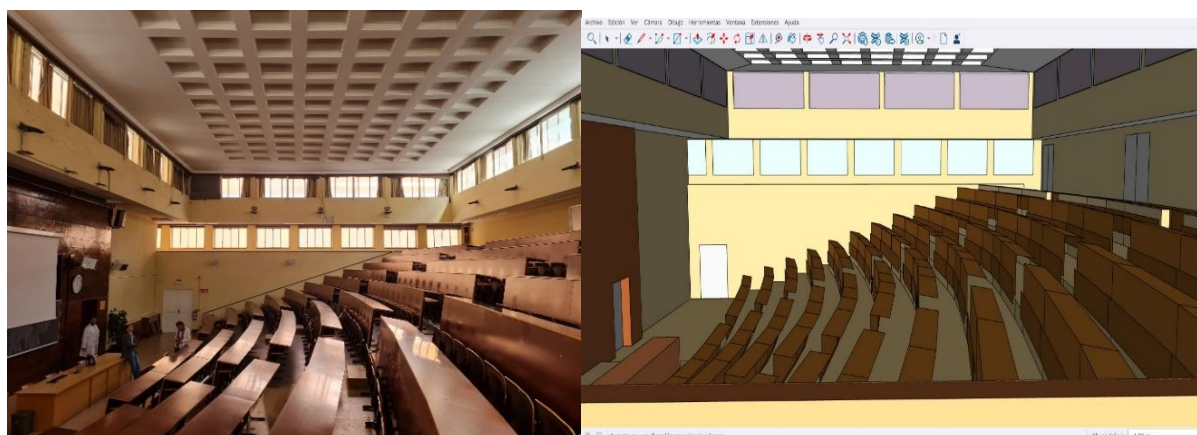
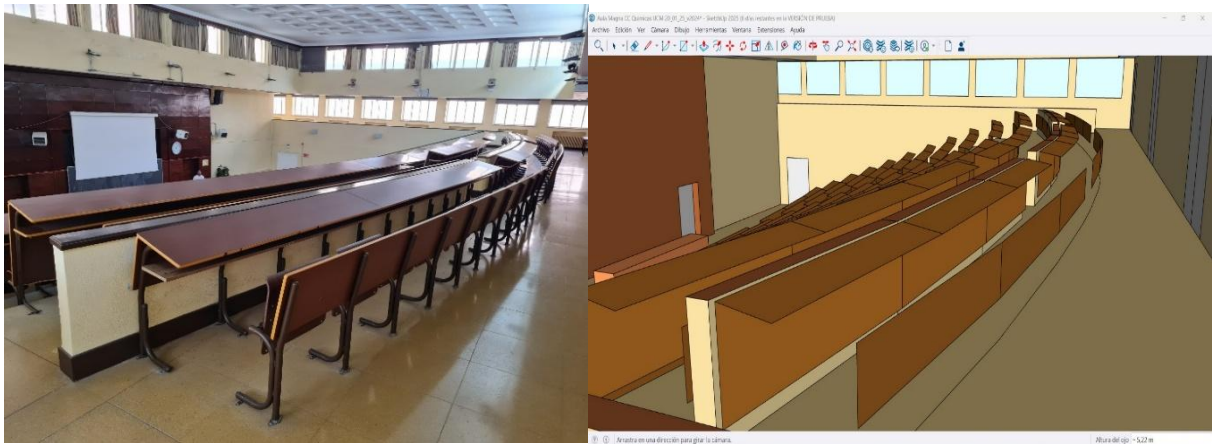
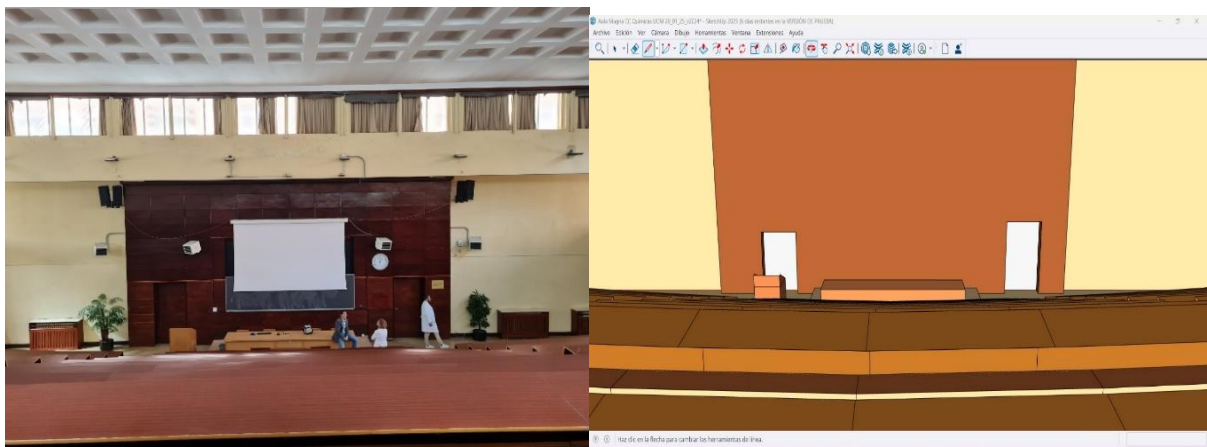


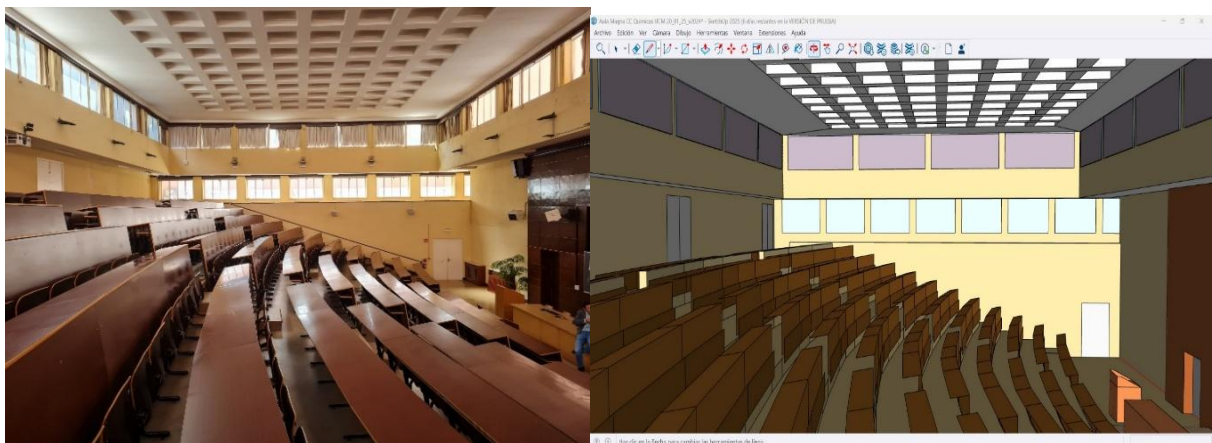
Figura 57. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista desde la galería derecha lateral.



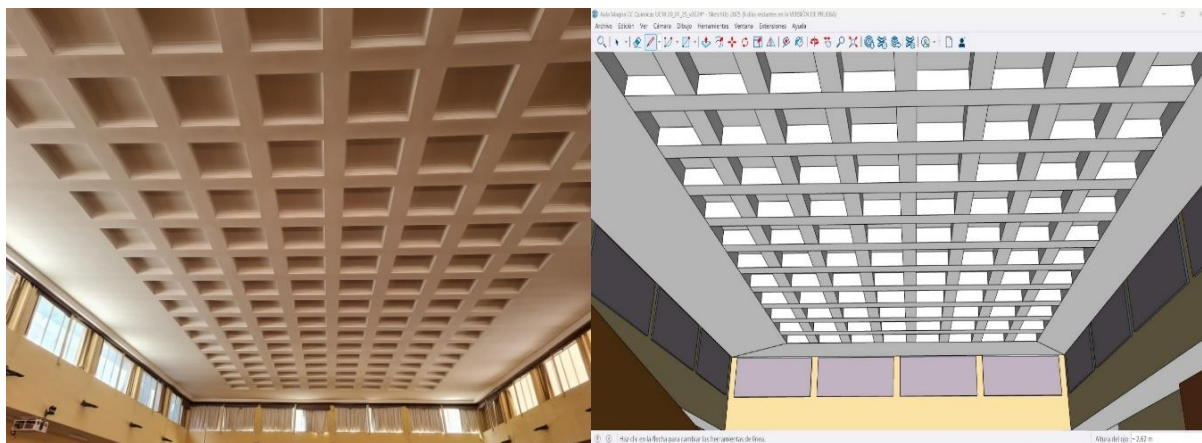
**Figura 58. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista desde el ultimo asiento a la derecha hacia el escenario.**



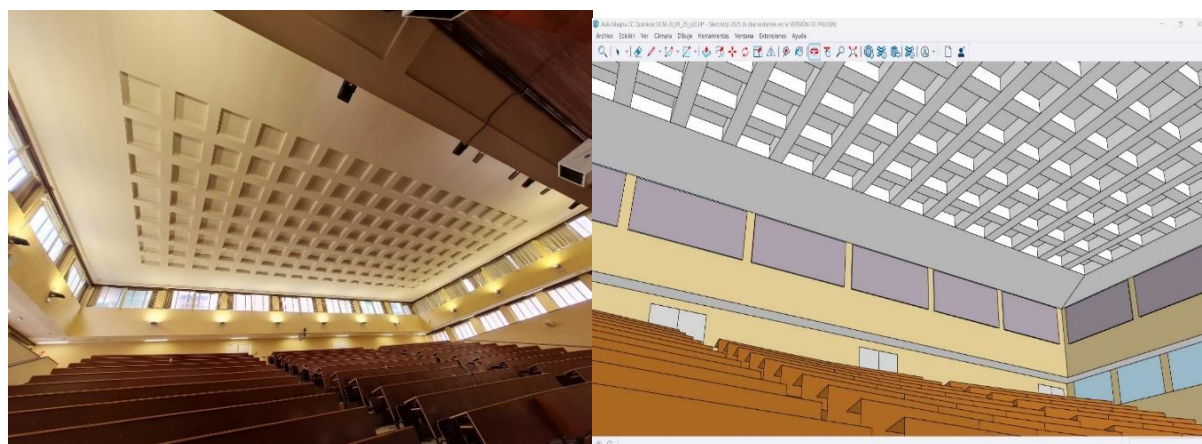
**Figura 59. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista desde la última fila hacia el escenario.**



**Figura 60. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista desde la galería izquierda lateral.**



**Figura 61. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista del techo.**



**Figura 62. Comparación de la sala real (izquierda) con el modelo (derecha), vista del techo desde el escenario.**

## 8. Importación y Configuración inicial del Modelo Geométrico en EASE

En este apartado se va a explicar cómo se ha realizado la importación del modelo arquitectónico creado en SketchUp a EASE, el diseño del modelo geométrico y las complicaciones que hubo.

Cuando ya se ha terminado el modelo, este se exporta en formato SketchUp versión 8 ya que esta versión es reconocida por EASE. Se crea un nuevo proyecto en EASE y desde la ventana de *Import/Export* se selecciona el archivo. Aparece una ventana en la que hay que realizar la asignación de materiales. A cada una de las capas se le asocia un material. Estos materiales se han obtenido de una base de datos que se han utilizado en proyecto anteriores similares. Con este proceso de asignación de materiales acústicos, con las propiedades de absorción y *scattering*, queda definido el modelo geométrico del Aula Magna.

En la designación de los materiales, estos se eligen de forma aproximada basándose en los materiales reales. Se pueden modificar posteriormente para que la simulación se ajuste correctamente a las condiciones reales del recinto. En la siguiente figura, se muestra la asignación de materiales.

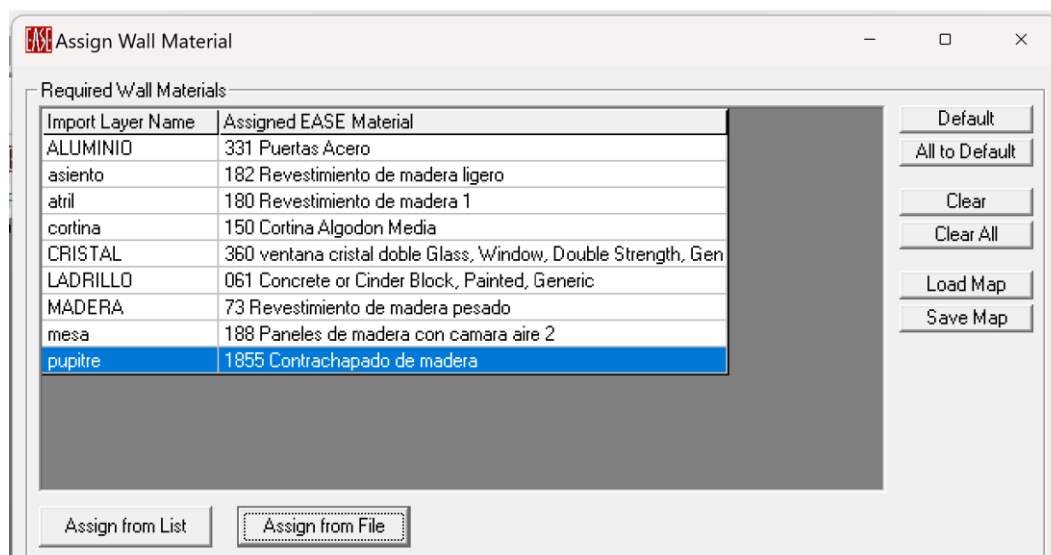


Figura 63. Primera asignación de los materiales a las capas en EASE.

Cuando se ha terminado de asociar un material a cada capa, se pulsa *Assign from File* y emerge una ventana donde se puede observar la vista de la sala en EASE. En esta ventana las aristas están pintadas del color de su material correspondiente, esto facilita la detección de algún posible error.

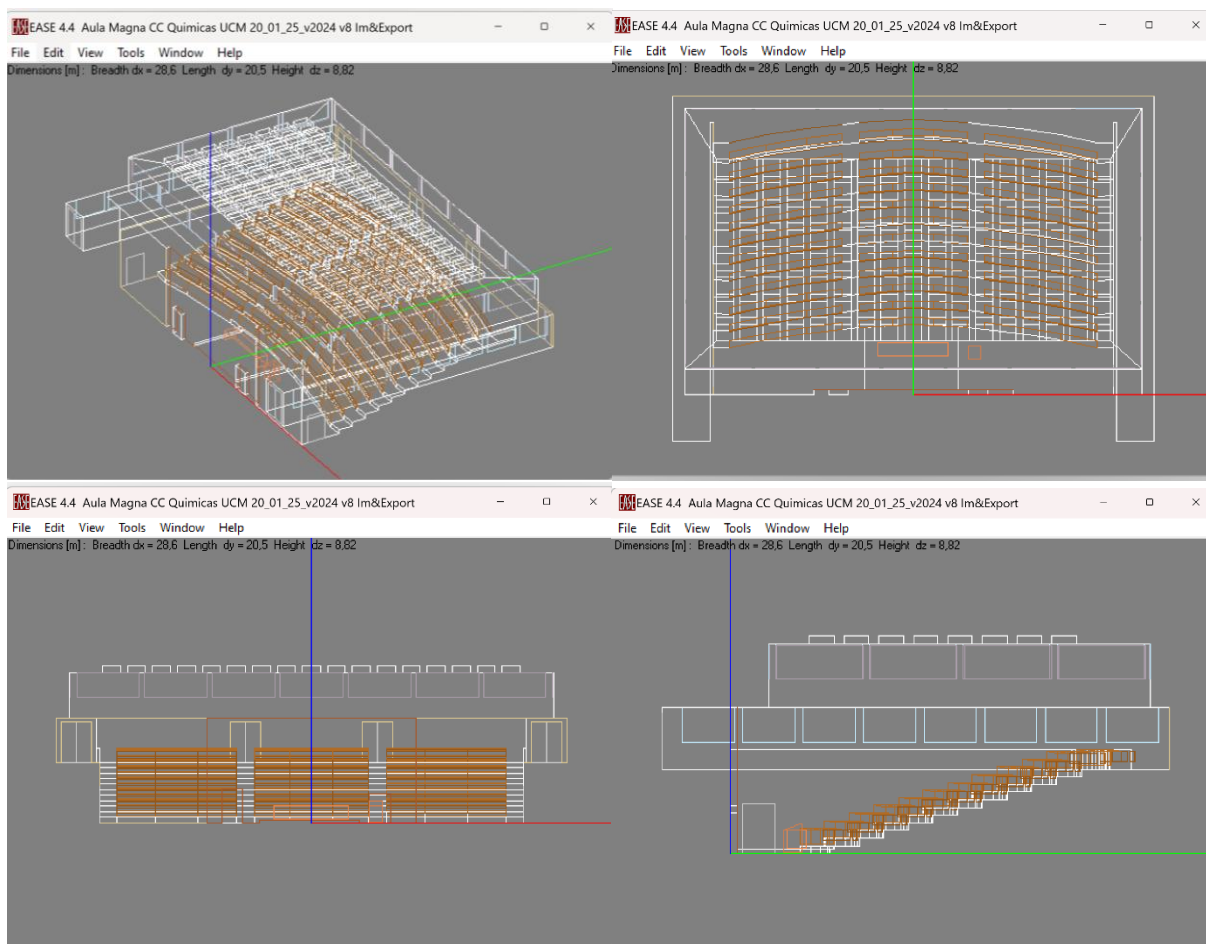


Figura 64. Vistas del Aula Magna tras la primera asignación de materiales.

Como se puede observar en la figura 64, debido a un problema de compatibilidad, no se han detectado todas las capas. Por lo tanto, las no detectadas se les va a asignar el material por defecto ABSORBER y su arista aparece en blanco. Mas adelante se resuelve este problema.

Tras tener todos los materiales asignados, se guarda el proyecto en uno nuevo. Para comprobar que la sala está cerrada, que no existen “agujeros”, se tiene que desactivar la opción *Room Open* en el menú *Edit -> Room Data*.

Mediante la herramienta *Check Data* se realiza una comprobación de que la sala no tenga errores. En caso de que, si haya, aparece un mensaje para revisarlos. Para detectar donde se encuentran precisamente estos errores se utiliza la opción de *Check Holes*. Esta herramienta localiza cuales son las caras incompletas o invertidas marcando en rojo las aristas y señalando los vértices.

En este caso, se presentaron dos problemas. El primero bastante sencillo, una cara mal orientada que simplemente se corrigió invirtiéndola. El segundo problema fue más complejo relacionado con la geometría del techo.

El recinto presenta un techo formado por casetones, es decir, compuesto por una retícula de huecos en bajorrelieve con forma de cuadricular. En SketchUp no dio ningún error, pero al importarlo a EASE, el programa no lo interpretaba de forma correcta. Ignoraba el relieve original del techo y creaba una cara que “tapaba” el casetón. Esto hace el modelo tenga superficies superpuestas, volúmenes encerrados y huecos en la sala.

Debido a que el archivo original donde se veía este error no se conserva, se ha recreado manualmente esta situación en el modelo con el objetivo de aclarar este error en la siguiente figura.

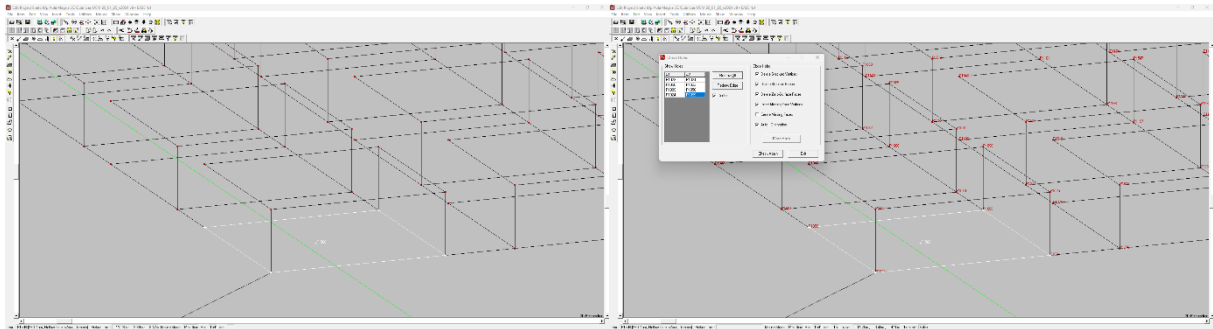


Figura 65. Recreación del error (izquierda) y aplicación de *Check Holes* (derecha).

La solución a este problema fue redibujar a mano el techo, se fue delimitando y volviendo a dibujar cuidadosamente cada superficie de los casetones una a una y eliminando las caras que se habían creado automáticamente. En la siguiente figura se muestran destacadas todas las caras del techo al mismo nivel para visualizar la partición del techo que se tuvo que realizar.

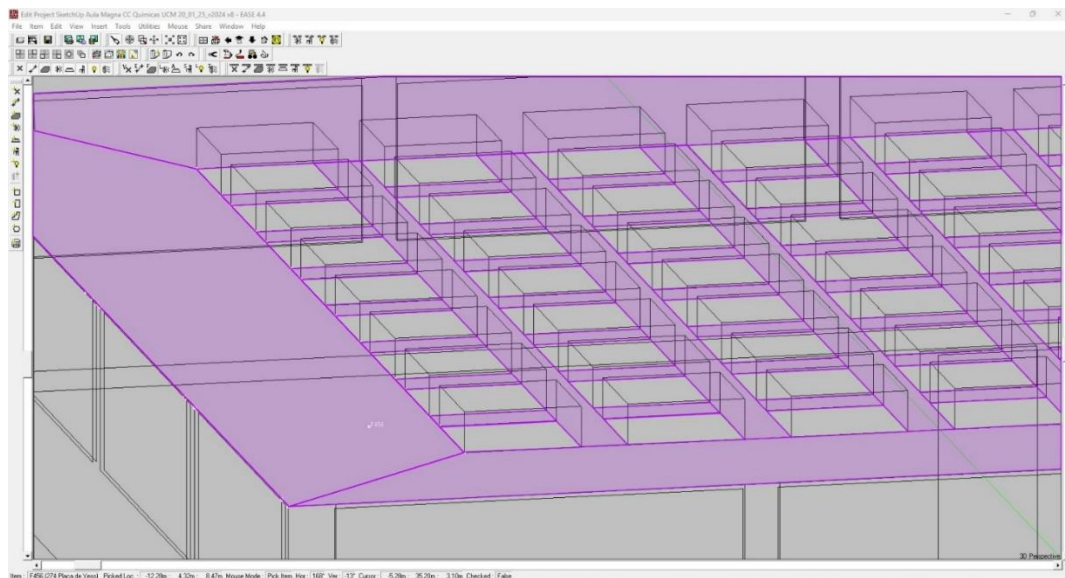


Figura 66. Caras destacadas del techo al mismo nivel.

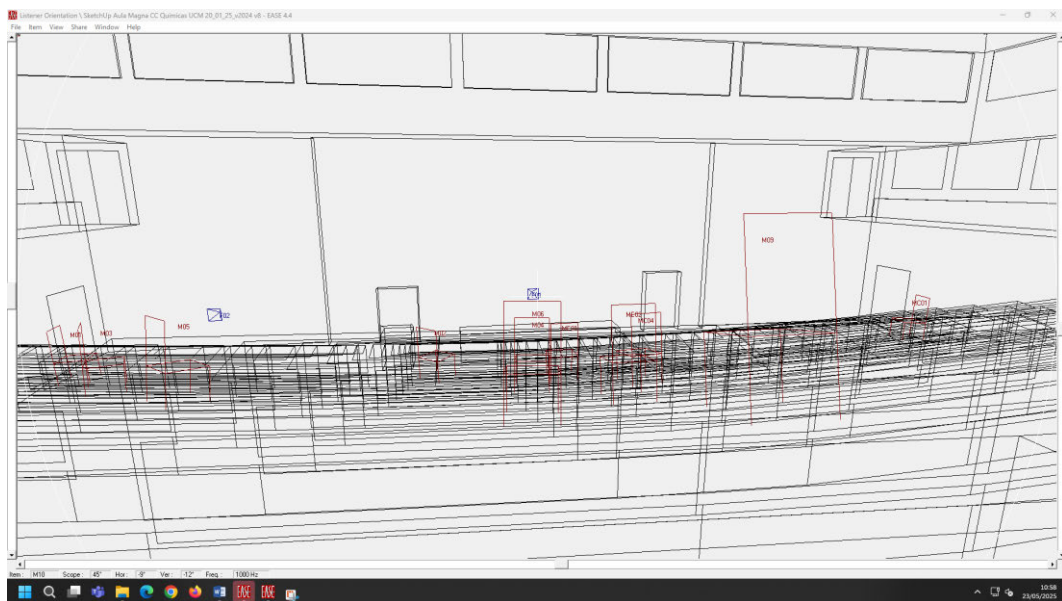
Tras realizar esto, se solucionó el primer problema y se comprobó con *Check Holes*.

Después de comprobar que la sala estaba perfectamente cerrada, sin “agujeros”, se le ha asignado a mano el material correspondiente a cada cara. En la siguiente figura se puede ver la asociación de cara-material. En el Anexo III, se expone la asociación de cada capa de SketchUp con su elemento constructivo y con el material de EASE correspondiente.

ID	Name	Image	Ings	Log	Face Material	Color	T3	Face Material	Face ID	Face Type	Face Texture	Face Thickness	Surface ID	Shading	Locked	Sides
184	F184		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				35.87	Yes	No	32	
185	F185		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				35.86	Yes	No	32	
186	F186		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				19.80	Yes	No	25	
187	F187		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				19.80	Yes	No	25	
188	F188		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				35.13	Yes	No	35	
189	F189		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.72	No	No	9	
190	F190		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				35.86	Yes	No	32	
191	F191		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				6.08	Yes	No	5	
192	F192		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				6.08	Yes	No	5	
193	F193		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				6.13	Yes	No	4	
194	F194		-	-	188 Paredes de m...	No		1877215				2.75	Yes	No	4	
195	F195		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				6.13	Yes	No	4	
196	F196		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				12.80	Yes	No	4	
197	F197		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				27.73	No	No	40	
198	F198		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				6.13	Yes	No	4	
199	F199		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.74	Yes	No	4	
200	F200		-	-	188 Paredes de m...	No		1877215				6.41	Yes	No	4	
201	F201		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.50	Yes	No	4	
202	F202		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.50	Yes	No	4	
203	F203		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.74	Yes	No	4	
204	F204		-	-	188 Paredes de m...	No		1877215				0.37	Yes	No	4	
205	F205		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				6.37	Yes	No	4	
206	F206		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.71	Yes	No	4	
207	F207		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				6.13	Yes	No	4	
208	F208		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.71	Yes	No	4	
209	F209		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.71	Yes	No	4	
210	F210		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.71	Yes	No	4	
211	F211		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				2.50	Yes	No	4	
212	F212		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				2.23	Yes	No	4	
213	F213		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.50	No	No	4	
214	F214		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				2.60	Yes	No	4	
215	F215		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.93	No	No	4	
216	F216		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.93	No	No	4	
217	F217		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.93	No	No	4	
218	F218		-	-	081 Concreto ac C. 19524090	No		1877215				1.93	No	No	4	
219	F219		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
220	F220		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
221	F221		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
222	F222		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
223	F223		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
224	F224		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
225	F225		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
226	F226		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
227	F227		-	-	030 Doox Hollow 18772282	No		1877215				1.93	Yes	No	4	
228	F228		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
229	F229		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
230	F230		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
231	F231		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
232	F232		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
233	F233		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.93	No	No	4	
234	F234		-	-	031 Puertas Acoso 13390327	No		1877215				1.94	No	No	4	
235	F235		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	4	
236	F236		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	5	
237	F237		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	5	
238	F238		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	5	
239	F239		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	5	
240	F240		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	5	
241	F241		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	5	
242	F242		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	5	
243	F243		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	4	
244	F244		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	4	
245	F245		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	4	
246	F246		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	4	
247	F247		-	-	360 ventana oist. 18772282	No		1877215				2.94	No	No	4	

**Figura 67. Tabla de las caras con la asignación de materiales.**

Por último, se vuelve a realizar un *Check Data* para asegurar que todo está correctamente y no acumular errores. Se colocan las fuentes y los micrófonos en su correspondiente posición como se muestra en la tabla 6 del apartado 5.3. El tipo de fuente que se selecciona para estas simulaciones es *Sphere*, ya que reproduce el comportamiento que la fuente que se menciona en el apartado 5.2. EASE representa los micrófonos mediante sillas y estos se orientan hacia la fuente F01.



**Figura 68. Orientación de la posición de micrófono M10.**

## 9. Validación del Modelo geométrico en EASE

En este apartado se va a explicar el proceso que se ha realizado para validar el modelo geométrico del Aula Magna en EASE. En esta validación, se han ajustado las características del modelo, en concreto los materiales, para generar las simulaciones de las cuales se obtienen los datos simulados de los parámetros que se midieron. Estos resultados se comparan con los datos medidos y si la distancia entre ellos expresada en métrica JND es la mínima posible, se puede dar por válida la simulación. También se comprueba la simetría de la sala. El procedimiento de validación consta de tres fases que se desarrollan secuencialmente hasta conseguir los resultados adecuados.

### 9.1. Fase I: Ajuste del tiempo de Reverberación inicial

Para comenzar con la validación, el primer paso consiste en ajustar el tiempo de reverberación, RT [s], ya que es uno de los parámetros acústicos que mejor representa el comportamiento de la sala. EASE tiene dos “variables” de entrada al modelo, la geometría (coordenadas tridimensionales de cada vértice del modelo arquitectónico) y las características acústicas de los materiales asociados a las diferentes caras del modelo. Dada que la geometría del modelo se ha dado por correcta tanto en Sketchup como con las modificaciones introducidas en EASE, para solventar el problema de los “agujeros”, la única “variable” que los queda por utilizar es la modificación de algunos materiales de la sala (absorción y *scattering*). La absorción de los materiales está íntimamente relacionada con la estimación del tiempo de reverberación por la aproximación de acústica estadística. EASE calcula el tiempo de reverberación con la fórmula de Eyring. Tiene en cuenta el volumen de la sala, la superficie total y los coeficientes de absorción de los materiales asignados a cada cara del modelo (así como las correcciones por humedad, temperatura y presión atmosférica).

Puesto que el modelo ya está diseñado, no se puede modificar ni el volumen ni la superficie de la sala. Por lo tanto, para ajustar el RT solamente se modifican los materiales para que sus características acústicas sean lo más parecidas a las reales.

Como se mencionó en el apartado anterior, se realiza una asignación inicial de los materiales que se intuye que son lo más parecido al real. Con esta asociación inicial, se calcula un primer tiempo de reverberación mediante *Optimize RT*.

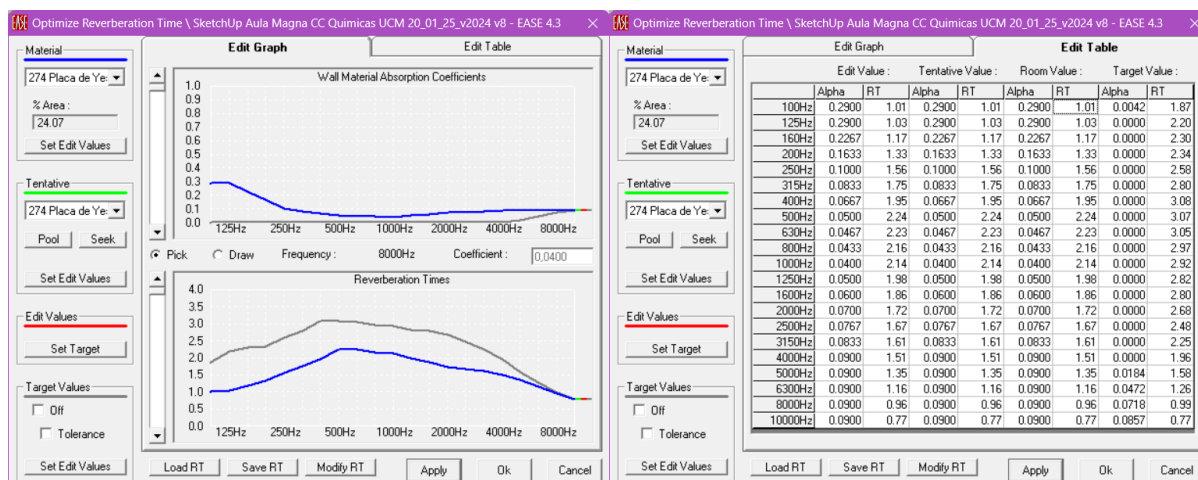


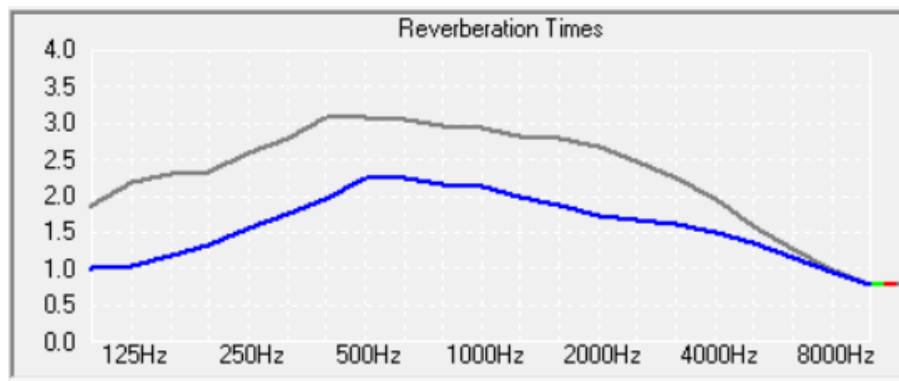
Figura 69. Menú *Optimize RT* con el tiempo de reverberación inicial.

Para poder comparar los datos medidos con los calculados por EASE, en la segunda pestaña *Edit Table* se pueden introducir en la columna *Target Value* los valores medidos *in situ*. En la

gráfica que presenta EASE, se muestra en gris los valores medidos, en azul los simulados y en verde, se puede ver cómo afecta el coeficiente de absorción de otro material al tiempo de reverberación antes de cambiarlo.

En este primer paso para validar el modelo, se busca que la curva azul, los datos simulados, reproduzca fielmente la curva gris, los datos reales. De forma general, se procura que la simulación quede por debajo que los datos medidos, ya que gracias a anteriores casos se ha demostrado que EASE tiende a sobreestimar este parámetro.

Aunque el parámetro RT sea clave para la validación, también se tienen en cuenta los parámetros como  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  y  $T_{30}$ , para el ajuste de los materiales ya que al cambiarlos se ve afectado el comportamiento acústico del modelo.



**Figura 70. Tiempo de reverberación inicial calculado por EASE (azul) y tiempo de reverberación real (gris).**

En la anterior imagen se puede observar el tiempo de reverberación inicial calculado por EASE y el obtenido con las medidas. Se puede confirmar que se va por buen camino ya que la forma de ambas curvas es muy similar, aun así, se tiene que ajustar mejor.

## **9.2. Fase II: Ajuste de Materiales**

Para seguir con la validación, se realiza el ajuste de los materiales que se asignaron a las caras del modelo con el objetivo de afinar la respuesta acústica simulada y lograr que replique el comportamiento acústico real de la sala.

Para esto se simulan los parámetros acústicos  $C_{50}$ ,  $C_{80}$ ,  $T_{30}$  y RT mediante la aproximación estadística (STD) y la geométrica (AURA) con baja resolución para agilizar el tiempo de cálculo y no afecta al grado de fiabilidad del cálculo. Se utiliza la métrica JND para saber cómo hay que ajustar los materiales fijándose en que frecuencias están los escalones JND más altos.

Para realizar el ajuste de materiales, se va a tomar como referencia la figura 70, que muestra la comparación entre el tiempo de reverberación medido y simulado, para ver cuáles son las frecuencias “conflictivas” y buscar como ajustarlo correctamente. Para que realmente se pueda distinguir un cambio en el tiempo de reverberación, hay que centrarse en los materiales que mayor superficie de absorción ocupen. En el caso de este proyecto se han realizado 3 modificaciones. Por cada modificación se vuelven a simular los parámetros mencionados y se les aplica la métrica JND.

En la siguiente tabla se muestran los escalones JND que se han obtenido en la primera simulación, sin realizar ninguna modificación de los materiales, de los parámetros que se han mencionado antes.

Tabla 20. Valores JND de la modificación 0.

MODIFICACIÓN 0							
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard	
100	3	2	4	3	6	10	
125	5	4	6	5	8	11	
160	4	3	5	4	6	10	
200	4	3	5	4	5	9	
250	5	3	5	4	4	8	
315	4	3	4	3	5	8	
400	3	2	3	2	5	8	
500	3	2	3	2	3	6	
630	3	2	2	1	3	6	
800	3	2	2	1	3	5	
1000	3	2	1	1	3	6	
1250	3	2	2	1	4	6	
1600	3	2	1	1	4	7	
2000	3	2	2	2	5	8	
2500	3	3	2	2	5	7	
3150	3	2	2	1	4	6	
4000	2	2	1	1	3	5	
5000	1	1	2	1	1	3	
6300	1	2	1	1	1	2	
8000	2	2	1	1	1	1	
10000	3	3	1	1	1	1	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
Cantidad por escalón	26	27	28	13	13	8	2	5	1	2	126
% sobre Total	21%	21%	22%	10%	10%	6%	2%	4%	1%	2%	
% acumulado	21%	42%	64%	75%	85%						

Como se puede apreciar en la tabla 20, en general los escalones son bastante altos a bajas frecuencias y en alta frecuencia estos se acercan más al “escalón 1”, sobre todo, el tiempo de reverberación que incluso sobrepasa el límite de 10 escalones que se impuso en el tercio de frecuencia de 125 Hz.

### 9.2.1. Modificación 1

En la primera modificación se han realizado dos cambios. El primero consiste en cambiar el material de las cortinas. En la primera asignación, se escogió el material 150 Cortina de algodón media, pero este resultó que era muy absorbente y realmente las cortinas que había en la sala eran más finas y plásticas. Por lo que se optó por el cambio al material 160 Cortina plástica cuya curva de absorción es más baja sobre todo en alta frecuencia.

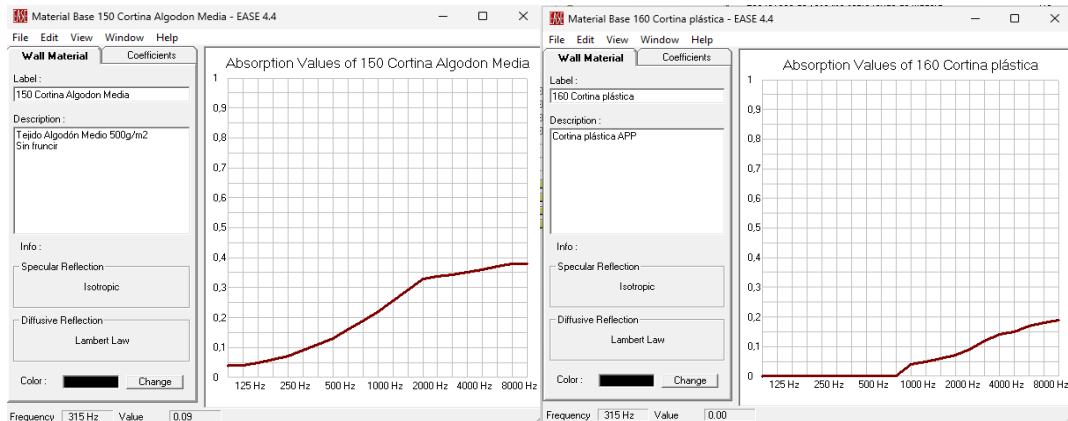
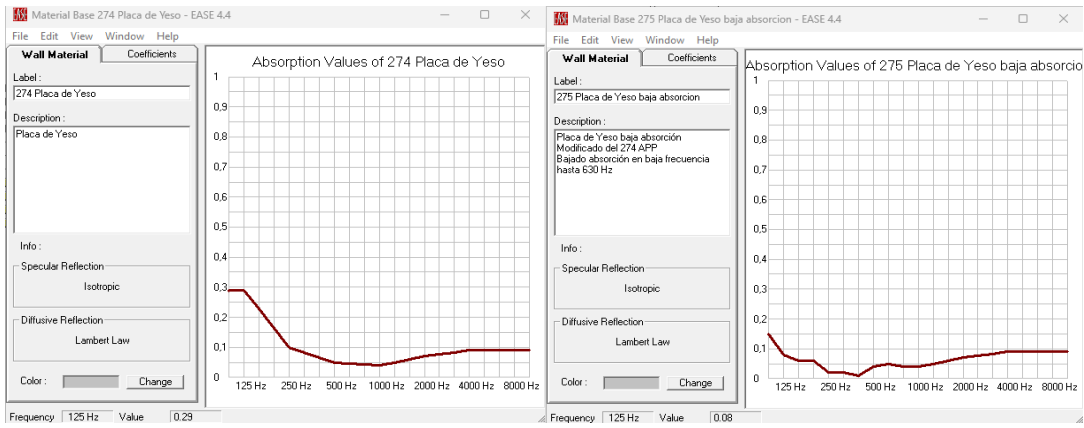
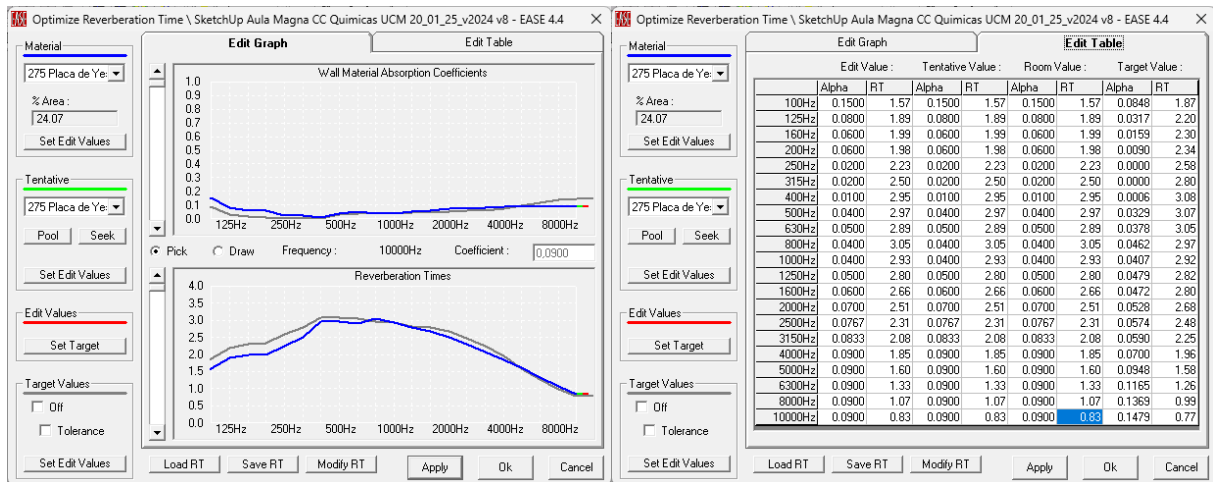


Figura 71. Curva de absorción del material 150 (izquierda) y del material 160 (derecha).

El segundo cambio consistía en cambiar el material del techo que inicialmente era el 274 Placa de yeso por el material 275 Placa de yeso baja absorción, cuyo coeficiente de absorción es más bajo hasta 500 Hz.



**Figura 72.** Curva de absorción del material 274 (izquierda) y del material 275 (derecha).



**Figura 73.** Tiempo de reverberación de la modificación 1.

**Tabla 21.** Valores JND de la modificación 1.

MODIFICACIÓN 1						
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard
100	2	1	2	1	2	6
125	2	1	3	2	1	6
160	2	1	3	1	1	5
200	2	1	3	2	1	5
250	3	2	3	2	1	5
315	3	2	2	1	1	4
400	2	1	1	1	1	3
500	2	1	2	1	1	3
630	2	2	1	1	1	3
800	2	1	1	1	1	3
1000	2	2	1	1	1	3
1250	2	2	1	1	2	3
1600	1	1	1	1	2	4
2000	2	1	1	1	3	4
2500	2	2	1	1	3	4
3150	2	1	1	1	2	3
4000	1	1	1	1	1	3
5000	1	1	1	1	1	1
6300	2	2	1	1	2	1
8000	2	2	1	1	2	2
10000	3	3	1	1	2	2

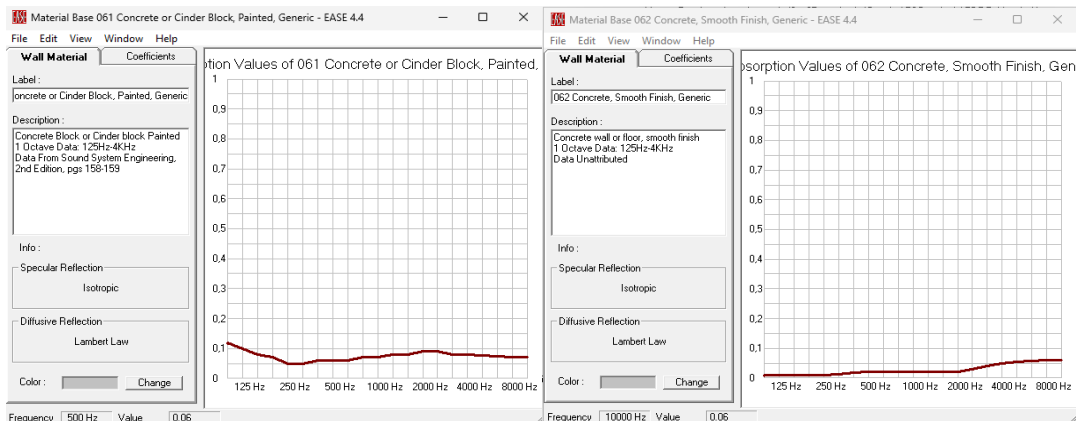
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
Cantidad por escalón	61	38	18	4	3	2	0	0	0	0	126
% sobre Total	48%	30%	14%	3%	2%	2%	0%	0%	0%	0%	
% acumulado	48%	79%	93%	96%	98%						

Como se puede apreciar en la tabla y grafica anteriores, hay una considerable mejora a nivel general en todos los parámetros. El porcentaje del escalón 1 pasa del 21% al 48 y desaparecen

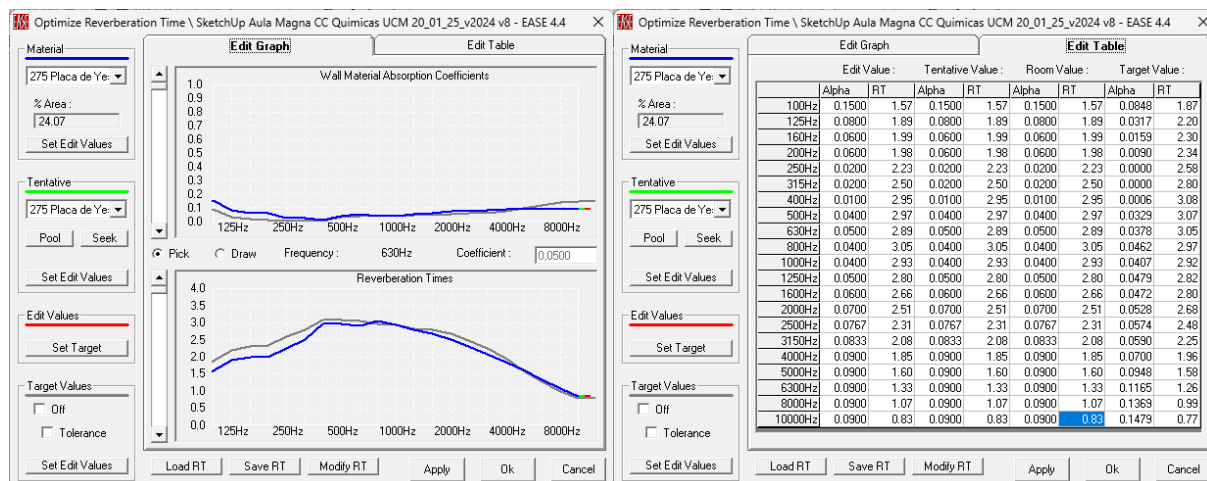
los escalones superiores a 6. En la gráfica se puede ver que se mantiene la misma forma, pero con un nivel más cercano al medido. Aun así, el nivel del tiempo de reverberación (RT) tiene que mejorar más.

### 9.2.2. Modificación 2

En la segunda modificación se cambió el material asociado a todas las paredes 061 Concrete or Cinder Block, Painted Generic por el material 062 Concrete, Smooth Finish, Generic porque se necesitaba bajar la absorción en todas las frecuencias.



**Figura 74. Curva de absorción del material 061 (izquierda) y del material 062 (derecha).**



**Figura 75. Tiempo de reverberación de la modificación 2.**

Tabla 22. Valores JND de la modificación 2.

MODIFICACIÓN 2							
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard	
100	1	1	1	1	3	4	
125	1	1	2	1	4	3	
160	1	1	2	1	4	3	
200	2	1	2	1	4	4	
250	3	1	3	2	4	3	
315	2	1	2	1	3	3	
400	1	1	1	1	4	1	
500	2	1	1	1	3	1	
630	1	1	1	1	2	2	
800	1	1	1	1	4	1	
1000	1	1	2	2	3	1	
1250	1	1	1	2	3	1	
1600	1	1	1	2	2	1	
2000	1	1	1	1	1	2	
2500	1	1	1	1	1	2	
3150	1	1	1	1	1	2	
4000	1	1	1	1	1	2	
5000	1	1	1	1	2	1	
6300	2	2	1	1	2	2	
8000	3	2	1	1	3	2	
10000	3	3	1	1	2	2	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
Cantidad por escalón	75	28	15	8	0	0	0	0	0	0	126
% sobre Total	60%	22%	12%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
% acumulado	60%	82%	94%	100%	100%						

En la figura 75 y en la tabla 22, se puede observar que a nivel general se mejoran todos los parámetros salvo el T<sub>30</sub> y aunque es un parámetro importante, ya que es el tiempo de reverberación calculado con la aproximación geométrica, el porcentaje de escalón 1 pasa de un 48% a un 60% y se eliminan los escalones superiores a 4.

### 9.2.3. Modificación 3

En esta tercera modificación, se volvió a ajustar el material de las paredes. Esta vez del 062 Concrete, Smooth Finish, Generic al 076 Hormigón cuya curva de absorción es un poco más alta en frecuencias medias. Con esto se pretende mejorar el T<sub>30</sub>.

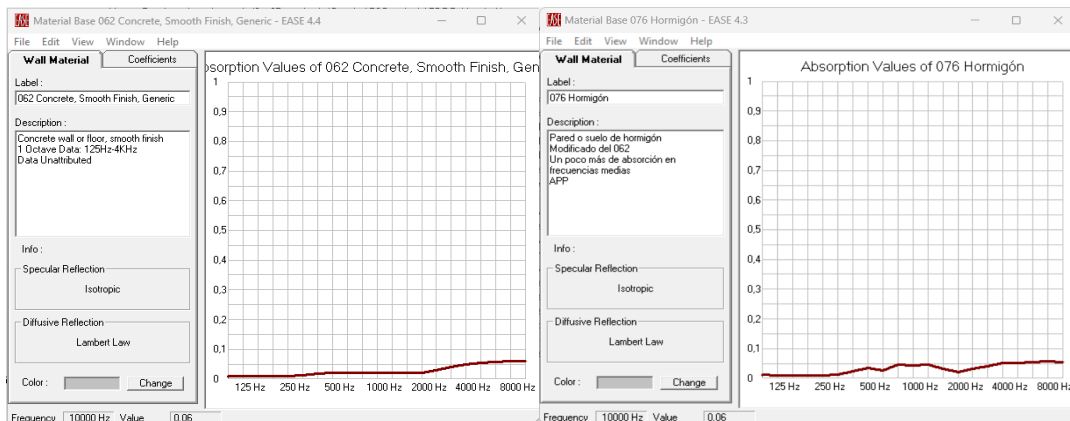


Figura 76. Curva de absorción del material 062 (izquierda) y del material 076 (derecha).

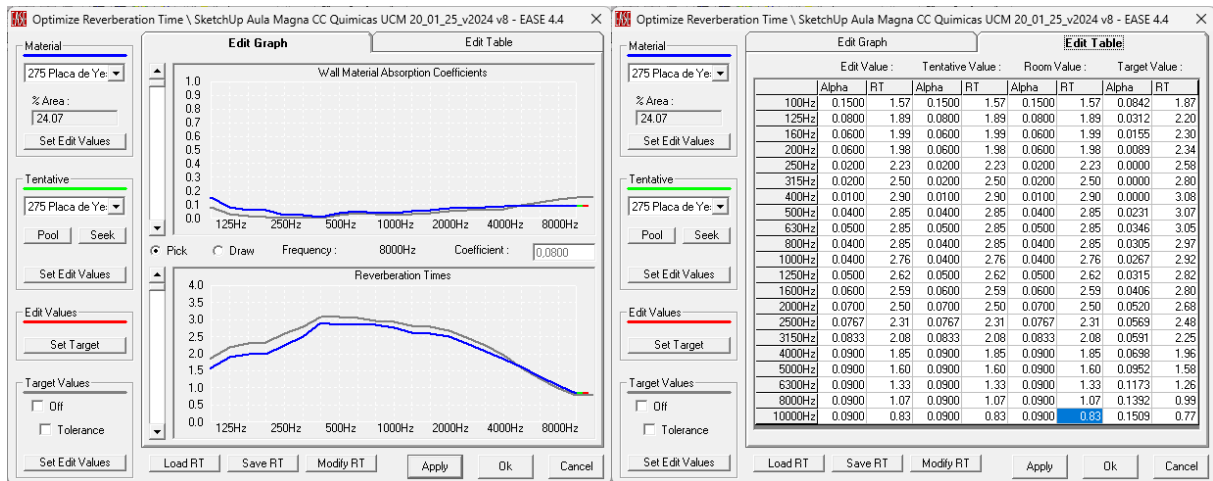


Figura 77. Tiempo de reverberación de la modificación 3.

Tabla 23. Valores JND de la modificación 3.

MODIFICACIÓN 3											
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard					
100	1	1	1	1	3	4					
125	1	1	2	1	4	3					
160	1	1	2	1	4	3					
200	2	1	2	1	3	4					
250	3	1	3	2	3	3					
315	2	1	2	1	3	3					
400	1	1	1	1	3	2					
500	2	1	1	1	2	2					
630	1	1	1	1	2	2					
800	1	1	1	1	2	2					
1000	2	1	1	2	2	1					
1250	1	1	1	1	1	2					
1600	1	1	1	2	1	2					
2000	1	1	1	1	1	2					
2500	1	1	1	1	1	2					
3150	1	1	1	1	1	2					
4000	1	1	1	1	1	2					
5000	1	1	1	1	2	1					
6300	2	2	1	1	3	2					
8000	3	3	1	1	3	2					
10000	3	3	1	1	2	2					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
Cantidad por escalón	73	32	17	4	0	0	0	0	0	0	126
% sobre Total	58%	25%	13%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
% acumulado	58%	83%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

En la tabla 23 se muestra una leve mejora en T<sub>30</sub>. Disminuye el porcentaje del escalón 4 y del escalón 1 y aumentan el del 2 y el 3, es decir, es como si se intercambian los valores entre los escalones, en este caso con una mejora sutil.

Es bastante complicado encontrar un equilibrio entre todos los parámetros, ya que al mejorar uno se puede empeorar otro. Esto se debe a que se desconocen los coeficientes de absorción reales de los materiales y se está trabajando con aproximaciones y a que la sala no tiene un campo completamente difuso por lo que la aproximación estadística no puede ajustarse con precisión al comportamiento real de la sala. El fin es acercarse lo máximo posible a la realidad para que el modelo sea coherente y correcto.

### 9.2.4. Modificación 4

Se ha realizado una prueba cambiando el material 076 por el 077, prácticamente el mismo material, pero con absorción plana en frecuencias medias para intentar mejora el parámetro T<sub>30</sub>.

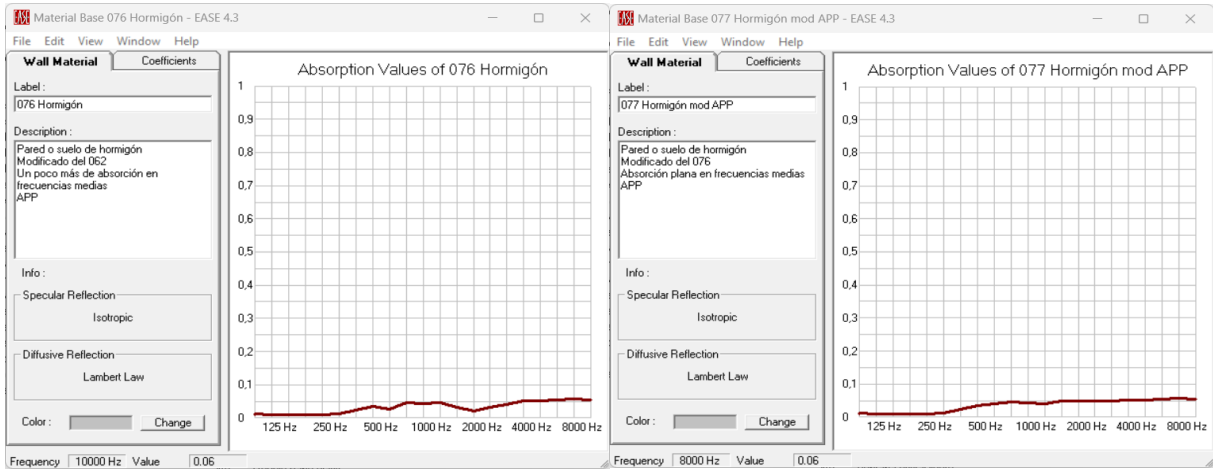


Figura 78. Curva de absorción del material 076 (izquierda) y del material 077 (derecha).

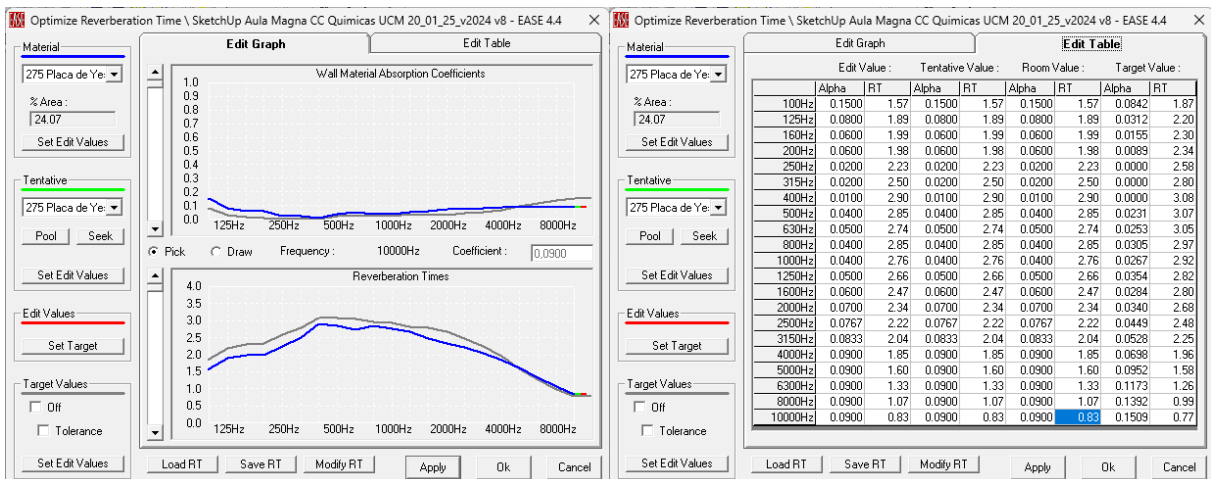


Figura 79. Tiempo de reverberación de la modificación 4.

Tabla 24. Tiempo de reverberación de la modificación 4.

MODIFICACIÓN 4											
Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard					
100	1	1	1	1	3	4					
125	1	1	2	1	3	3					
160	1	1	2	1	5	3					
200	2	1	2	1	3	4					
250	3	2	3	2	4	3					
315	2	1	2	1	4	3					
400	1	1	1	1	3	2					
500	2	1	1	1	2	2					
630	2	1	1	1	1	3					
800	1	1	1	1	2	1					
1000	2	1	1	2	2	2					
1250	1	1	1	1	1	2					
1600	1	1	1	1	1	3					
2000	1	1	1	1	1	3					
2500	2	2	1	1	1	3					
3150	1	1	1	1	1	2					
4000	1	1	1	1	1	2					
5000	1	1	1	1	2	1					
6300	2	2	1	1	2	2					
8000	3	2	1	1	3	2					
10000	3	3	1	1	2	2					
Cantidad por escalón	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
% sobre Total	56%	25%	14%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	126
% acumulado	56%	82%	96%	99%	100%						

En la tabla se puede ver que este cambio empeora en general los resultados. Por lo que se va a descartar este ajuste.

### 9.2.5. Tiempo de Reverberación final

Estas dos últimas modificaciones son muy parecidas. La modificación 3 tiene un porcentaje del 97% entre los tres primeros escalones, mientras que en la modificación 4 un 96%. Aunque esta diferencia es muy pequeña, la frecuencia afectada, 160 Hz, pasa de un escalón 3 a un escalón 5. Por lo que la modificación 3 es elegida como la óptima ya que esta es la que mejores resultados presenta. No se van a realizar más cambios de materiales ya que es poco probable que se pueda ajustar mejor la curva del tiempo de reverberación.

Con la modificación 3 se van a realizar las simulaciones con alta resolución de todos los parámetros acústicos. En la siguiente figura se muestra la comparación del tiempo de reverberación simulado con la modificación 3 y los valores medidos. Se puede ver que el  $T_{30}$  simulado está ligeramente por encima del medido y que el RT simulado está por debajo. Esto se debe a que EASE tiende a sobreestimar el RT por lo que una corrección a la baja hace que la simulación se acerque a la realidad.

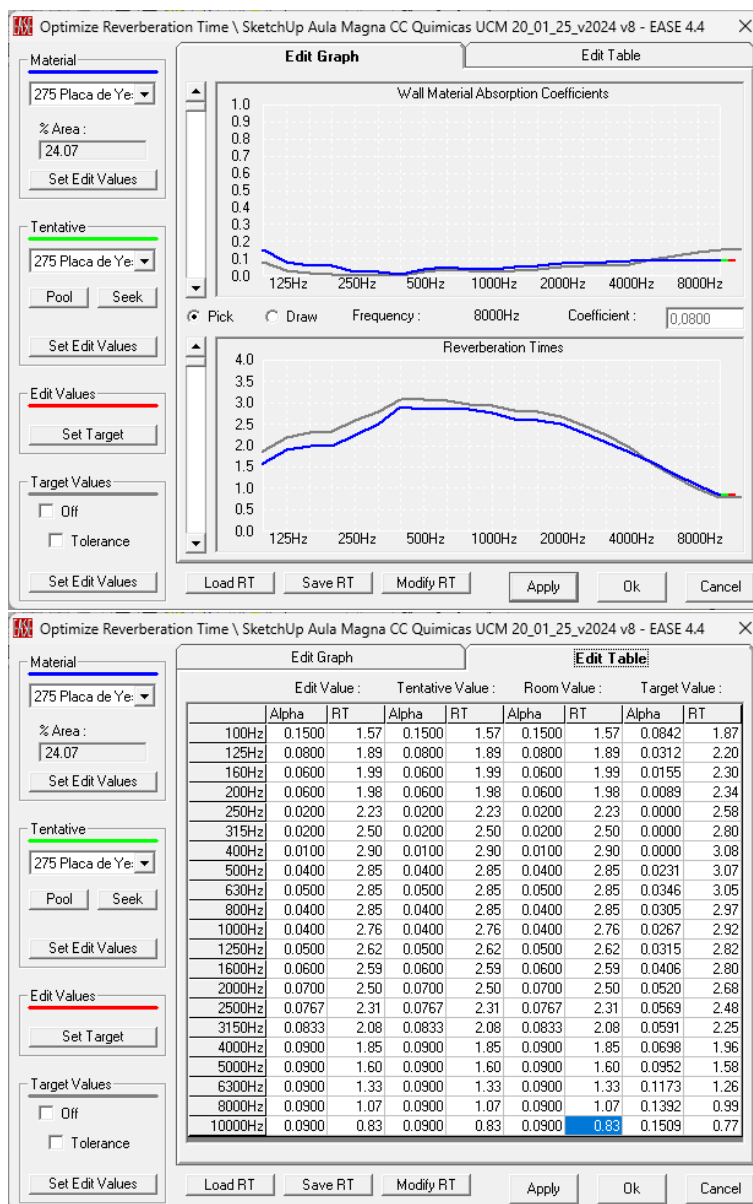
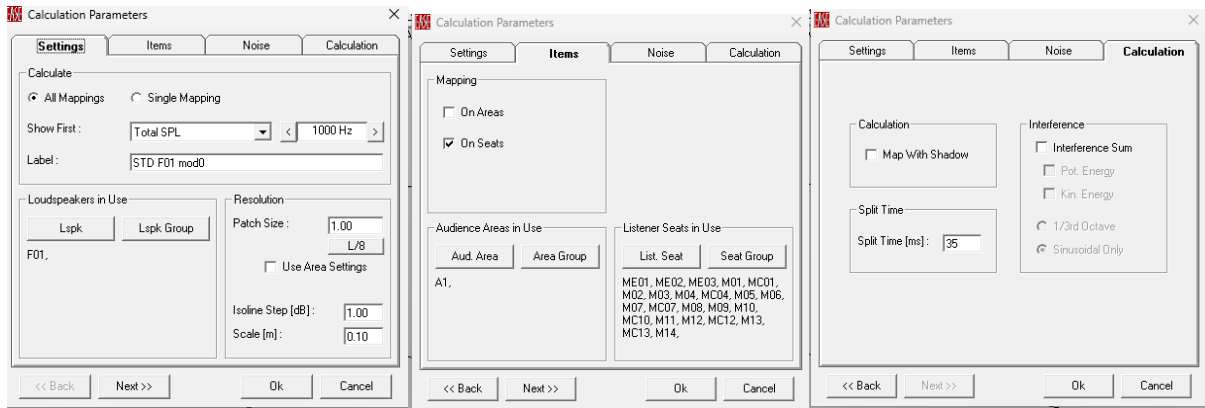


Figura 80. Tiempo de reverberación final (modificación 3) en representación gráfica (arriba) y en formato tabla (abajo).

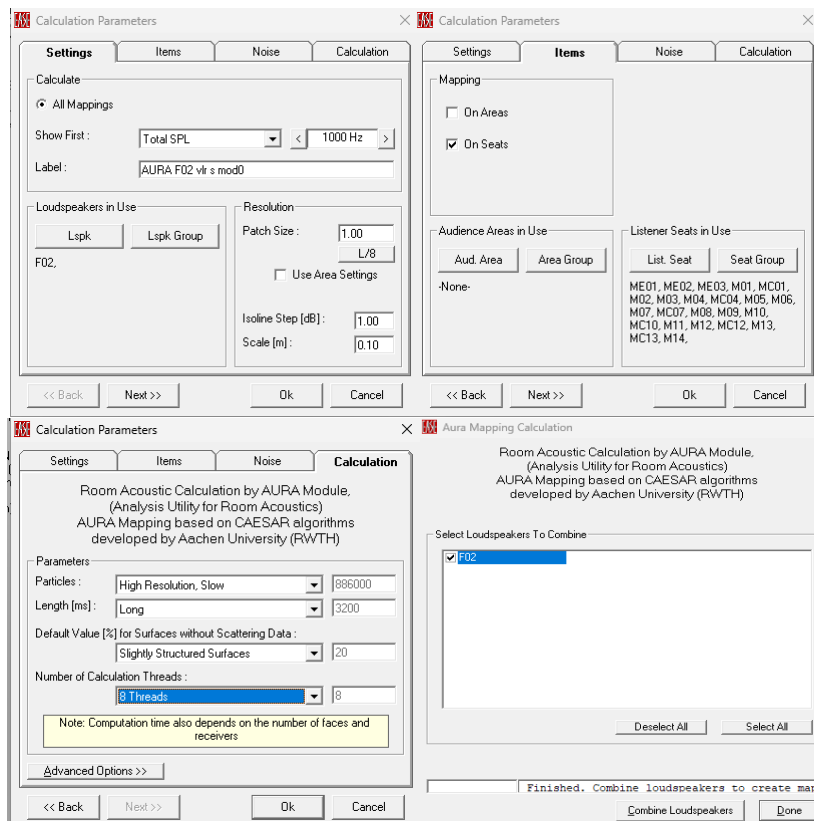
### 9.3. Simulación de los parámetros acústicos.

Cuando se ha terminado de ajustar los materiales, se procede a realizar las simulaciones con mayor resolución que para el ajuste. Ahora se van a simular todos los parámetros acústicos de manera más minuciosa utilizando tanto la acústica estadística (método *Standard Mapping* o STD) como la acústica geométrica (método *AURA Mapping*).

Para obtener los mapas que generan estos métodos, hay que abrir el menú *Mapping* de EASE y seleccionar Standard o AURA, según el mapa que se quiera realizar. Se han calculado 4 mapas, dos por cada posición de fuente, F01 y F02 y por cada método. En las siguientes figuras se muestra cómo se han configurado para obtener los datos simulados.



**Figura 81. Configuración Standard Mapping.**



**Figura 82. Configuración AURA Mapping de alta resolución.**

Mediante *Standard Mapping* se calcula el  $RT[s]$ , mientras que los parámetros  $D_{50}[-]$ ,  $EDT[s]$ ,  $LF[-]$ ,  $LFC[-]$ ,  $T_{20}[s]$ ,  $T_{30}[s]$  y  $T_s[ms]$  se calculan con *AURA Mapping*. Los parámetros  $C_{50}[dB]$ ,  $C_{80}[dB]$ ,  $Alcons[\%]$  y  $STI[-]$  se calculan de las dos maneras.

Tras simular los datos, se ha realizado un procesado de datos parecido al que se aplicó a los datos medidos que se explicó en el apartado 6.1, exceptuando el primer filtrado, la máscara INR. Solamente se aplica el criterio de Chauvenet, excluyendo los valores que se consideran estadísticamente poco representativos.



Parámetros temporales:

RT [s]

Tabla 25. Comparación de los valores medidos y simulados en STD del parámetro RT.

Frecuencias [Hz]	RT [s]				
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	1,87	0,20	1,57	3,19	4
125	2,20	0,21	1,89	2,85	3
160	2,30	0,17	1,99	2,66	3
200	2,34	0,16	1,98	3,07	4
250	2,58	0,14	2,23	2,71	3
315	2,80	0,08	2,5	2,12	3
400	3,08	0,12	2,9	1,17	2
500	3,07	0,09	2,85	1,44	2
630	3,05	0,09	2,85	1,31	2
800	2,97	0,08	2,85	0,81	1
1000	2,92	0,07	2,76	1,12	2
1250	2,82	0,06	2,62	1,43	2
1600	2,80	0,05	2,59	1,50	2
2000	2,68	0,04	2,5	1,33	2
2500	2,48	0,04	2,31	1,35	2
3150	2,25	0,03	2,08	1,50	2
4000	1,96	0,03	1,85	1,13	2
5000	1,58	0,03	1,6	0,25	1
6300	1,26	0,03	1,33	1,07	2
8000	0,99	0,03	1,07	1,69	2
10000	0,77	0,03	0,83	1,48	2

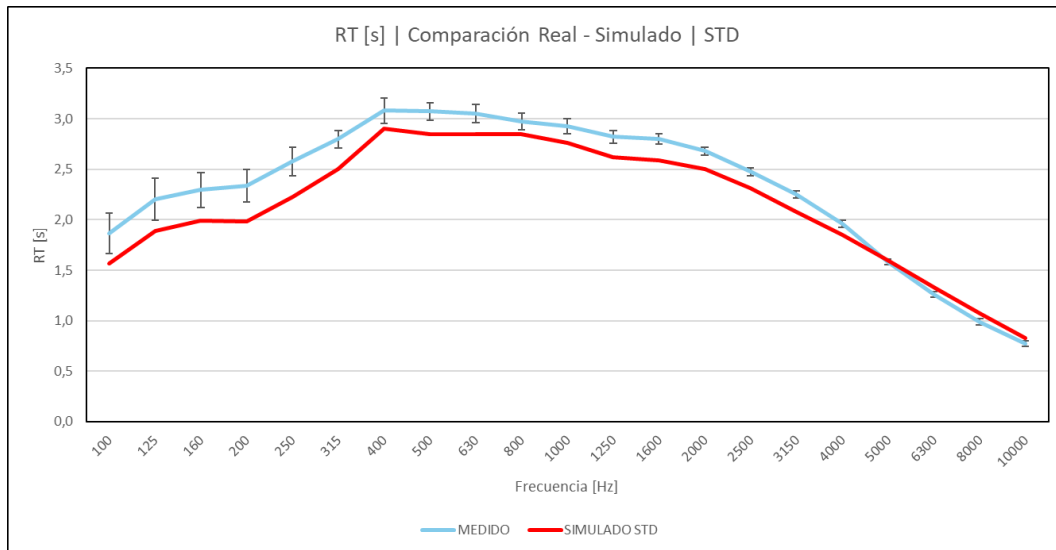


Figura 84. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) del parámetro RT.

Como se mencionó en el subapartado anterior, este parámetro no se adapta al real, pero se ha logrado una estimación más que correcta.

EDT [s]

Tabla 26. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro EDT.

Frecuencias [Hz]	EDT [s]				
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	1,92	0,59	2,04	1,25	2
125	2,33	0,56	2,50	1,45	2
160	2,38	0,45	2,64	2,25	3
200	2,35	0,35	2,63	2,39	3
250	2,58	0,42	3,02	3,36	4
315	2,88	0,40	3,25	2,53	3
400	3,04	0,29	3,62	3,81	4
500	3,03	0,26	3,32	1,89	2
630	3,09	0,23	3,28	1,21	2
800	2,93	0,24	3,20	1,79	2
1000	3,01	0,19	3,11	0,68	1
1250	2,83	0,16	2,91	0,56	1
1600	2,82	0,20	2,87	0,34	1
2000	2,70	0,14	2,76	0,42	1
2500	2,49	0,15	2,52	0,24	1
3150	2,26	0,13	2,25	0,07	1
4000	1,93	0,11	1,97	0,35	1
5000	1,51	0,11	1,68	2,22	3
6300	1,20	0,11	1,38	3,12	4
8000	0,91	0,11	1,10	4,10	5
10000	0,68	0,11	0,83	4,54	5

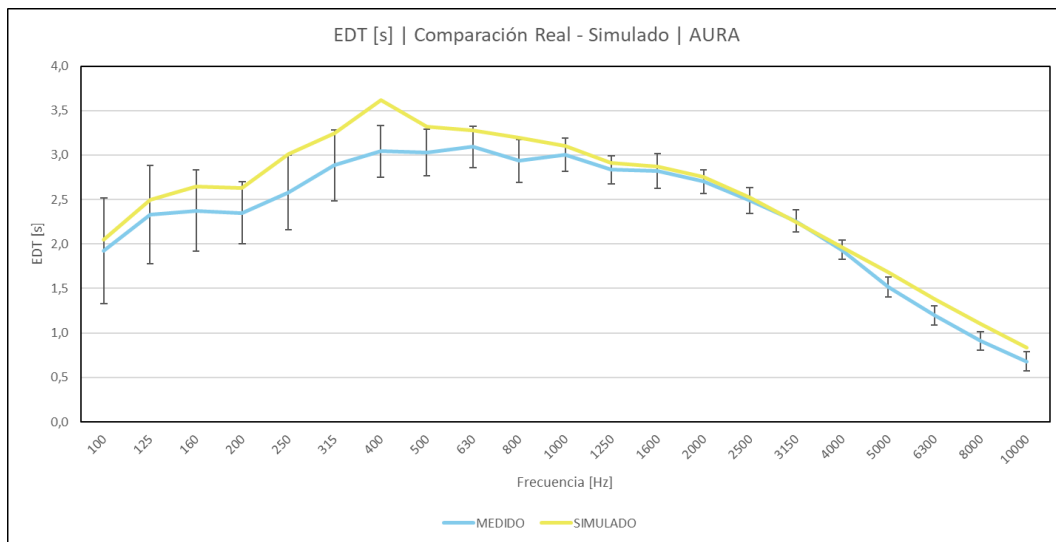


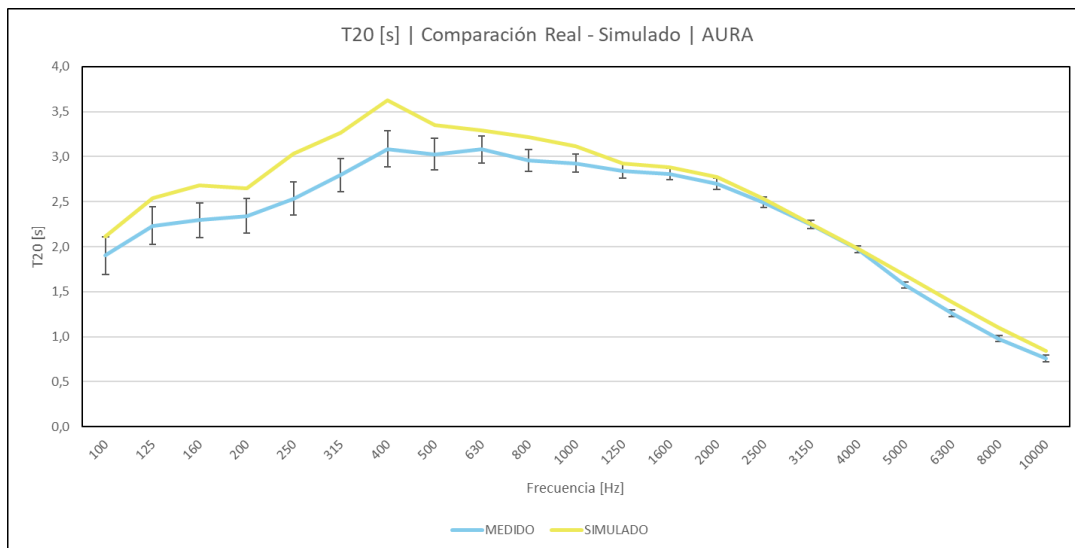
Figura 85. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro EDT.

En este parámetro se obtienen buenos resultados, salvo en el tercio de octava de 400 Hz, donde en la figura 85, se puede ver que hay un pico. También hay cierta discrepancia a partir de 8000 Hz.

**T<sub>20</sub> [s]**

**Tabla 27. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro T<sub>20</sub>.**

T <sub>20</sub> [s]					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	1,90	0,21	2,11	2,20	3
125	2,23	0,21	2,54	2,77	3
160	2,29	0,19	2,68	3,35	4
200	2,34	0,19	2,65	2,64	3
250	2,53	0,19	3,03	3,94	4
315	2,80	0,18	3,26	3,34	4
400	3,08	0,20	3,63	3,54	4
500	3,02	0,18	3,35	2,17	3
630	3,08	0,15	3,30	1,41	2
800	2,96	0,12	3,21	1,72	2
1000	2,93	0,10	3,11	1,28	2
1250	2,84	0,08	2,93	0,60	1
1600	2,81	0,06	2,88	0,56	1
2000	2,70	0,06	2,77	0,53	1
2500	2,49	0,06	2,53	0,30	1
3150	2,25	0,05	2,25	0,03	1
4000	1,97	0,04	1,98	0,07	1
5000	1,58	0,03	1,69	1,42	2
6300	1,26	0,04	1,39	2,03	3
8000	0,98	0,03	1,10	2,44	3
10000	0,76	0,04	0,84	2,04	3



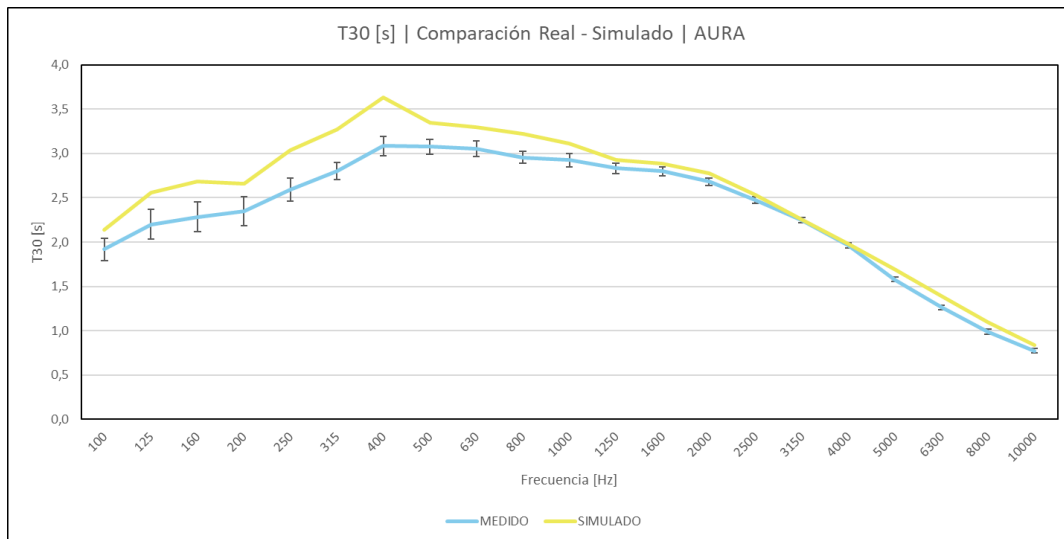
**Figura 86. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro T<sub>20</sub>.**

Este parámetro se ajusta mejor que el anterior, pero aun así hasta 400 Hz hay más distancia entre los valores simulados y medidos.

**T<sub>30</sub> [s]**

**Tabla 28. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro T<sub>30</sub>.**

T <sub>30</sub> [s]					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	1,92	0,13	2,13	2,28	3
125	2,20	0,17	2,56	3,25	4
160	2,28	0,17	2,68	3,48	4
200	2,35	0,16	2,66	2,68	3
250	2,59	0,13	3,04	3,46	4
315	2,80	0,10	3,27	3,34	4
400	3,08	0,11	3,63	3,54	4
500	3,08	0,09	3,35	1,79	2
630	3,05	0,09	3,30	1,58	2
800	2,96	0,07	3,22	1,76	2
1000	2,92	0,07	3,11	1,31	2
1250	2,83	0,06	2,93	0,69	1
1600	2,80	0,05	2,89	0,63	1
2000	2,68	0,04	2,78	0,71	1
2500	2,47	0,04	2,53	0,46	1
3150	2,25	0,03	2,26	0,11	1
4000	1,96	0,03	1,98	0,20	1
5000	1,58	0,03	1,69	1,42	2
6300	1,26	0,03	1,39	1,99	2
8000	0,99	0,03	1,10	2,18	3
10000	0,77	0,03	0,84	1,65	2



**Figura 87. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro T<sub>30</sub>.**

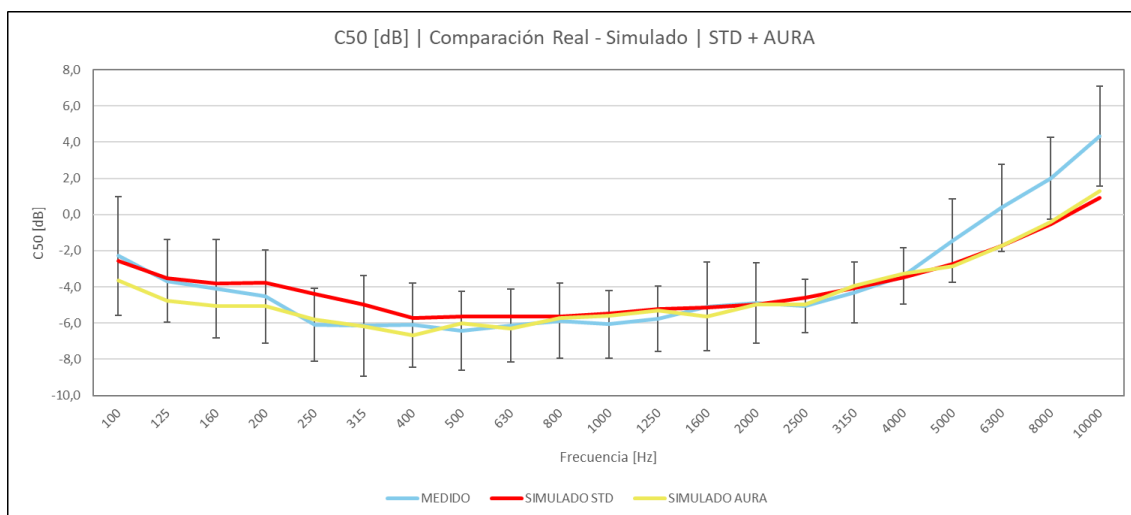
Estos resultados se asemejan mucho a los del T<sub>20</sub>.

Parámetros energéticos:

**C<sub>50</sub> [dB]**

**Tabla 29. Comparación de los valores medidos y simulados en STD (izquierda) y en AURA (derecha) del parámetro C<sub>50</sub>.**

C <sub>50</sub> [dB]   STD						C <sub>50</sub> [dB]   AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND	Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	-2,29	3,27	-2,55	0,26	1	100	-2,29	3,27	-3,63	1,34	2
125	-3,68	2,28	-3,54	0,14	1	125	-3,68	2,28	-4,77	1,09	2
160	-4,09	2,71	-3,81	0,28	1	160	-4,09	2,71	-5,07	0,98	1
200	-4,54	2,57	-3,78	0,75	1	200	-4,54	2,57	-5,04	0,50	1
250	-6,08	2,01	-4,39	1,68	2	250	-6,08	2,01	-5,78	0,29	1
315	-6,16	2,78	-4,97	1,19	2	315	-6,16	2,78	-6,18	0,02	1
400	-6,11	2,31	-5,70	0,41	1	400	-6,11	2,31	-6,66	0,54	1
500	-6,42	2,18	-5,62	0,80	1	500	-6,42	2,18	-6,03	0,39	1
630	-6,13	2,00	-5,62	0,51	1	630	-6,13	2,00	-6,28	0,15	1
800	-5,88	2,07	-5,62	0,26	1	800	-5,88	2,07	-5,74	0,14	1
1000	-6,07	1,87	-5,47	0,60	1	1000	-6,07	1,87	-5,60	0,47	1
1250	-5,75	1,81	-5,20	0,54	1	1250	-5,75	1,81	-5,30	0,44	1
1600	-5,09	2,46	-5,16	0,07	1	1600	-5,09	2,46	-5,63	0,55	1
2000	-4,90	2,22	-4,98	0,09	1	2000	-4,90	2,22	-4,99	0,09	1
2500	-5,05	1,46	-4,59	0,46	1	2500	-5,05	1,46	-4,96	0,09	1
3150	-4,32	1,69	-4,07	0,25	1	3150	-4,32	1,69	-3,95	0,37	1
4000	-3,41	1,56	-3,47	0,06	1	4000	-3,41	1,56	-3,28	0,13	1
5000	-1,44	2,30	-2,73	1,29	2	5000	-1,44	2,30	-2,84	1,40	2
6300	0,37	2,42	-1,75	2,11	3	6300	0,37	2,42	-1,74	2,11	3
8000	1,99	2,26	-0,55	2,54	3	8000	1,99	2,26	-0,40	2,39	3
10000	4,33	2,76	0,94	3,39	4	10000	4,33	2,76	1,29	3,03	4



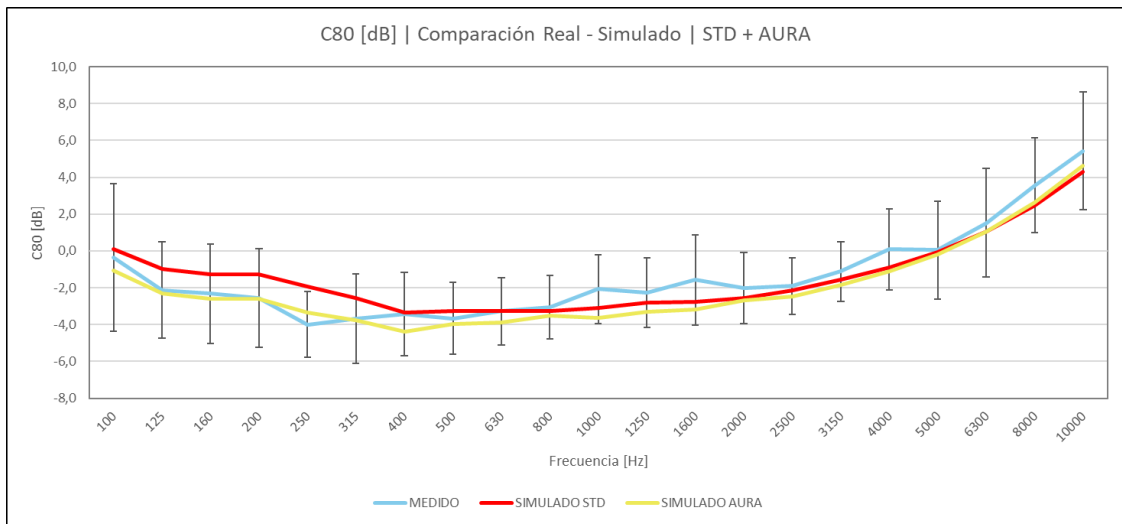
**Figura 88. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) y en AURA (amarillo) del parámetro C<sub>50</sub>.**

Como se puede ver en las tablas anteriores, los resultados son muy satisfactorios tanto con la simulación STD como con la simulación AURA. Esto quiere decir que no hay mucha diferencia entre los valores medidos y simulados. En la figura 88, queda más visual que las curvas simuladas se parecen a la medida y que solo discrepan más en alta frecuencia.

**C<sub>80</sub> [dB]**

**Tabla 30. Comparación de los valores medidos y simulados en STD (izquierda) y en AURA (derecha) del parámetro C<sub>80</sub>.**

C <sub>80</sub> [dB]   STD						C <sub>80</sub> [dB]   AURA					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND	Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	-0,34	4,01	0,11	0,45	1	100	-0,34	4,01	-1,07	0,73	1
125	-2,13	2,63	-0,99	1,14	2	125	-2,13	2,63	-2,30	0,17	1
160	-2,32	2,69	-1,29	1,03	2	160	-2,32	2,69	-2,62	0,30	1
200	-2,56	2,68	-1,26	1,31	2	200	-2,56	2,68	-2,58	0,02	1
250	-3,99	1,78	-1,92	2,06	3	250	-3,99	1,78	-3,36	0,62	1
315	-3,67	2,43	-2,55	1,12	2	315	-3,67	2,43	-3,77	0,10	1
400	-3,43	2,26	-3,34	0,10	1	400	-3,43	2,26	-4,38	0,95	1
500	-3,66	1,96	-3,25	0,41	1	500	-3,66	1,96	-3,96	0,30	1
630	-3,27	1,82	-3,25	0,03	1	630	-3,27	1,82	-3,89	0,61	1
800	-3,05	1,73	-3,25	0,20	1	800	-3,05	1,73	-3,49	0,44	1
1000	-2,07	1,87	-3,08	1,01	2	1000	-2,07	1,87	-3,63	1,56	2
1250	-2,27	1,88	-2,80	0,52	1	1250	-2,27	1,88	-3,30	1,03	2
1600	-1,58	2,44	-2,74	1,17	2	1600	-1,58	2,44	-3,19	1,61	2
2000	-2,02	1,93	-2,96	0,53	1	2000	-2,02	1,93	-2,68	0,65	1
2500	-1,90	1,54	-2,13	0,24	1	2500	-1,90	1,54	-2,47	0,58	1
3150	-1,11	1,62	-1,55	0,44	1	3150	-1,11	1,62	-1,84	0,73	1
4000	0,09	2,20	-0,90	0,99	1	4000	0,09	2,20	-1,10	1,18	2
5000	0,05	2,65	-0,06	0,11	1	5000	0,05	2,65	-0,17	0,23	1
6300	1,53	2,94	1,07	0,46	1	6300	1,53	2,94	1,06	0,47	1
8000	3,56	2,57	2,48	1,08	2	8000	3,56	2,57	2,62	0,94	1
10000	5,43	3,18	4,30	1,13	2	10000	5,43	3,18	4,63	0,81	1



**Figura 89. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) y en AURA (amarillo) del parámetro C<sub>80</sub>.**

Los resultados de C<sub>80</sub> son excelentes, mostrando que la simulación reproduce casi perfectamente el comportamiento real.

D<sub>50</sub> [-]

Tabla 31. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro D50.

D50 [-]					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	0,38	0,12	0,31	3,93	4
125	0,32	0,09	0,26	4,21	5
160	0,31	0,10	0,24	4,51	5
200	0,30	0,10	0,24	3,50	4
250	0,23	0,07	0,22	1,62	2
315	0,23	0,09	0,20	2,90	3
400	0,24	0,08	0,18	4,94	5
500	0,23	0,08	0,19	3,03	4
630	0,24	0,07	0,20	3,47	4
800	0,24	0,07	0,20	3,43	4
1000	0,24	0,07	0,21	2,81	3
1250	0,25	0,07	0,22	2,69	3
1600	0,28	0,09	0,22	4,03	5
2000	0,28	0,08	0,23	3,80	4
2500	0,27	0,06	0,25	2,02	3
3150	0,29	0,06	0,27	1,49	2
4000	0,35	0,08	0,30	2,78	3
5000	0,42	0,09	0,35	3,47	4
6300	0,48	0,08	0,40	3,11	4
8000	0,53	0,07	0,50	1,33	2
10000	0,59	0,05	0,59	0,13	1

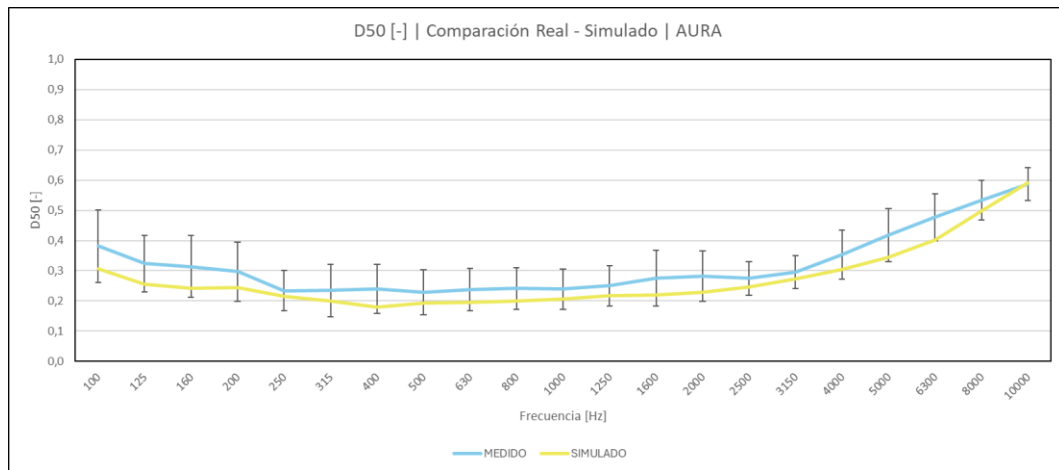


Figura 90. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro D50.

Se puede observar, en la tabla 31, que hay una distancia apreciable entre los valores reales y simulados ya que se han obtenido escalones JND un poco elevados. En la figura 90, queda claro que el nivel de las simulaciones es más bajo que el real.

$T_s$  [ms]

Tabla 32. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro  $T_s$ .

Ts [ms]					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	152,45	38,04	144,06	0,84	1
125	177,66	32,11	177,73	0,01	1
160	178,95	31,91	188,31	0,94	1
200	179,91	30,10	186,59	0,67	1
250	194,33	44,29	215,65	2,13	3
315	214,10	35,55	232,67	1,86	2
400	221,68	35,46	260,46	3,88	4
500	224,15	32,07	239,54	1,54	2
630	220,42	34,04	235,73	1,53	2
800	208,76	34,40	230,47	2,17	3
1000	210,77	26,78	223,59	1,28	2
1250	200,14	27,19	209,71	0,96	1
1600	190,46	39,92	206,37	1,59	2
2000	181,79	33,66	197,79	1,60	2
2500	174,43	21,49	180,66	0,62	1
3150	156,75	21,61	156,91	0,02	1
4000	126,86	27,25	140,79	1,39	2
5000	97,25	26,74	117,81	2,06	3
6300	74,76	22,49	96,17	2,14	3
8000	57,21	18,25	75,67	1,85	2
10000	43,56	15,93	57,22	1,37	2

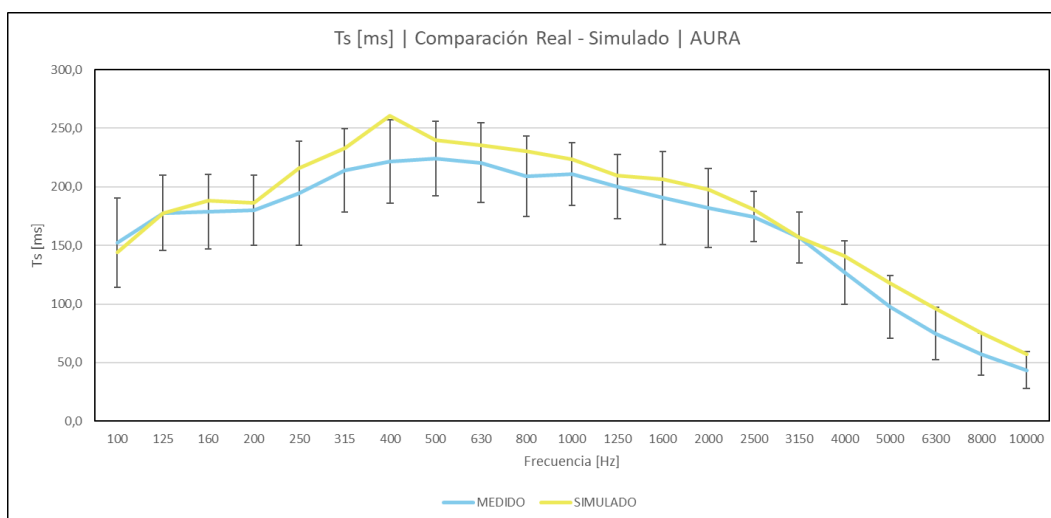


Figura 91. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro  $T_s$ .

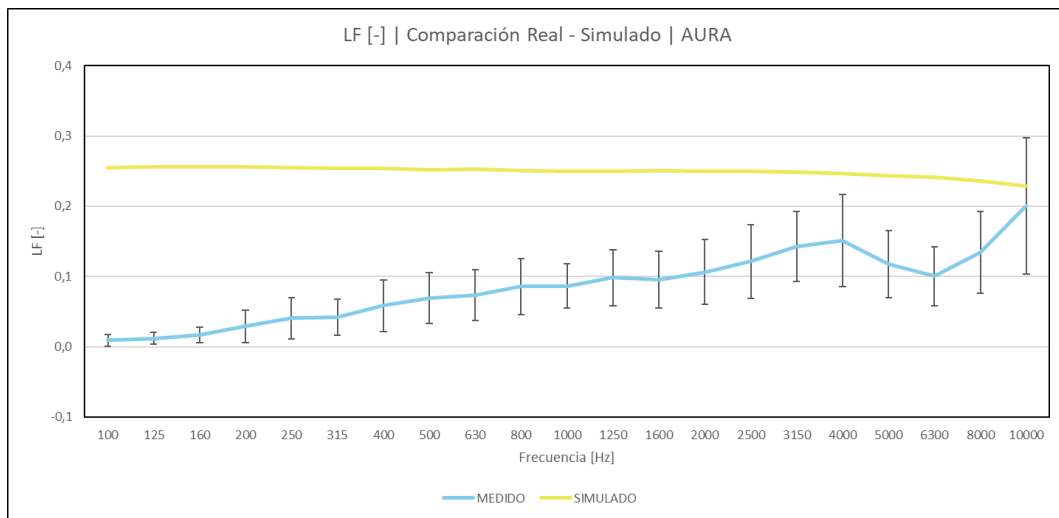
Este parámetro se ajusta bastante bien ya que los escalones JND tienen un nivel bajo. En la figura 91, la curva simulada tiene un nivel mayor con un pico en 400 Hz.

**Parámetros espaciales:**

**LF [-]**

**Tabla 33. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro LF.**

LF [-]					
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
100	0,01	0,01	0,26	4,93	5
125	0,01	0,01	0,26	4,88	5
160	0,02	0,01	0,26	4,79	5
200	0,03	0,02	0,26	4,55	5
250	0,04	0,03	0,25	4,28	5
315	0,04	0,03	0,25	4,25	5
400	0,06	0,04	0,25	3,91	4
500	0,07	0,04	0,25	3,64	4
630	0,07	0,04	0,25	3,59	4
800	0,09	0,04	0,25	3,30	4
1000	0,09	0,03	0,25	3,27	4
1250	0,10	0,04	0,25	3,03	4
1600	0,10	0,04	0,25	3,11	4
2000	0,11	0,05	0,25	2,88	3
2500	0,12	0,05	0,25	2,57	3
3150	0,14	0,05	0,25	2,13	3
4000	0,15	0,07	0,25	1,91	2
5000	0,12	0,05	0,24	2,52	3
6300	0,10	0,04	0,24	2,81	3
8000	0,13	0,06	0,24	2,03	3
10000	0,20	0,10	0,23	0,57	1



**Figura 92. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en AURA (amarillo) del parámetro LF.**

A frecuencias bajas no hay muy buenos resultados, a medias frecuencias mejora un poco y a alta frecuencia los resultados están bien.

## Parámetros de inteligibilidad:

### Alcons [%]

Tabla 34. Comparación de los valores medidos y simulados en STD del parámetro Alcons.

ALCONS [%]   STD				
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
17,22	4,22	15,36	0,93	1

Tabla 35. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro Alcons.

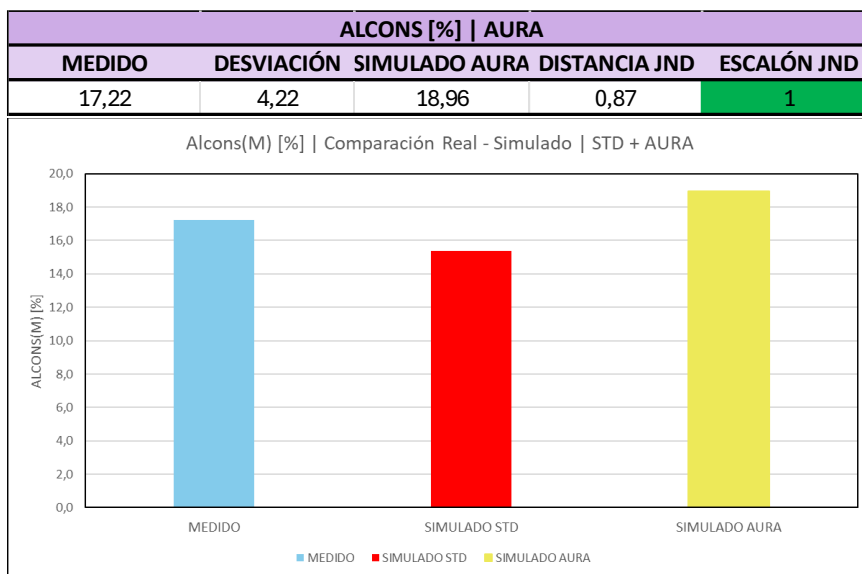


Figura 93. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) y en AURA (amarillo) del parámetro Alcons.

La comparación de las simulaciones STD y AURA con los valores medidos in situ es más que satisfactoria.

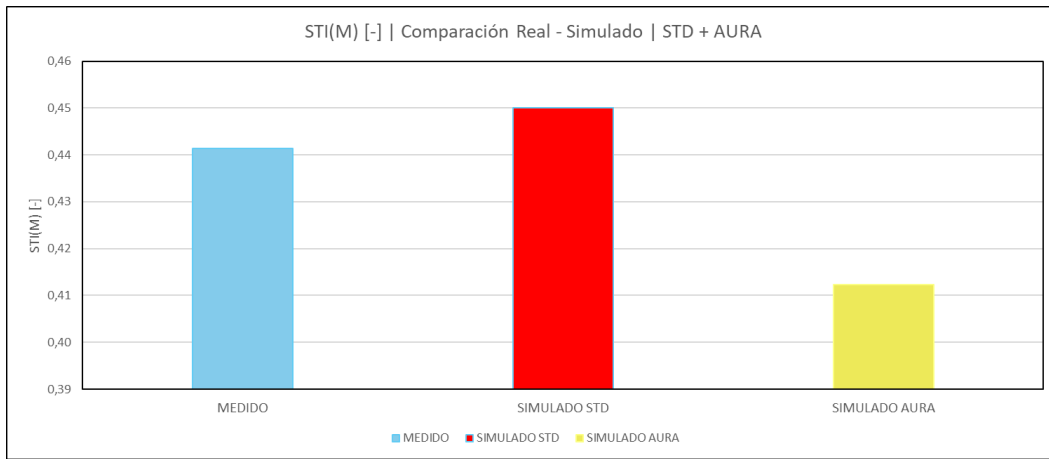
### STI [-].

Tabla 36. Comparación de los valores medidos y simulados en STD del parámetro STI.

STI [-]   STD				
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
0,44	0,05	0,45	0,17	1

Tabla 37. Comparación de los valores medidos y simulados en AURA del parámetro STI.

STI [-]   AURA				
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA	DISTANCIA JND	ESCALÓN JND
0,44	0,05	0,41	0,96	1



**Figura 94. Comparación de los valores medidos (azul) y simulados en STD (rojo) y en AURA (amarillo) del parámetro STI.**

Los resultados de este parámetro son igual de óptimos que el anterior.

En la última tabla de este apartado se muestran los valores de los escalones de la métrica JND de todos los parámetros acústicos para así tener una visión conjunta de los resultados. Se puede ver que el escalón 1 es el que tiene un mayor peso sobre el total con un 40%, además de que la mayoría de los valores están comprendidos en los primeros cuatro escalones. En el parámetro espacial, LF, es donde se encuentran los valores más distantes entre sí.

A grandes rasgos, es posible confirmar que los resultados son adecuados debido a que entre los escalones 1, 2, 3 y 4 hay un 95% del porcentaje acumulado. Sería más óptimo si se hubieran conseguido que este porcentaje fuera solo entre los tres primeros escalones, pero aun así el resultado de la validación es satisfactorio.

Tabla 38. Resultados de los datos simulados.

Frecuencia [Hz]	EDT AURA	T20 AURA	T30 AURA	RT STD	D50 AURA	C50 STD	C50 AURA	C80 STD	C80 AURA	Ts AURA	LF AURA	STI M STD	STI M AURA	AIcons M STD	AIcons M AURA
100 Hz	2	3	3	4	4	1	2	1	1	1	5				
125 Hz	2	3	4	3	5	1	2	2	1	1	5				
160 Hz	3	4	4	3	5	1	1	2	1	1	5				
200 Hz	3	3	3	4	4	1	1	2	1	1	5				
250 Hz	4	4	4	3	2	2	1	3	1	3	5				
315 Hz	3	4	4	3	3	2	1	2	1	2	5				
400 Hz	4	4	4	2	5	1	1	1	1	4	4				
500 Hz	2	3	2	2	4	1	1	1	1	2	4				
630 Hz	2	2	2	2	4	1	1	1	1	2	4				
800 Hz	2	2	2	1	4	1	1	1	1	3	4				
1000 Hz	1	2	2	2	3	1	1	2	2	2	4	1	1	1	1
1250 Hz	1	1	1	2	3	1	1	1	2	2	4				
1600 Hz	1	1	1	2	5	1	1	2	2	2	4				
2000 Hz	1	1	1	2	4	1	1	1	1	2	3				
2500 Hz	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	3				
3150 Hz	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	3				
4000 Hz	1	1	1	2	3	1	1	1	2	2	2				
5000 Hz	3	2	2	1	4	2	2	1	1	3	3				
6300 Hz	4	3	2	2	4	3	3	1	1	3	3				
8000 Hz	5	3	3	2	2	3	3	2	1	2	3				
10000 Hz	5	3	2	2	1	4	4	2	1	2	1				

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
Cantidad por escalón	93	60	38	32	12	0	0	0	0	0	235
% sobre Total	40%	26%	16%	14%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	
% acumulado	40%	65%	81%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

## 9.5. Simetría de la sala.

En este apartado se verifica la hipótesis que se planteó al empezar este proyecto sobre que el Aula Magna es una sala simétrica. Para ello, se van a comparar los resultados obtenidos en distintas posiciones de micrófonos respecto el eje de simetría. Se eligen posiciones tanto cerca de este eje como en extremos de la sala para verificar la suposición completamente. En la siguiente tabla se muestran las parejas de posiciones elegidas, en la figura 16 del apartado 5.3 se puede observar donde están situadas en la sala.

Tabla 39. Parejas de micrófonos elegidas para comprobar la simétrica.

Zona	Micrófono normal	Micrófono de control
Planta 0	M01	MC01
Planta 0	M04	MC04
Planta 0	M07	MC07
Planta 1	M10	MC10
Planta 1	M12	MC12
Planta 1	M13	MC13

En esas posiciones se van a analizar y comparar los valores medidos in situ y simulados de los parámetros  $C_{50}$  [dB], LF [-] y  $T_{30}$  [s], por separado.

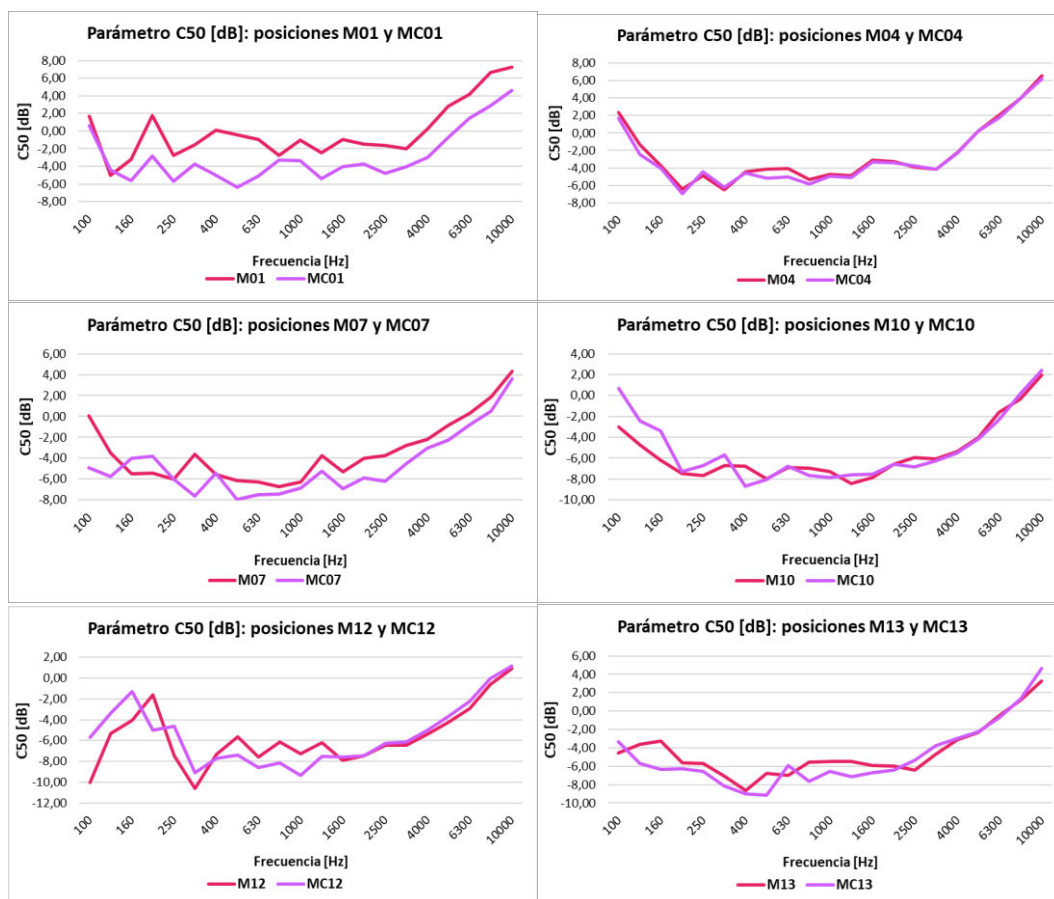


Figura 95. Comparación de los valores medidos en cada par de posiciones del parámetro  $C_{50}$ .

En la figura anterior, se puede observar que en general, la forma de la curva es muy semejante entre los pares de micrófonos diferenciando en el nivel. En algún caso de M04-MC04, son prácticamente idénticas. Estas diferencias pueden ser la influencia de la posición concreta, ya sea porque en ese punto hay más reflexiones o absorción.

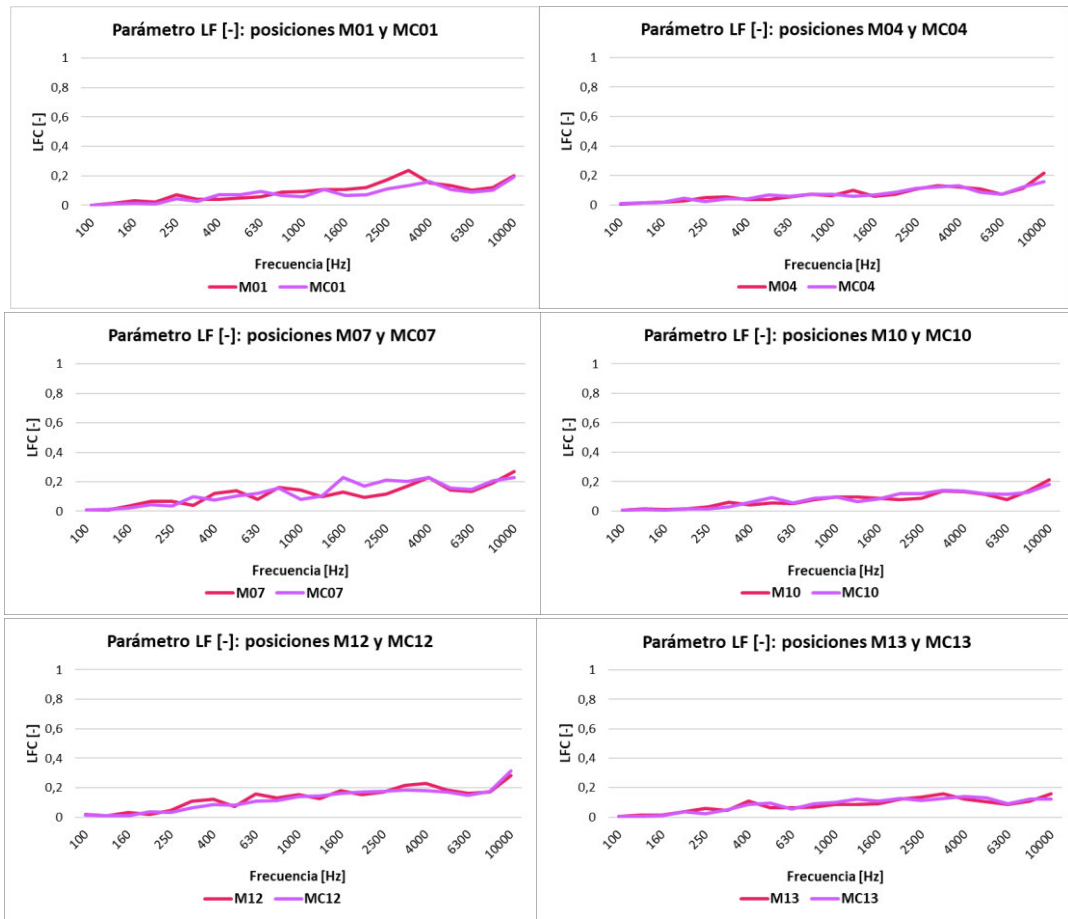


Figura 96. Comparación de los valores medidos en cada par de posiciones del parámetro LF.

Respecta a este parámetro, LF, los niveles coinciden un poco más.

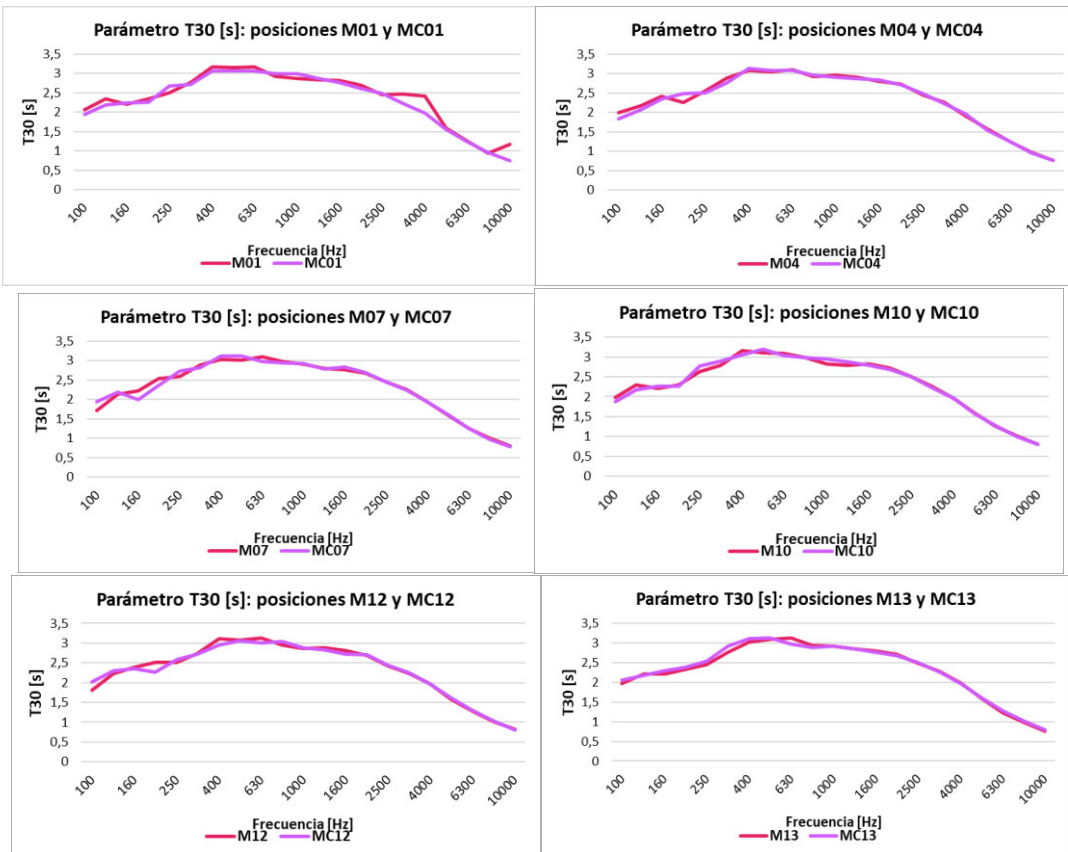


Figura 97. Comparación de los valores medidos en cada par de posiciones del parámetro T<sub>30</sub>.

En la figura anterior, se puede ver que para el parámetro T<sub>30</sub> las curvas de los micrófonos se asemejan tanto en forma como en nivel entre sí.

Ahora se van a presentar lo mismo, pero sobre los datos resultantes de las simulaciones.

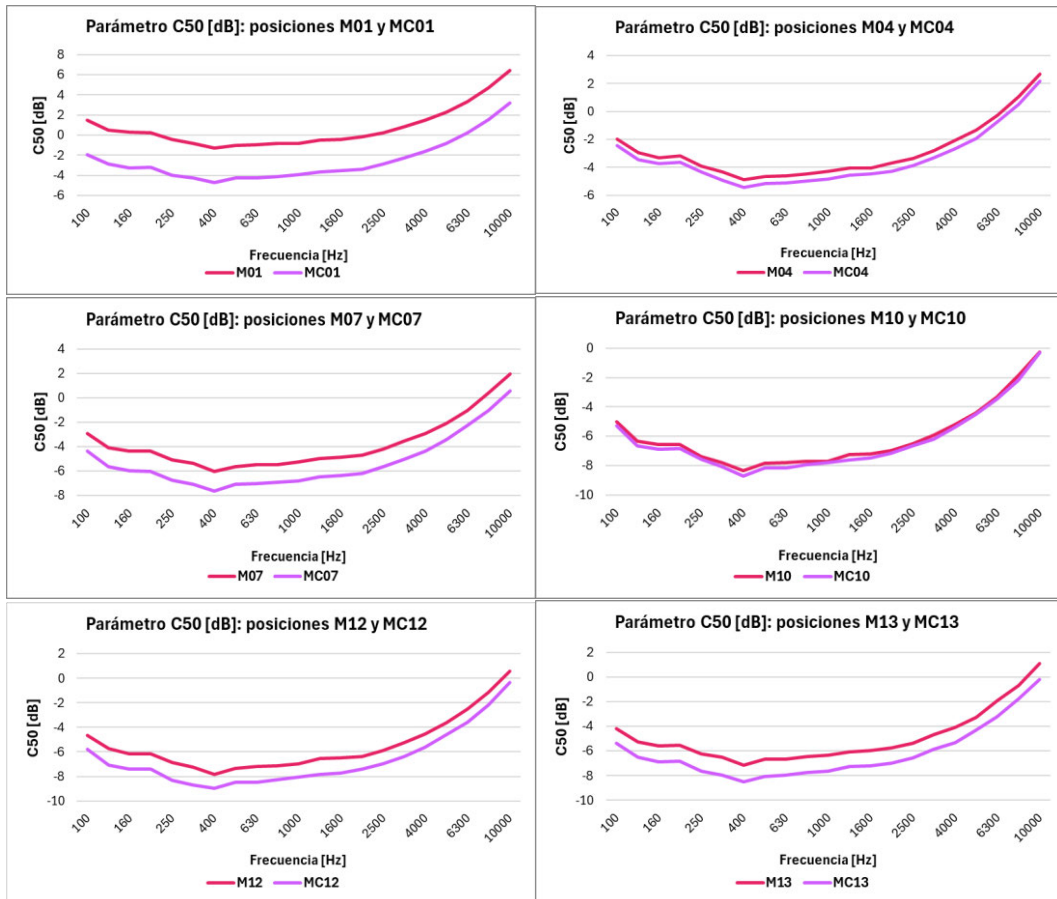


Figura 98. Comparación de los valores simulados en cada par de posiciones del parámetro C50.

Se puede decir que pasa lo mismo que con las medidas in situ. Los niveles de las curvas se distancian un poco, pero se sigue manteniendo la forma.

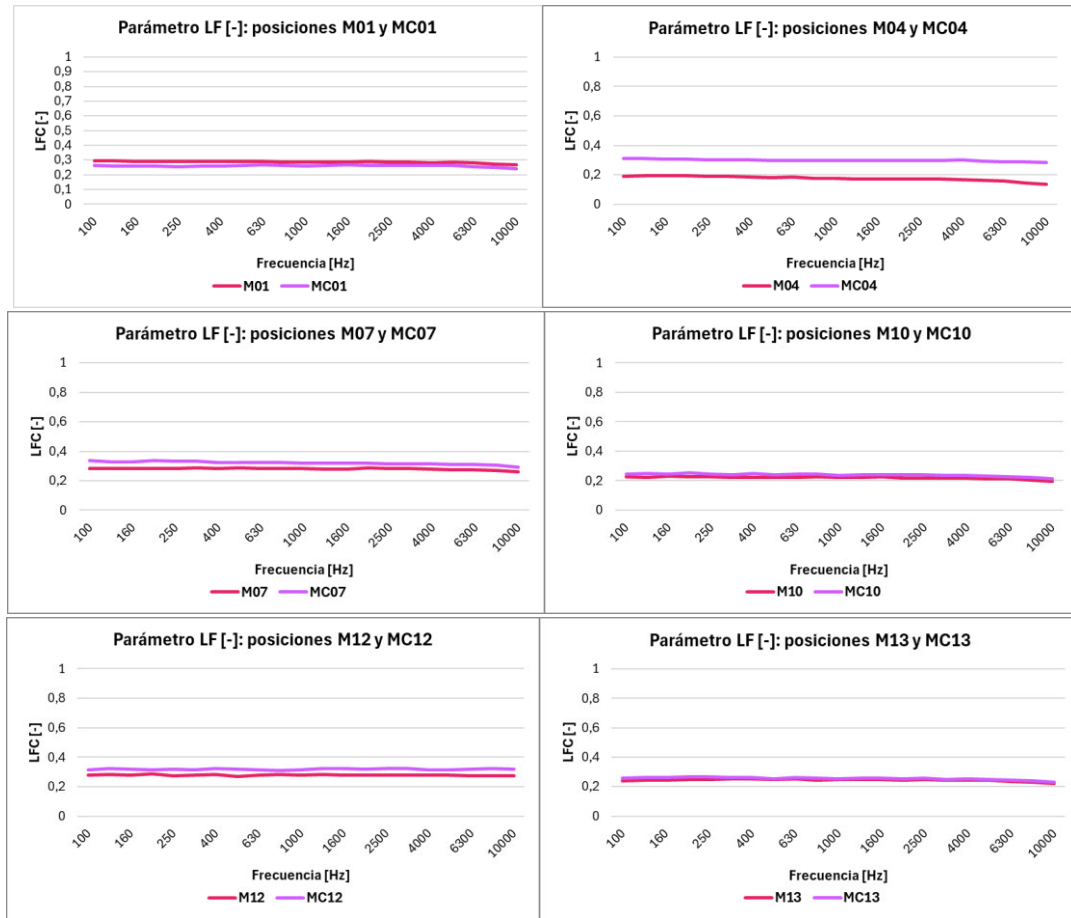


Figura 99. Comparación de los valores simulado en cada par de posiciones del parámetro LF.

Con este parámetro, se puede observar que para todos los pares de micrófonos hay bastante semejanza entre las curvas.

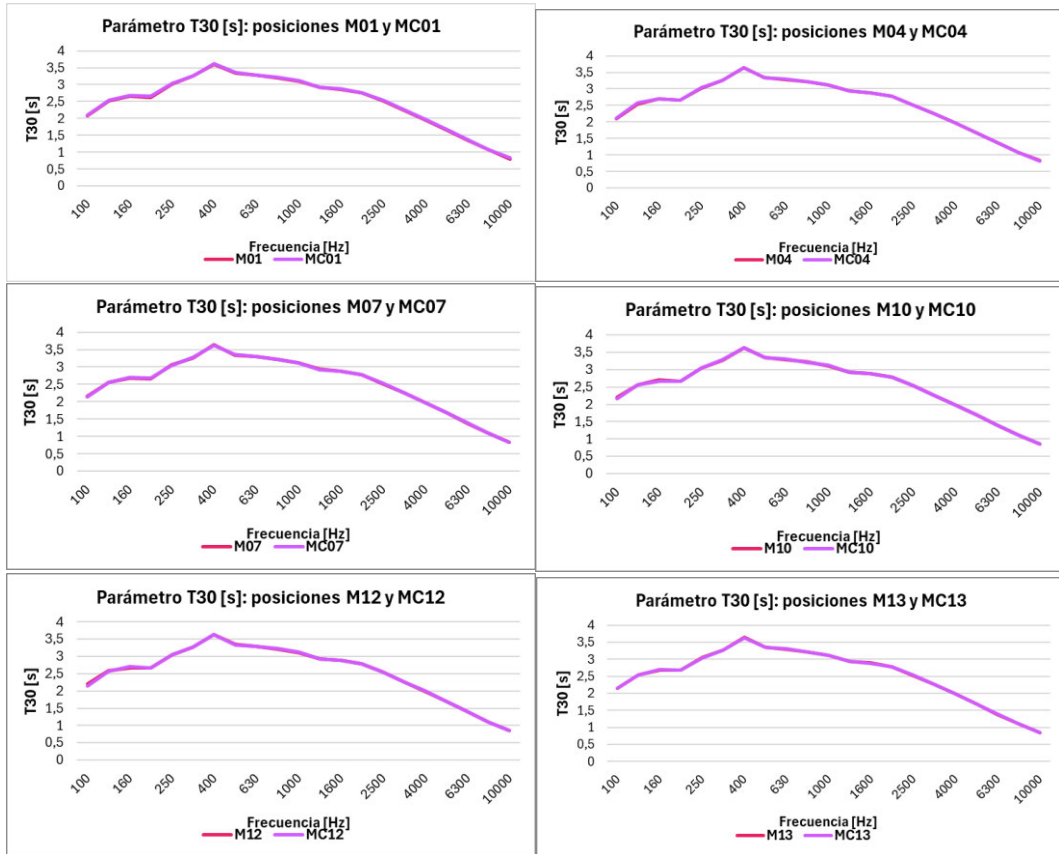


Figura 100. Comparación de los valores simulado en cada par de posiciones del parámetro T<sub>30</sub>.

En la figura 100, se puede ver que para este parámetro T<sub>30</sub>, las parejas de micrófonos son completamente simétricas.

Para esclarecer cuanta es la distancia entre los valores, se les ha aplicado la métrica JND a cada paraje de posiciones tanto a los datos medidos como a los simulados. Esto ayuda a determinar de forma objetiva la similitud entre los puntos simétricos.

Tabla 40. Comparación de los escalones JND de los valores medidos (izquierda) y simulados (derecha) del parámetro C<sub>50</sub>.

C50 [dB] - Medidas in situ							C50 [dB] - Simulación AURA						
Frecuencia	M01-MC01	M04-MC04	M07-MC07	M10-MC10	M12-MC12	M13-MC13	Frecuencia [Hz]	M01-MC01	M04-MC04	M07-MC07	M10-MC10	M12-MC12	M13-MC13
100	2	1	6	4	5	2	100	4	1	2	1	2	2
125	1	2	3	3	2	3	125	4	1	2	1	2	2
160	3	1	2	3	3	4	160	4	1	2	1	2	2
200	5	1	2	1	4	1	200	4	1	2	1	2	2
250	3	1	1	1	3	1	250	4	1	2	1	2	2
315	3	1	5	2	2	2	315	4	1	2	1	2	2
400	6	1	1	2	1	1	400	4	1	2	1	2	2
500	6	1	2	1	2	3	500	4	1	2	1	2	2
630	5	1	2	1	2	2	630	4	1	2	1	2	2
800	1	1	1	1	3	3	800	4	1	2	1	2	2
1000	3	1	1	1	3	2	1000	4	1	2	1	2	2
1250	3	1	2	1	2	2	1250	4	1	2	1	2	2
1600	4	1	2	1	1	1	1600	4	1	2	1	2	2
2000	3	1	2	1	1	1	2000	4	1	2	1	1	2
2500	4	1	3	1	1	2	2500	4	1	2	1	2	2
3150	3	1	2	1	1	1	3150	4	1	2	1	2	2
4000	4	1	1	1	1	1	4000	4	1	2	1	2	2
5000	4	1	2	1	1	1	5000	4	1	2	1	2	2
6300	3	1	2	1	1	1	6300	4	1	2	1	2	2
8000	4	1	2	1	1	1	8000	4	1	2	1	2	2
10000	3	1	1	1	1	2	10000	4	1	2	1	1	2

**Tabla 41. Comparación de los escalones JND de los valores medidos (izquierda) y simulados (derecha) del parámetro LF.**

LF [-] - Medidas in situ						LF [-] - Simulación AURA							
Frecuencia	M01-MC01	M04-MC04	M07-MC07	M10-MC10	M12-MC12	M13-MC13	Frecuencia [Hz]	M01-MC01	M04-MC04	M07-MC07	M10-MC10	M12-MC12	M13-MC13
100	1	1	1	1	1	1	100	1	3	2	1	1	1
125	1	1	1	1	1	1	125	1	3	1	1	1	1
160	1	1	1	1	1	1	160	1	3	1	1	1	1
200	1	1	1	1	1	1	200	1	3	2	1	1	1
250	1	1	1	1	1	1	250	1	3	1	1	1	1
315	1	1	2	1	1	1	315	1	3	1	1	1	1
400	1	1	1	1	1	1	400	1	3	1	1	1	1
500	1	1	1	1	1	1	500	1	3	1	1	1	1
630	1	1	1	1	1	1	630	1	3	1	1	1	1
800	1	1	1	1	1	1	800	1	3	1	1	1	1
1000	1	1	2	1	1	1	1000	1	3	1	1	1	1
1250	1	1	1	1	1	1	1250	1	3	1	1	1	1
1600	1	1	2	1	1	1	1600	1	3	1	1	1	1
2000	1	1	2	1	1	1	2000	1	3	1	1	1	1
2500	2	1	2	1	1	1	2500	1	3	1	1	1	1
3150	3	1	1	1	1	1	3150	1	3	1	1	1	1
4000	1	1	1	1	1	1	4000	1	3	1	1	1	1
5000	1	1	1	1	1	1	5000	1	3	1	1	1	1
6300	1	1	1	1	1	1	6300	1	3	1	1	1	1
8000	1	1	1	1	1	1	8000	1	3	1	1	1	1
10000	1	2	1	1	1	1	10000	1	3	1	1	1	1

**Tabla 42. Comparación de los escalones JND de los valores medidos (izquierda) y simulados (derecha) del parámetro T30.**

T30 [s] - Medidas in situ						T30 [s] - Simulación AURA							
Frecuencia	M01-MC01	M04-MC04	M07-MC07	M10-MC10	M12-MC12	M13-MC13	Frecuencia [Hz]	M01-MC01	M04-MC04	M07-MC07	M10-MC10	M12-MC12	M13-MC13
100	2	2	3	1	3	1	100	1	1	1	1	1	1
125	2	1	1	1	1	1	125	1	1	1	1	1	1
160	1	1	2	1	1	1	160	1	1	1	1	1	1
200	1	3	2	1	3	1	200	1	1	1	1	1	1
250	2	1	2	2	1	1	250	1	1	1	1	1	1
315	1	1	1	1	1	2	315	1	1	1	1	1	1
400	1	1	1	1	1	1	400	1	1	1	1	1	1
500	1	1	1	1	1	1	500	1	1	1	1	1	1
630	1	1	1	1	1	1	630	1	1	1	1	1	1
800	1	1	1	1	1	1	800	1	1	1	1	1	1
1000	1	1	1	1	1	1	1000	1	1	1	1	1	1
1250	1	1	1	1	1	1	1250	1	1	1	1	1	1
1600	1	1	1	1	1	1	1600	1	1	1	1	1	1
2000	1	1	1	1	1	1	2000	1	1	1	1	1	1
2500	1	1	1	1	1	1	2500	1	1	1	1	1	1
3150	2	1	1	1	1	1	3150	1	1	1	1	1	1
4000	4	1	1	1	1	1	4000	1	1	1	1	1	1
5000	1	1	1	1	1	1	5000	1	1	1	1	1	1
6300	1	1	1	1	1	1	6300	1	1	1	1	1	1
8000	1	1	1	1	1	1	8000	1	1	1	1	1	1
10000	8	1	1	1	1	2	10000	1	1	1	1	1	1

En las tablas 40, 41 y 42, el parámetro que más similitud tiene entre las posiciones simétricas, tanto en las medidas in situ como en las simulaciones, es T<sub>30</sub>. El parámetro C<sub>50</sub> hay más discrepancia entre las posiciones de micrófono, sin embargo, sí que hay una semejanza entre los valores medidos y simulados. Por el contrario, el parámetro LFC en la simulación da una simetría muy buena, pero en las mediciones empeora un poco. Aun así, se puede validar la suposición de que el Aula Magna es simétrica.

## 10. Presupuesto

Este proyecto de fin de grado es la culminación del plan de estudios del Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen de la Universidad Politécnica de Madrid, por lo que el presupuesto que se ha estimado sigue el modelo establecido por el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación (COITT).

En la siguiente tabla, se muestra el presupuesto desglosado basado en el tiempo que se invirtió en cada fase del proyecto. No obstante, el coste real del proyecto es inferior al que indica la tabla ya que la instrumentación y las licencias fueron proporcionadas por la propia Escuela y no se ha tenido en cuenta la mano de obra.

**Tabla 43. Presupuesto del Proyecto.**

Concepto	Descripción	Cantidad	Unidad	Person	Importe / Unid	IMPORTE
Herramientas	Alquiler de todas las herramientas e instrumentos: Fuente, micrófonos, cableados, tarjeta de sonido etc.	1	días	-	-	600,00 €
Software	Licencia de DIRAC 6.0	1	-	-	-	600,00 €
	Lincencia de EASE.4.4	1	-	-	-	300,00 €
Desplazamiento	Coste del desplazamiento en coche	1	-	-	-	65,00 €
Mano de obra	Obtención de documentación y estudio previo	10	horas	1	15,00 €	150,00 €
	Toma de medidas In-Situ	9	horas	3	15,00 €	405,00 €
	Procesado de medidas In-Situ	40	horas	1	15,00 €	600,00 €
	Creación del modelo geométrico.	40	horas	1	15,00 €	600,00 €
	Exportación a EASE y ajuste de materiales	60	horas	1	15,00 €	900,00 €
	Procesado de datos simulados en EASE	60	horas	1	15,00 €	900,00 €
	Validación del modelo	50	horas	1	15,00 €	750,00 €
	Redacción de la memoria	50	horas	1	15,00 €	750,00 €
<b>HORAS TOTALES</b>		<b>319,00 €</b>	<b>horas</b>	<b>IMPORTE TOTAL</b>		<b>6.620,00 €</b>



## **11. Impacto del proyecto**

Un buen estudio acústico puede influir significativamente en la calidad de la vida de las personas, ya que contribuye a mejorar su salud, bienestar, productividad y disfrute de los diferentes espacios cotidianos, ya sean de uso residencial, laboral o recreativo. Entornos con un buen estudio acústico atenúan el ruido no deseado, ayudan a reducir los niveles de estrés y ansiedad o aseguran una óptima experiencia auditiva para el público en recintos como aulas magnas. Aunque lo anterior pueda pasar inadvertido, su impacto en los ámbitos social, de la salud, ambiental, económico y tecnológico es significativo.

Asimismo, las consecuencias de este proyecto se pueden estar vinculadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Los ODS son un llamamiento universal a la acción global para hacer frente a retos relacionados con la salud, el bienestar, la educación, la igualdad y la sostenibilidad ambiental. Garantizar una buena acústica puede tener un papel crítico en algunos de los objetivos, ya sea de manera directa o indirecta:

- Un acondicionamiento acústico adecuado en las salas puede intervenir sustancialmente a la salud y el bienestar de las personas que las utilizan. La exposición continua al ruido excesivo puede provocar estrés, fatiga y otros problemas de salud. Optimizar la acústica puede mitigar estos efectos perjudiciales y favorecer un entorno más saludable. Estos aspectos se pueden relacionar con el ODS 3 **Salud y Bienestar** [13].
- Desde el punto de vista social, está la posibilidad de crear una auralización de la sala, es decir, una simulación en la cual se pueda experimentar la sensación de escucha en el interior de una sala. Esto ofrece una experiencia inmersiva mediante el uso de auriculares junto con imágenes 360° de la sala y facilita la posibilidad de la participación en remoto para aquellos que no puedan estar físicamente al recinto. Esto se vincula con los ODS 4 **Educación de Calidad** [14] y 9 **Industria, Innovación e Infraestructura** [15].
- Al tener la posibilidad de poder ajustar virtualmente la configuración de la sala, se evita la necesidad de desplazamientos para realizar campañas de mediciones, lo que supone un gran ahorro de tiempo, dinero y emisiones causadas al transporte. Esto último impacta positivamente en la reducción de la huella de carbono. Este enfoque se relaciona con los ODS 8 **Trabajo Decente y Crecimiento Económico** [16], y 11 **Ciudades y Comunidades Sostenibles** [17].

En el caso de ser necesario una modificación los materiales de la sala, el modelo virtual 3D permite evaluar previamente como afectaría ese cambio de los nuevos materiales en el comportamiento acústico y seleccionar los materiales más sostenibles para así contribuir más con el ODS 11 de *Ciudades y Comunidades Sostenibles*.

- Para abordar los retos relacionados con la acústica de las salas es clave la colaboración entre distintos sectores como la arquitectura, la ingeniería y la salud, lo que corresponde con el ODS 17 **Alianzas para lograr los Objetivos** [18].

Todos los datos generados y analizados en este proyecto se incorporarán a la base de datos del grupo de investigación *GAMMA*, que recopila datos e información de varios recintos y teatros en España. A futuro, este repositorio permitirá acceder a la información sobre la acústica de cada sala sin necesidad de realizar desplazamientos físicos y ahorrando un gran tiempo.

## **12. Conclusiones**

Como se ha podido ver a lo largo de esta memoria, se ha explicado el desarrollo de un estudio acústico del Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid, satisfaciendo el cumplimiento del objetivo principal de este proyecto, el cual era el diseño y la validación de un modelo geométrico para el estudio acústico del Aula Magna.

Para realizar este proyecto, la metodología que se ha empleado se puede dividir en tres fases principales. En primer lugar, se realizó una serie de mediciones acústicas in situ cumpliendo con la norma UNE-EN ISO 3382-1:2009. En estas medidas se adquirieron los valores de los parámetros acústicos necesarios para el estudio y se procesaron. En segundo lugar, se llevó a cabo el diseño en 3D del modelo simplificado del aula mediante el software SketchUp, teniendo de referencia planos, medidas y fotografías. En tercer y último lugar, se importó este modelo al software de simulación acústica EASE. Con este programa se realizaron las simulaciones y se pudo validar del modelo geométrico mediante la comparación de los valores medidos in situ con los datos simulados, implementando la métrica JND.

Para que el modelo fuera lo más fiel posible a la realidad, se fueron cambiando los materiales asociados a las caras del modelo hasta conseguir que esa combinación de materiales pudiera ofrecer el mismo comportamiento acústico que el real. Aunque no se consiguió que fuera exactamente igual, para la mayoría de los parámetros acústicos se confirmó que gran parte de sus valores se sitúan entre los escalones 1 y 4 de la métrica JND, con un 95%. Esto indica que la diferencia es poco perceptible para el oyente y valida con precisión el modelo, demostrando que los procedimientos empleados para realizar la simulación acústica y la validación de esta son eficaces.

Otro punto más sobre los parámetros acústicos es que los parámetros espaciales, LF y LFC, son los más complejos de replicar ya que tienen una naturaleza aleatoria y se necesitaría adaptar el modelo dinámicamente para ese comportamiento inesperado. En los parámetros energéticos, el que peor resultado ha dado fue el parámetro sobre la Claridad de la voz,  $D_{50}$ , acorde con lo que pasaba en realidad en el Aula Magna. Si se habla desde el escenario y estabas ubicado en la planta 1, era complicado entender todo el mensaje con nitidez. Por otro lado, en los parámetros temporales se ha obtenido una mayor precisión que en el resto. En general, el aula tiene una buena acústica a medias y altas frecuencias.

Además, se verificó la suposición de que el Aula Magna era un recinto simétrico a través del análisis y comparación de tres parámetros acústicos,  $C_{50}$ , LF y  $T_{30}$ , en posiciones simétricas, tanto con valores medidos como simulados, viéndose que la coincidencia era notable y que la hipótesis era cierta.

En este proyecto se ha utilizado una metodología en escala que puede replicarse para utilizada en otros proyectos y entornos acústicos. Esto hace posible que se pueda ampliar la base de datos del grupo GAMMA. Este proyecto se incorporará a ella, ayudando al avance de futuras nuevas tecnologías relacionadas con el campo de la Acústica.

A nivel personal, este proyecto me ha permitido darme cuenta de todo lo que he aprendido durante el grado y también todo el trabajo que realmente hay. He podido aprender a cómo gestionar una campaña de mediciones, cuadrando la fecha y los técnicos, aprendiendo a usar el equipo y el procedimiento a seguir, estudiando la norma para cumplirla, entre otras cosas. También, como había otros alumnos realizando proyectos parecidos, he podido ir a otros recintos a ayudar con las mediciones. Otra cosa que, para mí, era nueva fue el procesado de los datos de una manera más profesional. Durante la carrera, no se profundiza tanto en este aspecto y me ha resultado muy curioso. También he aprendido a utilizar el software SketchUp y a profundizar en el manejo de EASE. Nunca había utilizado un software de modelado y me ha resultado muy interesante y usarlo junto a EASE y aprender a resolver los problemas de incompatibilidad entre los programas y conseguirlo ha sido muy gratificante. En general, hacer este proyecto me ha hecho darme cuenta de que este campo ha despertado mi curiosidad y es la línea que quiero que siga mi futuro laboral.

## 13. Referencias

- [1] Wikipedia, «Acústica arquitectónica,» [En línea]. Available:[https://es.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%B3stica\\_arquitect%C3%B3nica](https://es.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%B3stica_arquitect%C3%B3nica). [Último acceso: 01 06 2025].
- [2] AENOR, «EN ISO 3382-1 - Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos,» España, Junio 2009.
- [3] J. Sánchez, *"Teoría Estadística", apuntes de la asignatura Acústica Arquitectónica, Departamento de Ingeniería de Audio y Comunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Primavera 2022.*
- [4] J. Sánchez, *"Teoría Geométrica", apuntes de la asignatura Acústica Arquitectónica, Departamento de Ingeniería de Audio y Comunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Primavera 2022.*
- [5] E. N. S. Justiniano, «Arquitectura y Diseño Acústico - Arquinex,» 29 04 2020. [En línea]. Available:<https://enixnicole.wixsite.com/arquinex-bo/post/inteligibilidad-de-la-palabra>. [Último acceso: 11 03 2025].
- [6] Svantek, «Inteligibilidad del habla,» [En línea]. Available:<https://svantek.com/es/academia/inteligibilidad-del-habla/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20escala%20de,1%20en%20forma%20de%20STI>. [Último acceso: 11 03 2025].
- [7] B. & Kjaer, «Software de acústica de salas DIRAC,» [En línea]. Available:<https://www.bksv.com/es/analysis-software/acoustic-analysis-software/room-acoustics-software-dirac>. [Último acceso: 20 03 2025].
- [8] crown,«XLS 2002,» [En línea]. Available: <https://www.crownaudio.com/en/products/xls-2002>. [Último acceso: 20 03 2025].
- [9] AKC, «CK94,» [En línea]. Available:[https://au.ake.com/modular-microphones-components/CK94.html?dwvar\\_CK94\\_color=Grey-GLOBAL-Support](https://au.ake.com/modular-microphones-components/CK94.html?dwvar_CK94_color=Grey-GLOBAL-Support). [Último acceso: 20 03 2025].
- [10] AKG, «SE300B,» [En línea]. Available:<https://au.ake.com/modular-microphones-components/2439X00080.html>. [Último acceso: 21 03 2025].
- [11] AENOR, «UNE-EN 61672-1 Sónómetros Parte 1: Especificaciones,» España, Noviembre 2014.
- [12] AENOR, «UNE-EN IEC 60942 Electroacústica Calibradores acústicos,» España, Febrero 2019.
- [13] ONU, «Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>. [Último acceso: 25 05 2025].

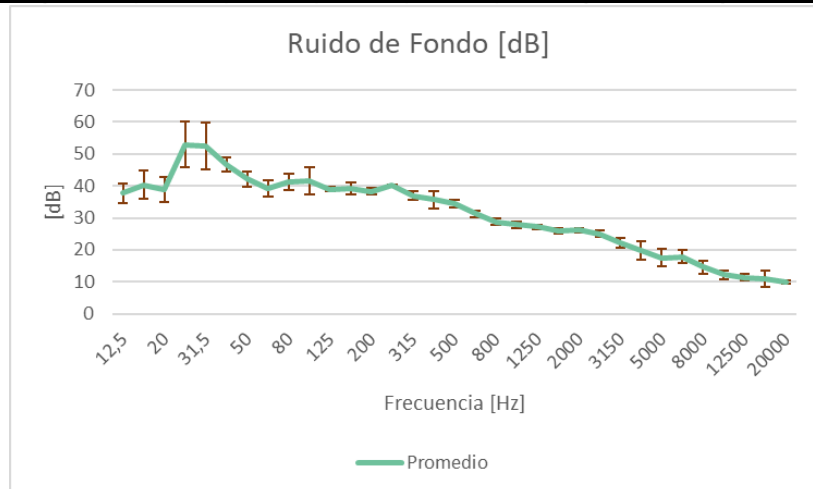
- [14] ONU, «Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/>. [Último acceso: 26 05 2025].
- [15] ONU, «Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>. [Último acceso: 26 05 2025].
- [16] ONU, «Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>. [Último acceso: 26 05 2025].
- [17] ONU, «Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>. [Último acceso: 27 05 2025].
- [18] ONU, «Objetivo 17: Revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/globalpartnerships/>. [Último acceso: 27 05 2025].

## Anexo I: Ruido de Fondo.

En este anexo se recogen los resultados obtenidos de las medidas tomadas del ruido de fondo en distintas posiciones en el Aula Magna. En la siguiente tabla se pueden ver los niveles de presión sonora registrados en cada punto, junto a el promedio por banda de frecuencia y su desviación estándar. Asimismo, en la figura posterior, se muestra la representación gráfica del ruido de fondo, lo que permite ver la forma que tiene.

**Tabla 44. Medidas in situ del ruido de fondo.**

Frec [Hz]	Posiciones de medida - SPL [dB]						Promedio	Desviación típica
	1	2	3	4	5	6		
12,5	39,9	35,2	37,5	42	38,3	33,4	37,72	3,11
16	37,9	42,6	43	43	43,3	32,5	40,38	4,37
20	38,9	38,9	35,4	43	43,3	33,4	38,82	3,97
25	49	63,9	53,1	57,8	49,6	44,2	52,93	7,03
31,5	49,3	54	48,5	66,3	50,9	45,3	52,38	7,39
40	43,5	46,2	47,6	50,1	47,5	45	46,65	2,30
50	43,2	42,2	40,4	43,9	38,6	44,7	42,17	2,29
63	40,6	41	40,2	40,5	34,2	39,2	39,28	2,56
80	41,1	41,5	44	42,7	36,6	41,8	41,28	2,52
100	39,4	47,9	41,5	41,5	35,3	43,6	41,53	4,20
125	39,4	39,9	38,8	38,4	39,4	38,2	39,02	0,66
160	40,8	41,5	37,5	39,6	38,7	37	39,18	1,79
200	37,5	40	37,5	37,9	39	37,9	38,30	1,00
250	39,9	39,5	40,4	40,2	40,6	39,7	40,05	0,42
315	35,5	38,9	38,3	37,2	35,4	36,4	36,95	1,45
400	34,6	34,1	40,7	36,1	33,2	35,1	35,63	2,67
500	34,4	34,7	36,6	34,8	33,7	32,9	34,52	1,24
630	32,4	30,9	31,6	30,6	30	31,9	31,23	0,89
800	30,4	28,8	28,7	28,8	28,4	27,3	28,73	1,00
1000	29,4	28,3	28,2	26,3	27,5	27,4	27,85	1,04
1250	28,5	26,7	26,5	27,6	26,9	26,5	27,12	0,79
1600	27,5	25,1	26,1	26	25,7	25,4	25,97	0,84
2000	27,3	26,1	26,3	26,4	25,5	25,7	26,22	0,63
2500	26,3	25,4	25,5	25,4	24,1	23,6	25,05	1,00
3150	24,4	23,5	22,2	22,2	20,9	20,2	22,23	1,56
4000	23,3	22,5	20,9	19	17,2	16	19,82	2,92
5000	20,7	20,1	18,8	16,4	15,3	14,2	17,58	2,67
6300	20,9	19,1	18,3	16,6	16,7	15,4	17,83	2,00
8000	17,2	16,8	14	14	13,7	11,5	14,53	2,13
10000	14,2	13,5	11,1	12,3	11,4	10,8	12,22	1,38
12500	12,5	12,4	10,6	10,6	10,2	12,1	11,40	1,04
16000	11	10,5	9,5	10	9,4	16,1	11,08	2,53
20000	9,6	9,8	9,5	10,4	9,5	10,7	9,92	0,51



**Figura 101. Ruido de fondo del Aula Magna.**



## **Anexo II: Estudio acústico del Aula Magna en octavas.**

En este anexo se exponen los datos recogidos en bandas de octava de las mediciones in situ en el Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Complutense de Madrid. Estos resultados son entregados a la propia facultad.

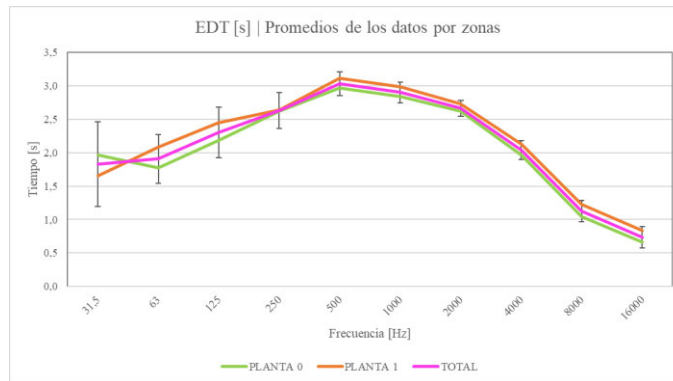
Se presentan los valores promedio en bruto por zonas y el total junto con su desviación estándar de cada parámetro acústico. Adicionalmente, se incluye las representaciones graficas para visualizar los datos y contrastarlos de manera más rápida y clara.

**Parámetros temporales**

**EDT [s]:**

**Tabla 45. Promedio por zonas y total del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava.**

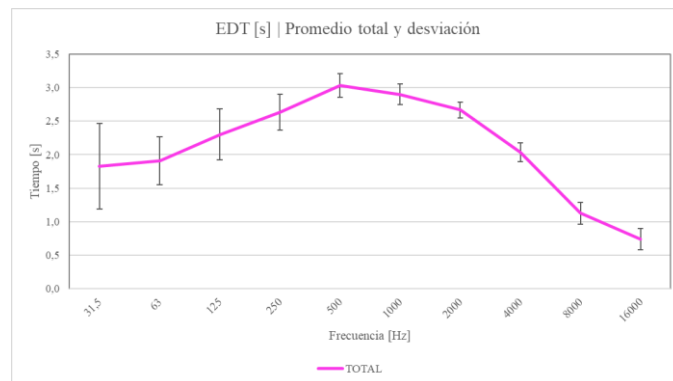
EDT [s]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [s]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	1,96	1,65	1,83
63	1,77	2,08	1,91
125	2,19	2,45	2,30
250	2,63	2,64	2,63
500	2,97	3,12	3,03
1000	2,84	2,98	2,90
2000	2,62	2,73	2,67
4000	1,96	2,13	2,04
8000	1,05	1,22	1,13
16000	0,66	0,83	0,74



**Figura 102. Promedio total y por zonas del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava.**

**Tabla 46. Promedio y desviación total del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava.**

EDT [s]		
Frecuencias [Hz]	Promedio total [s]	Desviación total [s]
31,5	1,83	0,64
63	1,91	0,36
125	2,30	0,38
250	2,63	0,27
500	3,03	0,18
1000	2,90	0,16
2000	2,67	0,12
4000	2,04	0,14
8000	1,13	0,16
16000	0,74	0,16

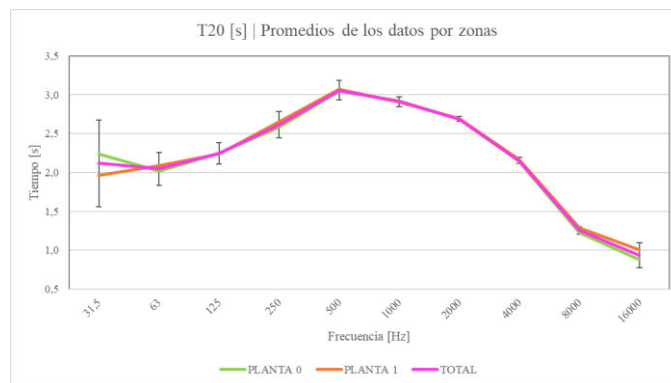


**Figura 103. Promedio y desviación total del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava.**

**T20 [s]:**

**Tabla 47. Promedio por zonas y total del parámetro T20 [s] medido in situ en bandas de octava.**

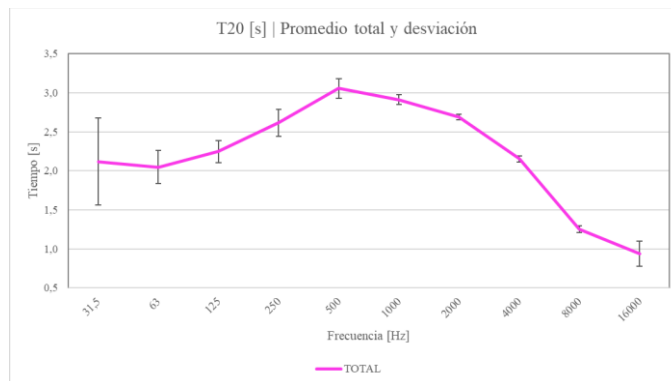
T20 [s]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [s]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	2,24	1,96	2,12
63	2,01	2,09	2,05
125	2,25	2,24	2,25
250	2,58	2,65	2,61
500	3,05	3,07	3,06
1000	2,92	2,90	2,91
2000	2,69	2,69	2,69
4000	2,14	2,17	2,15
8000	1,23	1,28	1,25
16000	0,88	1,01	0,93



**Figura 104. Promedio total y por zonas del parámetro EDT [s] medido in situ en bandas de octava.**

**Tabla 48. Promedio y desviación total del parámetro T20 [s] medido in situ en bandas de octava.**

T20 [s]		
Frecuencias [Hz]	Promedio total [s]	Desviación total [s]
31,5	2,12	0,56
63	2,05	0,21
125	2,25	0,14
250	2,61	0,17
500	3,06	0,12
1000	2,91	0,06
2000	2,69	0,03
4000	2,15	0,04
8000	1,25	0,04
16000	0,93	0,16

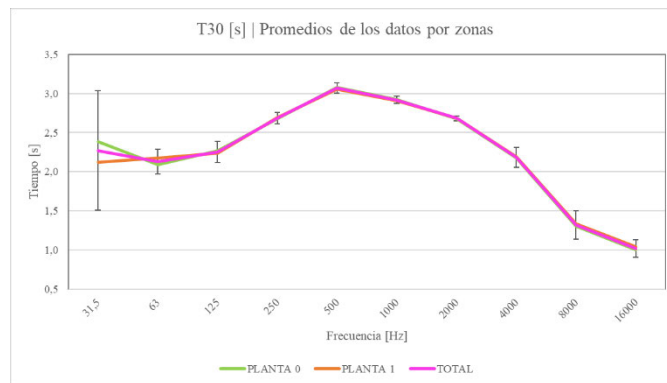


**Figura 105. Promedio y desviación total del parámetro T20 [s] medido in situ en bandas de octava.**

**T30 [s]:**

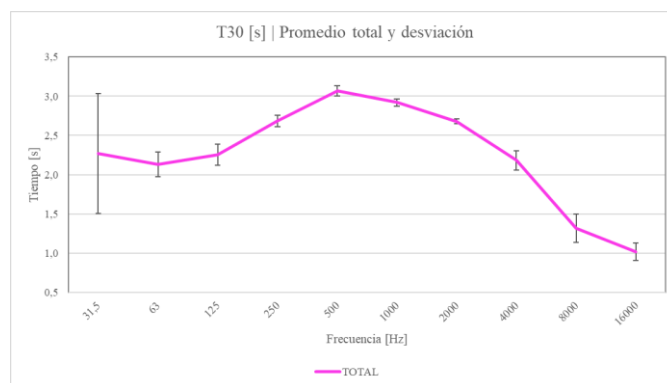
**Tabla 49. Promedio por zonas y total del parámetro T30 [s] medido in situ en bandas de octava.**

T30 [s]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [s]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	2,38	2,12	2,27
63	2,09	2,18	2,13
125	2,27	2,24	2,25
250	2,67	2,69	2,68
500	3,08	3,05	3,07
1000	2,93	2,91	2,92
2000	2,68	2,69	2,68
4000	2,18	2,19	2,18
8000	1,30	1,34	1,32
16000	1,00	1,04	1,02



**Tabla 50. Promedio y desviación total del parámetro T30 [s] medido in situ en bandas de octava.**

T30 [s]		
Frecuencias [Hz]	Promedio total [s]	Desviación total [s]
31,5	2,27	0,76
63	2,13	0,16
125	2,25	0,14
250	2,68	0,07
500	3,07	0,07
1000	2,92	0,05
2000	2,68	0,03
4000	2,18	0,12
8000	1,32	0,18
16000	1,02	0,11

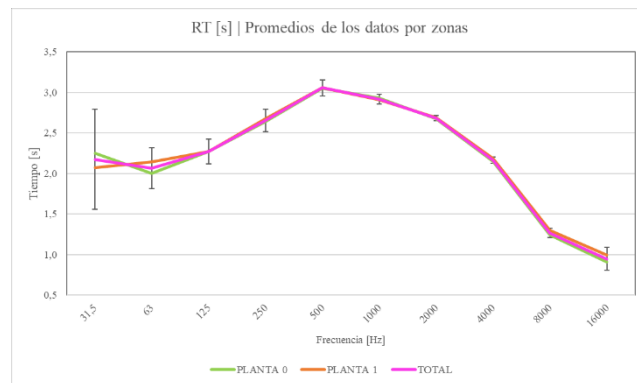


**Figura 106. Promedio y desviación total del parámetro T30 [s] medido in situ en bandas de octava.**

**RT [s]:**

**Tabla 51. Promedio por zonas y total del parámetro RT [s] medido in situ en bandas de octava.**

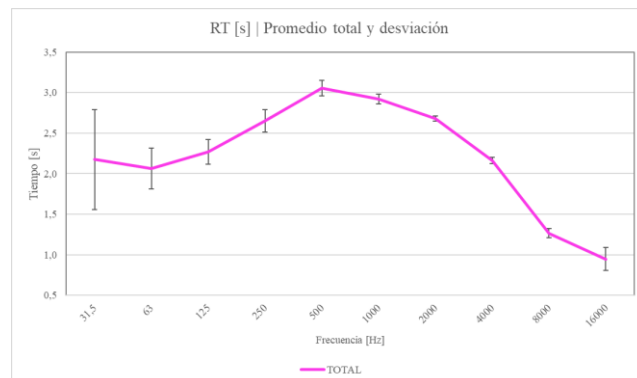
RT [s]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [s]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	2,25	2,07	2,17
63	2,00	2,14	2,06
125	2,27	2,27	2,27
250	2,64	2,67	2,65
500	3,05	3,06	3,05
1000	2,93	2,91	2,92
2000	2,68	2,69	2,68
4000	2,15	2,19	2,16
8000	1,24	1,30	1,27
16000	0,91	0,99	0,95



**Figura 107. Promedio total y por zonas del parámetro RT [s] medido in situ en bandas de octava.**

**Tabla 52. Promedio y desviación total del parámetro RT [s] medido in situ en bandas de octava.**

RT [s]		
Frecuencias [Hz]	Promedio total [s]	Desviación total [s]
31,5	2,17	0,62
63	2,06	0,25
125	2,27	0,15
250	2,65	0,14
500	3,05	0,10
1000	2,92	0,06
2000	2,68	0,03
4000	2,16	0,04
8000	1,27	0,06
16000	0,95	0,14



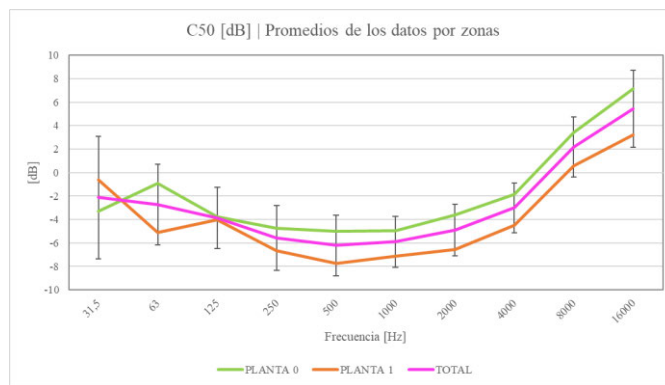
**Figura 108. Promedio y desviación total del parámetro RT [s] medido in situ en bandas de octava.**

**Parámetros energéticos**

**C50 [dB]:**

**Tabla 53. Promedio por zonas y total del parámetro C50 [dB] medido in situ en bandas de octava.**

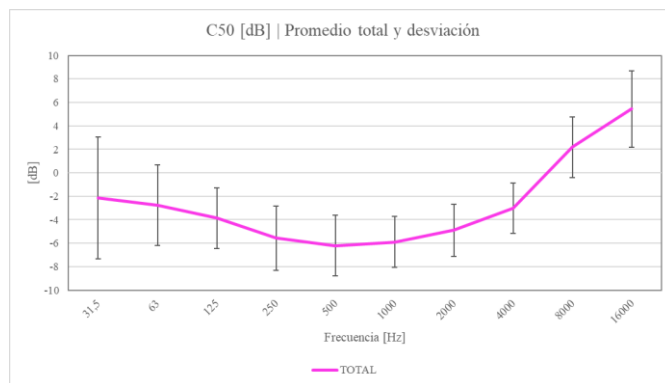
Frecuencias [Hz]	C50 [dB]		
	Promedio [dB]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	-3,29	-0,62	-2,13
63	-0,92	-5,12	-2,74
125	-3,76	-4,02	-3,87
250	-4,73	-6,66	-5,57
500	-5,02	-7,76	-6,21
1000	-4,95	-7,13	-5,90
2000	-3,61	-6,57	-4,90
4000	-1,86	-4,50	-3,01
8000	3,42	0,58	2,18
16000	7,15	3,19	5,43



**Figura 109. Promedio total y por zonas del parámetro C50 [dB] medido in situ en bandas de octava.**

**Tabla 54. Promedio y desviación total del parámetro C50 [dB] medido in situ en bandas de octava.**

Frecuencias [Hz]	C50 [dB]	
	Promedio total [dB]	Desviación total [dB]
31,5	-2,13	5,20
63	-2,74	3,43
125	-3,87	2,59
250	-5,57	2,75
500	-6,21	2,58
1000	-5,90	2,17
2000	-4,90	2,22
4000	-3,01	2,14
8000	2,18	2,58
16000	5,43	3,27

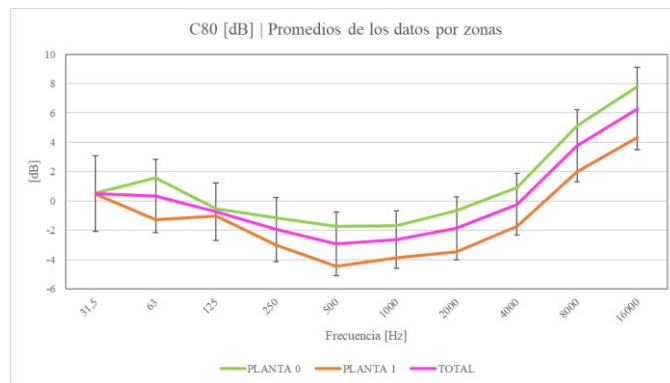


**Figura 110. Promedio y desviación total del parámetro C50 [dB] medido in situ en bandas de octava.**

**C80**

**Tabla 55. Promedio por zonas y total del parámetro C80 [dB] medido in situ en bandas de octava.**

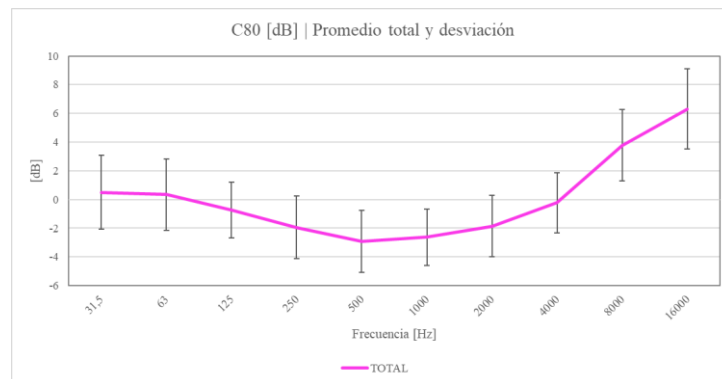
C80 [dB]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [dB]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	0,54	0,44	0,50
63	1,58	-1,28	0,33
125	-0,52	-1,02	-0,73
250	-1,14	-3,00	-1,95
500	-1,74	-4,45	-2,92
1000	-1,67	-3,87	-2,63
2000	-0,64	-3,47	-1,87
4000	0,93	-1,71	-0,22
8000	5,14	2,00	3,77
16000	7,82	4,33	6,30



**Figura 111. Promedio total y por zonas del parámetro C80 [dB] medido in situ en bandas de octava.**

**Tabla 56. Promedio y desviación total del parámetro C80 [dB] medido in situ en bandas de octava.**

C80 [dB]		
Frecuencias [Hz]	Promedio total [dB]	Desviación total [dB]
31,5	0,50	2,57
63	0,33	2,50
125	-0,73	1,96
250	-1,95	2,19
500	-2,92	2,15
1000	-2,63	1,97
2000	-1,87	2,14
4000	-0,22	2,09
8000	3,77	2,47
16000	6,30	2,80

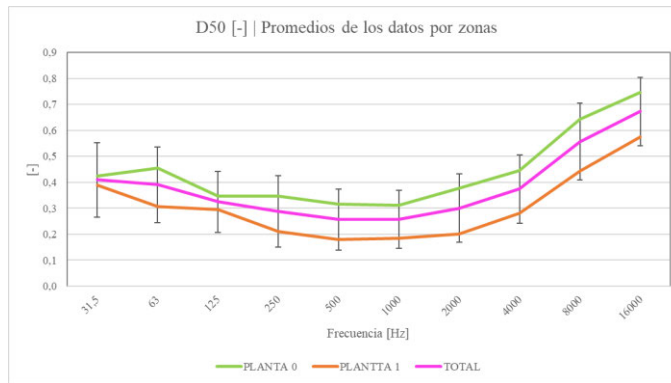


**Figura 112. Promedio y desviación total del parámetro C80 [dB] medido in situ en bandas de octava.**

**D50 [-]:**

**Tabla 57. Promedio por zonas y total del parámetro D50 [-] medido in situ en bandas de octava.**

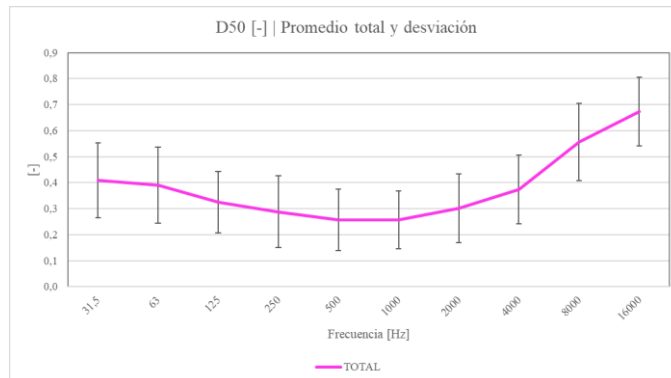
D50 [-]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [-]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	0,43	0,39	0,41
63	0,45	0,31	0,39
125	0,35	0,29	0,32
250	0,35	0,21	0,29
500	0,32	0,18	0,26
1000	0,31	0,19	0,26
2000	0,38	0,20	0,30
4000	0,45	0,28	0,37
8000	0,64	0,44	0,56
16000	0,75	0,58	0,67



**Figura 113. Promedio total y por zonas del parámetro D50 [-] medido in situ en bandas de octava.**

**Tabla 58. Promedio y desviación total del parámetro D50 [-] medido in situ en bandas de octava.**

D50 [-]		
Frecuencias [Hz]	Promedio total [-]	Desviación total [-]
31,5	0,41	0,14
63	0,39	0,15
125	0,32	0,12
250	0,29	0,14
500	0,26	0,12
1000	0,26	0,11
2000	0,30	0,13
4000	0,37	0,13
8000	0,56	0,15
16000	0,67	0,13

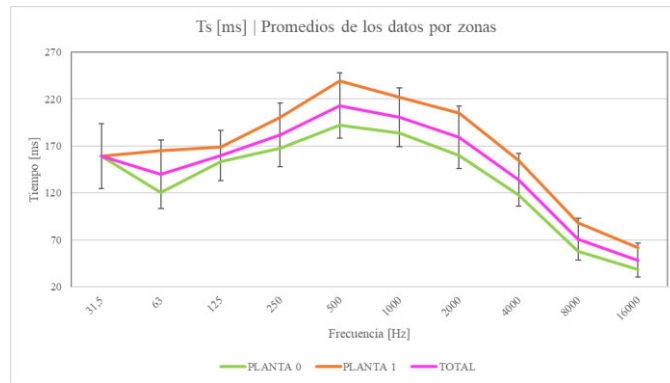


**Figura 114. Promedio y desviación total del parámetro D50 [-] medido in situ en bandas de octava.**

**Ts [ms]:**

**Tabla 59. Promedio por zonas y total del parámetro Ts [ms] medido in situ en bandas de octava.**

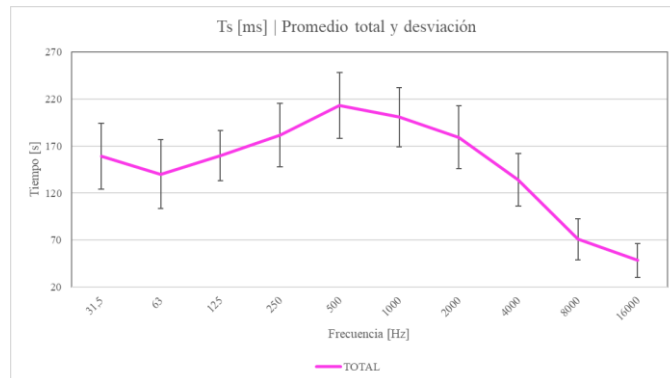
Frecuencias [Hz]	Ts [ms]		
	Promedio [ms]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	158,98	159,48	159,19
63	120,71	165,35	140,12
125	153,20	168,84	160,00
250	167,50	200,57	181,88
500	192,49	239,51	212,93
1000	184,12	222,02	200,60
2000	159,66	204,84	179,30
4000	117,88	155,07	134,05
8000	57,70	88,11	70,92
16000	38,43	61,67	48,53



**Figura 115. Promedio total y por zonas del parámetro Ts [ms] medido in situ en bandas de octava.**

**Tabla 60. Promedio y desviación total del parámetro Ts [ms] medido in situ en bandas de octava.**

Frecuencias [Hz]	Ts [ms]	
	Promedio total [ms]	Desviación total [ms]
31,5	159,19	34,76
63	140,12	36,45
125	160,00	26,79
250	181,88	33,73
500	212,93	34,91
1000	200,60	31,47
2000	179,30	33,39
4000	134,05	28,16
8000	70,92	22,05
16000	48,53	18,05



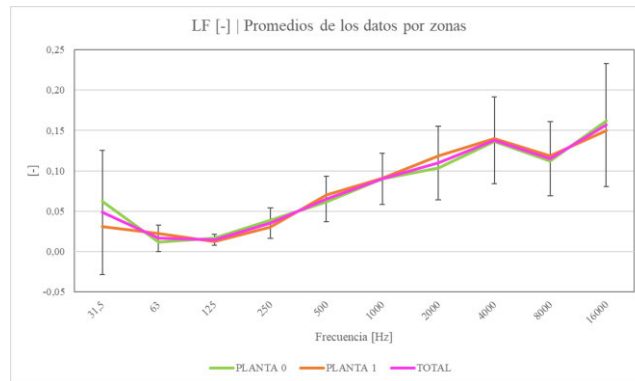
**Figura 116. Promedio y desviación total del parámetro Ts [ms] medido in situ en bandas de octava.**

**Parámetros espaciales**

**LF [-]:**

**Tabla 61. Promedio por zonas y total del parámetro LF [-] medido in situ en bandas de octava.**

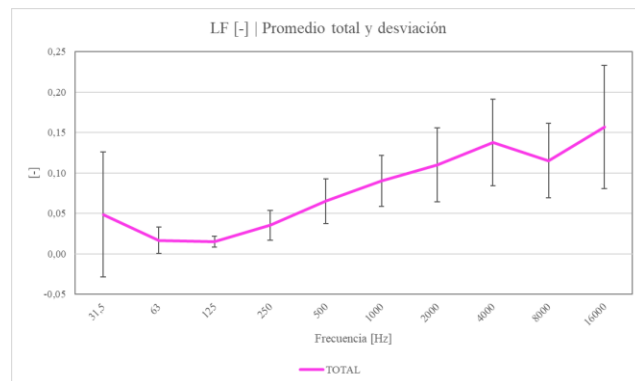
LF [-]			
Frecuencias [Hz]	Promedio [-]		
	Planta 0	Planta 1	Total
31,5	0,06	0,03	0,05
63	0,01	0,02	0,02
125	0,02	0,01	0,01
250	0,04	0,03	0,04
500	0,06	0,07	0,07
1000	0,09	0,09	0,09
2000	0,10	0,12	0,11
4000	0,14	0,14	0,14
8000	0,11	0,12	0,12
16000	0,16	0,15	0,16



**Figura 117. Promedio total y por zonas del parámetro LF [-] medido in situ en bandas de octava.**

**Tabla 62. Promedio y desviación total del parámetro LF [-] medido in situ en bandas de octava.**

LF [-]		
Frecuencias [Hz]	Promedio total [-]	Desviación total [-]
31,5	0,05	0,08
63	0,02	0,02
125	0,01	0,01
250	0,04	0,02
500	0,07	0,03
1000	0,09	0,03
2000	0,11	0,05
4000	0,14	0,05
8000	0,12	0,05
16000	0,16	0,08



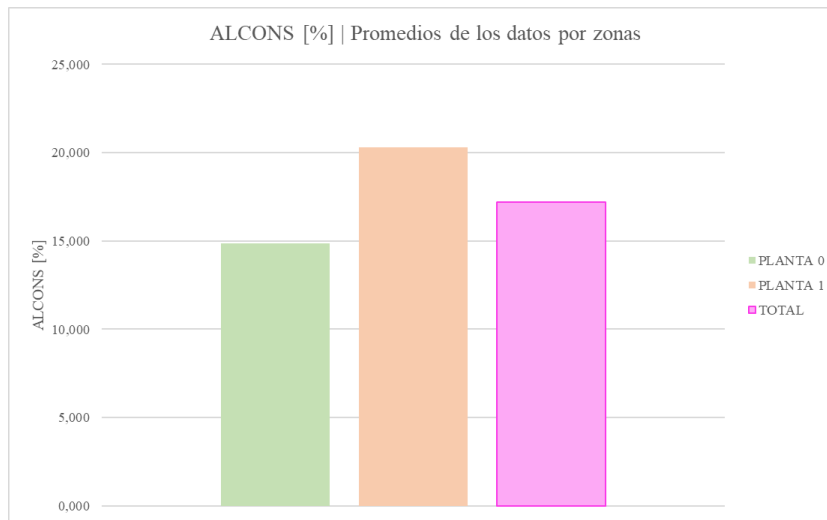
**Figura 118. Promedio y desviación total del parámetro LF [-] medido in situ en bandas de octava.**

## Parámetros de inteligibilidad

### Alcons [%]:

**Tabla 63. Promedio por zonas y total del parámetro Alcons [%] medido in situ en bandas de octava.**

Alcons [%]			
Frecuencias (Hz)	Promedio [%]		
	Planta 0	Planta 1	Total
-	14,86	20,29	17,22

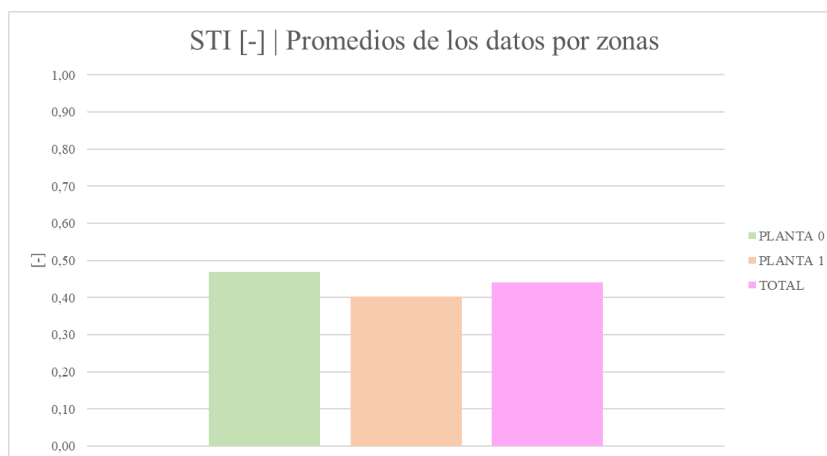


**Figura 119. Promedio total y por zonas del parámetro Alcons [%] medido in situ en bandas de octava.**

### STI

**Tabla 64. Promedio por zonas y total del parámetro STI [-] medido in situ en bandas de octava.**

STI [-]			
Frecuencias (Hz)	Promedio [-]		
	Planta 0	Planta 1	Total
-	0,47	0,40	0,44



**Figura 120. Promedio total y por zonas del parámetro STI [-] medido in situ en bandas de octava.**



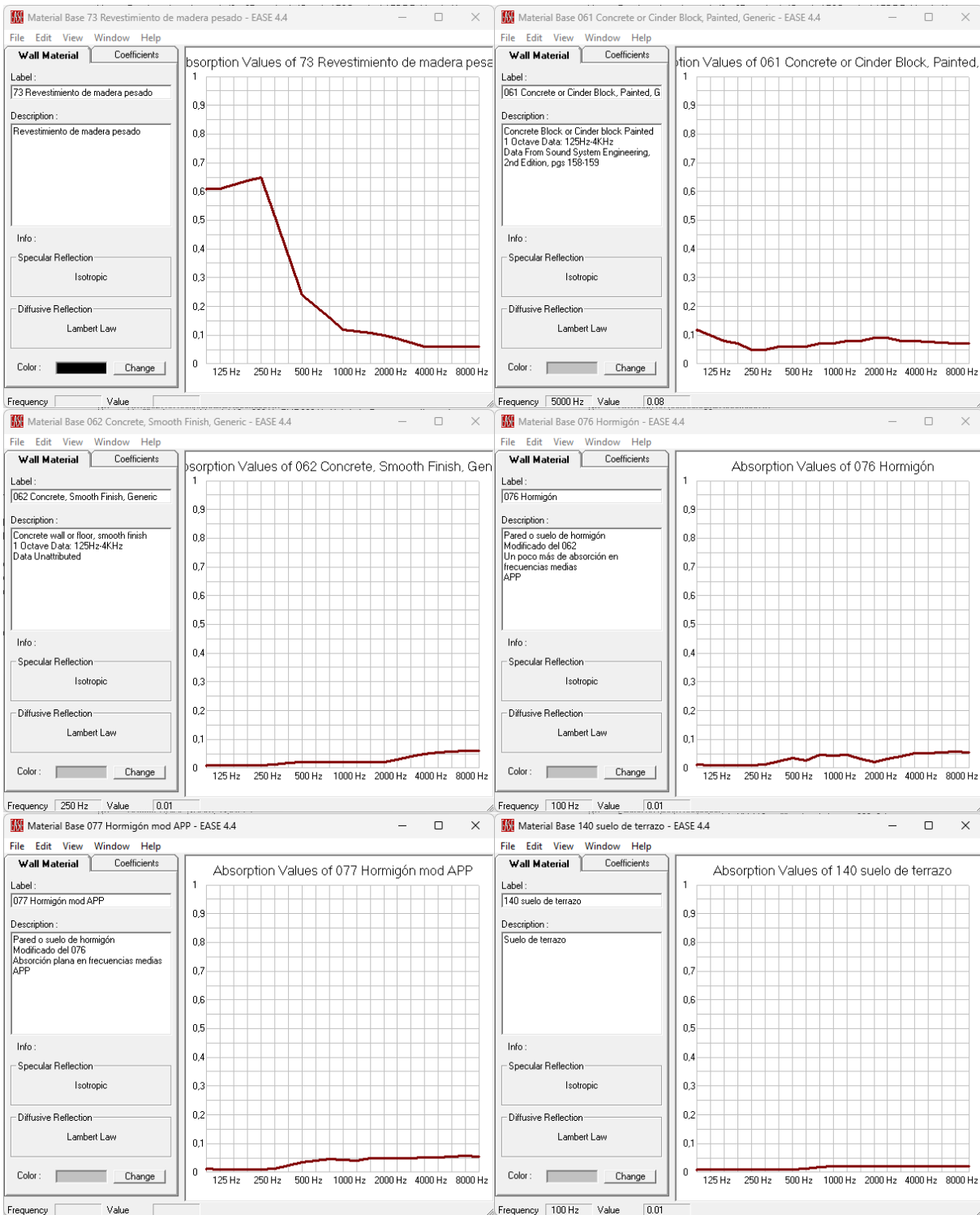
### **Anexo III. Materiales**

En este anexo se presenta la información relevante sobre los materiales asignados en la modificación 3 del modelo geométrico del Aula Magna. Se muestra una tabla en la que se asocian las capas utilizadas en el modelo diseñado en SketchUp, junto el elemento que representan, con el material que se eligió en EASE.

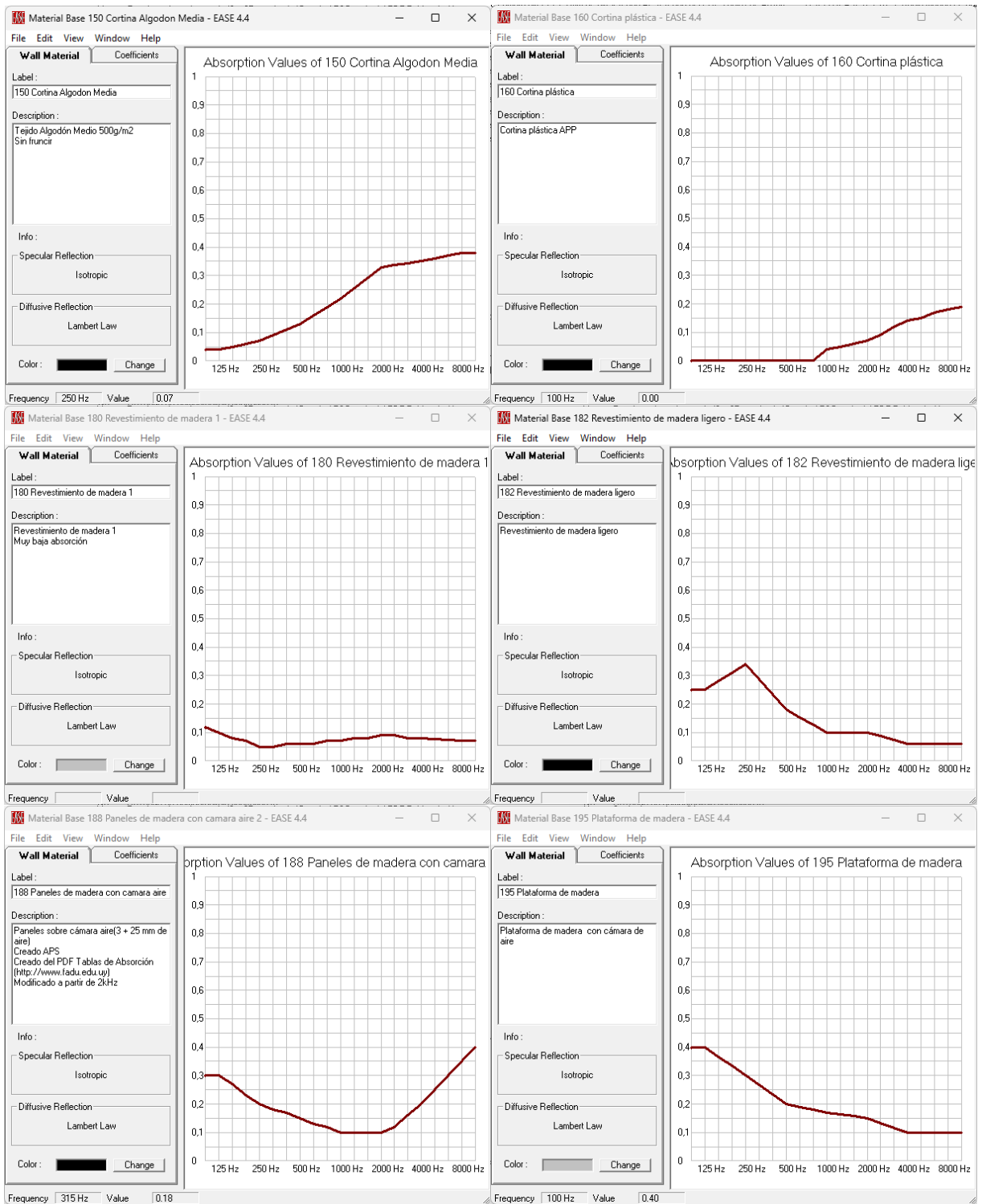
**Tabla 65. Materiales asignados al modelo.**

<b>Capa</b>	<b>Elemento constructivo</b>	<b>Material EASE</b>
TERRAZO	Suelo	140
TARIMA	Suelo escenario	195
pupitre \$ pupitre	Mesa del pupitre	1855
PUERTA	Puerta del escenario	330
mesa \$ mesa	Mesa del escenario	188
MADERA	Pared de madera	73
LADRILLO	Pared	076
ESCAYOLA	Techo	275
CRISTAL	Ventanas	360
cortina \$ cortina	Cortina	160
atril \$ atril	Atril	180
asiento % asiento	Asiento del pupitre	182
ALUMINIO	Puerta acceso	331

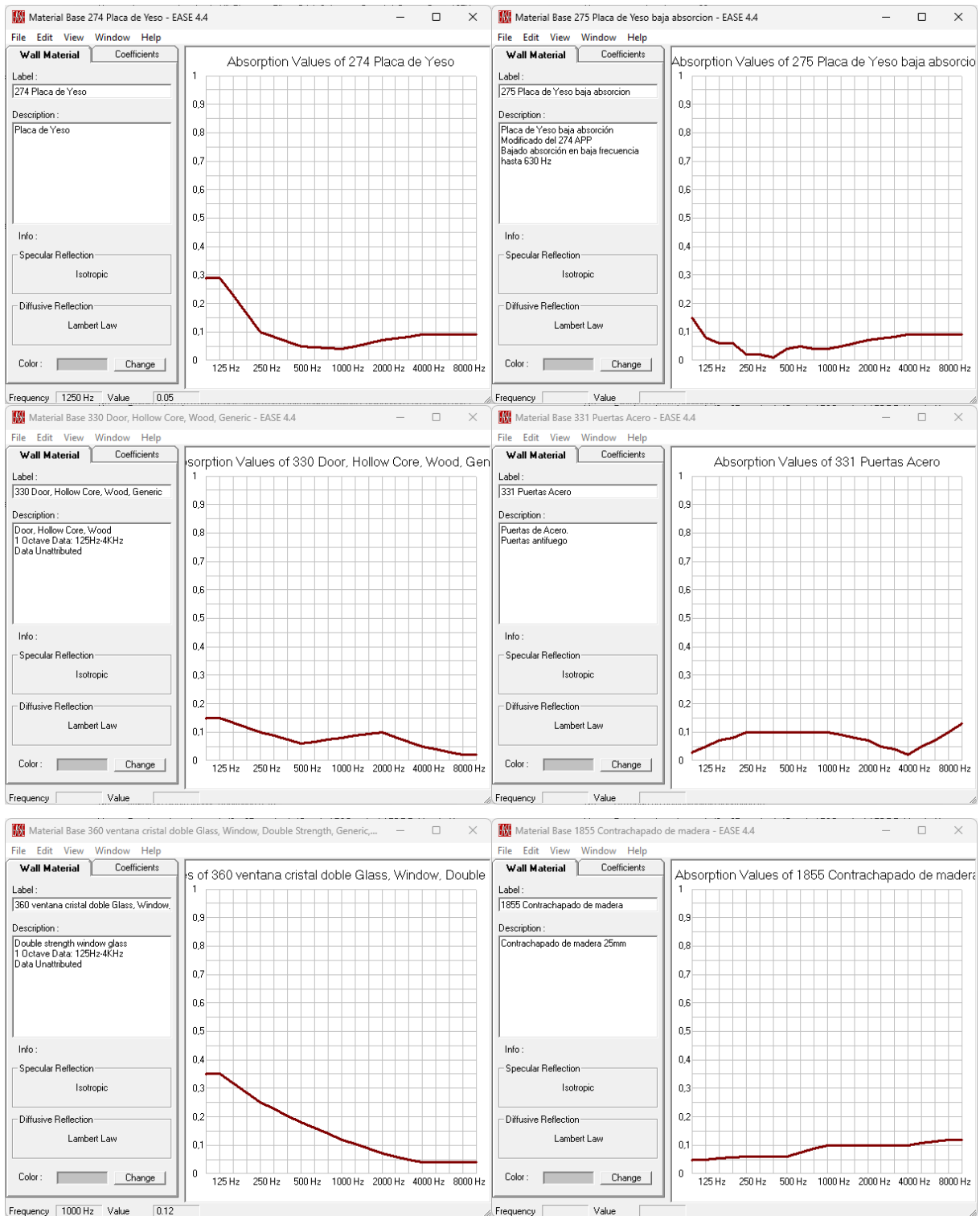
En las siguientes graficas se pueden ver los coeficientes de absorción de cada material utilizado.



**Figura 121. Curva de absorción de los materiales de arriba a abajo e izquierda a derecha: 73, 061, 062, 076, 077 y 140.**



**Figura 122.** Curva de absorción de los materiales de arriba a abajo e izquierda a derecha: 150, 160, 180, 182, 188 y 195.



**Figura 123. Curva de absorción de los materiales de arriba a abajo e izquierda a derecha: 274, 275, 330, 331, 360 y 1855.**