

Universitat Politècnica de València  
Departamento de Construcciones Arquitectónicas

Tesis Doctoral

**Contribución a la simulación virtual de parámetros  
de calidad acústica en espacios arquitectónicos.  
Aplicación del método de superficies de respuesta.**

Autor:

Jaime Llinares Millán

Directores:

Manuel Jesús Ramírez Blanco

José María Bravo Plana-Sala

Valencia, Octubre de 2012



---

## Agradecimientos

En primer lugar me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a mis directores de tesis, D. Manuel Jesús Ramírez Blanco y D. José María Bravo Plana – Sala, quienes no sólo han hecho posible esta tesis, sino que también me guían y aconsejan a diario en mi carrera universitaria.

A todo el grupo de investigación del GICONSIME, Mar, Felipe, Abel y Antonio, y en especial a Juanjo, su director, no sólo por haberme acogido como uno más, sino por animarme y no permitir que me rindiese ante las pruebas fallidas.

Pese a no haber colaborado directamente, quiero agradecer al Ciencias Rugby Club y al Campus Gijón Rugby, en especial a sus entrenadores Suso, Rubén, Alejandro, Cubas, Paco y Ariel, por enseñarme que siempre que algo sale mal, siempre que caes al suelo, la única opción posible es levantarse y volverlo a intentar con más fuerza.

A mi hermana y a mi madre, por estar siempre dispuestas a ayudarme en lo que hiciese falta para poder concluir este proyecto.

A Leles, por sus incansables ánimos, por las noches en vela, por aguantarme todo este tiempo y por aprender a vivir entre papeles llenos de números y gráficos.

Sin embargo, esta tesis nunca podría haberse concluido sin la ayuda de una persona en particular. El responsable de que sujetase mi primer sonómetro a los 9 años de edad. Compañero, consejero y director, no sólo de tesis, sino de vida, mi querido, mi viejo, mi amigo... mi padre.

---

---

## RESUMEN

El análisis acústico de espacios arquitectónicos ha sido ampliamente estudiado en los últimos años. Este análisis se ha enfocado desde diferentes puntos de vista, siendo la simulación uno de ellos.

En salas de grandes dimensiones y en particular en aquellas que poseen un determinado valor patrimonial, es muy interesante conocer, además de las condiciones acústicas de la situación actual, las que resulten de futuras intervenciones que puedan conllevar un cambio de uso de dicho espacio. Para ello, es necesario disponer de un modelo fiable que permita prever la variación de estas condiciones ya que cualquier intervención tendente a mejorar su acústica es siempre costosa, tanto en presupuesto como en la posible alteración de la arquitectura interior.

Por todo ello, la posibilidad de simular el efecto que pueda tener cualquier cambio en cuanto a las características geométricas de la sala o de los materiales que la componen cobra una especial relevancia.

En general, los programas de simulación acústica (Odeon, Caat, etc.) trabajan sobre un modelo tridimensional de la sala y aplican unos valores de los coeficientes de absorción de los materiales de revestimiento, que se toman de la bibliografía o directamente de ensayos, cuando el caso lo permite. Como resultado de esta simulación, se obtienen los valores de los parámetros de calidad, tanto temporales como energéticos, siendo el más importante el tiempo de reverberación en función de la frecuencia (para cada octava o tercio de octava).

Por otra parte, se realiza una medición "in situ" de estos parámetros cuyos valores suelen presentar diferencias respecto a los simulados. En estas condiciones se

---

ajustan los resultados procedentes de la simulación a los medidos, hasta conseguir un determinado grado de coincidencia entre ellos.

En la actualidad, este ajuste se realiza mediante un método iterativo, generalmente basado en la experiencia del operador, que introduce variaciones razonables de los valores de los coeficientes de absorción hasta conseguir una aproximación suficiente o aceptable entre la curva tonal simulada y la curva tonal medida.

El presente trabajo tiene como objeto la aplicación de la metodología matemática basada en las superficies de respuesta (Response Surface Method) a la fase de ajuste de coeficientes de absorción de los materiales o soluciones constructivas que constituyen los revestimientos de un espacio arquitectónico.

Este método aporta un protocolo para la fase de ajuste de coeficientes de absorción en el proceso de simulación acústica de salas. Dicho protocolo sistematiza dicha fase, evitando la arbitrariedad que supone en el método iterativo, tanto la asignación de valores de estos coeficientes como de sus respectivas desviaciones. Asimismo, se comprueba que en la aplicación de este método a recintos de diferentes volúmenes o geometría, dado que sigue un protocolo cerrado, los resultados no sufren variaciones en su precisión.

---

## ABSTRACT

The acoustic analysis of architectural spaces has been widely studied in recent years and has taken different approaches, including simulation.

In large music halls and particular those with heritage value, it of great interest to know, in addition to current acoustic conditions, what the situation would be after future interventions caused by a change in use. A reliable model is needed to forecast the variation in these conditions, as any intervention to improve acoustics is always costly, both in terms of budget and alteration to the interior architecture.

Thus it is particularly important to be able to simulate the effect of any change in the geometric characteristics of the room or the materials used.

In general, acoustic simulation software (Odeon, Caat, etc.) works on a three-dimensional model of the music hall and applies absorption coefficient values to the cladding materials taken from the literature or directly from tests when the case allows. This simulation provides the time and energy quality parameter values, the most important being reverberation time in relation to frequency (for each octave or third of an octave)

In addition, these parameters are measured “in situ” and their values usually differ from the simulated values. The simulation results are then adjusted to the measured results until they coincide to a certain degree.

Currently this adjustment is made using an iterative method, generally based on the experience of the operator who introduces reasonable variations for the absorption coefficient values until a sufficient or acceptable approximation is achieved between the simulated tone curve and the measured tone curve.

---

The aim of this present study is to apply the mathematical Response Surface Method to the phase of adjusting absorption coefficients for the construction materials or solutions used to clad an architectural space.

This method contributes a protocol for the absorption coefficient adjustment stage in the process of simulating music hall acoustics. This systematised protocol for the phase avoids the arbitrariness of the iterative method, both in assigning values for these coefficients and their respective deviations. In addition, it has been found that when applying this method to premises with different volumes or geometry, as a closed protocol is followed, there is no variation in the accuracy of the results.



---

## RESUM

L'anàlisi acústica d'espais arquitectònics ha sigut àmpliament estudiada en els últims anys. Aquesta anàlisi s'ha enfocat des de diferents punts de vista, i la simulació n'és un.

En sales de grans dimensions i en particular en les que posseeixen un determinat valor patrimonial, és molt interessant conèixer, a més de les condicions acústiques de la situació actual, les que resulten de futures intervencions que puguen comportar un canvi d'ús d'aquest espai. Per a fer-ho, cal disposar d'un model fiable que permeti preveure la variació d'aquestes condicions, ja que qualsevol intervenció tendent a millorar-ne l'acústica és sempre costosa, tant en pressupost com en la possible alteració de l'arquitectura interior.

Per tot això, la possibilitat de simular l'efecte que puga tenir qualsevol canvi, pel que fa a les característiques geomètriques de la sala o dels materials que la componen, cobra una rellevància especial.

En general, els programes de simulació acústica (Odeon, Caat, etc.) treballen sobre un model tridimensional de la sala, i apliquen uns valors dels coeficients d'absorció dels materials de revestiment que es prenen de la bibliografia o directament d'assajos, quan el cas ho permet. Com a resultat d'aquesta simulació, s'obtenen els valors dels paràmetres de qualitat, tant temporals com energètics, en què el més important és el temps de reverberació en funció de la freqüència (per a cada octava o terç d'octava).

D'altra banda, es realitza un mesurament in situ d'aquests paràmetres, els valors dels quals solen presentar diferències respecte als simulats. En aquestes condicions

---

s'ajusten els resultats procedents de la simulació als mesurats, fins a aconseguir un determinat grau de coincidència entre aquests.

En l'actualitat, aquest ajust es duu a terme mitjançant un mètode iteratiu, generalment basat en l'experiència de l'operador, que introdueix variacions raonables dels valors dels coeficients d'absorció fins a assolir una aproximació suficient o acceptable entre la corba tonal simulada i la corba tonal mesurada.

Aquest treball té com a objecte l'aplicació de la metodologia matemàtica basada en les superfícies de resposta (response surface method) a la fase d'ajust de coeficients d'absorció dels materials o solucions constructives que constitueixen els revestiments d'un espai arquitectònic.

Aquest mètode aporta un protocol per a la fase d'ajust de coeficients d'absorció en el procés de simulació acústica de sales. Aquest protocol sistematitza aquesta fase, i així evita l'arbitrarietat que suposa en el mètode iteratiu, tant l'assignació de valors d'aquests coeficients com de les seues respectives desviacions. Així mateix, es comprova que en l'aplicació d'aquest mètode a recintes de diferents volums o geometria, atès que segueix un protocol tancat, la precisió dels resultats no pateix variacions.

---

## ÍNDICE GENERAL

<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>VI</b>
<b>Resum</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XVII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XXV</b>
<b>1. Antecedentes y estado actual</b>	<b>1</b>
1.1 Historia de la simulación acústica	1
1.2 Problemática en el ajuste de coeficientes. Objeto de la tesis	13
<b>2. Parámetros de calidad acústica</b>	<b>19</b>
2.1 Introducción	19
2.2 La acústica arquitectónica: un resumen de su evolución	20
2.3 Parámetros de calidad acústica utilizados en este trabajo	29
2.3.1 Tiempo de reverberación	29
2.3.2 Claridad	35
2.3.3 Definición	36
2.3.4 STI, RASTI	37
<b>3. Aplicación del método de superficie de respuesta a la simulación acústica</b>	<b>39</b>
3.1 Método de superficie de respuesta (Response Surface Method-RSM)	39

---

3.1.1 Métodos y diseños de Superficie de Respuesta	40
3.1.2 RSM. Estimación de errores	41
3.2 Aplicación a la simulación acústica. Ajuste de coeficientes.	42
<b>4. Aplicación y verificación del método propuesto</b>	<b>49</b>
4.1 Descripción del recinto	50
4.1.1 Características	50
4.1.2 Descripción de las soluciones constructivas	52
4.2 Medición de parámetros	53
4.2.1 Toma de datos “in situ”	53
4.2.2 Resultados “in situ”	57
4.3 Simulación	59
4.3.1 Modelo virtual de la sala	59
4.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta	61
4.3.3 Resultado de la simulación	65
4.3.4 Resultados en la superficie de audición	67
<b>5. Presentación de resultados</b>	<b>75</b>
5.1 Sala de ensayos. Auditorio municipal de Villajoyosa	76
5.2 Aula magna facultad de derecho de la Universidad de Valencia	77
5.3 Sala de cámara. Gran auditorio de Torrevieja	78
5.4 Auditorio municipal de Benigánim	79
5.5 Auditorio municipal de Villajoyosa	80
5.6 Teatro universidad laboral Gijón	81
5.7 Salón columnario. Lonja de los mercaderes de Valencia	82
5.8 Análisis de resultados	83
<b>6. Conclusiones</b>	<b>85</b>
6.1 Sobre la fiabilidad del método RSM aplicado a la simulación acústica	85
6.2 Sobre la aplicación del método	86
6.3 Sobre ámbito de aplicación	87

---

<b>Anejo. Fichas de salas estudiadas</b>	<b>89</b>
A1 Sala de ensayos. Auditorio municipal de Villajoyosa	91
A1.1 descripción del recinto	91
A1.1.1 Características	91
A1.1.2 Descripción de las soluciones constructivas	92
A1.2 Medición de parámetros	92
A1.2.1 Toma de datos “in situ”	92
A1.2.2 Resultados “in situ”	91
A1.3 Simulación	95
A1.3.1 Modelo virtual de la sala	95
A1.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta	96
A1.3.3 Resultado de la simulación	97
A1.3.4 Resultados en la superficie de audición	99
A2 Aula magna de la Facultad de Derecho de la Universidad de Valencia	103
A2.1 Descripción del recinto	103
A2.1.1 Características del recinto	103
A2.1.2 Descripción de las soluciones constructivas	104
A2.2 Medición de parámetros	105
A2.2.1 Toma de datos “in situ”	105
A2.2.2 Resultados “in situ”	106
A2.3 Simulación	108
A2.3.1 Modelo virtual de la sala	108
A2.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta	109
A2.3.3 Resultado de la simulación	110
A2.3.4 Resultados en la superficie de audición	112
A3 Sala de cámara. Gran auditorio-conservatorio de Torrevieja	117
A3.1 Descripción del recinto	117
A3.1.1 Características del recinto	117
A3.1.2 Descripción de las soluciones constructivas	118

---

A3.2 Medición de parámetros	119
A3.2.1 Toma de datos “in situ”	119
A3.2.2 Resultados “in situ”	120
A3.3 Simulación	122
A3.3.1 Modelo virtual de la sala	122
A3.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta	123
A3.3.3 Resultado de la simulación	124
A3.3.4 Resultados en la superficie de audición	126
A4 Auditorio municipal de Benigánim	131
A4.1 Descripción del recinto	131
A4.1.1 Características del recinto	131
A4.1.2 Descripción de las soluciones constructivas	132
A4.2 Medición de parámetros	133
A4.2.1 Toma de datos “in situ”	133
A4.2.2 Resultados “in situ”	134
A4.3 Simulación	136
A4.3.1 Modelo virtual de la sala	136
A4.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta	137
A4.3.3 Resultado de la simulación	138
A4.3.4 Resultados en la superficie de audición	140
A5 Auditorio municipal de Villajoyosa	145
A5.1 Descripción del recinto	145
A5.1.1 Características del recinto	145
A5.1.2 Descripción de las soluciones constructivas	146
A5.2 Medición de parámetros	147
A5.2.1 Toma de datos “in situ”	147
A5.2.2 Resultados “in situ”	148
A5.3 Simulación	150
A5.3.1 Modelo virtual de la sala	150

---

A5.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta	151
A5.3.3 Resultado de la simulación	152
A5.3.4 Resultados en la superficie de audición	154
A6 Teatro de la Universidad Laboral de Gijón	159
A6.1 Descripción del recinto	159
A6.1.1 Características del recinto	159
A6.1.2 Descripción de las soluciones constructivas	160
A6.2 Medición de parámetros	161
A6.2.1 Toma de datos “in situ”	161
A6.2.2 Resultados “in situ”	162
A6.3 Simulación	164
A6.3.1 Modelo virtual de la sala	164
A6.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta	165
A6.3.3 Resultado de la simulación	166
A6.3.4 Resultados en la superficie de audición	168
A7 Salón Columnario. Lonja de los mercaderes de Valencia	181
A7.1 Descripción del recinto	181
A7.1.1 Características del recinto	181
A7.1.2 Descripción de las soluciones constructivas	182
A7.2 Medición de parámetros	182
A7.2.1 Toma de datos “in situ”	182
A7.2.2 Resultados “in situ”	183
A7.3 Simulación	185
A7.3.1 Modelo virtual de la sala	185
A7.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta	186
A7.3.3 Resultado de la simulación	187
A7.3.4 Resultados en la superficie de audición	189
<b>Referencias</b>	<b>193</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>201</b>





---

## INDICE DE FIGURAS

1.1. Alzado Goebelstrasse de Walter Gropius, ejemplo de seriación y modulación aplicada a la edificación.	2
1.2. Principio de funcionamiento del método de ray-trace. Varios rayos son emitidos desde la fuente S, propagados a lo largo de toda la sala, y finalmente recibidos por un receptor M.	5
1.3. Planta y sección longitudinal de un modelo de estudio con una fuente sonora S y dos receptores R.	7
1.4. Aplicación de la simulación acústica para el diseño óptimo de balconadas y barreras acústicas en viales.	11
1.5. Modelos virtuales actuales. Modelo básico (a) y modelo detallado (b).	12
2.1. Planta de un teatro Griego (a) y Romano (b).	21
2.2. Sección del Palacio de la Ópera de Garnier.	24
2.3. Planta del Concertgebouw de Amsterdam.	25
2.4. W.C. Sabine (izquierda) y el Boston Symphony Hall (derecha).	26
2.5. Sección y planta de la Berliner Philharmonie.	28
2.6. Gráficas para la determinación de la constante de atenuación del sonido en el aire, m.	32
2.7. Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala. (a) Estudios de radiodifusión para voz.      (b) Salas de conferencias. (c) Estudios de radiodifusión para música.      (d) Salas de conciertos. (e) Iglesias	34
2.8. Comparación C80 en diferentes salas.	36
3.1. Ejemplo de representación bidimensional de regiones de respuesta.	41
3.2. Descripción gráfica de la región de aplicación del RSM.	46
3.3. Ejemplo de superficie de respuesta (125Hz) y los pares obtenidos como resultados óptimos que cumplen el Target ( $T_R$ ).	47
3.4. Esquema ilustrativo del árbol de respuestas generado por el método iterativo y el método RSM propuesto.	48

---

4.1 Ejemplo del apartado “características” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	51
4.2 Detalle de la solución constructiva del techo y concha acústica del Auditorio Municipal de Benigánim.	52
4.3 Detalle de la solución constructiva de los laterales reflectantes de la sala del Auditorio Municipal de Benigánim.	53
4.4 Detalle de la solución constructiva de las tapas inferiores del hueco que aloja la climatización de la sala del Auditorio Municipal de Benigánim.	53
4.5 Ejemplo del apartado “toma de datos in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	57
4.6 Ejemplo de los resultados de los parámetros temporales del apartado “resultados in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim	58
4.7 Ejemplo de los resultados de la Claridad del apartado “resultados in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	59
4.8 Ejemplo de los resultados de la Definición del apartado “resultados in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	59
4.9 Ejemplo del apartado “modelo virtual de la sala” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	61
4.10 Ejemplo de las superficies de respuesta obtenidas en el apartado “ajuste mediante el RSM” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	64
4.11 Ejemplo de los resultados de los parámetros temporales del apartado “resultado de la simulación” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	67
4.12 Ejemplo de los resultados de los parámetros de Claridad del apartado “resultado de la simulación” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	67
4.13 Ejemplo de los resultados de los parámetros de Definición del apartado “resultado de la simulación” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	68
4.14 Ejemplo del resultado del parámetro STI del apartado “resultados en la superficie de audición” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	69
4.15 Ejemplo del resultado del parámetro T30 a 500Hz del apartado “resultados en la superficie de audición” de la ficha nº 4. Auditorio	69

---

Municipal de Benigánim.	
4.16 Ejemplo del resultado del parámetro T30 a 1000Hz del apartado “resultados en la superficie de audición” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	70
4.17 Ejemplo del resultado del parámetro C80 a 500Hz del apartado “resultados en la superficie de audición” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	70
4.18 Ejemplo del resultado del parámetro C80 a 1000Hz del apartado “resultados en la superficie de audición” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	71
4.19 Ejemplo del resultado del parámetro D50 a 500Hz del apartado “resultados en la superficie de audición” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	71
4. Ejemplo del resultado del parámetro D50 a 500Hz del apartado “resultados en la superficie de audición” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	72
6.1 Ejemplo de combinaciones de espectros de absorción como variables y sus zonas de posible error.	86
A1.1. Vista general de la sala.	91
A1.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).	92
A1.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	93
A1.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	94
A1.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	94
A1.6. Modelo virtual de la sala.	95
A1.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.	96
A1.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.	97
A1.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	98
A1.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	98
A1.11. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	99
A1.12. STI en toda la superficie de audición.	99
A1.13. T30 a 500Hz en toda la superficie de audición.	100

---

A1.14. T30 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	100
A1.15. C80 a 500Hz en toda la superficie de audición.	101
A1.16. C80 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	101
A1.17. D50 a 500Hz en toda la superficie de audición.	102
A1.18. D50 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	102
A2.1. Vista general de la sala.	103
A2.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).	105
A2.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales	106
A2.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	107
A2.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	107
A2.6. Modelo virtual de la sala.	108
A2.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.	109
A2.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.	110
A2.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	111
A2.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	111
A2.11. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	112
A2.12. STI en toda la superficie de audición.	112
A2.13. T30 a 500Hz en toda la superficie de audición.	113
A2.14. T30 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	113
A2.15. C80 a 500Hz en toda la superficie de audición.	114
A2.16. C80 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	114
A2.17. D50 a 500Hz en toda la superficie de audición.	115
A2.18. D50 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	115
A3.1. Vista general de la sala.	117
A3.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).	119
A3.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	120
A3.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	121
A3.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	121

---

A3.6. Modelo virtual de la sala.	122
A3.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.	123
A3.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.	124
A3.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	125
A3.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	125
A3.11. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	126
A3.12. STI en toda la superficie de audición.	126
A3.13. T30 a 500Hz en toda la superficie de audición.	127
A3.14. T30 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	127
A3.15. C80 a 500Hz en toda la superficie de audición.	128
A3.16. C80 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	128
A3.17. D50 a 500Hz en toda la superficie de audición.	129
A3.18. D50 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	129
A4.1. Vista general de la sala.	131
A4.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).	133
A4.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	134
A4.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	135
A4.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	135
A4.6. Modelo virtual de la sala.	136
A4.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.	137
A4.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.	138
A4.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	139
A4.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	139
A4.11. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	140
A4.12. STI en toda la superficie de audición.	140
A4.13. T30 a 500Hz en toda la superficie de audición.	141
A4.14. T30 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	141
A4.15. C80 a 500Hz en toda la superficie de audición.	142
A4.16. C80 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	142

---

A4.17. D50 a 500Hz en toda la superficie de audición.	143
A4.18. D50 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	143
A5.1. Vista general de la sala.	145
A5.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).	147
A5.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	148
A5.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	149
A5.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	149
A5.6. Modelo virtual de la sala.	150
A5.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.	151
A5.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.	152
A5.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	153
A5.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	153
A5.11. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	154
A5.12. STI en toda la superficie de audición.	154
A5.13. T30 a 500Hz en toda la superficie de audición.	155
A5.14. T30 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	155
A5.15. C80 a 500Hz en toda la superficie de audición.	156
A5.16. C80 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	156
A5.17. D50 a 500Hz en toda la superficie de audición.	157
A5.18. D50 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	157
A6.1. Vista general de la sala.	159
A6.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).	161
A6.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	162
A6.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	163
A6.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	163
A6.6. Modelo virtual de la sala.	164
A6.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.	165
A6.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.	166

---

A6.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	167
A6.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	167
A6.11. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	168
A6.12. STI en toda la superficie de audición.	168
A6.13. T30 a 500Hz en toda la superficie de audición.	169
A6.14. T30 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	169
A6.15. C80 a 500Hz en toda la superficie de audición.	170
A6.16. C80 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	170
A6.17. D50 a 500Hz en toda la superficie de audición.	171
A6.18. D50 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	171
A7.1. Vista general de la sala.	181
A7.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).	182
A7.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	183
A7.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	184
A7.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	184
A7.6. Modelo virtual de la sala.	185
A7.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.	186
A7.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.	187
A7.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.	188
A7.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.	188
A7.11. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.	189
A7.12. STI en toda la superficie de audición.	189
A7.13. T30 a 500Hz en toda la superficie de audición.	190
A7.14. T30 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	190
A7.15. C80 a 500Hz en toda la superficie de audición.	191
A7.16. C80 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	191
A7.17. D50 a 500Hz en toda la superficie de audición.	192
A7.18. D50 a 1000Hz en toda la superficie de audición.	192





---

## INDICE DE TABLAS

1.1. Resumen cronológico de la aparición de los principales softwares de simulación existentes.	13
2.1. Valores de STI/RASTI y su calificación.	38
3.1. Esquema de funcionamiento de la aplicación del RSM.	44
3.2. Esquema de funcionamiento de los límites de la región de aplicación del RSM.	45
4.1 Ejemplo del apartado “descripción de las soluciones constructivas” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	54
4.2 Ejemplo de los resultados de los parámetros de inteligibilidad del apartado “resultados in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	58
4.3 Ejemplo de los coeficientes de absorción aplicados en el apartado “modelo virtual de la sala” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	62
4.4 Ejemplo del apartado “ajuste mediante el RSM” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	63
4.5 Ejemplo de los pares obtenidos en el apartado “ajuste mediante el RSM” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	65
4.6. Pares de resultados para cada frecuencia.	65
4.7. Ejemplo de los resultados de los parámetros de inteligibilidad del apartado “resultado de la simulación” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.	66
5.1. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.	76
5.2. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.	76
5.3. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.	76
5.4. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.	76
5.5. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.	76
5.6. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.	77

---

5.7. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.	77
5.8. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.	77
5.9. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.	77
5.10. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.	77
5.11. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.	78
5.12. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.	78
5.13. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.	78
5.14. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.	78
5.15. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.	78
5.16. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.	79
5.17. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.	79
5.18. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.	79
5.19. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.	79
5.20. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.	79
5.21. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.	80
5.22. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.	80
5.23. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.	80
5.24. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.	80
5.25. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.	80
5.26. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.	81
5.27. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.	81
5.28. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.	81
5.29. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.	81
5.30. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.	81
5.31. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.	82
5.32. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.	82

---

5.33. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.	82
5.34. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.	82
5.35. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.	82
5.36. Resumen de los resultados obtenidos y su porcentaje de error en los parámetros EDT, T30, C80 y D50.	83
5.37. Resumen de los resultados obtenidos y su porcentaje de error del parámetro de STI.	84
A1.1. Datos de la sala.	91
A1.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.	92
A1.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	93
A1.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.	95
A1.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.	96
A1.6. Pares de resultados para cada frecuencia.	97
A1.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	97
A2.1. Datos de la sala.	103
A2.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.	104
A2.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	106
A2.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.	108
A2.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.	109
A2.6. Pares de resultados para cada frecuencia.	110
A2.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	110
A3.1. Datos de la sala.	117
A3.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.	118
A3.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	120
A3.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.	122
A3.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.	123

---

A3.6. Pares de resultados para cada frecuencia.	124
A3.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	124
A4.1. Datos de la sala.	131
A4.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.	132
A4.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	134
A4.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.	136
A4.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.	137
A4.6. Pares de resultados para cada frecuencia.	138
A4.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	138
A5.1. Datos de la sala.	145
A5.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.	146
A5.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	148
A5.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.	150
A5.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.	151
A5.6. Pares de resultados para cada frecuencia.	152
A5.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	152
A6.1. Datos de la sala.	159
A6.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.	160
A6.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	162
A6.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.	164
A6.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.	165
A6.6. Pares de resultados para cada frecuencia.	166
A6.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	166
A7.1. Datos de la sala.	181
A7.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.	182
A7.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	183

---

A7.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.	185
A7.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.	186
A7.6. Pares de resultados para cada frecuencia.	187
A7.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.	187



# 1

## ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL

### 1.1 HISTORIA DE LA SIMULACIÓN ACÚSTICA

En el primer cuarto del siglo XX, tras la Primera Guerra Mundial, la economía de la mayoría de los países se encontraba en una situación bastante precaria, debido fundamentalmente a los gastos militares derivados de la preparación y ejecución del conflicto bélico. Para paliar esta deuda, se redujeron de forma drástica los presupuestos dedicados a bienestar social y se aumentaron de forma significativa los impuestos.

Sin embargo, no todas las consecuencias del gran conflicto fueron tan negativas. Durante la contienda, se puso en juego toda la maquinaria industrial que, aunque con fines bélicos, el resultado final se tradujo en un avance en las tecnologías del momento. Del mismo modo, la entrada de la mujer en el mercado laboral dentro del sector industrial (por la necesidad de disponer de mano de obra que sustituyese a los soldados) hizo que después del gran conflicto hubiese un aumento demográfico importante de población trabajadora cualificada en el sector industrial [1].

Con la industria fortalecida y el aumento de mano de obra, el precio de la producción industrial disminuyó drásticamente, pudiendo competir con la producción manufacturada, sector que debía reponerse de la Guerra. Sin embargo la situación social y económica de la época no favorecía ningún tipo de mercado ya que

## 1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL

---

las cargas económicas a las que se veían sometidos los ciudadanos no favorecían en absoluto el consumo.

El ámbito de la construcción no fue una excepción de esta situación. El avance de las tecnologías permitía una mejora en el proceso de la edificación, sin embargo, la necesidad de reconstrucción que imperaba en algunos núcleos, unido a la decadente situación económica, hicieron necesario un cambio de mentalidad. La edificación encuentra un punto de inflexión anteponiendo los fines funcionales a los estéticos, siendo la máxima representación de esta tendencia el movimiento de la “Escuela de la Bauhaus” (*Bau* - construcción, *Haus* - casa) cuya ideología se podía resumir en la frase “la forma sigue a la función”.

Esta búsqueda de la funcionalidad, unida a la necesidad de reducir costes, centra al mundo de la edificación bajo la idea principal de la optimización de los recursos, lo que conlleva la puesta en marcha de diferentes líneas de investigación sobre el estudio de los parámetros que acaban definiendo, o condicionando, el uso y función de los diferentes espacios arquitectónicos.



*Fig 1.1. Alzado Goebelstrasse de Walter Gropius, ejemplo de seriación y modulación aplicada a la edificación. (Maynard J..1919)*

Los primeros bosquejos sobre vivienda sostenible, el uso de módulos seriados construidos en taller y los primeros pasos del prefabismo (que no alcanzaría su esplendor hasta las décadas de los 60 - 80) fueron algunas de las respuestas a este movimiento. Cada disciplina relacionada con el mundo de la edificación comenzaría un recorrido con un fin común: Conseguir los mejores resultados con el mínimo coste.



Inicialmente, los campos que más se desarrollaron fueron los directamente necesarios para la reconstrucción de los núcleos urbanos. El empleo de elementos prefabricados en taller, unido a la premisa de la facilidad de ejecución revertió en los primeros modelos de edificación modular mediante elementos seriados [2].

Uno de los mecanismos utilizados en este proceso de optimización es la predicción o simulación de resultados sobre modelos, para tratar de conocer el comportamiento de un edificio o espacio antes de su construcción. El mismo proceso que hasta el momento se había empleado, por ejemplo, para el cálculo estructural o para las fases de fraguado del hormigón, ahora se aplicaba a las diferentes disciplinas que estudian los parámetros que acaban definiendo, o condicionando, el uso y función de los diferentes espacios.

Una vez recuperado el panorama económico, el sistema basado en la simulación de resultados sigue vigente, variando levemente los objetivos finales. Ya no se toma como objetivo final conseguir el mejor rendimiento a bajo coste, sino los mejores resultados acordes al uso final de cada espacio. El objetivo, a partir de este momento, es acondicionar con calidad los espacios de acuerdo con la función para la que se diseñan.

El ámbito de la acústica arquitectónica no iba a ser una excepción a este proceso. Aunque este trabajo se centra en la simulación acústica informatizada, parece conveniente hacer una pequeña revisión de la simulación acústica desde sus orígenes.

A principios de la década de los 30 del siglo pasado, se realizan las primeras simulaciones acústicas sobre modelos a escala reducida, utilizando ultrasonidos. Spändok [3] fue el pionero en el campo de predicción acústica, desarrollando un método en el que básicamente utilizaba factores de reducción de las longitudes de onda de los sonidos emitidos y los hacía coincidir con los de reducción de un modelo a escala del espacio a estudiar. De esta forma, ubicando en el modelo a escala un micro direccional similar al funcionamiento del oído humano, estudiaba los resultados obtenidos.

## 1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL

---

De forma paralela, Meyer [4] presentó en 1937 un compendio de formulaciones algorítmicas, indicando un formato de predicción basado en cálculos matemáticos, algunos de los cuales todavía sirven de base en los utilizados actualmente.

En 1969 se realizaron los primeros cálculos informatizados, partiendo de las premisas de Meyer. La posibilidad de introducir una tarea y que ésta se repitiese de forma mecánica para diferentes parámetros multiplicaba el número de cálculos, por lo tanto el número de supuestos, y reducía notablemente el tiempo de cálculo.

En 1970 se planteó la primera comparación entre los métodos de cálculo estadísticos y los métodos gráficos [5], aplicados a diferentes recintos, demostrando que la simplicidad del método estadístico no siempre proporcionaba resultados precisos a la hora de calcular el tiempo de reverberación.

En 1975 se desarrollaron los primeros cálculos sobre el Índice de Inteligibilidad, basados en expresiones matemáticas [6], y las primeras aplicaciones informáticas básicas para el cálculo del radio crítico [7]. En estos cálculos no se tenía en cuenta la geometría del recinto a estudiar.

Es en 1977 cuando tiene lugar la primera predicción del tiempo de reverberación en un espacio tridimensional virtual y aunque sólo se aplicó a un espacio paralelepípedo, se consiguió calcular la trayectoria y reflexiones de un conjunto de rayos partiendo de una fuente puntual. El estudio se realizó sobre un recinto ficticio, con dimensiones preparadas y con un único valor del coeficiente de absorción superficial ( $\alpha$ ) para todas las superficies, con el objeto de conseguir un resultado concreto y así comprobar el método [8].

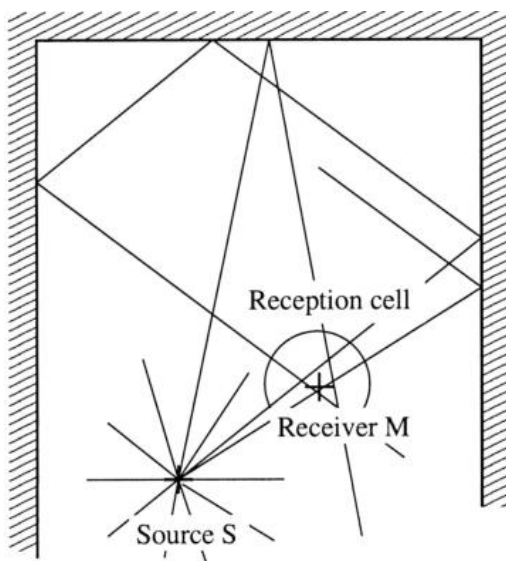
En 1979 se aplicó la misma metodología para realizar el estudio de salas estrechas. En este caso ya se introdujo una variación en los coeficientes de absorción superficial de algunos materiales, diferenciando los materiales absorbentes de los que no lo eran. El resultado, aunque satisfactorio, no resultó preciso al comparar las teorías numéricas frente a las gráficas.

Hasta este momento, el procedimiento gráfico de cálculo empleado era el método del **SEGUIMIENTO DE RAYOS o RAYTRACE**. Este método se planteó en 1968 [9] y se basa en teorías geométricas para representar la propagación de la onda sonora en un recinto cerrado. Considera, además, la difusión de las reflexiones basándose en el

diagrama de Lambert que adquiere importancia, sobre todo, al incidir la onda sobre superficies rugosas; ya que puede modificar sensiblemente el resultado del tiempo de reverberación.

El proceso de cálculo se resume en que cada vez que un rayo impacta sobre una superficie, se refleja según la ley de difusión de Lambert, emitiendo rayos en diferentes direcciones. Energéticamente, existe una pérdida de la energía del rayo inicial que depende del ángulo de difusión y del coeficiente de absorción superficial de la superficie impactada. Asimismo, conociendo las condiciones de temperatura y humedad del recinto, también se puede calcular la absorción energética del aire, consiguiendo obtener la pérdida energética que no sólo se base en las reflexiones, sino también en el tiempo (calculado sobre la distancia recorrida por el rayo). Así, se conoce la trayectoria de cada rayo hasta que alcanza valores energéticos despreciables.

La limitación de este método es que al reducir el frente de ondas a una discretización de rayos (elemento lineal), el cálculo de la recepción debe realizarse sobre elementos superficiales (ya que los puntuales pueden no recibir ningún impacto lineal). Dependiendo de la discretización de rayos que se realice, el resultado de la recepción varía con el número de rayos emitidos.



*Fig 1.2. Principio de funcionamiento del método de ray-trace. Varios rayos son emitidos desde la fuente S, propagados a lo largo de toda la sala, y finalmente recibidos por un receptor M. (Lee H.W. 2001)*

Esta fue la técnica utilizada hasta la publicación, en 1979, del método de la **FUENTE-IMAGEN (IMAGE-SOURCE)** que considera que en cada punto de impacto sobre una superficie, los rayos reflejados por la misma “proceden” de una fuente imagen simétrica a la real. Cada fuente tiene una imagen simétrica respecto de una superficie, que indica el punto de origen de los rayos reflejados.

Esta fuente simétrica puede, a su vez, ser fuente inicial de una segunda reflexión para obtener una nueva fuente simétrica respecto de otra superficie, calculando así las segundas reflexiones y, sucesivamente, se puede repetir el procedimiento hasta n veces. Los rayos procedentes de la fuente simétrica (fuente imagen) son iguales que los que proceden de la fuente inicial, aunque con una reducción energética debida a la absorción de la superficie en la que se reflejan.

De forma análoga al método del seguimiento de rayos, también puede estimarse la reducción energética producida por el aire, teniendo en cuenta la velocidad de propagación del sonido en el aire, la temperatura y humedad ambiente, y la distancia recorrida.

Este método, basado exclusivamente en la teoría geométrica, sólo puede emplearse en recintos modelizados con superficies planas.

La ventaja principal de este método es que, una vez fijado un receptor puntual, el cálculo puede realizarse a la inversa, hasta llegar a la fuente origen; lo cual disminuye el número de cálculos y al mismo tiempo permite una respuesta más precisa. A partir de este momento ambos métodos conviven en el ámbito de la simulación acústica.

A finales del año 1979, se compone la primera base de datos informatizada de parámetros y criterios de calidad acústica [10]. Poco después, en 1981, de forma paralela, surge la primera aplicación del método de rayos para el cálculo de los diferentes parámetros de calidad acústica [11].

El método fuente-imagen sigue perfeccionándose buscando mayores aproximaciones a la realidad. Con objeto de esta investigación, se crea en Dinamarca (1984) el Laboratorio ODEON. La publicación que inaugura este laboratorio contiene el primer modelo de cálculo con variación del coeficiente de absorción superficial dependiendo del ángulo de incidencia de los diferentes rayos. Es un primer intento de aplicar el fenómeno de difusión al método fuente-imagen [12].

El mismo año, aplicando la teoría de seguimiento de rayos, se publican dos trabajos sobre la predicción y cálculo del STI (Speech Transmission Index) [13] y una aplicación de la teoría de elementos finitos con el fin de poder ampliar el número de cálculos de cada modelo. Todo ello da origen a la aparición del primer software de simulación acústica, el ODEON 1.0, que basado en el método fuente-imagen y optimizando los cálculos mediante la teoría de elementos finitos, consigue un aumento del número de rayos por simulación.

A finales del mismo año, empieza la fase de validación del software, publicándose la primera comparación entre los resultados de las mediciones "in situ" y los obtenidos mediante simulación [14]. A principios de 1986, el mismo laboratorio publica su primer software aplicado a múltiples receptores, obteniendo resultados admisibles (inferiores al 20% de desviación) de tiempo de reverberación [15].

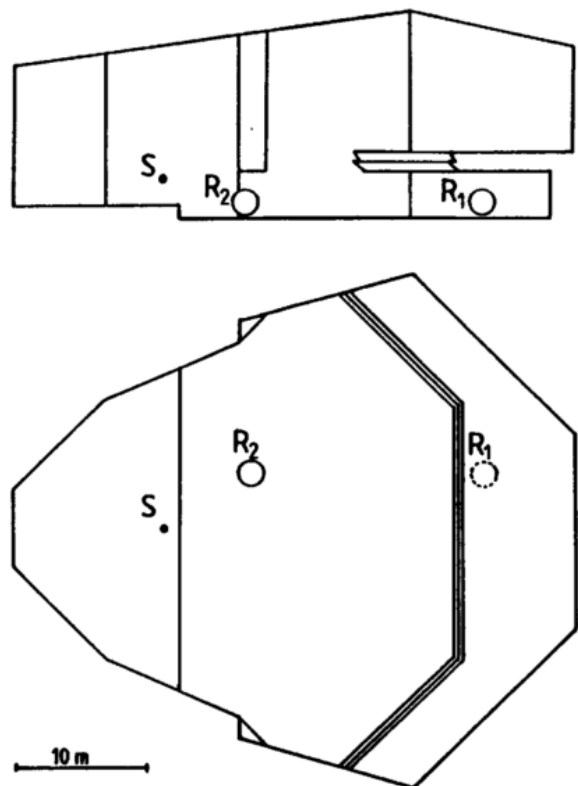


Fig 1.3. Planta y sección longitudinal de un modelo de estudio con una fuente sonora S y dos receptores R.(Geddes E.R. 1984)

Finalmente, con ánimo de seguir validando el método, en 1988 se comienza a aplicar el software a diferentes espacios arquitectónicamente singulares. En el estudio de tiempos de reverberación de salas alargadas aparecen los primeros resultados no coincidentes, sobre todo para receptores muy alejados de la fuente [16][17].

A mediados de 1989 se desarrolla el que va a ser el método actual de cálculo de prácticamente la totalidad de los software de predicción acústica, el método mixto **RAYTRACE/IMAGE-SOURCE**, que aúna los dos anteriores en uno sólo, mejorando, mediante el seguimiento de rayos, el método fuente-imagen. Para cada trayectoria de un rayo, se calcula su reflexión sobre cada una de las superficies mediante el proceso de las fuentes imagen añadiendo, al mismo tiempo, el efecto de difusión generado por el método de rayos, es decir que cada fuente imaginaria, en realidad, representa una serie de fuentes imaginarias muy próximas [18].

De esta forma, la optimización a la hora de calcular fuentes imagen es exponencial; permitiendo, bajo un mismo coste computacional, calcular un mayor número de rayos. Al igual que el método fuente-imagen, también éste permite realizar el mismo cálculo de reflexiones a la inversa para un receptor puntual.

Este método, con sus progresivas actualizaciones y modificaciones sigue siendo, a día de hoy, el modelo algorítmico de cálculo más empleado en la simulación acústica informatizada.

A raíz de la publicación de este método, surgen en el mercado dos nuevos software de simulación acústica; el RAYSCAT, basado en la teoría de raytracing (éste se presentó como un software con un bajo coste computacional) y, en 1990, el programa EASE, que ya presentaba cálculos mediante el método híbrido.

La verdadera puesta a punto de dicho método se daría en los siguientes años. En 1990 aparecen los primeros estudios aplicando el método mixto en simulaciones con fuentes y receptores direccionales [19]. Ya en 1992, el laboratorio ODEON publica los primeros resultados fiables obtenidos mediante el software ODEON 2.0, basado en el nuevo método. En sus publicaciones se testea el programa en salas de diferentes características [20][21].

Cabe destacar que el mismo laboratorio continúa con el estudio del resto de parámetros energéticos de calidad acústica, obteniendo, a finales de 1992, los primeros resultados de predicción de éstos (Claridad y Definición) mediante la simulación informatizada aplicando el método mixto [22].

En 1993 se realiza el primer estudio sobre simulación empleando receptores reales, comparando los resultados obtenidos “in situ” con los obtenidos en la simulación, teniendo en cuenta la directividad de la fuente y la difusión y absorción de los espectadores de la sala. El resultado, aunque fue aceptable para receptores próximos, no resultó muy preciso para los receptores situados en el fondo y laterales de la sala. La conclusión fue que el método mixto, aplicado a la totalidad de la sala, cuando su volumen es grande-medio, resultaba impreciso a partir de una distancia de la fuente ya que las múltiples reflexiones generadas hacían que los receptores finales recibiesen la misma energía [23].

En 1994 aparece el sistema SIDIART-QBASIC de cálculo de tiempo de reverberación mediante cálculo analítico. Basado en las teorías estadísticas, generaba un algoritmo de cálculo numérico que se veía modificado según una base de datos de parámetros obtenidos en diferentes salas [24]. Sus resultados fueron aceptables en modelos simples.

En 1995 surge en el mercado el software ROOM OPTIMIZER, basado en el método mixto. La novedad fue la optimización de resultados aplicando cálculos mediante elementos finitos. Sin embargo, los resultados no distaban de los obtenidos con los software contemporáneos.

A finales de 1995 se describe un método de cálculo mixto entre el seguimiento de rayos (software RAYSCAT) y cálculos estadísticos aplicados a grandes naves industriales [25]. Pese a no tener mucha repercusión como método mixto, la solución de optar por cálculos estadísticos para obtener resultados a lo largo de todo el amplio volumen de las grandes naves industriales supone un cambio en el enfoque de la simulación acústica.

En esta misma época, el software ODEON se actualiza en la versión 2.5, añadiendo al método mixto, el cálculo estadístico aplicado a grandes volúmenes. Durante ese año se sigue ajustando los modelos simulados con los datos obtenidos “in situ” [26] y

un año después, en 1996, el laboratorio ODEON compara y evalúa todos los métodos de cálculo para la modelización de la difusión de los rayos, emitiendo un informe de errores del ODEON 2.5 [27].

En 1997 se obtienen los primeros resultados aproximados entre los valores del tiempo de reverberación simulado y el medido “in situ” para diferentes receptores en una misma sala [28].

Durante el año 1998 aparecen en el mercado los software de simulación acústica CAAT ACOUSTICS y RAYNOISE (evolución del programa RAYSCAT) ambos basados en el método híbrido de cálculo. Posteriormente, en el año 2000, el programa RAYNOISE incluiría métodos numéricos y estadísticos para el cálculo de grandes volúmenes [29].

En el año 2000, en el 1<sup>er</sup> Congreso de ASA – FIA - IMA en Cancún, se presenta el coeficiente de difusividad sonora subjetiva en un punto del campo acústico (SFD) que permite evaluar el grado de difusión de una solución constructiva. Al aumentar la potencia de los procesadores, el número de rayos susceptibles de ser calculados aumenta exponencialmente, de forma que la difusión cobra relevancia. En una primera etapa se estudia la difusión producida en las aristas [30], añadiendo a los modelos mayor realidad en el cálculo de las reflexiones. Como comprobación se realizan pruebas en espacios controlados, obteniendo como resultados que los modelos difusos (con la difusión de los rayos mejor calculada) dan como resultados valores más exactos [31].

A finales del año 2000, se realiza una comparación entre los software RAYNOISE Y ODEON 2.6. El software ODEON resulta más exacto pese a necesitar mayor tiempo de cálculo [32].

En el año 2001, se presenta en un congreso una mejora a la simulación de la difusión en la reflexión de los rayos. La aplicación del algoritmo de las fuentes imagen al cálculo de la difusión otorga a los modelos experimentales resultados con mayor precisión [33].

Finalmente, es en el año 2002 cuando la simulación de la difusión de las diferentes superficies pasa a realizarse aplicando la teoría de elementos finitos [34]. En este paso ya queda definido el modelo final de simulación aplicado hoy en día. Modelo híbrido raytrace/image-source para el cálculo de primeras reflexiones,

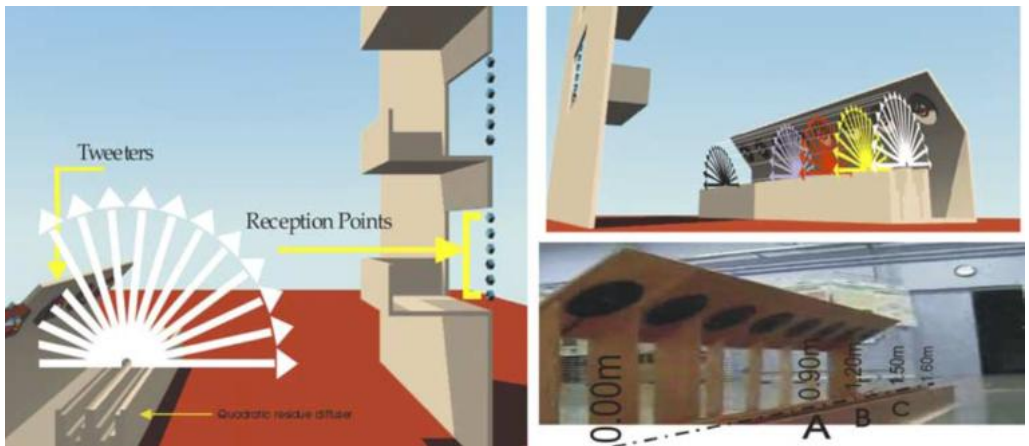


métodos estadísticos para las reflexiones tardías (grandes volúmenes), optimizando los cálculos de difusión mediante elementos finitos.

A partir de este momento la simulación acústica pasa a ser una herramienta muy útil, tanto en investigación como en la aplicación a proyectos de salas.

Entre los años 2003 y 2006, se realizan diferentes estudios que, empleando la simulación como herramienta base, investigan sobre pautas o criterios para mejorar el diseño de salas [35], obtener una mejor inteligibilidad de la palabra [36], diseño de anfiteatros [37] o, simplemente, comprobación del funcionamiento acústico de auditorios [38]. Incluso se emplea para simular los resultados de la inteligibilidad de la palabra en espacios públicos mediante megafonía (STIPA) [39].

En el año 2007 se lanza al mercado el software RAMSETE, cuyo objetivo es el de realizar simulaciones acústicas con un coste computacional muy reducido. En este mismo año se valida el uso de fuentes omnidireccionales en modelos simulados mediante el programa ODEON [40]. Al mismo tiempo se presenta un estudio sobre el factor de difusión de los diferentes materiales, teniendo en cuenta el objeto modelizado y el valor del coeficiente de difusión asignado a cada una de las superficies [41].



*Fig 1.4. Aplicación de la simulación acústica para el diseño óptimo de balconadas y barreras acústicas en viales. (Keränen J. 2010)*

Durante el 2008 se mejora el cálculo de la atenuación energética de los rayos debido a la absorción del aire y los condicionantes atmosféricos [42]. Al mismo tiempo se plantea, por primera vez, la problemática del grado de detalle de los modelos virtuales [43]. Este problema nunca existió, ya que el coste computacional siempre ejercía de barrera a la hora de detallar las salas, sin embargo, la mejora de los procesadores ya no suponía ninguna limitación para el diseño.

A mediados del 2008 se modifican los software para el cumplimiento de las normas ISO [44]. Este paso es fundamental ya que la simulación pasa a ser aceptada por la normativa como herramienta de cálculo. A finales de este año se realiza una comparación entre los software ODEON Y CAAT. Aunque los resultados son muy similares, el ODEON muestra mejor distribución de valores del STI [45].

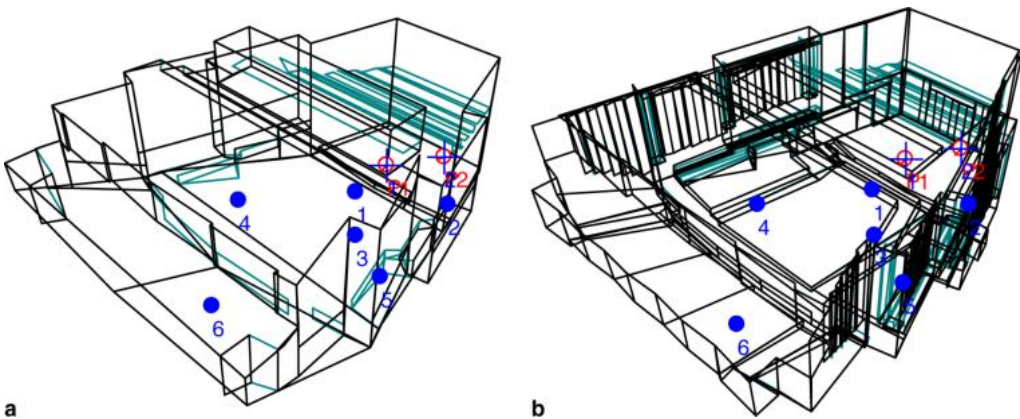


Fig 1.5. Modelos virtuales actuales. Modelo básico (a) y modelo detallado (b).

En el año 2009, se plantea por primera vez la problemática del ajuste de los valores bibliográficos de los coeficientes de absorción superficial, aplicando como procedimiento de ajuste el método iterativo que se analizará en el capítulo siguiente [46].

Finalmente, durante los años 2010 y 2011, se aplica la simulación para el estudio de diferentes modelos. Se realizan estudios sobre naves industriales [47], sobre espacios abiertos empleando materiales transparentes (túneles, teatros al aire libre, etc.) [48] e incluso se realiza un estudio basado en la simulación acerca de la mejor posición de un interlocutor en una sala [49].

Cabe señalar, que a finales del 2011 aparece en el mercado el primer software gratuito de simulación acústica. Basado en modelos geométricos generados mediante RHINOCEROS, el motor gratuito PACHYDERM ofrece resultados similares a los de otros software de pago. Este todavía se encuentra en fase de testeo, pero significa la primera incursión del software libre al mundo de la simulación acústica [50].

AÑO	SOFTWARE
1985	Aparición del ODEON
1990	Aparición del EASE
1995	Aparición del ROOM OPTIMIZER
1998	Aparición del CAAT ACOUSTICS
1998	Aparición del RAYNOISE
2007	Aparición del RAMSETE
2011	Primeros sistemas free - PACHYDERM + RHINOCEROS

*Tabla 1.1. Resumen cronológico de la aparición de los principales software de simulación existentes.*

## **1. 2 OBJETO DE LA TESIS. PROBLEMÁTICA EN EL AJUSTE DE COEFICIENTES.**

En la actualidad, las líneas basadas en la mejora de la simulación acústica mediante ordenador, trabajan principalmente en ajustar, de la forma más precisa posible, los resultados obtenidos con la simulación, con los medidos “in situ”. En elementos patrimoniales, es especialmente sensible y complicada la variación de sus características, ya desde el punto de vista estructural como morfológico. En general son espacios que gozan de protecciones administrativas de forma que las intervenciones en éstos son especialmente complicadas. En estos casos el disponer de una herramienta de simulación acústica precisa permitiría predecir el comportamiento acústico del mismo ante cualquier propuesta de intervención (adición o supresión de elementos, variaciones de volumen, adaptaciones a otros usos, etc.).

## 1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL

---

El protocolo de funcionamiento base de todos los software de programación es prácticamente el mismo, con una rutina de actuaciones que se compone de las siguientes fases:

- Modelización del espacio objeto del estudio, el cual puede realizarse mediante diferentes motores de diseño gráfico. Sin embargo, el resultado final es siempre el mismo: Un modelo virtual en el que se separan las superficies de trabajo (polígonos, 3Dcara, meshes, etc.) en grupos o “capas” según su solución constructiva.
- Identificación emisor/receptor, localizando, en dicho modelo virtual, un punto como emisor cuyas coordenadas coincidan con las de ubicación de la fuente emisora en las mediciones “in situ”. Análogamente, se ubican los distintos receptores repartidos a lo largo de toda la superficie de la sala, coincidiendo con las diferentes posiciones de los micrófonos en la medida.
- Configuración de la sala, mediante los parámetros de la misma (temperatura, humedad, número de rayos a emplear, número de reflexiones, ruido de fondo, etc.).
- Configuración de los materiales de la sala, asignando, a cada conjunto de superficies agrupado como una misma solución constructiva, un espectro de absorción superficial (dado por los correspondientes coeficientes de absorción para cada banda de frecuencias) y un espectro de difusión (que en la mayoría de software se suele reducir a un valor único). Estos valores de los coeficientes de absorción superficial se toman de la bibliografía, o de diferentes bases de datos obtenidas, en su mayoría, de mediciones en laboratorio. Este proceso se repite para cada una de las soluciones constructivas.

Sobre estas soluciones constructivas superficiales del interior del recinto, a las que se tiene que asignar un valor del coeficiente de absorción superficial para cada frecuencia, hay que tener en cuenta que:

- 1.- Algunas de las soluciones constructivas presentan dificultades para ser medidas en laboratorio según normativa actual (por motivos de complejidad constructiva, tipología, extensión, etc.) y, además, sus espectros de absorción, o no se

encuentran en ninguna base de datos, o cuando están, se remiten a supuestos similares tras haber realizado diferentes ensayos “in situ”. Los techos constituidos a base de tableros de distintos materiales -suspendidos o anclados mediante sistemas diferentes- con o sin absorbente acústico en su trasdós, constituyen un claro ejemplo de este tipo de elementos.

2.- Existen diferencias significativas en cuanto a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y los esperados en la ejecución real en grandes superficies. El grado de control en la ejecución de una pequeña muestra normalizada (12 m<sup>2</sup>) no puede trasladarse a la realidad de la ejecución en obra, por lo que se produce disparidad entre ambos valores. Un claro ejemplo de este caso es el uso de revestimientos a base de placas de cartón - yeso con cámaras de aire. En los ensayos de laboratorio, el espesor de la cámara de aire suele ser constante. En la praxis, dependiendo de las formas del elemento constructivo base, una cámara de aire puede variar de forma totalmente aleatoria. Esta variación puede originar diferencias significativas entre la respuesta del modelo simulado y la situación real.

3.- La propia diferencia de acabados entre la realidad y el modelo, hace siempre necesario un ajuste de coeficientes para poder equiparar ambos. El modelo simulado (perfecto, sin variaciones, sin diferente calidad en los acabados, con la misma temperatura, etc.) difiere de la realidad, en la que no se cumplen exactamente estos supuestos.

Estas razones expuestas ponen de manifiesto la necesidad de una fase posterior al protocolo de simulación que consista en ajustar los valores de los coeficientes de absorción superficial con el fin de aproximar los resultados obtenidos en la simulación, con los medidos “in situ”. Dicha fase será más o menos “agresiva” dependiendo de la diferencia existente entre ambos.

En la actualidad, una de las técnicas utilizadas en esta fase de ajuste es el “método iterativo” [46], que consiste en variar los coeficientes de los espectros de absorción ajustando la respuesta real de la sala a la del modelo simulado en el parámetro de tiempo de reverberación. La variación de estos coeficientes se hace con base en la experiencia del usuario, quien elige los materiales a variar y el rango de variación de sus respectivos coeficientes de absorción superficial.

En el caso de salas de pequeño volumen, o con soluciones constructivas simples, el ajuste necesario suele ser mínimo, por lo que el empleo de este método resulta suficiente.

Sin embargo, a medida que aumenta el volumen o la complejidad de las soluciones constructivas (o ambos) se debe aumentar el rango de estas variaciones para poder realizar el pertinente ajuste. Con ello, se aumenta el número de combinaciones que permiten un ajuste correcto del tiempo de reverberación, con lo que también aumenta el número de soluciones posibles que, aún cumpliendo con la premisa de ajustar el modelo con el parámetro de tiempo de reverberación, puede alejar la respuesta del resto de los parámetros de calidad (claridad, definición, inteligibilidad, etc.).

Esta tesis doctoral tiene como objeto la mejora de esta fase de ajuste de coeficientes aplicando la teoría matemática de la optimización de resultados mediante superficies de respuesta. Dicha técnica, trata de resolver algunos de los inconvenientes que presenta el método iterativo. Su aplicación a espacios arquitectónicos de distintas características geométricas y de diferentes materiales (presentados en el anejo de este documento) y el análisis de sus resultados, permite testear y dar validez a la metodología propuesta.

Para conseguir este objetivo, la presente memoria se estructura, por capítulos, cuyo contenido se describe a continuación.

En el capítulo 1, se plantea la problemática de la simulación acústica de recintos empezando por una revisión comentada de su evolución histórica, atendiendo a las aportaciones sobre el tema en las distintas épocas, hasta llegar a su estado actual.

El capítulo 2 introduce, define y analiza los parámetros de calidad acústica que se emplean en esta tesis doctoral. Se insiste en la importancia que tiene el dimensionado, la geometría y la distribución de materiales de los espacios arquitectónicos para conseguir unas adecuadas condiciones de calidad acústica, haciendo un resumen de la evolución temporal de éstos.

El capítulo 3 describe la metodología de superficies de respuesta y detalla su aplicación a la fase de ajuste de coeficientes de absorción acústica de los

revestimientos de un espacio arquitectónico en el proceso de simulación acústica del mismo.

Para probar y verificar la metodología propuesta, se aplica ésta a siete espacios de características geométricas distintas y con variadas soluciones constructivas de sus revestimientos. El capítulo 4, a modo de ejemplo, desarrolla la aplicación a uno de estos espacios, describiendo con detalle cada uno de los pasos seguidos.

En el capítulo 5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la aplicación a los siete recintos realizando un análisis de los mismos en cuanto a márgenes de desviación de los valores de los parámetros acústicos obtenidos en la simulación y los medidos “in situ”.

El capítulo 6 presenta las conclusiones más relevantes de esta memoria doctoral.

Finalmente, el Anejo contiene las mediciones realizadas “in situ” y las simulaciones completas, con aplicación de la metodología propuesta, de los siete espacios arquitectónicos estudiados.

## 1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL

---



# 2

## PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Antes de entrar a describir el conjunto de parámetros que permite valorar de forma objetiva la calidad acústica de una sala, parece conveniente presentar algunas reflexiones sobre este tema.

En primer lugar, hay que señalar que cuando se habla de calidad acústica de un recinto, realmente se refiere a calidad de audición, es decir, a la percepción auditiva que el usuario de la sala tiene sobre la actividad que en la misma se desarrolla.

Partiendo del supuesto de que el acondicionamiento acústico del recinto se realiza teniendo en cuenta el uso o actividad al que se destina, hay que señalar que la percepción subjetiva de la calidad por parte del usuario, se lleva a cabo mediante el pase de encuestas y posterior tratamiento estadístico de la información recogida. Este proceso está asociado a un error inherente a diferentes factores (colectivos encuestados, planteamiento de las encuestas, interpretación de resultados, etc.) Por ello, al hablar de valores de parámetros de calidad, no deben tomarse como valores exactos sino como índices que nos aproximan a este grado de calidad.

Por otra parte, dado que el contenido de este apartado se va a referir a los parámetros contemplados en los programas utilizados en el estudio acústico objeto de este trabajo, es importante no olvidar que existen otros criterios geométricos que

son necesarios para el buen diseño de un recinto y que constituyen la base de la Acústica Arquitectónica.

### 2.2 LA ACUSTICA ARQUITECTÓNICA: RESUMEN DE SU EVOLUCIÓN

Los inicios de los criterios relacionados con la calidad acústica se pierden en la historia. Dichos criterios, utilizados en el diseño de las formas y dimensiones de las edificaciones destinadas a la audición de la palabra o de la música, no van siempre ligados a los de la Acústica como ciencia que estudia las ondas sonoras y su propagación, sino que surgen durante la búsqueda y proyectación de sitios, lugares o construcciones destinadas a reunir a personas con el fin de comunicarse mensajes. Así tenemos las plazas o ágoras, mercados, templos, circos, teatros, odeones, etc.

Son los responsables de la elección o, en ocasiones, construcción de estos espacios (constructores, arquitectos, ingenieros, etc.) los que tuvieron en cuenta las condiciones que debían reunir los mismos para cumplir el objetivo para el que se construían. Así, los anfiteatros griegos se concibieron básicamente con las siguientes características:

- Planta semicircular prolongada con el objetivo de aproximar al escenario el mayor número de espectadores.
- Superficie delantera de escenario circular -orquestra- desnuda y dura para favorecer una emisión directa de los coros o músicos que actuaban sobre ella o una potente reflexión de las voces de los actores en el proscenio.
- Gradas con pendiente pronunciada para hacer llegar a todas las plazas una clara componente directa y una primera reflexión procedente de la orquesta.

Con estos criterios y cuidando su ubicación en un emplazamiento silencioso, pudieron conseguir anfiteatros con distancias superiores a los 60m entre escenario y espectador. El teatro Epidauro constituye un caso singular de extraordinaria calidad acústica (ya que esta distancia supera los 70m y su capacidad es de 14.000 espectadores) sobre el que algunos estudios recientes han revelado que, además de

la geometría, el tipo de piedra utilizado y su corte, contribuyen a optimizar esta buena audición [51].

En el teatro romano la geometría presenta algunas diferencias respecto a las del griego:

- Se minimizan las dimensiones de la orquesta a un pequeño semicírculo junto al proscenio con lo que ya no se produce la potente reflexión del sonido y por tanto obliga a disminuir la distancia máxima entre proscenio y espectador, que no supera los 50m.
- Se incorpora una edificación tras el proscenio que origina en parte una primera reflexión del sonido hacia los espectadores; la planta del graderío es totalmente semicircular.

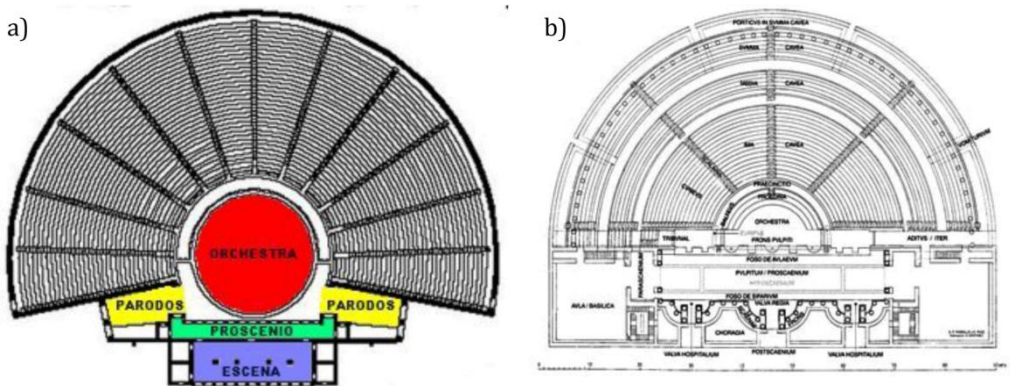


Fig 2.1. Planta de un teatro Griego (a) y Romano (b). (Declercq N.F. 2011)

En estas construcciones comentadas, tanto griegas como romanas, se observa una gran similitud en formas que probablemente se debían al seguimiento de unas normas o criterios concretos. Estas normas están contenidas en la obra de Vitruvio, “Los diez libros de Arquitectura”, concretamente en el Capítulo VIII (*De las tres especies de scenas y de los teatros griegos*) del Libro V. En este capítulo, después de dedicar unos párrafos a relaciones geométricas que deben tenerse en cuenta en la

construcción de los teatros, se describen fenómenos (defectos y virtudes) directamente relacionados con la acústica (\*) [52].

*(\*) “Después de exponer con todo detalle y con todo cuidado lo que precede, debe ahora ponerse la máxima atención en el tema que nos ocupa. En efecto, debe tenerse muy en cuenta el lugar que se elija, donde se despliegue la voz suavemente y no sea obstaculizada por algún elemento, haciéndose incomprendible. Hay diversos lugares que, de modo natural, obstaculizan las vibraciones de la voz —disonantes—, provocando un falso eco, que los griegos llaman catechountes; o bien lugares que reproducen por el eco los sonidos —circunsonantes—, que los griegos denominan periechountes; o bien lugares con resonancias —resonantes—, en griego antechountes, y también hay otros lugares donde retumba la voz —consonantes— de nombre synechountes. Los disonantes son lugares en los que la voz primera, al elevarse, choca con cuerpos sólidos superiores, es rechazada y desciende impidiendo la elevación de las voces siguientes; los circunsonantes son lugares en los que la voz, al esparcirse por todas partes, apaga sus sonidos intermedios y va desapareciendo sin marcar las terminaciones, ofreciendo un significado muy incierto; los resonantes son lugares en los que la voz, al chocar con un elemento sólido, elevándose, se articula erróneamente, produciendo al oído un doble sonido; en los lugares consonantes la voz, potenciada por las partes inferiores va elevándose con mayor volumen y llega al oído con un significado muy nítido. Por tanto, si se pone un cuidado especial en la elección de los lugares para el teatro, el problema de las voces de los actores quedará prudentemente subsanado, bajo el punto de vista de su efectividad. Con estas diferencias quedan indicados los diversos trazados de los teatros: los que se diseñan con cuadrados siguen la modalidad de los griegos y los que se diseñan con triángulos equiláteros, son latinos. Si alguien desea hacer uso de estas normas logrará un gran éxito en la construcción de los teatros”.*

Este es el primer escrito en el que se exponen fenómenos acústicos y se relacionan con las dimensiones y la geometría del lugar, constituyendo el embrión de la futura Acústica Arquitectónica, si se considera como una rama de la Acústica, o

Arquitectura Acústica si se toma como un aspecto de la Arquitectura directamente ligada a la función del espacio que se diseña.

Posteriormente, entre los siglos V y XV (Edad Media), algunas representaciones teatrales tratan de desarrollarse en los templos (Iglesias) pero se encuentran con una acústica muy deficiente para la audición de la palabra, por lo que vuelven a las plazas o lugares públicos. No obstante algunas interpretaciones musicales, como los cánticos gregorianos, encuentran en estos grandes espacios su máxima calidad de audición. Este hecho ya parece indicar una de las grandes diferencias entre la acústica adecuada a la palabra y a la música, asociando a la primera las propiedades de un espacio al aire libre y a la segunda espacios cerrados con cierto volumen.

Es a partir del siglo XV, cuando se recupera el conocimiento de los clásicos desarrollándose una cultura arquitectónica propia del Renacimiento. Los teatros cambian de emplazamiento buscando espacios cerrados de ciertas dimensiones que solo se encuentran en palacios o templos y que se transforman en salas de representación teatral o de audición musical de forma permanente sin, en general, haber sido construidas para estos usos. Estas salas únicamente se distinguían por sus elementos decorativos que solían contener alusiones a temas o instrumentos musicales. En cuanto a las dedicadas a audiciones musicales, el hecho de que los grupos orquestales fueran de número reducido y las salas de pequeñas dimensiones, la calidad acústica resultaba aceptable.

Es importante señalar que el desarrollo de estas interpretaciones en espacios cerrados obliga a introducir cambios en los criterios de diseño de los mismos, tanto desde el punto de vista arquitectónico como acústico. En cuanto al primero, se lleva a cabo un auténtico redimensionado, ya que los escenarios ya no necesitan dimensiones tan grandes, se han de proyectar los techos de forma adecuada y la planta debe recuperar la forma clásica semicircular con el objeto de acercar el espectador al escenario. En cuanto al segundo, el volumen confinado origina una reverberación en el recinto que obliga a ajustar dimensiones y revestimientos para conseguir una adecuada calidad.

En el siglo XIX tuvo lugar un hecho que, por primera vez, obligó a la colaboración entre compositor (Richard Wagner) y arquitecto (Otto Bruckwald). El resultado fue el diseño del Festspielhaus de Bayreuth (Teatro del Festival de Bayreuth) en Baviera,

Alemania, dedicado casi con exclusividad a la representación de las óperas compuestas por Wagner. Esta sala se construyó de acuerdo con unos principios cuyo objeto era la representación de un ciclo de óperas (El anillo del Nibelungo) y marcó un hito en el diseño de salas en Alemania, tratando de conseguir que el espectador quede totalmente absorbido por el arte. Al parecer, Wagner adaptó el diseño, sin permiso del arquitecto, de un proyecto de Gottfried Semper para un teatro en Múnich que no llegó a realizarse. Aunque la obra la dirigió Otto Bruckwald, estuvo en todo momento bajo la supervisión del propio Wagner. En contra de la tradición, el auditorio presenta una planta en abanico escalonado, sin galerías ni palcos, con visibilidad perfecta del escenario desde las 1.925 localidades.

Otro edificio emblemático de la época y representativo del teatro de la ópera clásico fue la Ópera de París del arquitecto Jean-Louis Charles Garnier. Aunque su tipología responde a la del teatro tradicional, su diseño fue juzgado como singular por las dificultades que presentaba de encuadrarlo en estilo concreto [53]. Tampoco la acústica siguió unos determinados criterios, tal como el propio Garnier reconoce al escribir sobre ella:

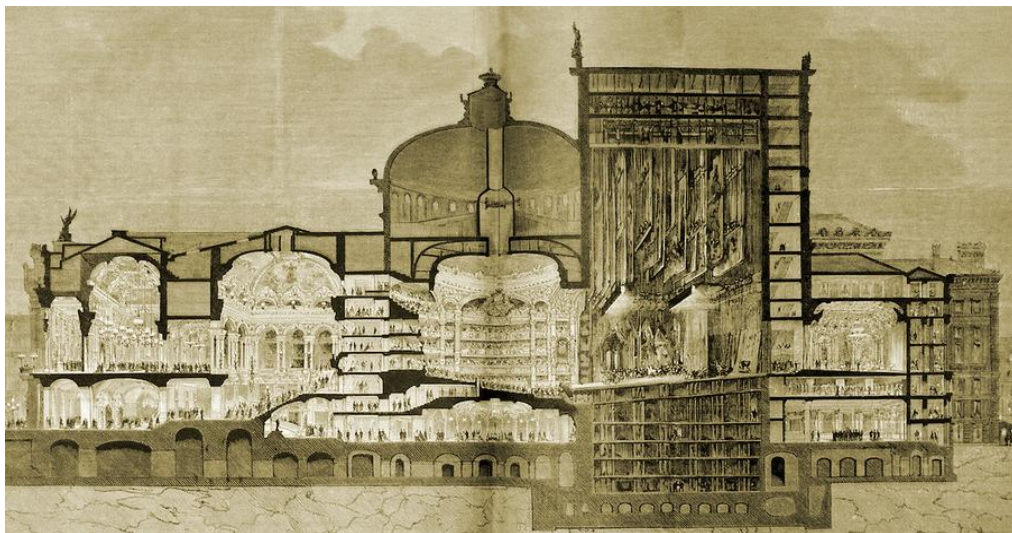


Fig 2.2. Sección del Palacio de la Ópera de Garnier.(Lorda J. 2008)

*"Traté de aprender esta ciencia extraña (se refería a la Acústica), pero ....en ninguna parte pude encontrar criterios que me guiaran, por el contrario, solo encontré normas contradictorias.... debo confesar*

(hablando de la acústica de la ópera construida) *que no he adoptado principio alguno, que mi plan no se ha basado en ninguna teoría, y que dejo el éxito o el fracaso a la casualidad ..... como un acróbata que cierra los ojos y se aferra a las cuerdas de un balón que asciende "* (Garnier, 1880).

Durante este mismo siglo, los espacios de interpretación musical pasan a ser de grandes dimensiones para adaptarse a las composiciones musicales que se hacían para grandes orquestas. La percusión adquiere más protagonismo, confiriendo mayor sonoridad a las interpretaciones. Es la época de una generación de grandes músicos, Schubert, Mendelssohn, Schumann, Mahler, Strauss, Brahms, etc., que introducen una amplia variedad de tonos y de timbres incorporando y ampliando la orquesta a nuevos instrumentos cuya audición requiere de salas reverberantes para conseguir un sonido abundante en tonos y pleno en sonoridad.

Se construyen grandes salas de conciertos de planta rectangular (en forma de caja) considerada como idónea desde el punto de vista acústico. Entre ellas, la Musikvereinsaal de Viena (de T. von Hansen en 1867-69) y la Concertgebouw de Amsterdam (de A. L. van Gendt en 1887-88) con aforos en torno a los 2000 espectadores.

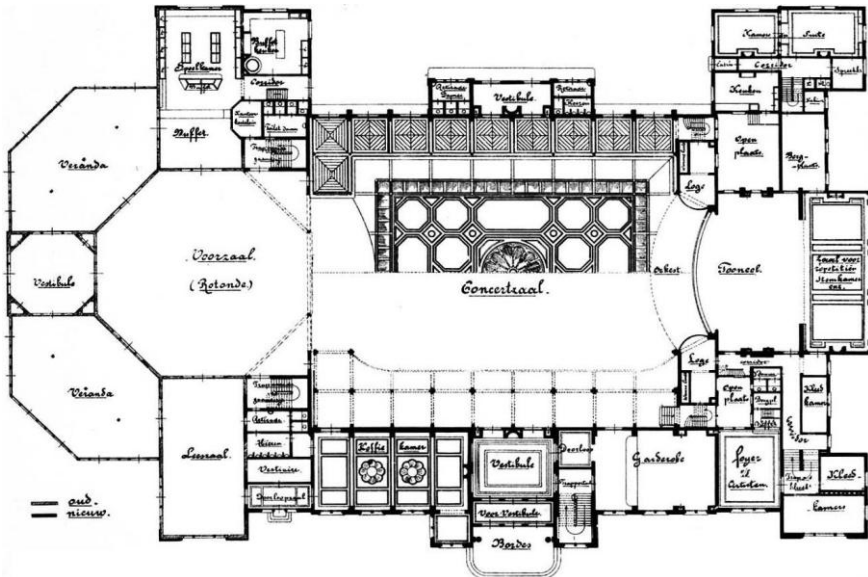


Fig 2.3. Planta del Concertgebouw de Amsterdam. (Beranek L.L. 1962)

## 2. PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA

---

En nuestro país la situación de la Acústica Arquitectónica se encuentra alejada de estos criterios ya asumidos por los países centroeuropeos. En el Resumen de Arquitectura de la Biblioteca Nacional, correspondiente al año 1897, hay un capítulo dedicado a la acústica de salas, escrito por el arquitecto asturiano Eduardo Adaro, que pone de manifiesto esta situación. Se manejan una serie de criterios y de reglas, en ocasiones contradictorias y casi siempre confusas, que ni técnicos ni constructores llegan a aplicar con racionalidad [54].

En 1895 tuvo lugar un hecho que constituiría el inicio de la Acústica Arquitectónica como ciencia. La problemática acústica que presentaba la sala Fogg, de la Universidad de Harvard, la hacía totalmente inadecuada para conferencias debido a su falta de inteligibilidad y en su adecuación habían fracasado los veteranos profesores del Departamento de Física. A un joven profesor de Óptica, Wallace Clement Sabine (1868-1919), que no tenía una misión asignada en el organigrama de la universidad, se le brindó la oportunidad de resolver este problema y Sabine aceptó el reto.

Para iniciar su investigación tomó como referencia dos salas; el Sanders Theatre, que era considerada una sala con buena acústica y el Jefferson Physical Laboratory con una acústica tolerable.

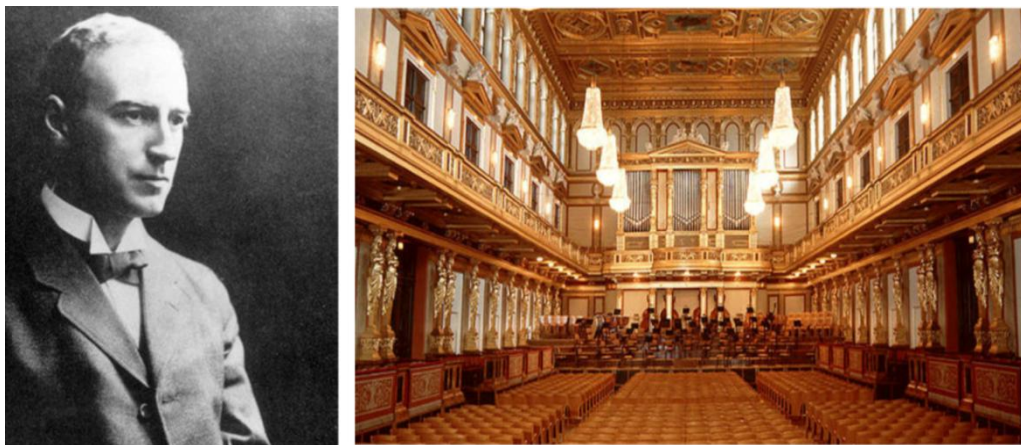


Fig 2.4. W.C. Sabine (izquierda) y el Boston Symphony Hall (derecha). ([www.bso.org](http://www.bso.org). 2007)

Con unos cuantos tubos de órgano, un cronógrafo, una batería, un compresor electro-neumático, y su bien disciplinado sentido del oído, Sabine y un grupo de



jóvenes asistentes, convirtió la sala Fogg en un auténtico laboratorio para analizar el comportamiento del sonido en espacios cerrados.

En esencia, con el cronógrafo medía el tiempo que tardaba en extinguirse el sonido emitido por un tubo de órgano en función de los distintos materiales (alfombras, cojines, personas, etc.), comprobando que, en efecto, este tiempo variaba con el tubo utilizado (la frecuencia) y la cantidad y el tipo de materiales introducidos en el recinto (la absorción).

Después de casi cinco años de experimentos, llegó a concluir que la calidad acústica, depende del tamaño del recinto y de la suma de las superficies de absorción, definiendo formalmente el tiempo de reverberación, que sigue siendo en la actualidad el parámetro más importante para medir la calidad acústica de una sala.

Este fue el inicio de la moderna ingeniería acústica, siendo uno de sus primeros ejemplos la acústica del Boston Symphony Hall, diseñada por Sabine y considerada como una de las mejores salas de conciertos del mundo.

A mediados del siglo XX (entre los años 1960 y 1963) se construye en Berlín la sala que será la futura sede de La Filarmónica y que constituye un auténtico hito, tanto en la Arquitectura de auditorios, como en la Acústica de los mismos. Fue diseñada por el arquitecto Hans Scharoun e impulsada por el que fue director de la Filarmónica durante muchos años, Von Karajan.

El diseño de la sala rompe con el principio clásico de ubicar al espectador frente a los músicos, tratando de que éstos se encuentren rodeados de público. El arquitecto gana el concurso de este proyecto con el lema "Música en el punto central" y esto es lo que al final se consigue, resultando una significativa innovación tipológica. El escenario se ubica en la zona central de una planta en forma de pentágono, aunque no en su centro geométrico. El público se distribuye a su alrededor agrupándose en pequeñas terrazas, lo que a pesar de su gran dimensión, confiere una intimidad musical más propia de salas pequeñas.

La acústica de la sala, diseñada por Lothar Cremer, es excelente; en cada asiento el sonido es claro y cercano. Se dice que se puede distinguir cada una de las voces e instrumentos desde cualquiera de cada uno de sus 2.440 asientos.

## 2. PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA

---

Esta tipología de escenario más o menos central y disposición del público en terrazas, es la que, a partir de la fecha de la inauguración de la Berliner Philharmonie, regiría en la mayor parte de salas de audición musical hasta el momento actual.

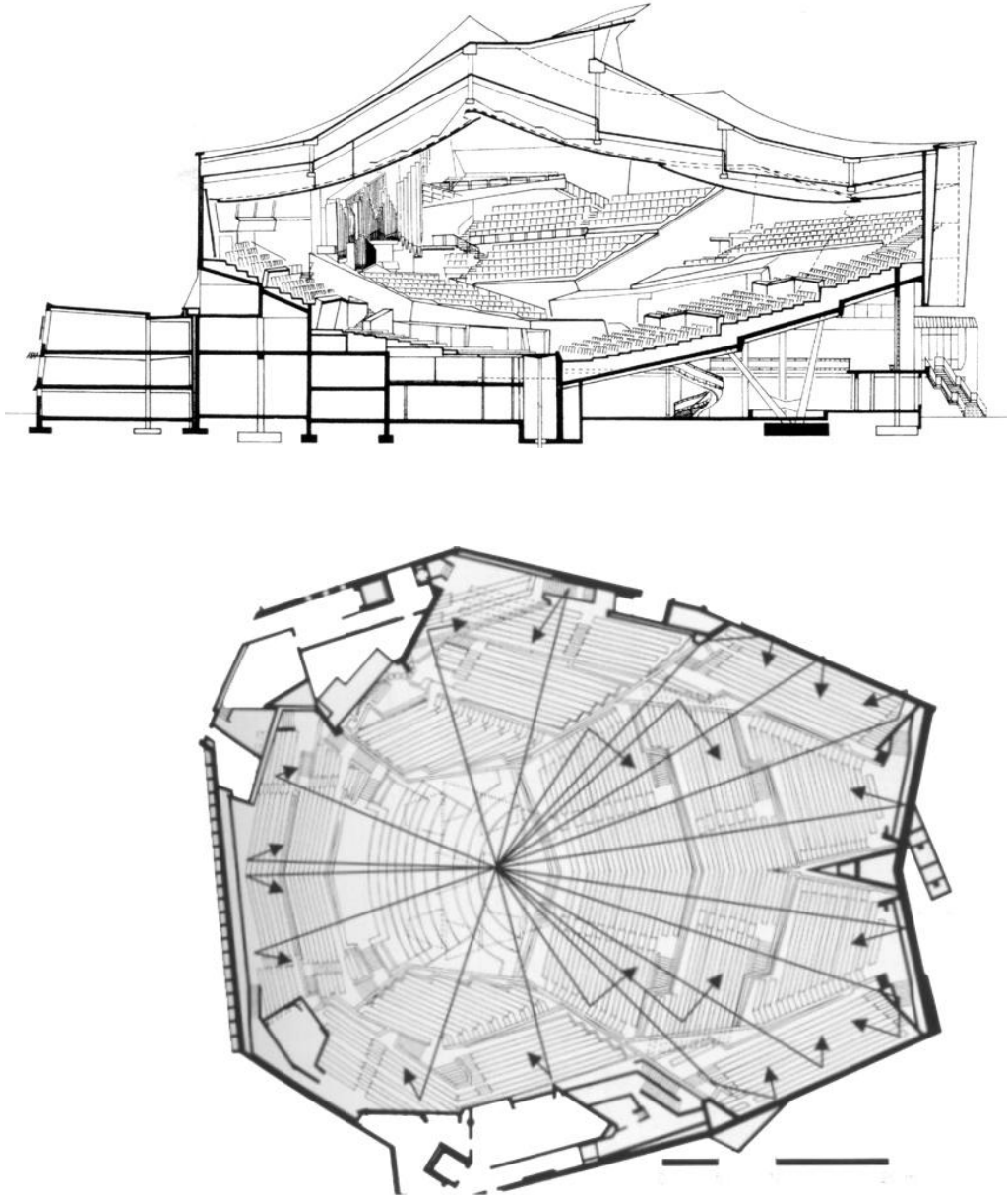


Fig 2.5. Sección y planta de la Berliner Philharmonie. (Beranek L.L. 1962)

En cuanto a los parámetros de calidad, a partir del tiempo de reverberación definido y cuantificado por Sabine, a lo largo del siglo XX se han definido otros muchos, tratando de cuantificar aspectos de la calidad de audición ligados tanto a parámetros temporales como energéticos.

## 2.3 PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA

Hechas estas consideraciones, se pasa a definir y analizar los principales parámetros acústicos utilizados en los programas empleados en este estudio (DIRAC para las mediciones y procesado de datos “in situ” y ODEON para las simulaciones virtuales).

### 2.3.1 Tiempo de reverberación

Se define la reverberación como la persistencia de un sonido en un recinto, una vez ha cesado la emisión del mismo. Esta persistencia se debe al conjunto de reflexiones sucesivas del frente de onda emitido por la fuente sobre las distintas superficies que delimitan el recinto. En la mayoría de las ocasiones, esto sucede cuando un frente de onda incide contra las paredes, techo, suelo, etc., de un recinto. Este conjunto de reflexiones constituye el denominado campo reverberado.

Dado que cada sonido, dependiendo de su intensidad y espectro, puede persistir más tiempo una vez detenida su emisión, es necesario un criterio común para poder determinar un parámetro comparable entre diferentes recintos.

Wallace Clement Sabine definió en 1903 el tiempo de reverberación,  $T_R$  o  $T_{R60}$ , como el tiempo necesario para que, una vez detenida la emisión de un sonido, la intensidad del mismo disminuya una millonésima parte (en escala de decibelios, 60dB). [55]. Asimismo, definió una expresión matemática que determina el tiempo de reverberación de un recinto,

$$T_R = \frac{0,162V}{A}$$

siendo  $V$  el volumen de la sala y  $A$  la absorción de la misma.

Esta expresión se aplica en condiciones de campo difuso y distribución uniforme del material absorbente en la sala. Esto hace que el criterio de Sabine sea más preciso en salas vivas y con baja absorción.

La absorción acústica,  $A$ , de una sala viene dada por

$$A = \sum_{i=1}^{i=n} S_i \alpha_i$$

siendo  $\alpha_i$  el coeficiente de absorción del material de revestimiento de la superficie  $S_i$ .

Desde Sabine hasta la actualidad se han propuesto diferentes expresiones para el cálculo de este parámetro, pero por su sencillez y su facilidad de uso en el predimensionado del recinto, la fórmula dada por Sabine sigue vigente en su uso, teniendo en cuenta sus hipótesis y sus limitaciones.

Una de estas limitaciones es la dada por el límite de los valores del coeficiente de absorción de los materiales. Esta limitación se pone claramente de manifiesto en el caso extremo de un recinto con la totalidad de sus superficies con absorción total.

Esta limitación la resuelven Eyring y Norris (1930-32) [55], mediante su expresión:

$$T_R = \frac{0,162V}{-S \ln(1 - \hat{\alpha})}$$

siendo  $S$ , la superficie total interior definida por:

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} S_i$$

y  $\hat{\alpha}$  el coeficiente de absorción medio definido por:

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i S_i}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i}$$

Con estas expresiones, es posible calcular el coeficiente de absorción de un material en cámara reverberante. Para ello, se mide el tiempo de reverberación de la cámara vacía, se introduce el material de revestimiento a estudiar sobre una de las superficies, y se vuelve a medir el tiempo de reverberación.

En caso de introducir un elemento con un coeficiente de absorción muy alto, las hipótesis establecidas sobre la distribución estadística de la energía acústica no se cumplirían, pudiendo dar como resultado valores de alfa superiores a la unidad (lo cual no es posible). Esta limitación la resuelve Millington [56], definiendo un nuevo coeficiente de absorción,  $\alpha'$ , mediante la expresión,

$$\alpha = \ln\left(\frac{1}{1-\alpha'}\right)$$

que introducido en la expresión de Sabine, resulta:

$$T_R = \frac{0,162V}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i \ln\left(\frac{1}{1-\alpha'_i}\right)}$$

En todas las expresiones anteriores, la pérdida de energía acústica se produce en las reflexiones de las ondas sobre los cerramientos de la sala. Sin embargo, existe una pérdida durante la propagación del sonido a través del aire (transformación de la energía sonora en energía calorífica) que puede afectar al tiempo de reverberación de una sala de grandes dimensiones. Esta disipación no afecta por igual a todas las frecuencias (depende de la longitud de onda, de la temperatura y de la humedad), siendo las bajas frecuencias las menos afectadas.

En recintos pequeños, las distancias recorridas por las ondas también lo son, por lo que la disipación es mínima, pudiéndose despreciar las pérdidas producidas por el aire. Sin embargo, en recintos grandes esta disipación puede llegar a ser notable, sobre todo a partir de la frecuencia de 3000Hz.

Esta pérdida depende del volumen de la sala, de las condiciones ambientales (temperatura y humedad) de la misma y de la frecuencia del sonido. Dicha pérdida se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire,  $m$ . En la gráfica siguiente se muestra un conjunto de curvas mediante las que es posible

determinar el valor de  $m$  en condiciones normales de presión y temperatura ( $P_0 = 105\text{Pa}$  y  $20^\circ\text{C}$ ), para cada frecuencia y porcentaje de humedad relativa del aire.

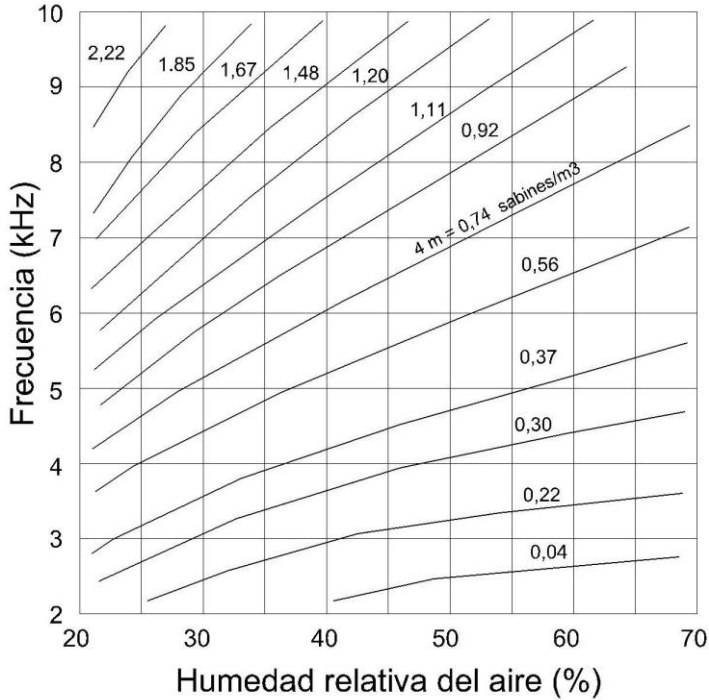


Fig 2.6. Gráficas para la determinación de la constante de atenuación del sonido en el aire,  $m$ . (Marshall L. 2006)

Por tanto, se pueden tabular los resultados, dependiendo de la frecuencia y de las condiciones ambientales, como constante ( $4m$ ), y multiplicarlos por el volumen de la sala.

Con ello, la expresión de Sabine quedaría de la siguiente forma:

$$T_R = \frac{0,162V}{A + 4mV}$$

A la hora de medir este parámetro, no siempre es posible poder disminuir 60dB la intensidad de un sonido (conflictos con ruido de fondo, intensidad de señal insuficiente...), es por ello que basándose en la linealidad de la curva de caída

energética se puedan medir los tiempos de reverberación midiendo tramos de esta curva.

Así, el EDT (Early Decay Time) se calcula [57] midiendo el tiempo de caída de los primeros 10dB, es decir, de 0dB a -10dB y multiplicando su resultado por 6 (para extrapolar la caída de 60dB). El  $T_{R10}$  se calcula sobre la caída de los primeros 10dB tras un receso de 5dB, es decir, sobre la caída de -5dB a -15dB, multiplicado por 6. El  $T_{R20}$  se calcula sobre la caída de -5dB a -25dB, multiplicado por 3. El  $T_{R30}$ , sobre la caída de -5dB a -35dB, multiplicado por 2.

Si los resultados de todos los parámetros (EDT,  $T_{R10}$ ,  $T_{R20}$ ,  $T_{R30}$ ,  $T_{R\dots}$ ) son similares, es un indicativo de la estabilidad de esta caída de energía y por tanto es también un valor añadido de calidad.

Cabe destacar, que dado que los diferentes materiales actúan de distinta forma en las diferentes frecuencias (espectro de absorción), su respuesta serán valores distintos de  $T_R$  para cada frecuencia (bandas de octava o tercios de octava). La representación de los valores de  $T_R$  en función de la frecuencia es la curva tonal.

Esta curva tonal, se puede representar en bandas de octava (centradas en las frecuencias 63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz y 8000Hz) o en tercios de octava (centrados en los correspondientes tercios de las octavas anteriores). En general, salvo para usos musicales, en la curva tonal se prescinde de las octavas extremas de 63Hz y de 8000Hz, quedando las seis bandas centrales de 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz y 4000Hz, a las cuales, en edificación, se les suele denominar bajas frecuencias a las dos primeras, frecuencias medias a las dos centrales y frecuencias altas a las dos últimas.

Para expresar el  $T_R$  de una sala con un solo valor se suele utilizar el denominado  $T_{Rmid}$ , definido como el valor medio del  $T_R$  a las frecuencias medias de 500Hz y 1000Hz.

$$T_{Rmid} = \frac{T_{R500} + T_{R1000}}{2}$$

Dos parámetros directamente relacionados con el tiempo de reverberación, que nos dan una idea de la forma de la curva tonal son la calidez y el brillo.

La calidez acústica, BR (Bass Ratio), es definida por Beranek [58] como la relación entre las sumas de los tiempos de reverberación de las bandas de bajas frecuencias y los de las bandas medias. En valores apropiados, representa la riqueza de graves en la sala y denota la suavidad de la respuesta de la misma a la interpretación musical.

$$BR = \frac{T_{R125} + T_{R250}}{T_{R500} + T_{R1000}}$$

El brillo, Br, es el parámetro equivalente al BR [59] pero dedicado al análisis del comportamiento de los tiempos de reverberación de las frecuencias altas en el recinto. Se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación de las bandas de frecuencias altas y los de las bandas medias y representa la riqueza de los armónicos como consecuencia del realce de los agudos.

$$Br = \frac{T_{R2000} + T_{R4000}}{T_{R500} + T_{R1000}}$$

Evidentemente, el conjunto de valores  $T_{Rmid}$ , BR y Br nos dan una idea bastante aproximada de la forma de la curva.

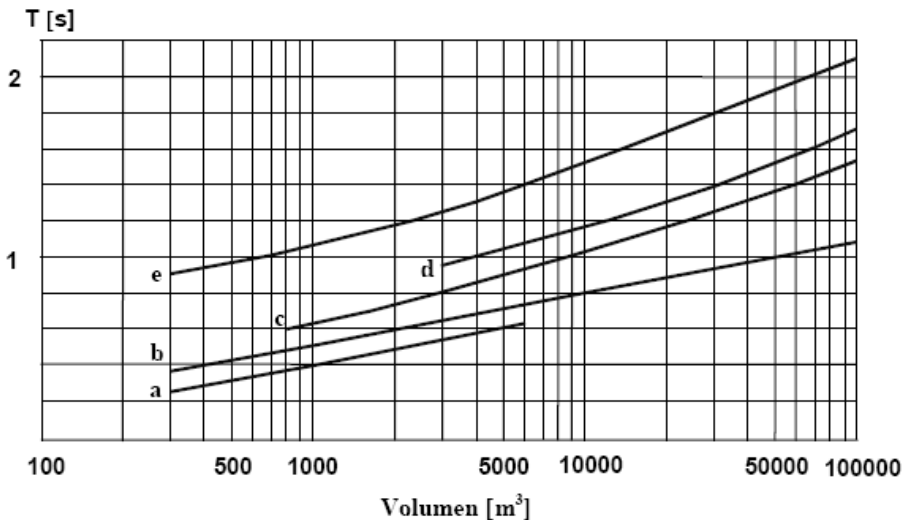


Fig 2.7. Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de sala (Beranek L.L. 1962).

- (a) Estudios de radiodifusión para voz.
- (b) Salas de conferencias.
- (c) Estudios de radiodifusión para música.
- (d) Salas de conciertos.
- (e) Iglesias.



### 2.3.2 Claridad

El índice de claridad o claridad musical,  $C_n$  (early to late arriving sound energy ratio), pretende indicar el grado de separación entre los diversos sonidos individuales que integran una composición musical. Su expresión analítica, propuesta por Reichard y Abdel Alim [60] es la siguiente:

$$C_n(dB) = 10 \log \frac{\int_0^{n \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{n \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

El cociente, expresado en dB, se establece entre la energía que llega en los primeros  $n$  milisegundos desde el sonido directo y la que llega después de estos  $n$  milisegundos. Habitualmente el valor de  $n$  suele ser 50 o 80 milisegundos.

Cincuenta milisegundos es el límite de intervalo de tiempo en el cual el oído humano integra o une los sonidos y los percibe como uno, reforzando al sonido directo. Por tanto, el  $C_{50}$  es un buen parámetro para poder determinar la claridad de la palabra.

En algunos casos, se estudia el promedio de las 3 frecuencias 500Hz, 1000Hz y 2000Hz, designándose como  $C_{50}(3)$  o  $C_{80}(3)$  respectivamente.

Según L.G. Marshall [61], el valor representativo de  $C_{50}$  se calcula como media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500Hz, 1kHz, 2kHz y 4kHz, y recibe el nombre de “speech average”. Los factores de ponderación son: 15%, 25%, 35% y 25%, respectivamente, de acuerdo con la contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad de la palabra.

El valor recomendado de  $C_{50}$  correspondiente a cada punto de una sala ocupada debe ser mayor que 2dB. Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra (STI) y por ende, la comprensión del mensaje (ya sea musical o hablado) en el punto considerado.

Para la música, al tener tiempos más largos, se toman los primeros 80 milisegundos ( $C_{80}$ ). En este caso, pequeños valores positivos definen una sala sorda,

muerta, en la que no existe armonía en el desarrollo musical; sin embargo, una sala con pequeños valores negativos definen a la sala como bien acondicionada para la expresión musical. Los valores aconsejados para el C80 son los comprendidos entre 0 y -4 dB. Se puede observar los valores de C80 de diferentes salas de audición en la siguiente gráfica:

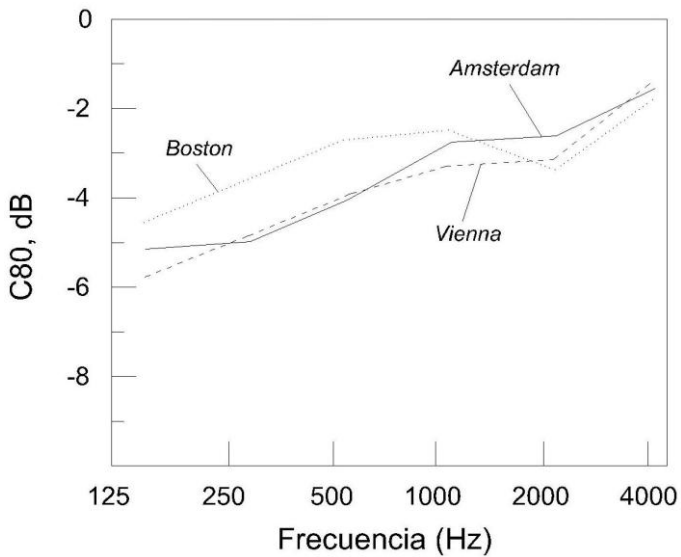


Fig 2.8. Comparación C80 en diferentes salas (Marshall L. 2006).

### 2.3.3 Definición

En 1953, Thiele [62] incorporó como nuevo parámetro la Definición,  $D_n$ , (early to total sound energy ratio). Se dice que una sala tiene buena definición cuando se pueden distinguir claramente unos instrumentos de otros, percibiendo sus notas. Cuantitativamente, viene dada por la relación entre la energía recibida en los primeros “n” milisegundos del decaimiento energético y el total de energía recibida, es decir:

$$D_n = \frac{\text{Energía recibida en los primeros } n \text{ milisegundos}}{\text{Energía recibida total}}$$

$$Dn = \frac{\int_0^{nms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty ms} p^2(t) dt}$$

Este parámetro va ligado a la inteligibilidad de la palabra, de modo que cuanto mayor sea su valor el mensaje hablado es más inteligible. Nótese que un sonido puede ser escuchado, pero no entendido. La Definición no tiene en cuenta la aportación negativa del ruido de fondo.

Por otra parte, conocido el valor  $C_n$  en una determinada banda de frecuencias, se calcula de forma inmediata el valor de la definición  $D_n$  en dicha banda y viceversa. La fórmula obtenida directamente de las definiciones de ambos parámetros es la siguiente:

$$Dn = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_n}{10}}}$$

Se entenderá como valor óptimo de Definición al que resulta superior a 0,5.

### 2.3.4 STI, RASTI.

El STI (Speech Intelligibility Index) es el índice de inteligibilidad de la palabra. Este índice se acuñó a principios de los 70 por Steenek y Houtgast [63] y se cuantifica del 0 (inteligibilidad nula) al 1 (inteligibilidad total). El STI depende del ruido de fondo y del tiempo de reverberación de la sala.

El cálculo se realiza sobre la base de que todo discurso está compuesto por una serie de modulaciones de baja frecuencia. El test STI ejecuta una señal de modulación similar al habla, el receptor procesa el espectro recibido y asume las reducciones en la profundidad de modulación como pérdidas de inteligibilidad.

Existen otros estándares de inteligibilidad como el método CVC de palabras sin sentido o el método británico de inteligibilidad de comprensión de palabras con sentido fuera de contexto. Los resultados obtenidos son bastante similares.

## 2. PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA

---

Existe una modificación de este test, el STIPA (Speech Transmission Index for Public Address Systems) que sirve para evaluar la inteligibilidad de la palabra en sistemas de megafonía destinados al público (estaciones, aeropuertos, etc.).

El RASTI (Rapid Speech Transmisión Index) es un proceso desarrollado también por Steenek y Houtgast [64] y la empresa Brüel & Kjaer, siendo una alternativa más sencilla que el STI ya que solamente mide dos octavas centradas en 500Hz y 2kHz, respectivamente. Utiliza una señal similar a la del habla y, al igual que el STI, asocia las reducciones en la profundidad de la modulación con pérdida de inteligibilidad.

El RASTI es un sistema sencillo que permite realizar medidas rápidas de recintos destinados a la audición o con sistemas electroacústicos instalados. Sin embargo la simplificación de este método conlleva algunos problemas que deben ser tenidos en cuenta.

Al evaluar solamente dos bandas de frecuencias, se asume que la respuesta se extiende de manera razonablemente equilibrada desde los 100Hz hasta los 8000Hz que es lo esperado en recintos con un buen diseño acústico. Sin embargo, para espacios con acústica deficiente, el RASTI puede proporcionar resultados demasiado optimistas.

A continuación se muestra una tabla de valores de inteligibilidad y la calidad asociada al recinto.

STI/RASTI	Valoración recinto
1,00 - 0,88	Excelente
0,87 - 0,66	Buena
0,65 - 0,50	Aceptable
0,49 - 0,36	Pobre
0,35 - 0,24	Mala

*Tabla 2.1. Valores de STI/RASTI y su calificación.*

# 3

## **APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA A LA SIMULACIÓN ACÚSTICA**

### **3.1 MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (RESPONSE SURFACE METHOD – RSM)**

La Metodología de Superficies de Respuesta, o Response Surface Method (en adelante RSM), es un conjunto de técnicas deterministas, matemáticas y estadísticas útiles para el modelado y análisis de problemas que permite optimizar una respuesta que depende de diversas variables [65].

El RSM es una técnica utilizada tanto en el diseño, la formulación, el desarrollo de mecanismos y el análisis de nuevos estudios y productos científicos, como en la mejora de procesos preexistentes de difícil solución, a los que su aplicación ha permitido llevar a feliz término [66][67]. Las aplicaciones más comunes del RSM se encuentran en usos industriales, biología, ciencias sociales, biotecnología de alimentos y ciencias aplicadas a la ingeniería.

El RSM fue planteado y empleado por primera vez en 1951 por G.E.P. Box y K.B. Wilson quienes tras analizar una serie de ensayos experimentales aplicados a un proceso (industrial, biológico, etc.) expresaron, mediante un polinomio de primer grado, el resultado de dicho proceso en función de las variables que intervenían en los ensayos. Sin embargo, eran conscientes de la aproximación que suponía este modelo, falto de precisión, aunque con cierta facilidad para ser adaptado a múltiples

usos, aun siendo parcialmente desconocido el proceso de ensayo. Estos autores, no solo plantearon el problema analíticamente sino que lo representaron gráficamente, obteniendo como resultado las curvas de respuesta (en 2 dimensiones) o las superficies de respuesta (en 3 dimensiones), para una o dos variables independientes estudiadas respectivamente.

Sin embargo, no fue hasta la contribución de H.O. Hartley en 1959, quien, basándose en sus investigaciones intentando crear modelos de máximo rendimiento económico (investigaciones que suponían uno de los principales campos de estudio en la etapa posterior a la Segunda Guerra Mundial), planteó las ecuaciones de optimización, las cuales darían significado práctico al RSM [68].

Uno de los factores más importante del RSM fue la inclusión de límites de los valores de las variables en el estudio, pudiendo buscar una respuesta óptima dentro de un margen de valores para cada una de ellas. Característica que hizo que el RSM fuese empleado mayoritariamente en sus inicios en el sector industrial (optimización de procesos industriales) [69].

#### **3.1.1 Métodos y diseños de Superficie de Respuesta**

Los RSM son modelos y diseños para trabajar en procesos que responden de forma lineal o cuadrática a la variación de las variables, encontrando los valores óptimos de cada una de ellas para conseguir un resultado concreto. En el caso de existir más de una solución, se selecciona la que cumple de forma óptima el compromiso fijado inicialmente como resultado. Cuando existen limitaciones en los datos de diseño (por ejemplo, en la elaboración de un determinado compuesto químico el porcentaje máximo de un excipiente exigido por la legislación) deben eliminarse aquellos resultados que no cumplan los requerimientos de dichas limitaciones [70].

Habitualmente, la superficie de respuesta puede ser visualizada gráficamente. Esta visualización es útil a la hora de entender la topografía de la superficie de respuesta (valles, subidas, depresiones, etc.). La forma más habitual de representar estas superficies es mediante un sistema de ejes cartesianos, representando las variables en los ejes  $X_1$  y  $X_2$ , y la respuesta generada en el eje perpendicular a ambos,  $Y$ . Esta representación tridimensional en ocasiones es sustituida por las llamadas regiones de superficie de respuesta. En este caso, resulta más sencillo observar los

resultados ya que se presentan en un gráfico bidimensional, en el cual, las variables siguen representándose en los ejes  $X_1$  y  $X_2$ , pero la respuesta condicionada pasa a representarse por regiones con contornos de igual valor (habitualmente se define un criterio de niveles o estratos de resultados para facilitar la interpretación de los mismos en el gráfico). Así, tal como se muestra en la figura 3.1, los valores de las variables comprendidos entre 70 y 76 ( $x_1$ ) y 128 y 135 ( $x_2$ ) dan como respuesta valores superiores a 44.

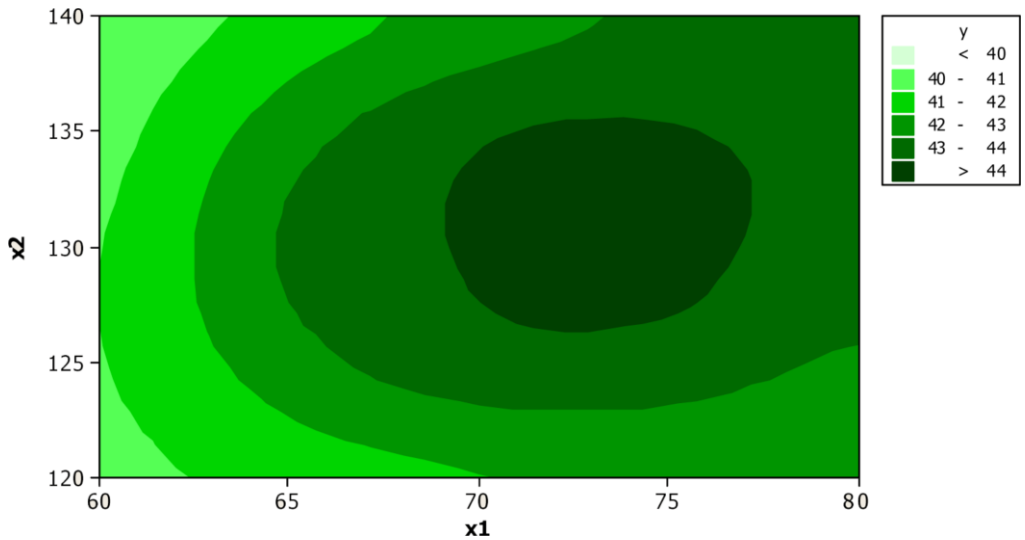


Fig 3.1. Ejemplo de representación bidimensional de regiones de respuesta. (Bradley N. 2007)

### 3.1.2. RSM. Estimación de errores

Se define el valor real esperado como  $\eta$ , que toma la variable de interés considerada influida por los niveles de  $k$  factores cuantitativos  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , lo cual puede expresarse mediante la ecuación

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

de tal forma que la variable respuesta puede expresarse como:

$$Y = \eta + \varepsilon = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon$$

donde  $\varepsilon$  es el error observado en la respuesta.

Dicho error define la falta de linealidad en las diferentes respuestas obtenidas. En el caso de ensayos realizados en el ámbito de la edificación, este error, habitualmente, viene dado bien por la variación de las condiciones de entorno (temperatura, humedad, luminosidad, etc.) o bien, por el posible pequeño error de precisión cometido en cada ensayo independiente.

La forma de la función que determina la relación entre los factores y la variable respuesta es, en general, desconocida, por lo que el primer objetivo del RSM consiste en establecer analíticamente una aproximación apropiada de dicha función. Para cumplir tal cometido, se propone un modelo de ecuación, generalmente polinómica en los  $k$  factores, y se selecciona un conjunto de valores para cada variable  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  sobre los que realizar los ensayos experimentales.

El objetivo de estos ensayos es doble. Por un lado se emplean para la obtención de estimaciones de los coeficientes  $(f(x_1, x_2, \dots, x_k))$  en el modelo propuesto (habitualmente, empleando el método de los mínimos cuadrados), y por otro, para la estimación de la variación del error experimental (dicha estimación será más o menos aproximada en función de los ensayos que se realicen).

Se realizan contrastes sobre el modelo y si éste se considera adecuado, puede emplearse como función de aproximación. En ese caso, la superficie de respuesta se estudia en términos de la superficie ajustada, ya que su análisis será muy próximo al sistema real [71].

Se toman como resultados óptimos, aquellos que cumplan el compromiso fijado como respuesta deseada, estimando que el valor del error observado tienda a cero. Es decir, del conjunto de resultados que cumplan el compromiso de obtener una respuesta  $Y$  concreta, se tomarán como óptimos aquellos valores  $x_1, x_2, \dots, x_k$  cuya aproximación al modelo de funcionamiento tenga un error de menor valor.

### **3.2 APLICACIÓN A LA SIMULACIÓN ACÚSTICA. AJUSTE DE COEFICIENTES.**

En la simulación acústica arquitectónica, se trabaja con el interior de un espacio arquitectónico en el que se parte del conocimiento de los coeficientes de absorción de las  $N$  soluciones constructivas que constituyen las superficies interiores del



mismo. Estos  $N$  elementos (materiales, soluciones constructivas superficiales, mobiliario, etc.) se caracterizan por sus correspondientes espectros de absorción, que en el ámbito de la edificación, se limitan a las bandas de frecuencias cuyos centros de octava están comprendidos entre 63Hz y 8000Hz.

Para poder aplicar el RSM a este sistema, es necesario partir del conocimiento de los coeficientes de absorción de  $N-2$  materiales o soluciones constructivas de revestimiento y tomar como variables independientes las otras dos ( $x_1, x_2$ ) cuyos valores condicionan la respuesta  $Y$  que es el tiempo de reverberación obtenido utilizando estos valores. Es decir, que las variables independientes en este caso son los dos coeficientes de absorción acústica desconocidos que regulan la respuesta de la función.

Dado que se tienen tantos espectros como soluciones constructivas constituyen los revestimientos del recinto, y que mediante el RSM únicamente se va a trabajar con dos variables independientes ( $x_1, x_2$ ), el primer paso es analizar las soluciones constructivas para proceder a la selección de estas dos variables.

Se seleccionan como incógnitas, las dos soluciones constructivas cuyo funcionamiento específico sea menos conocido. Es decir, aquellas soluciones constructivas superficiales que:

- Por sus dimensiones, complejidad o antigüedad no puedan haberse ensayado anteriormente en un laboratorio (grandes sillares medievales, calicestrados, etc.)
- Por su disposición particular en el recinto objeto del estudio, su funcionamiento se prevea que vaya a diferir del normal ensayado en el laboratorio. Los revestimientos de placas de cartón-yeso son un claro ejemplo de esto último, ya que en los ensayos de laboratorio la cámara de aire es de espesor controlado, mientras que en la realidad esta cámara puede tener grandes variaciones: desde un trasdosado con cámara variable, a paneles constituyendo un techo, colgado mediante tirantes o anclado en una subestructura, que puedan modificar el valor del coeficiente de absorción del sistema.
- Por su variación de funcionamiento con el paso del tiempo, por sufrir cambios en su composición. En este caso entrarían algunos de los

### 3. APLICACIÓN DEL RSM A LA SIMULACIÓN ACÚSTICA

revestimientos de los edificios con valor patrimonial, ya que en muchos casos han sufrido incendios, barnizados, tratamientos, intervenciones químicas, refuerzos, etc., dejando como material superficial uno distinto al original.

Por tanto, de acuerdo con el criterio antes enunciado, se fijarán los valores de los coeficientes de absorción de las soluciones constructivas de cuyo funcionamiento se dispongan más datos (materiales rígidos, reflectantes, pavimentos, aplacados de piedra, revestimientos de madera encolados, etc.).

En estas condiciones, teniendo N-2 variables fijadas (constantes) y dos variables independientes como incógnitas ( $x_1$ ,  $x_2$ ) ya se puede aplicar el RSM. Sin embargo, tal y como se indica anteriormente, los espectros de absorción se componen de 8 coeficientes, uno por centro de banda de octava (63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1KHz, 2KHz, 4KHz, y 8KHz), por lo que resulta necesario realizar el RSM ocho veces, uno por cada centro de banda de octava.

	63Hz	125Hz	...	8000Hz	
Solución revestimiento 1	Dato Bibliografía	Dato Bibliografía	...	Dato Bibliografía	Dato
Solución revestimiento 2	Dato Bibliografía	Dato Bibliografía	...	Dato Bibliografía	Dato
...	...	...	...	...	
Solución revestimiento N-1	$x_{1-63}$	$x_{1-125}$	...	$x_{1-8000}$	Variable 1
Solución revestimiento N	$x_{2-63}$	$x_{2-125}$	...	$x_{2-8000}$	Variable 2
	63Hz	125Hz	...	8000Hz	
$T_R$ "in situ"	$T_{R63}$	$T_{R125}$	...	$T_{R8000}$	Target
	RSM <sub>63</sub>	RSM <sub>125</sub>		RSM <sub>8000</sub>	

Tabla 3.1. Esquema de funcionamiento de la aplicación del RSM.

La respuesta o variable dependiente, Y (tiempo de reverberación), también dependerá de la frecuencia u octava estudiada y ésta, para realizar el ajuste de la sala, se utilizará como objetivo (target) o respuesta deseada. Así, para la octava i (i

de 1 a 8) se tienen los coeficientes  $x_{1i}$  y  $x_{2i}$  como variables independientes y el  $T_{Ri}$  como la variable respuesta.

En estas condiciones, siguiendo el RSM, se pasa a la realización de ensayos, que son simulaciones empleando el modelo virtual de la sala objeto del estudio. Dichos ensayos se realizan a partir de los valores definidos o regiones de cálculo para cada variable. Como se indica en el apartado anterior, cuanto mayor sea el número de ensayos realizados, más preciso resultará el polinomio resultante y, cuanto más acotados se encuentren los valores de los coeficientes de absorción, mayor precisión tendrá el polinomio final.

Se definen las regiones de cálculo de  $x_{1i}$  y de  $x_{2i}$ , correspondientes a la octava  $i$ , como  $B_{1i} \pm R_{1i}$  y  $B_{2i} \pm R_{2i}$  (siendo  $B_{1i}$  y  $B_{2i}$  los valores tomados de la bibliografía y  $R_{1i}$  y  $R_{2i}$ , incrementos que oscilan entre 0 y 0,5). Con los valores extremos de estos entornos, se procede a la simulación observando el resultado obtenido. Si el valor del tiempo de reverberación medido “in situ” para esa frecuencia (que es el objetivo), se encuentra dentro del intervalo de resultados obtenidos en las simulaciones, la región definida es correcta. En este paso es posible ajustar el tamaño de la región disminuyendo el valor de  $R_{1i}$  y  $R_{2i}$ , siempre comprobando que el objetivo se encuentra dentro del intervalo de soluciones.

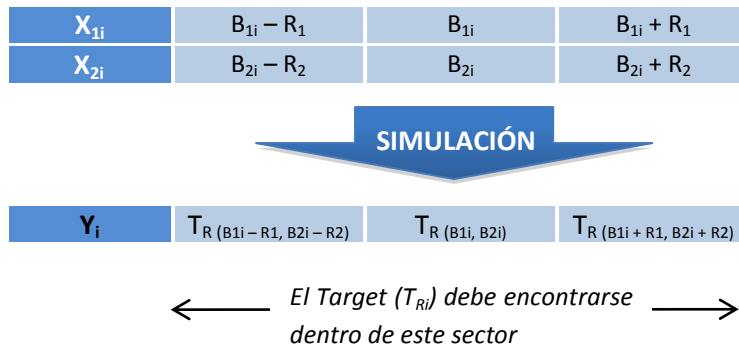


Tabla 3.2. Esquema de funcionamiento de los límites de la región de aplicación del RSM.

Definidos los límites de la región, se simula el funcionamiento del recinto para las 8 bandas de octava  $B_{1i} \pm R_{1i}$  y  $B_{2i} \pm R_{2i}$  de  $i=1$  a  $i=8$ , obteniendo los resultados  $T_{Ri}$  ( $i=1$ ,  $i=8$ ), tal como se muestra en el siguiente gráfico.

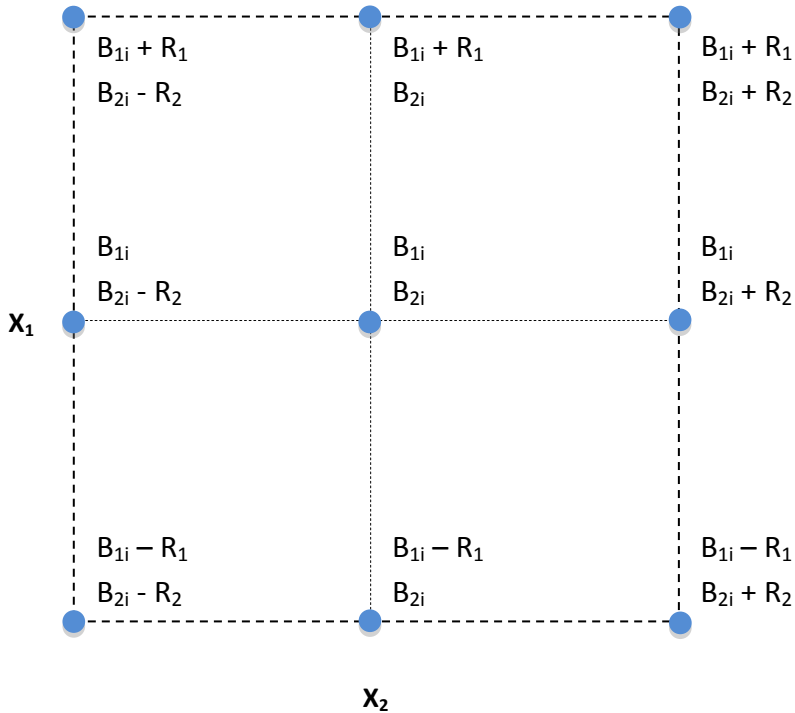


Fig. 3.2. Descripción gráfica de la región de aplicación del RSM.

Con los valores de  $T_{Ri}$  obtenidos, mediante aplicación de algún software matemático, (MATLAB, MINITAB, etc.), se obtiene el polinomio de funcionamiento del modelo virtual, a partir del cual, el RSM fija un polinomio de la forma:

$$T_R = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

En esta ecuación, tal como antes se ha estudiado,  $\varepsilon$  representa el error que puede deberse a desviaciones en la medida de alguna de las respuestas (que en este caso no procede porque todas las simulaciones se basan en el mismo modelo de predicción informatizada) o en la falta de linealidad de su funcionamiento, lo que impide conseguir un algoritmo que se ajuste al 100% con el juego de variables introducido  $x_1, x_2, T_R$  [72]. A medida que la región o entorno definido es más pequeño, el error,  $\varepsilon$ , es menor y, por tanto, se consigue mayor precisión en la superficie de respuesta.

Tal como se ha visto en el capítulo 1, en la simulación acústica de recintos, el cálculo de las primeras reflexiones responde a la teoría del trazado de rayos, que es logarítmico, y el de las reflexiones tardías responde a métodos estadísticos con funcionamiento lineal. El error  $\varepsilon$ , de la función obtenida asume esa diferencia.

Una vez obtenida la superficie de respuesta para la banda de octava  $i$ , se fija la respuesta al valor del tiempo de reverberación medido “in situ”, obteniendo como resultado una curva, cuyos puntos  $x_1$ ,  $x_2$  cumplen el compromiso funcional del modelo. Mediante el software informático, del conjunto infinito de puntos (curva de corte) se obtienen los conjuntos de pares  $x_1$ ,  $x_2$  cuyo valor de error,  $\varepsilon$ , es menor, obteniendo un conjunto finito de pares  $x_1$ ,  $x_2$ . De dicho conjunto de pares, se eliminan aquellos que uno u otro de sus elementos sean límites de su entorno ( $B_1 \pm R_1$ ,  $B_2 \pm R_2$ ) ya que es la forma que tiene el software de indicar que la superficie es infinita y que sólo tiene datos para calcular de forma precisa el interior de la región. En el caso de que al eliminar los valores extremos quede más de un par de valores  $x_1$ ,  $x_2$  se escogerá el que más se aproxime a los esperados.

Se repite el mismo proceso para cada una de las octavas, obteniendo como resultado los dos espectros de absorción de las soluciones constructivas discretizadas.

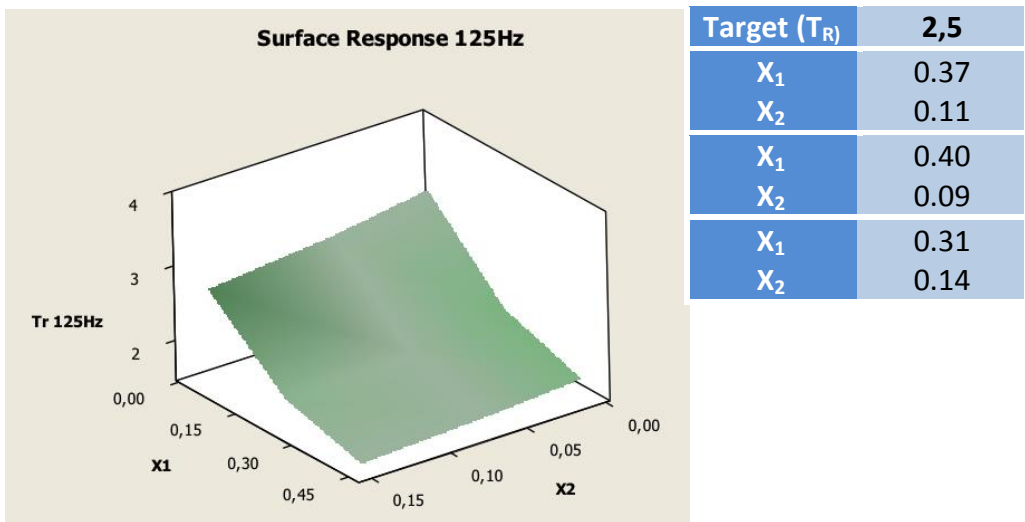


Fig. 3.3. Ejemplo de superficie de respuesta (125Hz) y los pares obtenidos como resultados óptimos que cumplen el Target ( $T_R$ ).

Evidentemente, el hecho de que la superficie de respuesta pueda localizar más de un juego de pares que cumplan el objetivo, hace que exista cierta probabilidad de fallo, sin embargo, la reducción numérica del árbol de soluciones proporciona a este método una gran precisión, eliminando el factor de arbitrariedad que conlleva el método iterativo. En el esquema siguiente se ilustra este hecho, mostrando la diferencia de posibilidades de ambos métodos.

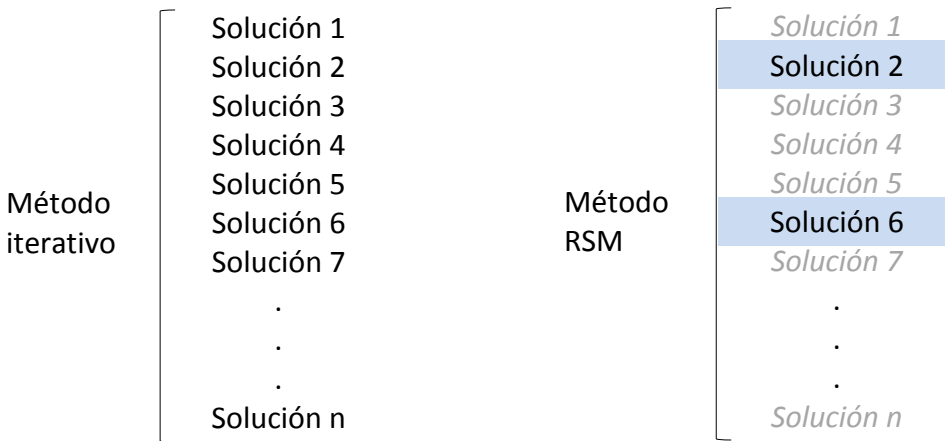


Fig 3.4. Esquema ilustrativo del árbol de respuestas generado por el método iterativo y el método RSM propuesto.

Finalmente, cabe señalar también la ventaja que supone la aplicación de este método para el caso de existir únicamente una solución constructiva,  $A(x_1)$ , con características de absorción desconocidas. En este caso, cabe la posibilidad de aproximar su espectro de absorción al fijar todas las soluciones, incluida la  $B(x_2)$ . Tras la aplicación del RSM, se seleccionan los pares obtenidos que tengan como valor de  $x_2$  los del espectro de absorciones de  $B(x_2)$ . De este modo, el espectro de absorción definido por los valores de  $x_1$  es el que corresponde a la solución constructiva incógnita,  $A(x_1)$ .

# 4

## APLICACIÓN Y VERIFICACION DEL MÉTODO PROPUESTO

Con objeto de aplicar y verificar el método de ajuste propuesto se han seleccionado siete espacios arquitectónicos de distinta geometría y dimensiones y con gran variedad de soluciones constructivas en sus revestimientos.

Los recintos seleccionados son (en orden creciente de volumen):

1. Sala de ensayos. Auditorio Municipal de Villajoyosa
2. Aula Magna de la Facultad de Derecho de Valencia
3. Sala de Cámara. Gran Auditorio-Conservatorio de Torreveija
4. Auditorio Municipal de Benigánim
5. Auditorio Municipal de Villajoyosa
6. Teatro de la Universidad Laboral de Gijón
7. Salón Columnario. Lonja de los Mercaderes de Valencia

El criterio seguido para la selección de estos espacios se ha basado fundamentalmente en tres características, a saber:

- Volumen. Se ha tratado de cubrir un amplio rango de variación de volúmenes. Desde pequeños espacios (salas de ensayos) hasta grandes volúmenes (espacios patrimoniales o auditorios) pasando por salas de audición de tamaño medio.

- Geometría. Se han seleccionado salas de distinta forma en planta y sección. Desde la rectangular a la quasiexagonal pasando por la semicircular pura.
- Soluciones constructivas de sus revestimientos. También en este sentido se ha querido aplicar el método a soluciones constructivas muy variadas (sencillas o complejas), incluyendo algunas poco habituales en espacios destinados a la audición, tales como las del Salón Columnario de La Lonja de Valencia.

Para cada espacio se ha seguido la misma metodología, obteniendo y analizando los mismos parámetros. Los pasos seguidos en cada uno de ellos y los resultados obtenidos, se presentan en sendas fichas, que constituyen el Anejo de esta Tesis Doctoral.

El estudio de cada sala se ha dividido en los tres apartados siguientes:

- Descripción del recinto
- Medición de parámetros “in situ”
- Simulación Acústica con aplicación del RSM en el ajuste de sus coeficientes de absorción

Para ilustrar la descripción de cada uno de estos apartados y evitar reiteraciones –al aplicarlo a los siete recintos-, se ha tomado la sala correspondiente a la ficha nº 4 (Auditorio Municipal de Benigánim) como ejemplo sobre el que se explican los distintos pasos. En el Anejo se presentan con detalle la totalidad de las salas.

### **4.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO**

#### **4.1.1 Características**

El primer apartado de la ficha consiste en una descripción general del espacio objeto de estudio. Se empieza con una fotografía que muestra la sala, seguida de una leve descripción de la forma del recinto y de la disposición de sus superficies de audición (platea y anfiteatros) y su techo (si se encuentra formado por varios planos, si es recto, simétrico, etc.). La planta y sección de la sala se incluyen en el apartado 4.2.1. Toma de datos “in situ”, las cuales, a su vez, sirven para ubicar los puntos de emisión y recepción.



Finalmente, se incluye una pequeña tabla que resume los datos geométricos principales de la sala (volumen, longitud, anchura, altura media) y el número de espectadores de la misma, separando los del patio de butacas y los del anfiteatro, en el caso de que la sala lo tuviese.

Se incluye también como dato, en su caso, la superficie de escenario o la de algún material que pueda ser de interés acústico (perforados, ranurados, etc.).



*La sala principal del auditorio municipal de Benigánim tiene una superficie de audición que se desarrolla en un plano único. Entre la corbata y el inicio de la platea se reserva un espacio en el que eventualmente se pueden colocar sillas para aumentar el aforo. El techo está compuesto por un juego de planos centrales, cortados de forma simétrica, en ambos laterales, por un plano inclinado que bisela el encuentro con los paramentos verticales que conforman los laterales de la sala.*

<b>Volumen</b>	4.993 m <sup>3</sup>	<b>Altura max</b>	8,21 m
<b>Nº de butacas</b>	604	<b>Ancho</b>	20,96 m
<b>Sup. Escenario</b>	161 m <sup>2</sup>	<b>Longitud</b>	31,56 m

Fig. 4.1 Ejemplo del apartado “características” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

### 4.1.2 Descripción de las soluciones constructivas

Aunque los programas de simulación utilizan los coeficientes superficiales de absorción de los materiales de revestimiento, en esta tesis se ha tratado de analizar la solución constructiva completa que conforma el revestimiento. Este aspecto tiene especial interés en los casos de las distintas soluciones de panelados, tanto suspendidos en techos como instalados en paramentos verticales o suelos ya que sus respectivos coeficientes de absorción, no solo dependen del acabado superficial del panel sino del sistema de anclaje, dimensiones del plenum o dimensiones del propio panel.

Las soluciones constructivas de los revestimientos de cada sala se incluyen en una tabla resumen con la descripción y numeración de cada una de ellas. En el caso que se está utilizando como ejemplo en este capítulo (Auditorio Municipal de Benigánim), tres de sus soluciones constructivas (las que corresponden a los números 3, 9 y 10 de la tabla) presentan cierta complejidad, por ello, a continuación se muestran los detalles constructivos de las mismas.

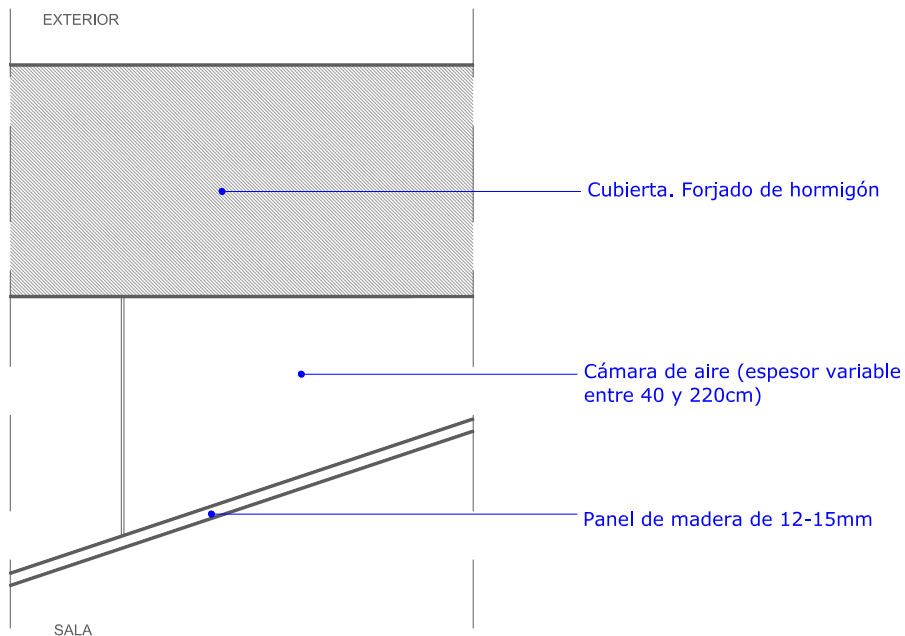


Fig. 4.2 Detalle de la solución constructiva del techo y concha acústica del Auditorio Municipal de Benigánim.

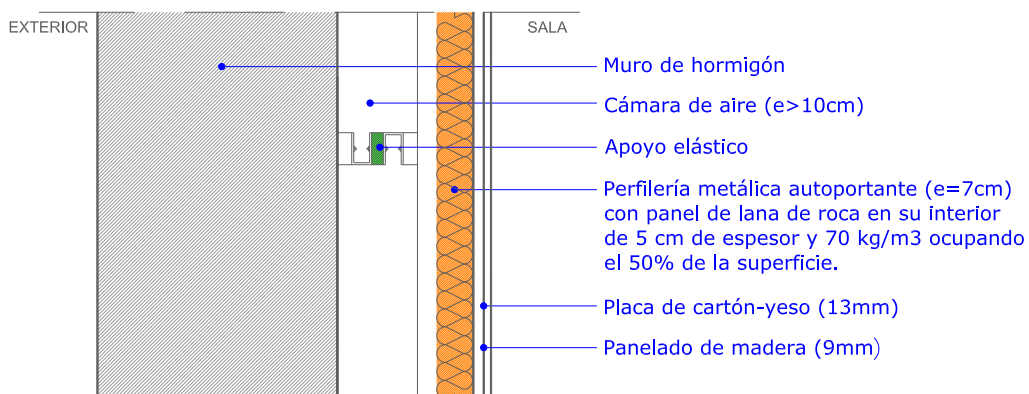


Fig. 4.3 Detalle de la solución constructiva de los laterales reflectantes de la sala del Auditorio Municipal de Benigánim.

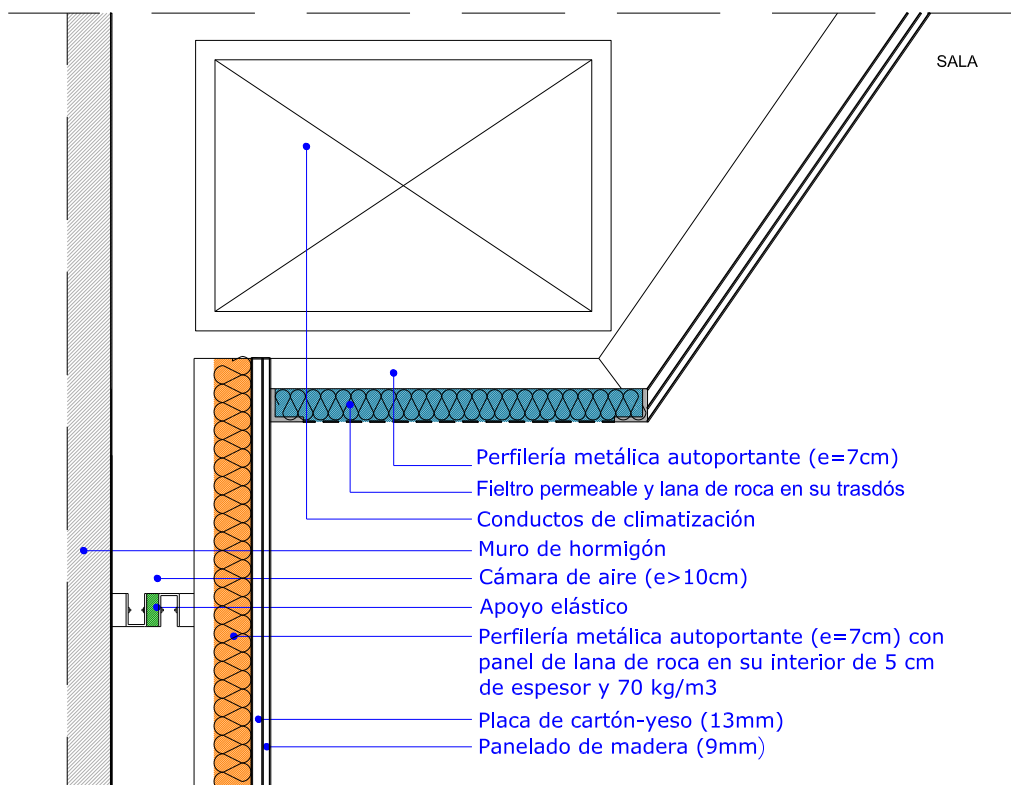


Fig. 4.4 Detalle de la solución constructiva de las tapas inferiores del hueco que aloja la climatización de la sala del Auditorio Municipal de Benigánim.

#### 4. APLICACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

A continuación, se presenta la tabla con las descripciones de la totalidad de las soluciones constructivas de la sala.

<i>ELEMENTO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>NUM.</i>
<i>Laterales y fondo concha de escenario</i>	<i>Cortinas ligeras de algodón plisadas, separadas entre 20 y 30cm de la pared.</i>	<i>1</i>
<i>Tarima escenario</i>	<i>Madera maciza de 3cm de espesor sobre rastreles de 10-15cm.</i>	<i>2</i>
<i>Fondo de la sala</i>	<i>Listonado vertical de madera con 50% de hueco con 4cm de lana de roca en su trasdós.</i>	<i>3</i>
<i>Laterales de la sala reflectantes (zócalo)</i>	<i>Panelado de madera contrachapada de 7-9mm sobre placa de cartón-yeso de 13mm.</i>	<i>4</i>
<i>Butacas</i>	<i>De tapizado medio. Patas y trasera de respaldo de madera sin tapizar.</i>	<i>5</i>
<i>Pavimento de la sala</i>	<i>Linóleum sobre losa de hormigón.</i>	<i>6</i>
<i>Vidrios cabina control</i>	<i>Luna grande alojada en carpintería metálica</i>	<i>7</i>
<i>Laterales sala absorbentes (parte superior)</i>	<i>Paneles de lana de roca de 4cm con velo.</i>	<i>8</i>
<i>Techo sala y concha acústica</i>	<i>Grandes paneles de madera contrachapada de 12-15mm de espesor con cámara de aire variable en su trasdós (entre 40cm y 220cm aproximadamente).</i>	<i>9</i>
<i>Tapas inferiores del hueco que aloja la climatización</i>	<i>Los conductos de aire acondicionado se encuentran en la parte superior de los laterales de la sala. En su cara inferior están revestidos con fieltro permeable y lana de roca en su trasdós.</i>	<i>10</i>

Tabla. 4.1. Ejemplo del apartado “descripción de las soluciones constructivas” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

## 4.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

### 4.2.1. Toma de datos “in situ”

La metodología empleada en las mediciones de los parámetros acústicos “in situ” en las diferentes salas ha sido la de “respuesta al impulso” (Impulse Response) siempre de acuerdo con la norma ISO 3382.

En todos los casos la toma de datos se ha realizado en condiciones de sala vacía y el número de puntos de medida (receptores) ha sido notablemente superior al especificado en la citada norma.

El equipo instrumental empleado ha sido el siguiente:

- Ordenador portátil MacBook Pro i7.
- Fuente sonora omnidireccional modelo 4292 light de Brüel & Kjaer. Acorde a la ISO 140 y a la ISO 3382.
- Amplificador de potencia modelo 2734 de Brüel & Kjaer. Potencia de salida hasta 500W con una respuesta de frecuencia de 20Hz a 20kHz.
- Micro modelo 4189-C-001 de Brüel & Kjaer. ½ pulgada .
- Preamplificador de micro modelo 2669-C de Brüel & Kjaer, de 6 Hz to 20 kHz.
- Placa USB audio interface tipo ZE-0948 de Brüel & Kjaer.
- Software de acústica de salas DIRAC 5.2 modelo 7841 de Brüel & Kjaer. Cumple con las normas ISO3382 (acústica de la salas), ISO 18233 (métodos de análisis) e IEC 60268-16 (inteligibilidad de la palabra)
- Sonómetro de clase 1 modelo 2250 de Brüel & Kjaer. Rango de frecuencias de 3 Hz a 20kHz.
- Calibrador sonoro modelo 4231 de Brüel & Kjaer. Conforme a la norma EN/IEC 60942 Class LS y Class 1 y a la norma ANSI S1.40-1984.

- El software de acústica de salas DIRAC 5.2 modelo 7841 de Brüel & Kjaer, ha regido la emisión de la señal, su recepción y el procesado de los datos. La señal emitida ha sido un SWEEP (señal de barrido que permite examinar la respuesta de frecuencia de forma continua en un intervalo de estudio considerado, e-sweep 20-20.000 Hz) [73].

Los parámetros acústicos medidos, agrupados para el análisis acústico de los diferentes recintos, son:

- Parámetros temporales: EDT, Tr10, Tr15, Tr20, Tr30, Tr, BR, Br.
- Parámetros energéticos: C50, C80, D50, D80.
- Parámetros de Inteligibilidad: RASTI, STI.

Los pasos seguidos en el proceso de medida de cada una de las salas son:

1. Localización de receptores. En un plano con la planta de la sala, se señala la posición de los receptores y la ubicación de la fuente. En caso de que la sala disponga de anfiteatro, también se da su planta con los puntos de medida.
2. Ejecución de la medida. Se procede a la emisión de una señal tipo sweep, controlada por el sistema DIRAC, tantas veces como posiciones de receptor se han planificado.
3. Descarga y análisis de resultados. Los resultados analizados por el software DIRAC 5.2 se descargan y se pasa a la representación gráfica de resultados que para mayor detalle se amplía en el siguiente apartado.

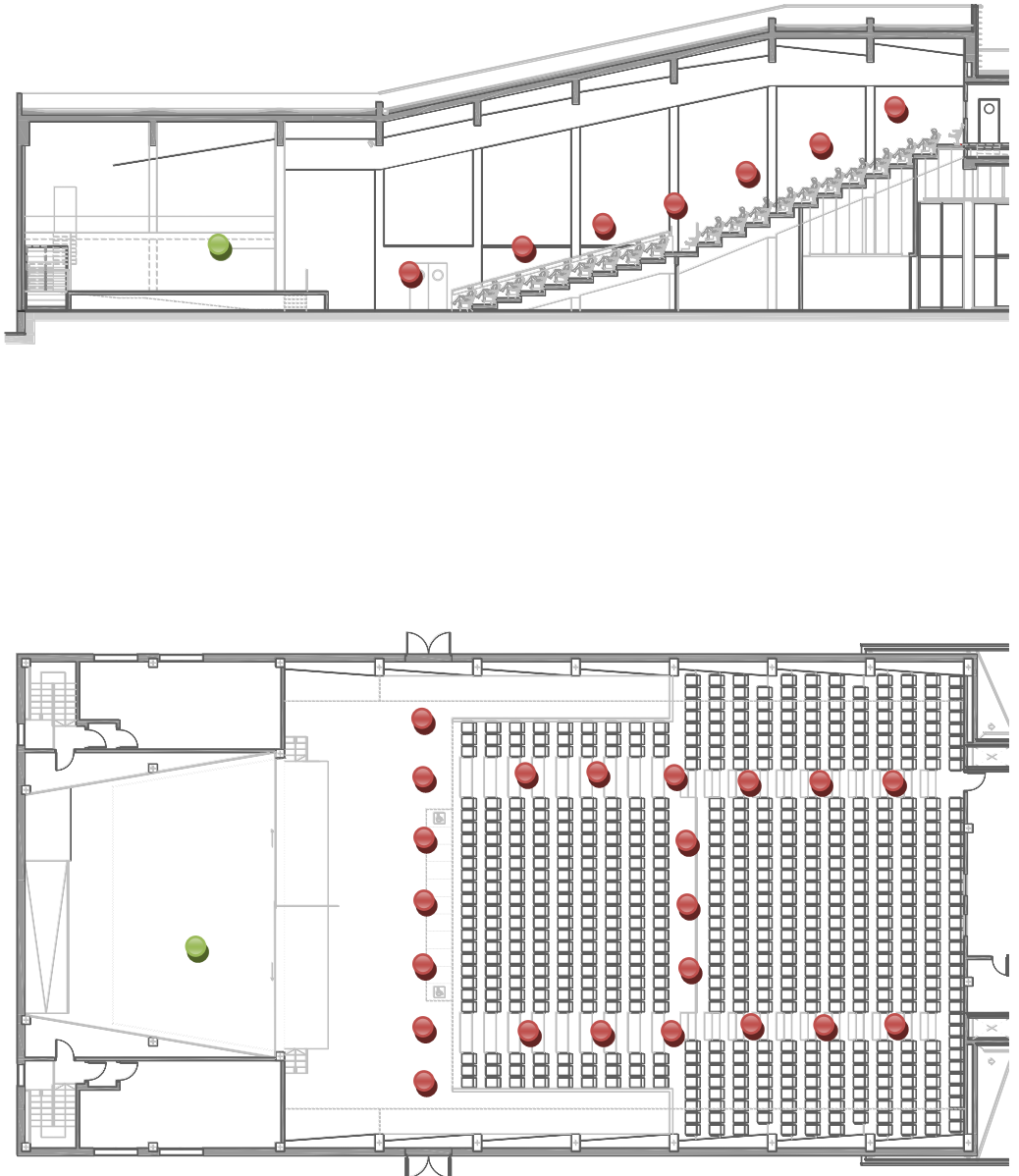


Fig. 4.5. Ejemplo del apartado “toma de datos in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

**4.2.2. Resultados “in situ”**

En este apartado se presentan en gráficos y/o tablas los valores medios de las medidas realizadas en los distintos puntos de recepción de la sala. Todos los parámetros representados, así como su rango de valores aceptables se explican en el capítulo II de esta memoria.

En primer lugar, se muestran en formato tabla los resultados obtenidos para los parámetros STI (male y female) y RASTI.

Platea Baja	
STI fm.	0,57
STI ml.	0,56
RASTI	0,54

Tabla. 4.2. Ejemplo de los resultados de los parámetros de inteligibilidad del apartado “resultados in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

Seguidamente, se presentan en gráficas los parámetros temporales (EDT, T10, T15, T20, T30 y Tr), representando en abscisas las frecuencias correspondientes a los centros de octavas y en ordenadas, el tiempo en segundos.

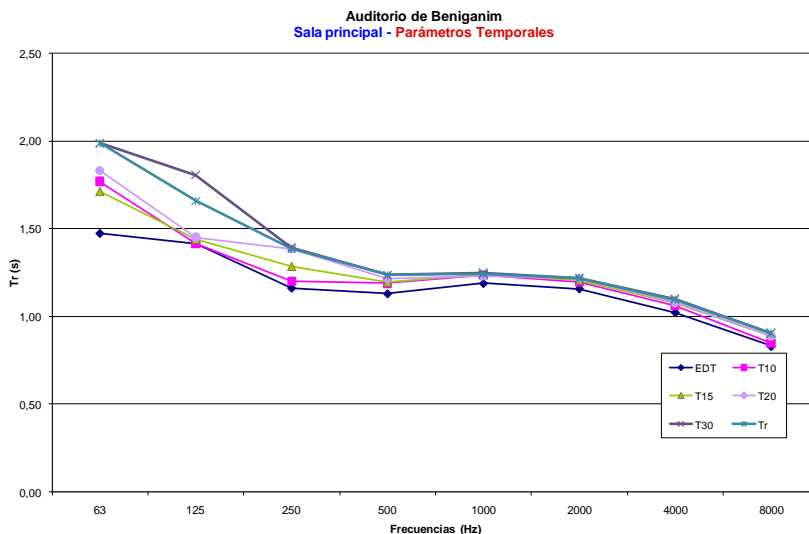


Fig. 4.6. Ejemplo de los resultados de los parámetros temporales del apartado “resultados in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.



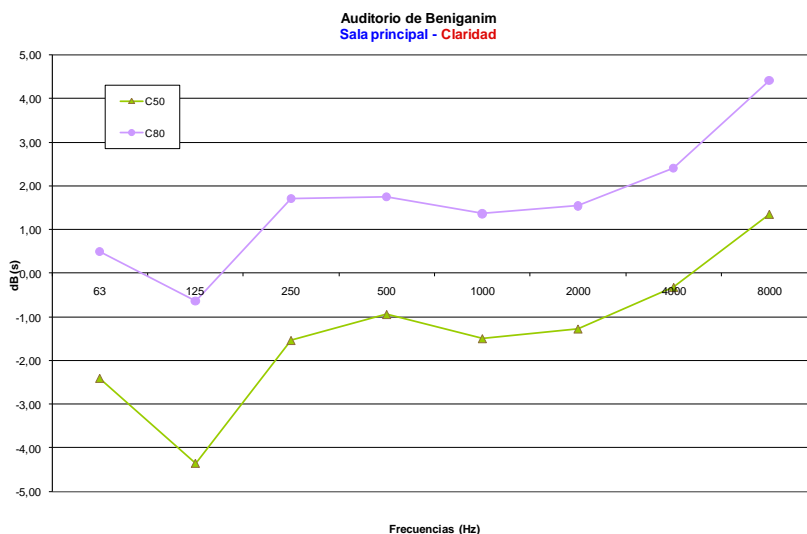


Fig. 4.7. Ejemplo de los resultados de la Claridad del apartado “resultados in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

De forma análoga, se grafían los parámetros de Claridad (C50 y C80) y Definición (D50 y D80).

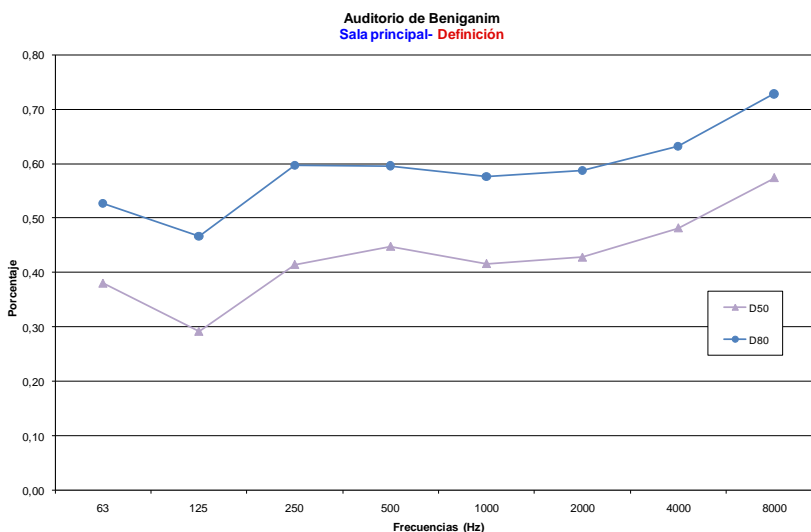


Fig. 4.8. Ejemplo de los resultados de la Definición del apartado “resultados in situ” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

### 4.3. SIMULACIÓN

#### 4.3.1. Modelo virtual de la sala

El primer paso para la simulación de las condiciones acústicas de un espacio, es la elaboración de un modelo para introducirlo en el software de predicción, que en este caso ha sido el ODEON 10.2 de Brüel & Kjaer.

Los modelos de las salas se han realizado con el software de diseño gráfico AUTOCAD 2012. Para ello, inicialmente, se ha procedido a un levantamiento planimétrico de los recintos, cuidando de manera especial la total correspondencia entre planta y sección.

En primera instancia, el modelo se construye como una entidad sólida que corresponde al aire interior de la sala ya que este volumen es el que se encuentra en contacto con todas las superficies que la delimitan. Con este paso se obtiene el volumen interior del recinto. Para facilitar el rodaje del programa, a la hora de definir el volumen de trabajo, se realiza una simplificación volumétrica. A modo de criterio general [74], se simplifica a un único plano, el que contenga resaltes, salientes, grecas, detalles, etc... que supongan menos de 15cm en alguna de sus dimensiones.

El siguiente paso es rehacer el modelo mediante 3D-caras (3D-FACE) construidas en sentido dextrógiro, con la normal dirigida al interior del recinto, con objeto de facilitar la interpretación del modelo por parte del programa de simulación acústica, ODEON 10.2, evitando el uso de materiales por las dos caras. A medida que se van construyendo, se agrupan en tantas capas como soluciones constructivas distintas tenga la sala, cuidando, al fusionar las 3D-caras que componen un plano de la misma solución constructiva, que ninguna tenga vértices sobre la arista de otra. De esta forma, los elementos en contacto entre entidades también van por pares; los vértices se encuentran en contacto con otros vértices y las aristas, con otras aristas.

Una vez cerrado el modelo, se introduce en el software ODEON 10.2, transformando las 3D-Caras en superficies planas, ya comprensibles para el programa. Llegado a este paso, es importante asegurar la estanqueidad del modelo, posicionando una fuente omnidireccional en el interior del recinto y realizando un barrido de rayos con varias reflexiones.

En estas condiciones, se ubican fuentes omnidireccionales y receptores en los mismos puntos donde se colocaron en las medidas reales [75], con el objeto de que las características o condiciones de la simulación sean idénticas a la realidad.

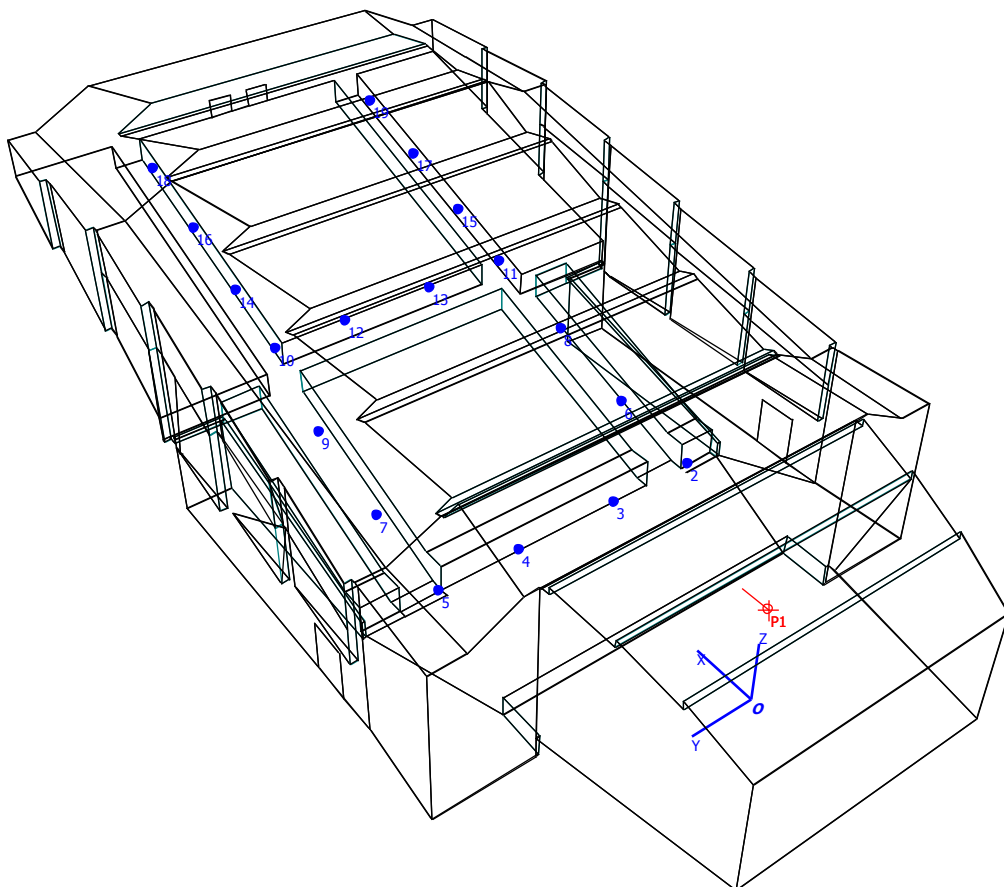


Fig. 4.9. Ejemplo del apartado “modelo virtual de la sala” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

Sobre el modelo importado, se procede a asignar los valores de los coeficientes de absorción y de difusión (en bandas de octava) a cada una de las soluciones constructivas que conforman los revestimientos de la sala. Estos valores se obtienen, bien de la propia librería de materiales del programa de simulación, bien de resultados de ensayos de laboratorio.

#### 4. APLICACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
1	0,17	0,17	0,25	0,45	0,65	0,60	0,60	0,60
2	0,15	0,18	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
3	0,35	0,35	0,55	0,85	0,90	0,75	0,75	0,75
4	0,20	0,20	0,12	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
5	0,11	0,18	0,40	0,59	0,62	0,68	0,70	0,70
6	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02
7	0,14	0,14	0,08	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
8	0,30	0,35	0,60	0,85	0,92	0,92	0,90	0,85
9	X1 <sub>65</sub>	X1 <sub>125</sub>	X1 <sub>250</sub>	X1 <sub>500</sub>	X1 <sub>1000</sub>	X1 <sub>2000</sub>	X1 <sub>4000</sub>	X1 <sub>8000</sub>
10	X2 <sub>65</sub>	X2 <sub>125</sub>	X2 <sub>250</sub>	X2 <sub>500</sub>	X2 <sub>1000</sub>	X2 <sub>2000</sub>	X2 <sub>4000</sub>	X2 <sub>8000</sub>

Tabla. 4.3. Ejemplo de los coeficientes de absorción aplicados en el apartado “modelo virtual de la sala” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

Finalmente, se introducen los valores de las propiedades de la sala (ruido de fondo, temperatura, etc.) y se inicia el proceso de simulación.

#### 4.3.2 Ajuste mediante método de las superficies de respuesta

En este apartado se muestran los resultados tras realizar el ajuste mediante el Método de las Superficies de Respuesta a cada una de las octavas con frecuencias centrales (63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz) tal y como se describe en el capítulo III de esta tesis.

En primer lugar, de las diez soluciones constructivas que conforman los revestimientos de la sala, se eligen los dos que presentan mayor grado de incertidumbre en los valores que se puedan asignar a sus coeficientes de absorción. En el ejemplo que se ha tomado como referencia, se han elegido los materiales 9 y 10 que corresponden, respectivamente, a los grandes paneles de la zona central del techo con cámara variable y a la superficie de fieltro que cubre la cara inferior de los pasos de los conductos de aire acondicionado que pasan por los laterales del techo. Estos dos materiales, además presentan espectros de absorción distintos ya que el primero corresponde al tipo membrana y el segundo a material poroso, lo que facilita la posterior identificación de sus respectivos valores.

Para definir la región de estudio en la aplicación del RSM, se delimitan los valores extremos (y uno central) de los materiales seleccionados, tomando para la variable  $X_1$ , (material nº 9) los valores 0,14 – 0,07 – 0,01 y para la variable  $X_2$ , (material nº 10) los valores 0,90 – 0,55 – 0,20 tal y como se explica en el apartado 3.2 de esta tesis.

Con las combinaciones posibles de estos valores se realizan los ensayos para las octavas consideradas cuyos resultados se muestran en la tabla 4.4 (ficha 4, Auditorio municipal de Benigánim) que define la región de estudio.

$X_1$	$X_2$	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
0,14	0,90	1,70	1,51	1,21	1,17	1,13	1,09	0,95	0,81
0,14	0,55	1,76	1,59	1,31	1,23	1,18	1,13	0,99	0,84
0,14	0,20	2,02	1,75	1,45	1,37	1,34	1,27	1,10	0,87
0,07	0,90	1,98	1,71	1,32	1,24	1,20	1,16	1,01	0,87
0,07	0,55	2,05	1,80	1,40	1,31	1,25	1,21	1,06	0,89
0,07	0,20	2,37	1,99	1,55	1,46	1,43	1,35	1,15	0,95
0,01	0,90	2,30	1,94	1,41	1,31	1,28	1,22	1,07	0,92
0,01	0,55	2,38	2,05	1,50	1,36	1,33	1,27	1,11	0,97
0,01	0,20	2,79	2,28	1,67	1,55	1,51	1,42	1,21	1,00

*Tabla. 4.4. Ejemplo del apartado “ajuste mediante el RSM” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.*

En la figura 4.7 se muestran las gráficas de las diferentes superficies de respuesta obtenidas para cada una de las octavas de frecuencias.

En dichas gráficas, en los ejes  $X_1$  y  $X_2$  se representan, respectivamente, los valores de los coeficientes de absorción de cada uno de los materiales seleccionados (en nuestro caso el designado por los números 9 y 10). En la perpendicular a ambos (eje OZ) se representa, con una escala diferente, el conjunto de valores del Tiempo de reverberación (Tr) obtenido, para poder mostrar con detalle la superficie de respuesta en cada caso.

#### 4. APLICACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

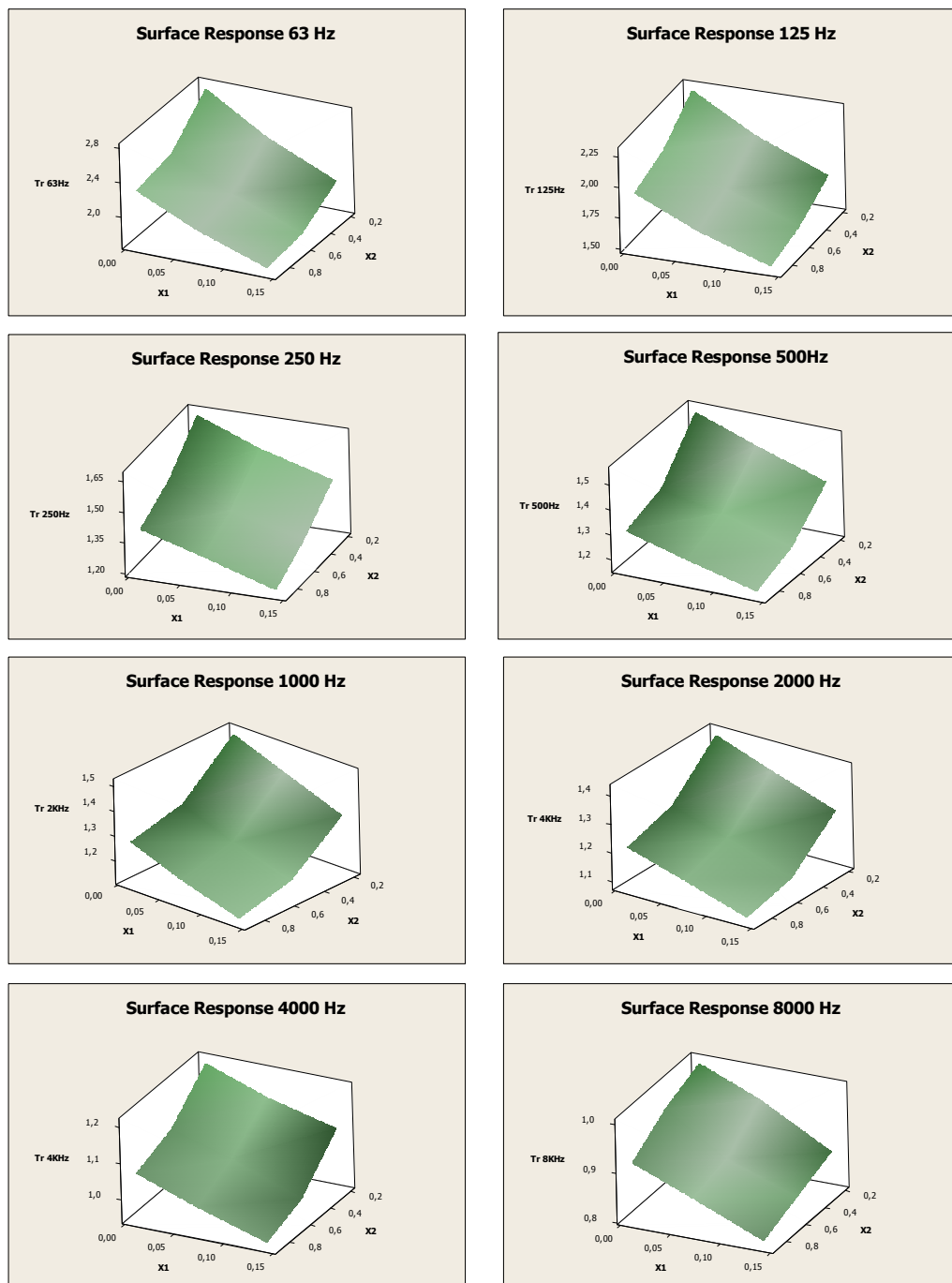


Fig. 4.10. Ejemplo de las superficies de respuesta obtenidas en el apartado “ajuste mediante el RSM” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

En estas condiciones, al aplicar la RSM se obtiene el conjunto de pares, cuya correspondiente respuesta se encuentra sobre dicha superficie.

El conjunto de pares, correspondiente al ejemplo que se estudia a lo largo de este capítulo, se muestra en la tabla 4.5. En ella, se descartan, marcando en tonalidad rojiza, los pares cuyos valores contienen alguno de los límites de la región estudiada, tal como se menciona en el capítulo 3. En este caso, para  $x_1$  los límites son 0.01 y 0.14, y para  $x_2$  son 0.20 y 0.55).

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
X1	0,01	0,11	0,02	0,12	0,72	0,01	0,01	
X2	0,19	0,90	0,88	0,56	0,55	0,29	0,28	
X1	0,08	0,07	0,06	0,14	0,24	0,77	0,23	0,07
X2	0,55	0,55	0,59	0,12	0,20	0,55	0,54	0,55
X1	0,09	0,09	0,14	0,06	0,11	0,23	0,03	0,03
X2	0,34	0,35	0,90	0,80	0,90	0,20	0,74	0,71
X1	0,17	0,12	0,27	0,36	0,04	0,03	0,13	
X2	0,20	0,22	0,20	0,90	0,85	0,76	0,21	
X1	0,13	0,19	0,13	0,13	0,13	0,13		
X2	0,23	0,20	0,33	0,49	0,36	0,32		

Tabla. 4.5. Ejemplo de los pares obtenidos en el apartado “ajuste mediante el RSM” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

Del conjunto de pares resultante, se seleccionan aquellos que más se aproximen a los valores esperados para cada uno de ellos, atendiendo a la forma del espectro de absorción de los mismos.

En la tabla 4.6, se presentan estos pares, señalando en letra negrilla los pares seleccionados, que se sitúan en la franja central de la tabla.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
X1	0,08	0,07	0,02	0,12	0,72	0,77	0,23	0,07
X2	0,55	0,55	0,88	0,56	0,55	0,55	0,54	0,55
X1	<b>0,13</b>	<b>0,09</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>
X2	<b>0,23</b>	<b>0,35</b>	<b>0,59</b>	<b>0,80</b>	<b>0,85</b>	<b>0,76</b>	<b>0,74</b>	<b>0,71</b>
X1	0,09	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
X2	0,34	0,22	0,33	0,49	0,36	0,32	0,21	

Tabla 4.6. Pares de resultados para cada frecuencia.

### 4.3.3. Resultado de la simulación

Tras aplicar los nuevos valores de coeficientes de absorción se repite el proceso de simulación del recinto. Siguiendo el mismo orden que en el apartado 4.2.2.

Para todos los parámetros se realiza la comparación entre los valores obtenidos en las mediciones “*in situ*” y los obtenidos mediante la simulación, una vez aplicado el método de ajuste de coeficientes mediante superficies de respuesta.

Dicha comparación, permite cuantificar el grado de aproximación de los valores simulados y medidos y, en consecuencia, realizar una valoración de la calidad de la metodología aplicada.

Aunque la comparación de los parámetros temporales, Claridad y Definición, se realice de forma gráfica, en el capítulo V de esta tesis se incluyen también los resultados numéricos obtenidos.

	<i>“in situ”</i>	<i>simulado</i>
<i>STI</i>	0,56	0,54

Tabla. 4.7. Ejemplo de los resultados de los parámetros de inteligibilidad del apartado “*resultado de la simulación*” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.



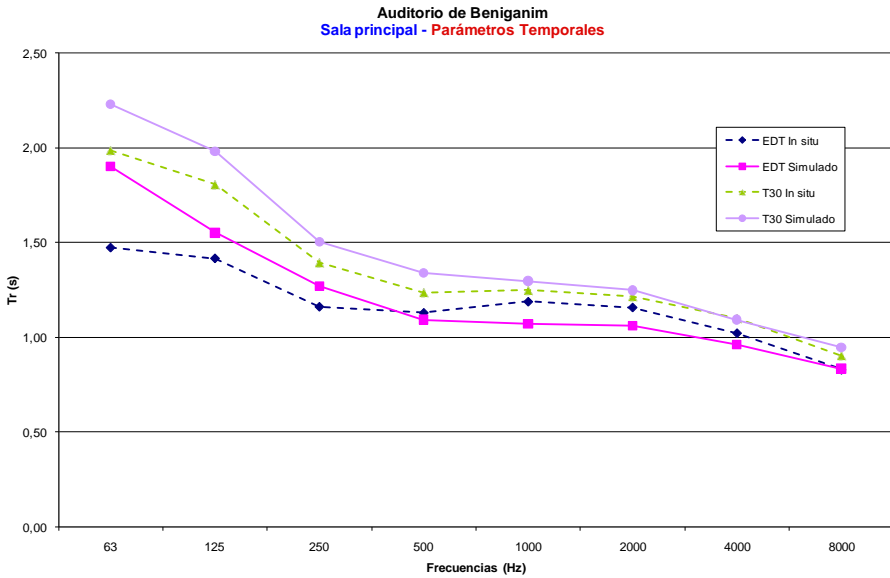


Fig. 4.11. Ejemplo de los resultados de los parámetros temporales del apartado “resultado de la simulación” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

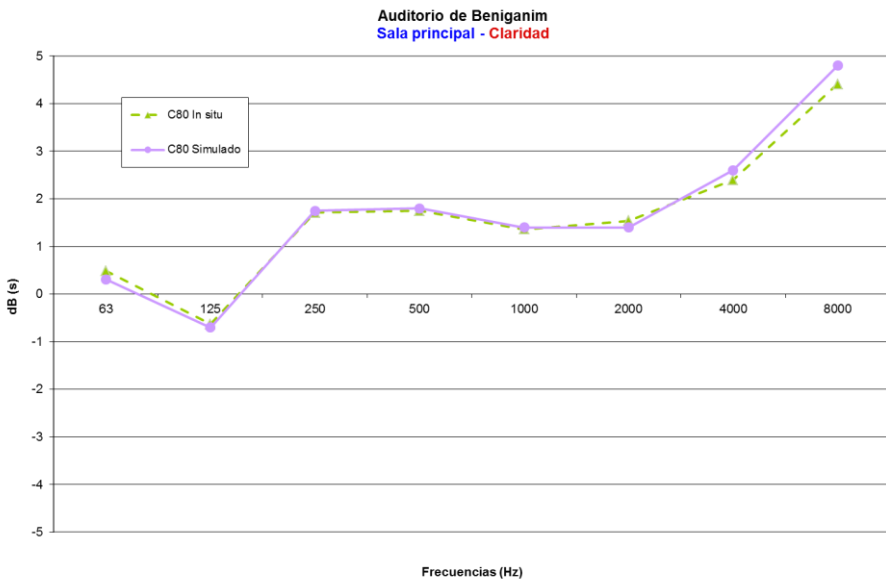


Fig. 4.11. Ejemplo de los resultados de los parámetros de Claridad del apartado “resultado de la simulación” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

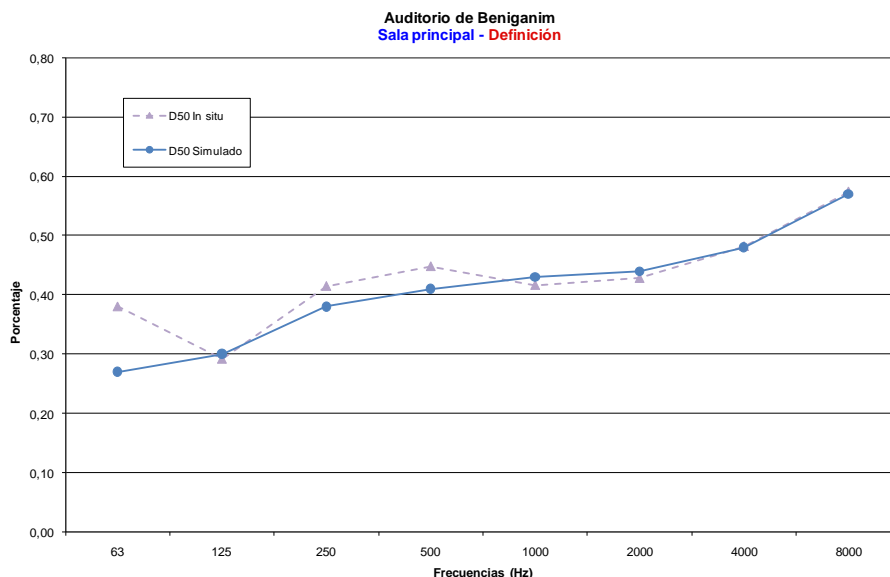


Fig. 4.13. Ejemplo de los resultados de los parámetros de Definición del apartado “resultado de la simulación” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Beniganim.

### 4.3.4 Resultados en la superficie de audición

Finalmente, tras ajustar la sala, se realiza la misma simulación, esta vez aplicada a la totalidad de las superficies de audición (platea, anfiteatro, palcos...) o, en caso de no existir una superficie clara de audiencia, sobre una superficie representativa de la ubicación de los oyentes.

Este paso sirve para una doble comprobación: La existencia de algún punto ciego o zona de peor audición en la sala y el correcto funcionamiento del programa de simulación extendido a toda la superficie de audición, evidenciando posibles fallos de cálculo [76].

A modo de muestreo, se presenta para cada parámetro los resultados en las frecuencias de 500 y 1000 Hz siempre que sea posible. El orden de presentación de las imágenes es el mismo empleado en el resto de presentación de resultados (Inteligibilidad, temporales, claridad y definición).

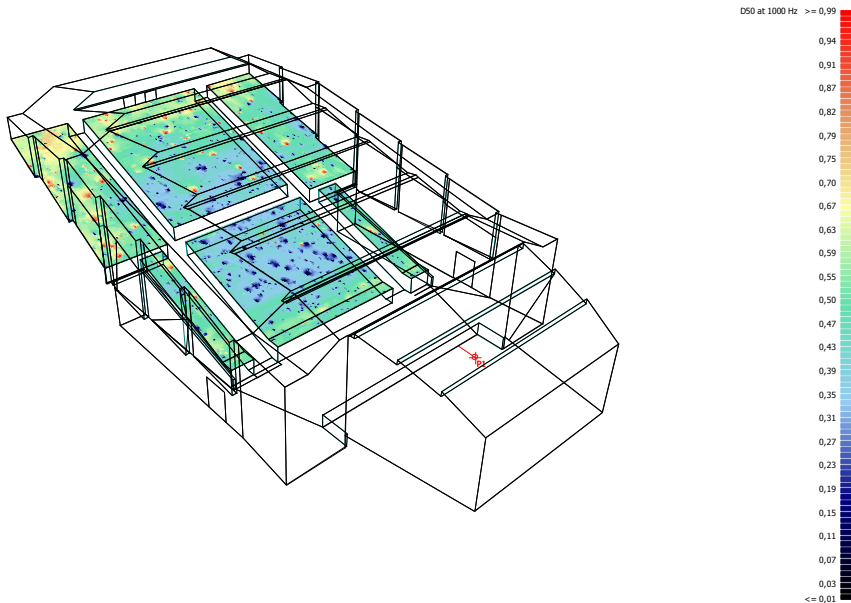


Fig. 4.20. Ejemplo del resultado del parámetro D50 a 500Hz del apartado “resultados en la superficie de audición” de la ficha nº 4. Auditorio Municipal de Benigánim.

Como se ha indicado al inicio de este apartado, la extensión del método a la totalidad de la superficie de audición permite extraer una serie de consideraciones sobre la homogeneidad de los resultados sobre la audiencia, poniendo de manifiesto posibles sombras acústicas o variaciones bruscas en los valores de los parámetros que en ocasiones se deben a fallos en los cálculos propios del proceso de simulación. En definitiva, esta extensión ratifica el correcto funcionamiento del modelo.

En el ejemplo de referencia, de la observación de estos resultados se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- a) Sobre la Inteligibilidad. El resultado obtenido es bastante homogéneo, con una disminución de valores a medida que aumenta la distancia a la fuente. En la zona de la platea media, se puede apreciar el efecto positivo originado por el refuerzo de las reflexiones laterales
- b) Sobre los parámetros temporales. En cuanto a los distintos índices del tiempo de reverberación, es de destacar la homogeneidad que presentan en su

distribución sobre la totalidad de la superficie, poniendo de manifiesto la estabilidad de estos parámetros.

- c) Sobre la Claridad. Los resultados obtenidos muestran una correcta correspondencia con los obtenidos en las mediciones “in situ”, apreciándose un cierto grado de divergencia entre estos resultados en las zonas laterales y sobre todo, en el fondo de la sala.
- d) Sobre la Definición. Los resultados son muy similares a los obtenidos en el parámetro de Claridad, con un refuerzo sensiblemente mayor en la zona central de la platea media.



# 5

## PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Con objeto de poder analizar y comparar los resultados obtenidos, a continuación se presenta, en formato tabla, el resumen de dichos resultados para cada una de las salas estudiadas.

De cada parámetro se presenta el valor obtenido de la medición “in situ” y el obtenido en la simulación una vez aplicado el ajuste mediante el RSM. La diferencia entre los valores medidos y simulados se expresa en porcentajes, redondeando al entero más próximo.

Aunque en la bibliografía revisada, se consideran aceptables los resultados cuyo error es igual o inferior al 10% [77], se introduce la matización de muy aceptable con objeto de precisar más el análisis de resultados.

De acuerdo con ello, se asigna el siguiente código de colores a los resultados:

- El verde para los resultados con error igual o inferior al 5%. Muy aceptables
- El azul para los resultados con error superior al 5%, e igual o inferior al 10%. Aceptables
- El rojo para los resultados con error superior al 10%. No aceptables

La totalidad de los resultados, así como el proceso de aplicación del RSM en cada recinto se muestra de forma específica en el Anejo de esta tesis.

## 5.1 SALA DE ENSAYOS. AUDITORIO DE VILLAJYOYA

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
EDT "In situ"	0,73	0,69	0,78	1,08	0,96	0,87	0,82	0,65
EDT Simulado	0,66	0,71	0,85	1,17	1,06	0,95	0,90	0,69
% Error	10 %	2 %	9 %	8 %	9 %	8 %	8 %	6 %

Tabla 5.1. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
T30 "In situ"	0,72	0,70	0,96	1,49	1,30	1,20	0,99	0,80
T30 Simulado	0,71	0,75	1,05	1,41	1,27	1,22	1,05	0,82
% Error	2 %	7 %	8 %	5 %	2 %	2 %	5 %	1 %

Tabla 5.2. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
C80 "In situ"	4,93	6,74	5,89	4,13	5,42	4,94	5,68	7,97
C80 Simulado	5,38	6,70	5,36	4,03	5,86	5,12	5,97	7,65
% Error	8 %	1 %	10 %	2 %	7 %	4 %	5 %	4 %

Tabla 5.3. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
D50 "In situ"	0,59	0,65	0,64	0,61	0,65	0,60	0,64	0,73
D50 Simulado	0,65	0,69	0,57	0,57	0,60	0,59	0,58	0,69
% Error	9 %	6 %	11 %	6 %	8 %	1 %	10 %	5 %

Tabla 5.4. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.

	Platea
STI "in situ"	0.65
STI Simulado	0.63
% Error	3 %

	Platea
RASTI "in situ"	0.54
RASTI Simulado	0.56
% Error	5 %

Tabla 5.5. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.

## 5.2 AULA MAGNA DE LA FACULTAD DE DERECHO DE VALENCIA

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
EDT "In situ"	0,91	0,67	0,58	0,93	1,23	0,90	0,82	0,65
EDT Simulado	0,88	0,73	0,57	1,00	1,15	0,83	0,77	0,69
% Error	4 %	8 %	2 %	7 %	7 %	8 %	7 %	6 %

Tabla 5.6. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
T30 "In situ"	0,90	0,87	0,75	1,19	1,29	1,04	0,95	0,79
T30 Simulado	0,84	0,88	0,76	1,19	1,27	1,05	0,96	0,76
% Error	7 %	1 %	2 %	0 %	1 %	0 %	1 %	4 %

Tabla 5.7. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
C80 "In situ"	4,55	6,75	7,27	5,05	3,11	4,83	5,85	7,64
C80 Simulado	4,80	6,40	7,50	4,70	3,20	5,20	5,70	7,00
% Error	5 %	5 %	3 %	3 %	3 %	7 %	3 %	1 %

Tabla 5.8. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
D50 "In situ"	0,62	0,66	0,69	0,63	0,53	0,61	0,67	0,74
D50 Simulado	0,64	0,61	0,74	0,62	0,58	0,67	0,70	0,74
% Error	3 %	8 %	7 %	2 %	8 %	9 %	5 %	0 %

Tabla 5.9. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.

	Platea
STI "in situ"	0.64
STI Simulado	0.63
% Error	2 %

	Platea
RASTI "in situ"	0.63
RASTI Simulado	0.62
% Error	2 %

Tabla 5.10. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.



**5.3 SALA DE CÁMARA. GRAN AUDITORIO-CONSERVATORIO DE TORREVIEJA**

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
<b>EDT "In situ"</b>	1,10	1,01	1,33	1,53	1,59	1,44	1,19	0,90
<b>EDT Simulado</b>	1,30	1,07	1,38	1,60	1,57	1,44	1,08	0,93
<b>% Error</b>	16 %	6 %	4 %	5 %	2 %	0 %	10 %	3 %

Tabla 5.11. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
<b>T30 "In situ"</b>	1,33	1,26	1,45	1,55	1,52	1,40	1,18	0,93
<b>T30 Simulado</b>	1,31	1,27	1,50	1,54	1,53	1,39	1,07	0,91
<b>% Error</b>	2 %	1 %	4 %	0 %	0 %	0 %	10 %	2 %

Tabla 5.12. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
<b>C80 "In situ"</b>	4,04	2,80	2,60	1,41	1,18	1,64	3,10	5,37
<b>C80 Simulado</b>	3,70	2,80	2,80	1,40	1,10	1,70	3,00	5,00
<b>% Error</b>	9 %	0 %	7 %	1 %	7 %	4 %	3 %	7 %

Tabla 5.13. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
<b>D50 "In situ"</b>	0,60	0,50	0,53	0,45	0,45	0,47	0,54	0,64
<b>D50 Simulado</b>	0,54	0,55	0,49	0,48	0,48	0,50	0,54	0,64
<b>% Error</b>	11 %	9 %	9 %	5 %	6 %	7 %	0 %	0 %

Tabla 5.14. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.

	Platea
<b>STI "in situ"</b>	0.56
<b>STI Simulado</b>	0.59
<b>% Error</b>	5 %

	Platea
<b>RASTI "in situ"</b>	0.59
<b>RASTI Simulado</b>	0.55
<b>% Error</b>	7 %

Tabla 5.15. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.

## 5.4 AUDITORIO MUNICIPAL DE BENIGNÍM

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
EDT "In situ"	1,47	1,42	1,16	1,13	1,19	1,16	1,02	0,83
EDT Simulado	1,90	1,55	1,27	1,09	1,07	1,06	0,96	0,83
% Error	23 %	9 %	9 %	3 %	11 %	9 %	6 %	0 %

Tabla 5.16. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
T30 "In situ"	1,99	1,80	1,39	1,24	1,25	1,21	1,10	0,90
T30 Simulado	2,23	1,98	1,50	1,34	1,30	1,25	1,09	0,94
% Error	11 %	9 %	7 %	8 %	4 %	3 %	1 %	4 %

Tabla 5.17. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
C80 "In situ"	0,49	-0,63	1,71	1,75	1,36	1,54	2,40	4,41
C80 Simulado	0,31	-0,70	1,75	1,80	1,40	1,40	2,60	4,80
% Error	58 %	9 %	2 %	3 %	3 %	10 %	8 %	8 %

Tabla 5.18. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
D50 "In situ"	0,38	0,29	0,41	0,45	0,42	0,43	0,48	0,57
D50 Simulado	0,27	0,30	0,38	0,41	0,43	0,44	0,48	0,57
% Error	41 %	3 %	9 %	9 %	3 %	3 %	0 %	1 %

Tabla 5.19. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.

	Platea
STI "in situ"	0.56
STI Simulado	0.54
% Error	4 %

	Platea
RASTI "in situ"	0.54
RASTI Simulado	0.53
% Error	2 %

Tabla 5.20. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.

**5.5 AUDITORIO MUNICIPAL DE VILLAJYOYA**

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
EDT "In situ"	1,24	1,29	1,28	1,29	1,24	1,14	0,95	0,80
EDT Simulado	1,68	1,34	1,17	1,29	1,26	1,17	1,03	0,83
% Error	26 %	4 %	9 %	0 %	1 %	2 %	8 %	4 %

Tabla 5.21. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
T30 "In situ"	1,90	1,76	1,58	1,48	1,38	1,27	1,09	0,83
T30 Simulado	2,10	1,71	1,61	1,38	1,34	1,26	1,07	0,80
% Error	10 %	3 %	2 %	7 %	3 %	1 %	2 %	4 %

Tabla 5.22. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
C80 "In situ"	1,88	1,59	1,64	1,34	1,62	2,22	3,40	5,71
C80 Simulado	1,90	1,50	1,50	1,47	1,50	2,10	3,20	5,40
% Error	1 %	6 %	10 %	9 %	8 %	6 %	6 %	6 %

Tabla 5.23. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
D50 "In situ"	0,47	0,46	0,46	0,44	0,46	0,48	0,53	0,65
D50 Simulado	0,40	0,47	0,42	0,46	0,46	0,49	0,55	0,65
% Error	17 %	1 %	9 %	4 %	1 %	2 %	3 %	0 %

Tabla 5.24. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.

	Platea	Anfiteatro
STI "in situ"	0.58	0.59
STI Simulado	0.64	0.56
% Error	9 %	5 %

	Platea	Anfiteatro
RASTI "in situ"	0.55	0.56
RASTI Simulado	0.58	0.52
% Error	9 %	8 %

Tabla 5.25. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.

## 5.6 TEATRO DE LA UNIVERSIDAD LABORAL DE GIJÓN

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
EDT "In situ"	1,25	1,24	0,98	1,10	1,27	1,25	1,03	0,77
EDT Simulado	2,11	1,21	1,03	1,17	1,33	1,17	1,01	0,47
% Error	41 %	3 %	5 %	6 %	4 %	7 %	2 %	65%

Tabla 5.26. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
T30 "In situ"	2,04	1,83	1,33	1,11	1,20	1,15	1,03	0,88
T30 Simulado	2,05	1,98	1,32	1,16	1,19	1,17	1,06	0,87
% Error	0 %	8 %	1 %	4 %	1 %	2 %	3 %	2 %

Tabla 5.27. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
C80 "In situ"	3,65	2,94	4,36	6,83	5,03	5,22	6,59	8,30
C80 Simulado	4,50	2,90	4,00	7,40	4,90	4,90	7,10	7,80
% Error	19%	1 %	9 %	8 %	3 %	6 %	7 %	6 %

Tabla 5.28. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
D50 "In situ"	0,60	0,55	0,63	0,76	0,68	0,68	0,74	0,80
D50 Simulado	0,51	0,50	0,62	0,71	0,64	0,64	0,69	0,79
% Error	18 %	10 %	2 %	7 %	6 %	6 %	7 %	1 %

Tabla 5.29. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.

	Platea	Anfiteatros
STI "in situ"	0.68	0.65
STI Simulado	0.67	0.63
% Error	1 %	3 %

	Platea	Anfiteatros
RASTI "in situ"	0.67	0.64
RASTI Simulado	0.63	0.62
% Error	6 %	5 %

Tabla 5.30. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.

## 5.7 SALÓN COLUMNARIO. LONJA DE LOS MERCADERES DE VALENCIA

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
EDT "In situ"	4,84	4,16	3,59	3,18	2,67	2,45	1,95	1,36
EDT Simulado	5,11	4,53	3,89	3,24	2,88	2,63	2,05	1,45
% Error	5 %	8 %	8%	2 %	3 %	7 %	5 %	6 %

Tabla 5.31. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro EDT.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
T30 "In situ"	4,20	4,54	3,85	3,22	2,84	2,60	2,06	1,43
T30 Simulado	5,05	4,49	3,86	3,22	2,86	2,63	2,05	1,40
% Error	17 %	1 %	0 %	0 %	1 %	1 %	0 %	2 %

Tabla 5.32. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro T30.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
C80 "In situ"	-3,11	-1,90	-3,03	-2,78	-1,04	-0,36	0,70	3,30
C80 Simulado	-3,10	-2,00	-2,80	-3,00	-0,85	-0,40	0,75	3,50
% Error	0 %	6 %	8 %	7 %	22 %	9 %	6 %	6 %

Tabla 5.33. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro C80.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
D50 "In situ"	0,29	0,34	0,27	0,27	0,36	0,38	0,43	0,55
D50 Simulado	0,30	0,33	0,29	0,3	0,39	0,41	0,46	0,61
% Error	3 %	3 %	7 %	10 %	8 %	7 %	7 %	10 %

Tabla 5.34. Resumen de los resultados obtenidos del parámetro D50.

	S.audición
STI "in situ"	0.43
STI Simulado	0.46
% Error	6 %

	S.audición
RASTI "in situ"	0.41
RASTI Simulado	0.44
% Error	7 %

Tabla 5.35. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de inteligibilidad.

## 5.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras analizar la totalidad de los resultados de los valores obtenidos en las medidas realizadas (en las que se han considerado las banda de octava desde 63Hz a 8000Hz) y su correspondiente desviación entre resultado medido y simulado, se observa que el 51% presenta una desviación igual o inferior al 5%, mientras que en el 7%, la desviación es superior al 10%.

Ahora bien, de no haber considerado estas dos octavas extremas (63Hz y 8000Hz), ya que no ofrecen un resultado fiable [77] tanto en las medidas “in situ”, (en las que su variación es excesiva) como en las simuladas, (en las que no presentan comportamientos lineales) el porcentaje de desviaciones iguales o inferiores al 5% apenas varía quedándose en el 52%, mientras que el de errores no admisibles, o superiores al 10% desciende al 2%.

A continuación, con objeto de tener una visión de conjunto que permita valorar de forma global la metodología propuesta, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos parámetros en una tabla. En ella, se tiene en cuenta tres franjas de valoración (“muy aceptable”, “aceptable” y “no aceptable”) de los porcentajes de correspondencia entre los valores de la simulación y los resultados de las medidas. Asimismo, en dicha tabla, se distingue la inclusión o no de las bandas de octava extremas (63Hz y 8000Hz).

	Sobre la totalidad de los resultados (56 por parámetro)			Eliminando las bandas de 63 y 8000Hz (42 por parámetro)		
<b>EDT</b>	23 ≤ 5 %	Muy aceptable	41 %	17 ≤ 5 %	Muy aceptable	41 %
	5 % < 27 ≤ 10%	Aceptable	48 %	5 % < 24 ≤ 10%	Aceptable	57 %
	6 ≥ 10 %	No aceptable	11 %	1 ≥ 10 %	No aceptable	2 %
<b>T30</b>	44 ≤ 5 %	Muy aceptable	79 %	34 ≤ 5 %	Muy aceptable	81 %
	5 % < 10 ≤ 10%	Aceptable	17 %	5 % < 8 ≤ 10%	Aceptable	19 %
	2 ≥ 10 %	No aceptable	4 %	0 ≥ 10 %	No aceptable	0 %
<b>C80</b>	23 ≤ 5 %	Muy aceptable	41 %	18 ≤ 5 %	Muy aceptable	43 %
	5 % < 30 ≤ 10%	Aceptable	54 %	5 % < 23 ≤ 10%	Aceptable	55 %
	3 ≥ 10 %	No aceptable	5 %	1 ≥ 10 %	No aceptable	2 %
<b>D50</b>	23 ≤ 5 %	Muy aceptable	41 %	15 ≤ 5 %	Muy aceptable	36 %
	5 % < 28 ≤ 10%	Aceptable	50 %	5 % < 26 ≤ 10%	Aceptable	52 %
	5 ≥ 10 %	No aceptable	9 %	1 ≥ 10 %	No aceptable	2 %

Tabla 5.36. Resumen de los resultados obtenidos y su porcentaje de error en los parámetros EDT, T30, C80 y D50.

## 5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

---

El mismo estudio se realiza sobre el parámetro de STI, tomando en este caso la totalidad de resultados obtenidos.

Sobre la totalidad de los resultados			
STI	$11 \leq 5 \%$	Muy aceptable	61 %
	$5 \% < 7 \leq 10\%$	Aceptable	39 %
	$0 \geq 10 \%$	No aceptable	0 %

*Tabla 5.37. Resumen de los resultados obtenidos y su porcentaje de error del parámetro de STI.*

A la vista de estos resultados, obtenidos mediante la aplicación del método en espacios con distintas características formales (volumétricas, geométricas, de revestimiento), y de acuerdo con el criterio de desviación entre los obtenidos en mediciones “in situ” y mediante simulación, se confirma la validez del método propuesto.

# 6

## CONCLUSIONES

### 6.1 SOBRE LA FIABILIDAD DEL METODO RSM APLICADO A LA SIMULACIÓN ACÚSTICA

1. A la vista de los resultados de porcentajes y órdenes de desviaciones entre las medidas “in situ” y las simuladas, sobre distintas salas, se puede afirmar que el método RSM es aplicable al ajuste de coeficientes de absorción en la simulación acústica de espacios arquitectónicos. En la práctica totalidad de los casos la valoración del método ha sido aceptable o muy aceptable, obteniéndose porcentajes de correspondencia entre la simulación y la medida inferiores al 10%.
2. Este método aporta a la fase de ajuste de coeficientes de absorción en el proceso de simulación acústica de salas, una metodología o protocolo con el que se sistematiza dicha fase, evitando la arbitrariedad que supone la asignación de valores de estos coeficientes o sus desviaciones en el método iterativo.
3. Se comprueba que el método, dado que sigue un protocolo cerrado (a diferencia del método iterativo), no sufre variaciones en la precisión de los resultados al ser aplicado a recintos de diferentes volúmenes o geometría. Obsérvese que el porcentaje de desviación obtenido es similar, tanto aplicado a salas pequeñas y sencillas (sala de ensayos del Auditorio Municipal de Villajoyosa) como a



## 6. CONCLUSIONES

grandes y de geometría compleja (Salón Columnario de la Lonja de los Mercaderes de Valencia, teatro de la Universidad Laboral de Gijón).

- El método propuesto, ha respondido del mismo modo ante las distintas distribuciones de soluciones constructivas planteadas, desde salas con menos cantidad de absorbente (sala de cámara del Gran Auditorio de Torrevieja) hasta salas con grandes superficies absorbentes (Auditorio Municipal de Beniganim) o incluso sectores absorbentes puntuales (Aula Magna de la Facultad de Derecho de Valencia).
- Dado que en grandes salas la proporción del cálculo de la simulación que se realiza por procedimientos estadísticos es elevada, la aplicación del método RSM es muy adecuada, ya que para su buen funcionamiento, cuanto más lineal es el proceso, menor resulta el error,  $\epsilon$ .

### 6.2 SOBRE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO

- Se observa que la elección de las variables (espectros de absorción) elegidas va estrechamente ligada a la precisión de los resultados. Es conveniente seleccionar dos soluciones de revestimiento cuyos espectros de absorción sean lo más diferentes posible, con objeto de poder discernir entre ellos, en el momento de seleccionar entre los pares de resultados optimizados ( $x_1$ ,  $x_2$ ).

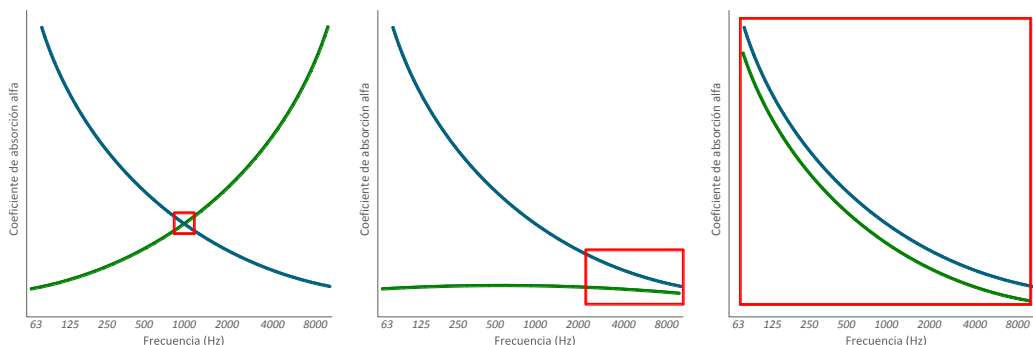


Fig 6.1. Ejemplo de combinaciones de espectros de absorción como variables y sus zonas de posible error.

En la Fig. 6.1 se muestran, de forma esquemática, las tres combinaciones posibles de pares de espectros de absorción, a la hora de elegir los revestimientos que serán incógnitas del sistema, y se marcan en rojo, sus posibles zonas de error.

En el primer ejemplo, se eligen dos revestimientos con espectros de absorción opuestos, uno ascendente y otro descendente. El área de error es mínimo, existiendo únicamente en el supuesto cruce de ambos espectros.

El segundo ejemplo representa los casos en los que se emplea uno de los dos espectros, prácticamente plano (constante) como referencia. El área de error en este caso puede ser mayor (dependiendo del rango de valores) encontrándose en la zona en que ambos espectros tienen valores similares.

El tercer ejemplo representa la elección que siempre se debe evitar. Dos espectros similares. Cuánto más similares sean sus espectros, mayor será la zona de error, llegando en algunos puntos a ser imposible discernir entre un espectro y otro.

2. Del mismo modo, la elección de la región de estudio también varía el grado de precisión de los resultados obtenidos. Cuanto más ajustada esté la región de estudio (siempre cumpliendo el hecho de contener a la respuesta deseada o target), más detallada será la superficie de respuesta, por lo tanto, menor será el error  $\epsilon$ , y mayor precisión en el cálculo de la respuesta optimizada.

### 6.3 SOBRE ÁMBITO DE APLICACIÓN

Teniendo en cuenta que el método propuesto obliga, en todos los casos, a realizar una serie de simulaciones (9 de testeo y 1 simulación final en este caso), el coste computacional (ya sea traducido en tiempo de trabajo del usuario, como de equipo empleado) es alto. Por ello, en el ajuste de salas pequeñas (inferiores a 1500 m<sup>3</sup>), en las que suelen tener más controladas las soluciones constructivas, este método presenta pocas ventajas respecto al método iterativo ya que con éste se puede llegar en dos o tres pasos a un ajuste correcto.

Sin embargo, su uso es recomendable en salas de volumen medio. A partir de los 1500 – 2000 m<sup>3</sup> la respuesta simulada ya se aleja sensiblemente de la respuesta real, y el ajuste de coeficientes requiere mayor trabajo. El coste computacional

comparado con el del método iterativo es similar, mientras que el árbol de soluciones posibles es mucho más limitado (por lo tanto preciso) en el RSM.

Finalmente, el método es muy recomendable en recintos de gran volumen (a partir de los 7500 m<sup>3</sup>). En estos casos, el método iterativo requiere de un gran número de cálculos y testeos para llegar a un correcto ajuste del tiempo de reverberación, pudiendo generar un número ilimitado de posibles soluciones, es decir, existiendo un elevado porcentaje de posibilidades de adoptar como válido un espectro de absorción que sea erróneo. El RSM reduce el número de simulaciones a las establecidas en el protocolo, ofreciendo un juego limitado de posibles soluciones, por lo tanto, una mayor precisión.

# A

## **Anejo. Fichas resumen de los diferentes espacios arquitectónicos analizados.**

Los recintos seleccionados son (en orden creciente de volumen):

A1. Sala de ensayos. Auditorio de Villajoyosa

A2. Aula Magna de la Facultad de Derecho de Valencia

A3. Sala de Cámara. Gran Auditorio-Conservatorio de Torrevejea

A4. Auditorio Municipal de Benigánim

A5. Auditorio Municipal de Villajoyosa

A6. Teatro de la Universidad Laboral de Gijón

A7. Salón Columnario. Lonja de los mercaderes de Valencia

A. ANEJO. FICHAS RESUMEN DE LOS DIFERENTES ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS ANALIZADOS

# 1. SALA DE ENSAYOS. AUDITORIO DE VILLAJYOYOSA

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

### 1.1.1 Características



*Fig. A1.1. Vista general de la sala.*

La sala de ensayos del Auditorio Municipal de Villajoyosa es un espacio diáfano, de planta prácticamente cuadrada, con laterales y techo dispuestos de modo que se rompe el paralelismo entre planos opuestos. El techo presenta la inclinación de la losa de la platea de la sala principal, siendo su cota más alta la correspondiente a su acceso.

Volumen	462 m <sup>3</sup>	Altura max.	3.19 m
Sup. Perforado	62.48 m <sup>2</sup>	Ancho	11.89 m
Sup. Pavimento	142.69 m <sup>2</sup>	Largo	12.68 m

*Tabla A1.1. Datos de la sala.*

### 1.1.2 Descripción de las soluciones constructivas

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	NUM.
Laterales sala y techo lisos	Trasdosado con doble placa de cartón-yeso de 13+13mm sobre perfilera de 36mm con lana de roca de 70kg/m <sup>3</sup> en su trasdós y 10cm de cámara de aire	1
Puertas	Panel de madera contrachapada de 5cm de espesor	2
Pavimento	Linóleoum sobre losa de hormigón	3
Lateral quebrado	Trasdosado con doble placa de cartón-yeso de 13+13mm sobre perfilera de 36mm con lana de roca de 70kg/m <sup>3</sup> en su trasdós. Cámara de aire entre 0 y 25cm, formando diente de sierra	4
Techo absorbente	Cartón yeso perforado el 19% con perforación cuadrada y 4cm de lana de roca de 70kg/m <sup>3</sup> en su trasdós, con plenum de 20cm de aire	5

Tabla A1.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.

## 1.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

### 1.2.1. Toma de datos “in situ”

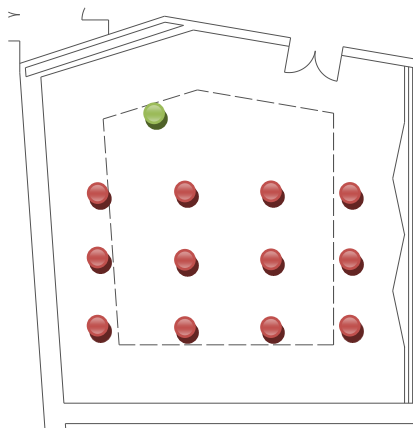


Fig. A1.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).

### 5.2.2. Resultados “in situ”

Tanto en este apartado, como en los posteriores, los resultados se presentan siempre siguiendo el mismo esquema. En primer lugar los resultados de **Inteligibilidad**, mostrando el valor medio obtenido en la totalidad de los puntos o en los correspondientes a un sector específico. Seguidamente los resultados de los **parámetros temporales** (EDT,  $T_R$ ,  $T_{R30}$ ,  $T_{R20}$ ,  $T_{R15}$  y  $T_{R10}$ ), y los **parámetros energéticos**, diferenciando por un lado el parámetro Claridad (C50 y C80), y por otro, el parámetro Definición (D50 y D80).

	Sala
STI fm.	0,65
STI ml.	0,65
RASTI	0,54

Tabla A1.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

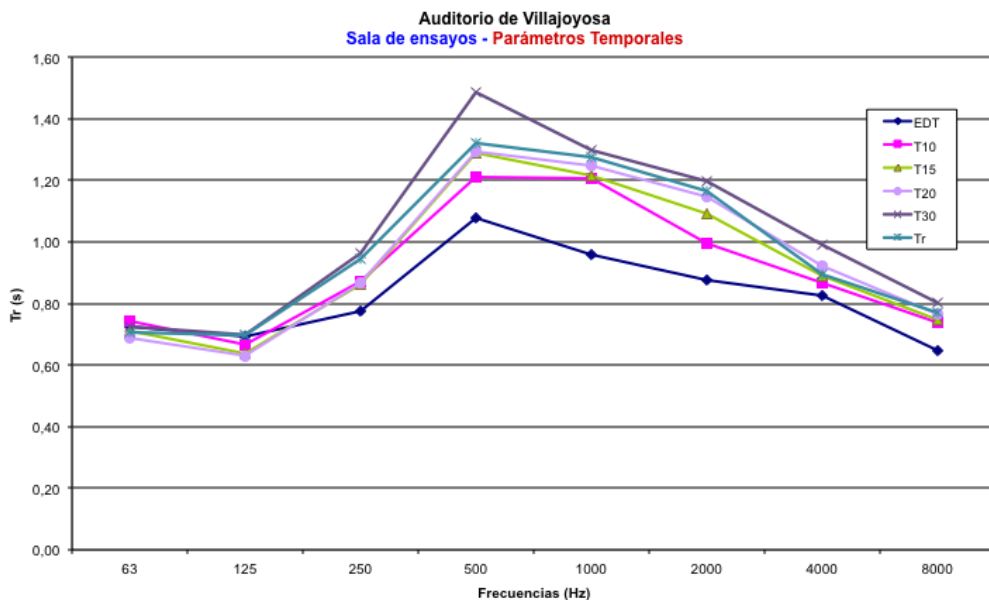


Fig. A1.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.



A.1. SALA DE ENSAYOS. AUDITORIO DE VILLAJOYOSA

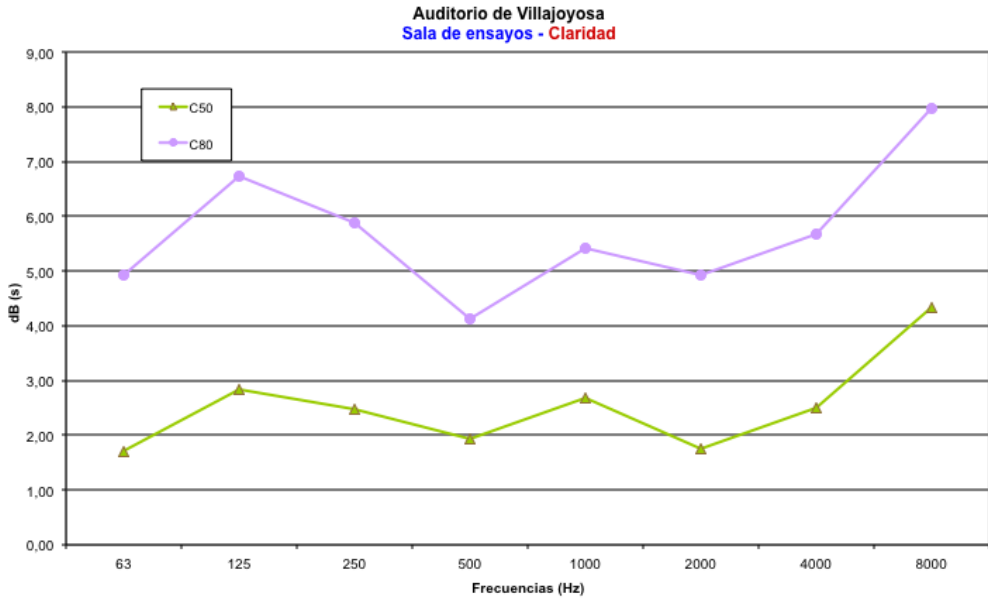


Fig. A1.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.

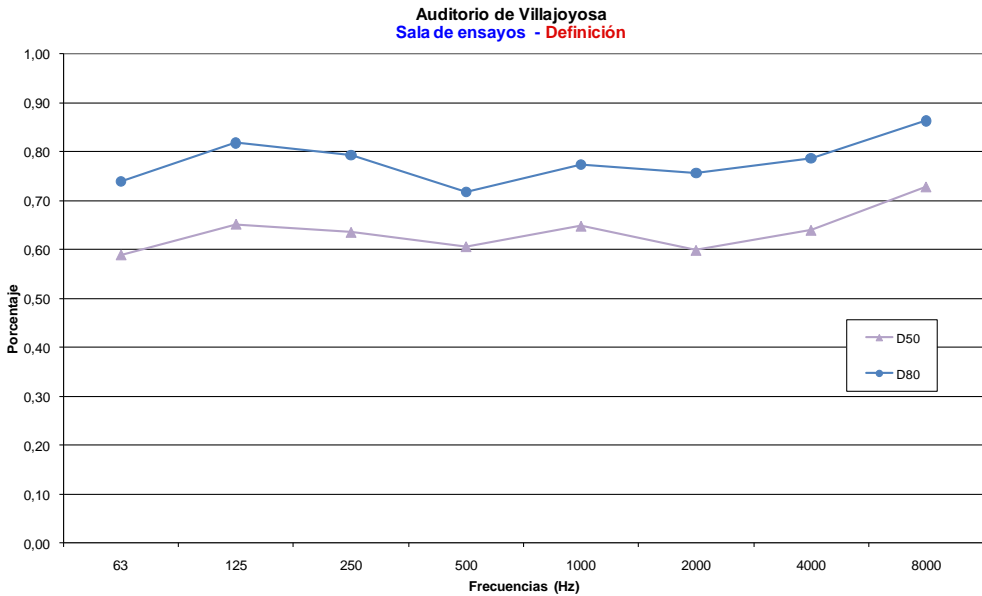


Fig. A1.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.

### 1.3. SIMULACIÓN

#### 1.3.1. Modelo virtual de la sala

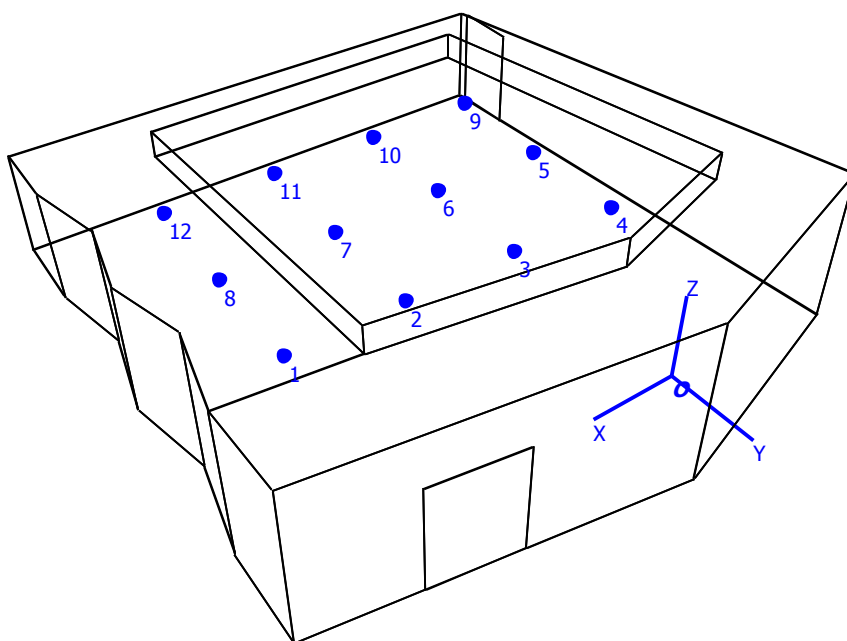


Fig. A1.6. Modelo virtual de la sala.

En este caso se toman como incógnitas el lateral quebrado (por las cámaras de aire de espesor variable) y el techo perforado (por tener la cámara de aire parcialmente ocupada por las conducciones de aire acondicionado). Los espectros de absorción de ambas soluciones constructivas son significativamente distintos.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
1	0,15	0,19	0,09	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
2	0,16	0,20	0,12	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
3	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
4	X <sub>165</sub>	X <sub>1125</sub>	X <sub>1250</sub>	X <sub>1500</sub>	X <sub>1100</sub>	X <sub>1200</sub>	X <sub>1400</sub>	X <sub>1800</sub>
5	X <sub>265</sub>	X <sub>2125</sub>	X <sub>2250</sub>	X <sub>2500</sub>	X <sub>21000</sub>	X <sub>22000</sub>	X <sub>24000</sub>	X <sub>28000</sub>

Tabla A1.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.

**1.3.2 ajuste mediante método de las superficies de respuesta**

X1	X2	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
0,40	0,60	0,38	0,45	0,76	1,07	0,91	0,83	0,71	0,56
0,40	0,35	0,61	0,69	1,00	1,29	1,14	1,05	0,91	0,74
0,40	0,10	0,79	0,84	1,38	2,09	1,79	1,62	1,33	0,91
0,20	0,60	0,64	0,67	0,93	1,23	1,07	1,00	0,88	0,72
0,20	0,35	0,69	0,75	1,10	1,51	1,28	1,17	1,01	0,79
0,20	0,10	0,90	0,93	1,36	2,49	1,99	1,76	1,41	0,97
0,01	0,60	0,64	0,67	0,93	1,23	1,07	1,00	0,88	0,72
0,01	0,35	0,69	0,75	1,10	1,51	1,28	1,17	1,01	0,79
0,01	0,10	0,90	0,93	1,59	2,49	1,99	1,76	1,41	0,97

Tabla A1.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.

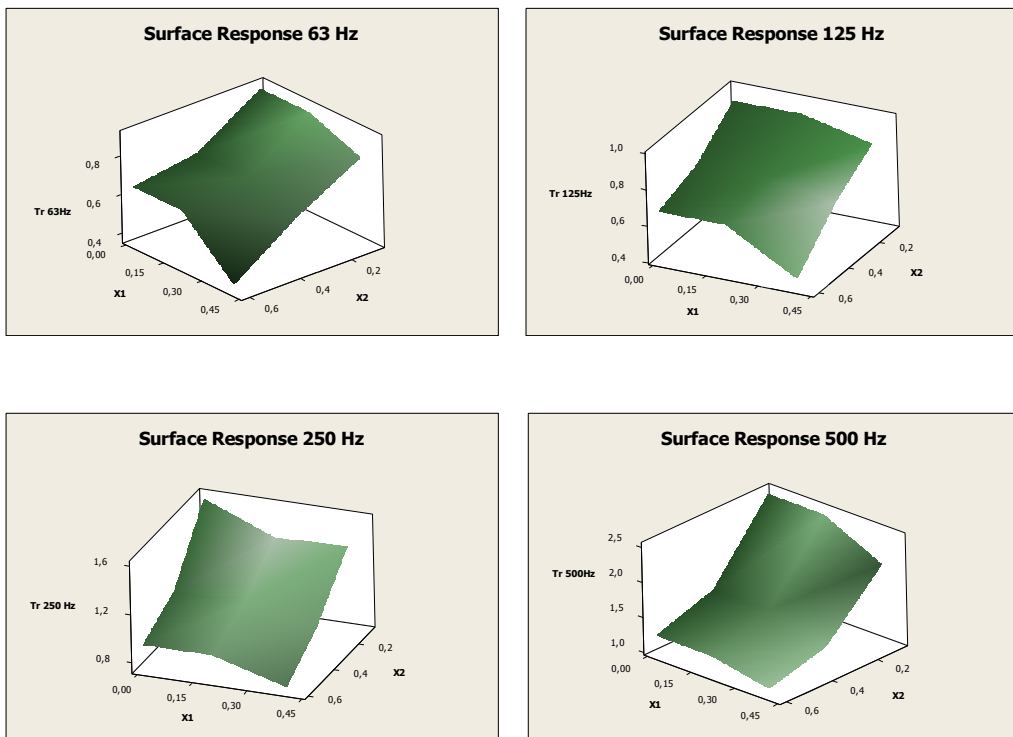


Fig. A1.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.

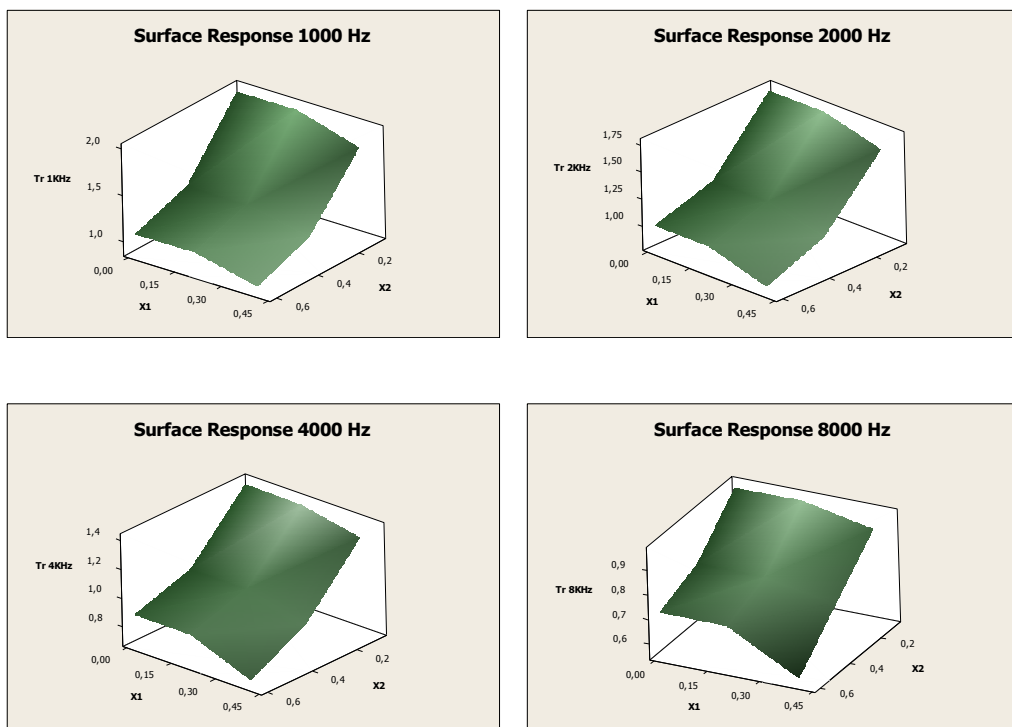


Fig. A1.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
X1	0,30	0,29	0,23	0,21	0,20	0,20	0,21	0,16
X2	0,25	0,30	0,44	0,36	0,35	0,35	0,37	0,37
X1	<b>0,21</b>	<b>0,25</b>	<b>0,12</b>	<b>0,06</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>
X2	<b>0,33</b>	<b>0,44</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,45</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>
X1	0,08		0,14					0,12
X2	0,37		0,35					0,36

Tabla A1.6. Pares de resultados para cada frecuencia.

### 1.3.3. Resultado de la simulación

	"in situ"	Simulado
STI	0,65	0,63
RASTI	0,54	0,64

Tabla A1.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

A.1. SALA DE ENSAYOS. AUDITORIO DE VILLAJOYOSA

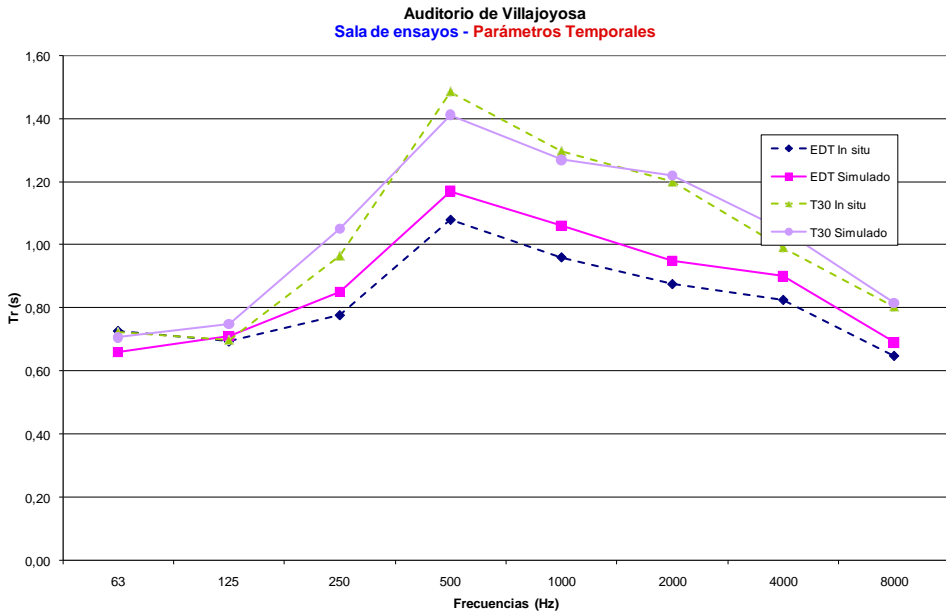


Fig. A1.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

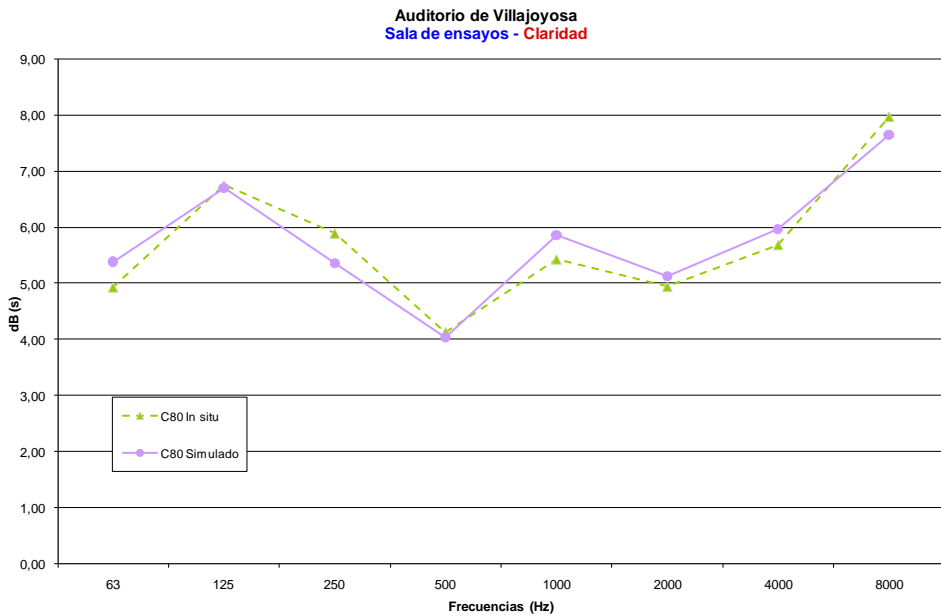


Fig. A1.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.

## 2. AULA MAGNA FACULTAD DE DERECHO DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

#### 2.1.1 Características



*Fig. A2.1. Vista general de la sala.*

El Aula Magna de la Facultad de Derecho de la Universidad de Valencia, responde a una planta de laterales rectos divergentes que se abren hacia el fondo del patio de butacas. El frente y el fondo de sala presentan una determinada curvatura tal como se puede observar en la planta que se muestra en el apartado 2.2.1.

<b>Volumen</b>	1.650 m <sup>3</sup>	<b>Altura max.</b>	4,80 m
<b>Nº de butacas</b>	307	<b>Ancho</b>	19,55 m <sup>2</sup>
<b>Sup. Techo perforado</b>	68,79 m <sup>2</sup>	<b>Largo</b>	23,45 m <sup>2</sup>

*Tabla A2.1. Datos de la sala.*

### 2.1.2 Descripción de las soluciones constructivas

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	NUM.
Laterales, frente y fondo de la sala	Panelado de madera contrachapada, rigidizado exteriormente mediante un rastrelado vertical decorativo	1
Puertas	Madera contrachapada de 5cm espesor	2
Tarima	Madera de 3cm sobre montantes de madera de 12cm de espesor de media	3
Techo absorbente en zona próxima a tarima	Placas de cartón-yeso de 15mm con perforación circular del 11% y 10mm de lana de roca en su trasdós con plenum de aire de 10cm	4
Techo liso	Doble placa de cartón-yeso de 13+13mm sobre perfilera de 36mm con lana de roca en su trasdós, suspendida del forjado mediante silent-blocks. Plenum con espesor promedio de 12cm	5
Butacas	Butacas con laterales tapizados	6
Pavimento	Linóleum pegado al terrazo original	7
Laterales acristalados	Grandes lunas de vidrio de 8mm de espesor, alojadas en estructura metálica. Sobre este vidrio se dispone de unos cortinajes ligeros de tela para control de entrada de luz del exterior	8

Tabla A2.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.

## 2.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

### 2.2.1. Toma de datos "in situ"

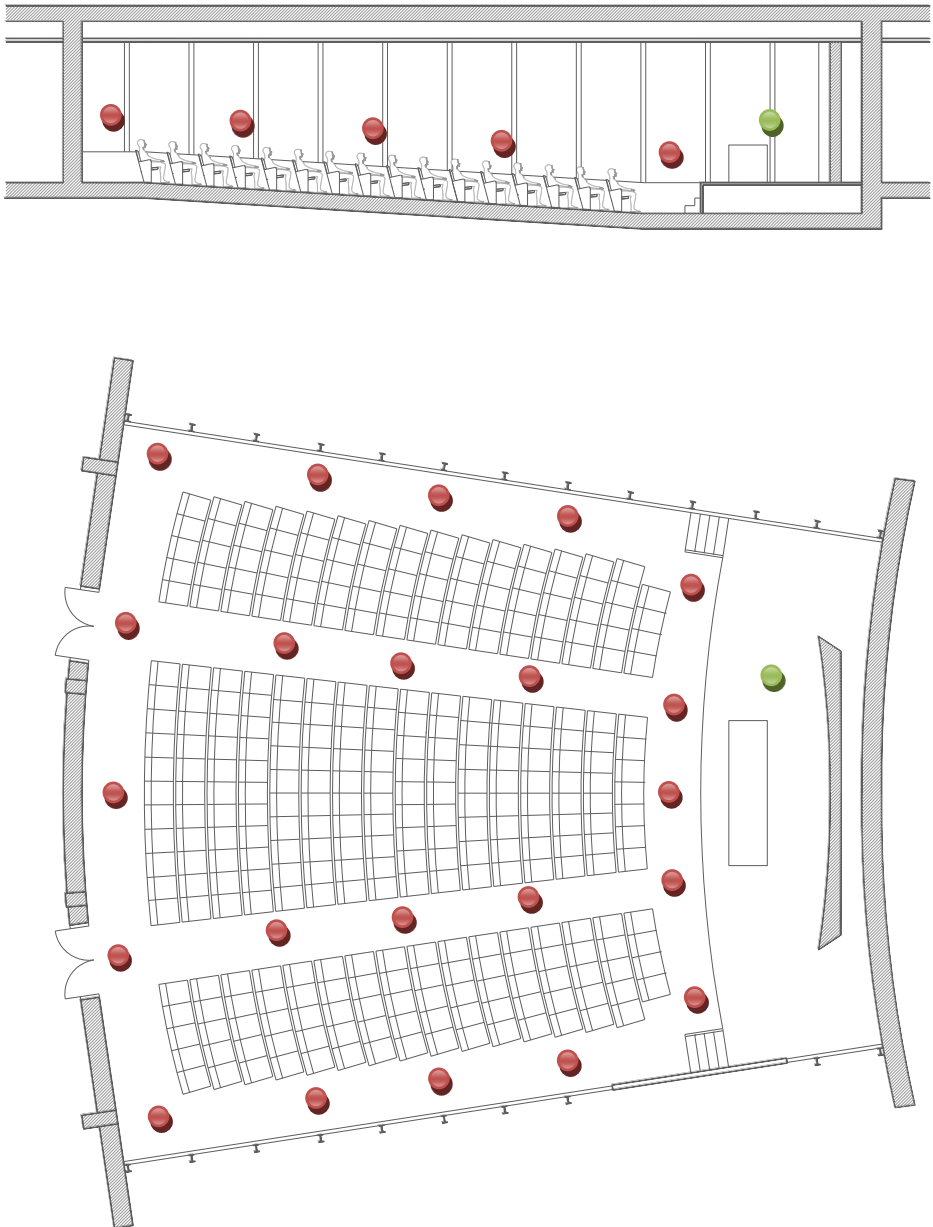


Fig. A2.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).



### 2.2.2. Resultados “in situ”

Tanto en este apartado, como en los posteriores, los resultados se presentan siempre siguiendo el mismo esquema. En primer lugar los resultados de **Inteligibilidad**, mostrando el valor medio obtenido en la totalidad de los puntos o en los correspondientes a un sector específico. Seguidamente los resultados de los **parámetros temporales** (EDT,  $T_R$ ,  $T_{R30}$ ,  $T_{R20}$ ,  $T_{R15}$  y  $T_{R10}$ ), y los **parámetros energéticos**, diferenciando por un lado la Claridad (C50 y C80), y por otro, la Definición (D50 y D80).

	Platea
STI fm.	0,64
STI ml.	0,64
RASTI	0,63

Tabla A2.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

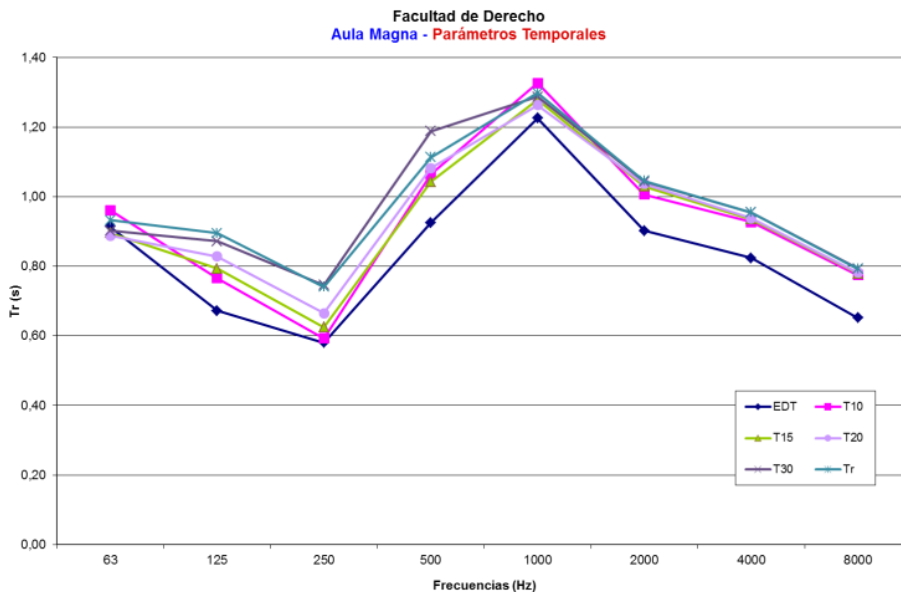


Fig. A2.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

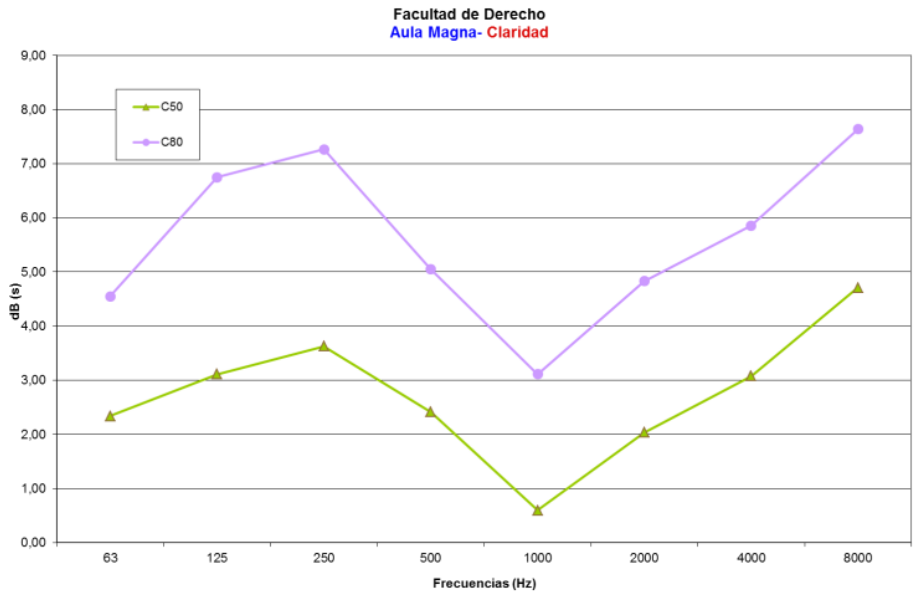


Fig. A2.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.

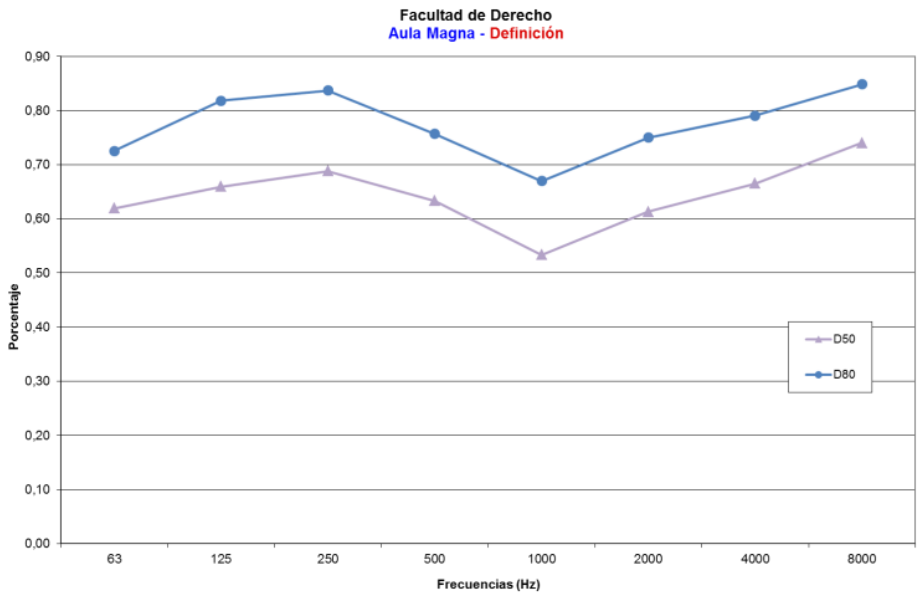


Fig. A2.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.

## 2.3. SIMULACIÓN

### 2.3.1. Modelo virtual de la sala

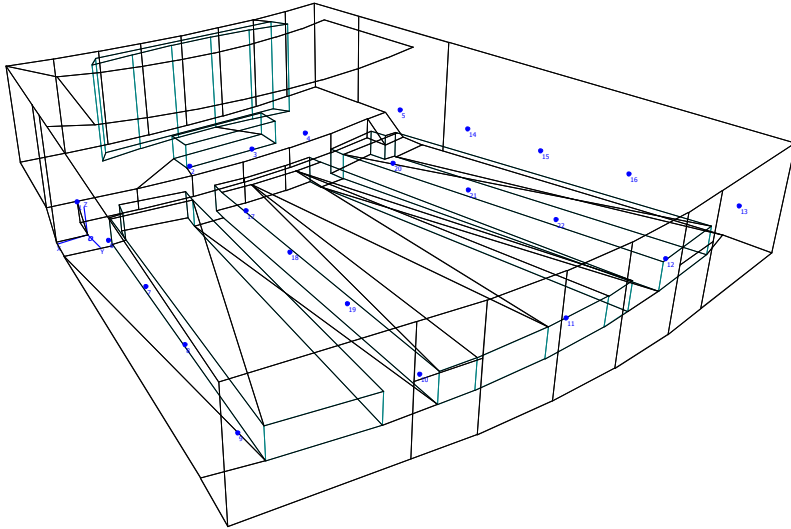


Fig. A2.6. Modelo virtual de la sala.

En este caso se toman como incógnitas los laterales acristalados (por ser una solución constructiva singular) y el pavimento (por tener un espectro conocido y poder usarlo como guía). Los espectros de absorción de ambas soluciones constructivas son significativamente distintos.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
1	0,25	0,21	0,14	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
2	0,20	0,20	0,12	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
3	0,15	0,18	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
4	0,15	0,18	0,40	0,35	0,30	0,23	0,20	0,20
5	0,15	0,18	0,11	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
6	0,30	0,35	0,45	0,52	0,60	0,60	0,65	0,70
7	X1 <sub>65</sub>	X1 <sub>125</sub>	X1 <sub>250</sub>	X1 <sub>500</sub>	X1 <sub>100</sub>	X1 <sub>200</sub>	X1 <sub>400</sub>	X1 <sub>800</sub>
8	X2 <sub>65</sub>	X2 <sub>125</sub>	X2 <sub>250</sub>	X2 <sub>500</sub>	X2 <sub>1000</sub>	X2 <sub>2000</sub>	X2 <sub>4000</sub>	X2 <sub>8000</sub>

Tabla A2.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.

### 2.3.2 ajuste mediante método de las superficies de respuesta

X1	X2	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
0,10	0,30	0,78	0,82	0,68	1,01	1,07	0,91	0,83	0,68
0,10	0,15	0,86	0,89	0,75	1,11	1,17	0,97	0,89	0,71
0,10	0,01	0,94	0,98	0,83	1,22	1,26	1,02	0,94	0,75
0,05	0,30	0,79	0,85	0,68	1,04	1,10	0,94	0,86	0,69
0,05	0,15	0,86	0,90	0,76	1,14	1,18	0,99	0,92	0,72
0,05	0,01	0,95	0,99	0,83	1,24	1,29	1,05	0,96	0,76
0,01	0,30	0,80	0,85	0,68	1,05	1,11	0,97	0,88	0,70
0,01	0,15	0,88	0,91	0,76	1,15	1,21	1,01	0,93	0,73
0,01	0,01	0,95	1,00	0,84	1,25	1,30	1,07	0,98	0,76

Tabla A2.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.

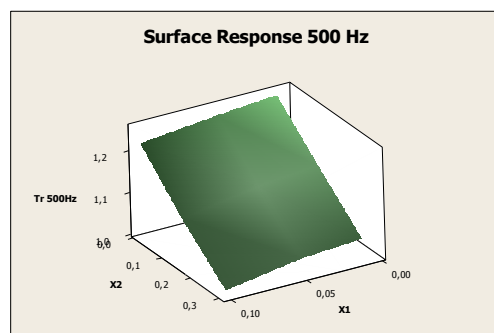
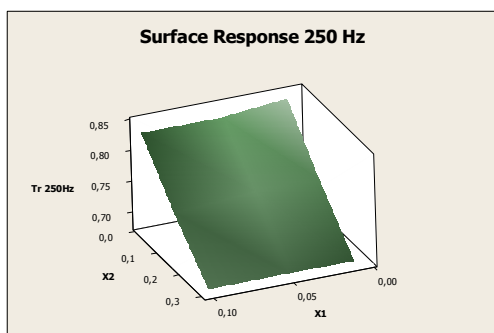
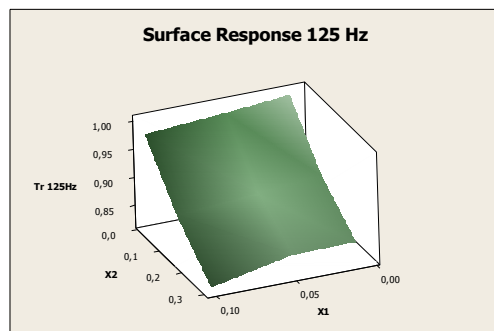
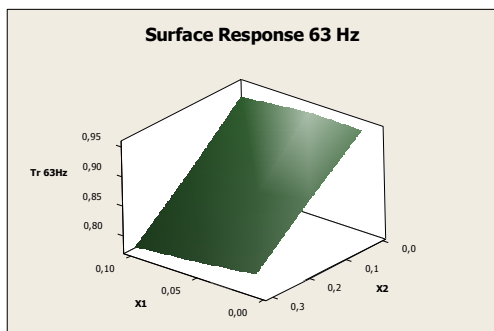


Fig. A1.7. Superficie de respuesta para 63, 125, 250 y 500Hz.

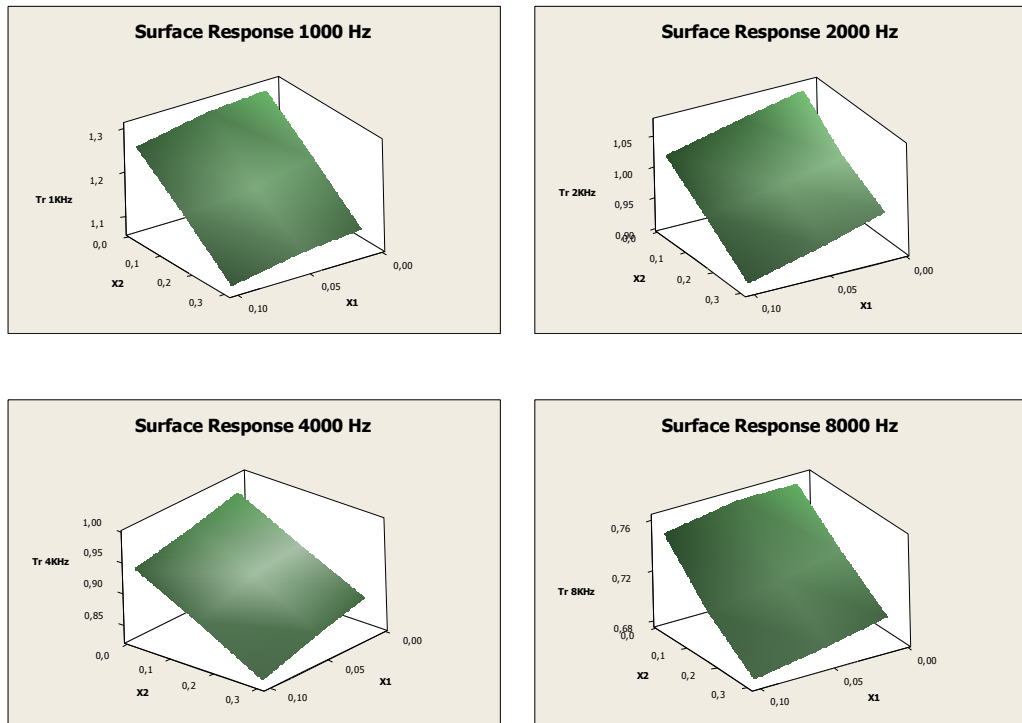


Fig. A1.8. Superficie de respuesta para 1000, 2000, 4000 y 5000Hz.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
<b>X1</b>	0,04	0,07	0,06	0,02	0,02	0,03	0,05	
<b>X2</b>	0,19	0,21	0,16	0,09	0,03	0,05	0,06	
<b>X1</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>
<b>X2</b>	<b>0,20</b>	<b>0,19</b>	<b>0,15</b>	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>
<b>X1</b>		0,03	0,10				0,02	
<b>X2</b>		0,24	0,15				0,09	

Tabla A2.6. Pares de resultados para cada frecuencia.

### 2.3.3. Resultado de la simulación

	"in situ"	simulado
<b>STI</b>	0,64	0,65
<b>RASTI</b>	0,63	0,62

Tabla A2.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

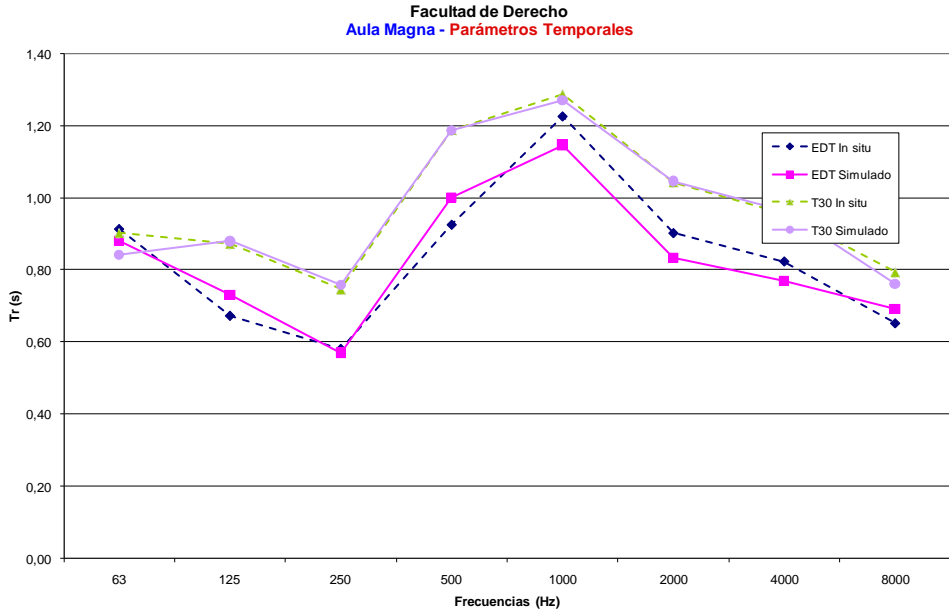


Fig. A2.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

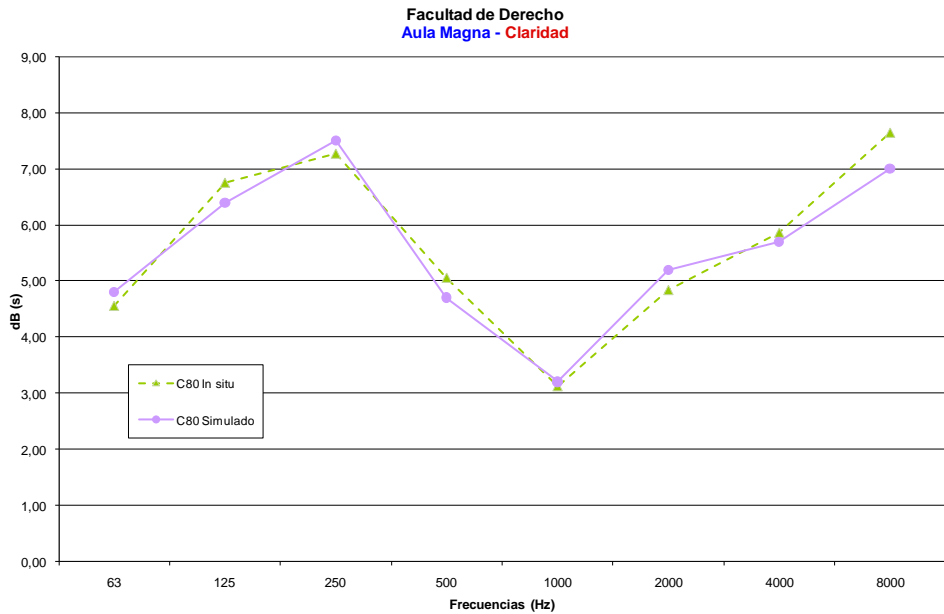


Fig. A2.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.



## 3. SALA DE CÁMARA. GRAN AUDITORIO DE TORREVIEJA

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

#### 3.1.1 Características



*Fig. A3.1. Vista general de la sala.*

La sala de cámara del Gran Auditorio de Torrevieja se distribuye siguiendo un esquema semicircular en planta. La pronunciada inclinación de la platea permite una visibilidad total del escenario desde todas las butacas. Los planos que configuran el techo siguen una forma similar a la superficie de audición.

<b>Volumen</b>	2.461 m <sup>3</sup>	<b>Altura max</b>	8,21 m
<b>Nº de butacas</b>	450	<b>Anchura</b>	28,56 m <sup>2</sup>
<b>Sup. Escenario</b>	52,75 m <sup>2</sup>	<b>Longitud</b>	9,03 m <sup>2</sup>

*Tabla A3.1. Datos de la sala.*



## 3.1.2 Descripción de las soluciones constructivas

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	NUM.
Fondo escenario. Franja inferior	Panelado de madera contrachapada de 1cm sobre rastreles de 4x4cm con un 30% de superficie con 2cm de lana en su trasdós	1
Fondo escenario. Franja superior	El mismo panelado que en la franja inferior, pero ampliando la cámara de aire para adaptarse a los entrantes que forma el paramento	2
Suelo de la sala	Las gradas están conformadas por paneles de contrachapado de 3.5cm de espesor sobre rastreles de madera fijados a estructura metálica.	3
Laterales de la sala	Trasdosado con doble placa de cartón-yeso de 13mm sobre perfilera de 46mm con lana de roca en su trasdós	4
Butacas	Butacas con laterales tapizados.	5
Techo de la sala	Doble placa de cartón yeso de 13mm con un 50% de lana de roca en su trasdós, formando planos a diferentes alturas (creando con el forjado superior cámaras de diferentes dimensiones). La sujeción al forjado se realiza mediante silent-blocks	6
Escenario	Parquet pegado a la losa de hormigón. Dispone en su zona central de una plataforma elevadora que comunica con el piso inferior	7

Tabla A3.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.

### 3.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

#### 3.2.1. Toma de datos “in situ”

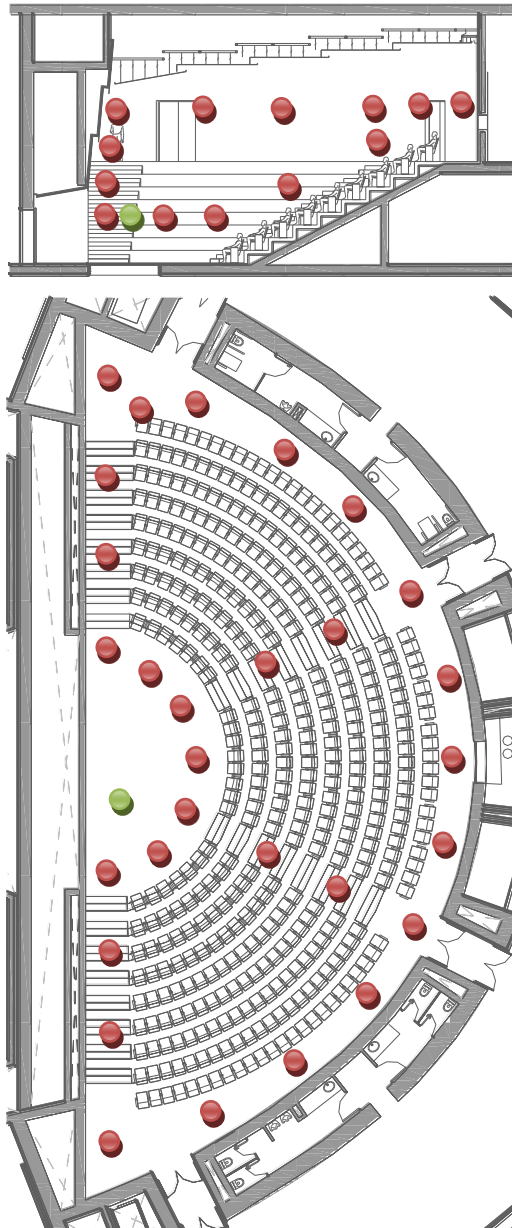


Fig. A3.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).

### 3.2.2. Resultados “in situ”

Tanto en este apartado, como en los posteriores, los resultados se presentarán siempre siguiendo el mismo esquema. En primer lugar los resultados de **Inteligibilidad**, mostrando el valor medio obtenido en la totalidad de los puntos o en los correspondientes a un sector específico. Seguidamente los resultados de los **parámetros temporales** (EDT,  $T_R$ ,  $T_{R30}$ ,  $T_{R20}$ ,  $T_{R15}$  y  $T_{R10}$ ), y los **parámetros energéticos**, diferenciando por un lado el parámetro Claridad (C50 y C80), y por otro lado, el parámetro Definición (D50 y D80).

	Platea
STI fm.	0,56
STI ml.	0,56
RASTI	0,59

Tabla A3.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

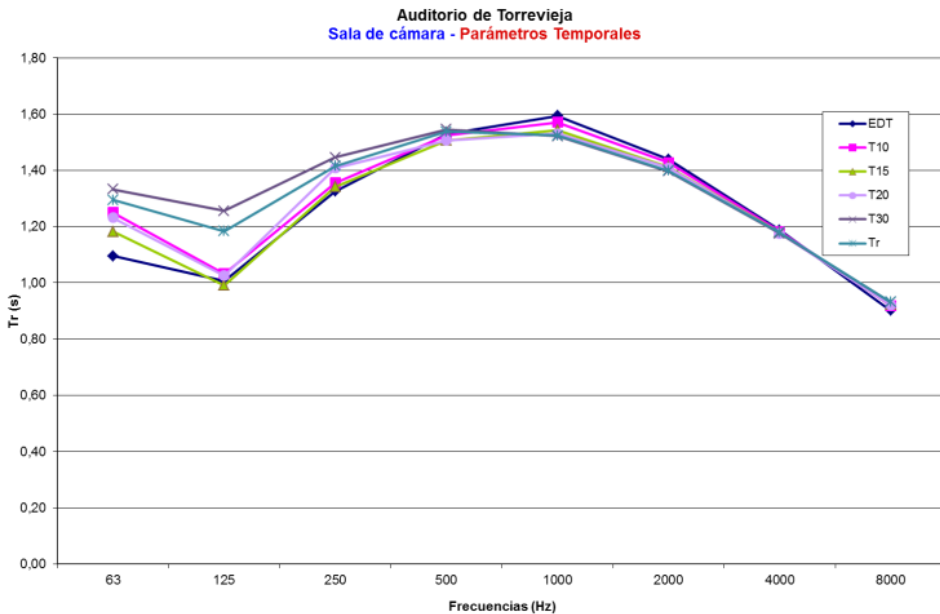


Fig. A3.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

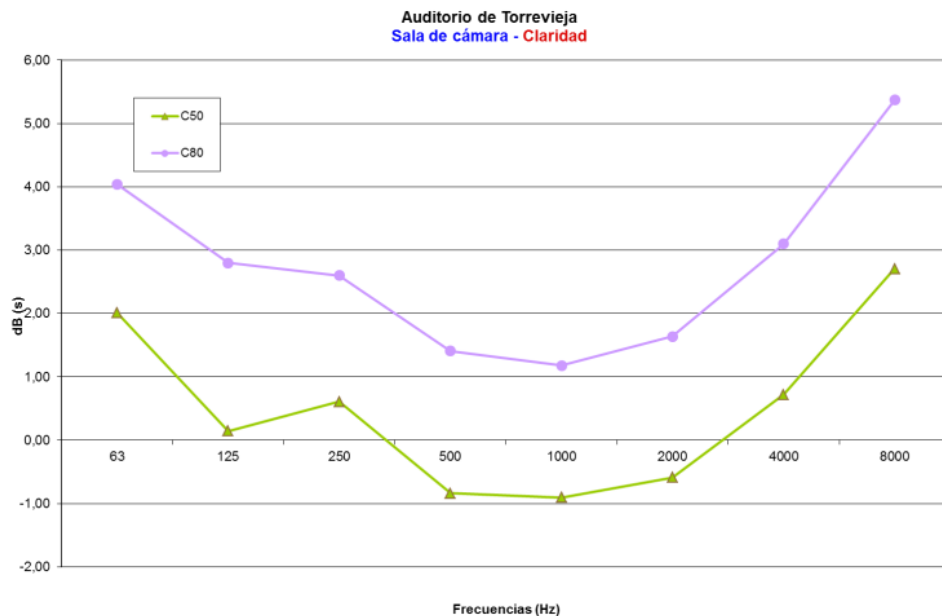


Fig. A3.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.

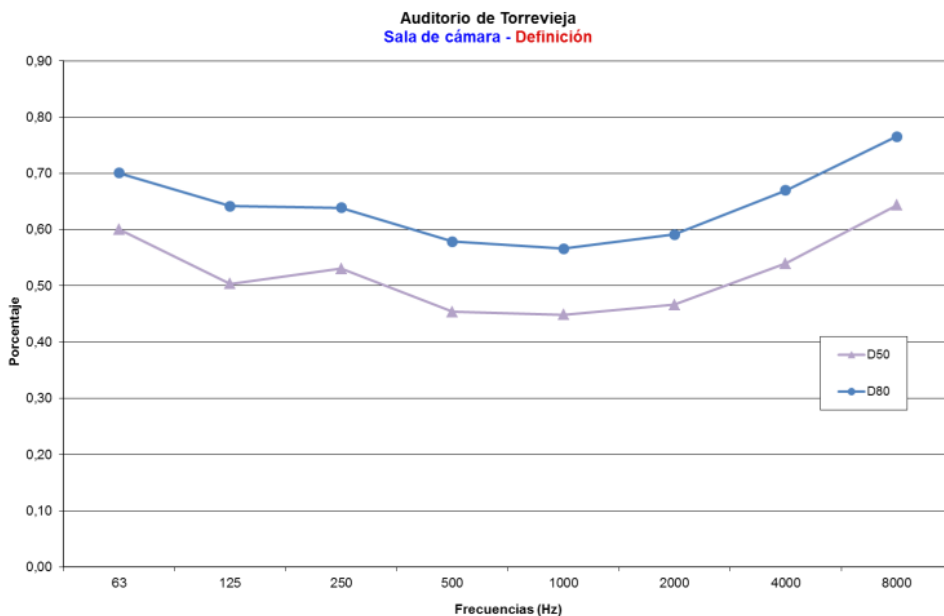


Fig. A3.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.

### 3.3. SIMULACIÓN

#### 3.3.1. Modelo virtual de la sala

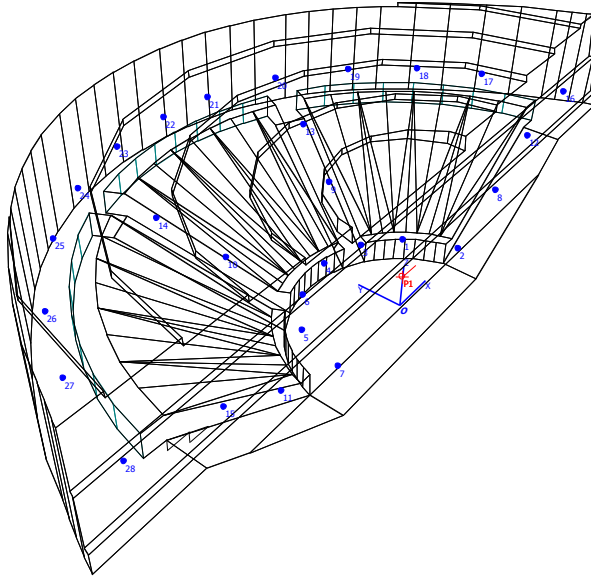


Fig. A3.6. Modelo virtual de la sala.

En este caso se toman como incógnitas el techo de la sala (por las cámaras de aire de espesor variable) y el pavimento del escenario (incluyendo la plataforma central). Los espectros de absorción de ambas soluciones constructivas son significativamente distintos.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
1	0,24	0,20	0,22	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
2	0,15	0,12	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
3	0,10	0,10	0,08	0,06	0,06	0,06	0,04	0,04
4	0,15	0,18	0,11	0,08	0,06	0,06	0,04	0,04
5	0,15	0,17	0,37	0,54	0,60	0,67	0,71	0,71
6	X1 <sub>65</sub>	X1 <sub>125</sub>	X1 <sub>250</sub>	X1 <sub>500</sub>	X1 <sub>100</sub>	X1 <sub>200</sub>	X1 <sub>400</sub>	X1 <sub>800</sub>
7	X2 <sub>65</sub>	X2 <sub>125</sub>	X2 <sub>250</sub>	X2 <sub>500</sub>	X2 <sub>1000</sub>	X2 <sub>2000</sub>	X2 <sub>4000</sub>	X2 <sub>8000</sub>

Tabla A3.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.

### 3.3.2 ajuste mediante método de las superficies de respuesta

X1	X2	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
0,20	0,08	1,19	1,15	1,18	1,18	1,17	1,09	0,88	0,77
0,20	0,04	1,23	1,19	1,22	1,22	1,21	1,11	0,90	0,78
0,20	0,01	1,25	1,20	1,23	1,23	1,22	1,13	0,90	0,78
0,10	0,08	1,45	1,38	1,40	1,40	1,39	1,25	0,97	0,84
0,10	0,04	1,49	1,41	1,42	1,42	1,40	1,28	0,98	0,78
0,10	0,01	1,52	1,44	1,44	1,44	1,43	1,29	0,99	0,86
0,01	0,08	1,76	1,64	1,63	1,62	1,60	1,42	1,07	0,93
0,01	0,04	1,76	1,64	1,63	1,62	1,60	1,42	1,07	0,93
0,01	0,01	1,85	1,72	1,69	1,69	1,66	1,47	1,09	0,95

Tabla A3.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.

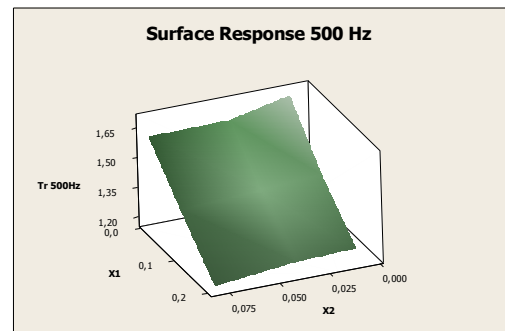
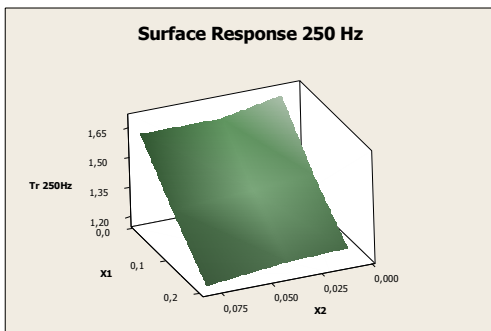
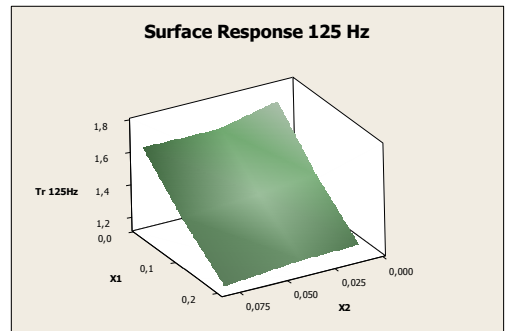
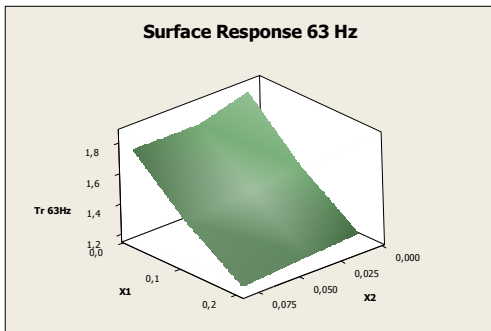


Fig. A3.7. Superficie de respuesta para 63. 125. 250 y 500Hz.

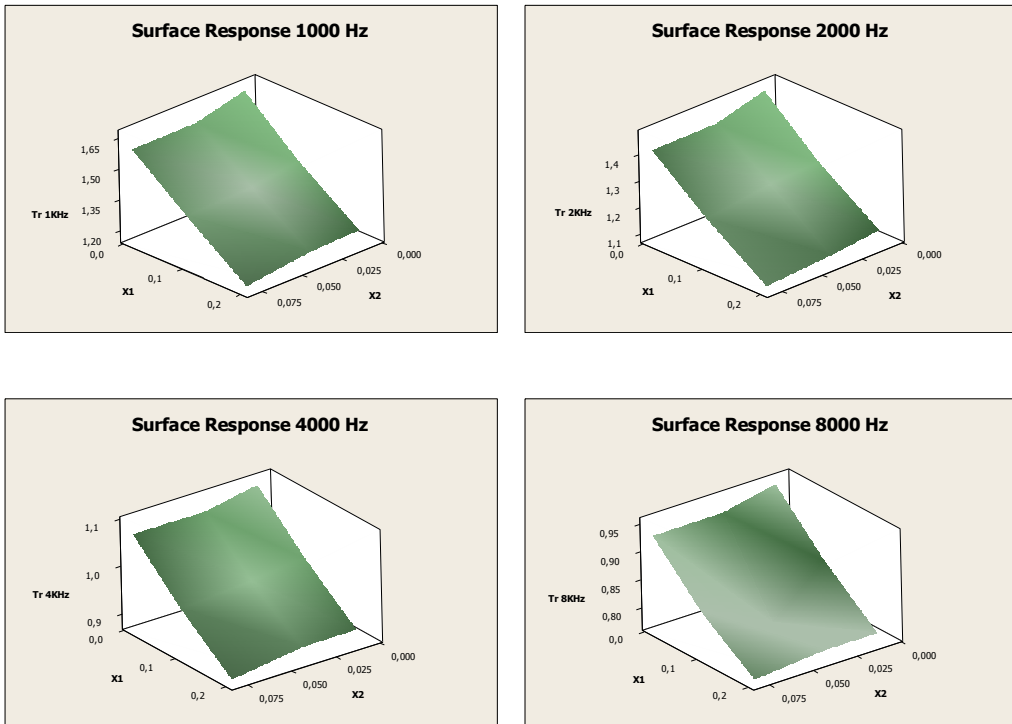


Fig. A3.8. Superficie de respuesta para 1000. 2000. 4000 y 5000Hz.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
X1			0,09			0,03	0,05	0,02
X2			0,03			0,03	0,02	0,06
X1	0,17	0,16	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
X2	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04
X1			0,08					
X2			0,05					

Tabla A3.6. Pares de resultados para cada frecuencia.

### 3.3.3. Resultado de la simulación

	"in situ"	simulado
STI	0,56	0,59
RASTI	0,52	0,55

Tabla A3.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

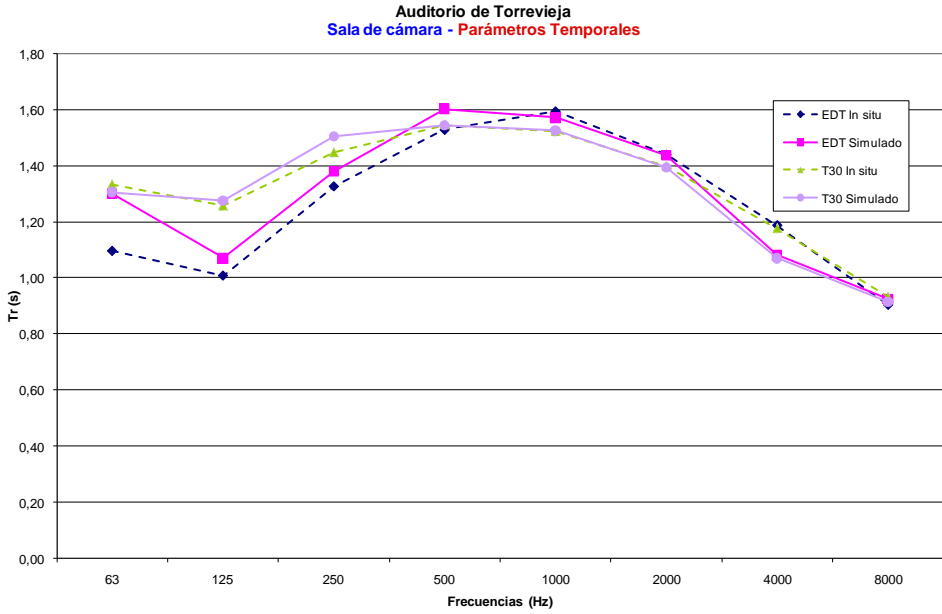


Fig. A3.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

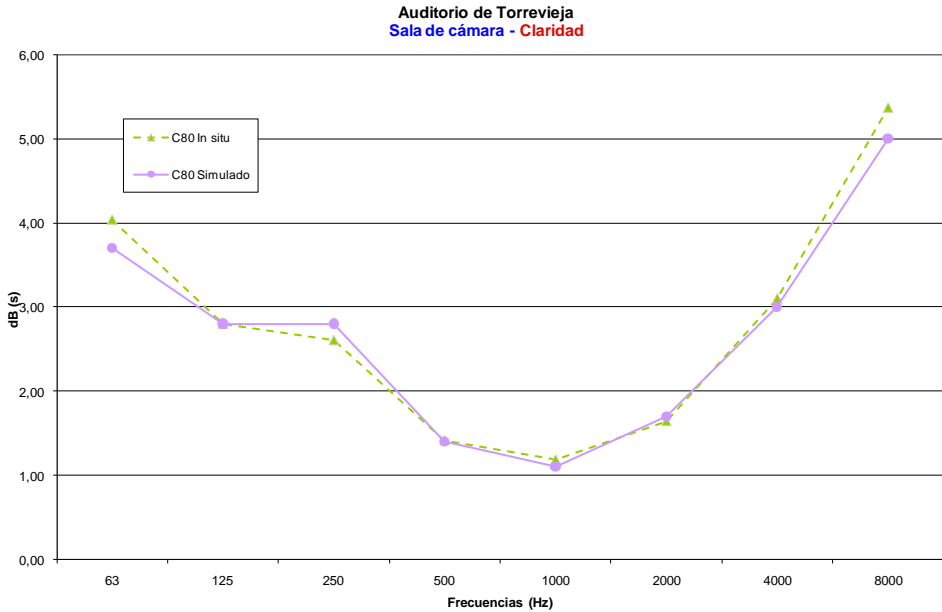


Fig. A3.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.





## 4. AUDITORIO MUNICIPAL DE BENIGANIM.

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

#### 4.1.1 Características



*Fig. A4.1. Vista general de la sala.*

La sala principal del auditorio municipal de Beniganim tiene una superficie de audición que se desarrolla en un plano único. Entre la corbata y el inicio de la platea se reserva un espacio en el que eventualmente se pueden colocar sillas para aumentar el aforo. El techo está compuesto por un juego de planos centrales, cortados de forma simétrica, en ambos laterales, por un plano inclinado que bisela el encuentro con los paramentos verticales que conforman los laterales de la sala.

Volumen	4.993 m <sup>3</sup>	Altura max	8,21 m
Nº de butacas	604	Ancho	20,96 m
Sup. Escenario	161 m <sup>2</sup>	Longitud	31,56 m

*Tabla A4.1. Datos de la sala.*

## 4.1.2 Descripción de las soluciones constructivas

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	NUM.
Laterales y fondo concha de escenario	Cortinas ligeras de algodón plisadas, separadas entre 20 y 30cm de la pared	1
Tarima	Madera maciza de 3cm de espesor sobre rastreles de 10-15cm	2
Fondo de la sala	Listonado vertical de madera con 50% de hueco con 4cm de lana de roca en su trasdós	3
Laterales de la sala reflectantes (zócalo)	Panelado de madera contrachapada de 7-9mm	4
Butacas	De tapizado medio. Patas y trasera de respaldo de madera sin tapizar	5
Pavimento de la sala	Linóleoum sobre losa de hormigón	6
Vidrios cabina control	Luna grande alojada en carpintería metálica	7
Laterales sala absorbentes (parte superior)	Paneles de lana de roca de 4cm con velo	8
Techo sala y concha acústica	Grandes paneles de madera contrachapada de 12-15mm de espesor con cámara de aire variable en su trasdós (entre 40cm y 220cm aproximadamente)	9
Tapas inferiores del hueco que aloja la climatización	Los conductos de aire acondicionado se encuentran en la parte superior de los laterales de la sala. En su cara inferior están revestidos con fieltro permeable y lana de roca en su trasdós	10

*Tabla A4.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.*

## 4.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

### 4.2.1. Toma de datos “in situ”

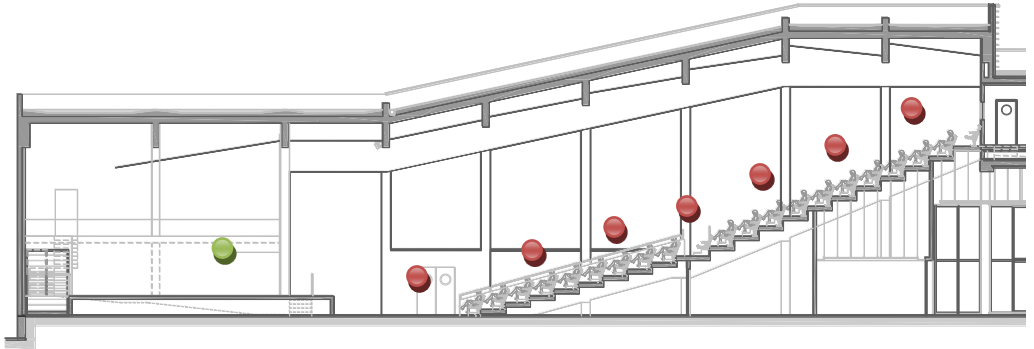


Fig. A4.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).

### 4.2.2. Resultados “in situ”

Tanto en este apartado, como en los posteriores, los resultados se presentarán siempre siguiendo el mismo esquema. En primer lugar los resultados de **Inteligibilidad**, mostrando el valor medio obtenido en la totalidad de los puntos o en los correspondientes a un sector específico. Seguidamente los resultados de los **parámetros temporales** (EDT,  $T_R$ ,  $T_{R30}$ ,  $T_{R20}$ ,  $T_{R15}$  y  $T_{R10}$ ), y los **parámetros energéticos**, diferenciando por un lado el parámetro Claridad (C50 y C80), y por otro lado, el parámetro Definición (D50 y D80).

	Platea
STI fm.	0,57
STI ml.	0,56
RASTI	0,54

Tabla A4.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

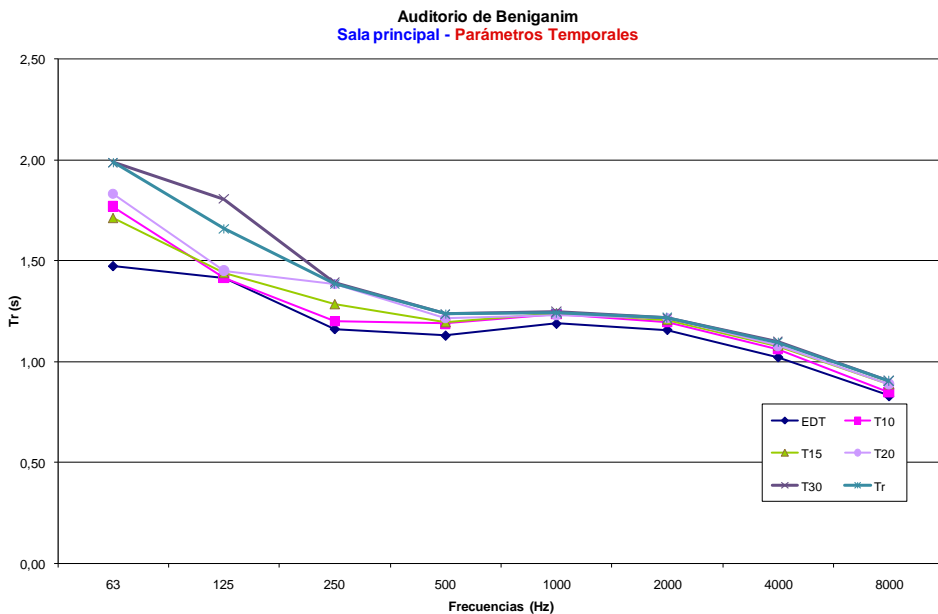


Fig. A4.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

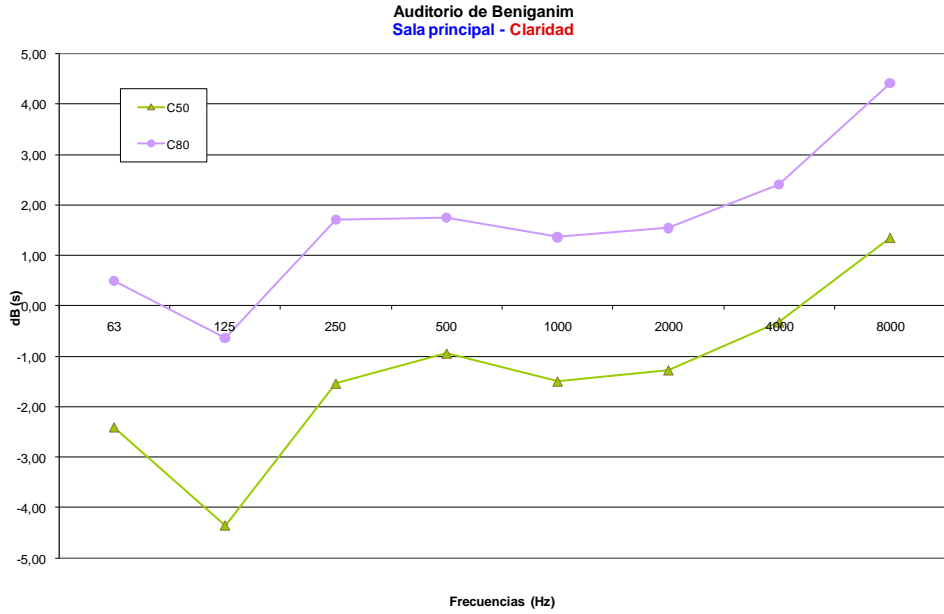


Fig. A4.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.

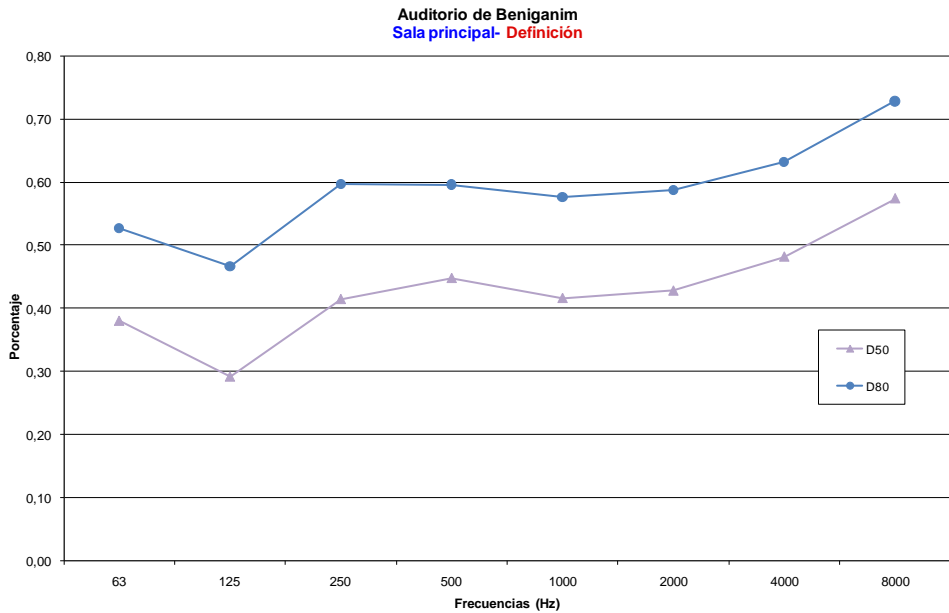


Fig. A4.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.

### 4.3. SIMULACIÓN

#### 4.3.1. Modelo virtual de la sala

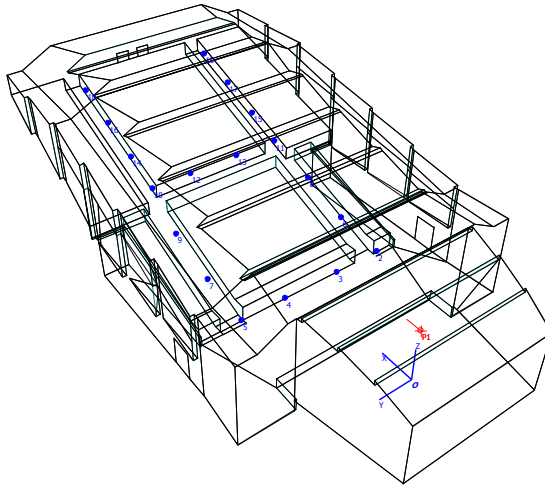


Fig. A4.6. Modelo virtual de la sala (182 3Dcaras).

En este caso se toman como incógnitas el techo de la sala y la concha acústica (por la diferencia existente en las cámaras de aire) y el revestimiento absorbente de los conductos de climatización (por ser una solución poco estudiada previamente). Los espectros de absorción de ambas soluciones constructivas son significativamente distintos.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
1	0,17	0,17	0,25	0,45	0,65	0,60	0,60	0,60
2	0,15	0,18	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
3	0,35	0,35	0,55	0,85	0,90	0,75	0,75	0,75
4	0,20	0,20	0,12	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
5	0,11	0,18	0,40	0,59	0,62	0,68	0,70	0,70
6	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02
7	0,14	0,14	0,08	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
8	0,30	0,35	0,60	0,85	0,92	0,92	0,90	0,85
9	X1 <sub>65</sub>	X1 <sub>125</sub>	X1 <sub>250</sub>	X1 <sub>500</sub>	X1 <sub>1000</sub>	X1 <sub>2000</sub>	X1 <sub>4000</sub>	X1 <sub>8000</sub>
10	X2 <sub>65</sub>	X2 <sub>125</sub>	X2 <sub>250</sub>	X2 <sub>500</sub>	X2 <sub>1000</sub>	X2 <sub>2000</sub>	X2 <sub>4000</sub>	X2 <sub>8000</sub>

Tabla A4.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.

### 4.3.2 ajuste mediante método de las superficies de respuesta

X1	X2	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
0,14	0,90	1,70	1,51	1,21	1,17	1,13	1,09	0,95	0,81
0,14	0,55	1,76	1,59	1,31	1,23	1,18	1,13	0,99	0,84
0,14	0,20	2,02	1,75	1,45	1,37	1,34	1,27	1,10	0,87
0,07	0,90	1,98	1,71	1,32	1,24	1,20	1,16	1,01	0,87
0,07	0,55	2,05	1,80	1,40	1,31	1,25	1,21	1,06	0,89
0,07	0,20	2,37	1,99	1,55	1,46	1,43	1,35	1,15	0,95
0,01	0,90	2,30	1,94	1,41	1,31	1,28	1,22	1,07	0,92
0,01	0,55	2,38	2,05	1,50	1,36	1,33	1,27	1,11	0,97
0,01	0,20	2,79	2,28	1,67	1,55	1,51	1,42	1,21	1,00

Tabla A4.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.

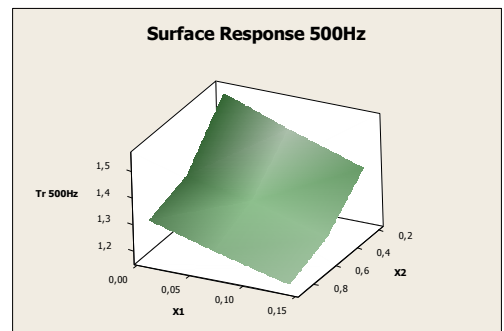
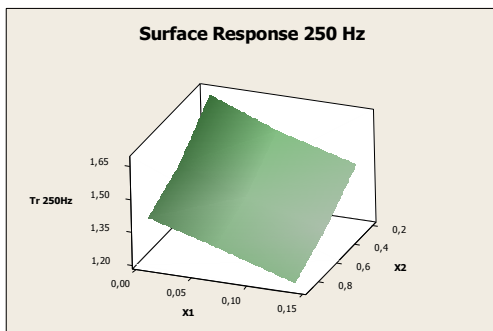
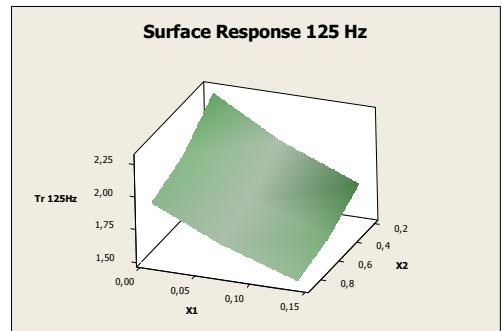
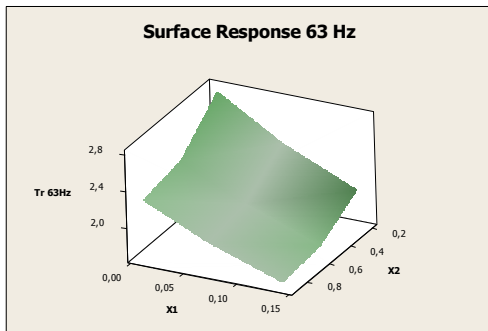


Fig. A4.7. Superficie de respuesta para 63. 125. 250 y 500Hz.



A.4. AUDITORIO MUNICIPAL DE BENIGANIM

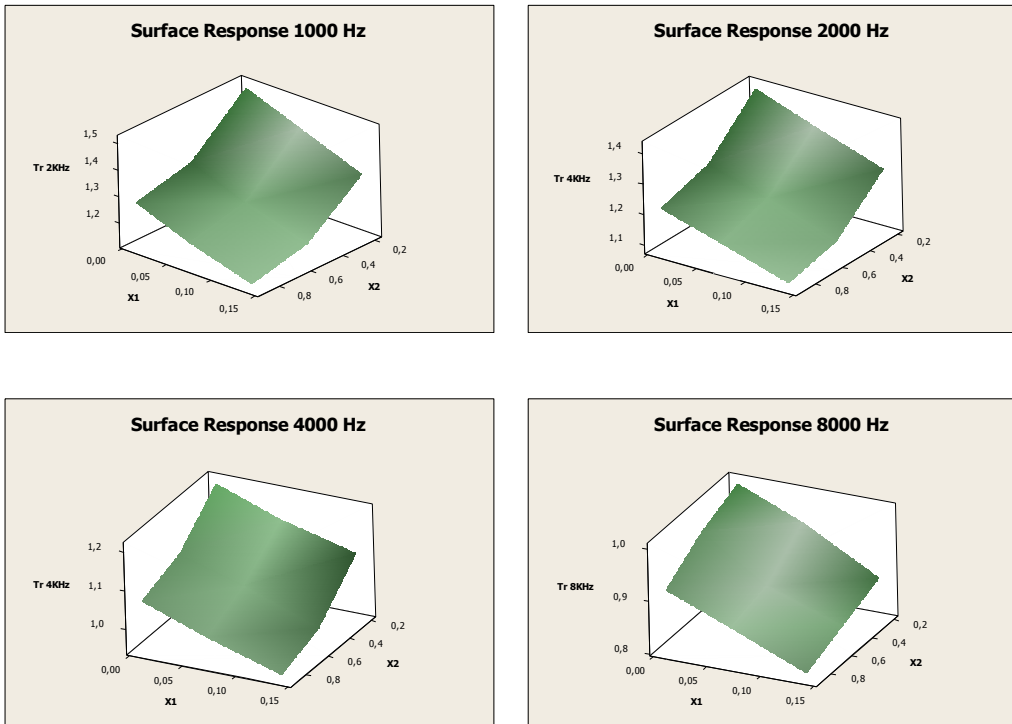


Fig. A4.8. Superficie de respuesta para 1000. 2000. 4000 y 8000Hz.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
X1	0,08	0,07	0,02	0,12	0,72	0,77	0,23	0,07
X2	0,55	0,55	0,88	0,56	0,55	0,55	0,54	0,55
X1	<b>0,13</b>	<b>0,09</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>
X2	<b>0,23</b>	<b>0,35</b>	<b>0,59</b>	<b>0,80</b>	<b>0,85</b>	<b>0,76</b>	<b>0,74</b>	<b>0,71</b>
X1	0,09	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
X2	0,34	0,22	0,33	0,49	0,36	0,32	0,21	

Tabla A4.6. Pares de resultados para cada frecuencia.

4.3.3. Resultado de la simulación

	"in situ"	simulado
STI	0,56	0,54
RASTI	0,54	0,53

Tabla A4.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

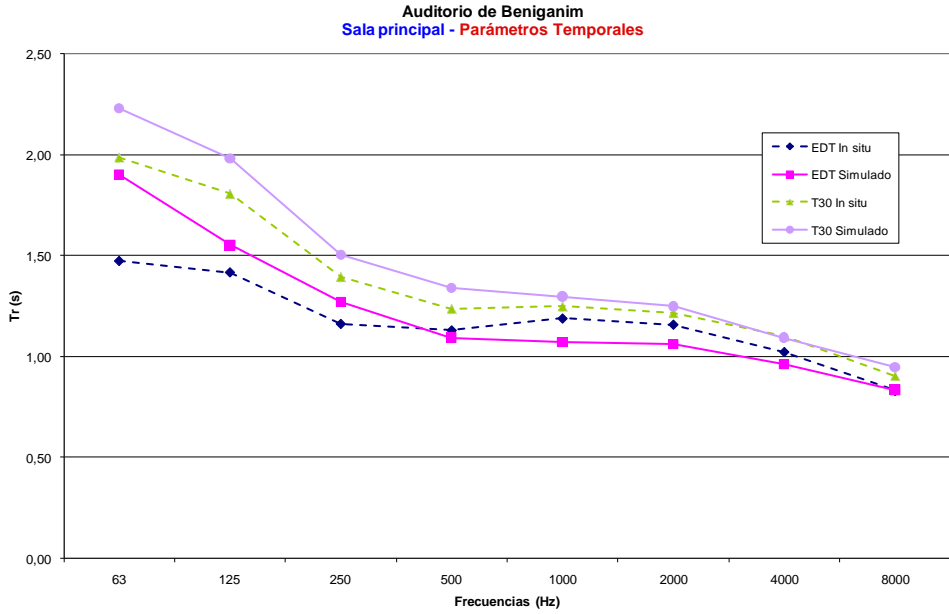


Fig. A4.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

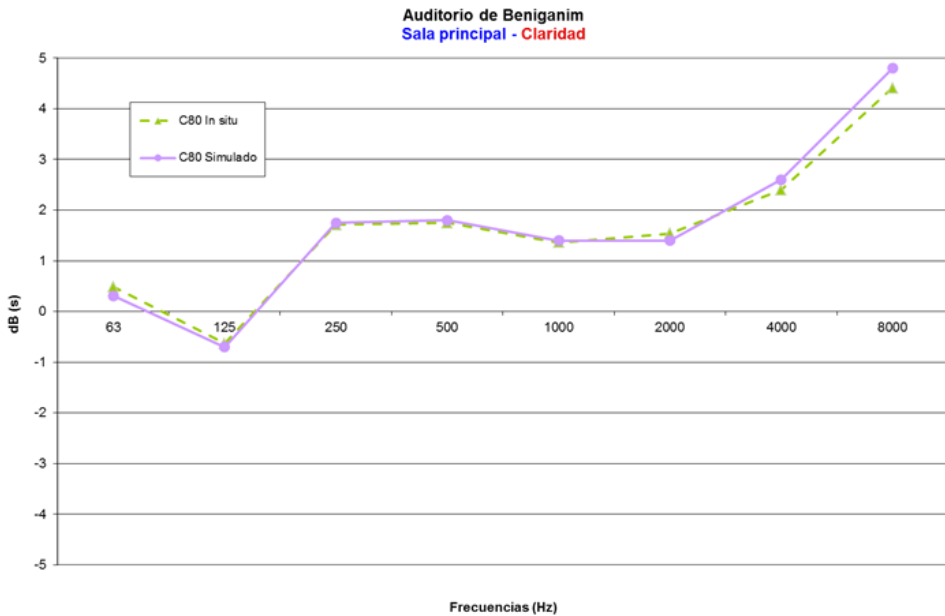


Fig. A4.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.



## 5. AUDITORIO MUNICIPAL DE VILLAJOYOSA.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

#### 5.1.1 Características



*Fig A5.1. Vista general del Auditorio Municipal de Villajoyosa.*

La sala principal del auditorio Municipal de Villajoyosa se conforma espacialmente a partir del corte de diferentes planos que definen su cubierta y sus laterales. Se aprecian dos zonas diferenciadas de audición, la platea y el anfiteatro, el cual destaca por su disposición irregular, asimétrica, al igual que los paneles que constituyen el techo.

<b>Volumen</b>	8.321 m <sup>3</sup>	<b>Altura max</b>	14,46 m
<b>Nº de butacas</b>	814	<b>Ancho</b>	23,28 m
<b>Sup. Escenario</b>	217 m <sup>2</sup>	<b>Largo</b>	41,21 m

*Tabla A5.1. Datos de la sala.*

## 5.1.2 Descripción de las soluciones constructivas

	Numeración	Num.
Laterales de la sala	Vermiculita proyectada sobre muro de hormigón	1
Antepecho anfiteatro y escaleras	Estructuras metálicas revestidas con doble placa de cartón-yeso (13+13mm)	2
Tarima	Tarima de madera de 3cm sobre rastreles de 10-15cm	3
Butacas	Butacas totalmente tapizadas con poco relleno	4
Vidrios cabina y ventana fondo de sala	Luna grande sellada a carpintería metálica	5
Puertas	Madera contrachapada de 5cm lacada	6
Pavimento	Moqueta de 3mm pegada directamente a losa de hormigón	7
Techo inferior anfiteatro	Paneles perforados de cartón-yeso de 15mm con perforación del 21%	8
Pasos de acceso al anfiteatro	Su sección se considera como hueco absorbente tipo lana de roca	9
Techo de la sala	Paneles constituidos por doble placa de cartón-yeso de 13+13mm, fijados a subestructura metálica. En su trasdós presentan una gran cámara variable (entre 90cm y 450cm) parcialmente ocupada por instalaciones	10
Concha acústica	Paneles de madera contrachapada de 19mm de espesor	11

Tabla A5.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.

## 5.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

### 5.2.1. Toma de datos “in situ”

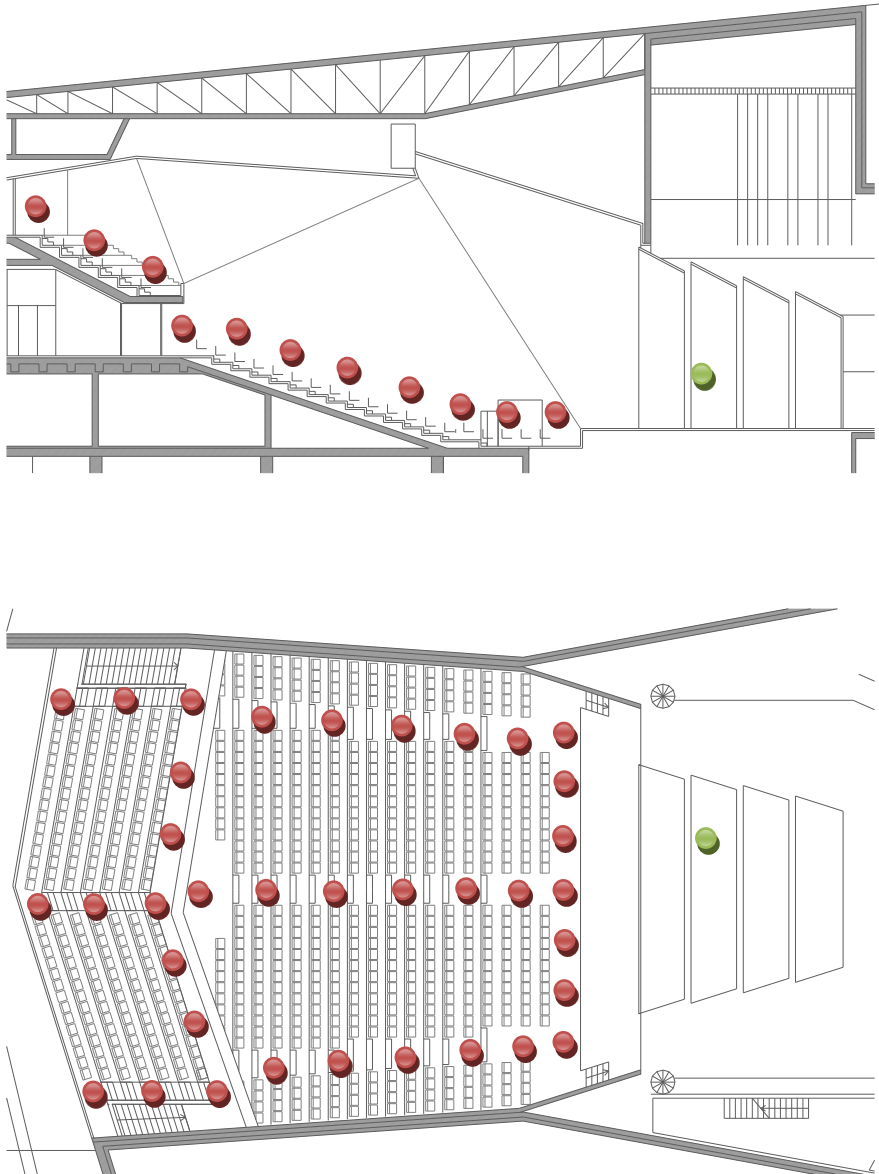


Fig A5.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos) en la platea y en el anfiteatro.

### 5.2.2. Resultados “in situ”

Tanto en este apartado, como en los posteriores, los resultados se presentarán siempre siguiendo el mismo esquema. En primer lugar los resultados de **Inteligibilidad**, mostrando el valor medio obtenido en la totalidad de los puntos o en los correspondientes a un sector específico. Seguidamente los resultados de los **parámetros temporales** (EDT,  $T_R$ ,  $T_{R30}$ ,  $T_{R20}$ ,  $T_{R15}$  y  $T_{R10}$ ), y los **parámetros energéticos**, diferenciando por un lado el parámetro Claridad (C50 y C80), y por otro lado, el parámetro Definición (D50 y D80).

	Platea Baja	Platea Alta	Anfiteatro
STI fm.	0,58	0,59	0,59
STI ml.	0,57	0,59	0,59
RASTI	0,54	0,56	0,56

Tabla A5.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

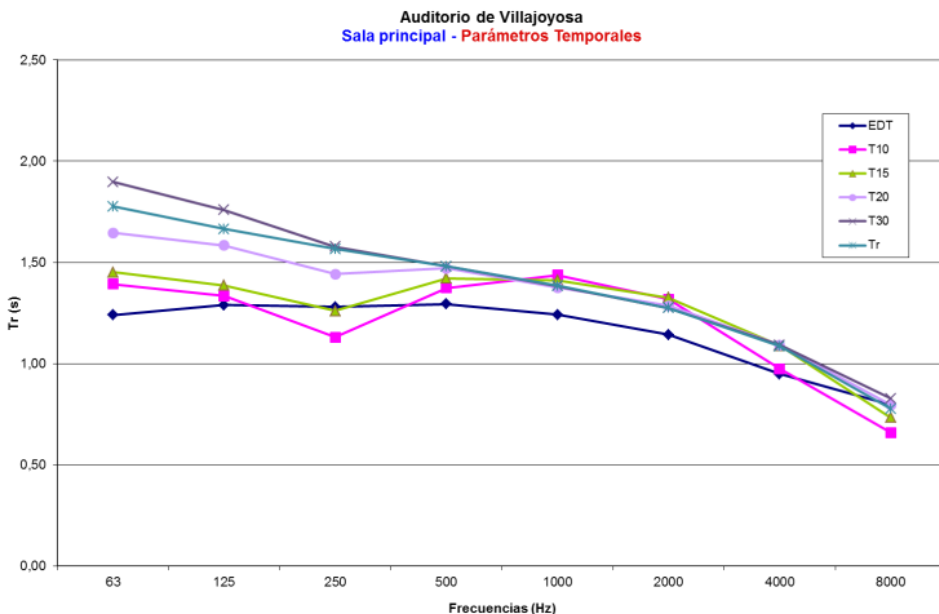


Fig A5.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

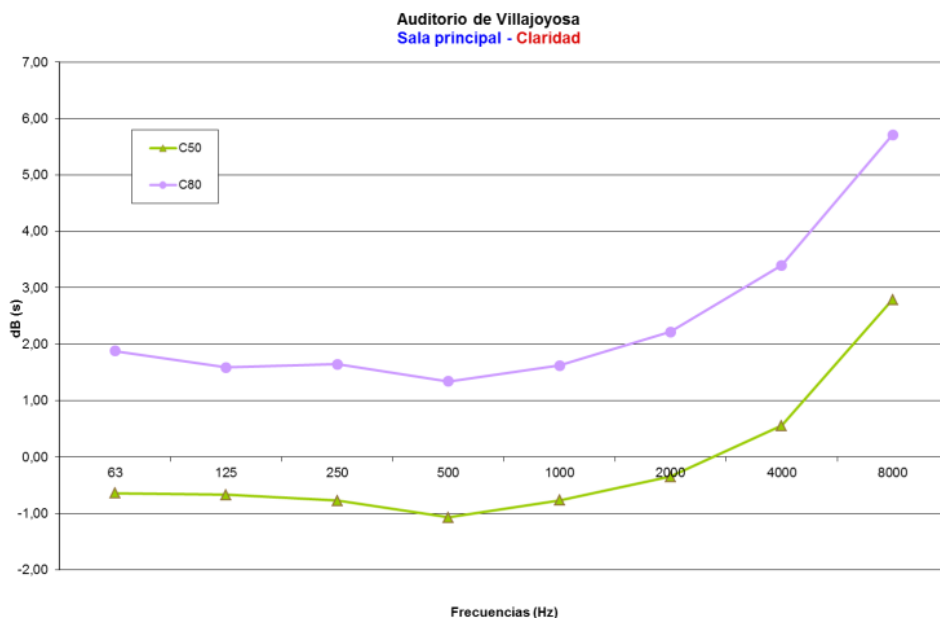


Fig A5.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.

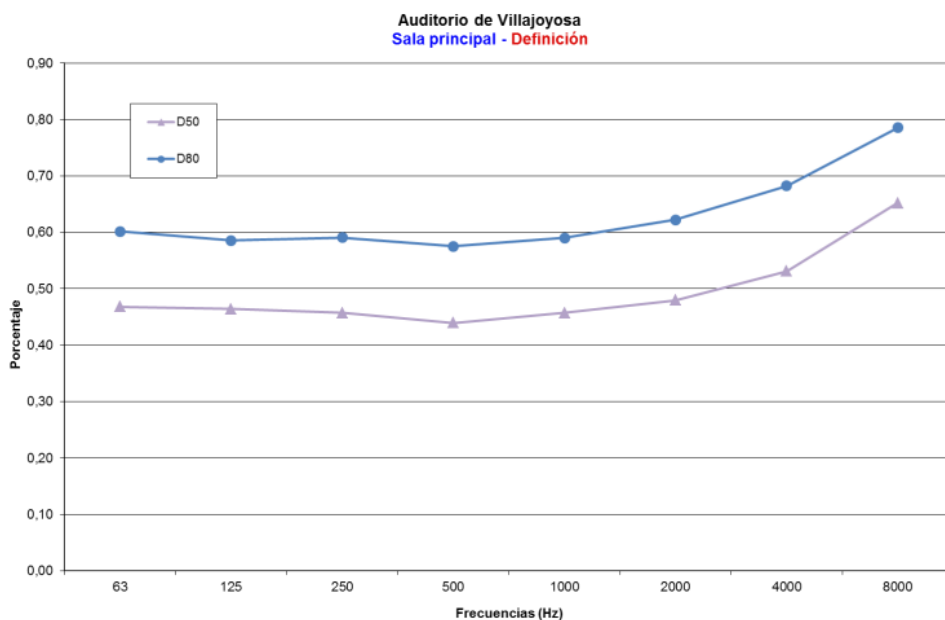


Fig A5.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.



### 5.3. SIMULACIÓN

#### 5.3.1. Modelo virtual de la sala

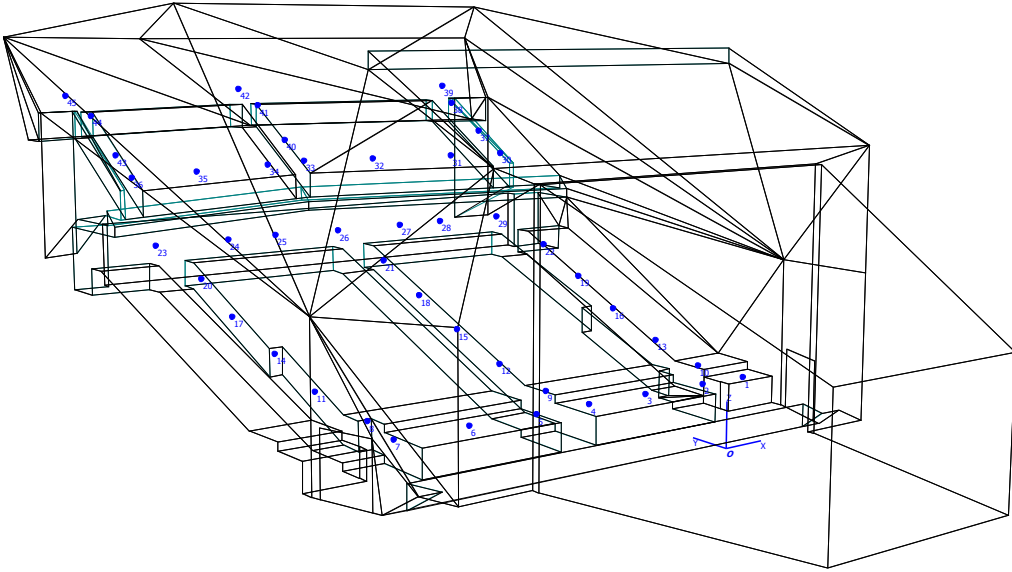


Fig A5.6. Modelo virtual de la sala.

	65	125	250	500	1K	2K	4K	8K
1	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,07
2	0,10	0,18	0,11	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04
3	0,15	0,18	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
4	0,27	0,27	0,45	0,59	0,62	0,81	0,81	0,81
5	0,09	0,18	0,09	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03
6	0,12	0,12	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
7	0,04	0,06	0,15	0,22	0,24	0,36	0,42	0,45
8	0,15	0,20	0,28	0,55	0,82	0,50	0,43	0,40
9	0,19	0,70	0,85	0,90	0,90	0,90	0,19	0,70
10	X1 <sub>65</sub>	X1 <sub>125</sub>	X1 <sub>250</sub>	X1 <sub>500</sub>	X1 <sub>100</sub>	X1 <sub>200</sub>	X1 <sub>400</sub>	X1 <sub>800</sub>
11	X2 <sub>65</sub>	X2 <sub>125</sub>	X2 <sub>250</sub>	X2 <sub>500</sub>	X2 <sub>1000</sub>	X2 <sub>2000</sub>	X2 <sub>4000</sub>	X2 <sub>8000</sub>

Tabla A5.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.

### 5.3.2 ajuste mediante método de las superficies de respuesta

X1	X2	65	125	250	500	1K	2K	4K	8K
0,45	0,15	1,94	1,62	1,39	1,05	1,01	0,9	0,81	0,63
0,45	0,07	2,04	1,71	1,5	1,14	1,09	1,00	0,87	0,68
0,45	0,01	2,15	1,81	1,59	1,22	1,17	1,10	0,95	0,7
0,25	0,15	3,00	1,91	1,72	1,21	1,11	1,04	0,91	0,66
0,25	0,07	3,21	1,99	1,82	1,29	1,23	1,13	0,96	0,71
0,25	0,01	3,38	2,16	1,95	1,38	1,36	1,16	1,05	0,76
0,05	0,15	6,30	2,8	2,31	1,43	1,33	1,14	1,01	0,74
0,05	0,07	7,01	2,98	2,46	1,53	1,43	1,23	1,08	0,77
0,05	0,01	7,42	3,18	2,64	1,63	1,55	1,34	1,18	0,79

Tabla A5.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.

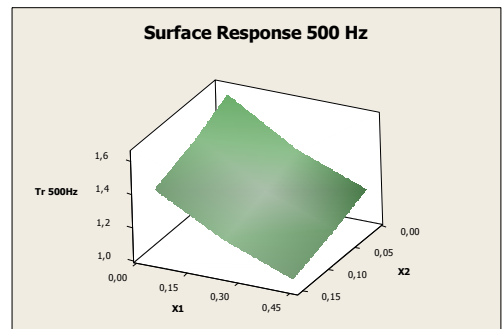
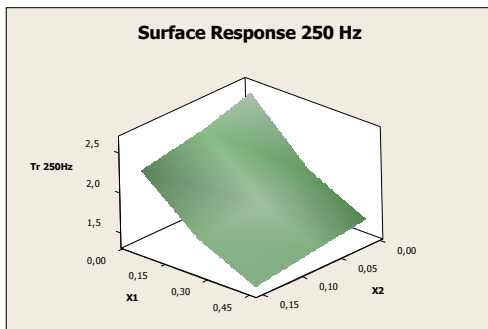
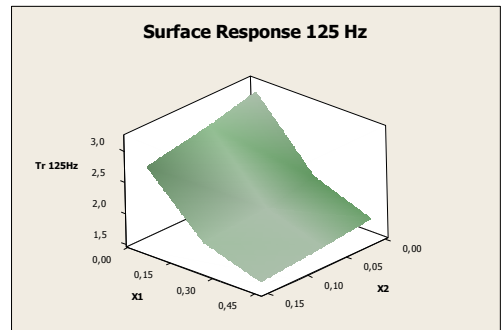
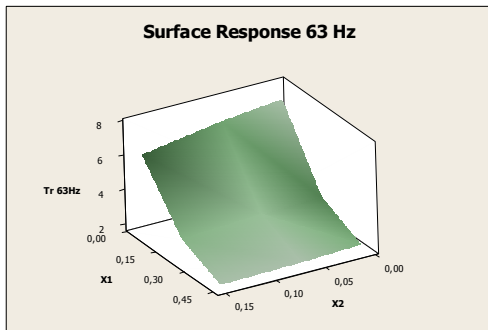


Fig. A5.7. Superficie de respuesta para 63. 125. 250 y 500Hz.

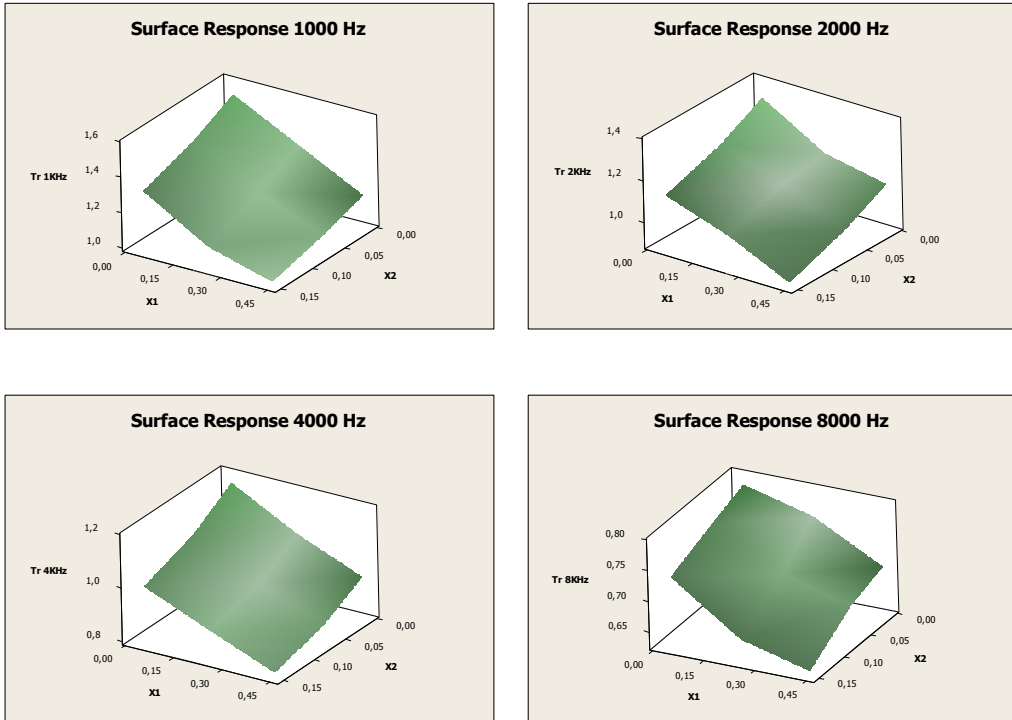


Fig. A5.8. Superficie de respuesta para 1000. 2000. 4000 y 8000Hz.

	65	125	250	500	1K	2K	4K	8K
X1	0,42	0,31	0,32	0,15	0,11	0,06	0,06	0,06
X2	0,14	0,15	0,14	0,08	0,08	0,04	0,05	0,04
X1		0,40	0,36	0,15	0,17	0,11	0,15	
X2		0,13	0,09	0,02	0,03	0,02	0,02	

Tabla A5.6. Pares de resultados para cada frecuencia.

### 5.3.3. Resultado de la simulación

	Platea Baja	Platea Alta	Anfiteatro
STI	0,69	0,59	0,56
RASTI	0,62	0,55	0,52

Tabla A5.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

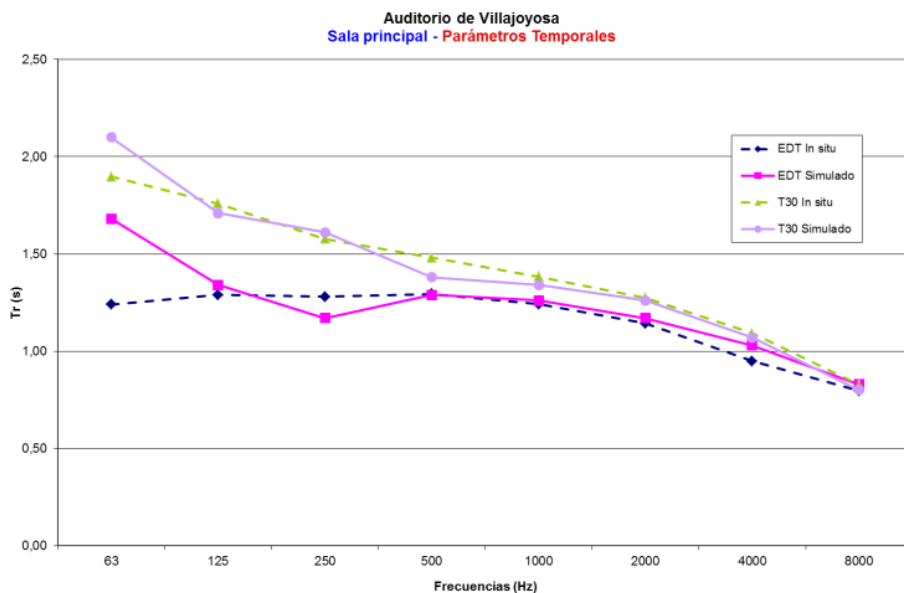


Fig A5.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

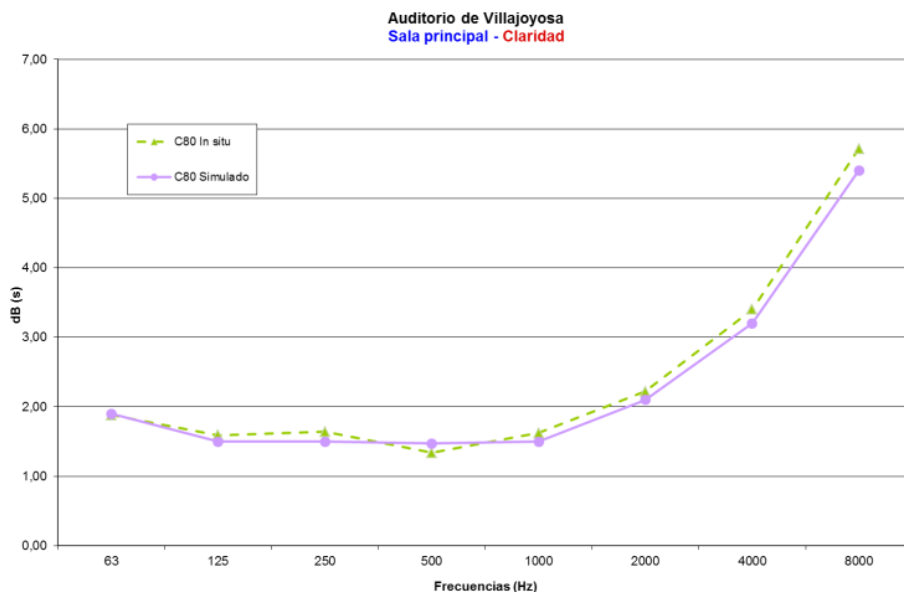


Fig A5.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.



## 6. TEATRO UNIVERSIDAD LABORAL GIJÓN

### 6.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

#### 6.1.1 Características del recinto



*Fig A6.1. Vista general de la sala.*

El teatro de la Universidad Laboral de Gijón responde al modelo de sala clásica, que con el tiempo se ha modificado y reformado para mejorar sus condiciones acústicas. Sobre la planta originaria, se diseñaron revestimientos laterales, formando la actual caja de escena, y los planos reflectantes cercanos a ella. La cubierta fue revestida a su vez por un juego de costillas de madera con el fin de aumentar la difusión.

<b>Volumen</b>	8.925 m <sup>3</sup>	<b>Alto</b>	13,05
<b>Nº Butacas Platea</b>	900	<b>Ancho</b>	28,98 m
<b>Nº But. Anfiteatros</b>	234	<b>Largo</b>	27,88 m

*Tabla A6.1. Datos de la sala.*

## 6.1.2 Descripción de las soluciones constructivas

	Numeración	Num.
Boca de escena	El escenario no cuenta con ningún tipo de concha acústica que delimite el espacio entre la sala y la caja de escena	1
Embocadura de escenario	Trasdosado con doble placa de cartón-yeso de 13+13mm sobre perfilera de 36mm con lana de roca de 70kg/m <sup>3</sup> en su trasdós y 10cm de cámara de aire	2
Tarima	Madera maciza de 3cm de espesor sobre rastreles de 10-15cm	3
Butacas	De tapizado medio. Patas y trasera de respaldo de madera sin tapizar	4
Vidrios cabina de control	Luna grande alojada en carpintería metálica	5
Huecos de ventilación	Los retornos e impulsiones de las instalaciones de climatización se resuelven con huecos sobre las puertas de acceso a la sala. Dichos huecos se encuentran cubiertos por un rastrelado al 50% de la superficie total.	6
Fondo y laterales de la sala	Panelado de madera contrachapada, rigidizado exteriormente mediante un rastrelado vertical decorativo	7
Pavimento	Linóleoum pegado al terrazo original	8
Concha sobre platea	Paneles de madera contrachapada de 19mm de espesor	9
Estructura de la cubierta	Paneles de madera contrachapada de 30mm de espesor rigidizada por el entramado de vigas. Cámara de aire variable entre 40cm y 370cm	10
Cortinajes	Cortinajes semipesados. Separados 10cm de los paneles de madera que cierran los antiguos accesos a la sala	11

Tabla A6.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.

## 6.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

### 6.2.1. Toma de datos “in situ”

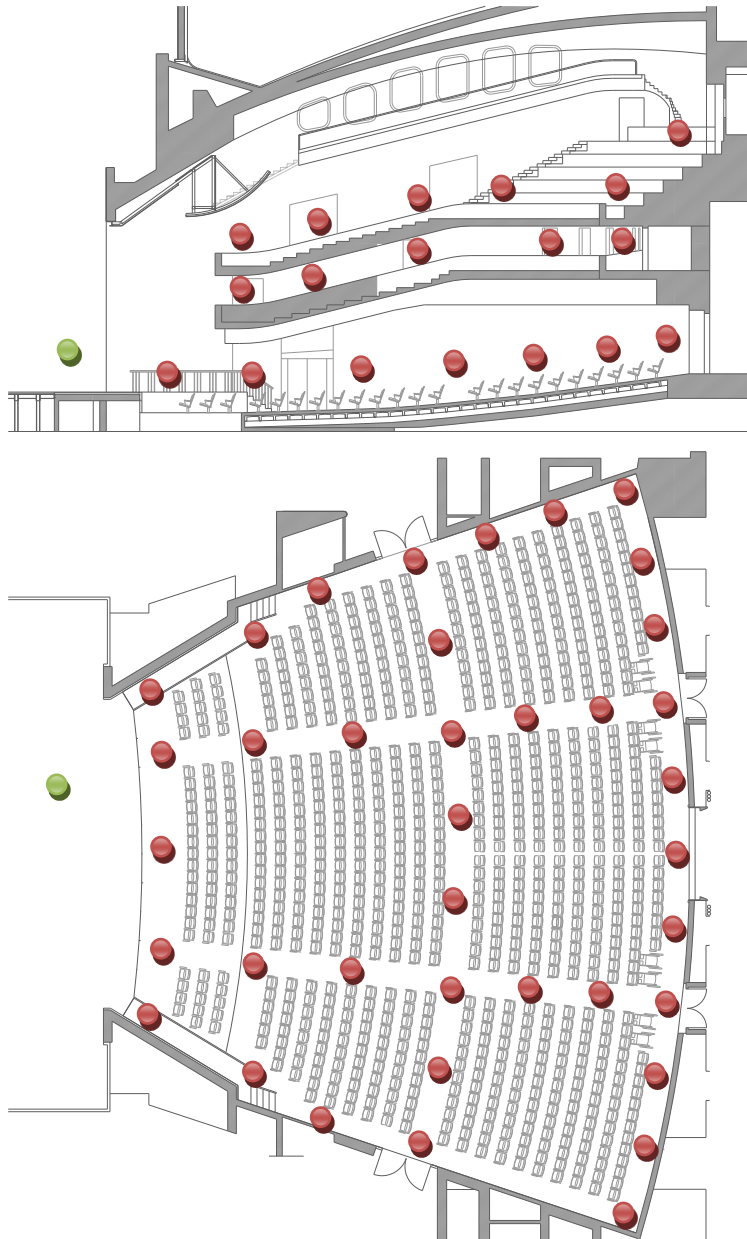


Fig A6.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).



### 6.2.2. Resultados “in situ”

Tanto en este apartado, como en los posteriores, los resultados se presentarán siempre siguiendo el mismo esquema. En primer lugar los resultados de **Inteligibilidad**, mostrando el valor medio obtenido en la totalidad de los puntos o en los correspondientes a un sector específico. Seguidamente los resultados de los **parámetros temporales** (EDT,  $T_R$ ,  $T_{R30}$ ,  $T_{R20}$ ,  $T_{R15}$  y  $T_{R10}$ ), y los **parámetros energéticos**, diferenciando por un lado el parámetro Claridad (C50 y C80), y por otro lado, el parámetro Definición (D50 y D80).

	Platea	Anfiteatro 1	Anfiteatro 2
STI fm.	0,68	0,68	0,62
STI ml.	0,68	0,69	0,62
RASTI	0,67	0,68	0,60

Tabla A6.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

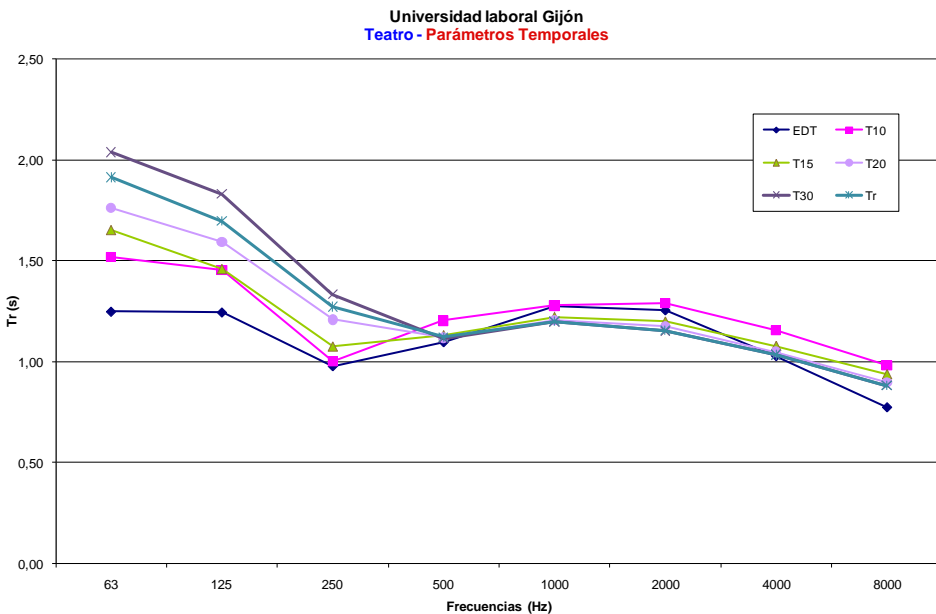


Fig A6.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

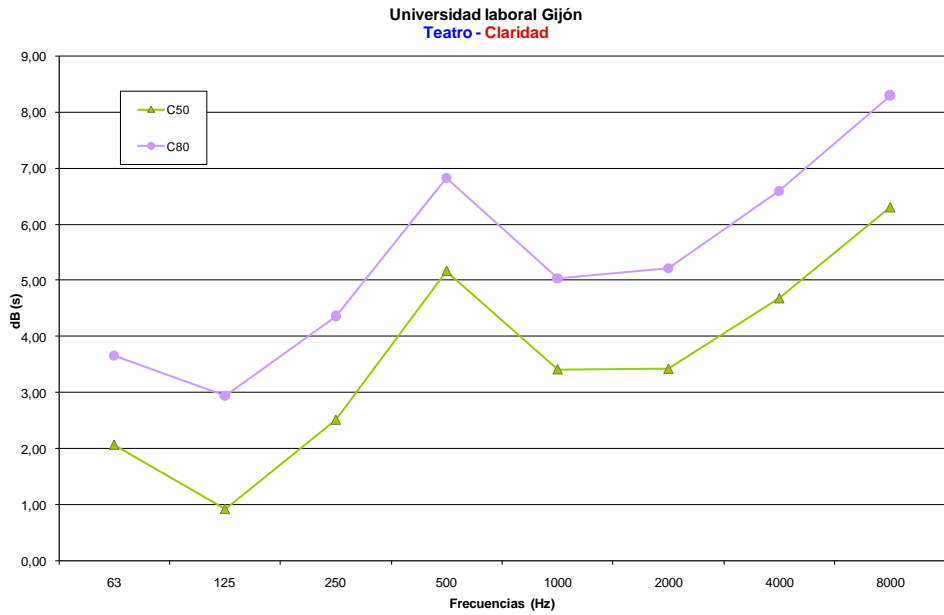


Fig A6.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.

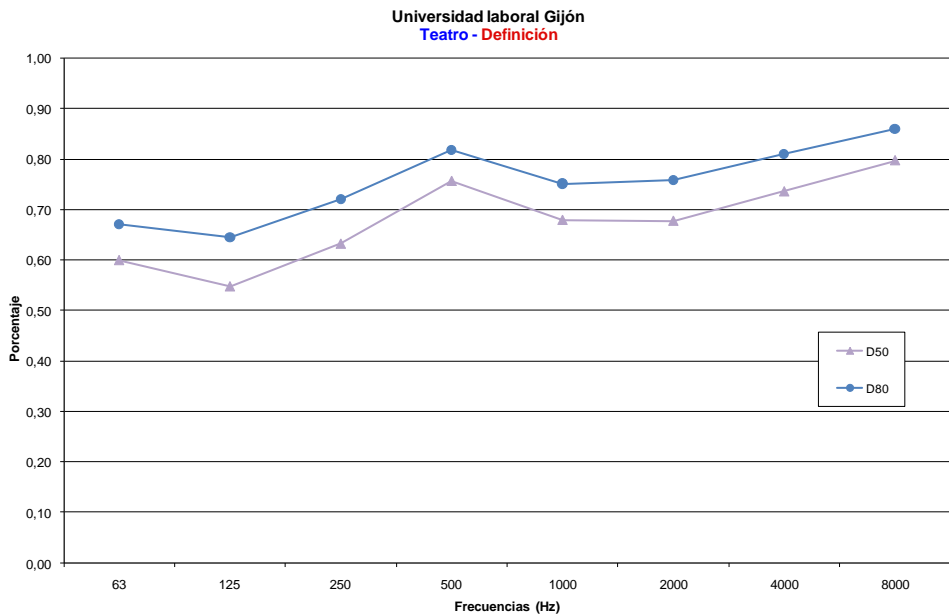


Fig A6.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.

### 6.3. SIMULACIÓN

#### 6.3.1. Modelo virtual de la sala

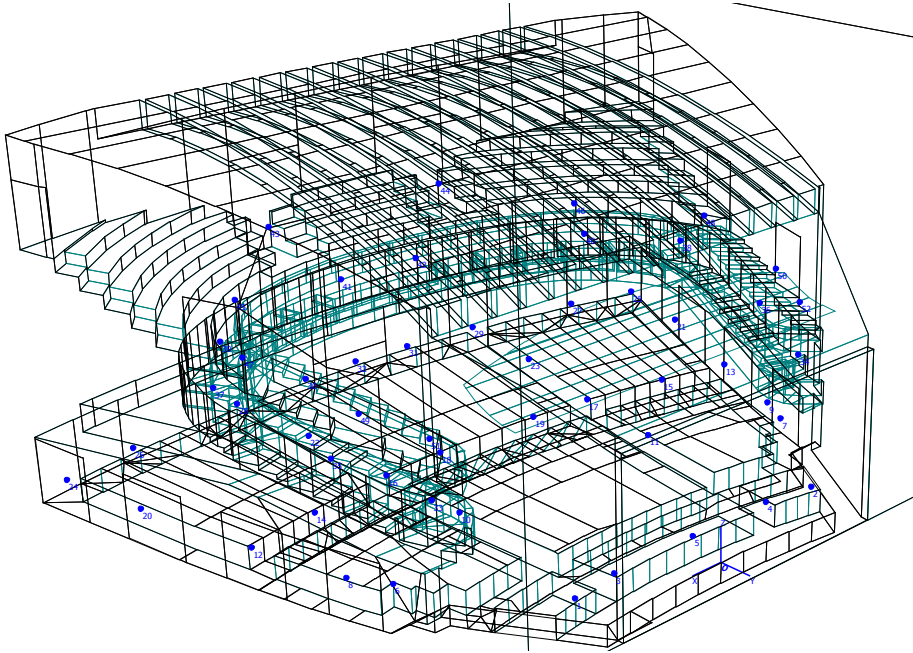


Fig A6.6. Modelo virtual de la sala.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
1	0,20	0,25	0,30	0,42	0,45	0,38	0,35	0,30
2	0,15	0,19	0,09	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
3	0,15	0,18	0,11	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
4	0,11	0,18	0,40	0,59	0,62	0,68	0,70	0,70
5	0,14	0,14	0,08	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
6	0,20	0,35	0,60	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
7	0,25	0,21	0,14	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
8	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02
9	0,20	0,15	0,09	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04
10	X1 <sub>65</sub>	X1 <sub>125</sub>	X1 <sub>250</sub>	X1 <sub>500</sub>	X1 <sub>100</sub>	X1 <sub>200</sub>	X1 <sub>400</sub>	X1 <sub>800</sub>
11	X2 <sub>65</sub>	X2 <sub>125</sub>	X2 <sub>250</sub>	X2 <sub>500</sub>	X2 <sub>1000</sub>	X2 <sub>2000</sub>	X2 <sub>4000</sub>	X2 <sub>8000</sub>

Tabla A6.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.

### 6.3.2 ajuste mediante método de las superficies de respuesta

X1	X2	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
0,20	0,80	1,71	1,73	1,10	1,02	1,05	1,04	0,96	0,80
0,20	0,45	1,93	1,95	1,15	1,07	1,09	1,08	0,99	0,81
0,20	0,10	1,92	1,92	1,19	1,09	1,12	1,11	1,01	0,83
0,10	0,80	1,98	2,01	1,19	1,08	1,12	1,10	1,01	0,84
0,10	0,45	2,06	2,11	1,24	1,11	1,15	1,14	1,02	0,85
0,10	0,10	2,24	2,25	1,28	1,15	1,19	1,17	1,07	0,87
0,01	0,80	2,39	2,43	1,33	1,20	1,25	1,22	1,10	0,88
0,01	0,45	2,50	2,58	1,38	1,24	1,30	1,25	1,12	0,90
0,01	0,10	2,78	2,79	1,43	1,28	1,34	1,31	1,16	0,92

Tabla A6.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.

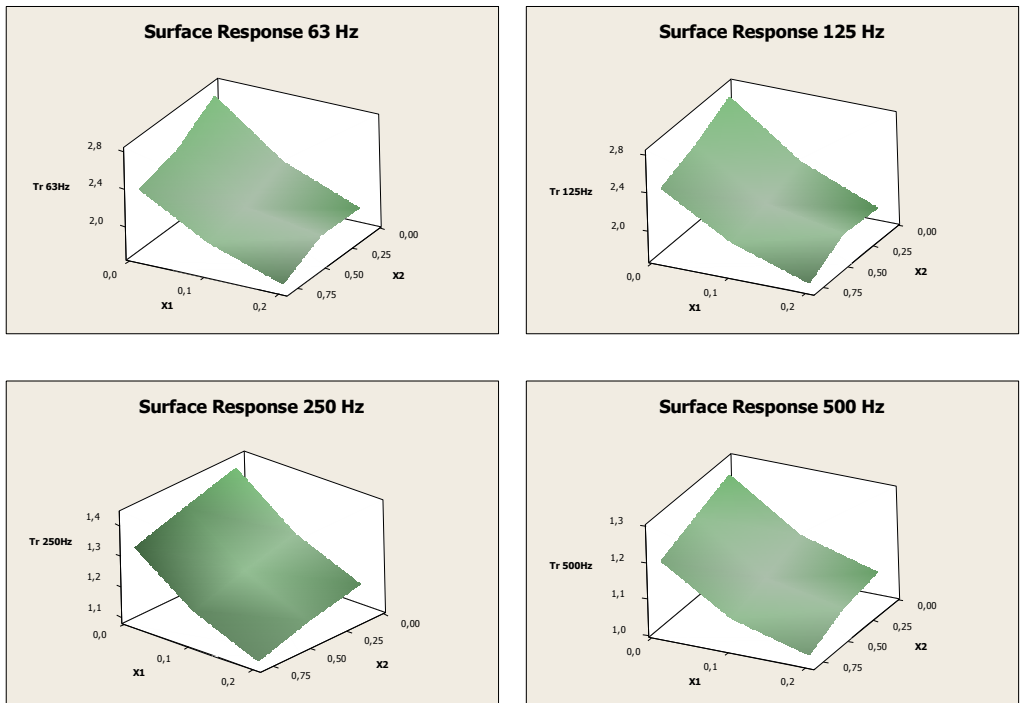


Fig A6.7. Superficie de respuesta para 63. 125. 250 y 500Hz.

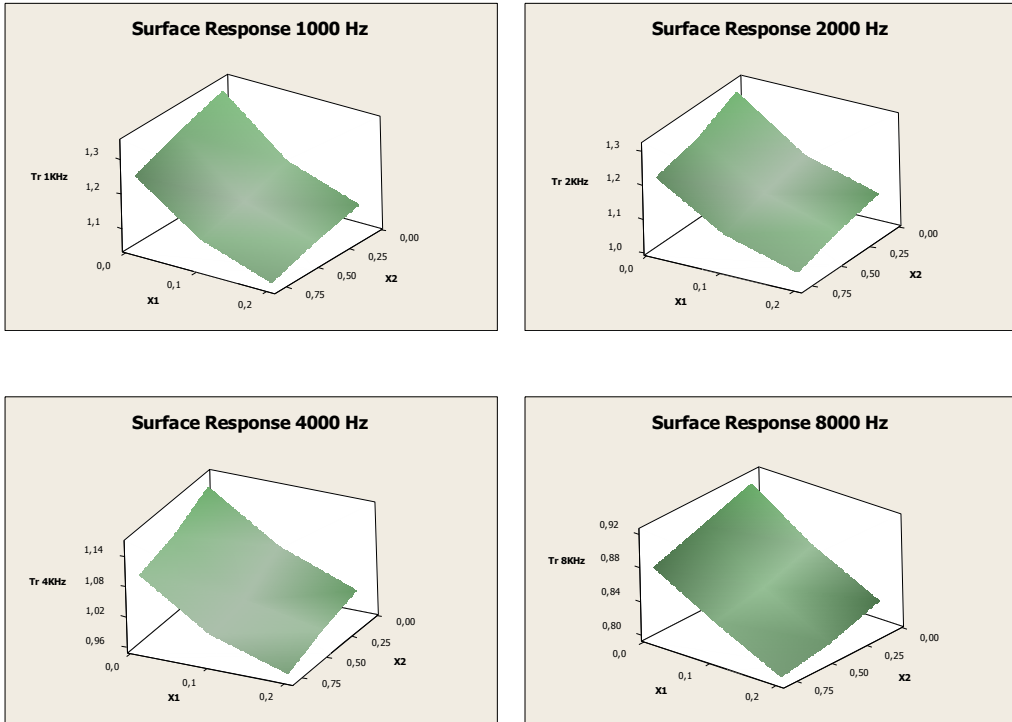


Fig A6.8. Superficie de respuesta para 1000. 2000. 4000 y 5000Hz.

	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
X1			0.09	0.12		0.03	0.05	0.12
X2			0.19	0.26		0.30	0.68	0.51
X1	<b>0.16</b>	<b>0.11</b>	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>
X2	<b>0.15</b>	<b>0.17</b>	<b>0.25</b>	<b>0.45</b>	<b>0.65</b>	<b>0.70</b>	<b>0.70</b>	<b>0.70</b>
X1			0.08					
X2			0.21					

Tabla A6.6. Pares de resultados para cada frecuencia.

### 6.3.3. Resultado de la simulación

	Platea Baja	Anfiteatros
STI	0.68	0.62
RASTI	0.67	0.60

Tabla A6.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

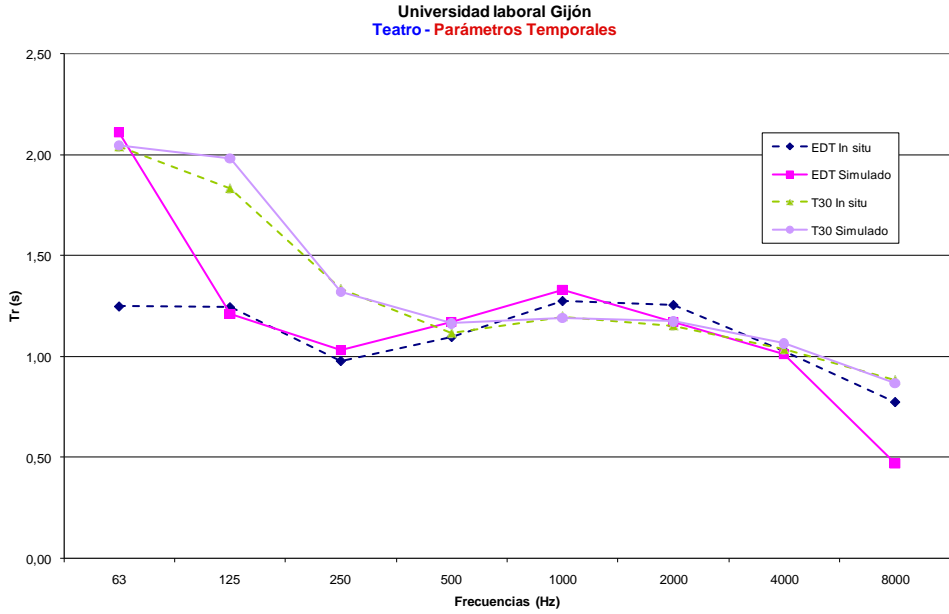


Fig A6.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

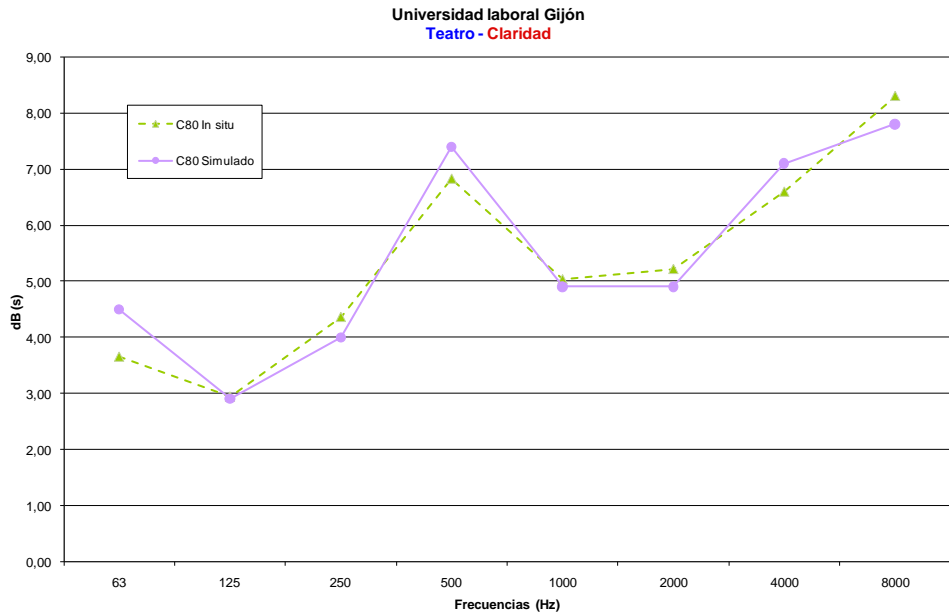


Fig A6.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.



## 7. SALÓN COLUMNARIO. LONJA DE LOS MERCADERES.

### 7.1 DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

#### 7.1.1 Características



*Fig A.7.1. Vista general del Salón Columnario.*

La Sala de Contratación o Salón Columnario constituye el cuerpo principal del edificio de la Lonja de los Mercaderes de Valencia. La construcción de esta sala se inició en 1482 y consta de un gran espacio dividido en tres naves longitudinales y cinco transversales. La bóveda está sostenida por veinticuatro columnas helicoidales, ocho de ellas exentas, doce medias columnas adosadas a los muros y las cuatro restantes que ocupan los ángulos del amplio salón. Todas ellas apean los arcos de crucería de la bóveda, dando la vistosa apariencia de palmera. El edificio está concebido como un templo al comercio y presenta un marcado carácter simbólico, en el que se ha querido ver la representación del paraíso en el que las columnas serían los árboles y las bóvedas representarían la cúpula celeste.



La sala se desarrolla en una planta de forma rectangular de 35,6 metros de largo por 21,4 de ancho y 15,7 de altura (altura media, ya que con las bóvedas el techo es un plano irregular) y un volumen de 12.140m<sup>3</sup>. Dispone en su eje longitudinal de dos portadas clásicas (Cristo rey y virgen María), y su eje transversal una puerta accesoria al pasaje Pere Compte en su lado Oeste, y un acceso interior al patio de los naranjos en el Este. Dispone de grandes ventanales en todo su perímetro (8 en total) que en inicio se plantearon abiertos, creando una unidad del espacio interior con el exterior, y que actualmente se encuentran cerrados mediante vidrios esmerilados por motivos de seguridad.

<b>Volumen</b>	12.140 m <sup>3</sup>	<b>Superficie planta</b>	770 m <sup>2</sup>
<b>Ancho</b>	21,4 m	<b>Superficie Bóveda</b>	51,3 m <sup>2</sup>
<b>Largo</b>	35,6 m	<b>Nº Ventanales</b>	8

Tabla A7.1. Datos de la sala.

### 7.1.2 Descripción de las soluciones constructivas

	<b>Numeración</b>	<b>Num.</b>
<b>Ventanales laterales</b>	Vidrios luna grande recibido por muro de piedra mediante perfil metálico.	1
<b>Puertas</b>	Madera maciza de 15-25cm de espesor.	2
<b>Pavimento</b>	Piezas de mármol encastadas.	3
<b>Piedra lisa (sillares lisos)</b>	Grandes sillares de piedra caliza	4
<b>Piedra tallada (adornos, nervios de las bóvedas, cenefa, etc...)</b>	Piezas de piedra caliza fosilífera, de gran porosidad y facilidad de labra.	5

Tabla A7.2. Numeración de los distintos materiales de revestimiento de la sala.

## 7.2. MEDICIÓN DE PARÁMETROS

### 7.2.1. Toma de datos “in situ”

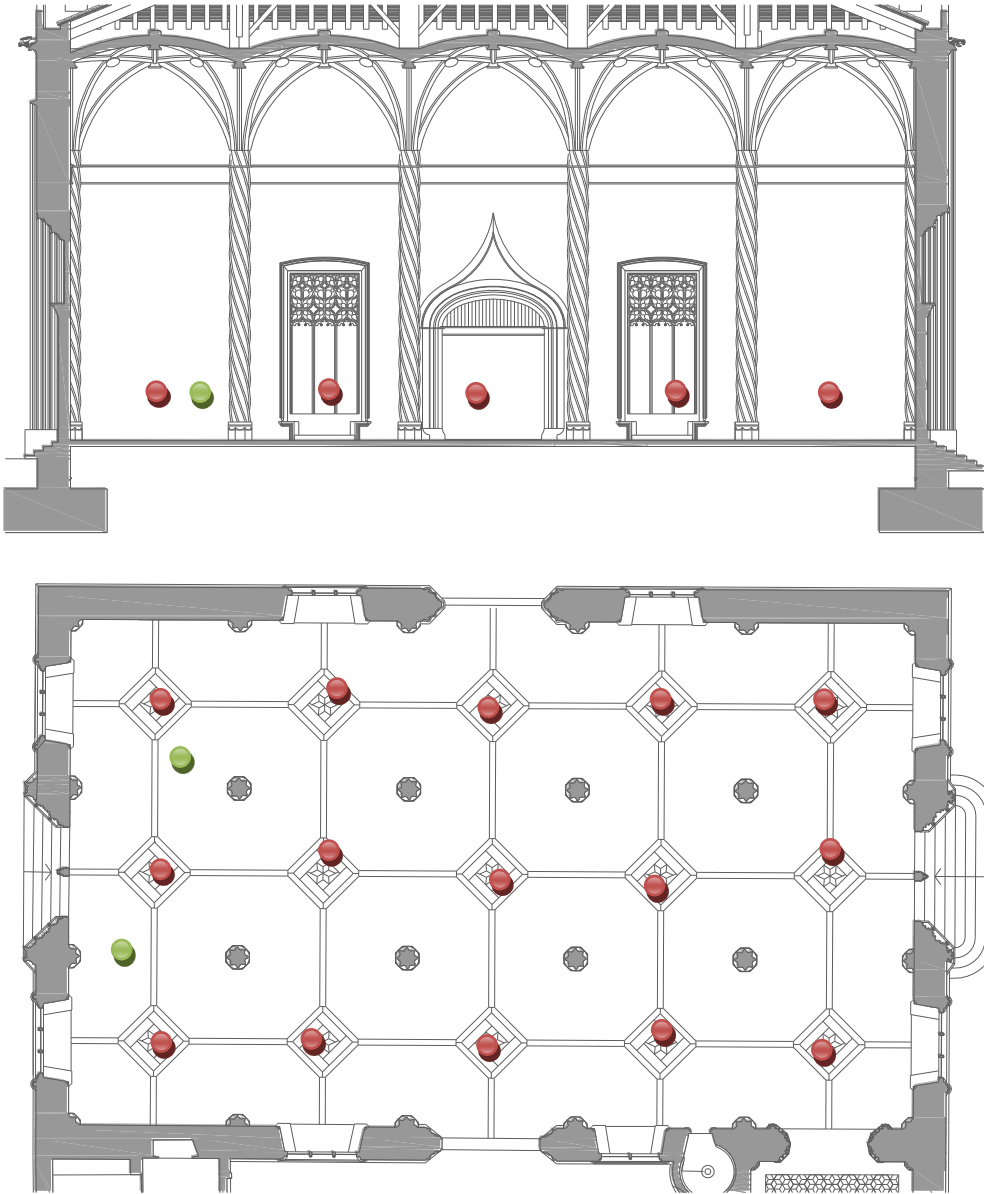


Fig A7.2. Distribución de los diferentes puntos de emisión (Verde) y recepción (Rojos).

7.2.2. Resultados “in situ”

Tanto en este apartado, como en los posteriores, los resultados se presentarán siempre siguiendo el mismo esquema. En primer lugar los resultados de **Inteligibilidad**, mostrando el valor medio obtenido en la totalidad de los puntos o en los correspondientes a un sector específico. Seguidamente los resultados de los **parámetros temporales** (EDT,  $T_R$ ,  $T_{R30}$ ,  $T_{R20}$ ,  $T_{R15}$  y  $T_{R10}$ ), y los **parámetros energéticos**, diferenciando por un lado el parámetro Claridad (C50 y C80), y por otro lado, el parámetro Definición (D50 y D80).

	Platea Baja
STI fm.	0,44
STI ml.	0,42
RASTI	0,41

Tabla A7.3. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

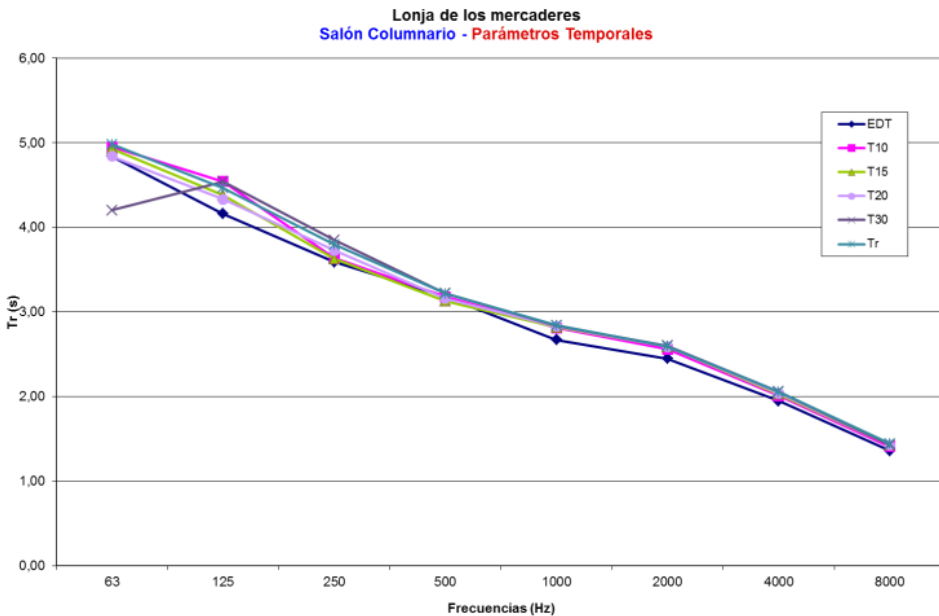


Fig A7.3. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

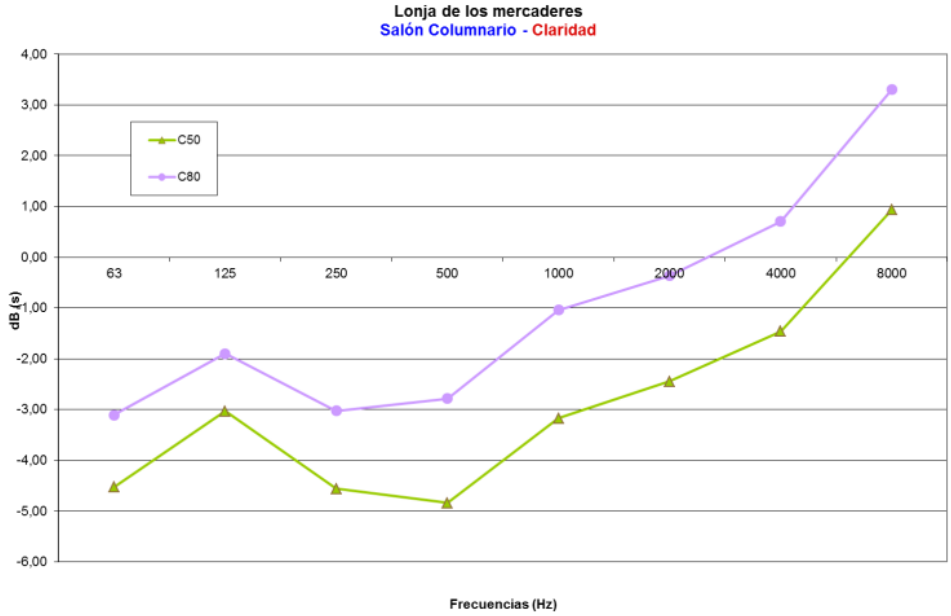


Fig A7.4. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.

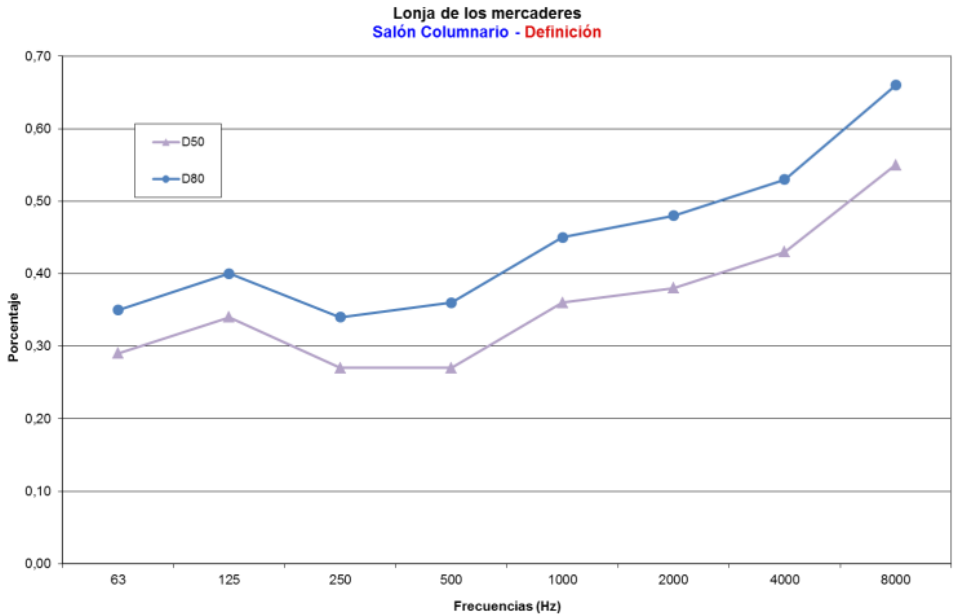


Fig A7.5. Resumen de los resultados del parámetro de Definición.

### 7.3. SIMULACIÓN

#### 7.3.1. Modelo virtual de la sala

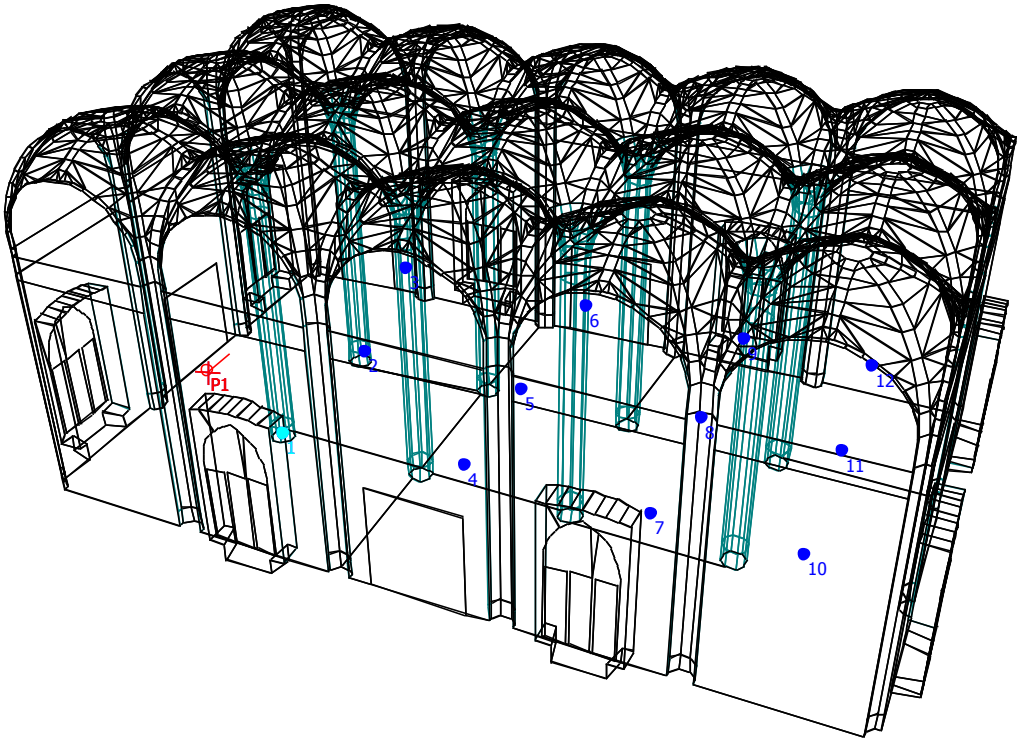


Fig A7.6. Modelo virtual de la sala.

	65	125	250	500	1K	2K	4K	8K
1	0,12	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
2	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
4	X <sub>165</sub>	X <sub>1125</sub>	X <sub>1250</sub>	X <sub>1500</sub>	X <sub>1100</sub>	X <sub>1200</sub>	X <sub>1400</sub>	X <sub>1800</sub>
5	X <sub>265</sub>	X <sub>2125</sub>	X <sub>2250</sub>	X <sub>2500</sub>	X <sub>21000</sub>	X <sub>22000</sub>	X <sub>24000</sub>	X <sub>28000</sub>

Tabla A7.4. Coeficientes de absorción superficial empleados en la simulación.

7.3.2 ajuste mediante método de las superficies de respuesta

X1	X2	65	125	250	500	1K	2K	4K	8K
0,10	0,10	5,71	5,65	5,68	5,47	5,05	4,36	2,85	1,23
0,10	0,15	4,84	4,80	4,82	4,67	4,36	3,84	2,61	1,18
0,10	0,20	4,20	4,17	4,19	4,08	3,84	3,43	2,41	1,14
0,15	0,20	3,44	3,42	3,44	3,36	3,20	2,90	2,15	1,07
0,15	0,15	3,87	3,85	3,86	3,76	3,56	3,20	2,30	1,11
0,15	0,10	3,97	3,85	3,86	3,76	3,56	3,2	2,30	1,11
0,20	0,10	3,58	3,26	3,57	3,49	3,32	3,00	2,20	1,09
0,20	0,15	3,21	3,19	3,20	3,13	2,99	2,73	2,05	1,05
0,20	0,20	2,91	2,89	2,90	2,85	2,73	2,51	1,93	1,02

Tabla A7.5. Resultados obtenidos en los diferentes puntos de la región a estudiar.

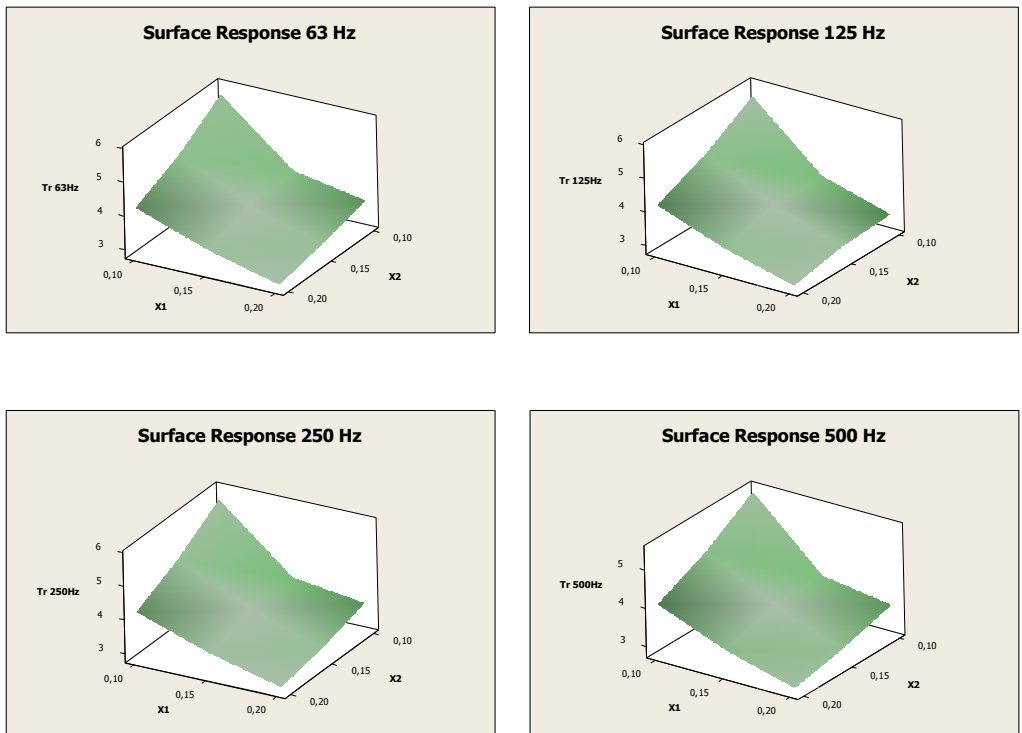


Fig. A7.7. Superficie de respuesta para 63. 125. 250 y 500Hz.

A.7. SALÓN COLUMNARIO. LONJA DE LOS MERCADERES

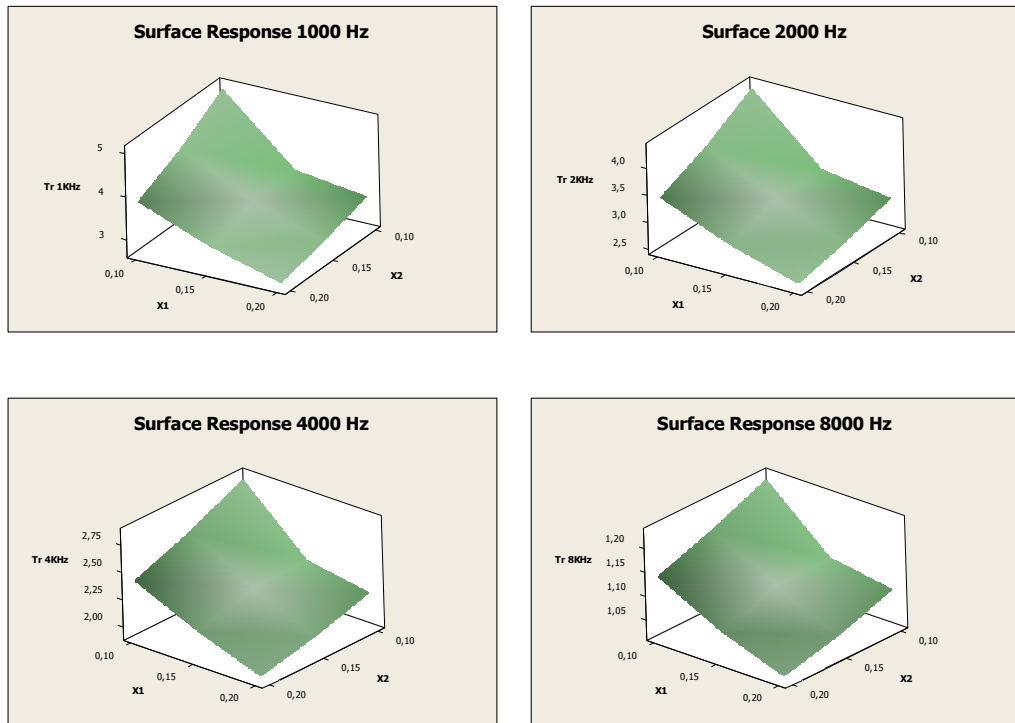


Fig. A7.8. Superficie de respuesta para 1000. 2000. 4000 y 8000Hz.

	65	125	250	500	1K	2K	4K	8K
X1	0,12	0,13	0,17				0,19	0,05
X2	0,11	0,11	0,10				0,17	0,04
X1	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>	<b>0,15</b>	<b>0,18</b>	<b>0,19</b>	<b>0,19</b>	<b>0,18</b>	<b>0,04</b>
X2	<b>0,12</b>	<b>0,14</b>	<b>0,15</b>	<b>0,17</b>	<b>0,19</b>	<b>0,19</b>	<b>0,17</b>	<b>0,04</b>
X1			0,16					
X2			0,12					

Tabla A7.6. Pares de resultados para cada frecuencia.

7.3.3. Resultado de la simulación

	Platea Baja
STI	0,46
RASTI	0,44

Tabla A7.7. Resumen de los resultados de Inteligibilidad.

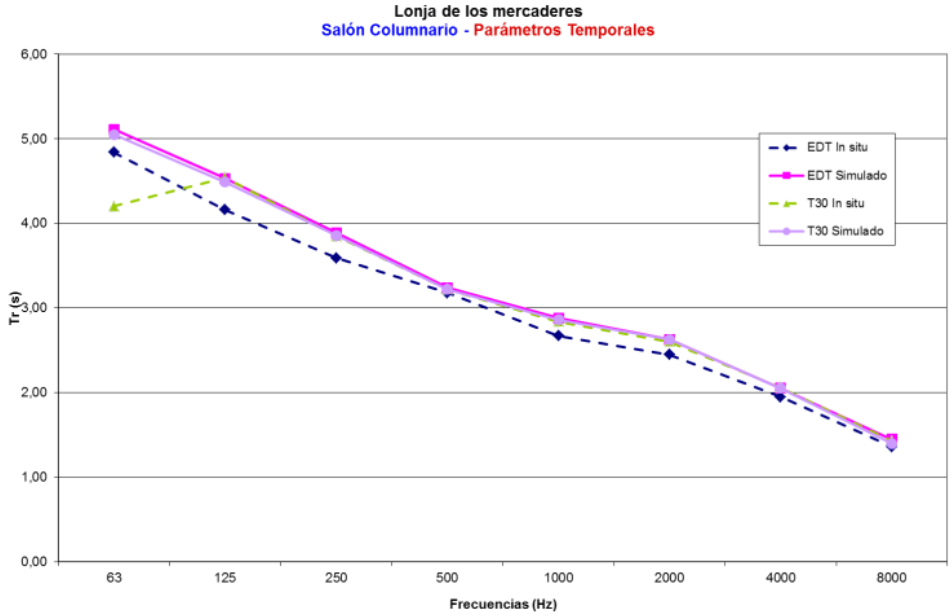


Fig A7.9. Resumen de los resultados de parámetros temporales.

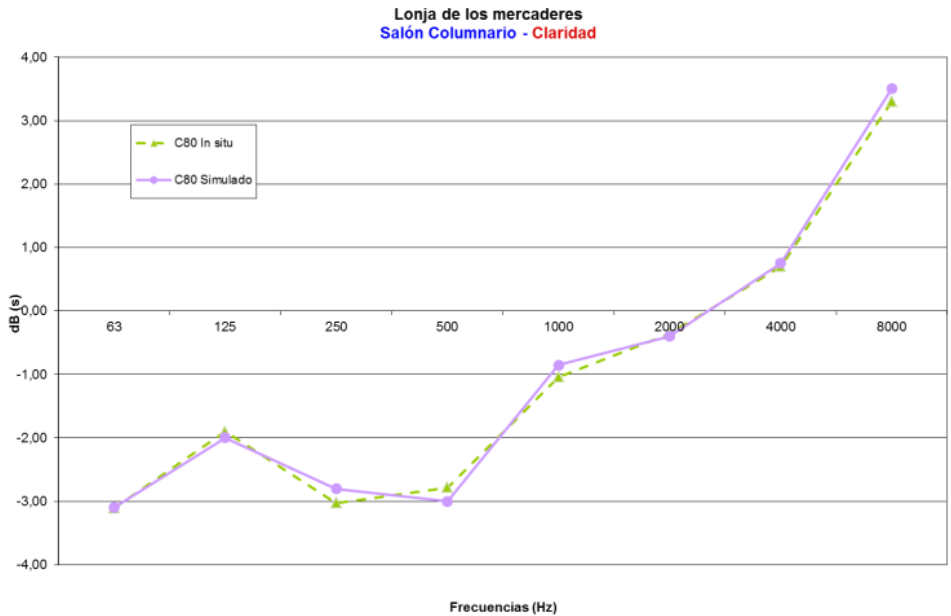


Fig A7.10. Resumen de los resultados del parámetro de Claridad.





**REFERENCIAS:**

- [1] MAYNARD J., VOLCKER P.A. *"The Economics Consequences of the Peace"*. SkyHorse Publishing. (1919).
- [2] VAN DE WOUDE A. *"Volkhuisvesting"*. Het Nieuwe Bouwen Internationaal. CIAM. Volkhuisvesting Stedebouw. Housing Town Planning. Delft University Press. (1983).
- [3] SPÄNDOCK F. *"Akustische Modellversuche"*. Annalen der Physik. Vol. 412, nº 4. (1934).
- [4] MEYER E. *"Reverberation and Absorption of Sound"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol 8, Issue 3. (1937).
- [5] SCHROEDER M.R. *"Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 47, Nº 2. (1970).
- [6] MACCHI M.J., FUJIMURA O. *"The syllable and speech synthesis"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol 57, Supplement Nº 1. (1975).
- [7] JETZT J.J. *"Critical distance measurement of rooms from the sound energy spectral response"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 65, Nº 5. (1979).
- [8] WAYMAN J.L., VANYO J.P. *"Three-dimensional computer simulation of reverberation in an enclosure"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol 62, Nº 1. (1977).
- [9] ALLEN J.B., BERKLEY D.A. *"Image method for efficiently simulating small-room acoustics"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 65, Nº 4. (1979).
- [10] BAXA D.E., SEIREG A. *"The use of quantitative criteria for the optimum design of concert halls"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 67, Nº 6. (1980).
- [11] HULBERT G.M., BAXA D.E., SEIREG A. *"Criterion for quantitative rating and optimum design of concert halls"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 71, Nº 3. (1982).
- [12] BENEDETTO G., SPAGNOLO R. *"Reverberation time in enclosures: The surface reflection law and the dependence of the absorption coefficient on the angle of incidence"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 77. Nº 4. (1985).
- [13] HOUTGAST T., STEENEKEN H.J.M. *"A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 77. Nº 3. (1985).

- [14] BORISH J.G. "*Electronic simulation of auditorium acoustics*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 77(2). (1985).
- [15] PETERSON P.M. "*Simulating the response of multiple microphones to a single acoustic source in a reverberant room*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 80, Nº 5. (1986).
- [16] GEDDES E.R. "*An Analysis of the Low Frequency Sound Field in Non-rectangular Enclosures Using the Finite Element Method*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 75, Nº 2. (1984).
- [17] HODGSON M. "*On the prediction of sound fields in large empty rooms*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 84, Nº 1. (1988).
- [18] VORLÄNDER M. "*Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing / image-source algorithm*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 86, Nº 1. (1989).
- [19] CZYZEWSKI Z., NABELEK A.K. "*Image method for simulating reverberant room response with directional receiver and source*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 90, Nº 4. (1991).
- [20] KLASCO M. "*Computer modeling and auralization in room acoustics: An overview on computer models for room acoustics*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 92, Nº 4, Pt. 2. (1992).
- [21] NAYLOR G., RINDEL J.H. "*Predicting room acoustical behavior with the ODEON computer model*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 92, Nº 4. Pt. 2. (1992).
- [22] JANUARSARI T.R. "*A modified evaluation of energy parameters in ODEON 1.1 using Sabine's diffuse energy decay formulas*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 92, Nº 4, Pt. 2. (1992).
- [23] KOMPIS M., DILLIER N. "*Simulating transfer functions in a reverberant room including source directivity and head-shadow effects*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 93, Nº 5. (1993).
- [24] MENDEZ CASTAÑEDA E. "*Computer-based system for reverberation room design*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 96, Nº 5, Pt. 2. (1994).
- [25] ONDET A.M., SUEUR J. "*Development and validation of a criterion for assessing the acoustic performance of industrial rooms*". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 97, Nº 3. (1995).

- [26] CAMPBELL R.H., GRIESINGER D. *"Computer model versus reality in a nonshoebox orchestra hall"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 97, Nº 5, Pt. 2. (1995).
- [27] LAM Y.W. *"A comparison of three diffuse reflection modeling methods used in room acoustics computer models"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 100, Nº 4, Pt. 1. (1996).
- [28] MORGAN D.R. *"A parametric error analysis of the backward integration method for reverberation time estimation"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 101, Nº 5, Pt. 1. (1997).
- [29] LE BOT A., BOCQUILLET A. *"Comparison of an integral equation on energy and the ray-tracing technique in rooms acoustics"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol.108, Nº 4. (2000).
- [30] TORRES R.R., SVENSSON U.P., KLEINER M. *"Computation of edge diffraction for more accurate room acoustics auralization"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 109, Nº 2. (2001).
- [31] BISTAFA S.R., BRADLEY J.S. *"Predicting reverberation times in a simulated classroom"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 109, Nº 2. (2000).
- [32] BISTAFA S.R., BRADLEY J.S. *"Predicting reverberation times in a simulated classroom"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol.108, Nº 4. (2000).
- [33] LEE H.W., KO I.D., DOO S., OH Y., JEONG D., CHOI C.M., KIM L.H. *"Calculation of diffuse sound reflections in predicting room acoustics using the image method"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 109, Nº 2. (2001).
- [34] VALEAI V., SAKOUT A., LI F. *"Solving the diffusion equation with a finite element solver: Calculation of diffuse sound field in room acoustic"*. Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 112, Nº 5. (2002).
- [35] CHIANG W., SHU Y. *"Acoustical design of stages with large plane surfaces in rectangular recital halls"*. Applied Acoustics. Nº 64. (2003).
- [36] BRADLEY J.S., SATO H., PICARD M. *"On the importance of early reflections for speech in rooms"*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 113, Nº 6. (2003).
- [37] HOSSAM EL DIEN H., WOLOSZYN P. *"The acoustical influence of balcony depth and parapet form: experiments and simulations"*. Applied Acoustics. Nº 66. (2005).

- [38] WU S., WANG H., ZHAO Y. "Auditorium acoustics evaluation based on simulated impulse response". 147th Meeting: Acoustical Society of America. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 115, Nº 5. (2004).
- [39] WIJNGAARDEN S.J., VERHAVE J.A. "Prediction of speech intelligibility for public address systems in traffic tunnels". Applied Acoustics, Nº67. (2006).
- [40] WANG L.M., VIGEANT M.C. "Evaluations of output from room acoustics computer modeling and auralization due to different sound source directionalities". Applied Acoustics, Nº 66. (2007).
- [41] WANG L.M., RATHSAM J. "The influence of absorption factors on the sensitivity of a virtual room's sound field to scattering coefficients". Applied Acoustics, Nº 6.it. (2007).
- [42] BILLON A., PICAUT J., FOY C., VALEAU V., SAKOUT A. "Introducing atmospheric attenuation within a diffusion model for room-acoustic predictions (L)". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 123, Nº 6. (2008).
- [43] SILTANEN S., LOKKI T., SAVIOJA L., CHRISTENSEN C.L. "Geometry Reduction in Room Acoustics Modeling". Acta Acustica united with Acustica, Nº43. (2008).
- [44] SAN MARTIN R., ARANA M. "Uncertainties caused by source directivity in room-acoustic investigations". Journal of the Acoustical Society of America. 123 (6). (2008)
- [45] HODGSON M., YORK N., YANG W., BLISS M. "Comparison of Predicted, Measured and Auralized Sound Fields with Respect to Speech Intelligibility in Classrooms Using CAAT-Acoustics and ODEON". Acta Acustica united with Acustica, Nº43. (2008).
- [46] GALINDO M., ZAMARREÑO T., GIRÓN S. "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches". Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 115, Nº 5. (2009).
- [47] KERÄNEN J., HONGISTO V. "Comparison of Simple Room Acoustics Models Used for Industrial Spaces". Acta Acustica united with Acustica, Nº43. (2010).
- [48] PU H., MIN H., QJU X., WANG J. "On the sound field of a vault with two open ends". Applied Acoustics, Nº 66. (2010).
- [49] GIL-REYES B., JEONG C., BRUNSKOG J. "Room acoustic investigation of actors' positions and orientations for various theatre configurations in a moderate-sized drama theatre". Applied Acoustics, Nº 66. (2011).

- [50] VAN DER HARTEN A.W. *“Customized room acoustics simulations using scripting interfaces”*. 161st Meeting: Acoustical Society of America. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 129, Nº 4. (2011).
- [51] DECLERCQ N.F., DEKEYSER C.S. *“Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidaurus: Seat rows responsible for the marvelous acoustics”*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 121, Nº 4.(2011).
- [52] VITRUVIO M. *“Los diez libros de arquitectura”*. Libro V, capítulo VIII. Linkgua S.L. (Siglo I a.c – reedición 2007).
- [53] LORDA J. *“Classical architecture”*. Publicaciones Universidad de Navarra. (2008).
- [54] DE ADARO E. *“La acústica en las salas”*. Resumen Arquitectura de la Biblioteca Nacional de España. (1987).
- [55] SABINE W. *“Collected Papers on Acoustics”*. Harvard University Press. (1922). Reimpression Dover. (1964).
- [56] EYRING C.F. *“Reverberation Time in “Dead” Rooms”*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 1. (1930).
- [57] MILLINGTON G. *“A modified Formula for Reverberation”*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 4. (1932).
- [58] JORDAN V.L. *“Acoustical Criteria for Auditoriums an Their Relation to Model Techniques”*. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 47, Nº 1. (1970).
- [59] BERANEK L.L. *“Music, Acoustic an Architecture”*. John Wiley and Sons New York, London. (1962).
- [60] ABDEL ALIM O. *“Abhängigkeit de Zeit- und Registerdurchsichtigkeit von raumakustischen Parametern bei Musikdarbietungen (Depedence of time and register definition of room acoustical parameters with music performances)”*. Dissertation, TU Dresden. (1973).
- [61] MARSHALL L. *“Architectural Acoustics”*. Academic Press. (2006).
- [62] THIELE, R. *“Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruckwurfe in Raumen”*. Acustica Nº 3. (1953).
- [63] STEENEKEN H.J.M. *“A psychical Method for measuring Speech Transmission Quality”*. Journal of Acoustical Society of America, Vol. 19. (1980).
- [64] LEHMAN P. *“Über die Ermittlung raumakustischer Kriterien und deren Zusammenhang mit subjektiven Beurteilungen der Hörsamkeit (On the ascertainment of room acoustical criteria and correlation of the same with*

- subjective assessments of the acoustic overall impression*)". Dissertation, TU Berlin. (1976).
- [65] MONTGOMERY D.C. *"Design and Analysis of Experiments: Response surface method and designs"*. John Willey and Sons, Inc. (2005).
- [66] ANDERSON M.J., WHITCOMB P.J. *"Design solutions from concept through manufacture: Response surface method for process optimization"*. Desktop Engineering. (2004).
- [67] BOX E.P., HUNTER J.S., HUNTER G.W. *"Statistics for Experiments"*. John Willey and Sons, Inc. (2005).
- [68] MYERS R.H., KHURI A.I., CARTER W.H. *"Response surface methodology: 1966-1988"*. Technometrics, Nº 31, Vol 2. (1989)
- [69] MYERS R.H., MONTGOMERY D.C. *"Response Surface Methodology: process improvement with steepest ascent, the analysis of response Surfaces, experimental designs for fitting response surfaces"*. John Willey and Sons, Inc. (1995).
- [70] OEHLERT G.W. *"Designs and analysis of experiments: Response surface design"*. W.H. Freeman and Company. (2000).
- [71] KHURI A.I., CORNELL J.A. *"Response Surfaces. Design and Analysis"*. Statistics: Textbooks and monographs, Nº 81. (1987)
- [72] WU C.F., HAMANDA M. *"Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization"*. Willey Interscience. (2000).
- [73] MARCON PASSERO, C.R., TROMBETTA, P. *"Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades formulas"*. Applied Acoustics, Nº71. (2010).
- [74] SILTANEN, S., LOKKI, T., SAVIOJA, L., CHRISTENSEN, C.L. *"Geometry Reduction in Room Acoustics Modeling"*. Acta Acustica united with Acustica, Nº 94. (2008).
- [75] WANG, L.M., VIGEANT, M.C. *"Evaluations of output from room acoustics computer modeling and auralization due to different sound source directionalities"*. Applied Acoustics, Nº69. (2008).
- [76] DE SANT'ANA, D.Q., TROMBETTA, P. *"Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and*

- 
- computer-predicted speech transmission index*". Building and Environment, N<sup>o</sup>. 46. (2011).
- [77] HODGSON, M., YORK, N., YANG, W., BLISS, M. "*Comparison of Predicted, Measured and Auralized Sound Fields with Respect to Speech Intelligibility in Classrooms Using CAAT-Acoustics and ODEON*". IEEE Transaction on visualization and computer graphics, N<sup>o</sup>.94. (2008).



## REFERENCIAS

---

**BILBIOGRAFÍA:**

- Marshall, L. *“Architectural acoustics”*. Academic Press, (2006).
- Barron, M. *“Auditorium acoustics and architectural design”*. Spoon Press, (1993).
- Kuttruff, H. *“Room acoustics”*. Spon Press (1973).
- Ballou, G. *“Handbook for sound engineers”*. SAMS, (1987).
- Llinares, J., Llopis, A., Sancho, J. *“Acústica arquitectónica y urbanística”*. Servicio de publicaciones UPV. (1996).
- Carrión, A. *“Diseño acústico de espacios arquitectónicos”*. Ediciones UPC. (1998).
- Arau, H. *“ABC de la acústica arquitectónica”*. Ediciones Ceac. (1999).
- Recuero, M., Gil, C. *“Acústica arquitectónica”*. Artes gráficas Benzal (1992).
- Sabine, W.C., *“Collected Papers on Acoustics”*. Dover Publications (1964). (Reproducción del mismo título publicado por Harvard University Press en 1922)
- Jordan, V.L. *“Acoustical Design of Concert Halls and Theatres”*. Applied Science Publishers. (1980).
- Beranek, L.L. *“Music, Acoustics and Architecture”*. McGraw-Hill, (1960).
- Arizmendi, L.J.” *Tratado fundamental de la acústica en la edificación”*, Ecinsa (1980)
- Knudsen, V.O. y Harris, C.M. *“Acoustical Designing in Architecture”*. John Willey & Sons. (1950).
- Malkawi, A., Augenbroe, G. *“Advanced Building Simulation”*. Spoon Press. (2004)
- Vorländer, M. *“Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality”*. Springer. (2007)
- ODEON 9.2 *“Manual del usuario”*. Brüel & Kjaer. (2010).
- DIRAC 5.0 *“Manual del usuario”*. Brüel & Kjaer. (2009).

- *Norma ISO 140 - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements.* (1997).
- *Norma ISO 3382 - Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.* (2008).
- *Norma ISO 18233 - Application of new measurement methods in building and room acoustics.* (2006).