UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)





"Estudio de las Características Acústicas de la Cueva del Parpalló"

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor:
Noé Jiménez González

Director/es:
D. Rubén Picó Vila
D. Francisco Javier Redondo Pastor

GANDIA, 2007

A mi Lola, por las largas noches que pasamos los dos frente al ordenador

(Algún día conseguirás atrapar el ratón).

Estudio de las características acústicas de la cueva del Parpalló

Noé Jiménez González

Escuela Politécnica Superior de Gandía, Junio de 2007

ÍNDICE

Pág.

1. **Introducción** 9
   1.1. Introducción al proyecto 9
   1.2. Objetivos 9
   1.3. Justificación 9

2. Conceptos teóricos 11
   2.1. Arqueoacústica 11
      2.1.1. Introducción 11
      2.1.2. El sonido en la arqueología: Arqueoacústica 11
      2.1.3. Espacios naturales no modificados por el hombre 14
         2.1.3.1. Espacios cerrados: cuevas y litófonos 14
         2.1.3.2. Espacios abiertos: arte rupestre al aire libre 18
      2.1.4. Espacios creados por el hombre 18
         2.1.4.1. Tumbas megalíticas: dólmenes y túmulos 18
         2.1.4.2. Círculos de piedra 24
      2.1.5. La cueva de Parpalló 26
         2.1.5.1. Características arqueológicas 26
         2.1.5.2. Características acústicas subjetivas y primeras observaciones 29
   2.2. Conceptos de acústica recintos usados en el trabajo 31
      2.2.1. Introducción a los diferentes modelos acústicos 31
      2.2.2. La acústica geométrica y su tratamiento en CATT-Acoustics 32
         2.2.2.1. Trazado de rayos aleatorio 32
         2.2.2.2. Fuente imagen (ISM) 33
         2.2.2.3. Trazado de conos aleatorizado con corrección de cola 37
      2.2.3. Parámetros acústicos 38
         2.2.3.1. Velocidad del sonido en el aire para CATT 38
         2.2.3.2. Ecogramas y curvas de caída 39
         2.2.3.3. Tiempos de reverberación 39
      2.2.4. Parámetros de calidad de salas usados: Inteligibilidad 40
         2.2.4.1. Claridad 40
         2.2.4.2. Definición 40
         2.2.4.3. STI / RASTI 41
            2.2.4.3.1. STI 41
            2.2.4.3.2. RASTI 44
            2.2.4.3.3. RASTI / STI a partir de la respuesta al impulso 45
      2.2.5. Medición de la respuesta al impulso en sistemas reales con señales MLS 47

3. Desarrollo de la simulación acústica 49
3.1. Introducción 49
3.2. Pre procesado del modelo 49
3.2.1. Determinación del modelo geométrico de la cueva 49
3.2.2. Determinación de las condiciones de contorno: superficies 51
3.2.3. Fuentes y receptores 56
3.2.4. Ruido de fondo 57
3.2.5. Obtención del archivo del modelo para CATT-Acoustics 58
3.3. Procesado 61
3.4. Resultados de las simulaciones 64
3.4.1. Simulaciones previas 64
3.4.2. Características de los modelos 65
3.4.3. Tiempos de reverberación **66**
3.4.4. Uniformidad del campo sonoro 68
3.4.5. Parámetros de inteligibilidad 70
3.4.5.1. Claridad C-50 70
3.4.5.2. Definición D-50 71
3.4.5.3. RASTI 72

4. Desarrollo de la medida *in situ* 73
4.1. Necesidad, objetivo, planteamiento 75
4.2. Desarrollo 75
4.3. Post procesado 78
4.4. Resultados 79
4.4.1. Respuesta en frecuencia 79
4.4.2. Tiempos de reverberación 80
4.4.3. Parámetros de inteligibilidad 82

5. Conclusiones 85
5.1. Comparativa entre simulación y medida 85
5.2. Conclusiones de los resultados 87
5.3. Parpalló y su acústica 88
5.4. Líneas futuras de investigación 88
5.4.1. Complementar el estudio de la cueva de Parpalló 88
5.4.2. Estudios similares en otros recintos 89
5.4.3. Presentación de los resultados: Auralización 89
5.4.4. Conservación del espacio sonoro 90

6. Bibliografía 93

7. Anexos 99
7.1. Resultados adicionales de la simulación 99
7.2. Resultados adicionales de la medida 118

7.3. Índice de ficheros anexos 132

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción al proyecto

El presente trabajo está contemplado desde el punto de vista de un proyecto fin de carrera, orientado al análisis e investigación. El tema a tratar es el estudio acústico de un recinto, con la especial particularidad de que este es el importante yacimiento arqueológico de la cueva del Parpalló.

1.2. Objetivos

El análisis pretende caracterizar al recinto desde el punto de vista de la acústica de salas, pero teniendo en cuenta las peculiaridades y limitaciones que esta tiene en este tipo de recintos.

1.3. Justificación

A simple vista, el recinto sagrado de Parpalló goza de unas características acústicas excepcionalmente adecuadas para la transmisión de mensajes sonoros. El estudio de estas pretende arrojar algo de luz acerca de las razones de la gran afluencia y cantidad de reuniones y rituales supuestamente llevados a cabo en el interior del recinto, aportando datos científicos que puedan demostrar si las propiedades acústicas de este recinto pudieran haber contribuido a los propósitos funcionales para los que fue usada la cueva.

Aun así, se debe tener en cuenta que el estudio puede llegar a mostrar grandes dificultades debido ámbito pluridisciplinar que abarca, pues en el se relacionarán conceptos de ciencias tan dispares como la Arqueología y Antropología, y la Acústica.

2. INTRODUCCIÓN TEORICA

2.1. Arqueoacústica

2.1.1. Introducción

La capacidad humana de comunicarse a través del sonido es uno de los mayores factores que han influido en nuestra evolución. La capacidad de articulación de sonidos por el hombre ha ido ligada al desarrollo de su inteligencia *[Ref. 2].* Así, la comunicación verbal es un factor clave para el intercambio de ideas y conocimientos y como consecuencia, todos los factores externos que puedan alterar el mensaje acústico serán determinantes para la interpretación del mismo.

2.1.2. El sonido en la arqueología: Arqueoacústica

Estos factores han sido estudiados por la ciencia moderna en mayor o menor medida, pero, en cuanto a las evidencias del sonido en la prehistoria, hasta los años 60 la arqueología solo puso su atención en los objetos materiales encontrados.

Son muchísimos los restos de instrumentos musicales repartidos en un amplio número de yacimientos. Hasta el paleolítico medio no existen claras evidencias arqueológicas que relacionen al hombre con la música, instrumentos con los que se producía o los recintos en los que esta era interpretada. Con respecto a los instrumentos encontrados, estos se pueden clasificar en cinco grandes grupos: *[Ref. 19].*

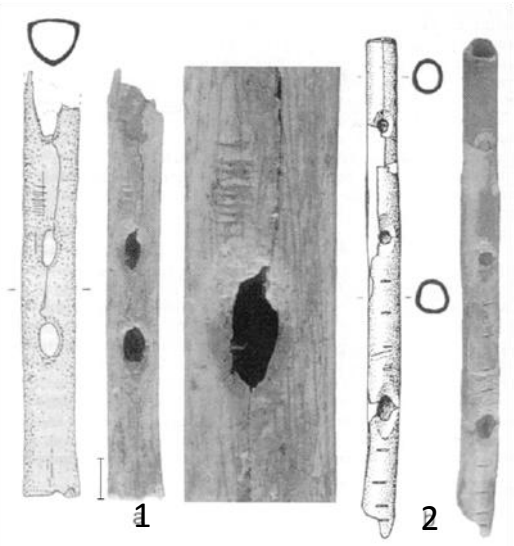
a. Flautas de hueso *[Fig. 2.1.]*

b. Aerófonos en forma de falanges huecas *[Fig. 2.2.]*

c. Aerófonos en forma de zumbadores *[Fig. 2.3.]*

d. Raspadores de hueso *[Fig. 2.4.]*

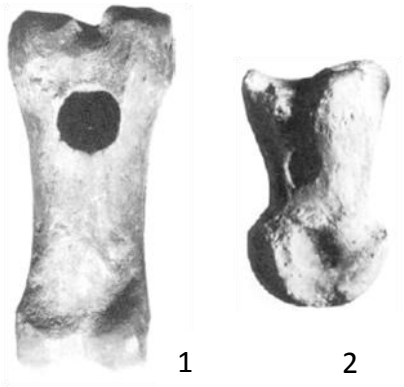
e. Litófonos



1. Aurignacian, flauta de hueso de ave, 35,000 años, Isturitz, Francia, vulture ulna

2. Aurignacian, flauta de hueso de ave, 35,000 años, Geissenklösterle, Alemania, swan ulna

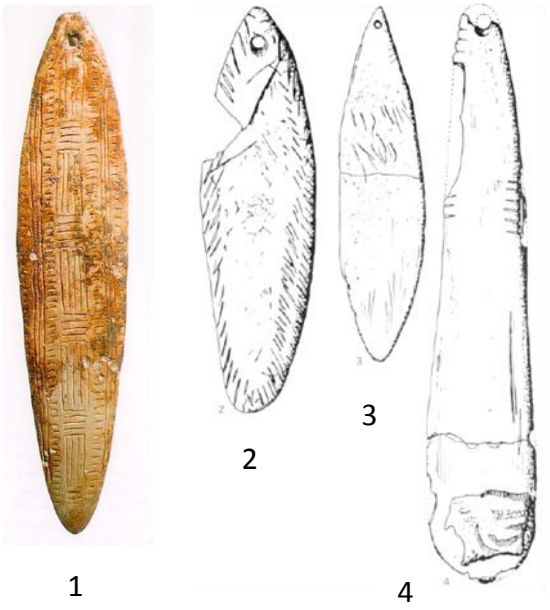
Fig. 2.1. Ejemplos de flautas de hueso [Ref. 19].



1. Perigordian, 1º falange agujereado, Laugerie Haute, Les Eyzies-de-Tayac, Dordogne (Francia). 53.2mm

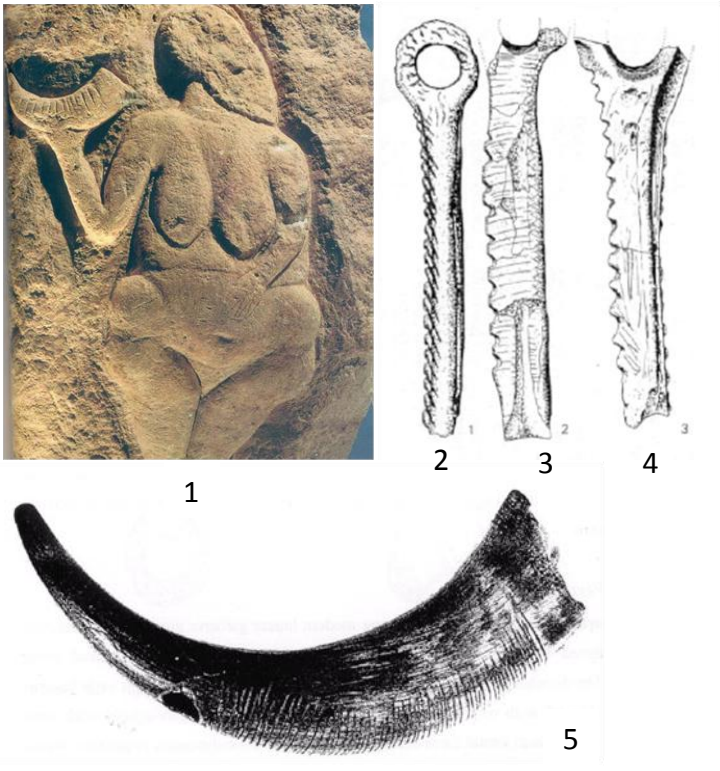
2. Magdaleniense, 2º falange agujereado, Saint-Jean-de-Verges, Ariège (Francia). 38.6mm

Fig. 2.2. Ejemplos de aerófonos en forma de falanges huecas [Ref. 19].



1. Magdalenian; La Roche, Lalinde, Dordogne L Longitud, 180mm.
2. Magdalenian; Abri de Laugerie Basse, Les Eyzies-de-Tayac. Longitud, 107mm.
3. Solutrean; Lespugue, Haute Garonne. Longitud, 90mm.
4. Solutrean; Badegoule, Dordogne. Longitud 190mm.

Fig. 2.3. Ejemplos de aerófonos en forma de zumbadores [Ref. 19].



1. "Venus of Laussel", o "Dame a la Corne", Laussel, Dordogne, Francia. altura 440mm.
2. Pekarna, Moravia, República Checa. 205mm.
3. Abri Lafaye Bruniquel, Tarn-et-Garonne, Francia. 236mm.
4. Mas d'Azil, Ariège, Francia.
5. Rascador en cuerno bobino, Bonaire, Francia.

Fig. 2.4. Ejemplos de rascadores [Ref. 19].

Todos los casos de instrumentos musicales encontrados están construidos con hueso o piedra, probablemente debido a que son los únicos materiales que han perdurado hasta hoy.

Así, la Etnografía, ciencia que se encarga de estudiar las diferentes tribus no civilizadas existentes hoy en día, ha establecido una interesante hipótesis con respecto a los instrumentos en la prehistoria. Según ella, el hueso es un material que rara vez se usa para la construcción de instrumentos musicales en estas tribus y comunidades, la mayoría están fabricados con materiales como madera y piel. Establece aquí el razonamiento de que aunque no hayan perdurado hasta hoy en día, hay motivos para pensar que probablemente si existieran en la prehistoria; teniendo en cuenta que solo es una hipótesis y que su demostración sea prácticamente imposible a partir de los restos actuales. *[Ref. 19].*

La relación del hombre primitivo con la música es un tema ampliamente discutido y demostrado, aunque el uso concreto de estos instrumentos no está claro. La celebración de rituales y demás ceremonias formaban parte de la vida de nuestros ancestros, como así defienden muchos autores *[Ref. 24].* Así, la presencia de esta en el entorno social del paleolítico se puede justificar desde diversas funciones tales como la cohesión del grupo, selección sexual o cortejo, estatus social, aprendizaje, etc. *[Ref. 19].*

El estudio e interpretación de los signos encontrados no se pueden concebir sobre un mundo sordo, sin sonido. El medio donde se producían estos mensajes sonoros, ya sean musicales u orales, es uno de los factores que más condiciona el contenido y la forma de los mismos; es más, en muchos casos podría llegar a ser determinante para la existencia de otras formas de comunicación, expresión artística o rituales. *[Ref. 35].*

2.1.3. Espacios sonoros no modificados por el hombre

2.1.3.1. Espacios cerrados: Cuevas y litófonos

Los principales yacimientos arqueológicos de la prehistoria hasta el neolítico superior están localizados dentro de cuevas, ya que ese era el principal refugio del hombre. Así, es imposible el imaginarnos en esas profundas cuevas, en oscuridad, sin la existencia de una dimensión sonora. *[Ref. 34].* Es más, como si de una grabación de miles de años de antigüedad se tratara, probablemente los propios recintos sean la única prueba fiel de cómo fueron los espacios sonoros en la prehistoria.

Las primeras ideas sobre estos conceptos fueron sugeridas por Siegried Giedion en 1962 *[Ref. 14],* pero hasta dos años después, no se realizó el primer estudio acústico de una cueva ocupada en la prehistoria. En 1964, Abbe

Glory en "La Grotte de Roucador" *[Ref. 15]* en Francia describió cualitativamente la posibilidad de que las formaciones estalagmíticas marcadas con pintura fuesen usadas a modo de litófono natural. Esta hipótesis, que Glory realizó también en "Escoural" en Portugal *[Ref. 16]* y "Cougnac", "Pech-Merle" y "Les Fieux" *[Ref. 17]* en Francia *[Fig. 2.5]*, *[Fig. 2.6.]* no pudo ser confirmada hasta 1984 y 85 con los estudios de Dams, L. en la cueva de Nerja (Málaga, España) *[Ref. 5], [Ref. 6], [Fig. 2.7]*. Esta cueva consta de 19 pinturas y unas cilíndricas formaciones calcáreas decoradas con líneas y puntos rojos y negros. Dams demostró que estas habían sido golpeadas para producir notas musicales estudiando las capas de pintura de las formaciones calcáreas. Más tarde otros estudios como los de Dauvois, M. y Boutillon, X. en 1990 *[Ref. 11]* también demostraron la presencia de litófonos naturales en la región de Ariége, Francia.

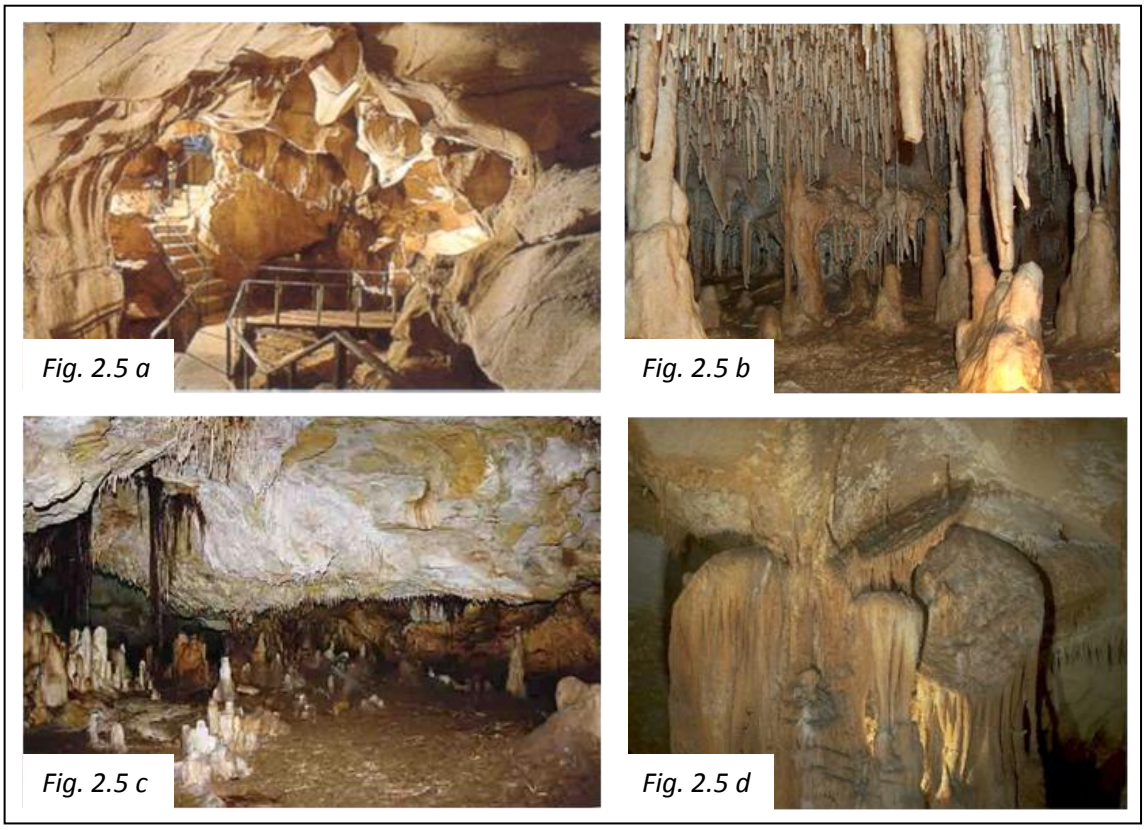


Fig. 2.5. a. "Escoural" en Portugal; b. "Cougnac"; c. "Pech-Merle"; d. "les Fieux" en Francia

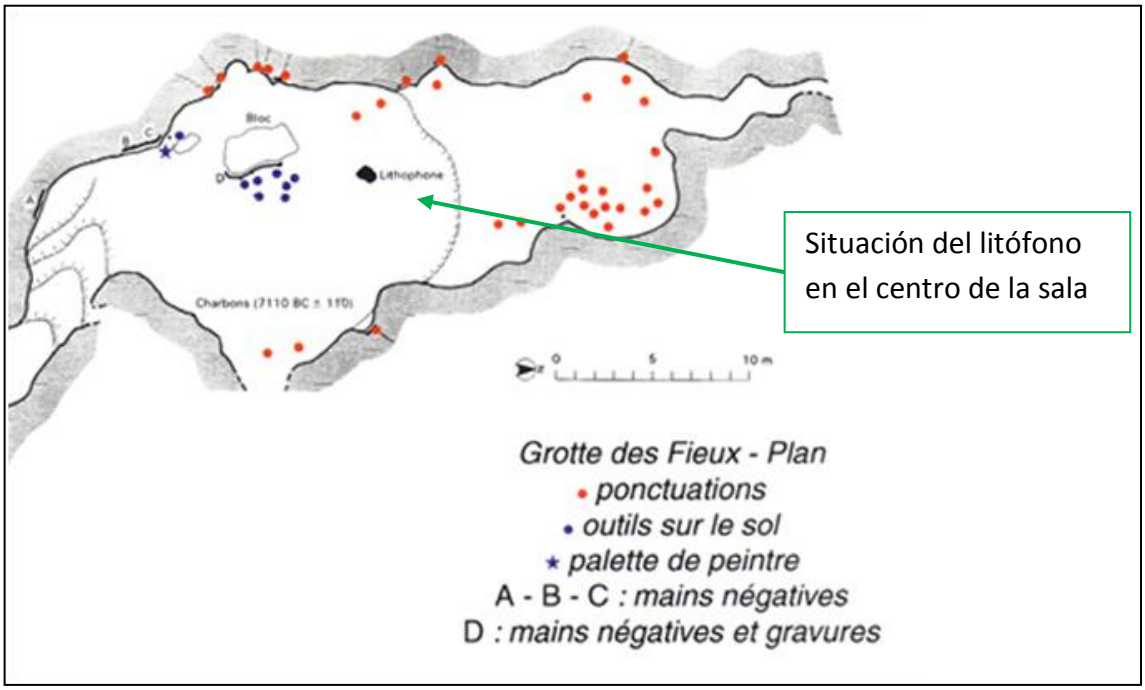


Fig. 2.6. "les Fieux" en Francia y situación del litófono

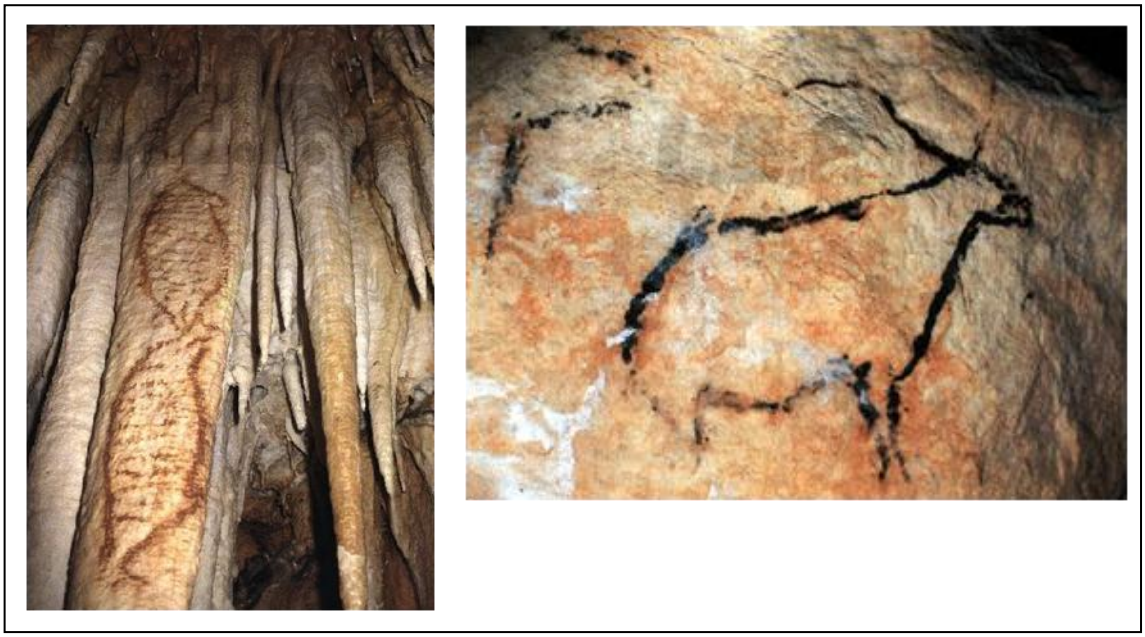


Fig. 2.7. Litófono y pinturas en la cueva de Nerja, Málaga, España.

El siguiente paso que se dio, fue estudiar la relación entre las otras propiedades acústicas "menos tangibles" de los recintos y la presencia de arte en él. Dauvois, M. y Reznikoff, I. en 1988 *[Ref. 12]* presentaron un estudio en el que se relaciona la posición de las pinturas rupestres con los puntos de resonancia de las cuevas de "Le portel", "Fontanet" y "Niaux [*Fig. 2.8*]. En él,

encontraron una fuerte correlación entre los dos elementos: la gran mayoría de las pinturas se corresponden con puntos de resonancia de la gruta y todos los puntos de mayor resonancia están señalados con una pintura o en el caso de los lugares más inaccesibles con un punto. Dauvois y Reznikoff argumentan que la disposición de estas pinturas solo puede explicarse en relación a las características acústicas de la cueva. Para este estudio, usaron como fuente sonora la voz humana y como resultado, hallaron las frecuencias de resonancia en torno a 110Hz, los primeros formantes de la voz. Está claro que, en estas frecuencias, los modos excitados son los transversales al eje de la gruta, a diferencia de otros trabajos posteriores. *[Ref. 41]*

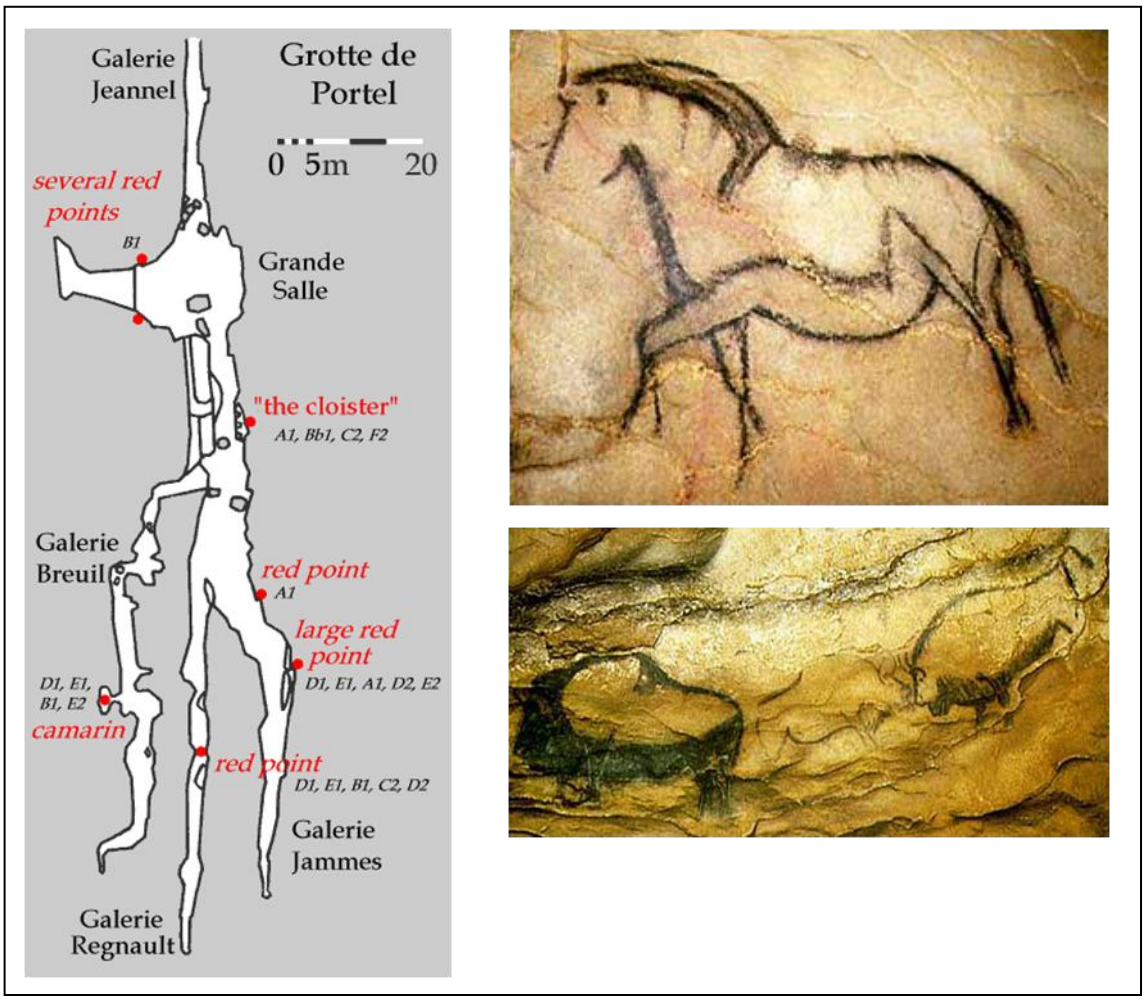


Fig. 2.8. "Grotte de Portel", Francia. Simplificación del gráfico del estudio de Dauvois y Reznikoff y pinturas rupestres [Ref. 12]

2.1.3.2. Espacios Abiertos: Arte rupestre al aire libre

Son muchos los investigadores que han trabajado sobre estas hipótesis y son muchos los enclaves en los que se han encontrado interesantes correlaciones. Steven J. Waller *[Ref. 43] [Ref. 44] [Ref. 45]* ha estudiado alrededor de 100 yacimientos repartidos por Europa, Australia y Norte América, centrando su atención principalmente en la existencia de ecos en las proximidades de las pinturas. En ellos, Waller estudia la relación entre el emplazamiento del arte rupestre y la localización de ecos.

La conclusión de muchos de sus trabajos es una fuerte correlación entre la posición de las pinturas y los puntos donde existen fuertes ecos, relacionando además la impresión subjetiva del eco producido con una posible interpretación chamánica o diálogo con los espíritus. *[Ref. 42] [Ref. 46]*

2.1.4. Espacios creados por el hombre

Son varios también los trabajos realizados sobre estas cuestiones en enclaves de épocas superiores al Paleolítico. La diferencia fundamental con los anteriores es que estos fueron diseñados y creados por el hombre. La mayoría de los recintos megalíticos estudiados están situados en el Reino Unido e Irlanda y se dividen en dólmenes y otras tumbas de piedra, túmulos cerrados de gran tamaño y círculos de piedra.

2.1.4.1. Tumbas megalíticas: dólmenes y túmulos

Los estudios relativos a los dólmenes y tumbas similares centran su atención en la distribución de los nodos y antinodos y en las frecuencias de resonancia existentes en su interior.

Un ejemplo de estos estudios es el realizado por Robert G. Jahn, Paul Devereux y Michael Ibison en 1995 *[Ref. 31].* En él se describen las características acústicas de seis recintos, encontrando, mediante predicciones teóricas y medidas en campo, fuertes resonancias entre 95 y 120Hz, donde se encuentran los primeros formantes de la voz humana. *[Fig. 2.9, Fig. 2.10, Fig. 2.11, Fig. 2.12, Fig. 2.13]*. En este trabajo, Robert G. Jahn y cia. describen como la amplificación del sonido en este tipo de recintos pudo alterar la transmisión de los mensajes acústicos en los ritos funerarios que allí se celebraban. Así, sustentan de nuevo la teoría de que las propiedades acústicas del recinto pueden contribuir a los propósitos funcionales para los que fueron concebidos. *[Ref. 50]*

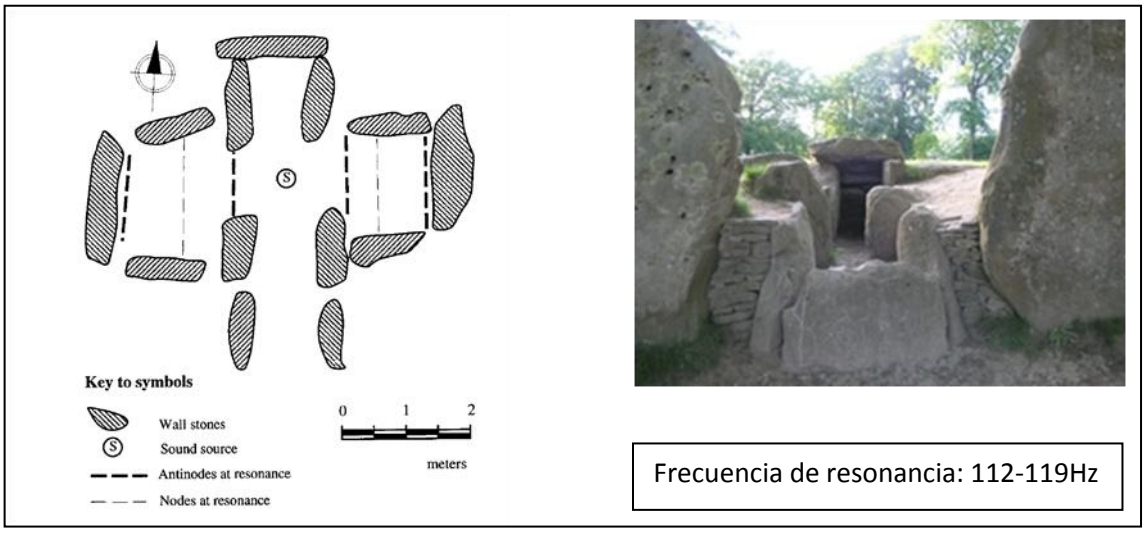


Fig. 2.9. Distribución de los modos resonantes en Wayland's Smithy Berkshire, Reino Unido, 3500 a.c. [Ref. 31]

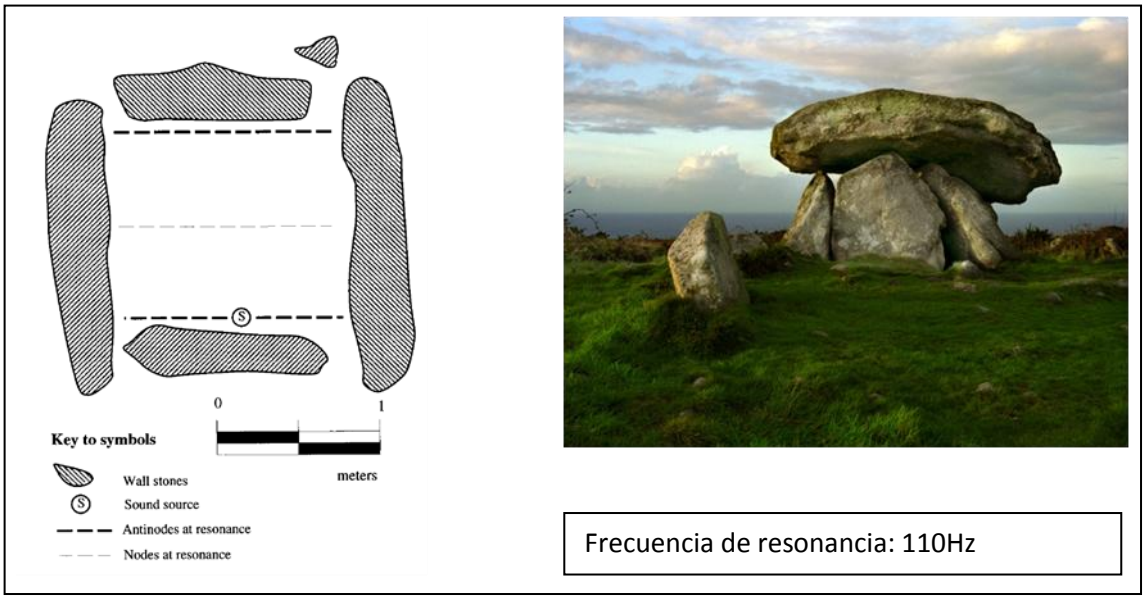


Fig. 2.10. Distribución de los modos resonantes en Chun Quoit Cornwall, Reino Unido, 3500 a.c. [Ref. 31]

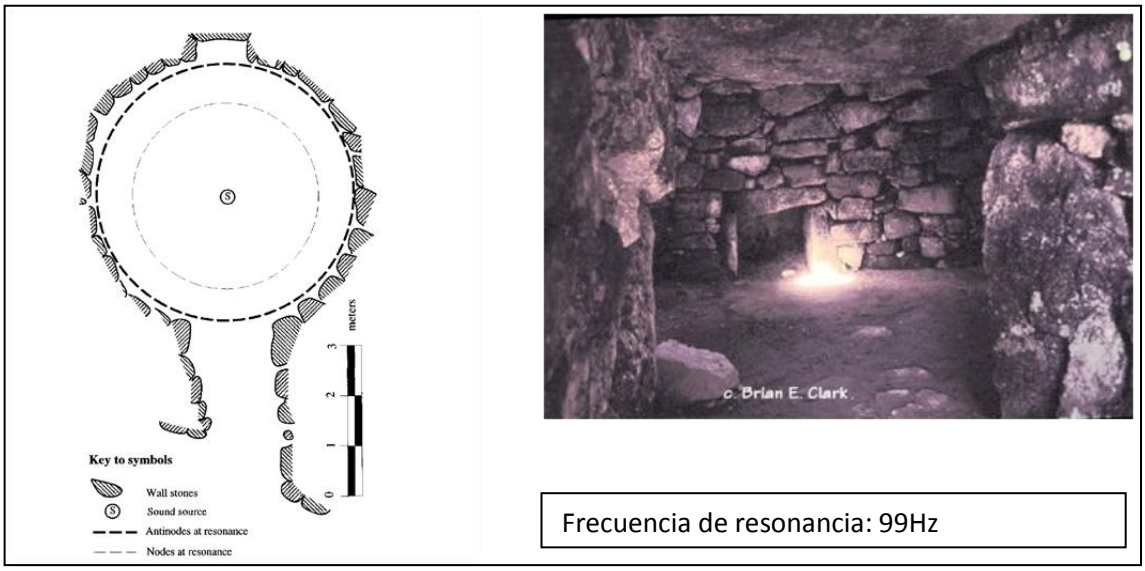


Fig. 2.11. Distribución de los modos resonantes en Cairn Euny Cornwall *Reino Unido, 400 a.c. [Ref. 31]*

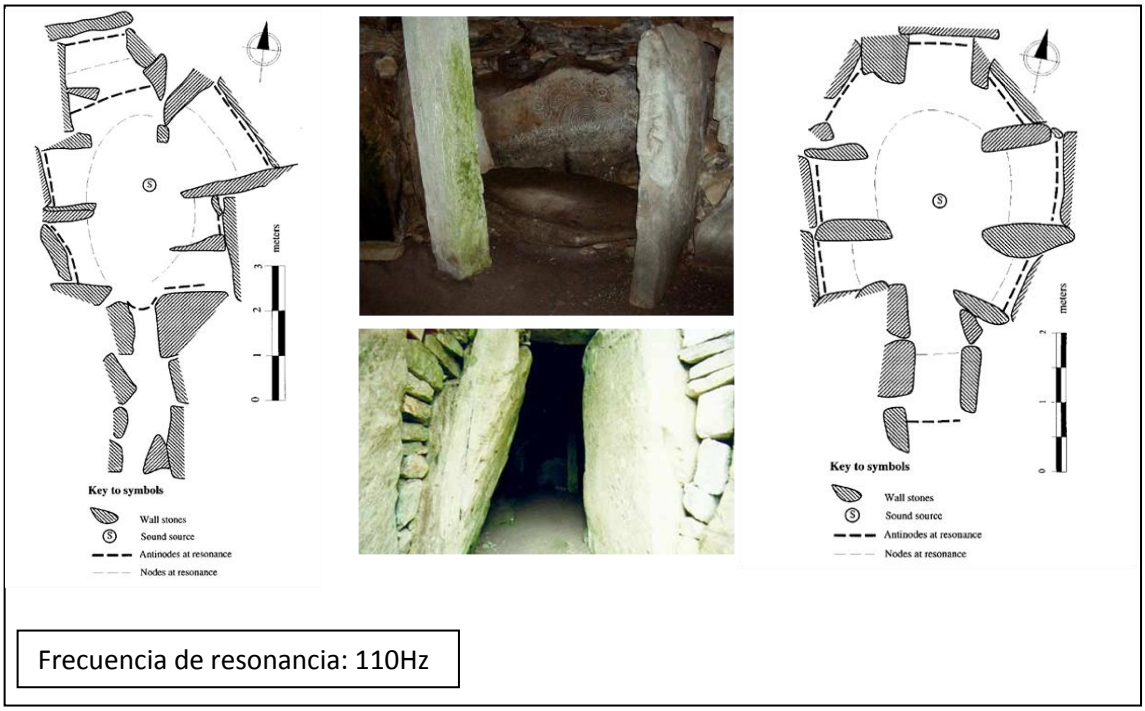


Fig. 2.12. Distribución de los modos resonantes en Cairn L, Cairn I, Carnbane West Loughcrew Irlanda, 400 a.c. [Ref. 31]

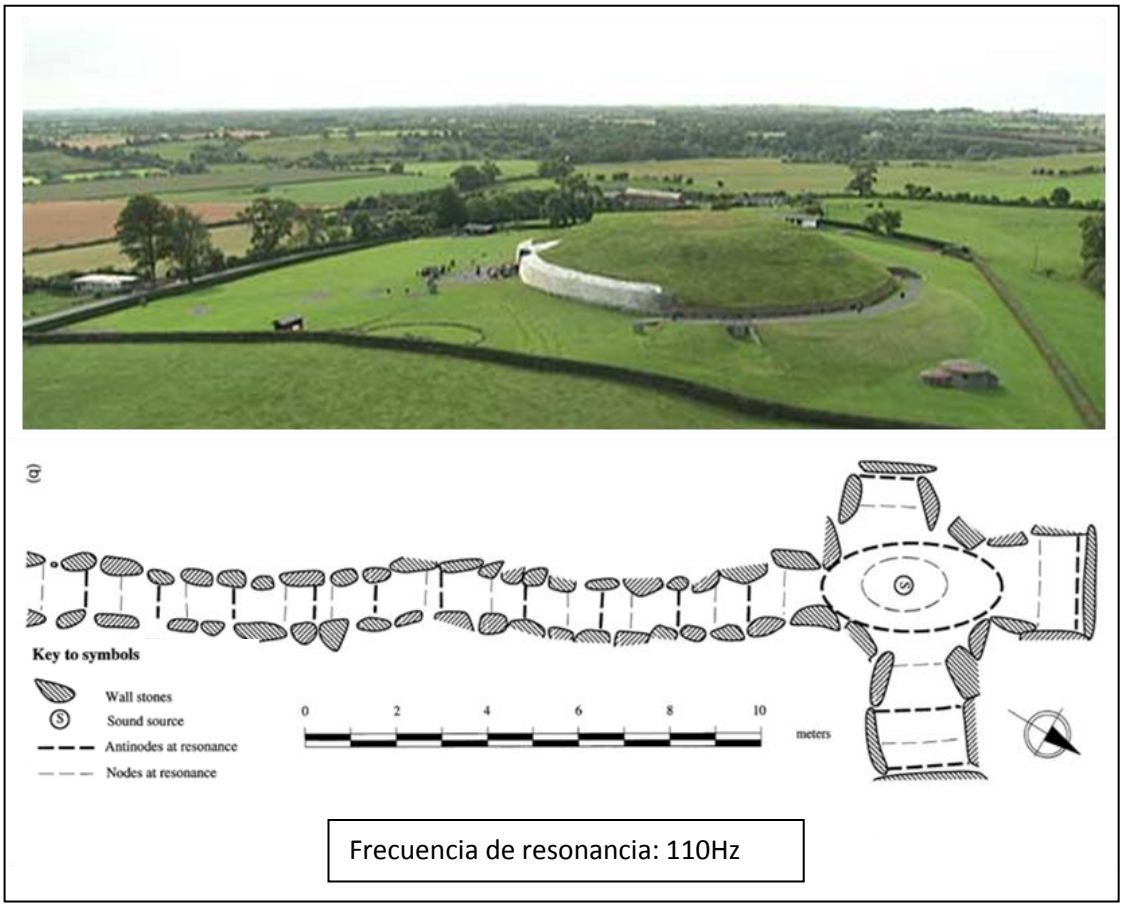


Fig. 2.13. Distribución de los modos resonantes en Newgrange Co. Meath *Irlanda, 3500 a.c. [Ref. 31]*

En estudios similares, Aaron Watson y David Keating *[Ref. 48] [Ref. 49]* estudiaron los fenómenos acústicos en diversas tumbas megalíticas anglosajonas. En sus trabajos, Watson, además de las principales frecuencias de resonancia existentes en el rango audible, analiza otros fenómenos acústicos como resonancias ultrasónicas y curvas de respuesta dentro y fuera del recinto.

Debido a que los materiales con los que han sido reconstruidos muchos de estos recintos no son los mismos que los que originalmente los formaban, solo se han podido hacer estudios en salas cuyas propiedades acústicas no hayan sido alteradas.

Es el caso de Camster Round, un túmulo que pertenece a the Grey Cairns of Camster en Escocia. *[Fig. 2.14*] En él, Watson apreció diferentes fenómenos acústicos bastante interesantes. El recinto es análogo a un resonador de Helmholtz, posee fuertes frecuencias de resonancia que crean diversos efectos sonoros en su interior y exterior. Así, la reverberación y filtrado que se produce en el interior amplifica en exceso los sonidos, sobre todo las bajas frecuencias,

y debido al largo y estrecho pasadizo, en el exterior se escuchan las voces distorsionadas en extremo. Las frecuencias medias y altas no consiguen llegar al exterior del túmulo, creando así una difícil distinción de los mensajes sonoros. Este efecto se acentúa si nos situamos en la parte trasera del recinto. Las propiedades de resonancia son tales que, si excitamos la sala con un instrumento de percusión, se consiguen escuchar resonancias de muy baja frecuencia en la cercana cámara de Camster Long, a 200m de distancia. Este sonido no se aprecia en el exterior de la cámara.

A partir de estos experimentos, Watson interpreta el posible uso de estos recintos para realizar rituales en los que existiera una clara diferenciación entre los participantes que estuviesen en el exterior y los del interior, ya que las experiencias sensoriales son totalmente distintas.



Fig. 2.14. Camster Round, the Grey Cairns of Camster, Escocia, UK

Efectos similares fueros estudiados en la cámara de Maeshowe, en Orkney, Gran Bretaña. *[Fig. 2.15].* Esta cámara neolítica, de mayor tamaño interior y con piedra muy reflectante, es capaz de crear fuertes picos de resonancia a ciertas frecuencias. A diferencia de Camster Round, y en común con la cámara de Newgrange en Irlanda, posee una losa de piedra que cierra la entrada, amplificando aún más si cabe estos efectos acústicos. Esta losa deja una abertura aparentemente intencionada (al igual que Newgrange) que deja escapar algo de sonido al exterior. Watson describe aquí un posible efecto psicoacústico muy acentuado en este recinto. Se trata de una frecuencia de resonancia muy aguda situada en torno a 2Hz; fuera del espectro audible. Una de las pocas maneras con las que se podría excitar esa frecuencia ace 35000 años es golpeando un instrumento de percusión con un tempo de 2 golpes por segundo (120 bpm). Así, en sus experimentos Watson y Keating obtuvieron

picos de hasta 110dB. Estas frecuencias a niveles altos pueden llegar a alterar física y psíquicamente a los participantes en los rituales, contribuyendo así al desarrollo de los mismos.



Fig. 2.15. Maeshowe, en Orkney, Gran Bretaña

Otro caso interesante es el de Dwarfie Stane en Orkney, Gran Bretaña. *[Fig. 2.16*]. Es un monumento único, compuesto por un pasaje y una cámara interior perforada en un gran bloque de piedra. Los fenómenos acústicos del recinto son aparentemente similares a los anteriores, lo que lo diferencia es el intrigante emplazamiento de la sala. A su alrededor, las paredes de los acantilados forman una gran lente convergente, y esta cámara se encuentra en el foco. Solo excitando con la voz humana, los ecos reflejados son amplificados en su mayoría justo en el emplazamiento de este único recinto, y escuchándolos desde el interior de la pequeña cámara, las voces aparecen ampliamente distorsionadas.



Fig. 2.16. Dwarfie Stane en Orkney, Gran Bretaña

Watson introduce aquí la interesante idea de que los aspectos del entorno y los espacios sonoros que estos crean deban ser considerados también, como ocurre también en el caso de Midhowe (Orkney). *[Fig. 2.17]* Esta cámara

situada al lado de la orilla del mar recoge el ruido de las olas chocando contra la costa, filtrando las altas frecuencias y amplificando las graves, creando así en su interior un zumbido constante.



Fig. 2.17. Midhowe en Orkney, Gran Bretaña

2.1.4.2. Círculos de piedra

En sus estudios, Watson y Keating *[Ref. 49]* también han estudiado otro tipo de monumento megalítico: los círculos de piedra. El trabajo realizado en Easter Aquorthies (Escocia, Neolítico superior) *[Fig. 2.18.]* demuestra que la disposición y emplazamiento de las piedras modifica las cualidades del campo sonoro. La plataforma que posiblemente sirviera de estrado, tiene una piedra en su parte trasera que refleja el sonido hacia el interior del anillo. Así, excitando con una fuente situada sobre esta y midiendo la distribución de presión sonora en el interior y exterior del círculo, obtuvieron resultados que confirman una inhomogeneidad en el campo acústico del círculo. El nivel de presión es muy superior en el centro que en los extremos, lo que podría suponer una discriminación de los individuos en las ceremonias. *[Fig. 2.19.]*

Otros efectos acústicos encontrados en este tipo de monumentos son los ecos. Debido a su disposición geométrica, en el centro de los anillos se focalizan fuertes ecos, fenómeno inexplicable para los hombres del Neolítico.



Fig. 2.18. Easter Aquorthies, Escocia, Neolítico superior

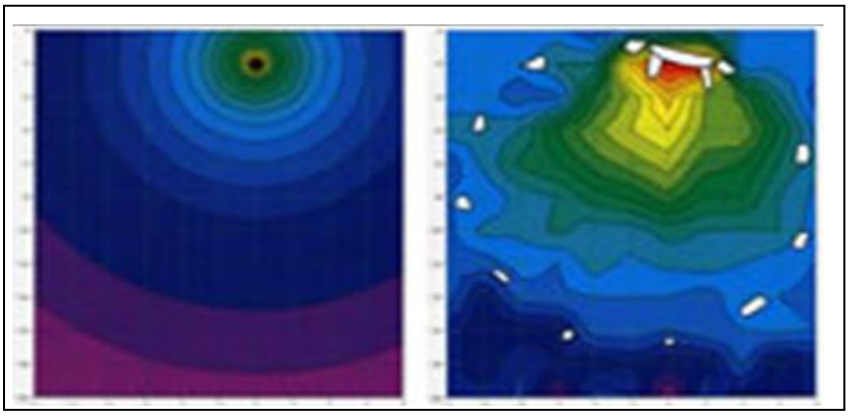


Fig. 2.19. Distribución del SPL en campo abierto y en Easter Aquorthies

Efectos similares fueron encontrados en los círculos de Stonehenge, *[Ref. 13] Fig. [2.20]* The Ring of Brodgar, *Fig. [2.21]* Avebury *Fig. [2.22]* o Stones of Stenness *Fig. [2.23]* (estos dos poseen una zanja exterior al anillo que incrementa los efectos de distribución espacial del sonido)



Fig. 2.20. Stonehenge



Fig. 2.21. The Ring of Brodgar



Fig. 2.22. Avebury



Fig. 2.23. Stones of Stenness

2.1.4.3. La cueva del Parpalló

2.1.4.4. Características arqueológicas

La cueva del Parpalló, situada en la ladera del monte Monduver, Gandía, Valencia, es uno de los más importantes yacimientos paleolíticos españoles. En ella se ha encontrado una colección de arte mueble excepcional, incluso a nivel internacional. Existen indicios de ocupación desde el Paleolítico superior hasta el Neolítico, y en toda su cronología aparecen gran cantidad de objetos de arte y de diferentes técnicas pictóricas. La rareza, cantidad, diversidad y amplitud cronológica de los restos dotan a este yacimiento de una singularidad especial. Entre los restos encontrados destaca la impresionante colección de aproximadamente 5000 plaquetas grabadas, lo que induce al pensamiento de la gran afluencia de individuos a la cueva de Parpalló. *[Ref. 1] [Ref. 29] [Fig. 2.26]*

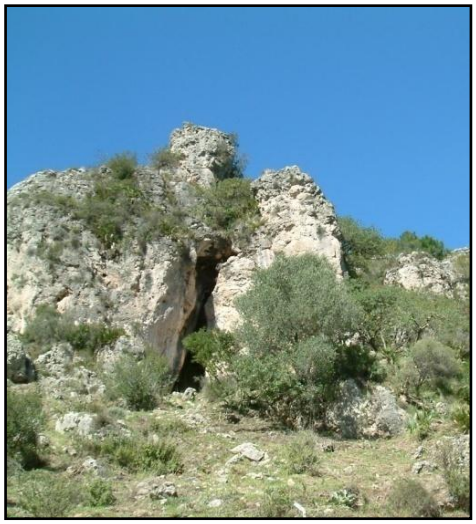


Fig. 2.24. Cova del Parpalló, Gandía, Valencia

La ubicación geográfica es estratégica, ya que desde la ladera del Mondúver donde se encuentra ubicada la cueva se divisa todo el valle. *[Fig. 2.25*]



Fig. 2.25. Vistas desde la cueva del Parpalló

Aún así, los motivos que llevaron a nuestros antepasados a elegir este lugar no están claros, pues existen muchas evidencias arqueológicas de que la cueva fuese un lugar de reunión, comercio y santuario religioso. Sus características arquitectónicas son las adecuadas para estas actividades. Así, su volumen es el adecuado para celebrar reuniones e incluso existe una plataforma ideal para ser usada como estrado por un orador. *[Ref. 30]*



Fig. 2.26. Arte mueble en la cova del Parpalló; a: industria lítica, b: elementos de adorno, c: industria ósea, c: plaquetas grabadas [Ref. 1]

El nivel del suelo de la cueva no ha sido el mismo a lo largo de su cronología, ya que se fue colmatando con el transcurso del tiempo. *[Fig. 2.26].* Esto es útil para los arqueólogos ya que ayuda ha precisar la antigüedad de los restos encontrados. De los trabajos de L.Pericot en 1931 tenemos la secuencia crono-estratigráfica de Parpalló. Se pueden observar los niveles de ocupación y la estratificación cronológico-cultural. *[Ref. 1]*

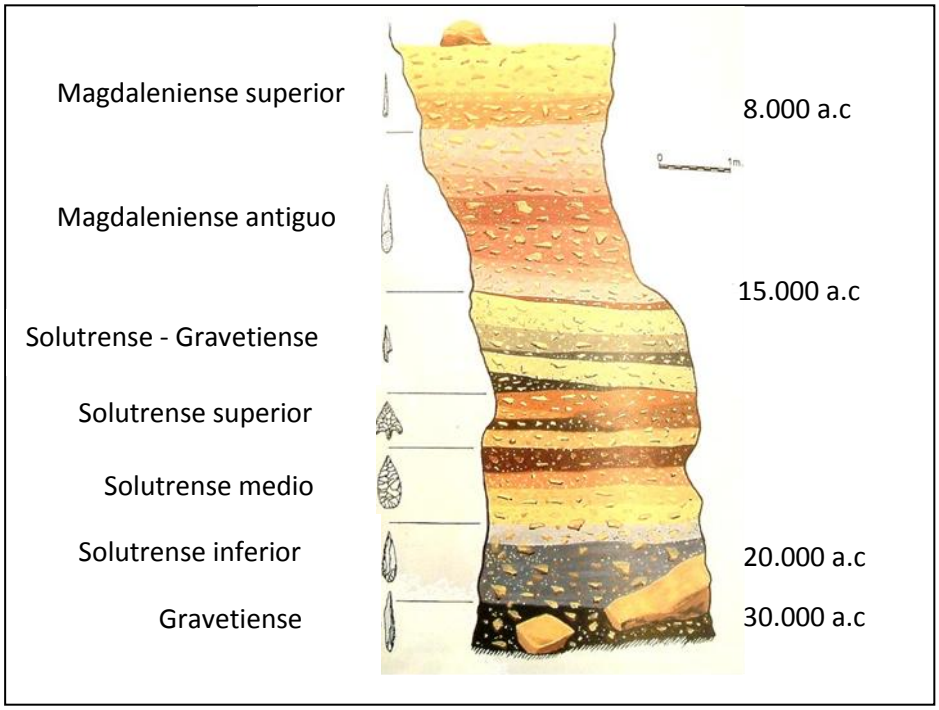


Fig. 2.26. Estratificación geológica de la cova del Parpalló [Ref. 1]

2.1.4.5. Características acústicas subjetivas y primeras observaciones

En relación con la arqueoacústica, la principal característica de Parpalló es que es un recinto natural. El hombre no creó intencionadamente este espacio sonoro, en todo caso lo eligió. Con la simple observación (auriculación) de la cueva se pueden observar características poco comunes comparadas con las de recintos similares, y que probablemente doten de unas buenas propiedades acústicas a este recinto. *[Ref. 30]*

A diferencia de otros recintos de su misma época, en él se aprecian a simple vista cualidades acústicas excepcionales. Éstas, no se refieren a fenómenos acústicos pronunciados como los de estudios anteriores (fuertes ecos, resonancias, distorsiones…) si no un aspecto completamente funcional, la inteligibilidad del mensaje acústico.

Debido a su especial geometría, Parpalló goza de unas características de inteligibilidad muy superiores al resto de cuevas habitadas. Con todas sus

superficies de piedra, los únicos elementos capaces de disminuir el largo tiempo de reverberación de una cueva son la boca de entrada, y el suelo y la audiencia. *[Ref. 30]*

En la cueva de Parpalló, la gran apertura de la puerta aumenta el área de absorción de manera muy considerable, disminuyendo en gran medida el tiempo de caída. Esto influirá directamente sobre parámetros como la claridad C_{50} o el STI/RASTI. Aún así, el sonido en la sala no es demasiado seco. Las galerías interiores aportan algo de energía en la parte más tardía del ecograma, lo que se traducirá en una curva de caída "quebrada", dotando a la vez distinción y profundidad a los sonidos.

Por ser una sala de gran tamaño, los picos de resonancia debidos a los primeros modos propios se producen a frecuencias por debajo de los 125 Hz, lo que consigue de nuevo no distorsionar demasiado el mensaje sonoro.

A la altura de la galería existe una plataforma plana, elevada y con buena visibilidad hacia todo el suelo de la cueva. Detrás de esta superficie, la pared de piedra es plana, lo que ayudaría a conseguir un óptimo refuerzo sonoro. Debido a estas características, es ideal para haber sido usada como estrado. La situación de la gran boca de la cueva también es característica, ya que al estar situada detrás de la supuesta audiencia, es capaz de disminuir el tiempo de reverberación sin eliminar las primeras reflexiones del techo y paredes, consiguiendo así un adecuado refuerzo sonoro.

Deberemos tener en cuenta el nivel de colmatación del suelo porque modificará considerablemente el campo sonoro en su interior. Al subir el nivel del suelo, el tiempo de reverberación disminuirá, ya que estamos disminuyendo el volumen sin variar apenas la absorción total de la cueva.

2.2. Conceptos de acústica de salas usados en el trabajo

2.2.1. Introducción a los modelos de simulación acústica

La simulación del comportamiento acústico de un recinto puede hacerse bajo el punto de vista de los siguientes modelos teóricos, principalmente*: [Ref. 27] [Fig.2.27*]

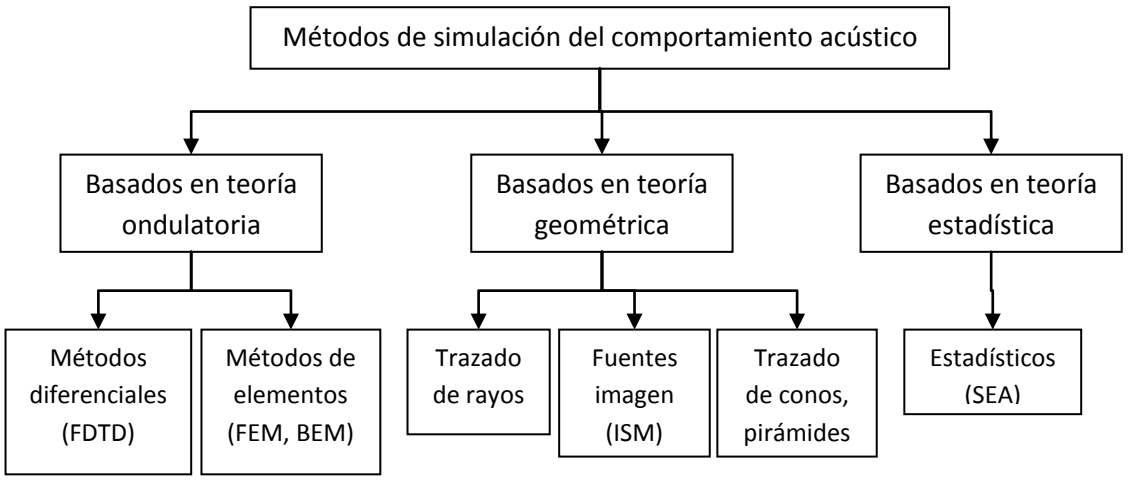


Fig.2.27. Principales métodos de simulación acústica

Es notable destacar que no existe un método perfecto, cada uno tiene sus limitaciones y es conveniente conocerlas para optimizar su uso y alcanzar los objetivos perseguidos.

Los métodos de elementos finitos (FEM), métodos de elementos de contorno (BEM) o los métodos de diferencias finitas (FSTD) están basados principalmente en la resolución de la ecuación de ondas. Los resultados aportados son muy precisos pero requieren elevados recursos computacionales y tiempo de procesado. Estos requerimientos aumentan con la frecuencia deseada de la simulación, lo que hace de su uso para aplicaciones de acústica de salas se limite a las bajas frecuencias. *[Ref. 27]*

Los métodos basados en acústica estadística, como el análisis estadístico de energía (SEA) están diseñados para trabajar con niveles energéticos para aplicaciones de aislamiento, contaminación acústica y transmisión de ruido en recintos acoplados. Estos modelos no trabajan con ecogramas y suelen hacer suposiciones de campo difuso para sus cálculos, con lo que se desaconseja su uso para el análisis de parámetros de calidad de salas. *[Ref. 27]*

Los métodos basados en la teoría geométrica se basan en el principio de Fermat, tratando el frente de onda de presión acústica como si de un rayo se tratara. Existen varios caminos para la aplicación de este método, ente los cuales destacan el trazado de rayos aleatorio, el de las fuentes imagen (SIM), y el trazado de conos o pirámides. *[Ref. 5]*

2.2.2. Acústica geométrica y su tratamiento en CATT-Acoustics

La teoría geométrica se basa en tratar el frente de onda de presión según el principio de Fermat; como si de un rayo óptico se tratara. Así, usando los principios de reflexión, difracción y refracción, se trazarán rayos desde una fuente a un receptor, y midiendo los tiempos de llegada y sus atenuaciones para conformar los ecogramas. Del post-procesado de estos se podrán obtener todos los parámetros deseados.

Cierto es que los materiales que componen el recinto no mantienen constantes sus propiedades de absorción y dispersión para todo el espectro de frecuencias y para distintos ángulos de incidencia. Además, los fenómenos de difracción del frente de onda sonora y reflexión difusa complicarán el proceso. Bajo estas limitaciones no es recomendable trabajar en frecuencias inferiores a la banda de 125 Hz ni superiores a 4 kHz. *[Ref. 3]*

Teniendo esto en cuenta, describiremos brevemente el programa de simulación elegido, CATT-Acoustics en su versión 8e. No se describirá aquí el modelado geométrico 3D del recinto por estar ampliamente detallado en otros trabajos y en la misma ayuda de CATT. Solo se explicará brevemente el funcionamiento interno de CATT para tenerlo en cuenta en las conclusiones, limitaciones y estudio del error. *[Ref. 5]*

Este software se basa tres modelos de predicción independientes, basados todos en los principios de la teoría acústica geométrica.

2.2.2.1. Trazado de rayos aleatorio

El primer modelo es usado para el mapeado de audiencia. Se trata del simple trazado de rayos en todas direcciones desde una fuente y analizando las incidencias sobre receptores esféricos de tamaño fijo dispuestos en una cuadrícula definida. Este método es bastante robusto para predicciones como la distribución del nivel de presión sonora, el sonido directo, parámetros de inteligibilidad o EDT (aunque no T30, T60...). En general, funciona bien con aquellos parámetros en los que la cola de reverberación no influye demasiado, ya que los ecogramas obtenidos no se corresponden demasiado con la realidad. El trazado de los rayos se realiza distribuyéndolos uniformemente

desde la fuente, pero ponderando esta distribución conforme a la directividad indicada de esta. *[Ref. 5] [Fig.2.28]*

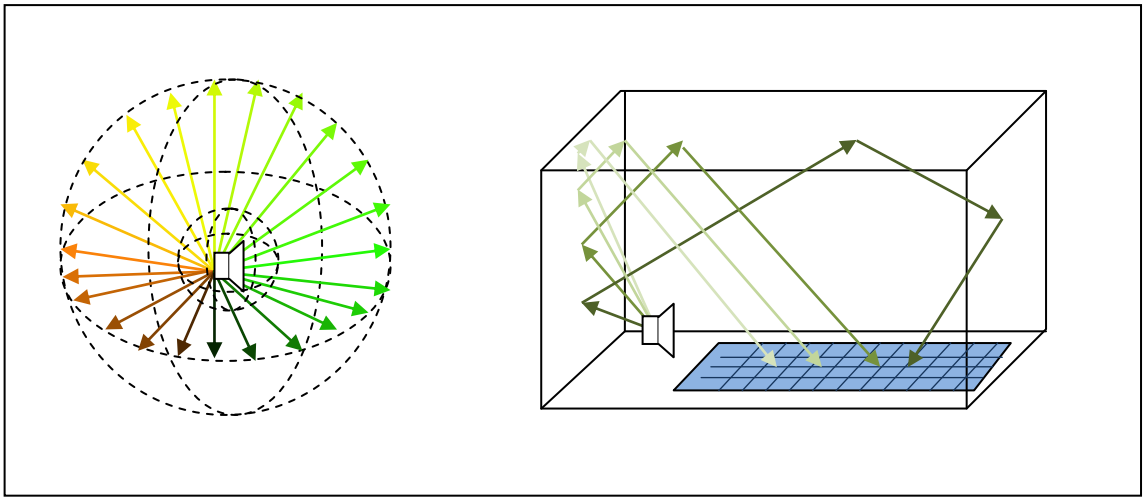


Fig.2.28. Distribución de los rayos en una fuente omnidireccional y su incidencia sobre la superficie de audiencia [Ref. 5]

Además, CATT resuelve aquí el problema de las reflexiones difusas variando la trayectoria del rayo aleatoriamente. Esta desviación se realiza con una función de probabilidad proporcional al coeficiente de dispersión del material especificado.

2.2.2.2. Fuente imagen *(ISM)*

El segundo tipo de simulación es la de cálculo de ecogramas detallados y el modelo usado es el de fuente imagen (ISM). Para ello el programa primero calcula las fuentes imagen correspondientes a todos los planos del recinto (reflexiones de 1º orden). Después, para cada una de estas calcula nuevas imágenes virtuales de 2º orden. Se le debe especificar al programa el máximo orden que queremos calcular (hasta un máximo de 9º) y el tiempo máximo de llegada de las reflexiones. Para calcular el ecograma basta con unir todas las fuentes con el receptor, incluida la original para el sonido directo, hallar la longitud de los vectores de tres dimensiones para deducir los tiempos de llegada y calcular los rebotes sufridos en las distintas superficies para calcular las atenuaciones. *[Ref. 5]*

En el ejemplo *[Fig.2.29]*, se ha calculado la fuente imagen de orden 1 sobre el techo *(S_c),* la fuente imagen de orden 1 sobre el suelo *(S_f)* y la fuente imagen de orden 2 del suelo sobre el techo *(S_{fc}).* A partir de estas fuentes se han trazado los rayos correspondientes *(P_c, P_f, y P_{fc}). [Ref. 3]*

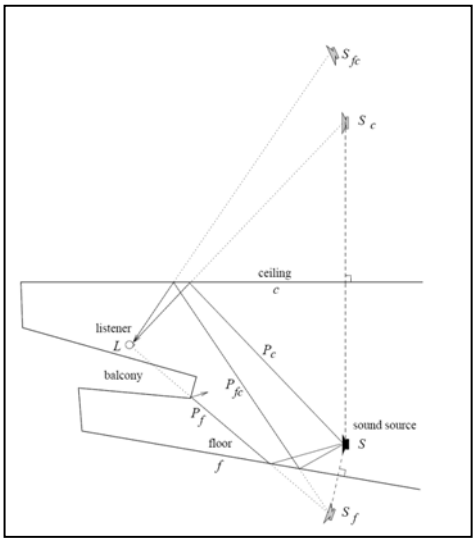


Fig.2.29. Ejemplo de aplicación del principio de la fuente imagen [Ref. 27]

El proceso se repetiría hasta obtener las fuentes imagen para todas las superficies del recinto *[Fig.2.30].* Después de trazar todos los rayos *[Fig.2.31].* se calculan los tiempos de llegada y las atenuaciones correspondientes para calcular los ecogramas *[Fig.2.32],* y posteriormente la respuesta al impulso del recinto *h(t)*. *[Fig.2.33]*

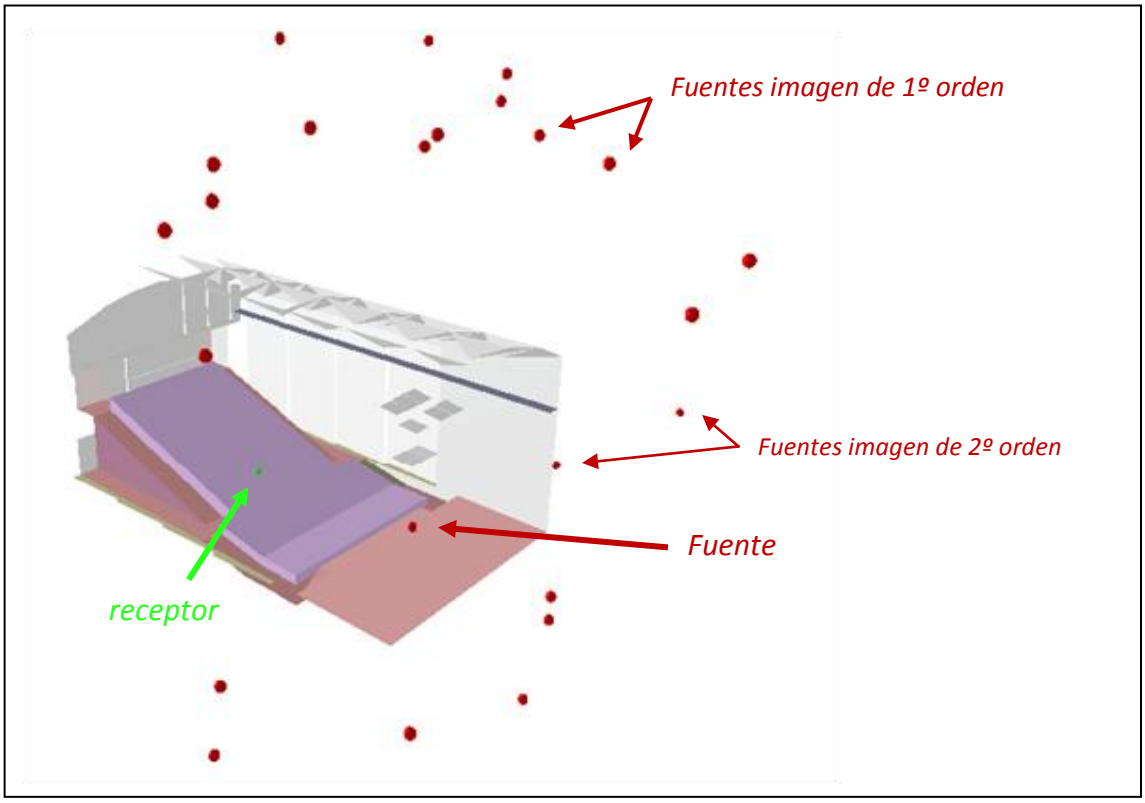


Fig.2.30. Ejemplo de aplicación del principio de la fuente imagen [Ref. 27]

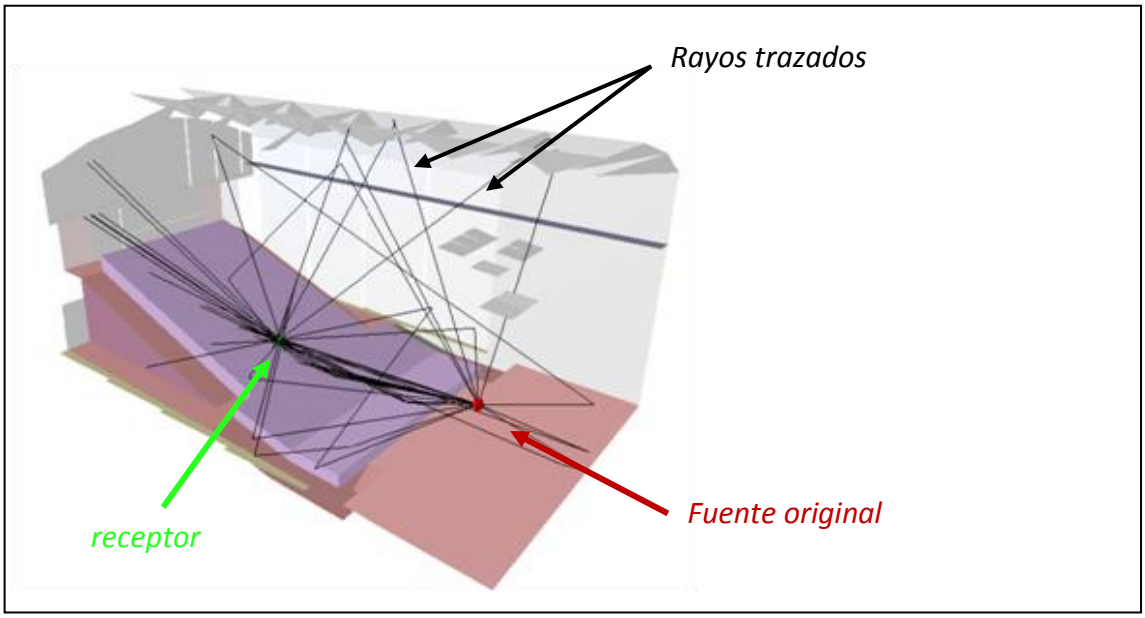


Fig.2.31. Ejemplo de aplicación del principio de la fuente imagen [Ref. 27]

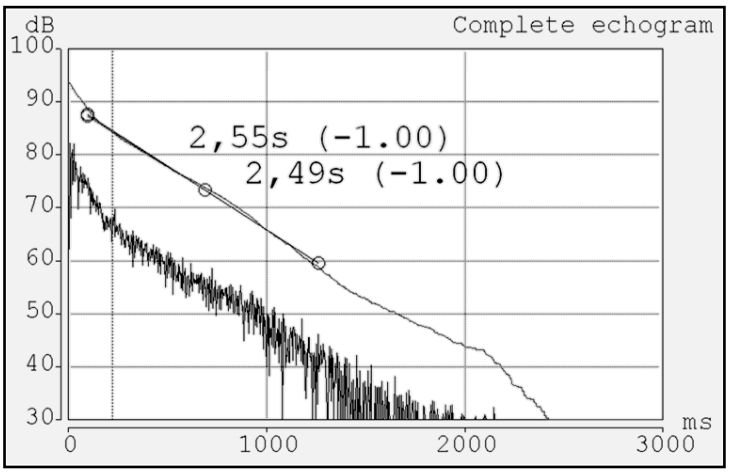


Fig.2.32. Ejemplo de ecograma obtenido [Ref. 5]

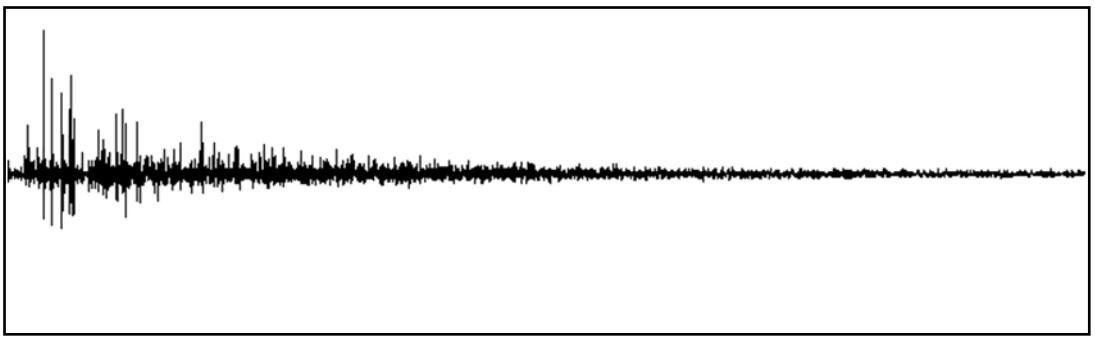


Fig.2.33. Ejemplo de respuesta temporal h(t) obtenida [Ref. 5]

Las limitaciones de este método derivan de los fenómenos de difracción y reflexión difusa que sufren los rayos. Si observamos el rayo P_f *[Fig.2.34]* es cierto que a una frecuencia suficientemente baja se difractara pudiendo llegar al oyente *(L). [Ref. 3]*

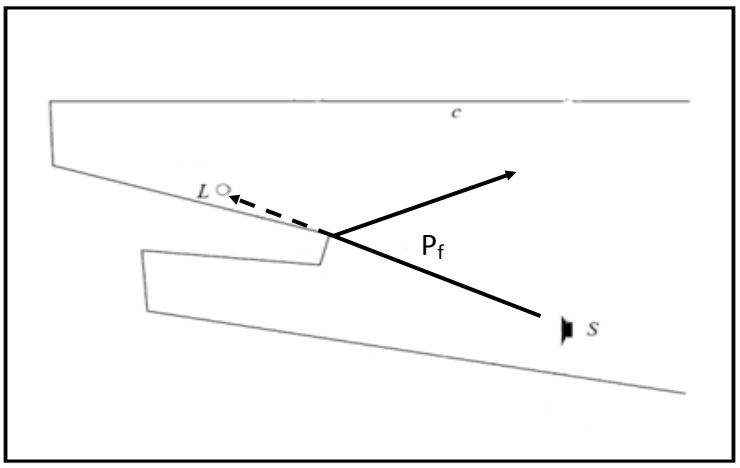


Fig.2.34. Fenómenos de difracción y reflexión difusa [Ref. 27]

Además, según este método un rayo *[Fig.2.35]* con una trayectoria cercana a P_c, P_c', nunca incidiría al oyente *L* pero si tenemos en cuenta la posible dispersión de la superficie del techo, si llegaría una ligera parte de su energía.

CATT aproxima este último defecto calculando para cada reflexión especular una reflexión difusa en función de los coeficientes de dispersión introducidos en las características del material de la superficie. Estos coeficientes son distintos para cada frecuencia pero no varían en función del ángulo de incidencia y supone la misma dispersión en todas las direcciones, por lo que es bastante aproximado. Así, los resultados no son fiables para reflexiones de elevado orden (cola de reverberación). *[Ref. 5]*

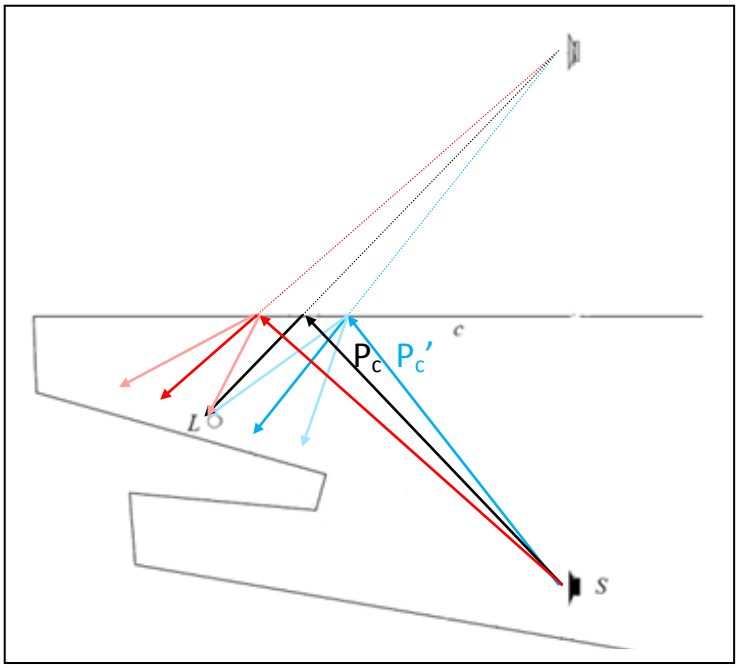


Fig.2.35. Fenómeno de reflexión difusa [Ref. 3]

2.2.2.3. *Trazado de conos aleatorizado con corrección de cola 2 (RTC-II)*

El tercer algoritmo que incorpora CATT es el más exacto y está basado en los trabajos de B-I Dalenbäck. El procesado, llamado *Randomized Tail-corrected Cone-tracing 2,* combina el trazado de conos, rayos y fuentes imagen; tiene en cuenta la dispersión del sonido para reflexiones tardías, así como la difracción de los rayos en los bordes. El fundamento de este algoritmo es trazar un cono en lugar de un rayo, lo que mejora los resultados de la parte más tardía del ecograma. *[Ref. 4] [Ref. 5]* El método se puede dividir en tres partes:

La primera es un trazado de conos uniforme, similar al trazado de rayos aleatorio comentado en el punto 2.2.2.1; la segunda parte se reserva solo para las reflexiones de orden 1 y a parte, en una tercera fase, se calculan las reflexiones especulares y difusas de orden 1 y la especular de orden 2 mediante fuente imagen (ISM) para detallar la parte temprana del ecograma. *[Ref. 4]*

Primera parte: Para cada reflexión de orden superior a 1, se genera un número aleatorio [0,1] comparándolo con el coeficiente de dispersión de la superficie. Si es inferior, la dirección del cono a trazar se desviará ligeramente como si de un difusor ideal se tratase (ley de Lambert). Si es superior, la reflexión se considerará especular. Este proceso de aletorización es

independiente para cada banda de frecuencias, lo que implica trazar un cono o rayo por octava (8 veces el numero de rayos especificados).

Segunda parte: Para las reflexiones de orden igual a 1, se crea una distribución de fuentes elementales repartidas por cada superficie difusora. Esta sigue una función de densidad proporcional a *s(1-α)*, con lo que las superficies más especulares tendrán pocas o ninguna fuente secundaria. La potencia radiada esta gobernada por la ley de Lambert (también es proporcional a *s(1-α)*).

Aparte, cualquier primera o segunda reflexión especular (conseguidas idénticas al método ISM) se disminuirán en *(1 - s)(1- α).* El motivo es compensar la atenuación del rayo principal por la ligera dispersión sufrida, aunque no se calculen los rayos difusos debido a su muy baja energía.

Tercera parte: Los receptores son puntuales, pero al contrario que para el trazado de rayos aleatorio *(audience area mapping*), estos son de tamaño muy pequeño. Esto debería crear una gran variación de los resultados para cada simulación, pero se compensa buscando las reflexiones especulares y difusas de orden 1 y la especular de orden 2 mediante (ISM). Esto hace que **aunque la simulación conste de pocos rayos, los resultados son bastante aproximados**. Aun así, los ecogramas obtenidos con pocos rayos no se corresponden con la realidad y no serán válidos para auralizar.

Para terminar, añadir que CATT introduce un algoritmo especial para determinar más exactamente la cola de reverberación en recintos con formas menos comunes (recintos en forma de “L”, recintos acoplados, grandes recintos con elevada reverberación…). La corrección evita que se pierdan demasiados rayos colocando un receptor esférico similar al descrito en *audience area mapping*, aunque esto supone un mayor error de aletorización y por tanto una mayor dispersión en las medidas. *[Ref. 5]*

2.2.3. Parámetros acústicos

2.2.3.1. Velocidad del sonido en el aire en CATT

$$c_0 = 331.4\sqrt{1+\frac{T}{273}}$$

Donde T es la temperatura del aire en ˚C *[Ref. 5]*

2.2.3.2. Ecogramas y curvas de caída

Las curvas de caída son necesarias para el cálculo interno de los tiempos de reverberación, así como otros parámetros. CATT trabaja con dos tipos de curvas:

1. *Integral "hacia delante"*

$$F(t) = \int_0^t h^2(\tau)d\tau$$

Representa el ecograma completo. *[Ref. 5]*

2. *Integral "hacia atrás" o de Schröder.*

$$B(t) = \int_t^\infty h^2(\tau)d\tau$$

Representa la curva de caída *[Ref. 5]*

Para una correcta visualización de los ecogramas se filtran estos convolucionandolos con funciones elegidas por el usuario (exponencial, triangular, rectangular…) simulando la constante de integración del oído humano. Así, es más fácil identificar picos debidos a la llegada de varias reflexiones al mismo tiempo, etc.…

2.2.3.3. Tiempos de reverberación

CATT trabaja con seis medidas de tiempos de reverberación: SabT, EyrT, EyrTg, EDT, T-15, T-30. *[Ref. 5]*

SabT: Es el cálculo clásico de reverberación de Sabine. Al trabajar en CATT hemos de tener cuidado de que las superficies no se solapen, no repetir planos y trabajar con recintos cerrados para que este valor esté dentro del rengo de validez de los resultados.

EyrT: Está basado en el cálculo del recorrido libre medio real de los rayos calculados (no 4V/S) y la absorción media (AbsC) a partir de la suma de todas las absorciones encontradas por los rayos trazados.

EyrTg: En este caso, el recorrido libre es idéntico al del EyrT pero la absorción (AbsCg) está calculada como en el caso del SabT.

EDT, T-15 y T-30: Están calculados a partir de la pendiente de las curvas de caída. Para EDT se ha trazado la recta que une los puntos de -5 a -15dB y

calculado su pendiente. Para T-15 -5 y -20dB y para T-30 los puntos a unir son -5 y -35dB.

Aparte, para los cálculos de *audience area mapping* no es posible calcular el T-30 ya que se necesitaría un ecograma para cada punto. Aun así, aquí CATT permite aproximar el EDT a partir de lo que denomina **RT'**, derivado del tiempo de subida y asumiendo una caída exponencial (RT' = 13.8 Ts). Estos resultados solo serán validos en recintos con una elevada difusión y para posiciones alejadas de la fuente. *[Ref. 5]*

2.2.4. Parámetros de calidad de salas usados: Inteligibilidad

2.2.4.1. Claridad

Parámetro que expresa el juicio subjetivo relativo a la distinción de sonidos sucesivos. *[Ref. 3]*

$$C_{50}(dB) = 10\ log \frac{\int_0^{50} p^2(t)dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t)dt}$$

C_{50} (Speech Average) = 0.15 C_{50} (500Hz)+ 0.25C_{50} (1kHz) + 0.35C_{50} (2kHz) +0.25 C_{50} (4kHz)

Para el cálculo teórico de la C_{50}, y bajo la hipótesis de campo difuso: *[Ref. 3]*

$$C_{50} = -1 + e^{\frac{13.8 \cdot 50[ms]}{TR[ms]}}$$

2.2.4.2. Definición

Parámetro similar a la claridad; distinción de sonidos sucesivos.

$$D\ (dB) = 10\ log \frac{\int_0^{50} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}$$

Por ser un parámetro que compara una parte de la energía del ecograma frente al total, se puede expresar en %. *[Ref. 3]*

2.2.4.3. STI / RASTI

Speech transmision index / Rapid speech transmision index

Estos índices tratan de calificar la inteligibilidad de un sistema lineal e invariante, como por ejemplo puede ser un recinto.

2.2.4.3.1. STI

Fue definido por Houtgast y Steeneken en los años 70 *[Ref. 18].* Puede tomar valores comprendidos entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima).

Calculo del STI

a. Se definen 7 frecuencias portadoras, correspondientes a las frecuencias centrales de las bandas de octava normalizadas entre 125 y 8000 Hz, y cada una de estas señales es modulada con las 13 siguientes frecuencias F_m: 0.63, 0.8, 1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3, 8, 10 y 12.5 Hz. Se transmite en el recinto las 98 señales moduladas en amplitud con un índice de modulación conocido m_{in}. *[Fig.2.36*] *[Ref. 21] [Ref. 22]*

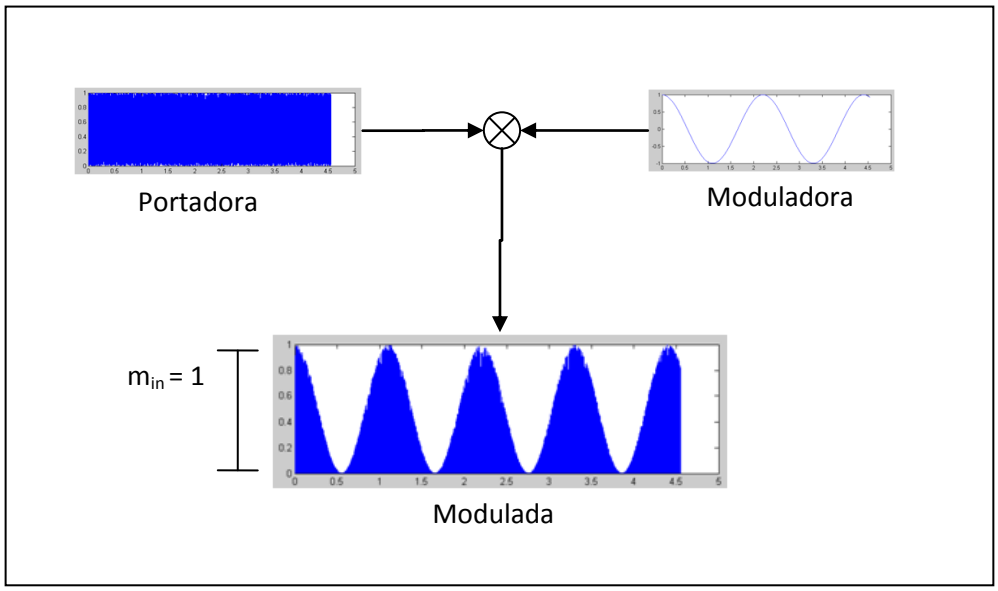


Fig.2.36. Modulación de las señales

b. Se mide la reducción que experimenta el índice de modulación m para cada una de las señales utilizadas. Esta reducción del índice de modulación es debida a la reverberación, ecos y al ruido de fondo, y se traduce en una pérdida de inteligibilidad. *[Fig.2.37*]

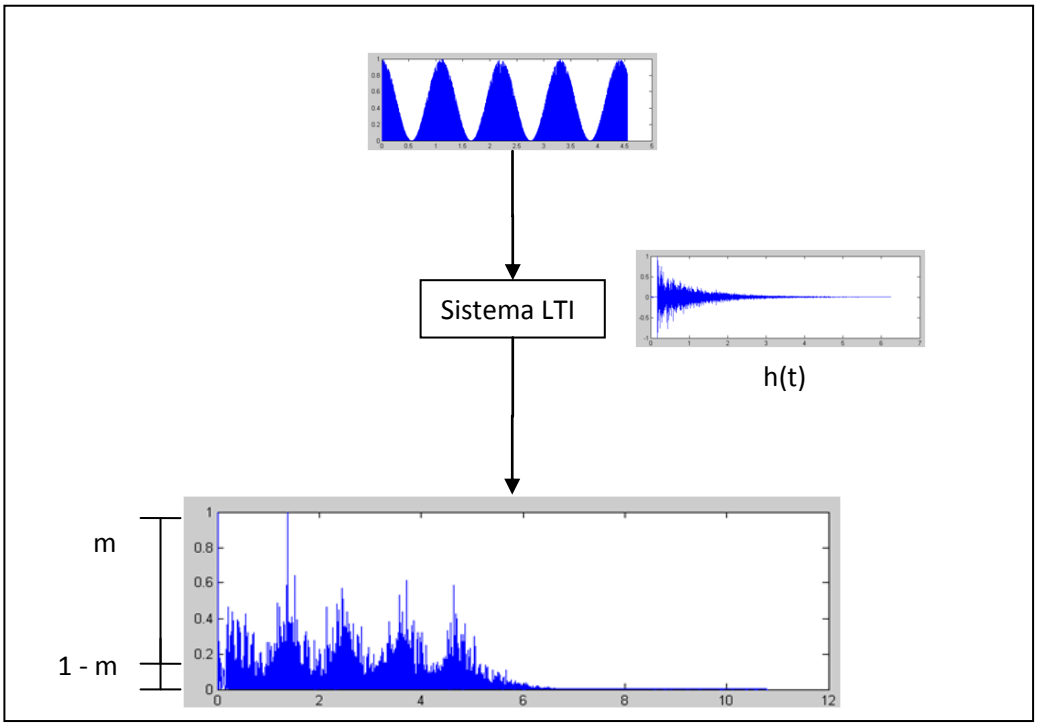


Fig.2.37. Filtrado de la señal con la respuesta de la sala

c. La perdida de modulación m en función de la frecuencia de la moduladora define la llamada función de perdida de modulación MTF. Existe 8 MTF, una para cada frecuencia portadora. *[Fig.2.38*] *[Ref. 21] [Ref. 22]*

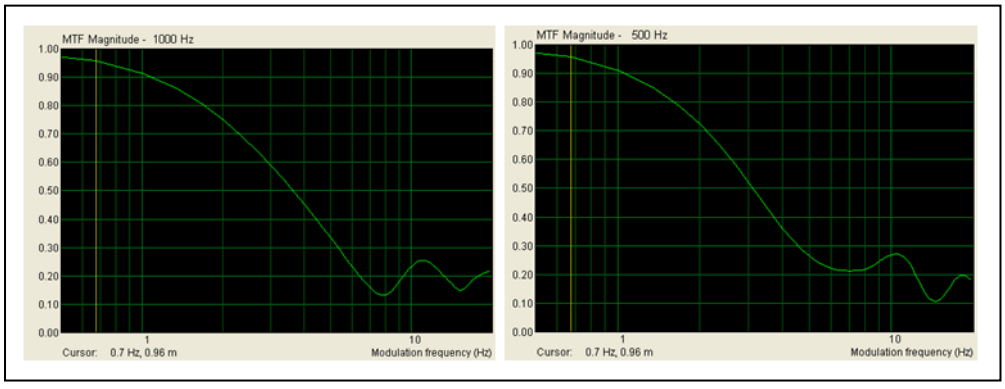


Fig.2.38. Ejemplo de MTF para 1000 y 500 Hz

Se obtiene la relación señal-ruido aparente asociada a cada señal modulada.

$$(S/N)ap_i = 10\,log\left(\frac{m_i}{1-m_i}\right)$$

d. Los valores de$(S/N)\mathrm{ap_i}$ están limitados a ± 15 dB:

si $(S/N)ap_i$ *> 15 entonces* $(S/N)ap_i$ *= 15*
si $(S/N)ap_i$ *> -15 entonces* $(S/N)ap_i$ *= -15*

e. El método STI indica que la relación sonido /ruido en la gama de frecuencias calculada y de -15dB a 15dB es linealmente dependiente del índice de inteligibilidad en la gama de 0 a 1. Es por esto que la relación sonido/ruido se convierte en los 98 índices de transmisión TI_i .

$$TI_i = \frac{(S/N)ap_i + 15}{30}$$

f. El valor medio de TI_i para cada banda de octava (índice de transmisión de octava, OTI_n) se define como la media de los valores:

$$OTI_n = \frac{\sum TI_i}{14}$$

g. Para obtener el STI final se ponderan las OTI_n según el espectro de la voz humana. Cabe citar que la ponderación es distinta para hombres que para mujeres, lo que implicará un STI distinto para cada género. Estas constantes han sido obtenidas experimentalmente [IEC 60268-16].

$$STI = \sum_{n=1}^{7} \alpha_n \, OTI_n - \sum_{n=1}^{6} \beta_n \sqrt{OTI_n \cdot OTI_{n+1}}$$

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\alpha_{masculina}$	0.085	0.127	0.23	0.233	0.309	0.224	0.173
$\beta_{masculina}$	0.085	0.078	0.065	0.011	0.047	0.095	0
$\alpha_{femenina}$	0	0.117	0.223	0.216	0.328	0.25	0.194
$\beta_{femenina}$	0	0.099	0.066	0.062	0.025	0.076	0

Fig.2.39. ponderación de las OTI_n *según el espectro de la voz humana [Ref. 21] [Ref. 22]*

STI	Índice subjetivo equivalente
0,0 < STI < 0,3	Malo
0,3 < STI < 0,45	Pobre
0,45 < STI < 0,6	Suficiente
0,6 < STI < 0,75	Bueno
0,75 < STI < 1,04	Excelente

Fig.2.40. Relación entre el STI y la inteligibilidad subjetiva [Ref. 3]

2.2.4.3.2. RASTI

De la gran cantidad de medidas a realizar (98) en el método STI surge de la necesidad de un proceso equivalente pero más rápido. Hougast y Steeneken dedujeron que no era necesaria una MTF tan detallada para calificar la inteligibilidad de la voz humana en espacios cerrados y definieron un parámetro reducido, el RASTI. El proceso es similar pero reduciendo las portadoras a 2 y las moduladoras a 4 y 5. *[Fig.2.41*]

$F_{portadora}$(Hz)	$F_{moduladora}$(Hz)				
500	1	2	4	8	
2000	0.7	1.4	2.8	5.6	11.2

Fig.2.41. Modulaciones para el RASTI

Para medir el RASTI, se transmite esta señal de test desde la posición del hablante en la sala y se analiza en la posición de los oyentes, calculando directamente la reducción de la modulación para las 9 frecuencias.

La norma [IEC 60268-16] exige que para la medición del STI / RASTI la señal modulada tenga un espectro y un nivel similar al de una conversación normal (67 dBA ponderados conforme a la siguiente tabla). *[Fig.2.42*]

Octava	Voz masculina	Voz femenina	Filtro de medida estandar
125	2,9	-200,0	-0,55
250	2,9	5,3	0,00
500	-0,8	-1,9	-1,43
1000	-6,8	-9,1	-4,60
2000	-12,8	-15,8	-9,52
4000	-18,8	-16,7	-16,80
8000	-24,8	-18,0	-25,30

Fig.2.42. Espectro de una conversación normal usado para el RASTI

Las señales serán siempre ruido blanco de ancho de banda una octava centrado en la frecuencia correspondiente a la medida STI / RASTI.

2.2.4.3.3. RASTI / STI a partir de la respuesta al impulso:

Schoroeder demostró que es posible obtener la MTF a partir de la respuesta al impulso *[Ref. 41]* siempre que el sistema sea lineal, pasivo e invariante en el tiempo (LTI). Así, se puede obtener la perdida de modulación filtrando *h(t)* para cada banda de octava:

$$m(f) = \frac{\int_0^\infty h_f^2(\tau) \cdot e^{-j2\pi\tau} d\tau}{\int_0^\infty h_f^2(\tau) d\tau}$$

Para la obtención de la respuesta se puede utilizar una señal impulsiva como excitación, aunque deberemos ajustar su espectro a los valores señalados por Hougast y Steeneken y no se podrá contabilizar el efecto del ruido de fondo.

Otro método es usar señales MLS como señal de excitación. Las señales han de ser filtradas antes de ser amplificadas para acondicionar su espectro al de la voz humana. *[Fig.2.43*] *[Ref. 41]*

NOTA: Como para el trabajo se necesitaba una respuesta al impulso sin ningún filtrado para el análisis de los demás parámetros de calidad de salas, el acondicionamiento de las señales MLS no se ha realizado en la fase previa. Se ha optado por filtrar la respuesta al impulso obtenida, con lo que también estamos modificando el espectro del ruido de fondo. Se ha considerado despreciable este factor ya que el ruido de fondo en el interior de la cueva es muy bajo, siendo siempre inferior al ruido de la tarjeta de sonido empleada.

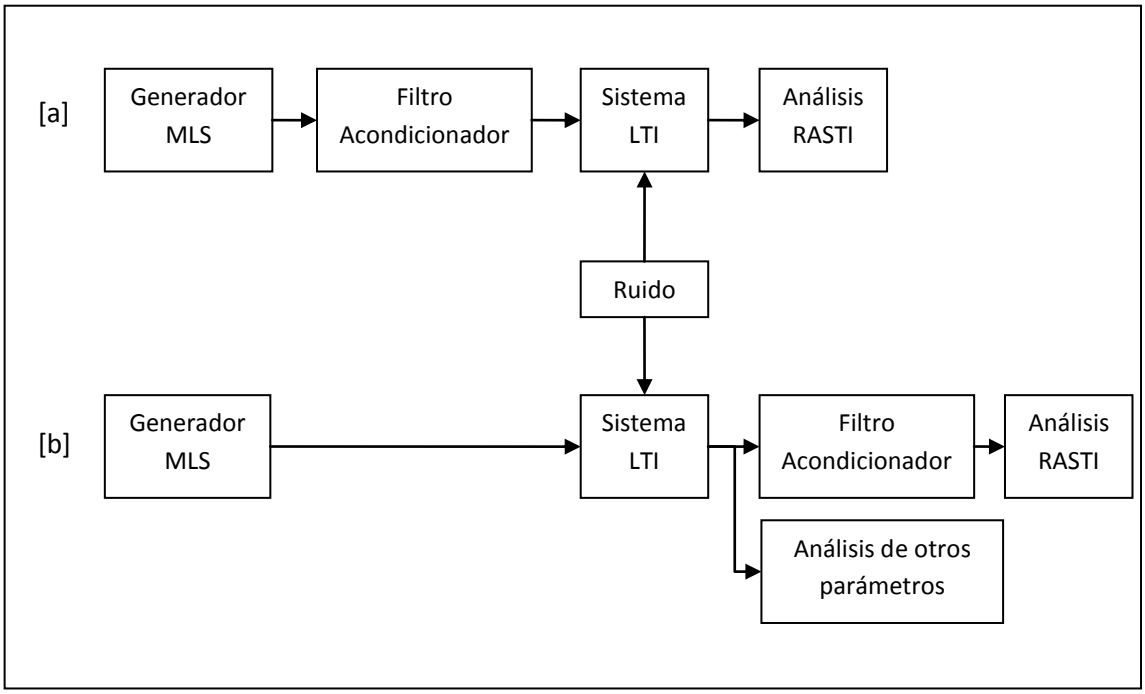
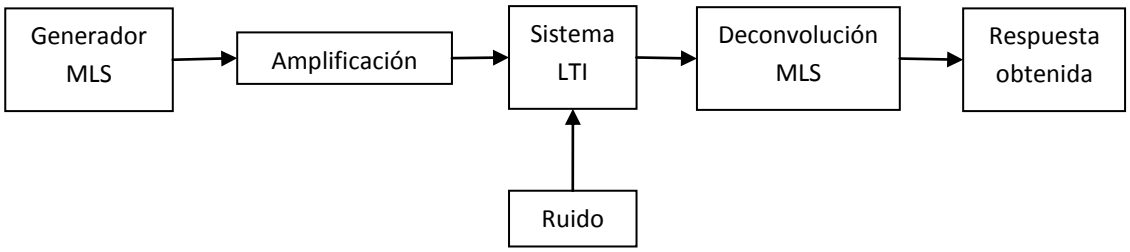


Fig.2.43. Ponderación del espectro de ruido usado para el calculo del RASTI.

[a] configuración propuesta por Schroeder; [b] configuración usada en este trabajo

2.2.5. Medición de la respuesta al impulso en sistemas reales con señales MLS

En el trabajo se ha realizado un estudio a partir de medidas reales en el interior de la cueva. Para medir la respuesta de la sala la técnica elegida fue MLS. El esquema es el siguiente: *[Ref. 36] [Ref. 37]*

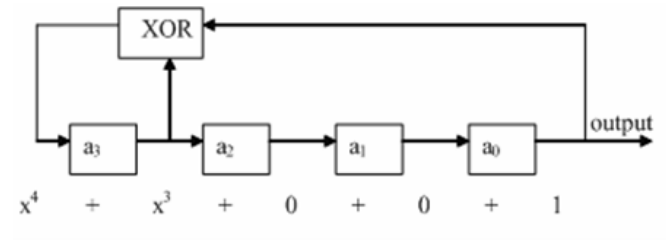


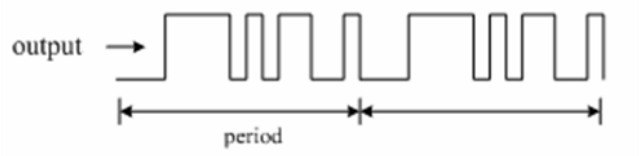
Una señal de Secuencia de Longitud Máxima (MLS) es una señal de impulsos con intercambio casi-aleatorio ente los dos niveles de señal: +1 y -1. Se puede analizar como secuencia binaria de N ceros o unos periódica con periodo N = 2^m-1. Esta señal se puede generar con registros de cambio conectado en retroalimentación Fig[]. Las conexiones de retroalimentación se definen con algún polinomio primitivo de orden *m*-avo.

Por ejemplo, la generación de una secuencia MLS con el polinomio de cuarto orden;

$b(x)=x^4+x^3+1$

tiene una longitud (periodo) $N = 2^4 - 1 = 15$.





Estados de registro de cambios			
a3	a2	a1	a0
1	0	0	0
1	1	0	0
1	1	1	0
1	1	1	1
0	1	1	1
1	0	1	1
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
0	1	1	0
0	0	1	1
1	0	0	1
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0

Características de las secuencias MLS:

1. La función de autocorrelación es constante $R_k^{xx} = f(x) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ -\frac{1}{N}, & k \neq 0 \end{cases}$

2. El valor CC es igual a 1/N

3. El factor de cresta es 1 (0dB)

En realidad, cuando se genera el MLS con una tarjeta de sonido, la señal MLS cambia en la salida del filtro antialiasing del conversor D/A. Un valor de factor de cresta de 6dB a 9dB es común en la salida de las tarjetas de sonido de PC.

Para N mayores, un valor CC (1/N) se acerca a cero. Entonces, la autocorrelación es igual a 1. El espectro de potencia S_n y la autocorrelación R_k son parejas Fourier:

$$S_n^{xx} = \sum_{k=o}^{N-1} R_k^{xx} e^{-j2\pi nk/N} = 1$$

Este espectro de potencia es una constante, que significa que la secuencia MLS tiene un **espectro blanco**. Cuando la excitación de entrada al sistema tiene un espectro blanco la correlación-cruzada con la señal de salida es proporcional a la respuesta al impulso del sistema:

$$h_k = R_k^{xx}$$

Además de por la disponibilidad de software y hardware, la razón de la elección de este sistema fue la rápida generación de las secuencias y el bajo tiempo de procesado (la correlación con una secuencia MLS se puede hacer con la transformada Hadamard que es un algoritmo más rápido que un FFT).

Los únicos inconvenientes del uso de técnicas MLS derivan de la medida de sistemas no lineales, en los cuales pueden sufrir grandes distorsiones, aunque este caso no ocurriría nunca al medir la respuesta de una sala con la configuración elegida. *[Ref. 36] [Ref. 37]*

3. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN ACÚSTICA

3.1. Introducción

En un principio, y como continuación del estudio de Rubén Picó y cía. *[Ref. 30],* se planteó resolver este trabajo con modelos de **acústica ondulatoria** (simulación FEM). La resolución de la ecuación de ondas aporta resultados precisos para predicciones a baja o muy baja frecuencia, pero las características del recinto a tratar dificultan el estudio con este método.

Las elevadas dimensiones de la cueva hacen que el estudio (bajo software Comsol Multifisics V.3.2) limite el cálculo a frecuencias inferiores a 1 kHz, insuficiente para determinar parámetros de inteligibilidad. Otras limitaciones importantes son el difícil tratamiento de los transitorios, el dificultoso modelado en 3D del recinto así como el cálculo de las condiciones de contorno reales, además del alto tiempo de procesado para cada simulación.

Todas estas cuestiones llevaron a la decisión de cambiar el punto de vista del trabajo y tratar el recinto bajo modelos de **acústica geométrica**, en particular con el software CATT - Acoustics V8e.

3.2. Preprocesado del modelo

3.2.1. Determinación del modelo geométrico de la cueva

El primer paso para la creación del modelo acústico del recinto fue determinar la geometría física de la cueva. En una primera aproximación, se obtuvieron las coordenadas geométricas a partir de los planos de la cueva definidos en los trabajos de L. Pericot *[Ref. 29],* y posteriormente recopilados por E. Aura *[Ref.1]*. Estos primeros puntos se importaron del modelo original *cova4.mph [File 1]* de Comsol Multifisics del trabajo de R. Pico y cia. *[Ref. 30] [Fig. 3.1].*

El modelo inicial obtenido constaba de una malla de 360 puntos con resolución aproximada de 1 m. En esta primera malla no se contempla la boca de entrada, las galerías y la inclinación del piso.

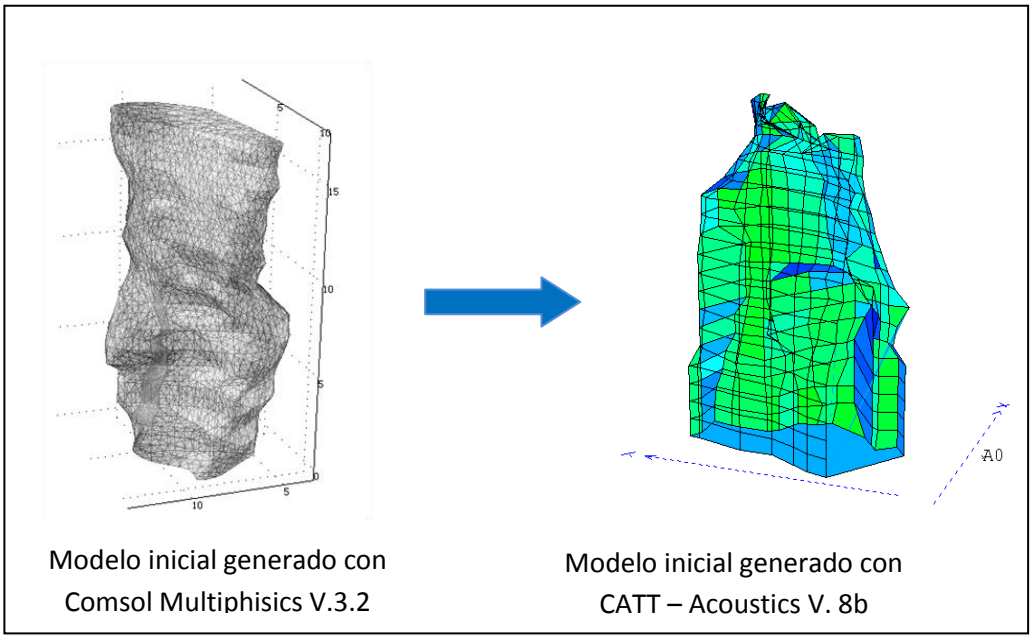


Fig. 3.1. Modelos iniciales a partir de los 360 puntos

A partir de los planos arqueológicos *[Fig. 3.2]* se procedió a determinar la geometría de las galerías y de la boca. Por disponibilidad, buena interacción grafica con inclusión de fotos/puntos en coordenadas y conocimiento del funcionamiento, el método empleado fue usar el programa *Freehand 10* de Macromedia. Debido a que la resolución requerida no era menor que 0.5 m, el resultado fueron 64 coordenadas para las galerías y 18 para la boca de entrada. El desnivel del piso actual es aproximadamente 0.5 m, lo que supone una inclinación de 6˚ aproximadamente. Por el contrario se desconoce cual sería la inclinación con otros niveles de colmatación.

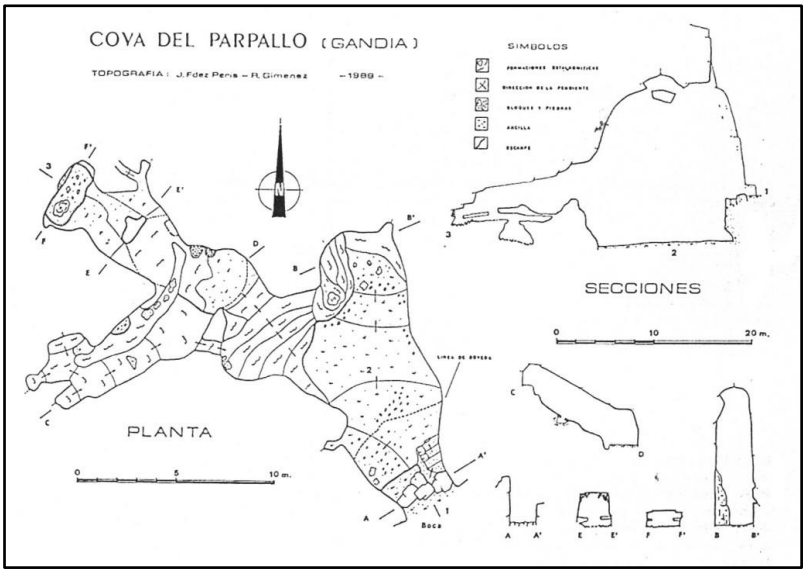


Fig. 3.2. Ejemplo de los planos arqueológicos de Parpalló

En un posterior modelo se procedió a aumentar la resolución de la malla de puntos interpolando los conocidos. El método empleado está implementado en MATLAB 6.5 con la denominación *splines*. Este método es capaz de interpolar curvas cerradas mediante interpolación polinómica de segundo orden. Es posible determinar el número deseado de puntos y la curva obtenida siempre pasa por los puntos originales. A partir de este procesado se obtuvieron 2070 puntos para el cuerpo principal, 250 para las galerías y 18 para la boca.

Desde el punto de vista acústico esta interpolación debería precisar los resultados de los parámetros no estadísticos, pero debido al funcionamiento del algoritmo usado por CATT para el trazado de los rayos definido anteriormente, en las simulaciones efectuadas se comprobó que los resultados no varían demasiado. Si que lo hace el tiempo empleado para cada simulación hasta el punto de que para solo 1000 rayos, el proceso tarda unas 6 horas.

3.2.2. Determinación de las condiciones de contorno: superficies

3.2.2.1. Piedra de las paredes y techo

La composición de las paredes y techo de la cueva, así como de las galerías, es básicamente piedra caliza en combinación con otras superficies de conglomerado arenoso *[Fig. 3.3].* Existe un amplio rango de superficies desde las más pulidas, duras y reflectantes hasta las más rugosas y absorbentes, tanto placas lisas como con relieves irregulares. La distribución de estas está repartida por toda la cueva de manera bastante irregular y tanto a partir de los planos como de la simple observación del recinto es difícil conseguir una caracterización absoluta de las superficies de la cueva.

De los planos arqueológicos no se pueden extraer demasiadas conclusiones relevantes ya que solo especifican la situación de piedra, estalagmita, arena y suelo arcilloso.

Debido a esta poca homogeneidad en los materiales de las superficies, la caracterización de los cerramientos con un coeficiente de absorción y dispersión único resultaría poco exacta. Se optó por buscar un intervalo lógico de los parámetros de absorción y dispersión.

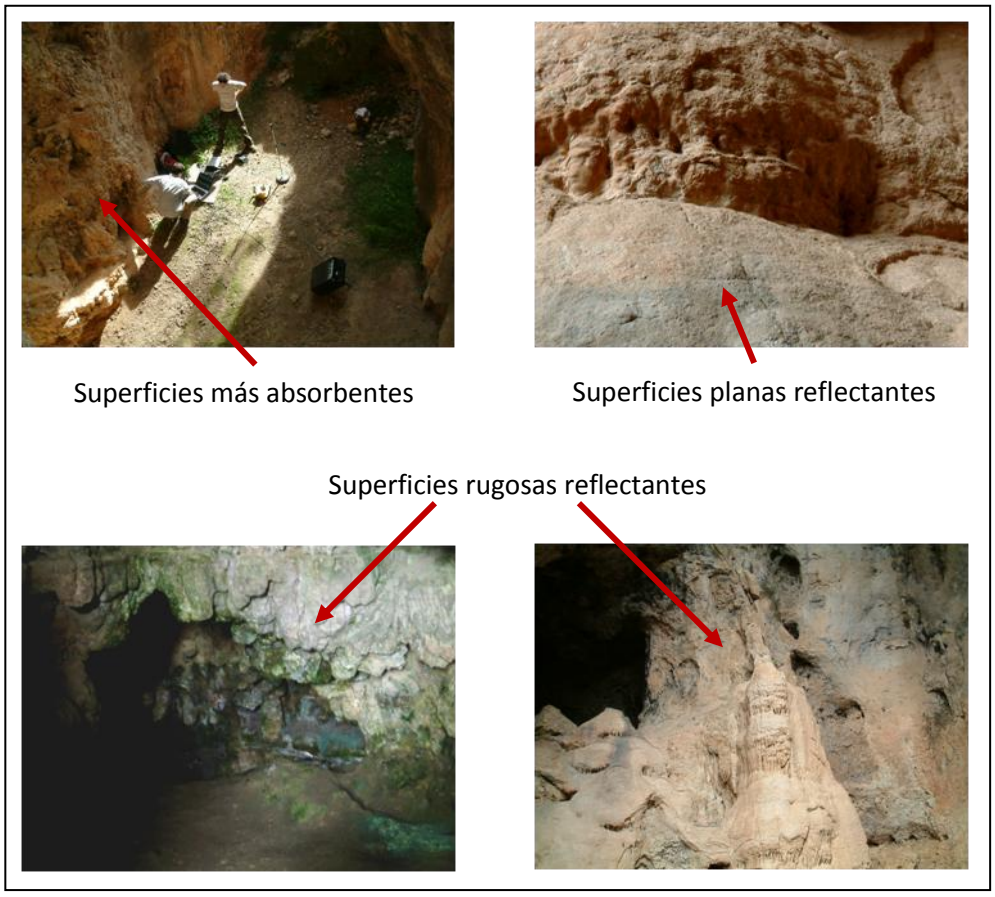


Fig. 3.3. Distribución de los materiales de las superficies en Parpalló

De Beranek *[Ref. 3]* y de M. Recuero *[Ref. 32]* encontramos que los coeficientes de absorción para superficies de piedra lisa están en torno a 0.01, pero atendiendo a las consideraciones anteriores se realizaron 7 simulaciones de prueba con coeficientes desde 0.01 hasta 0.1, aumentando ligeramente estos para las frecuencias más altas *[Fig. 3.4].* De los resultados de estas pruebas y las comparaciones posteriores con los resultados de las medidas *in situ* se estableció un coeficiente de absorción aproximado para simulaciones más detalladas.

Frec. (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Abs Stone 1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.015	0.015	0.02	0.02
Abs Stone 2	0.01	0.015	0.015	0.015	0.02	0.02	0.03	0.03
Abs Stone 3	0.015	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Abs Stone 4	0.015	0.025	0.025	0.025	0.025	0.04	0.04	0.05
Abs Stone 5	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06
Abs Stone 6	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1
Abs Stone 7	0.03	0.04	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.2

Fig. 3.4. Coeficiente de absorción de las superficies para las simulaciones preliminares

NOTA: Cabe citar que las simulaciones 7 y 8 quizás exageren las propiedades de absorción reales pero puede ser interesantes para observar la tendencia y ajustar los resultados

Con relación al coeficiente de dispersión de la piedra de la cueva, CATT-Acoustics explica que el algoritmo empleado para el cálculo ofrece resultados más exactos con coeficientes de dispersión por encima de los reales que por debajo y más cuando la geometría del recinto se ha aproximado en exceso *[Ref. 5].* Los valores elegidos se muestran en la tabla siguiente: *[Fig. 3.5.*]

Frec. (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Scatt Stone 1-7	10	20	20	20	30	30	30	30

Fig. 3.5. Coeficiente de dispersión de las superficies para las simulaciones preliminares

3.2.2.2. Suelo de la cueva:

En los planos se observa que el piso actual de la cueva está compuesto por arena arcillosa. De M. Recuerdo *[Ref. 32]* obtuvimos los coeficientes de absorción de materiales parecidos. Pero cabe considerar que la cueva durante una reunión nunca estaría vacía, y no solo de individuos, si no de demás enseres y objetos, hogares, etc *[Ref. 29]*. Es por ello que el coeficiente de absorción y el de dispersión será bastante más elevado que el de la arena. *[Fig. 3.6.*]

Frec. (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Arena húmeda	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15
Grava	0.25	0.06	0.065	0.7	0.75	0.8
Arena seca	0.15	0.35	0.4	0.5	0.55	0.8
Público de pie	0.36	0.43	0.47	0.44	0.49	0.49
Absorción suelo elegida para el modelo	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8

Fig. 3.6. Coeficiente de absorción de la superficie del suelo

Para los coeficientes de dispersión, y siguiendo las recomendaciones de CATT se escogió: *[Fig. 3.7.*]

Frec. (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Scatt suelo 1-7	30	40	50	60	70	80

Fig. 3.7. Coeficiente de dispersión de la superficie del suelo

3.2.2.3. Apertura de la cueva

La gran apertura de la cueva es un elemento que no está contemplado por este software. Si se deja abierta, sin ningún plano como cerramiento el programa es incapaz de mostrar resultados debido a la perdida de rayos. Por ello se incluyeron planos totalmente absorbentes sobre toda la boca. Si la absorción es total (α=1), CATT también señala un error y no puede concluir resultado alguno. Se eligió por tanto un coeficiente de absorción de 0.999 para todas las frecuencias. Este error es despreciable puesto que la incertidumbre en los coeficientes de absorción y su área es mucho mayor en los materiales del techo y paredes. *[Fig. 3.8.]*

Frec. (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Abs boca	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9

Fig. 3.8. Coeficiente de absorción de la superficie de la apertura

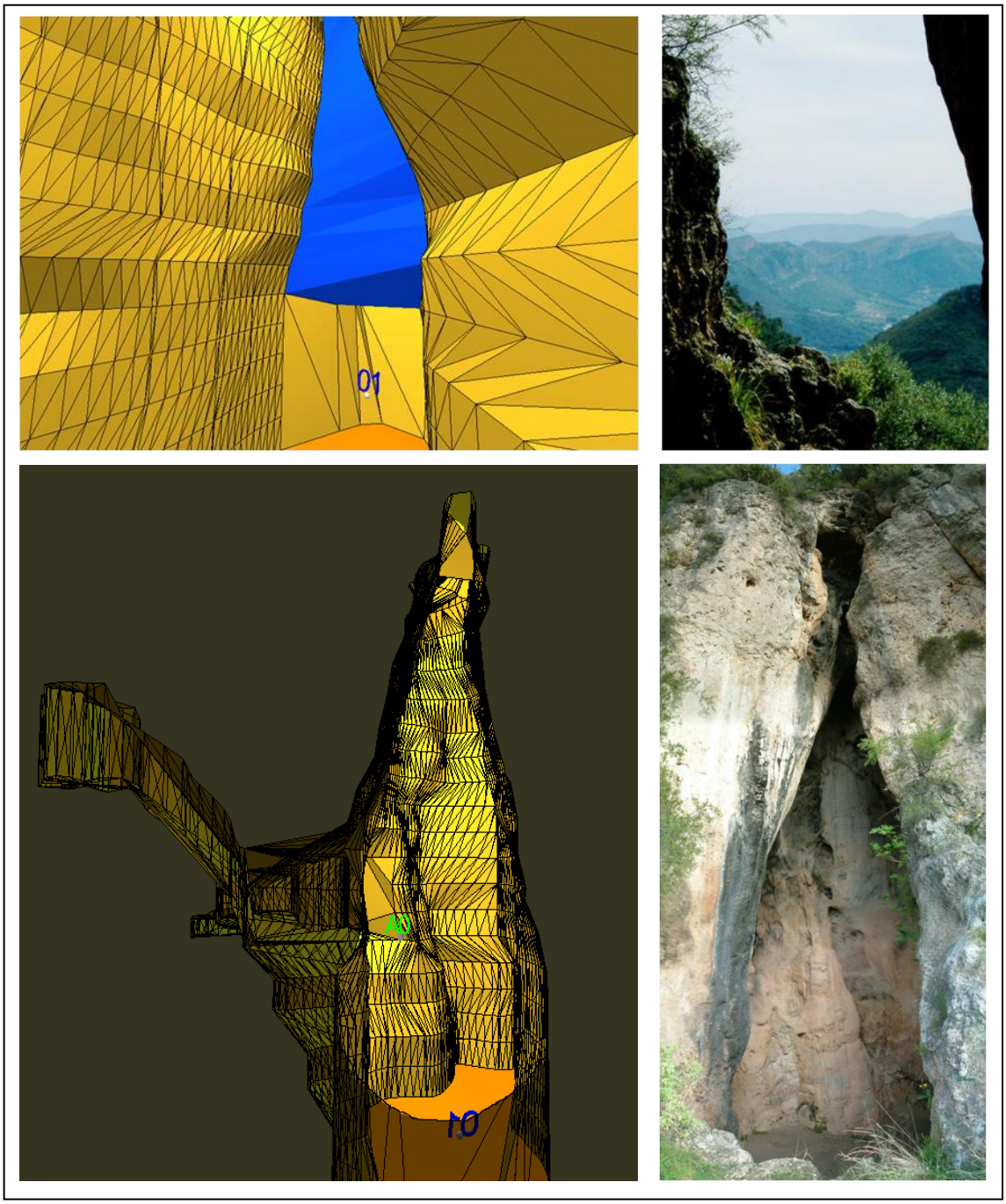


Fig. 3.9. Representación de la apertura en el modelo

3.2.3. Fuentes y receptores

En lo relativo a la posición de la fuente sonora, en un principio se colocó básicamente en dos posiciones: una en la plataforma elevada sobre la superficie de la cueva (S1), y la segunda en la entrada a las galerías (S2). De los resultados de estás simulaciones preliminares se dedujo que los parámetros acústicos no variaban demasiado y para las simulaciones detalladas se eligió la plataforma (S1) como lugar lógico de situación del orador o fuente sonora.

Debido a la gran altura (5 m) y el difícil acceso, en las medidas *in situ* no se pudo emplazar la fuente en este estrado, se eligió un punto alejado de los receptores (S medida).

En ambos casos se usó una fuente omnidireccional, con un espectro de ruido blanco. En un principio, el nivel de presión sonora es un parámetro irrelevante ya que se trata de un sistema lineal. Pero para las medidas de STI/RASTI el ruido de fondo influye y aún siendo mínimo en la cueva se optó por imponer a la fuente un SPL de aproximadamente 90dB.

El fichero que contiene los datos de las fuentes sonoras para CATT se denomina *src.loc [File 2] [Fig. 3.10.* y *Fig. 3.11.]*

	x (m)	y (m)	z (m)
S1	-7.03	10.97	5.22
S2	-10.27	9.99	5.78

Fig. 3.10. Coordenadas de las fuentes sonoras contenidas en src.loc

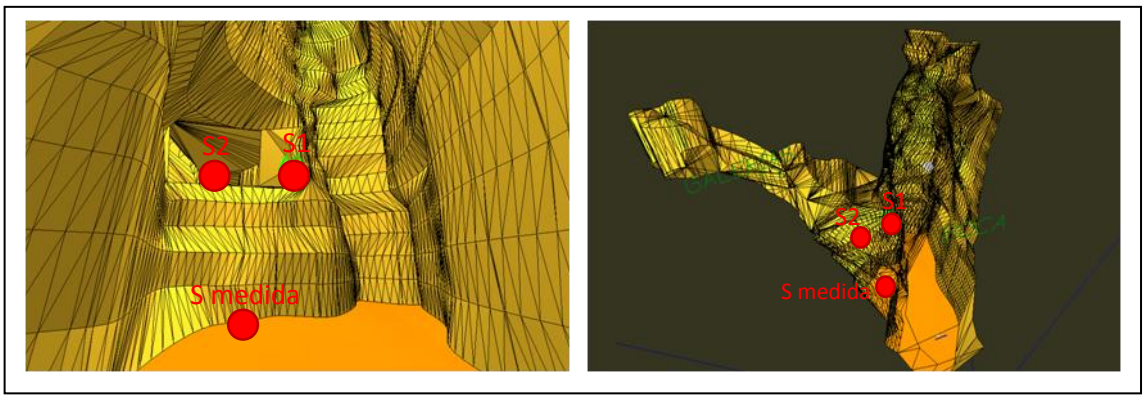


Fig. 3.11. Representación de las fuentes sonoras en el modelo

Para los receptores se eligieron tres puntos distribuidos por la superficie de la cueva, y estos se respetaron en las medidas *in situ*. Se trata de receptores omnidireccionales a la altura de la cabeza humana. (El motivo de la diferencia de las alturas es la inclinación del piso).

El fichero que contiene los datos de los receptores para CATT se denomina *rec.loc [File 3] [Fig. 3.12 y Fig. 3.13]*

	x (m)	y (m)	z (m)
R1	-2.59	4.8	1.3
R2	-4.87	7.91	1.5
R3	-4.32	11.9	1.8

Fig. 3.12. Coordenadas de los receptores contenidas en rec.loc

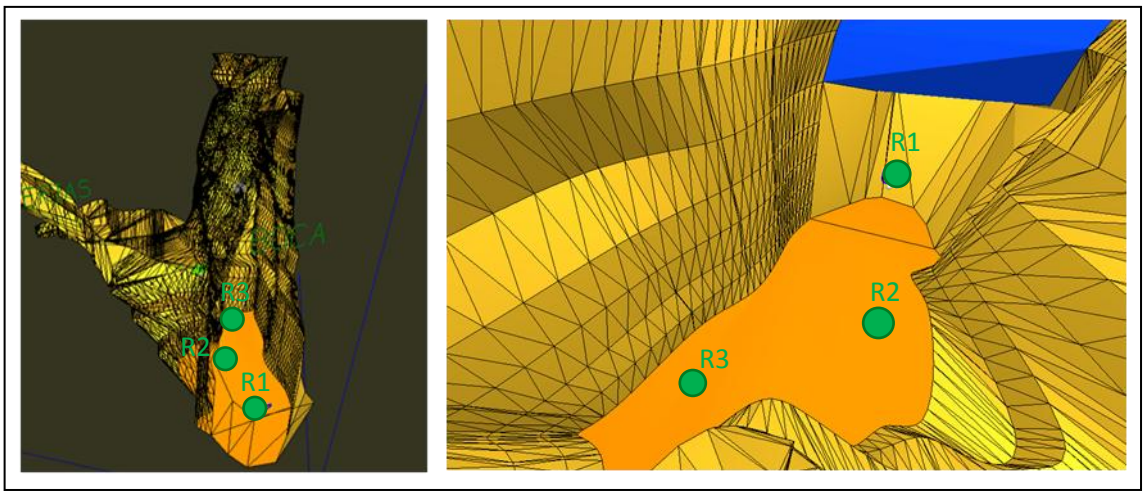


Fig. 3.13. Representación de los receptores en el modelo

Aparte, se realizaron simulaciones *Audience Area Mapping* en las que los planos de audiencia se eligieron por toda la superficie de la cueva.

3.2.4. Ruido de fondo

Para la evaluación del RASTI CATT-Acoustics emplea dos métodos: En uno evalúa la pérdida de modulación solo a partir de la respuesta del recinto y en el otro además con ruido de fondo. El ruido de la cueva, debido a factores ambientales se ha simplificado igual para todos los modelos con el espectro de ruido siguiente *[Fig. 3.14*]

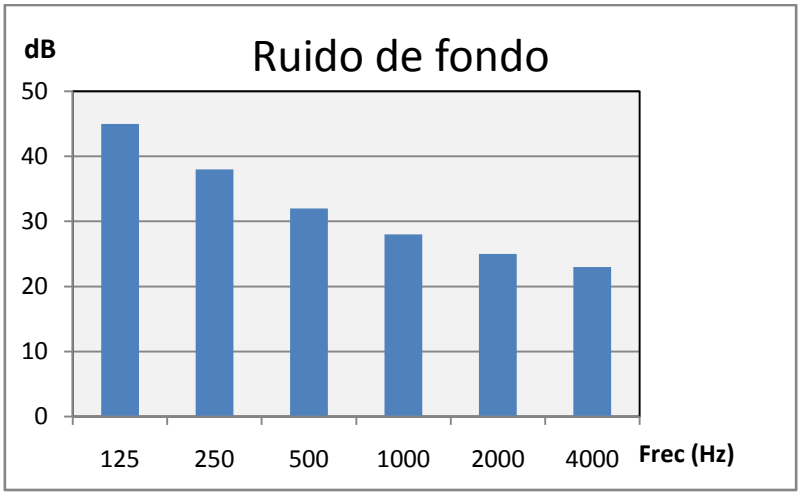


Fig. 3.14. Espectro del ruido de fondo para cálculos de RASTI

3.2.5. Obtención del archivo del modelo para CATT-Acoustics

El archivo que contiene los datos referentes al modelo geométrico (puntos y planos) así como de las propiedades de los materiales para CATT-Acoustics tiene la extensión **.geo*. El modelado del recinto se puede hacer sobre un programa de diseño 3D (autocad o similares) e importarlo después. Debido a que los datos iniciales solo eran las coordenadas de los puntos, se decidió procesar los datos de forma paralela entre MATLAB 6.5 y hojas de calculo Excel. Con el software MATLAB se programó un sencillo algoritmo que recorría todos los puntos de la malla, los numeraba y triangulizaba planos entre ellos, generando el número de plano y sus aristas correspondientes. Más tarde, en una hoja de cálculo Excel se generó el código con los caracteres acordes al lenguaje de programación de CATT.

Las partes más irregulares [*Fig. 3.15*] (techo, boca y enlace de las galerías con el cuerpo) generaron problemas por ser y difíciles de programar de esta manera y se optó por modelar plano por plano según el lenguaje de CATT. *[Fig. 3.16]*

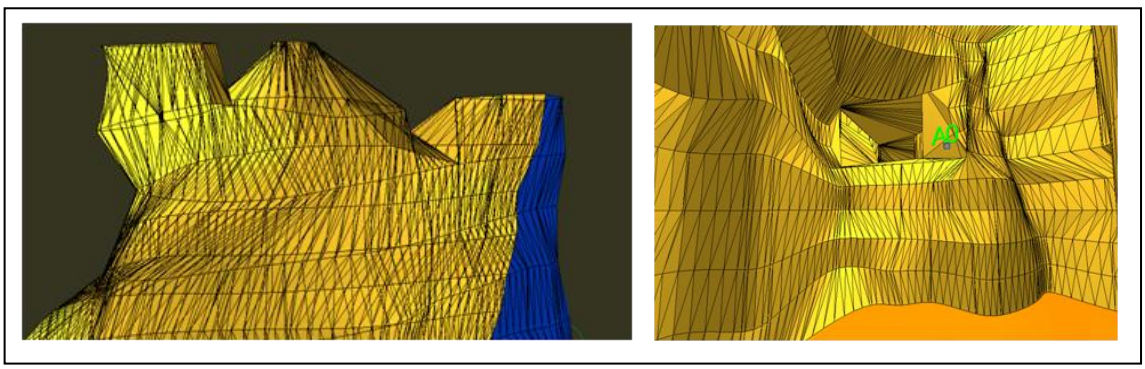


Fig. 3.15. Detalle de las partes más irregulares (techo y enlace con galerías)

```
; modelocompleto_incl3_5.geo


;absorption and scattering coefficients 125Hz to 4kHz [%], RGB-color
ABS audience = <40 50 60 70 80 80> L <30 40 50 60 70 80> { 255 0 0 }
ABS boca = <99,9 99,9 99,9 99,9 99,9 99,9> L <30 40 50 60 70 80> {7
180 180}
ABS suelo = <40 50 60 70 80 80> L <30 40 50 60 70 80> {187 107 0}
ABS stone     = <05 05 05 06 08 10> L <10 10 10 10 10 10> {227 204
72}



; Planos que tapan la galería =  {113 114 133 134 153 154}

CORNERS

1     -0,8000     6,3000      -0,3575
2     -1,1500     7,5000      -0,43162
3     -1,7500     8,5000      -0,50281
4     -2,5500     10,1000     -0,61182
5     -2,6500     12,0000     -0,71532
6     -3,4800     14,8500     -0,89134
7     -3,5000     15,4000     -0,92103
8     -4,2000     15,0000     -0,92125
9     -6,0000     15,0000     -0,97619
10    -5,8000     13,8500     -0,90928
11    -5,6000     11,6000     -0,78422
12    -6,0000     11,0000     -0,76471
13    -7,3000     10,3500     -0,77003
14    -7,5500     9,3000      -0,72215
15    -8,0000     8,5000      -0,69359
16    -6,7000     6,1000      -0,52702
17    -5,8000     5,4000      -0,46254
18    -5,2000     5,0000      -0,42307
19    -6,0000     4,0000      -0,39462
20    -5,0000     3,3000      -0,32709

; continúa…


PLANES

; Cuerpo

[     594   594   /     22    2     1     /     stone ]
[     595   595   /     1     21    22    /     stone ]
[     596   596   /     23    3     2     /     stone ]
[     597   597   /     2     22    23    /     stone ]
[     598   598   /     24    4     3     /     stone ]
[     599   599   /     3     23    24    /     stone ]
[     600   600   /     25    5     4     /     stone ]

; continúa…
```

Fig. 3.16. Extracto del archivo generado en lenguaje CATT- Acoustics.

Inicialmente se modeló la cueva a partir de 460 coordenadas y 890 planos. Sobre este modelo se realizaron las 7 las simulaciones de prueba para determinar el coeficiente de absorción de la piedra. *[File 4]*

Más tarde, y a partir de los puntos interpolados como comentamos en el apartado *3.1.1* se obtuvo un modelo de unas 2192 coordenadas y 6400 planos aproximadamente. Este modelo es mucho más extenso por lo que el fichero .geo está dividido en varios #include o partes de los diferentes elementos (puntos, planos del cuerpo, galerías boca, suelo, correcciones…). En este modelo se introdujeron algoritmos propios de CATT para la creación de los planos. Aún así, la gran cantidad de planos hizo inviables las simulaciones: la versión de CATT de la que se disponía la licencia (8e) no permite la inclusión de más de 5000 planos (incluso lo desaconseja) y con versiones de demostración superiores el tiempo empleado para simular con apenas 1000 rayos es excesivo y **los resultados son similares al modelo simple**. Este modelo es el que se ha empleado en la mayoría de las imágenes de este trabajo. *[File 5]*

La simulación de la cueva en las diferentes épocas geológicas se llevó a cabo con la realización de otros dos modelos con una diferente colmatación del piso. Por simplificación se optó por levantar el piso 2m en un modelo y 4m en otro sobre el estado actual. Aquí la inclinación no se ha considerado por ser desconocida. *[File 6] [File 7]*

3.3. Procesado

Para la optimización del tiempo de procesado de las simulaciones y una correcta organización de los resultados se elaboró un plan de simulaciones. *[Fig. 3.16.*]

Las primeras 14 simulaciones (una para cada posición de fuente (2fuentes) y para cada coeficiente de absorción (7 distintos)), con el modelo de prueba fueron realizadas antes de la medida *in situ*. Para estas simulaciones preliminares se utilizaron unos 1000 rayos ya que solo se pretendía una aproximación de los resultados. El tiempo empleado para cada simulación fue de unos 5 min. Con los posteriores resultados de las medidas *in* situ de la cueva se pudo ajustar los coeficientes de absorción de la piedra para el resto de simulaciones.

El objetivo de las simulaciones de los modelos *Estado actual, Colmatado 2m* y *Colmatado 4m* es extraer todos los datos relevantes al comportamiento acústico del recinto para su posterior análisis. Siguiendo las recomendaciones de CATT, el número de rayos se dejó en modo automático y se seleccionaron todas las octavas desde 125Hz hasta 16kHz. El tiempo de procesado oscilo entre 5 y 8 horas para cada modelo. *[Fig. 3.17.*]

El modelo interpolado se simuló con la versión DEMO para comprobar limitaciones de CATT y sobre todo para visualizaciones 3D. *[Fig. 3.18*]

Para todas las simulaciones se siguieron las recomendaciones de CATT para el tiempo de truncado de rayos, siempre mayor que la mitad del mayor T-30.

Tipo de modelo	Nombre del fichero	Simulaciones	Nº Rayos	Objetivos
Prueba	*modelocompleto.geo*	14x Full detailed	1000	Ajuste de Coef. absorción
Estado actual	*modelocompleto_incl 3_5.geo*	1x Full detailed 1x Audience Area M	33000 310000	EDT, T-15, T-30, curva tonal, C-50, RASTI, SPL
Colmatado 2m	*modelocompleto_incl 3_5_colmatado2m.geo*	1x Full detailed 1x Audience Area M	32000 292000	EDT, T-15, T-30, curva tonal, C-50, RASTI, SPL
Colmatado 4m	*modelocompleto_incl 3_5_colmatado4m.geo*	1x Full detailed 1x Audience Area M	31000 295000	EDT, T-15, T-30, curva tonal, C-50, RASTI, SPL
Interpolado actual	*interpolacion.geo*	1x Full detailed DEMO	1000	Limitaciones y Fotografía 3D

Fig. 3.16. Plan de simulaciones

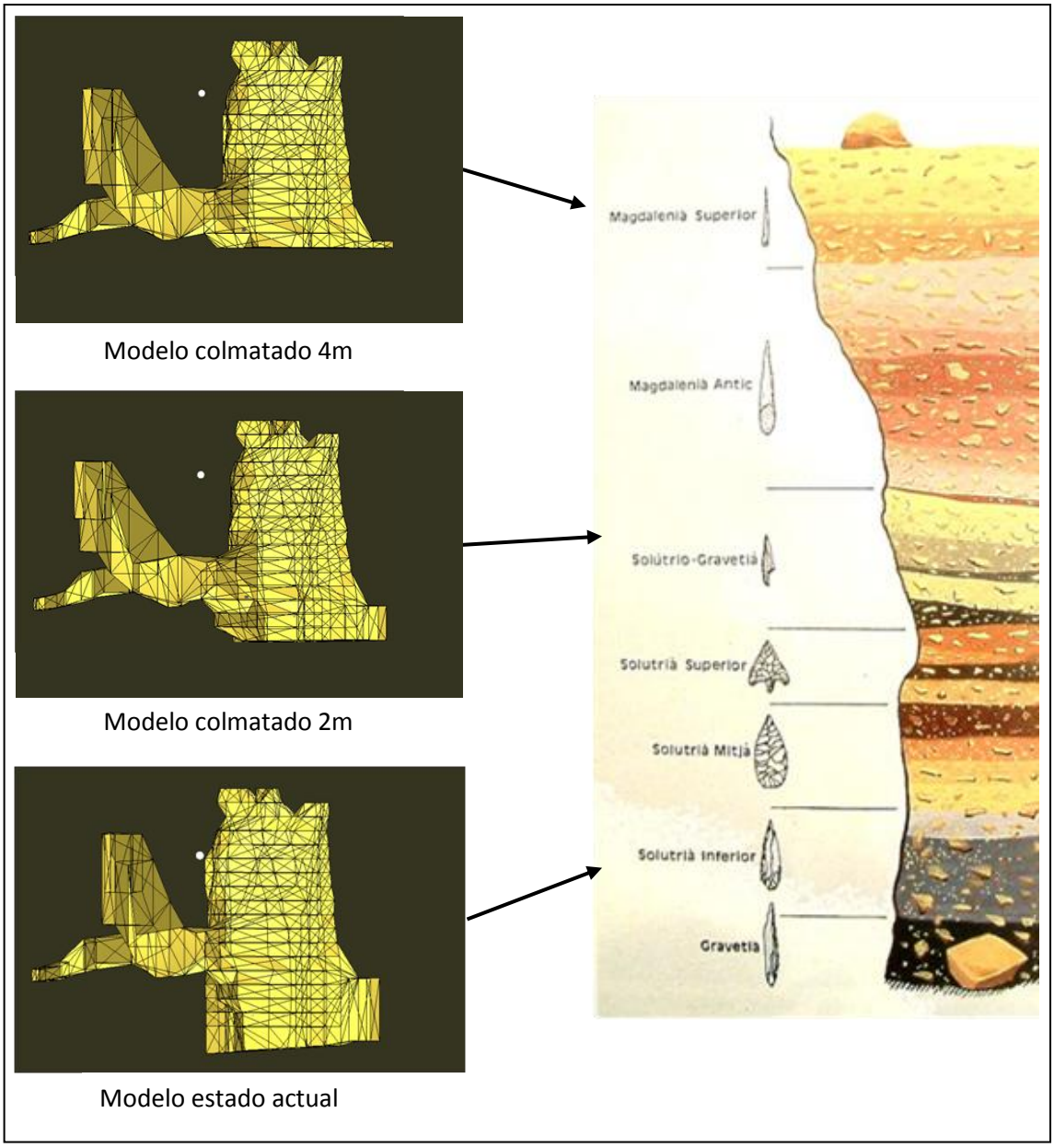


Fig. 3.17. Representación de los modelos y su aproximación a edades arqueológicas

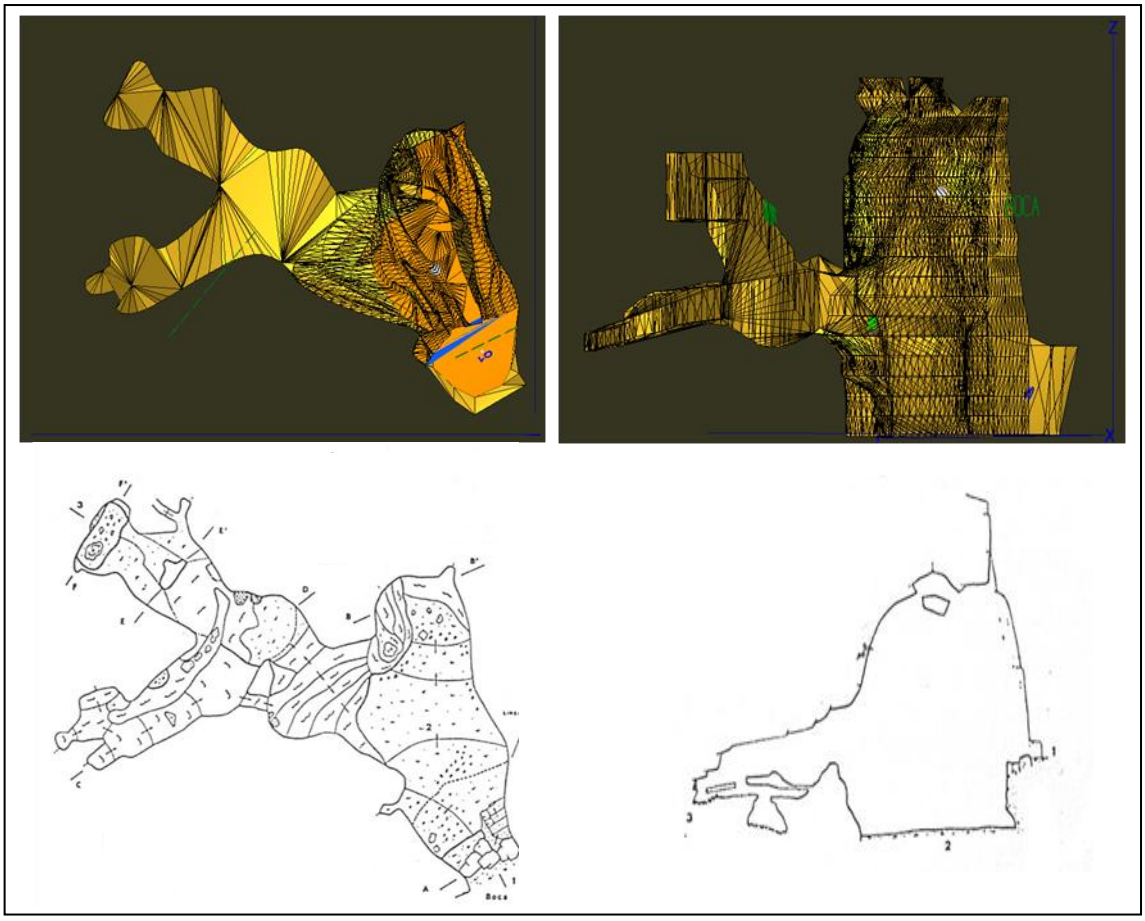


Fig. 3.18. Representación del modelo interpolado y su comparación con los planos arqueológicos

3.4. Resultados de las simulaciones

La gran cantidad de simulaciones y el elevado número de parámetros a contemplar requiere una gran organización en su presentación para que el posterior análisis de los resultados sea más sencillo y eficaz. Debido a ello, nos centraremos aquí en mostrar solo los resultados comparativos que requerirán un posterior comentario. Los demás se pueden encontrar en el anexo 1 y en las carpetas adjuntas en el CD. *[File 8]*

3.3.1. Simulaciones previas

El objetivo de estas simulaciones era establecer un coeficiente de absorción de la piedra de Parpalló a partir del análisis de los tiempos de reverberación. De los datos obtenidos se observa como **los valores de EDT, T-15 y T-30 no varían en función de la posición del oyente**, como se muestra en todas las gráficas del anexo 1. Ajustando los tiempos de reverberación con los medidos en el apartado 4 se deduce que **el coeficiente de absorción estará en torno a 0.05.** *[Fig. 3.19 y Fig. 3.20]*

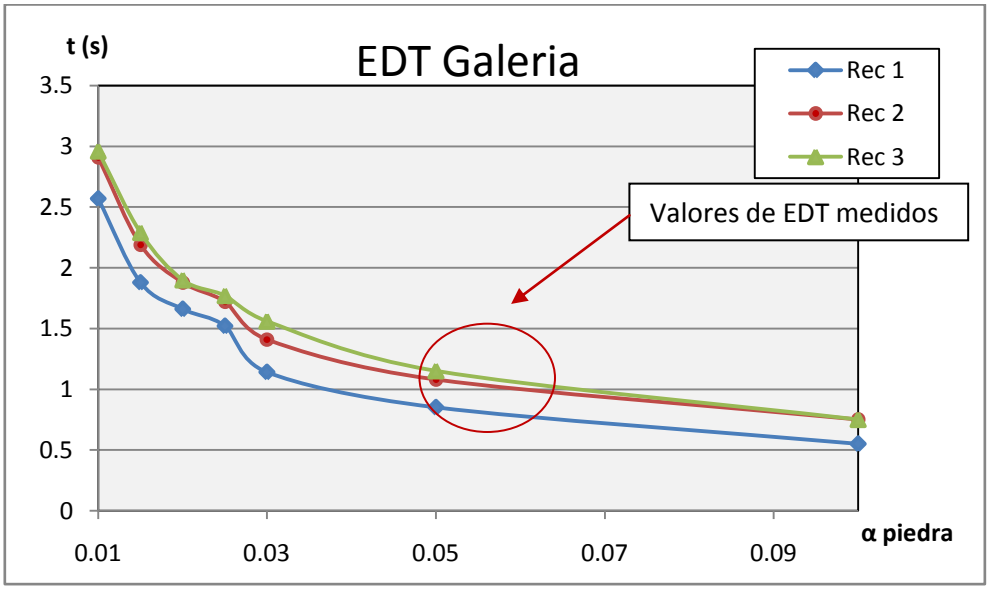


Fig. 3.19. EDT en función del coeficiente de absorción de la piedra y valores medidos en la cueva de Parpalló.

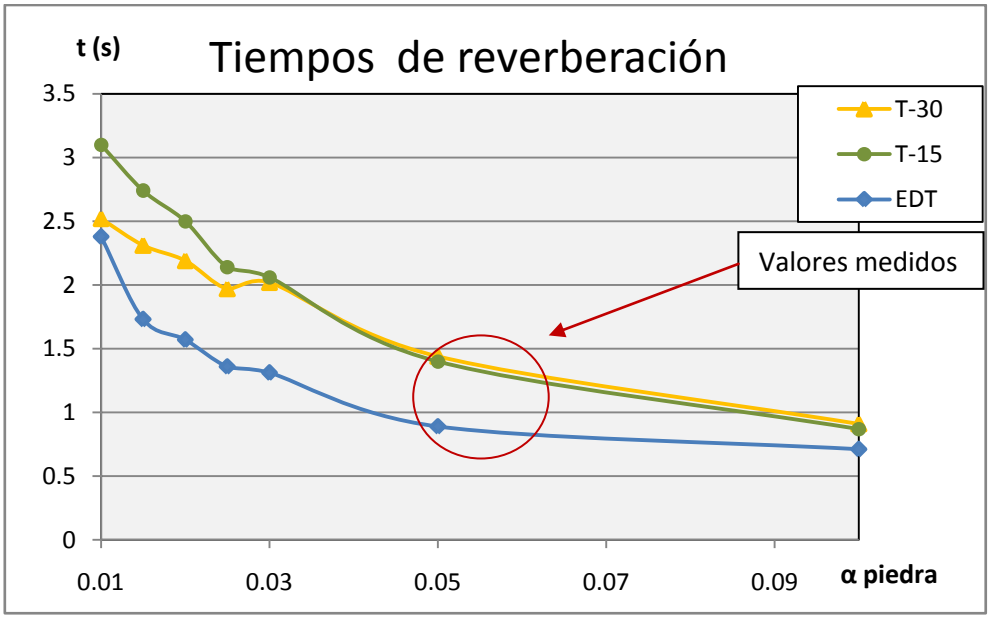


Fig. 3.20. Tiempos de reverberación en función del coeficiente de absorción de la piedra y valores medidos en la cueva de Parpalló.

3.3.2. Características de los modelos

A la vista de los datos ofrecidos por CATT se pueden comprobar las suposiciones realizadas en la introducción, en las que se predecía que la colmatación del piso de la cueva disminuiría considerablemente el volumen y la superficie de la cueva, pero sin variar la superficie de absorción. El resultado es **un incremento en el coeficiente de absorción medio** como se puede observar en las graficas siguientes. *[Fig. 3.20. y Fig. 3.21]*

Modelo	V[m³]	S[m2]	Recorrido libre medio [m]
Estado actual	992	917	4.33
Colmatado 2m	866	845	4.1
Colmatado 4m	729	770	3.79

Fig. 3.20. Tabla de características de los modelos simulados

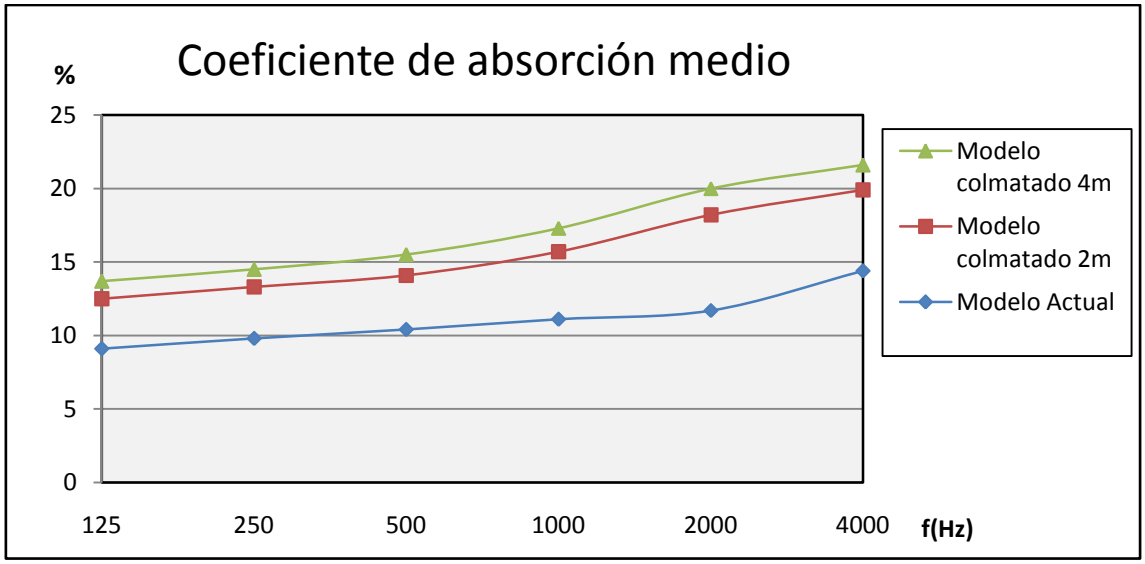


Fig. 3.21. Coeficiente de absorción medio de los modelos simulados

3.3.3. Tiempos de reverberación

Los valores obtenidos de tiempos de reverberación prácticamente **no varían en absoluto al variar la posición del receptor**. *[Fig. 3.22]* Este aspecto se puede observar en todos los modelos simulados, como se puede observar en las siguientes gráficas más ampliamente detallado en las correspondientes al anexo 1. Las diferencias entre los valores de los tiempos de reverberación no son en ningún caso mayores que ±0.3s, lo que demuestra que **el campo sonoro sobre la superficie es relativamente uniforme**.

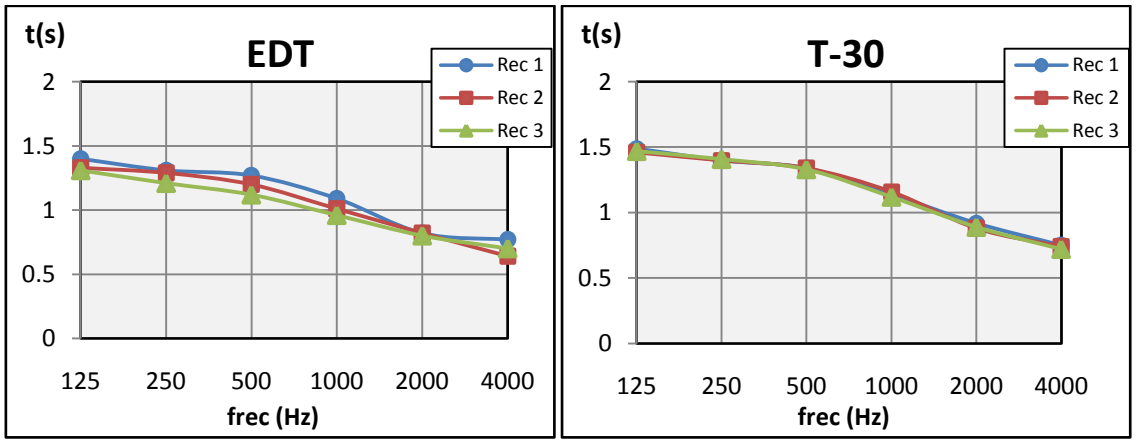


Fig. 3.22. Tiempos de reverberación para el modelo "estado actual" y los 3 receptores

Si existen en cambio grandes diferencias entre los resultados obtenidos entre los distintos modelos. Así, y debido a su gran similitud, los valores de los tiempos de reverberación se han promediado entre los tres receptores para el análisis comparativo de los tres modelos, representando cada uno en una sola gráfica. [*Fig. 3.23, Fig. 3.24 y Fig. 3.25]*

En primer lugar se puede apreciar como **la forma de la curva tonal es adecuada para un recinto dedicado a la transmisión sonora**, aumentando ligeramente la reverberación para frecuencias mas graves y manteniendo un adecuado equilibrio entre el EDT, T-15, T-30; formando una curva de caída de manera que la densidad de energía disminuya más rápidamente en la primera parte de la curva y más lentamente en la parte posterior.

Los valores de los tiempos de reverberación también son los adecuados para este tipo de recintos; el EDT oscila entre 1.1 y 0.7s, existiendo una diferencia de aproximadamente 0.2s entre el EDT y el T-30 simulado.

Estas características se pueden extrapolar a los resultados obtenidos en los diferentes modelos con la diferencia de que **los valores del modelo colmatado en 2m sobre el estado actual disminuyen 0.2s y los del modelo colmatado 4m lo hacen en 0.4s**. Como caso especial cabe resaltar que la predicción para este último modelo **se corresponde con los valores de reverberación ideales** recomendados por la bibliografía para un recinto dedicado a la transmisión de la palabra.

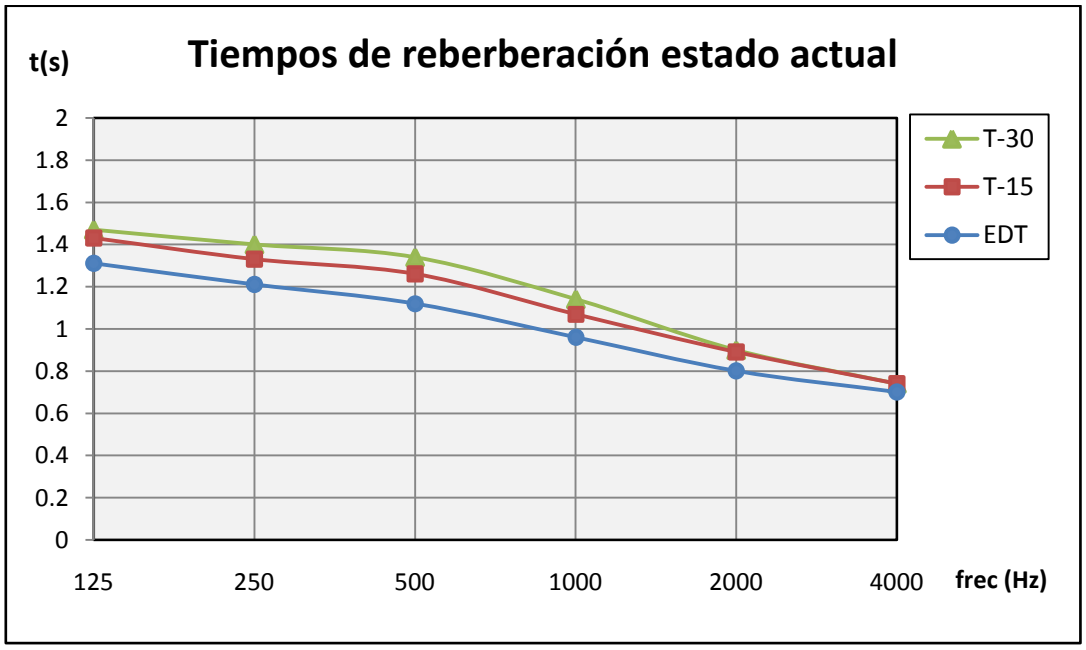


Fig. 3.23. Tiempos de reverberación para el modelo "estado actual".

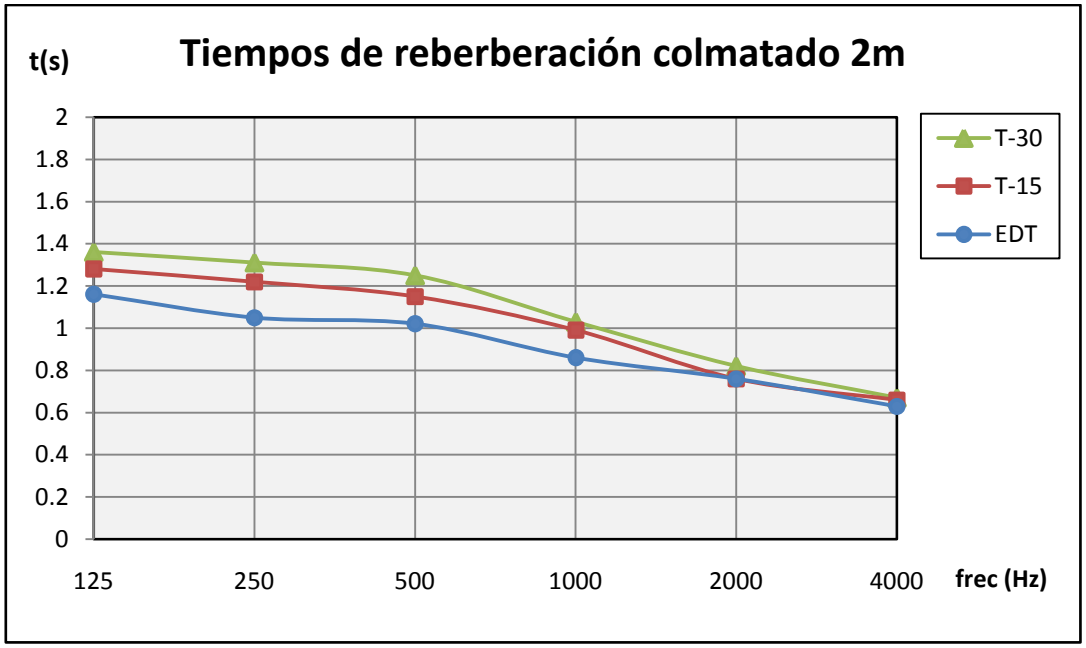


Fig. 3.24. Tiempos de reverberación para el modelo "colmatado 2m".

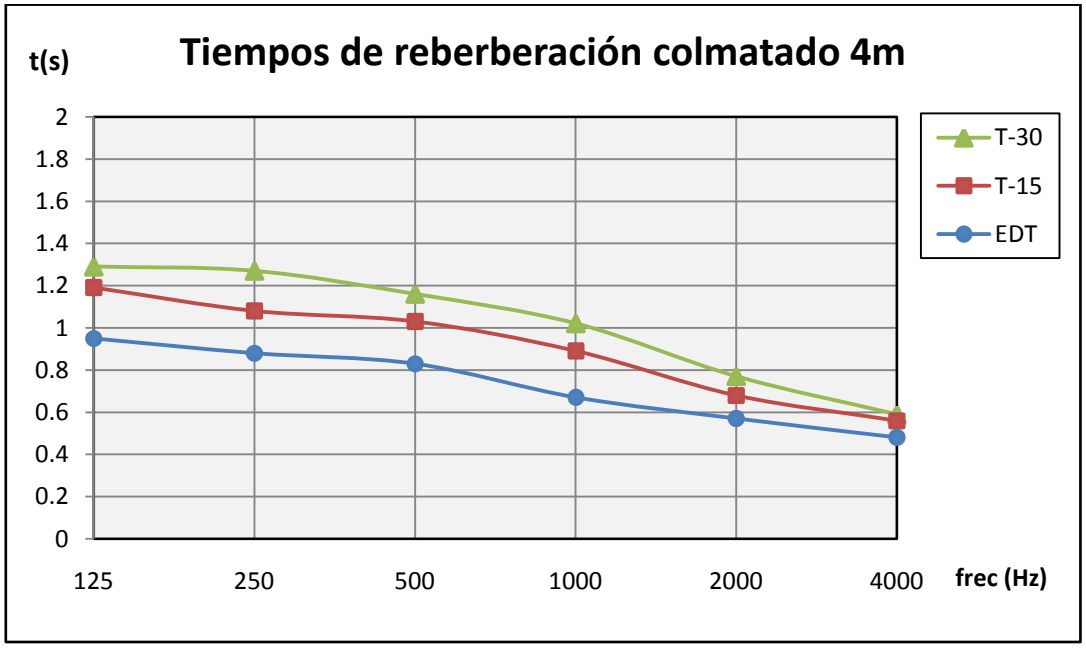


Fig. 3.25. Tiempos de reverberación para el modelo "colmatado 4m".

3.3.4. Uniformidad del campo sonoro

Para analizar la uniformidad del campo acústico sobre la superficie del piso de la cueva se han utilizado representaciones en planta de los parámetros de EDT, y distribución del SPL. A partir de estos resultados se puede observar como **el EDT apenas varía 0.4s para todos los modelos**; entre 0.8 y 1.1s

para el primero, entre 0.6 y 1.0s para el segundo y entre 0.5 y 09s para el último.

No debemos olvidar que para posiciones muy cercanas los valores de EDT generados con este tipo de simulación en CATT no se corresponden a los reales, por tanto, en las zonas donde aparecen valores mínimos de EDT (de hasta 0.4s) los resultados reales sean sean muy superiores.

Solo difiere de esta uniformidad el rincón interior de la cueva, el cual no goza de visión directa con la plataforma y en el que además, según los diarios de excavación de Luis Pericot se situaban las hogueras de los ocupantes. *[Fig. 3.26*]

En cuanto a la distribución del nivel de presión sonora no existen diferencias mayores de 5 o 6dB a lo largo de toda la superficie del piso. **Estas diferencias no son muy elevadas**, pero debemos tener en cuenta el efecto de los modos propios resonantes que se producirían en la realidad y que no son contemplados por CATT. Se puede señalar también como los modelos más sedimentados refuerzan más el sonido en la zona de audiencia, como se puede comprobar en la grafica de distribución de SPL *[Fig. 3.27]* y gozan de una mayor ganancia acústica como se muestra en las graficas del anexo 1. No se han incluido aquí estas por ser equivalentes a las de SPL.

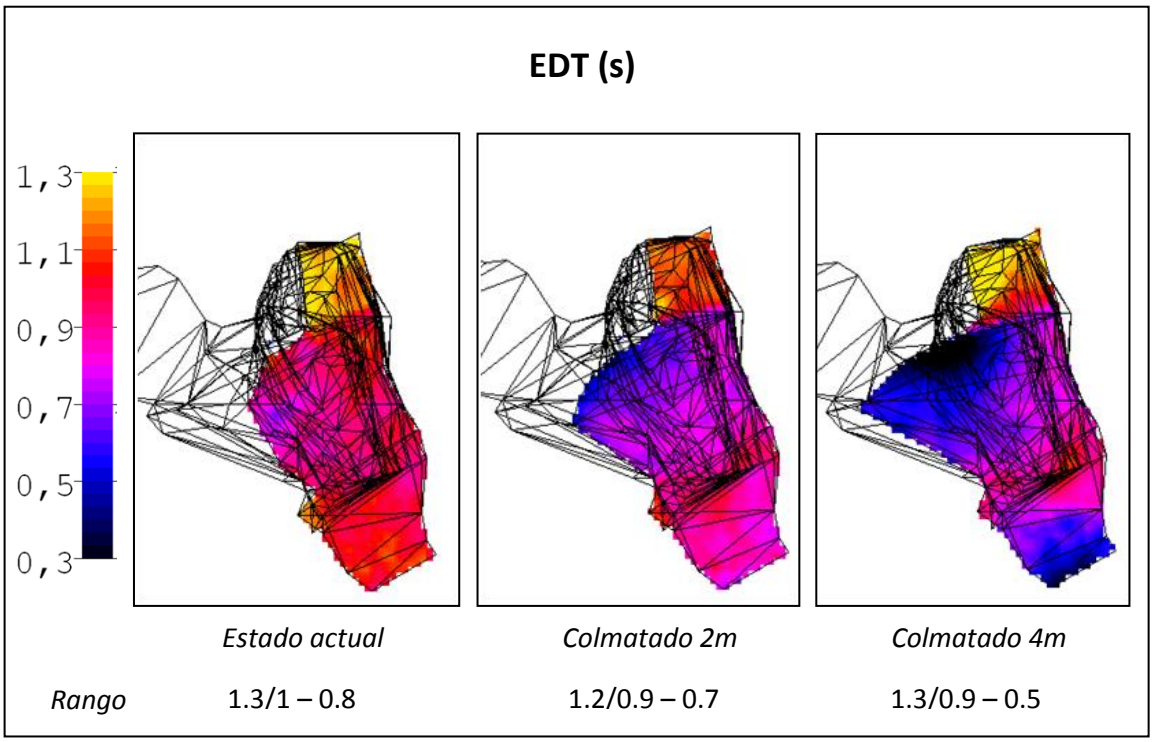


Fig. 3.26. Distribución del EDT por el piso de Parpalló para los 3 modelos

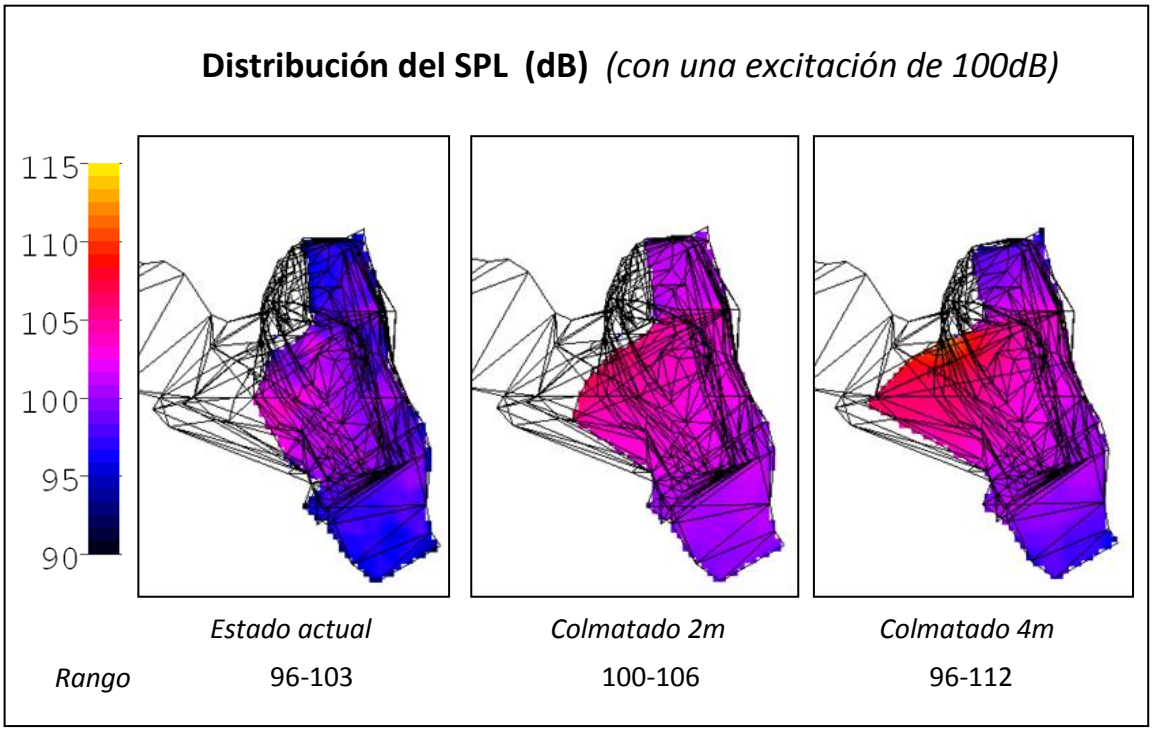


Fig. 3.27. Distribución del SPL por el piso de Parpalló para los 3 modelos

3.3.5. Parámetros de inteligibilidad

3.3.5.1. Claridad C-50

Para el análisis comparativo de los parámetros de inteligibilidad se han realizado varias graficas comparando los resultados de los diferentes modelos. Al contrario de lo que ocurría con la distribución de nivel de presión sonora y en la distribución de los tiempos de reverberación; los parámetros de inteligibilidad no se comportan de manera tan uniforme, sobre todo en los modelos colmatados.

En la primera se analiza la claridad C-50 sobre los receptores puntuales [*Fig. 3.28]*. Se puede observar como aún siendo aceptables los resultados para todos los modelos, los valores mas altos se producen cuando la cueva tiene el piso totalmente lleno de sedimentos. También se puede apreciar que el punto que goza de una mayor claridad es el del centro de la cueva, el receptor 2.

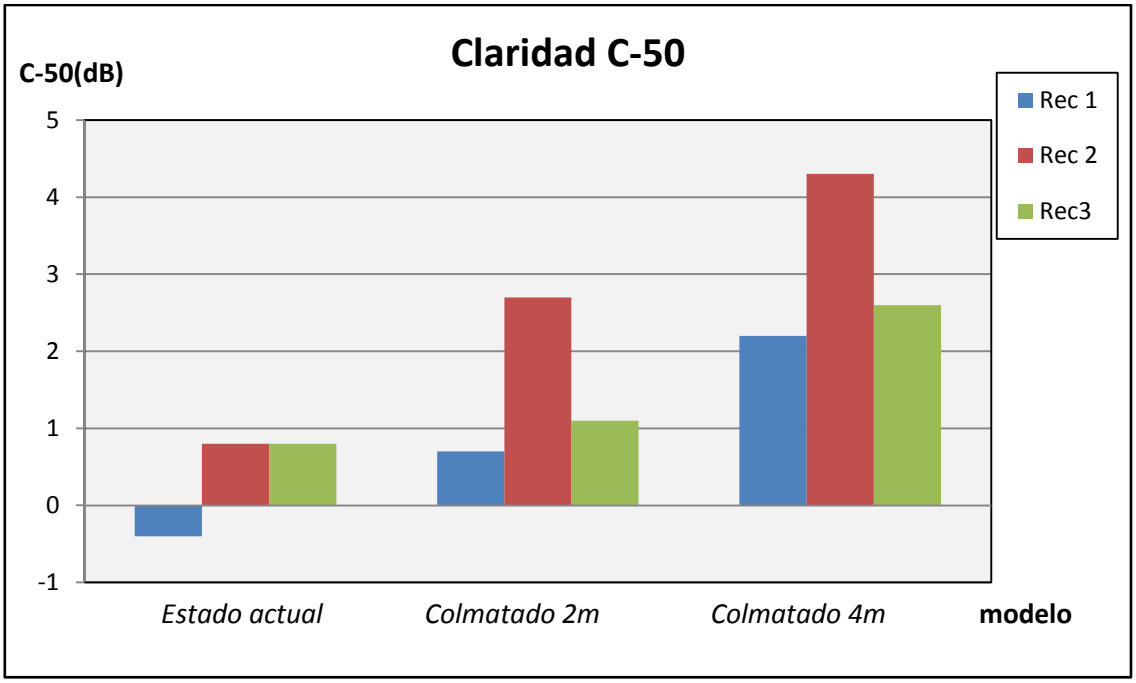


Fig. 3.28. Claridad C-50 sobre receptores puntuales

3.3.5.2. Definición D-50

Para estudiar la inteligibilidad sobre la superficie de la audiencia se escogió la definición D-50 como magnitud representada. En la grafica correspondiente *[Fig. 3.29]* se muestra como los resultados oscilan entre 50 y 80% para la zona de la audiencia. Según la valoración realizada por varios autores, estos resultados se pueden calificar de aceptables/buenos. Los mayores valores se obtienen como ya se intuyó anteriormente para el modelo colmatado en su totalidad.

Al igual que ocurría en la representación del EDT por toda la planta, existe una zona donde la inteligibilidad es mínima y coincide con una posición probablemente no usada como espacio de audiencia.

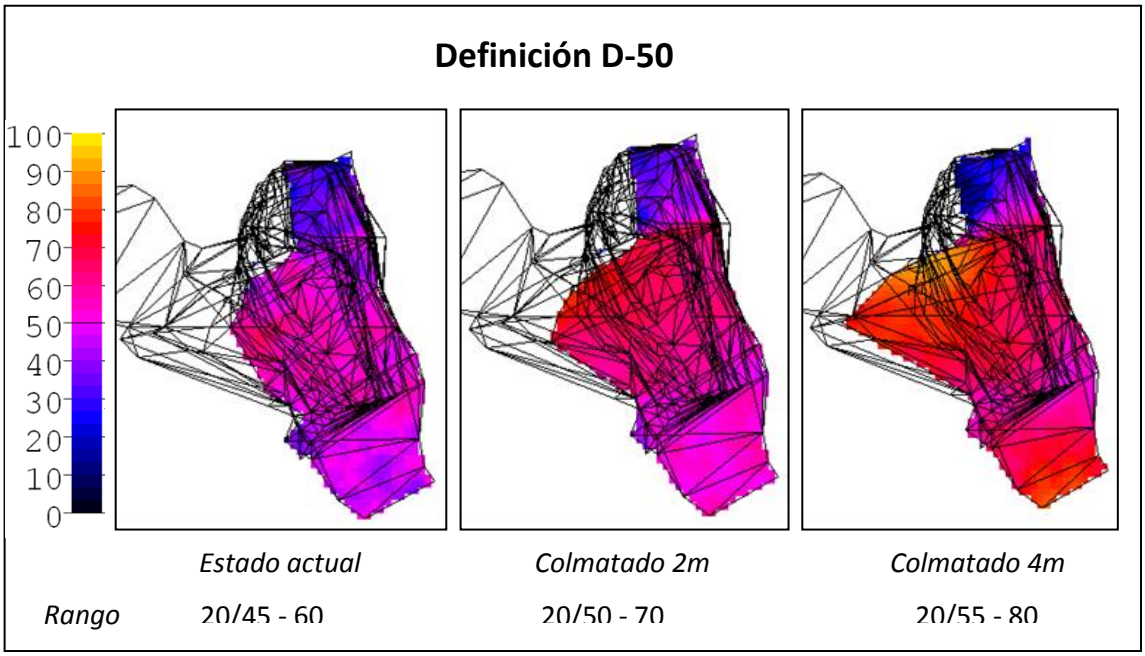


Fig. 3.29. Definición D-50 sobre la superficie del piso para los 3 modelos

3.3.5.3. RASTI

Como último parámetro a estudiar se escogió el RASTI, el cual aporta un índice bastante aproximado a la inteligibilidad del mensaje hablado. De la comparación de los resultados de el RASTI evaluado con ruido de fondo y sin él no se encuentran diferencias, toda la perdida de modulación es por tanto debida a la reverberación del recinto. *[Fig. 3.30]*

Los valores obtenidos para el primer modelo varían entre 53 y 65, con lo que se puede calificar aproximadamente de aceptable/bueno.

Para el segundo modelo, los valores oscilan entre 56 y 73 mejorando la calificación con respecto al modelo anterior.

Para el último modelo, los resultados son superiores a 80 en algunos puntos, pudiéndose calificar de excelente la inteligibilidad sobre estos. Pero a cambio, la distribución del RASTI con la cueva llena de sedimentos muestra una mayor dispersión de los valores, con mucha menos uniformidad que los modelos anteriores.

Cabe resaltar como todos los parámetros de inteligibilidad además de aumentar con la cercanía a la fuente como es lógico, también aumentan al aproximar el receptor a la apertura de la boca, aún estando esta más lejana del orador. Este efecto está probablemente producido por que al aproximarnos a

esa superficie totalmente absorbente, las reflexiones llegan de una manera más simultánea aumentando la inteligibilidad del mensaje.

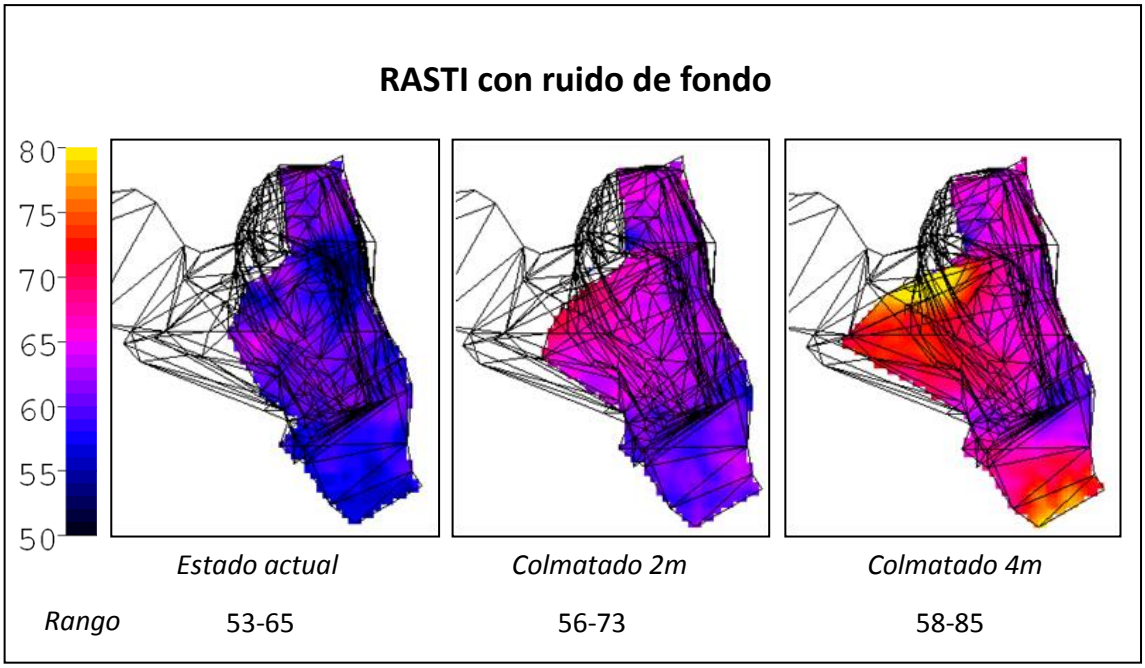


Fig. 3.30. RASTI sobre la superficie del piso para los 3 modelos

4. DESARROLLO DE LA MEDIDA *IN SITU*

4.1. Justificación y objetivo

Para un mayor contraste de los resultados de las simulaciones y para el ajuste de algunos parámetros de estas (α de la piedra…) se procedió a la medida real de la respuesta de la cueva. Estas medidas tienen sus limitaciones y no deben ser tratadas como absolutas, ya que son múltiples los factores que pueden llegar a falsearlas.

El método usado, descrito en la introducción teórica, fue mediante señales MLS. Así, se obtuvo la respuesta de la sala en diferentes puntos coincidentes con los receptores de la simulación. Para la captura de las señales no se tuvo en cuenta el nivel relativo entre unas y otras, siendo así imposibles las comparaciones de nivel sonoro. El motivo principal de este desajuste de ganancias fue el alto ruido de fondo del sistema de medida, en particular la tarjeta de sonido del PC.

4.2. Desarrollo

Debido a que en la ladera del Mondúver donde se encuentra la cueva no existe ninguna toma de alimentación eléctrica, fueron varias las posibilidades que se barajaron para la realización de las medidas.

En un primer momento se pensó en medir con algún tipo de señal impulsiva (disparo, detonación), pero se descartó esta posibilidad debido a que el espectro de estas señales no excita por igual todas las frecuencias. Además, cada detonación posee unas características propias únicas que hacen inviable una posterior compensación de la respuesta.

El segundo método planteado fue usar la propia tarjeta de sonido del ordenador portátil como amplificador para un altavoz comercial, y conectar un micrófono dinámico directamente a la entrada de dicha tarjeta. Ya que el sistema es lineal, el nivel con el que excitemos la cueva es independiente para obtener su respuesta. El problema de este método fue principalmente que la poca ganancia de la tarjeta, junto con las perdidas que producirían los largos cables y la baja sensibilidad del micrófono no conseguían un nivel de señal con un rango dinámico aceptable por encima del nivel de ruido de fondo.

Así, por último lugar se decidió llevar un equipo de medida completo a la cueva. *[Fig. 4.1 y Fig. 4.2*]. La alimentación eléctrica del sistema se consiguió con un grupo electrógeno de alquiler, situado suficientemente lejos del recinto para que el ruido producido por el motor no interfiriera en las medidas. El equipo usado y su configuración aparecen reflejados en el siguiente grafico:

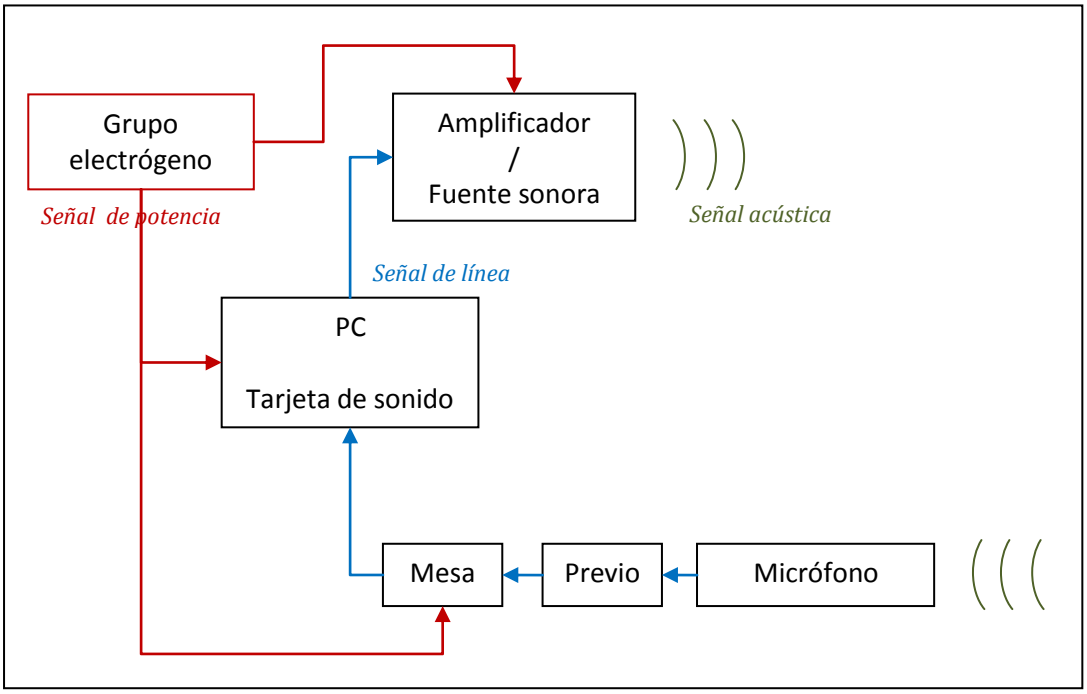


Fig. 4.1. Configuración del equipo de medida

Equipo	Modelo
Amplificador / Fuente sonora	Brüel & Kjær 100watt
Mesa de mezclas	Behringer EURORACK MX602A
Microfono y previo microfónico	Beringer ecm8000

Fig. 4.2. Especificaciones del equipo de medida

Para la posición de los puntos de medida se escogieron 3 puntos para los receptores y 2 posiciones de fuente. Debido al tamaño de la fuente y al difícil acceso hasta la posición de la plataforma, las posiciones de la fuente se distribuyeron por el piso de la cueva. Este factor es fundamental para la posterior comparación entre los resultados de las simulaciones y de estas medidas. *[Fig. 4.3]*.

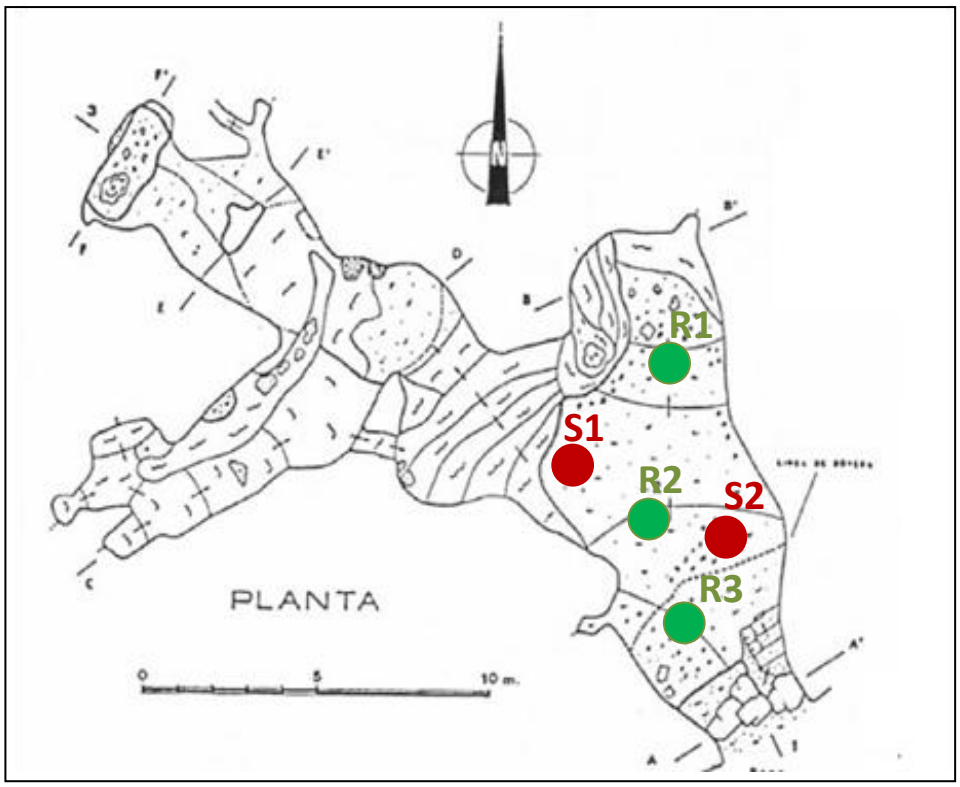


Fig. 4.3. Puntos de medida y excitación

En cuanto al número de medidas realizadas se decidió realizarlas por duplicado ante la posibilidad de que un posible error echara a perder los resultados. Además, por comparación se podría determinar el límite práctico del equipo, sobre todo a bajas frecuencias. *[Fig. 4.5*]

El software empleado tanto para la generación de las señales MLS como para su deconvolución fue Aurora v3.2, un plugin ejecutable desde la plataforma Cool Edit 2.0. La reproducción y grabación simultánea de las señales se realizó también sobre este software multipistas.

Para la elección del tipo de señal MLS hay que tener en cuenta que cuantos más periodos contenga la secuencia mayor será la ponderación que realizará, eliminando el ruido de fondo así como posibles ruidos impulsivos procedentes del ambiente. Por otro lado, las medidas de RASTI sí cuentan con el ruido de fondo y si este es eliminado por completo, el RASTI obtenido será superior al real. Así, teniendo todo esto en cuenta, se eligió una señal MLS tipo 16A con 10 repeticiones, adecuada para eliminar el ruido de fondo del equipo y dejarlo a niveles similares al ruido ambiente. *[File 9]*

Medida Nº	Receptor	Fuente	Archivo MLS	Archivo Deconvolucionado
1a	1	1	MLS_1a.wav	Resp_1a.wav
1b	1	1	MLS_1b.wav	Resp_1b.wav
2a	2	1	MLS_2a.wav	Resp_2a.wav
2b	2	1	MLS_2b.wav	Resp_2b.wav
3a	3	1	MLS_3a.wav	Resp_3a.wav
3b	3	1	MLS_3b.wav	Resp_3b.wav
4a	1	2	MLS_4a.wav	Resp_4a.wav
4b	1	2	MLS_4b.wav	Resp_4b.wav
5a	2	2	MLS_5a.wav	Resp_5a.wav
5b	2	2	MLS_5b.wav	Resp_5b.wav
6a	3	2	MLS_6a.wav	Resp_6a.wav
6b	3	2	MLS_6b.wav	Resp_6b.wav

Fig. 4.5. Tabla de medidas y archivos generados



Fig. 4.6. Medida en Parpalló

4.3. Post procesado

Después de deconvolucionar las secuencias MLS con el plugin Aurora se obtuvo una respuesta al impulso *h(t)* de cada medida. Estas respuestas contienen toda la información del comportamiento de la cueva, y a partir de su análisis se pueden obtener fácilmente todos los parámetros de acústica de salas. El plugin Aurora tiene un módulo que permite este análisis, con el que se obtuvieron la mayoría de los parámetros.

Para la obtención de la MTF y posteriormente el STI / RASTI se utilizó otro software de mediciones acústicas, llamado ARTA software versión 1.0.1. Este programa permite la obtención del RASTI excitando el recinto con los niveles de ruido especificados en la norma IEC-60268-16. Para conseguir resultados correctos a partir de la excitación con señales MLS se deben ecualizar las respuestas conforme a la norma, advirtiendo que como en este caso ecualizamos posteriormente a la grabación, también estamos ponderando el ruido de fondo capturado y ello conllevará un pequeño error. Para la determinación de este error se realizaron comparaciones entre el RASTI obtenido con ponderación y sin ella, observando que los resultados apenas variaban ±0.1; prácticamente insignificante al tratarse de medias de RASTI.

4.4. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas:

4.4.1. Respuesta en frecuencia

Para la determinación del límite práctico del sistema a baja frecuencia se compararon las dos medidas de respuesta en frecuencia de la cueva para cada punto *[Fig. 4. 7.]*. Teóricamente deberían de ser idénticas ya que no cambia la posición de la fuente y el receptor, pero en el análisis se observa como la **respuesta por debajo de los 80Hz no guarda ninguna correlación**. En la gráfica siguiente se muestra la respuesta para las medidas 1a y 1b. Las comparaciones de las distintas parejas de medidas muestran resultados similares.

Por otro lado, y debido a las grandes dimensiones de la cueva, los modos resonantes observados en estas curvas no se corresponden a los fundamentales por estar estos localizados a frecuencias mucho más bajas. Estas respuestas no resultan útiles para el análisis a baja frecuencia.

Otra característica importante que se observa en todas las curvas es la fuerte **amplificación de la banda vocal**, aspecto que se puede observar también al realizar una sencilla convolución de esta respuesta y una grabación de voz.

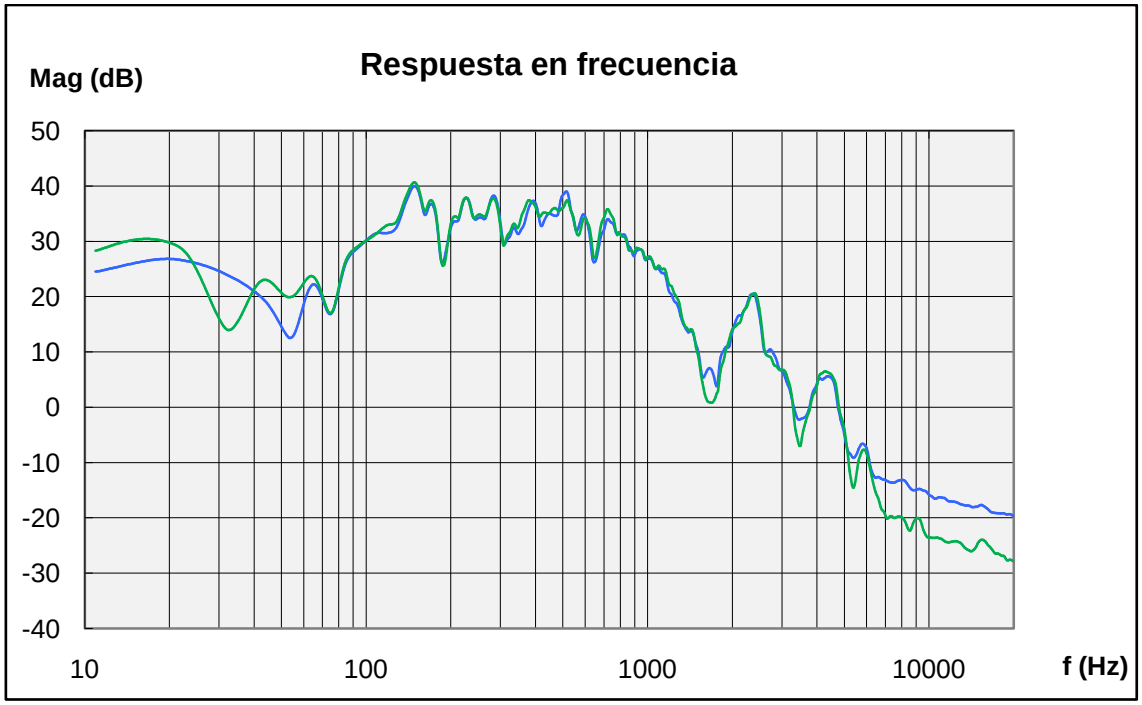


Fig. 4.7. Respuesta en frecuencia de la cueva para dos medidas en el mismo punto

4.4.2. Tiempos de reverberación

De la representación de la curva tonal para las diferentes posiciones *[Fig. 4.8 y Fig. 4.9]* se puede observar que **el tiempo de reverberación estimado oscila entre 1.4 y 1s**. Estos tiempos están extrapolados por el software aurora a partir del T-20, ya que solo en algunos casos es capaz de calcular el T-30 debido al ruido de fondo. En los pocos casos que conseguimos calcular valores del T-30, estos son ligeramente superiores al T-20, lo que nos induce a pensar que **los valores reales del T-60 serán algo superiores al los estimados**.

El EDT toma valores **unas décimas inferiores al TR**, oscilando **entre 0.7 y 1s**. Cabe resaltar que solo para un caso (Fuente en posición S1 y receptor R2) extrañamente el EDT es superior al TR, superándolo ligeramente.

Otra característica observada es que el TR a bajas frecuencias (125 y 250 Hz) no es excesivamente largo para un recinto de estas características.

A la vista de estas observaciones entre los diferentes valores del EDT, T-20 y TR se puede intuir como la **curva de reverberación quebrada** favorecerá la inteligibilidad en el interior del recinto manteniendo a la vez sus características de espacialidad y refuerzo sonoro.



Fig. 4.8. Tiempos de reverberación para el receptor 1 y la fuente 1

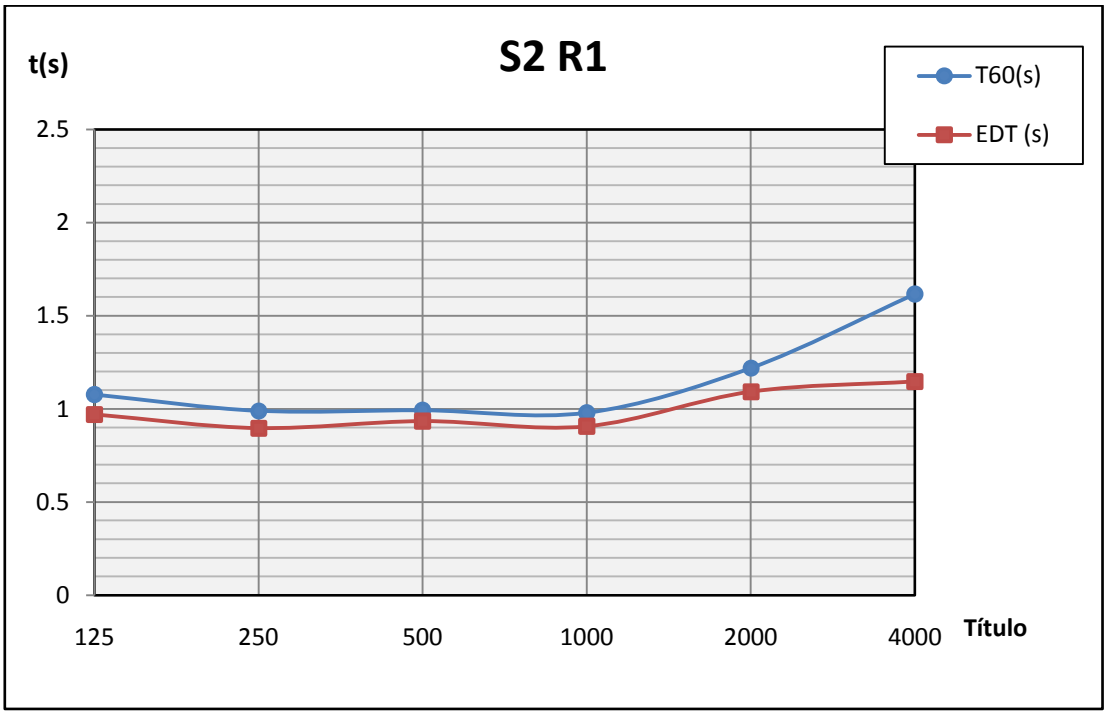


Fig. 4.9. Tiempos de reverberación para el receptor 1 y la fuente 2

4.4.3. Parámetros de inteligibilidad

Para la estimación de la inteligibilidad en el interior de la cueva se ha elegido la representación de la claridad C-50, la definición D-50 y el RASTI. Para mostrar la relación entre la energía temprana y la tardía del la respuesta bastaría con un parámetro ELR *(Early to Late*) de entre los dos mostrados (C-50 y D-50) ya que pueden llegar a ser equivalentes. Esta relación de equivalencia ocurrirá siempre que supongamos la hipótesis de campo difuso, pero como se puede comprobar en las graficas siguientes existen diferencias entre los dos parámetros que ponen de relieve que el campo acústico de Parpalló no tendrá una caída lineal.

La siguiente gráfica muestra como la claridad C-50 *[Fig. 4.10]* oscila bastante entre unas posiciones y otras, observando como para ciertos puntos existen valores muy elevados de este parámetro. No debemos olvidar que **la posición de la fuente en las mediciones no era la posición lógica que ocuparía el orador en la cueva**. Aquí la fuente está muy cerca de los receptores para muchos casos, y si se elevara sobre el nivel de la audiencia hasta el estrado, seguramente se obtendrían valores de claridad mayores y uniformes, como se puede observar en los resultados de la simulación del apartado 3.

Conclusiones similares se pueden observar en la grafica de la definición D-50 *[Fig. 4.11]*, que aún manteniendo unos **valores relativamente aceptables**, existe una ligera variación de los resultados, oscilando entre 45 y 70%.

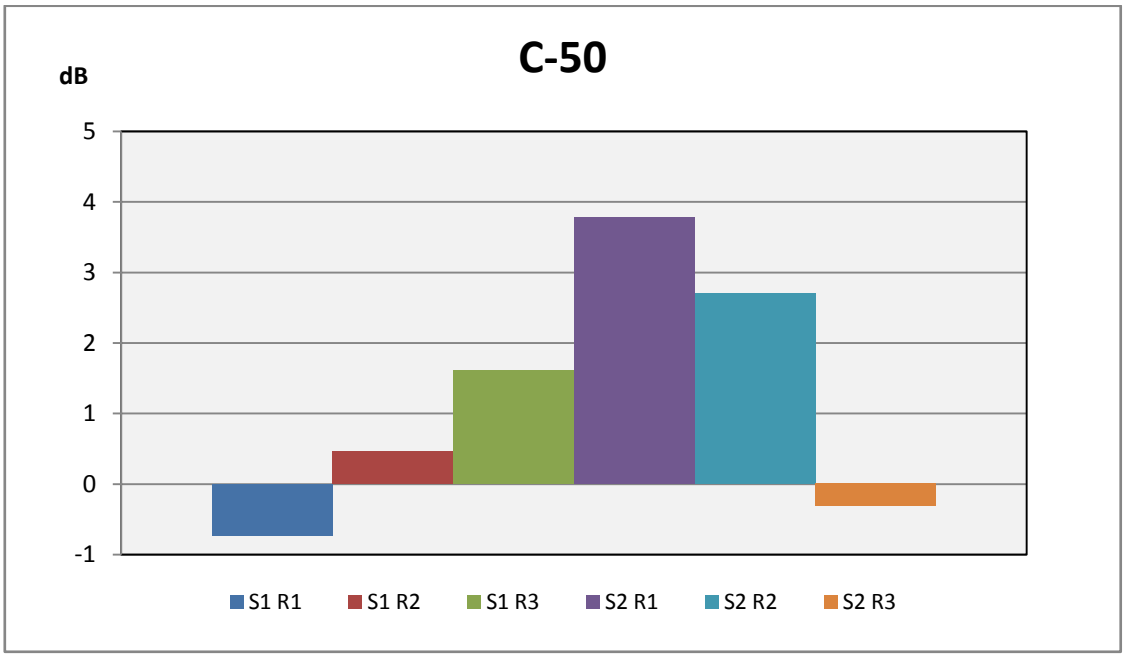


Fig. 4.10. Claridad C-50 en todas las combinaciones fuente/receptor

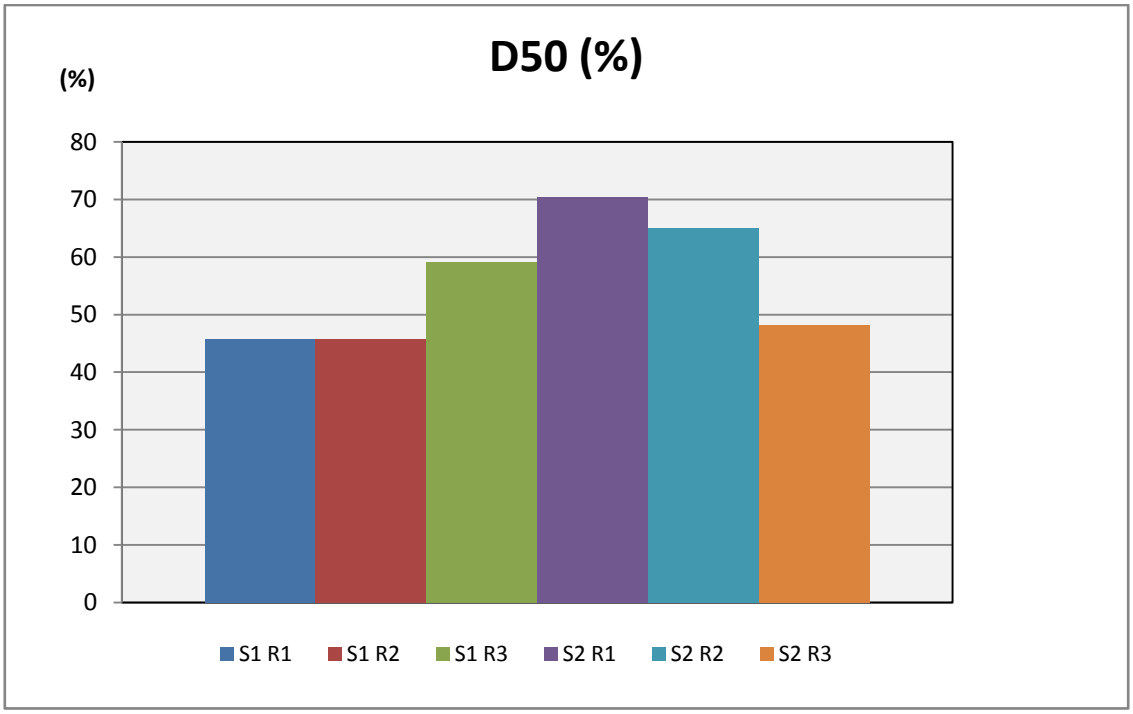


Fig. 4.11. Definición D-50 en todas las combinaciones fuente/receptor

A la vista de la representación del RASTI *[Fig. 4.12]* se observa como oscila entre los valores de 56 y 65. Al igual que con los otros parámetros de inteligibilidad, no parece encontrarse correspondencia alguna entre la posición de la fuente y los receptores, quizá debido a que al situar la fuente sobre el piso de la cueva variando la cercanía con estos de una posición a otra, los valores se modifican. Aun, así, esta variación en función de la posición de los receptores y fuente no es extremadamente amplia, y nos aporta información suficiente del comportamiento de la cueva.

Los resultados se corresponden bastante aproximadamente con los obtenidos en las simulaciones y todos **los valores medidos se podrían calificar como aceptables/buenos** siempre teniendo en cuenta que se trata de juicios subjetivos.

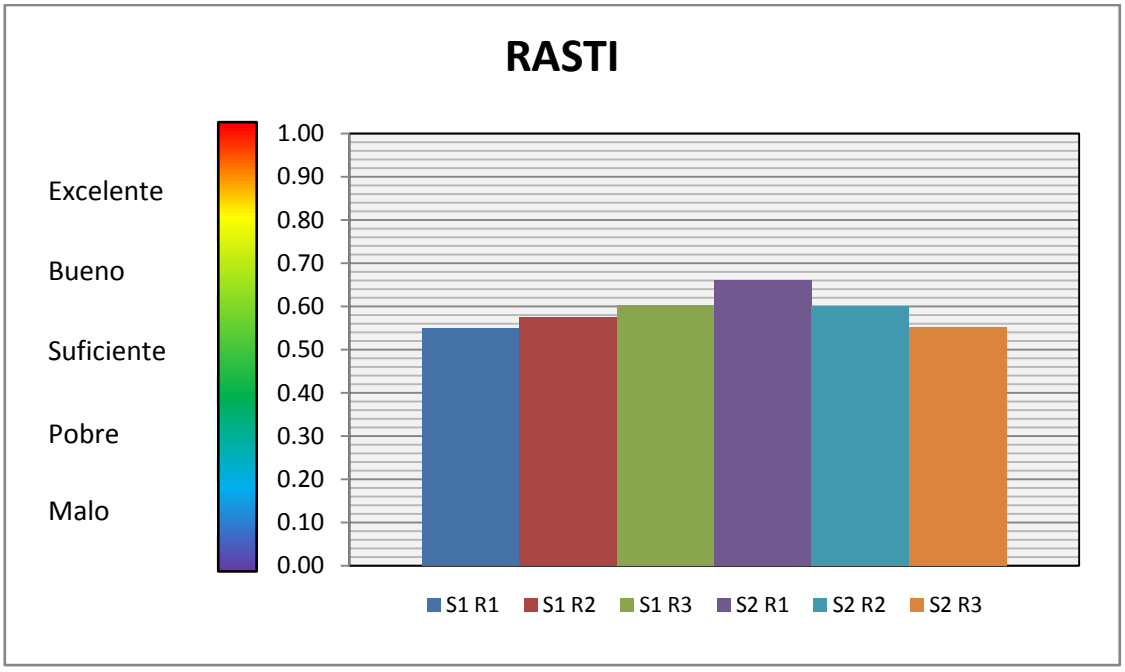


Fig. 4.12. RASTI en todas las combinaciones fuente/receptor y su correspondiente valoración subjetiva

5. CONCLUSIONES

5.1. Comparativa entre simulación y medida

Los resultados de las medidas tomadas en el interior de este recinto muestran una gran correlación entre los datos medidos y los simulados:

Si tenemos en cuenta el error cometido, los tiempos de reverberación de la simulación son prácticamente iguales a los de la medida. Solo difieren ligeramente a altas frecuencias, donde las medidas muestran tiempos de reverberación superiores. Aún así, debemos tener en cuenta que la posición de la fuente no fue la misma para la medida que para la simulación y ello influirá en gran medida en la equivalencia de los resultados.

Para los parámetros de inteligibilidad existe una clara correlación en los valores, como se puede observar en las graficas siguientes. *[Fig. 5.1, Fig. 5.2, Fig. 5.3]*

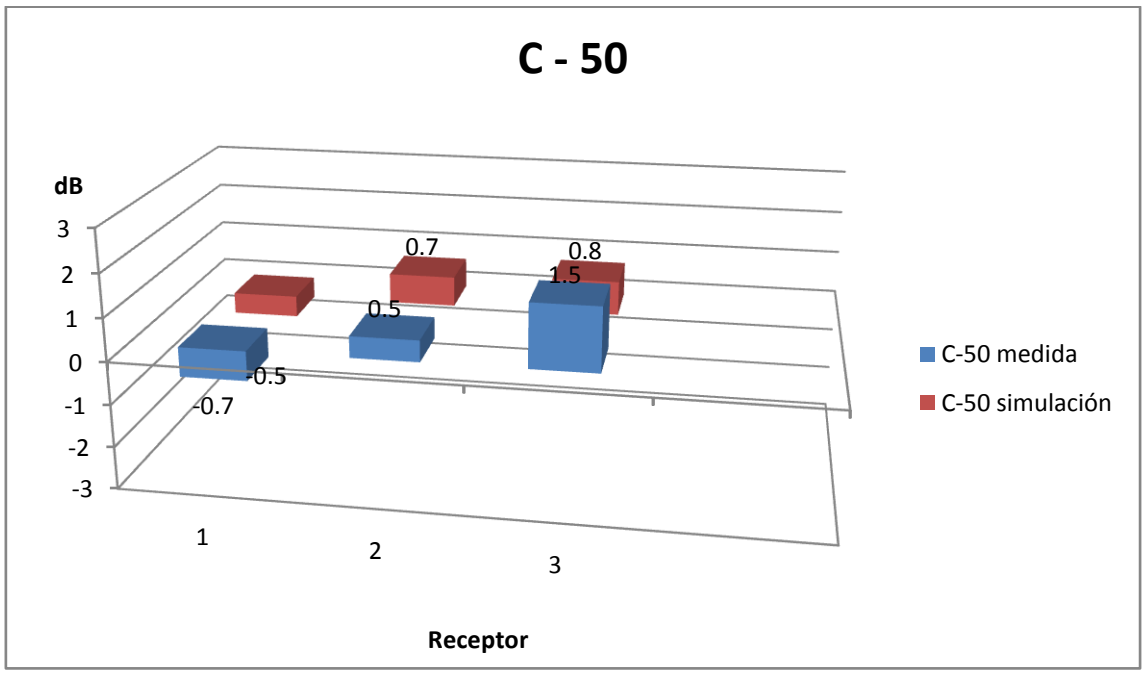


Fig. 5.1 Comparación entre la claridad C-50 medida y simulada

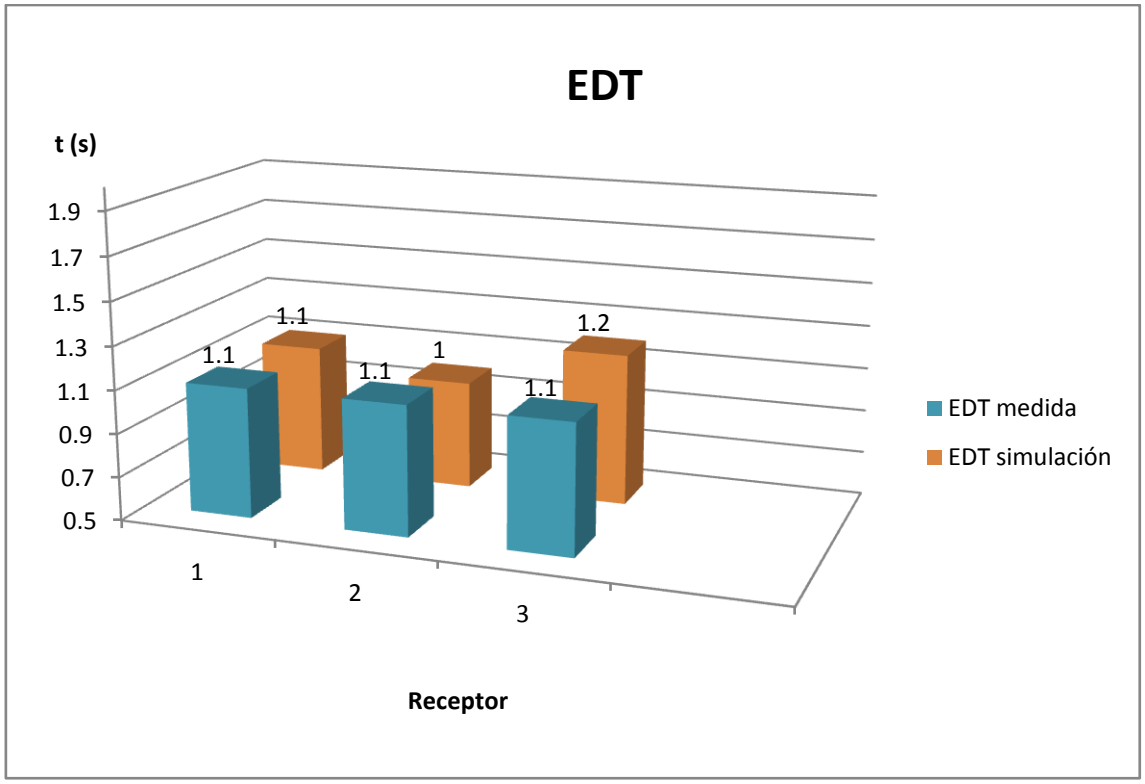


Fig. 5.2. Comparación entre el EDT medido y simulado

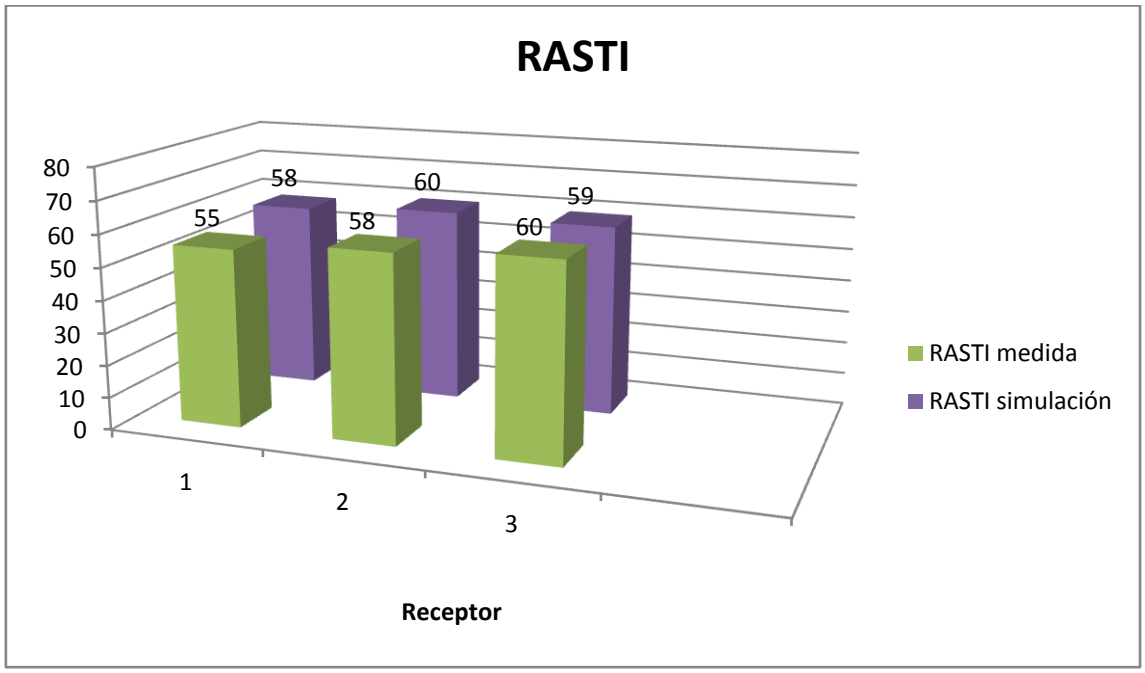


Fig. 5.3. Comparación entre el RASTI medido y simulado

5.2. Conclusiones de los resultados

Los datos obtenidos mediante el método de simulación acústica aportan una enorme cantidad de información sobre el comportamiento real de esta.

Los tiempos de reverberación no son excesivamente largos, siendo el EDT bastante menor que el T-30. Esta comparación demuestra que el campo sonoro existente en el interior de la cueva no se acerca demasiado al modelo de campo difuso, creando una **particular curva de caída**. El descenso energético se hace mucho más rápido en los primeros milisegundos de la curva y más lentamente en la parte más tardía. *[Fig. 5.4]*

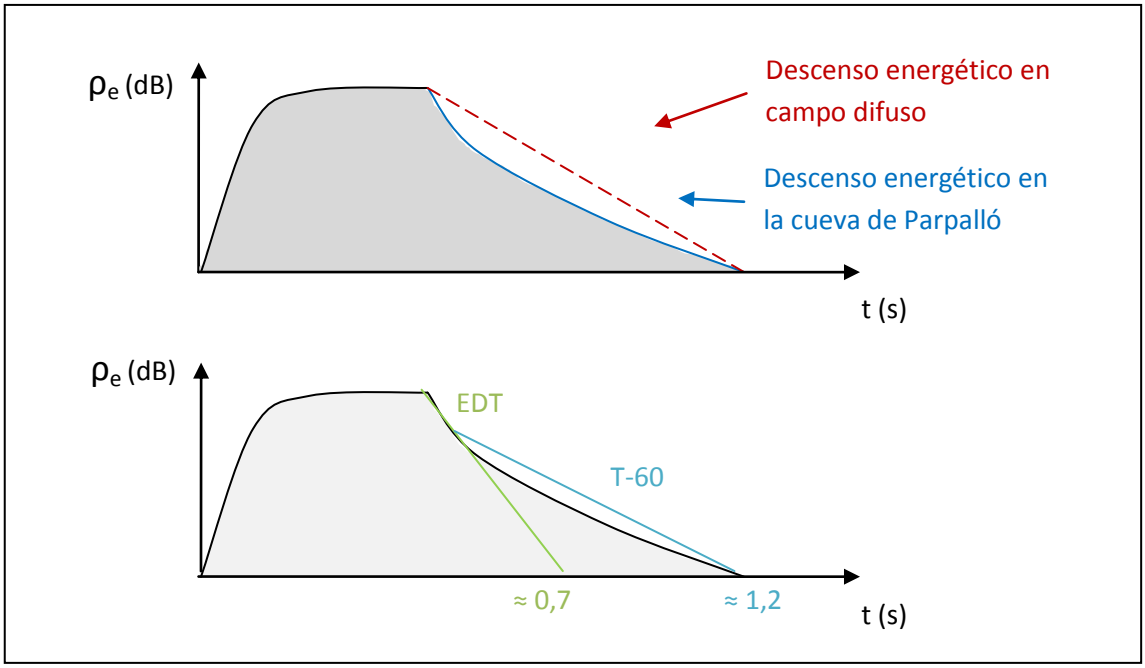


Fig. 5.4. Descenso energético, EDT y tiempo de reverberación correspondientes

Esta característica es fundamental para poder conseguir los **altos valores de inteligibilidad** que Parpalló posee, elevando como se vio anteriormente los parámetros de claridad C-50, definición D-50 y RASTI. La principal causa de la este comportamiento es sin duda la gran absorción de la apertura de la cueva y el acoplamiento acústico de las galerías.

Por otro lado, el análisis comparativo de los resultados correspondientes a los modelos con mayor colmatación muestra **un aumento de las características de inteligibilidad y refuerzo sonoro cuanto mayor es la colmatación del piso**.

5.3. Parpalló y su acústica

Con todo lo anterior se puede concluir este trabajo con la idea de que, para un recinto de sus características, la cueva del Parpalló goza de unas **propiedades acústicas excepcionales**:

a) Tiempos de reverberación óptimos para la transmisión de mensajes sonoros

b) Propiedades de inteligibilidad muy buenas en general, y aceptables en todos los casos

c) Potente refuerzo sonoro

Mediante el estudio de la colmatación del piso se puede concluir con la idea de que **en las primeras épocas de ocupación (Magdaleniense superior, 8.000 a.c.) las propiedades de inteligibilidad fueron superiores a los primeros periodos (Gravetiense, 30.000 a.c.)**; alcanzando en las últimas épocas propiedades excelentes para la transmisión de mensajes verbales y musicales.

A esto hay que sumar el efecto que tendría sobre la inteligibilidad el hecho de que exista una plataforma para el orador, ya que **los mensajes sonoros se verían apoyados con lenguaje visual** adquiriendo así una mayor comprensión por parte de los asistentes.

Otro punto importante es también la relación que se puede producir entre el espacio sonoro o forma del mensaje y el rito o acto comunicativo. Así, **la afluencia y reunión de individuos en determinados espacios prehistóricos podría estar íntimamente relacionada con las propiedades acústicas de estos**: la singularidad y excepcionalidad de un espacio en relación con la singularidad y excepcionalidad de un acto social o ritual.

5.4. Líneas futuras de investigación

5.4.1. Complementar el estudio de la cueva de Parpalló

El trabajo realizado en este proyecto puede completarse para caracterizar por completo el comportamiento de la cueva. Son varias las líneas a seguir para realizarlo, siendo prioritario un estudio de los modos propios resonantes a baja frecuencia. Para conseguirlo, es recomendable utilizar alguno de los métodos de predicción basados en principios de acústica ondulatoria vistos en el capítulo 2.2.1.

Como complemento, para completar totalmente el estudio, se podría también realizar un estudio de ecos y focalizaciones, aunque estos efectos no han sido observados a simple vista en la cueva de Parpalló, si ocurren a menudo en otros recintos prehistóricos (ver capítulo 2.1.3.)

5.4.2. Estudios similares en otros recintos

Otro punto muy recomendable para completar esta investigación sería realizar estudios similares a este en recintos del entorno de Parpalló. Estudiando la correlación entre las características acústicas y las características arqueológicas de los recintos se podrían extraer conclusiones acerca de la interacción de la acústica en las sociedades prehistóricas.

Los estudios deben de caracterizar todos los aspectos acústicos del recinto en cuestión:

a) Parámetros de calidad de salas. Inteligibilidad
b) Ecos y focalizaciones
c) Modos propios resonantes
d) Uniformidad del campo acústico
e) Ruido
f) Otros posibles efectos acústicos

Con estos datos, se podría empezar a esbozar la medida en la que las propiedades acústicas de los recintos en la prehistoria condicionan su uso y/u ocupación.

5.4.3. Presentación de los resultados: Auralización

Toda ciencia, debe de poder dar a conocer sus avances y desarrollo tanto a los expertos de su misma rama, al resto de la comunidad científica y al público en general. La exposición de los resultados hacia un público que no posea conocimiento teórico alguno en ese campo es una tarea que se debe centrar en expresarse con claridad, brevedad y con el mínimo numero de tecnicismos pero manteniendo en todo momento el rigor científico.

Para el caso concreto de Parpalló, una excelente vía para esta exposición es la auralización del recinto. A grandes rasgos, la auralización consiste en transformar por medio de procesado una señal sonora en otra que fuese idéntica a la que se escucharía en el interior del recinto.

No nos extenderemos en el proceso, ya que está ampliamente investigado, pero si apuntaremos aquí la necesidad de apoyar el sistema sonoro con visualizaciones 3D y recursos multimedia.

Como simples ideas para la realización de este trabajo se proponen las siguientes:

1) Auralización estática:

   Mediante la convolución de una señal con la respuesta binaural en un punto de la cueva. Se puede conseguir a tiempo real o con bajos tiempos de latencia mediante la implementación del sistema con DSP's.

2) Auralización dinámica:

   Sistema que combina la auralización del sonido y el movimiento del receptor sonoro por el recinto. Debido a los elevados recursos de procesado que necesita, en esta opción se ha de dividir la respuesta de la sala en dos trozos:

   a) Las reflexiones tempranas, calculado mediante acústica geométrica, e implementado con filtros FIR.

   b) La cola de reverberación, calculada con métodos de acústica estadística e implementada con filtros IIR.

   Posteriormente se puede filtrar la señal para simular resonancias siempre que se conserven las características de espacialidad y tiempos de caída de la sala.

   Un buen método ampliamente desarrollado para conseguir todo esto puede ser un sistema de auralización DIVA. *[Ref. 26] [Ref. 27]*

   Aunque la manera más sencilla de realizar la interfaz de movimiento sea mediante pulsadores o botones similares, se puede desarrollar un sistema de detección del movimiento de la cabeza del oyente para conseguir unos resultados mucho más reales.

Como complemento a todo este sistema, se puede añadir ruido ambiente y efectos sonoros que simulen el espacio sonoro creado por el recinto en cuestión, aparte de utilizar todas las posibilidades multimedia que sean posibles para exponer todos los datos arqueológicos, evolución de la acústica según la edad geológica, comparaciones entre varios recintos, etc.

5.4.4. Conservación del espacio sonoro

Esto no es una idea nueva, no hay más que entrar en una iglesia románica para darnos cuenta de que la grandiosidad y sensaciones que nos transfiere ese tipo de recintos están debidas en gran parte a las propiedades acústicas que posee. Al igual que somos capaces de conservar, proteger y dar a conocer los restos visibles de los yacimientos arqueológicos; el espacio sonoro creado por un recinto con un determinado valor arqueológico también debe de recibir un trato similar, tanto por motivos científicos, históricos o por motivos estéticos, paisajísticos y turísticos. Las propiedades acústicas de ese espacio, así como los sonidos y ruidos del ambiente no deberían de ser alterados, tal y como ya apuntaba S.J.Waller en Petroglyph National Monument (Albuquerque, USA) *[Ref. 47]* donde diversas construcciones estaban poniendo en peligro los ecos encontrados, o en varias de las cuevas estudiadas donde la inserción de puertas y vidrios en las aperturas modificaron por completo las resonancias y reverberaciones en su interior.

La conservación del espacio acústico debe ser un compromiso entre la exposición de los restos al público, la conservación del patrimonio acústico-arquitectónico y los demás factores sociales y culturales que rodean al yacimiento.

6. Bibliografía

[Ref. 1] Aura, E. (1988): La Cova del Parpalló y el Magdaleniense mediterráneo de facies ibérica. Tesis Doctoral, Valencia.

[Ref. 2] Arsuaga, J.L.; Martínez, I.(1998): La especie elegida, MADRID

[Ref. 3] Beranek, Leo Leroy; (1996): Acoustics. Woodbury: Acoustical Society of America, cop.

[Ref. 4] B-I Dalenbäck (1992): Room Acoustic Prediction and Auralization Based on an Extended Image Source Model. Licentiate thesis, Report F92-03,

[Ref. 5] CATT-Acoustic v8.0f Help-file and Manual www.catt.se

[Ref. 6] Dams, L. (1984) Preliminary Findings at the "Organ Sanctuary" in the Cave of Nerja, Malaga, Spain, *Oxford Journal Of Archaeology* Vol. 3, p. 1-14.

[Ref. 7] Dams, L. (1985) Palaeolithic Lithophones: Descriptions and Comparisons, *Oxford Journal Of Archaeology* Vol. 4, p. 31-46.

[Ref. 8] Dauvois, M. (1989) Son et Musique Paléolithiques, *Les Dossiers D'Archéologie* Vol. 142, p. 2-11.

[Ref. 9] Dauvois, M. (1989) Sons et Musique paléolithiques. *Les Dossiers de l'Archéologie* 142:2-11.

[Ref. 10] Dauvois, M. (1996) Evidence of Sound-Making and the Acoustic Character of the Decorated Caves of the Western Paleolithic World. *International Newsletter on Rock Art* 13:23-25.

[Ref. 11] Dauvois, M./ Boutillon, X. (1990): "Etudes acoustiques au Réseau Clastres: salle des Peintures et lithophones naturels", en Prehistoire Ariegeoise, tom. 45, pp. 175-186, Tarasconsur- Ariége

[Ref. 12] Dauvois, M./ Reznikoff, I. (1988): "La dimension sonore des grottes ornées", en Bulletin de la Societe Prehistorique Francaise , 85/8, pp. 239- 246. Paris

[Ref. 13] Devereux, P., (2001): *Stone age soundtracks*: The acoustic archaeology of ancient sites. Vega, London, , ISBN 1-84333-019-9

[Ref. 14] Giedion, Siegried. (1962). *The Eternal Presence: A Contribution on Constancy and Change*, Vol. 1: .The Beginnings of Art.. New York: Pantheon Books.

[Ref. 15] Glory, A. (1964) La Grotte de Roucador, *Bulletin de la Société Préhistorique Française* Vol. 61, p. clxvi-clxix.

[Ref. 16] Glory, A. (1965) Nouvelles découvertes de dessins rupestres sur le causse de Gramat, *Bulletin de la Société Préhistorique Française* Vol. 62, p. 528-536.

[Ref. 17] Glory, A., Vaultier, M. & Farinha Dos Santos, M. (1965): La grotte ornée d'Escoural (Portugal), *Bulletin de la Société Préhistorique Française* Vol. 62, p. 110-117.

[Ref. 18] Houtgast, T., Steeneken, (1985) .H.J.M., A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria, JASA, vol. 77,

[Ref. 19] Iain Morley (2003): The Evolutionary Origins and Archaeology of Music. Darwin College, Cambridge University, United Kingdom p. 32-75 ISSN 1749-9194

[Ref. 20] Ian Cross & Aaron Watson Acoustics and the Human Experience of Socially-organized Sound (sin referencia)

[Ref. 21] IEC 60268-16, (2003): Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International Electronical Committee, Geneva, IEC-268-16

[Ref. 22] IEC-268-16, (1988) Sound system equipment: the objective rating of speech intelligibility in auditoria by the RASTI method, International Electronical Committee, Geneva, IEC-268-16

[Ref. 23] Ivo Mateljan, (2003) ARTA, Manual de usuario, Programa para Medición de Respuesta de Impulsos y Análisis en Tiempo Real del Espectro y de la Respuesta en Frecuencia, , Versión 1.1.1.

[Ref. 24] J. David Lewis- Williams (1994): Rock art and ritual: southern africa and beyond *Complutum,* 5, 1994: 277-289

[Ref. 25] Jahn, Robert G. and Paul Devereux. (1996): Preliminary Investigations and Cognitive Considerations of the Acoustical Resonances of Selected Archaeological Sites.. *Antiquity* 70, 269: 665-666.

[Ref. 26] L. Savioja and Tapio Lokki, (2002): Auralization applying the parametric room acoustic modeling technique - THE DIVA AURALIZATION SYSTEM. Telecommunications Software and Multimedia Laboratory Helsinki University of Technology

[Ref. 27] L. Savioja. (1999): Modeling Techniques for Virtual Acoustics. PhD thesis, Helsinki University of Technology, Telecommunications Software and Multimedia Laboratory, report TML-A3

[Ref. 28] Lawson, G., Scarre, C., Cross, I. & Hills, C. (1998): Mounds, megaliths, music and mind: some acoustical properties and purposes of archaeological spaces, *Archaeological Review From Cambridge* Vol. 15, p. 111-134.

[Ref. 29] Pericot, L. (1942): La Cueva del Parpalló. CSIC, Madrid

[Ref. 30] Picó, Rubén; Piqueras, Laura; Roig, Bernardino; Redondo, Javier; Simulación acústica de la cueva del Parpalló mediante el método de elementos finitos. Referencia pacs: 43.55.+p

[Ref. 31] R. G. Jahn, P. Devereux, and M. Ibison, (1996): "Acoustical resonances of assorted ancient structures," J. Acoust. Soc. Am., vol. 99, no. 2, pp. 649–658.

[Ref. 32] Recuero López, Manuel; (1992): Acústica arquitectónica. 2ª ed. Madrid

[Ref. 33] Reijs, Victor; 2002. MegaSound: Sound in Irish megalithic buildings, Ireland (sin referencia)

[Ref. 34] Reznikoff, I. & M. Dauvois, (1988): La dimension sonore des grottes ornées. Bulletin de la Société Préhistorique Française 85(8), 238–46.

[Ref. 35] Reznikoff, Iégor. (1995): .On the Sound Dimension of Prehistoric Painted Caves and Rocks.. *Musical Signification: Essays in the Semiotics Theory and Analysis of Music*, ed. Eero Tarasti, pp. 541-557. Berlin: Mouton De Gruyter.

[Ref. 36] Rife, D. D., (1992) Modulation Transfer Function Measurement with Maximum-Length Sequences, J. Audio Eng. Soc., vol. 40, October 1992.

[Ref. 37] Rife, D.D., Vanderkooy, J., (1989) Transfer Function Measurement with Maximum-Length Sequences, J. Audio Eng. Soc., vol. 37, June 1989.

[Ref. 38] Scarre, C. (1989) Painting By Resonance, *Nature* Vol. 338, p. 382.

[Ref. 39] Steven Errede (2005): Pre-Historic Music and Art in Palæolithic Caves Department of Physics, The University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois

[Ref. 40] T Houtgast, H J M Steeneken, R Plomp (1980): Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. I. General Room Acoustics, Acustica 46, 60-72

[Ref. 41] Teófilo Zamarreño, Miguel Galindo, Sara Girón (2001): Ruido modulado versus mls para la medida de parámetros de inteligibilidad: primera aproximación. Departamento de Física Aplicada II E. T. S. de Arquitectura - Universidad de Sevilla

[Ref. 42] Waller, Steven J. "Background explanation of acoustic theory relative to ancient rock art". Waller Homepage www.geocities.com/CapeCanaveral/9461

[Ref. 43] Waller, Steven J. (1993): Sound and Rock Art.. *Nature* 363: 501.

[Ref. 44] Waller, Steven J. (1993): Sound Reflection as an Explanation for the Content and Context of Rock Art.. *Rock Art Research* 10: 91-101.

[Ref. 45] Waller, Steven J. (1994): Acoustical Studies of Rock Art on Three Continents 109 Saint Regis Drive, U. S. A.

[Ref. 46] Waller, Steven J. (2002): Psychoacoustic influences of the echoing environments of prehistoric art, Paper for ASA First Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics in Cancun

[Ref. 47] Waller, Steven J. (2003): Conservation of Rock Art Acoustics: "Unexpected" Echoes at Petroglyph National Monument. Rock Art Papers, Volume 16. San Diego Museum Papers 41.

[Ref. 48] Watson, Aaron and David Keating. (1999): .Architecture and Sound: An Acoustic Analysis of Megalithic Monuments in Prehistoric Britain.. *Antiquity* 73, 280: 325-336.

[Ref. 49] Watson, Aaron and David Keating. (2000): The architecture of sound in Neolithic Orkney, in Neolithic Orkney in its European Context, ed. A. Ritchie. (McDonald Institute Monographs.) Cambridge: McDonald Institute for Archaeological Research, pp. 259-63.

[Ref. 50] Watson, Aaron. (1997): .Hearing Again the Sound of the Neolithic.. *British Archaeology*, 23: 6.

7. ANEXOS

7.1. Resultados adicionales de la simulación

En este anexo se representan los demás resultados a los que se hace referencia en la memoria que por su gran repetitividad y tamaño se ha decidido no incluir en el apartado correspondiente.

La organización de los resultados en este anexo sigue el siguiente orden:

Simulaciones previas:

Nº Grafica	Parámetro	Presentación
A1. 1	EDT desde la plataforma (1kHz)	EDT en función del coeficiente de absorción de la piedra y distintos receptores
A1. 2	T-15 desde la plataforma (1kHz)	T-15 en función del coeficiente de absorción de la piedra y distintos receptores
A1. 3	T-30 desde la plataforma (1kHz)	T-30 en función del coeficiente de absorción de la piedra y distintos receptores
A1. 4	EDT desde la galería (1kHz)	EDT en función del coeficiente de absorción de la piedra y distintos receptores
A1. 5	T-15 desde la galería (1kHz)	T-15 en función del coeficiente de absorción de la piedra y distintos receptores
A1. 6	T-30 desde la galería (1kHz)	T-30 en función del coeficiente de absorción de la piedra y distintos receptores
A1. 7	RASTI Plataforma	Gráfica para los diferentes receptores
A1. 8	RASTI galería	Gráfica para los diferentes receptores

Modelo *estado actual.*

Nº Grafica	Parámetro	Presentación
A1. 10	Características del modelo	Tabla
A1. 11	Coeficiente de absorción medio	[%]
A1. 12	Curva tonal EDT	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 13	Curva tonal T-15	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 14	Curva tonal T-30	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 15	Claridad C-50	Gráfica en función de frec. para los diferentes receptores
A1. 16	RASTI	Distribución por superficie de audiencia
A1. 17	EDT	Distribución por superficie de audiencia
A1. 17	Definición	Distribución por superficie de audiencia
A1. 18	Ganancia	Distribución por superficie de audiencia
A1. 18	Distribución de SPL	Distribución por superficie de audiencia

Modelo *Colmatado 2m.*

Nº Grafica	Parámetro	Presentación
A1. 19	Características del modelo	Tabla
A1. 20	Coeficiente de absorción medio	[%]
A1. 21	Curva tonal EDT	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 22	Curva tonal T-15	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 23	Curva tonal T-30	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 24	Claridad C-50	Gráfica en función de frec. para los diferentes receptores
A1. 25	RASTI	Distribución por superficie de audiencia
A1. 26	EDT	Distribución por superficie de audiencia
A1. 26	Definición	Distribución por superficie de audiencia
A1. 27	Ganancia	Distribución por superficie de audiencia
A1. 27	Distribución de SPL	Distribución por superficie de audiencia

Modelo *Colmatado 4m.*

Nº Grafica	Parámetro	Presentación
A1. 28	Características del modelo	Tabla
A1. 29	Coeficiente de absorción medio	[%]
A1. 30	Curva tonal EDT	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 31	Curva tonal T-15	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 32	Curva tonal T-30	Superposición de las curvas tonales de los diferentes receptores
A1. 33	Claridad C-50	Gráfica en función de frec. para los diferentes receptores
A1. 34	RASTI	Distribución por superficie de audiencia
A1. 35	EDT	Distribución por superficie de audiencia
A1. 35	Definición	Distribución por superficie de audiencia
A1. 36	Ganancia	Distribución por superficie de audiencia
A1. 36	Distribución de SPL	Distribución por superficie de audiencia

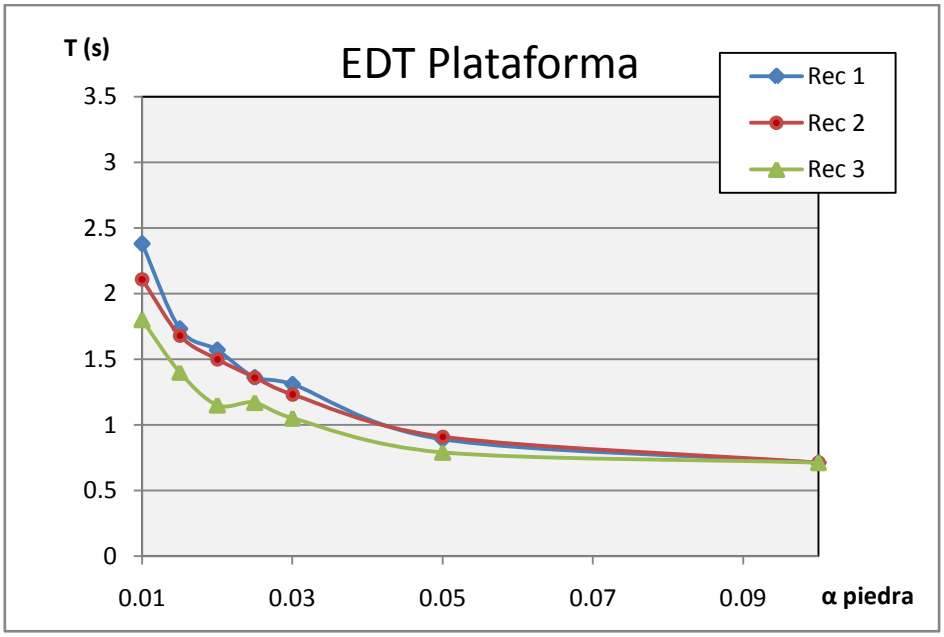


Fig. A1. 1

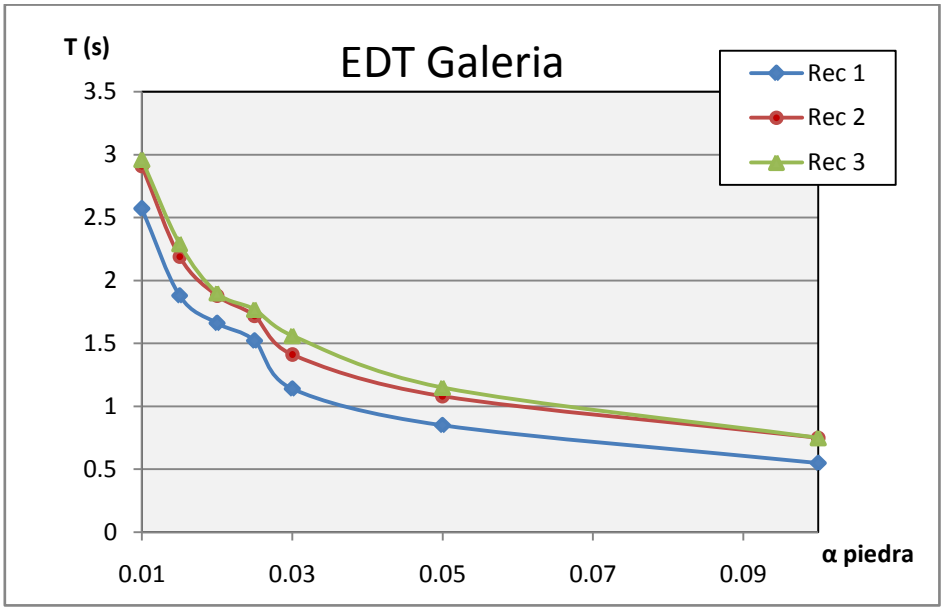


Fig. A1. 2

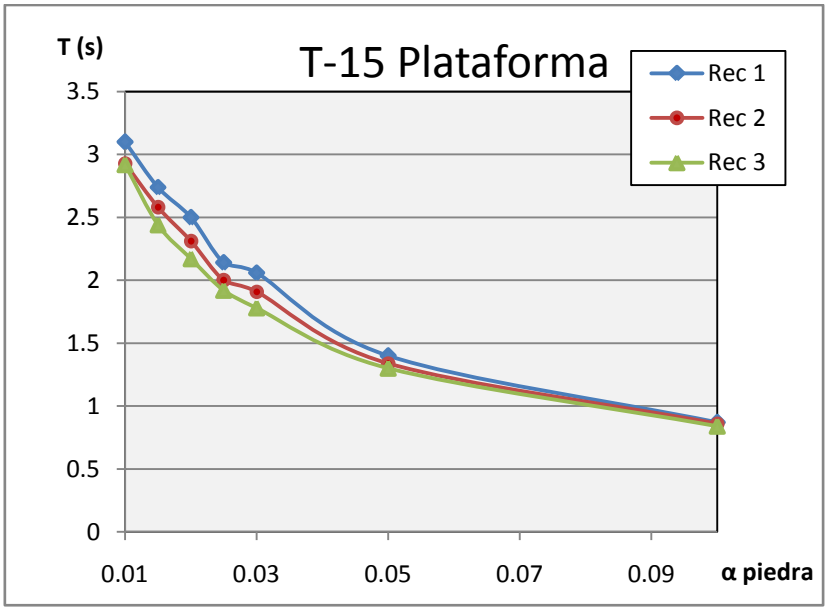


Fig. A1. 3

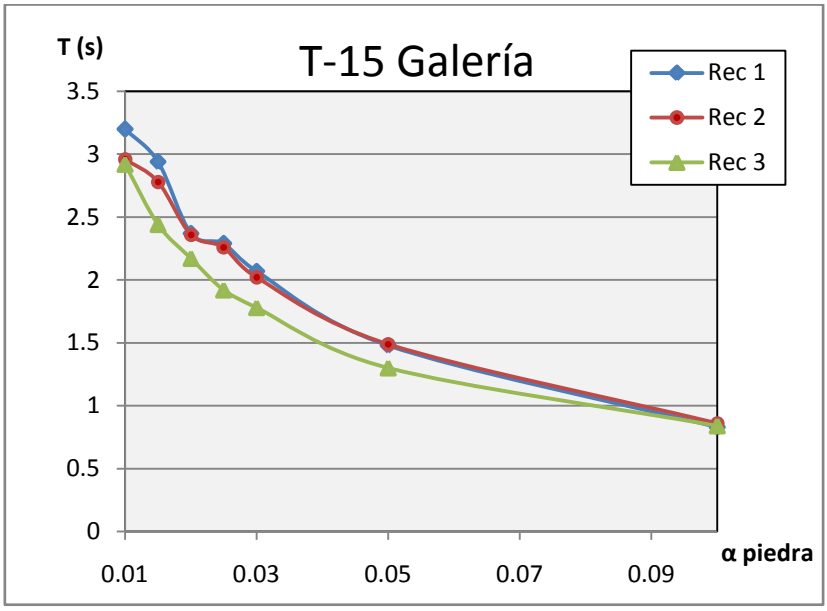


Fig. A1. 4

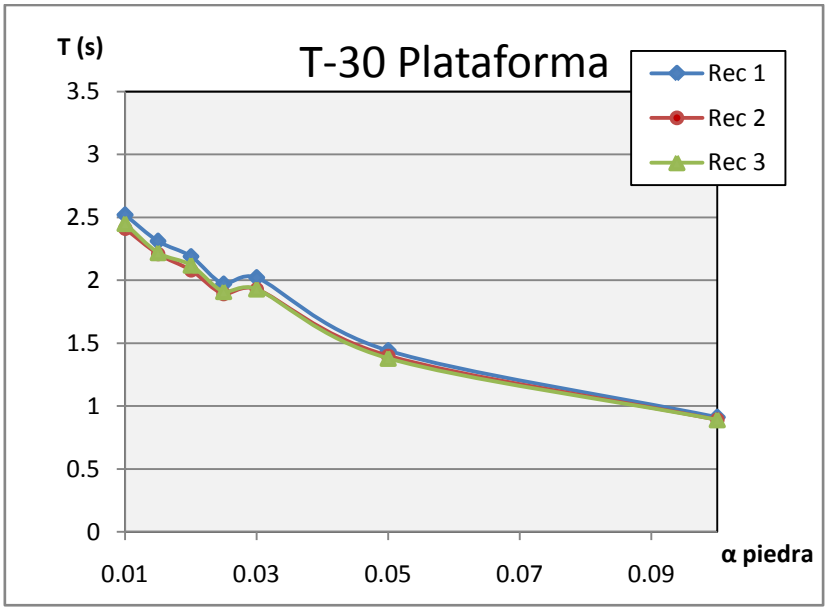


Fig. A1. 5

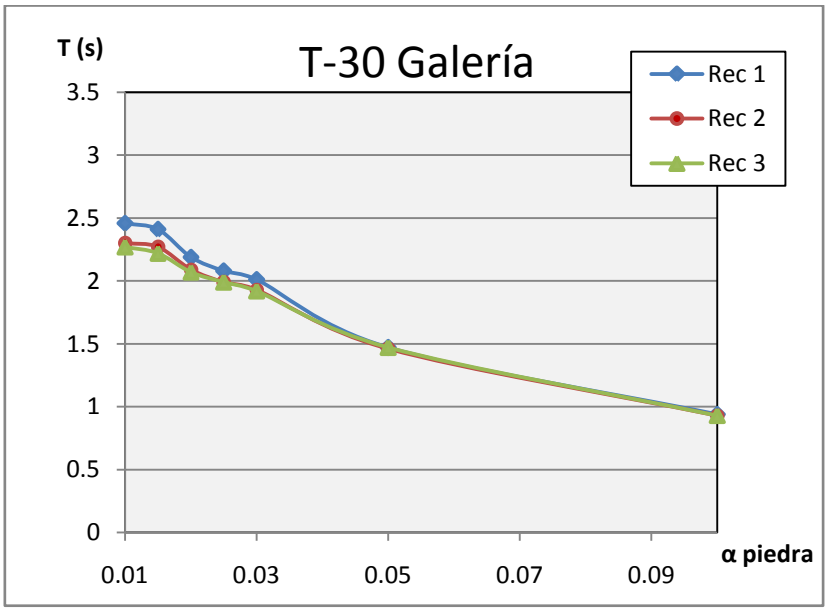


Fig. A1. 6

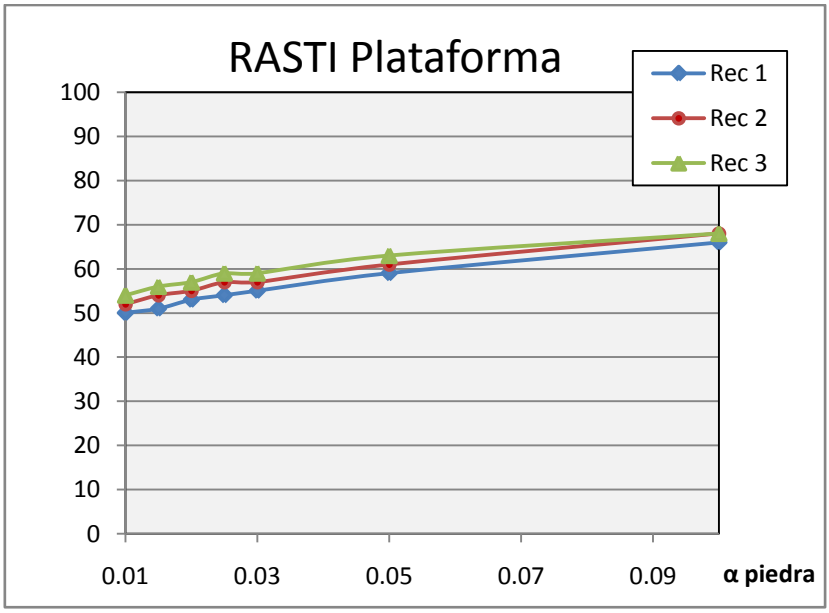


Fig. A1. 7

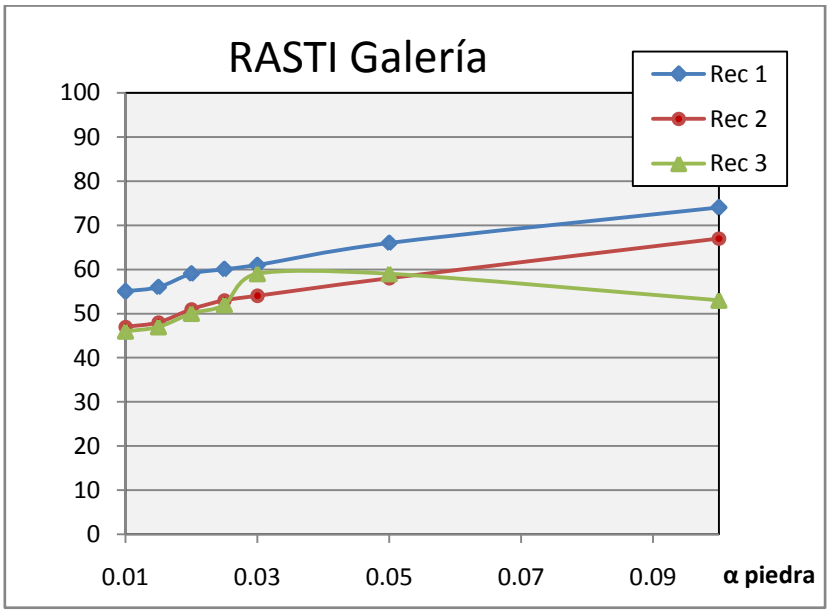


Fig. A1. 8

V[m³]	S[m2]	Recorrido libre medio [m]
992	917	4.33

Fig. A1. 10

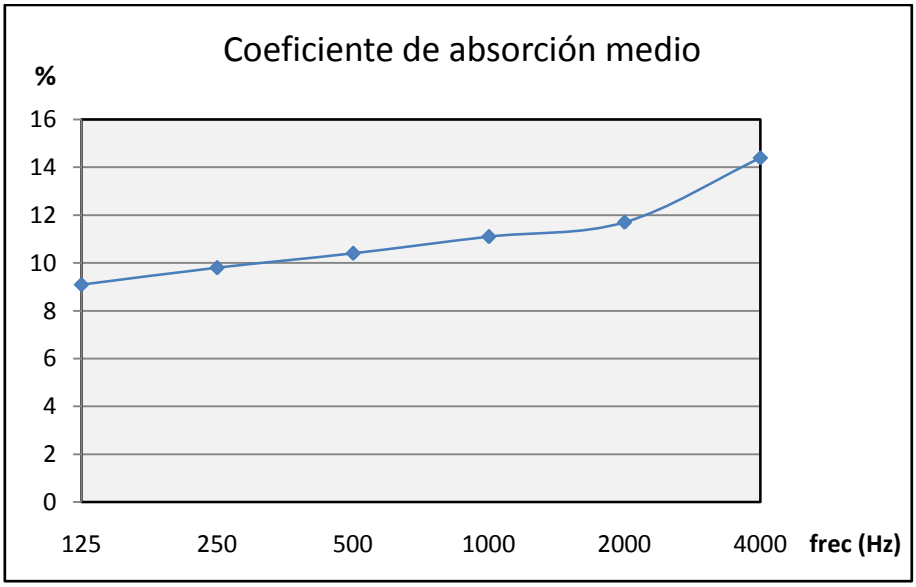


Fig. A1. 11

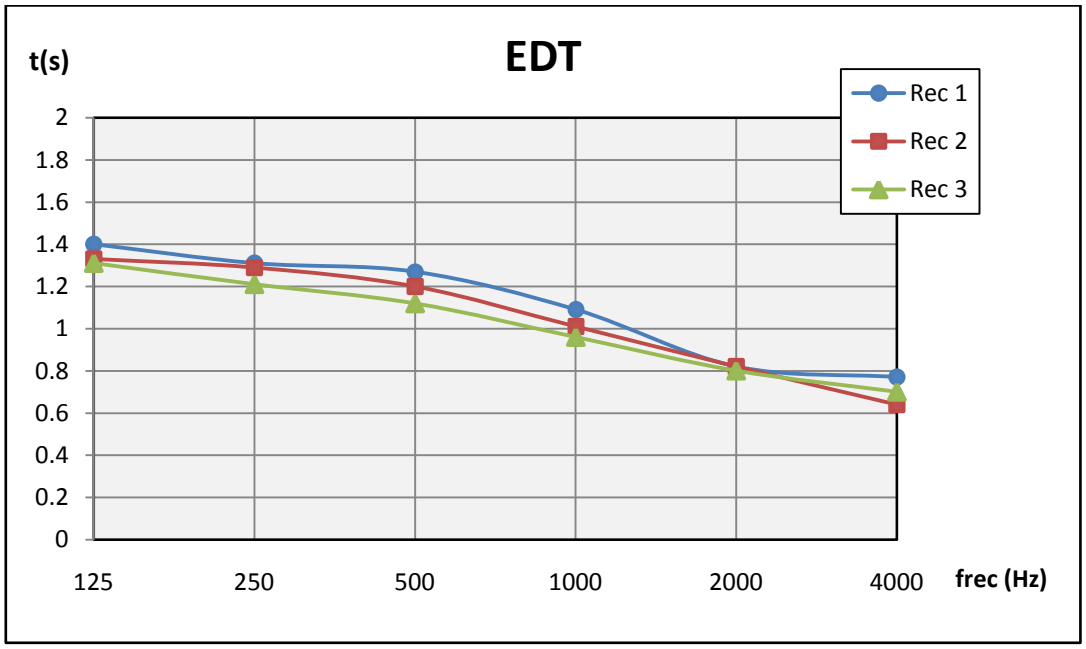


Fig. A1. 12

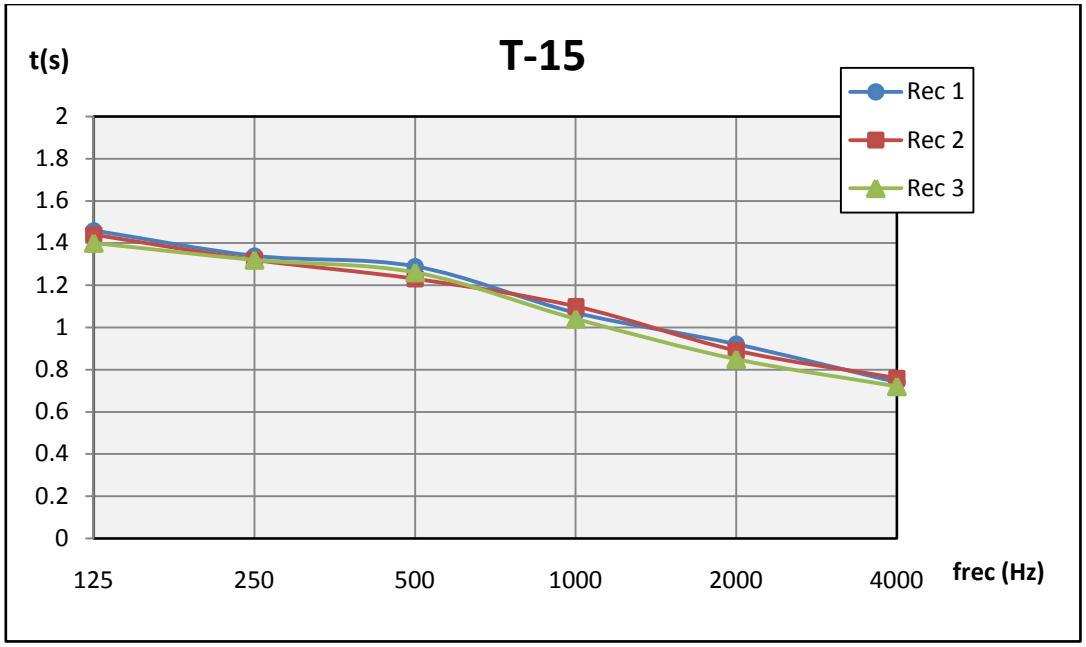


Fig. A1. 13

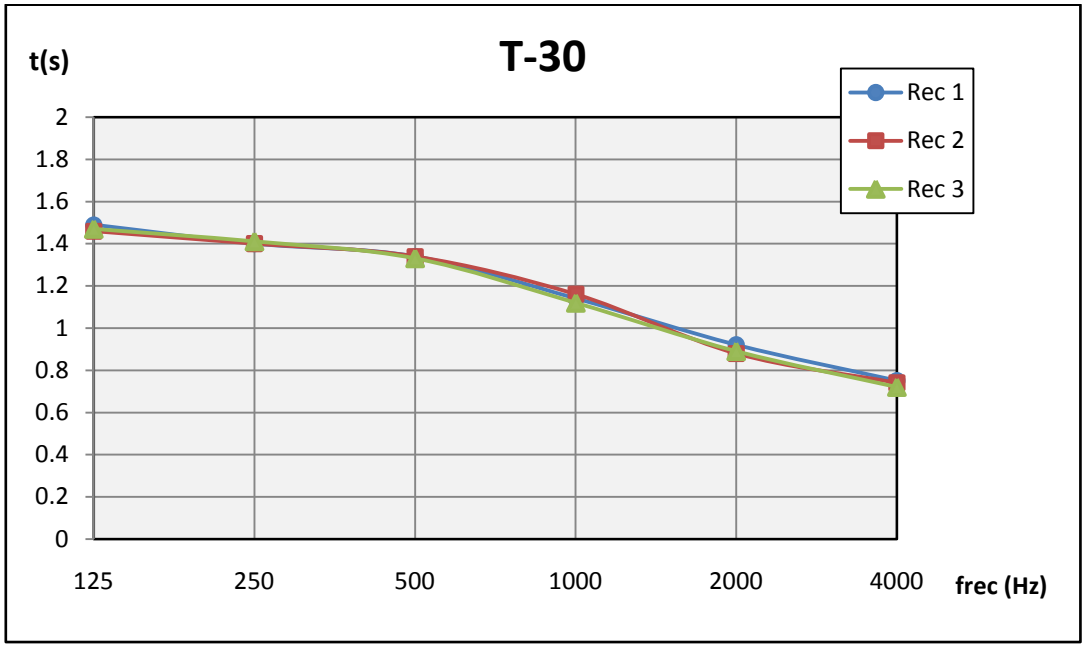


Fig. A1. 14

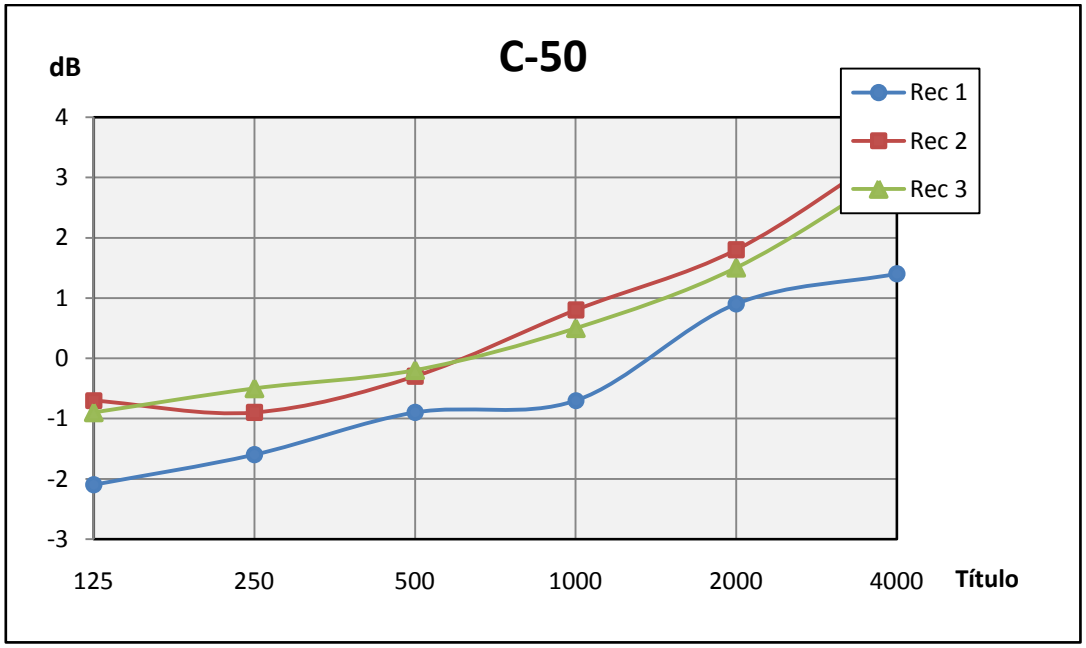


Fig. A1. 15

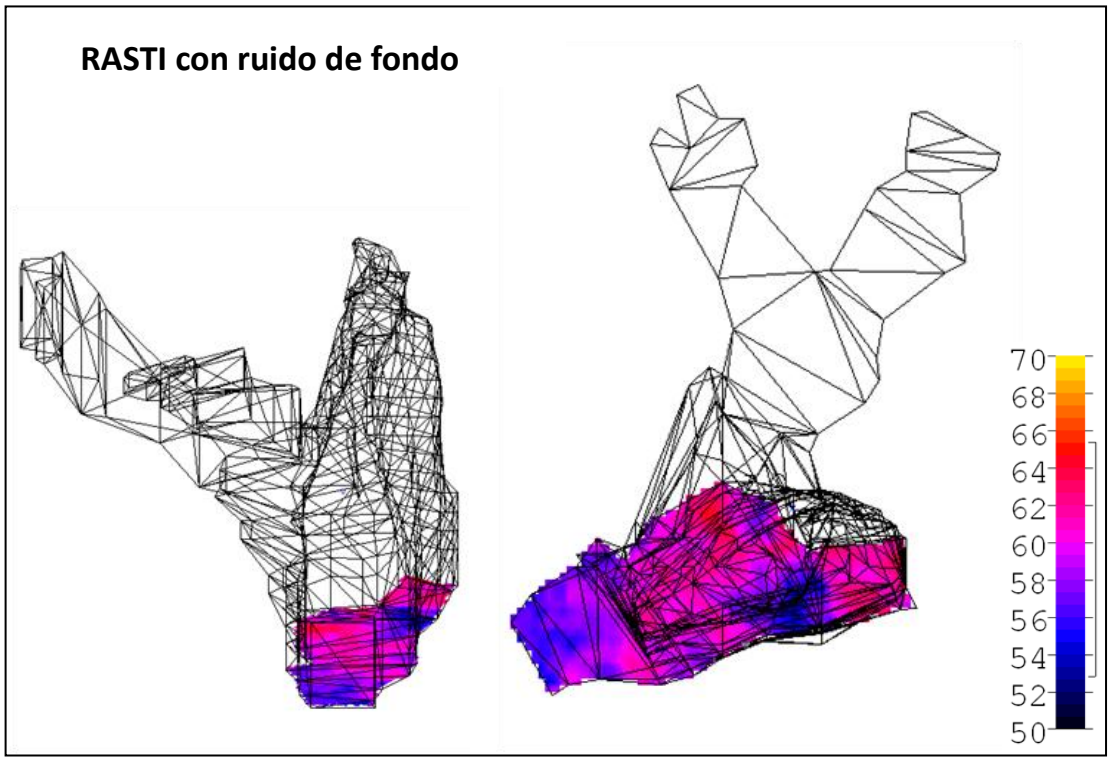


Fig. A1. 16

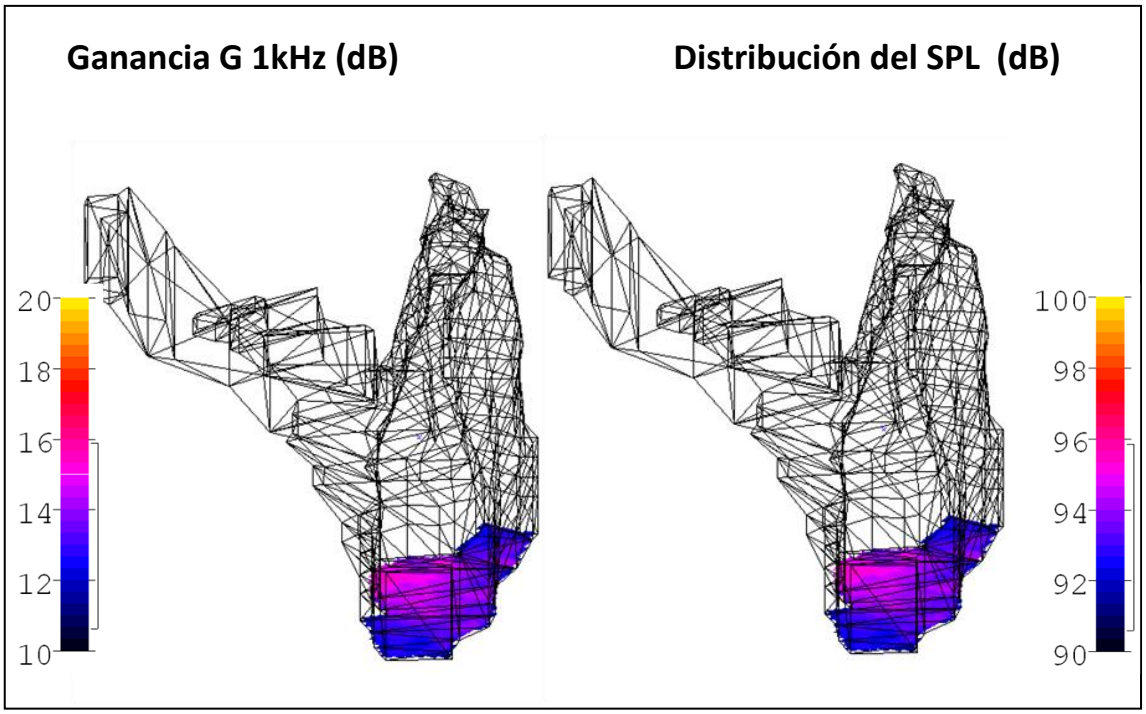


Fig. A1. 17

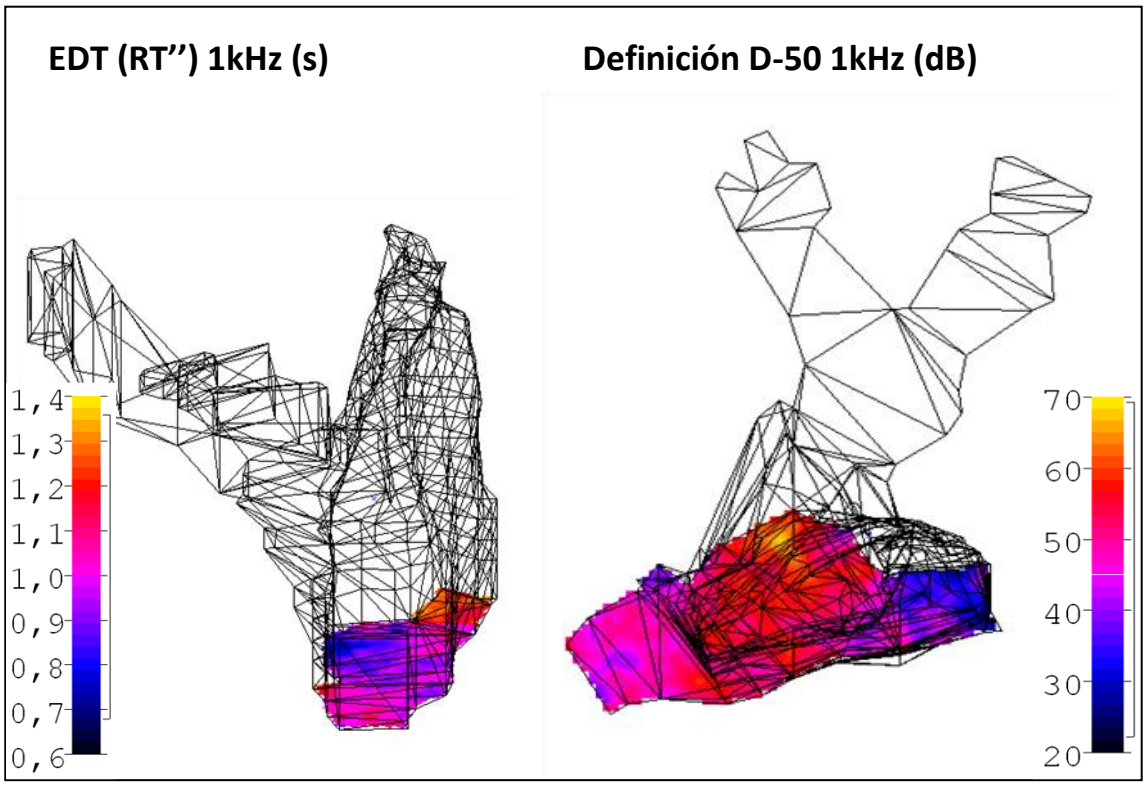


Fig. A1. 18

V[m³]	S[m2]	Recorrido libre medio [m]
866	845	4.1

Fig. A1. 19

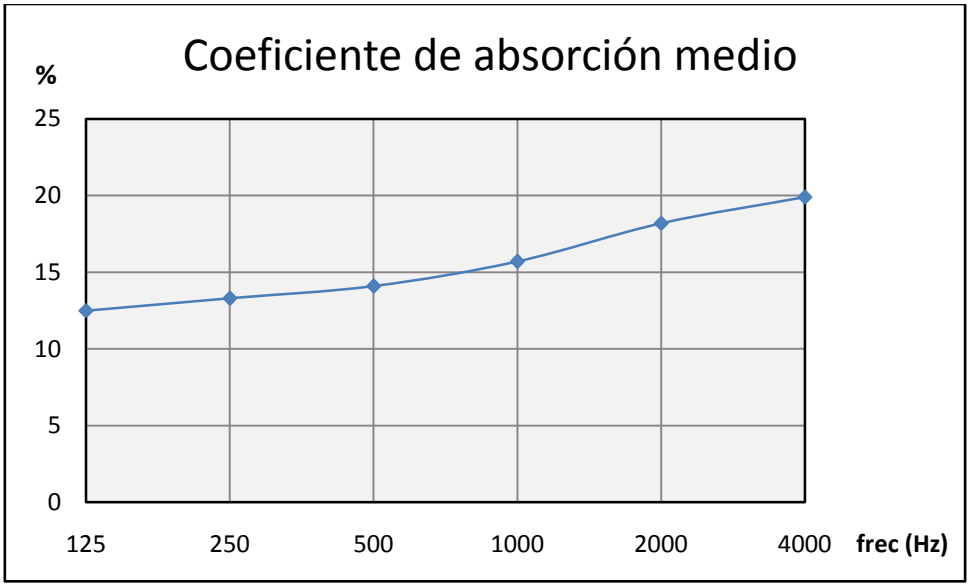


Fig. A1. 20

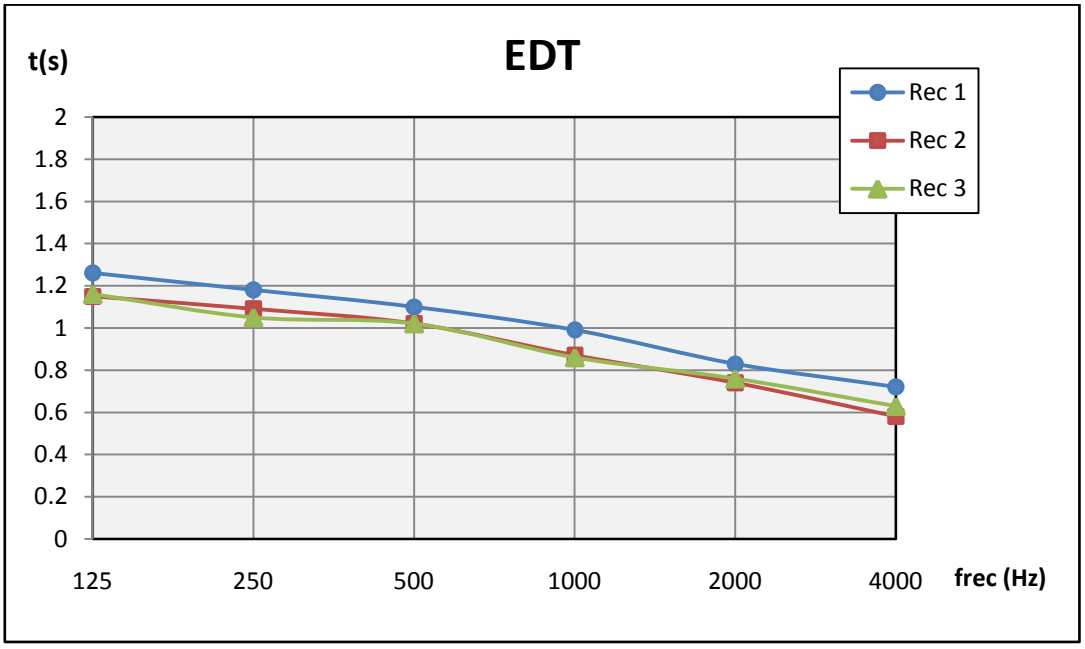


Fig. A1. 21

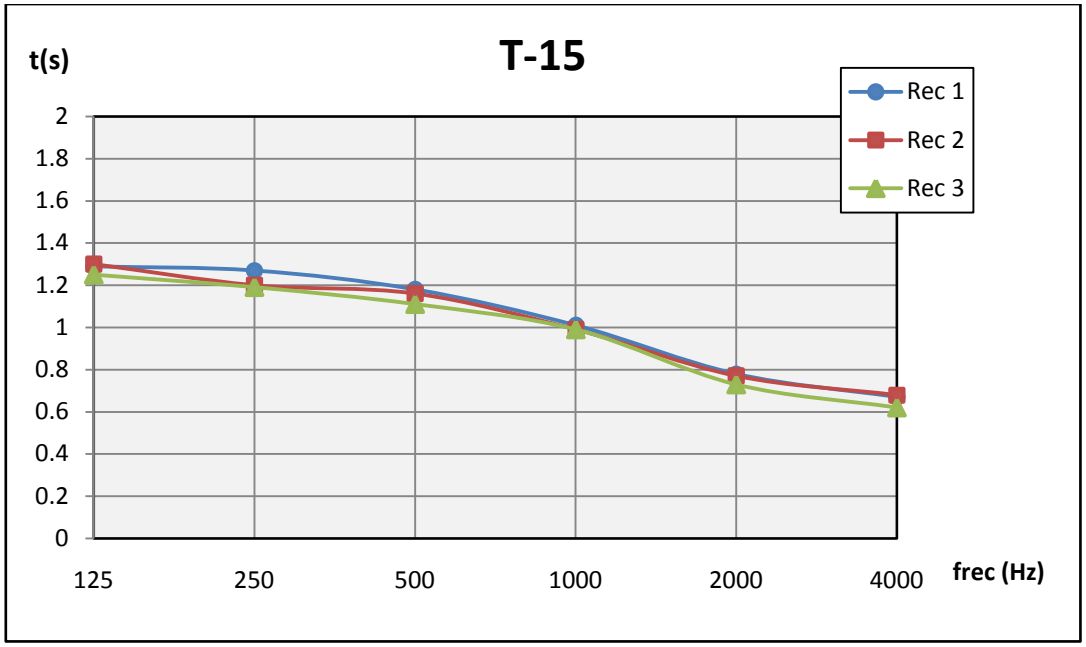


Fig. A1. 22

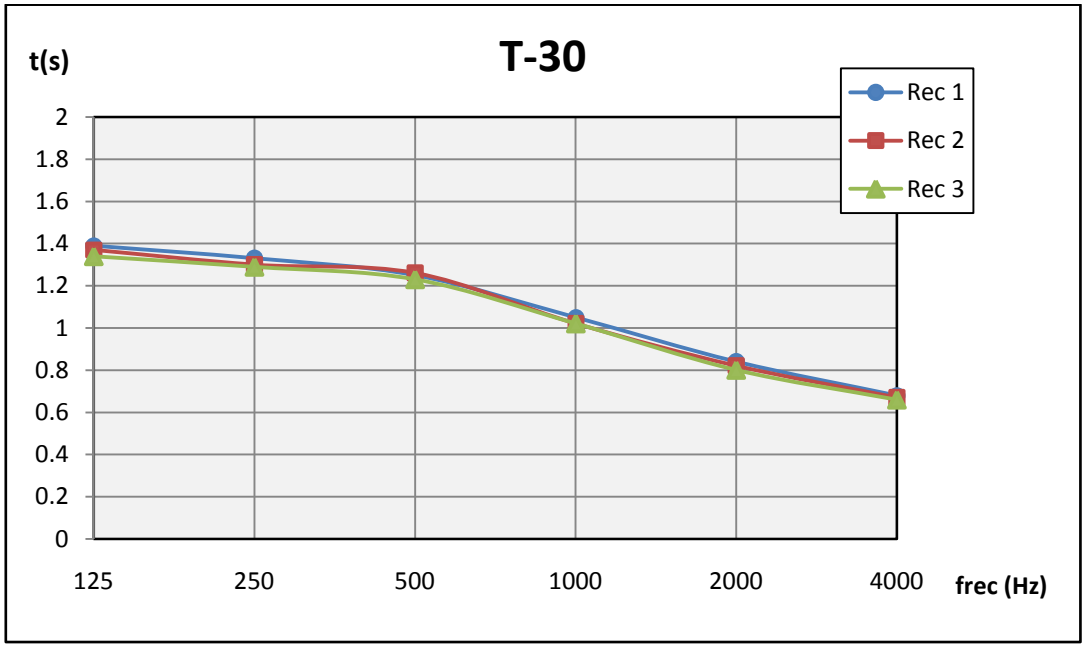


Fig. A1. 23

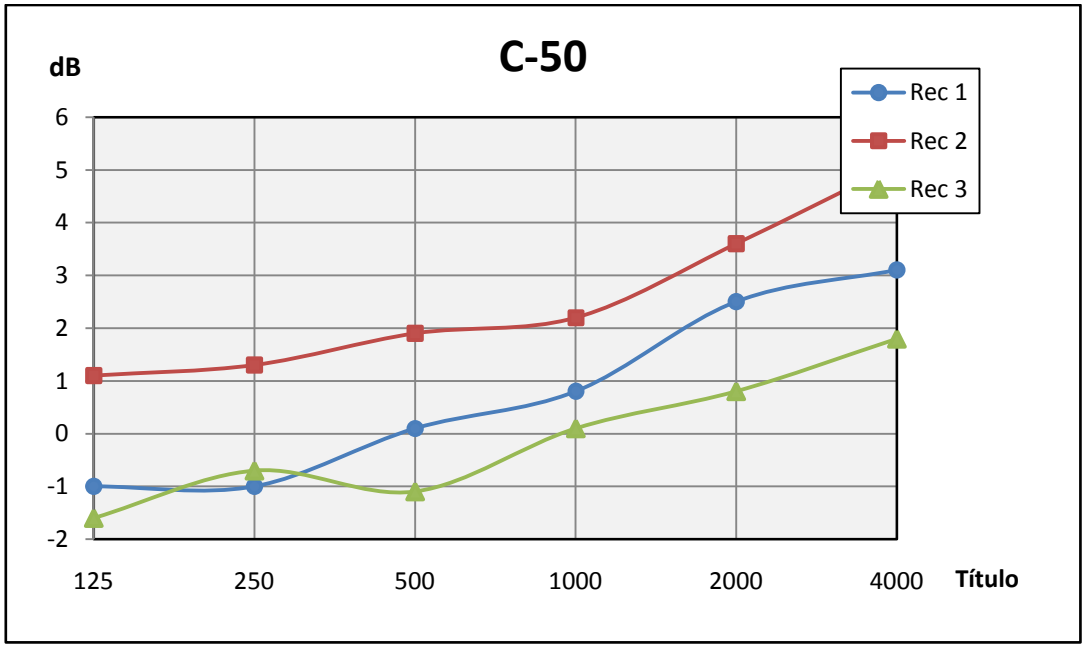


Fig. A1. 24

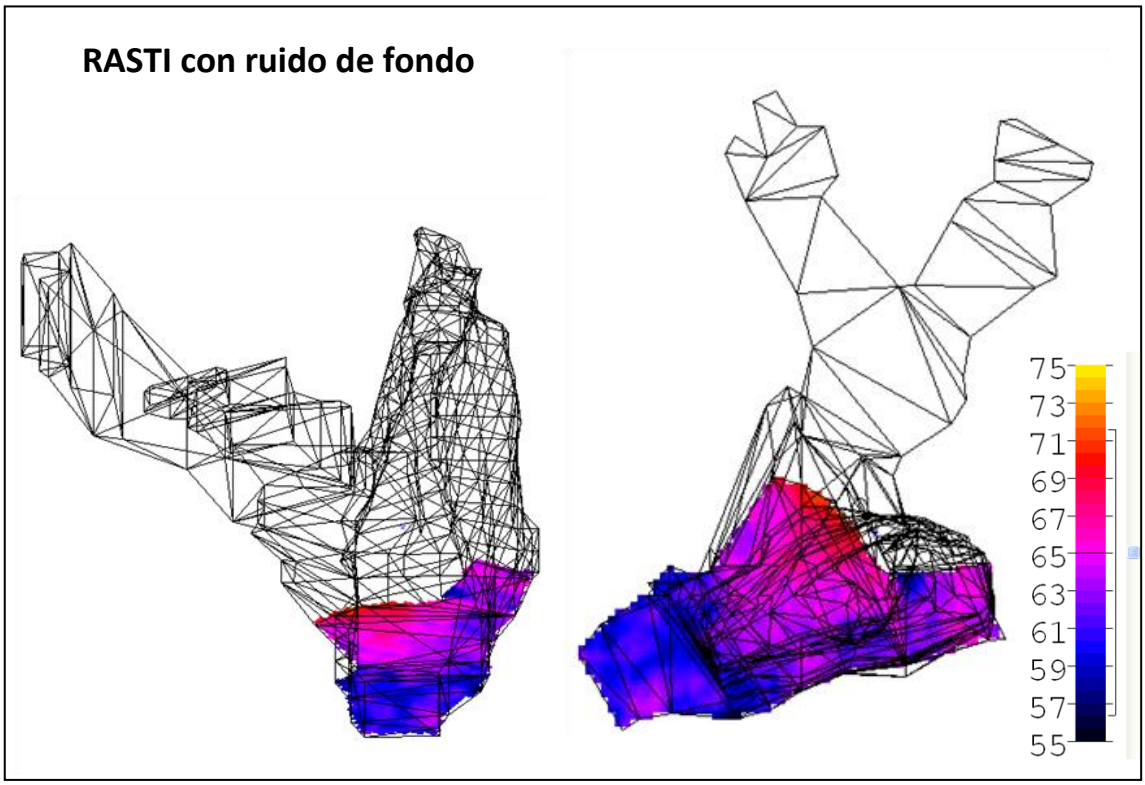


Fig. A1. 25

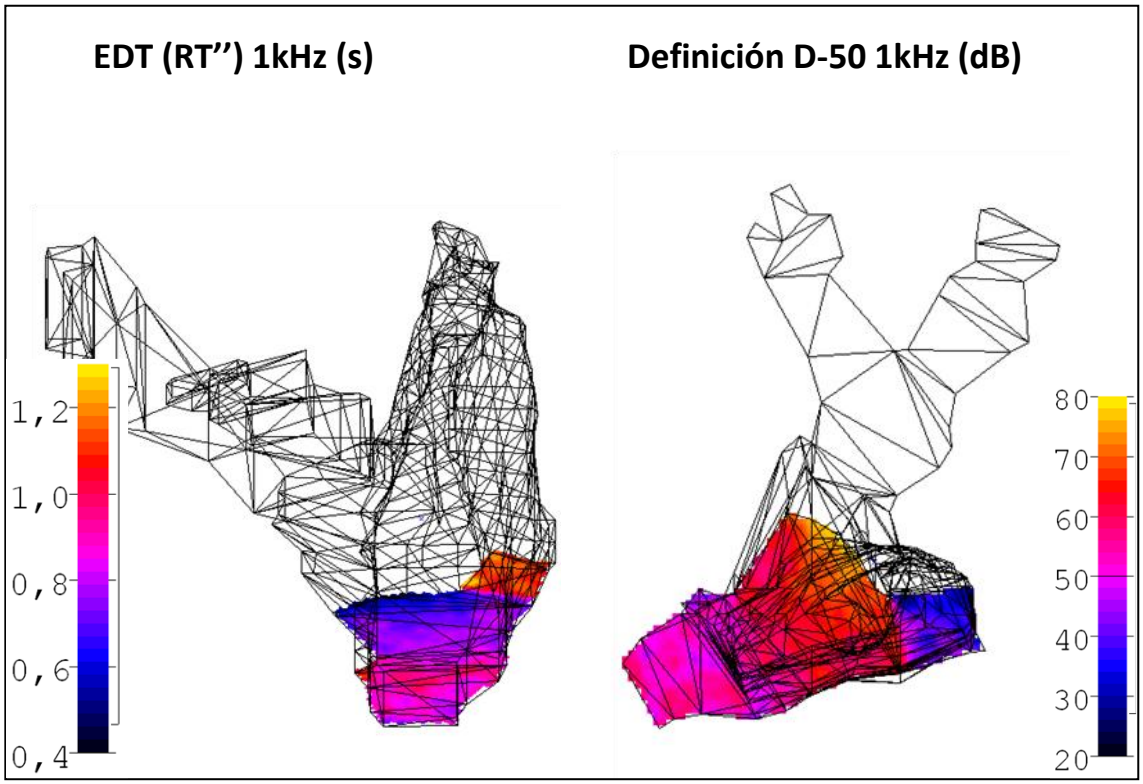


Fig. A1. 26

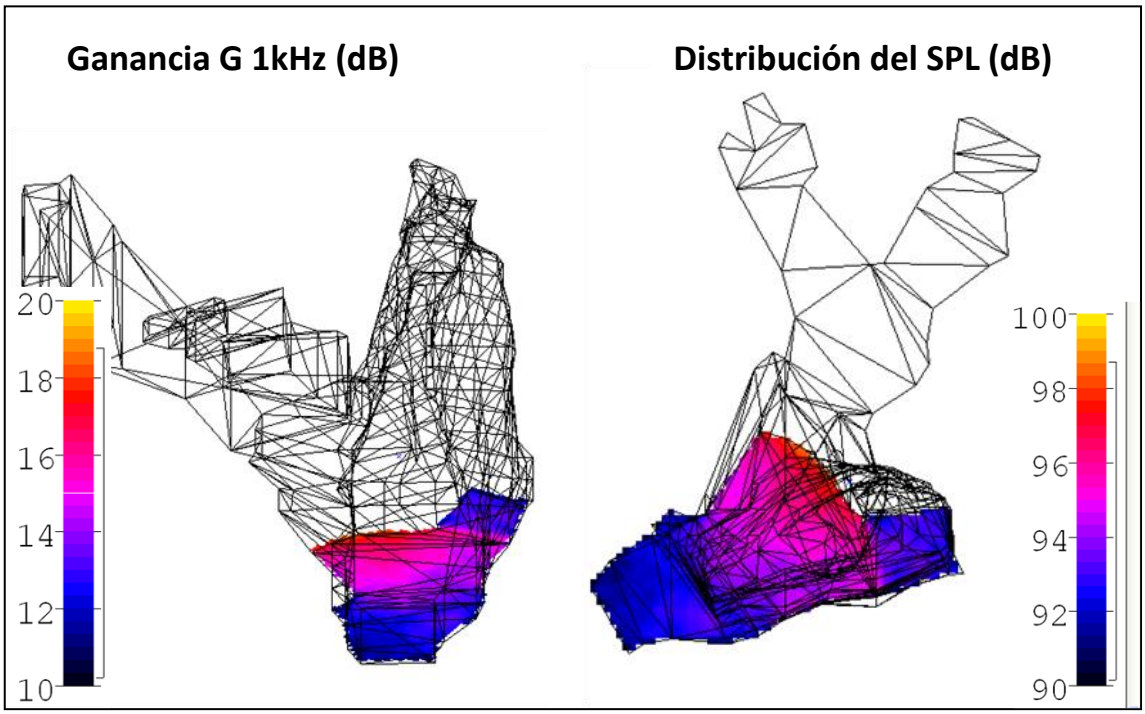


Fig. A1. 27

V[m³]	S[m2]	Recorrido libre medio [m]
729	770	3.79

Fig. A1. 28

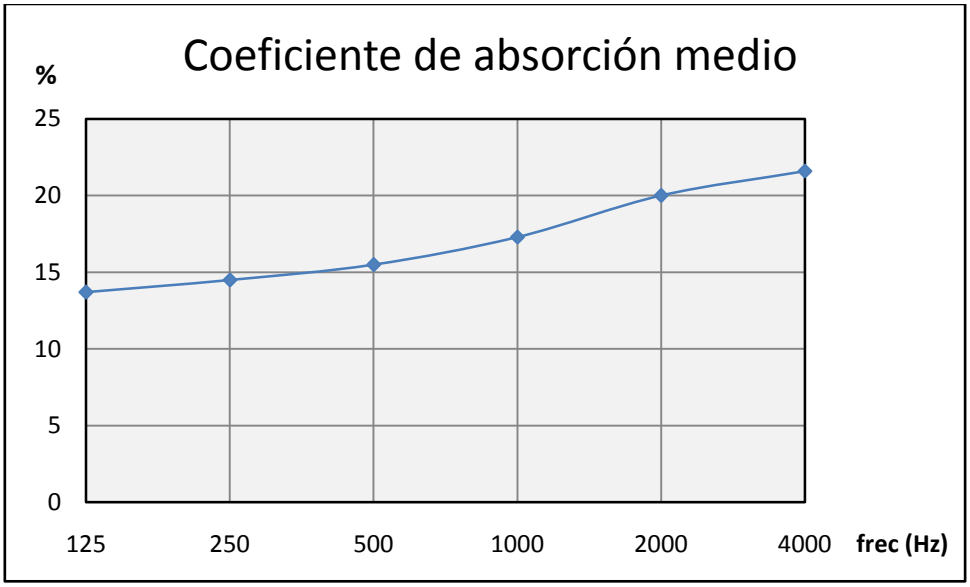


Fig. A1. 29

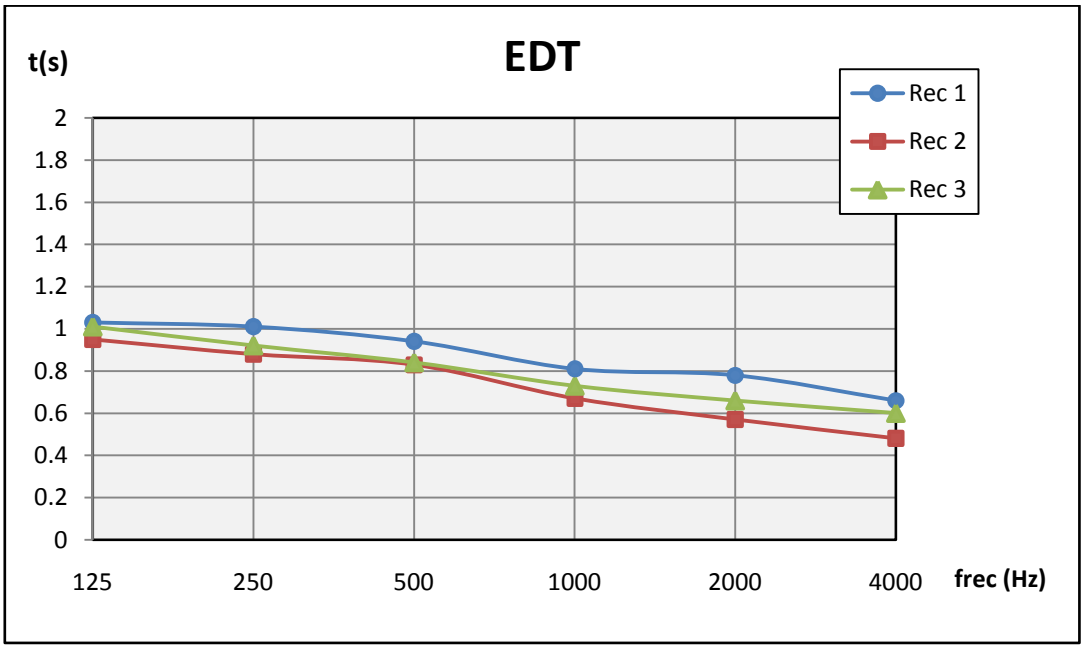


Fig. A1. 30

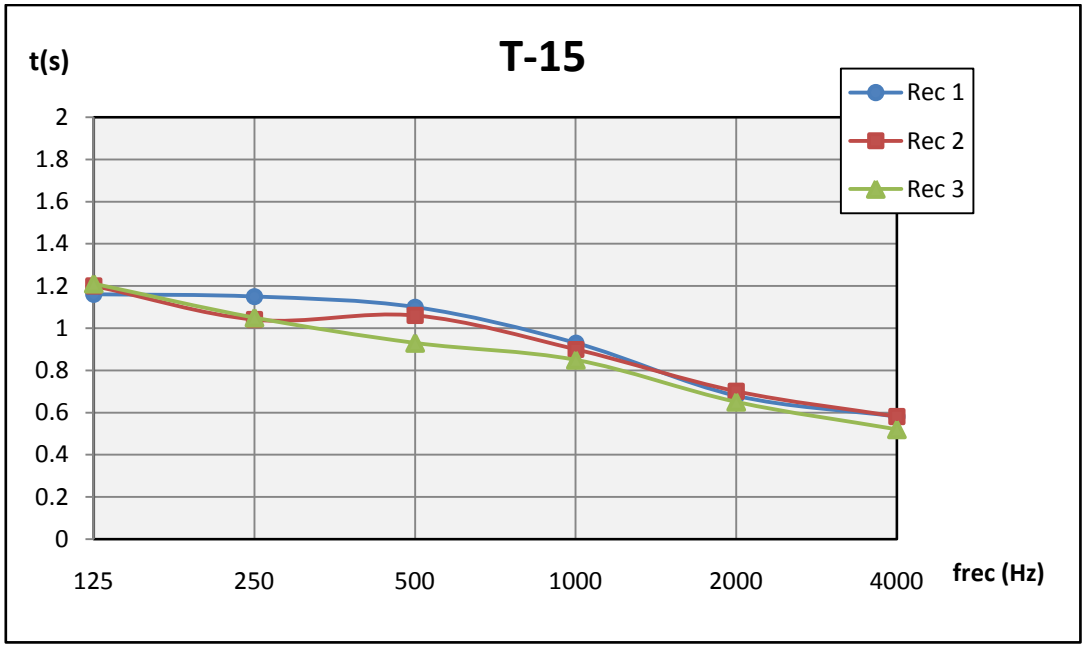


Fig. A1. 31

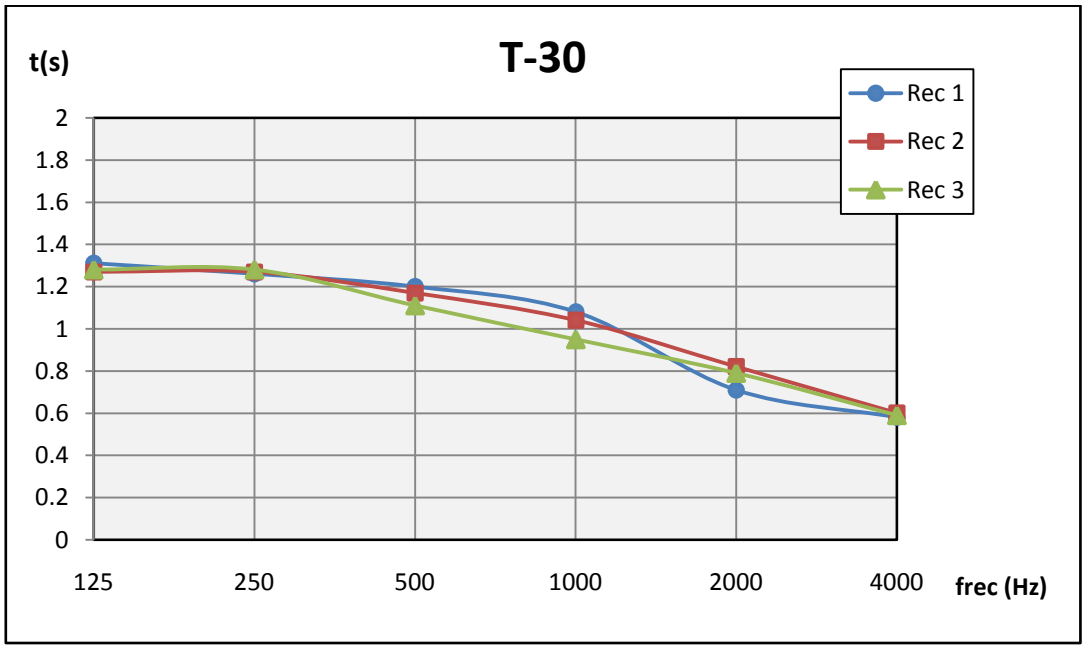


Fig. A1. 32

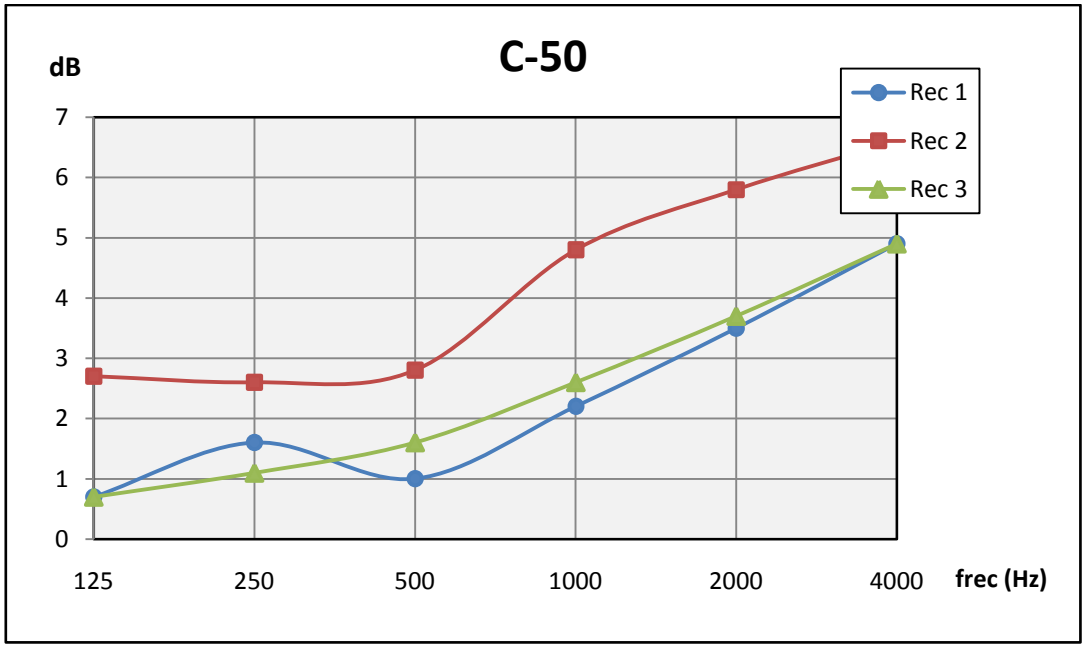


Fig. A1. 33

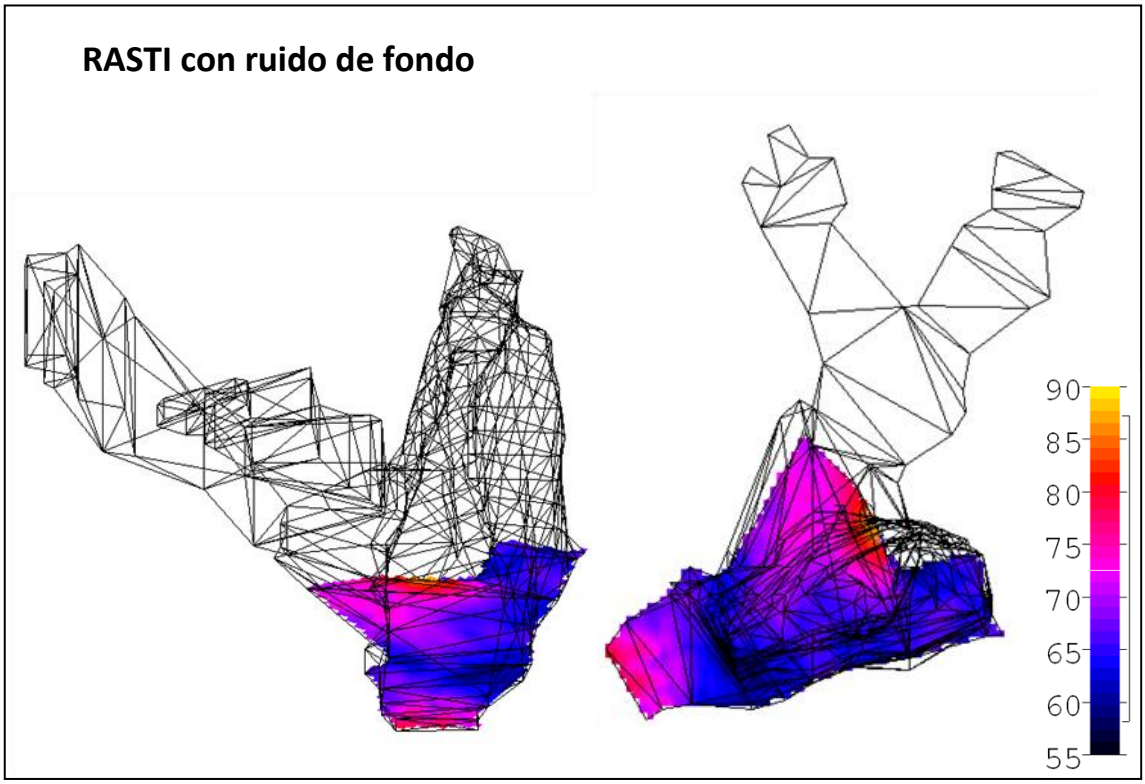


Fig. A1. 34

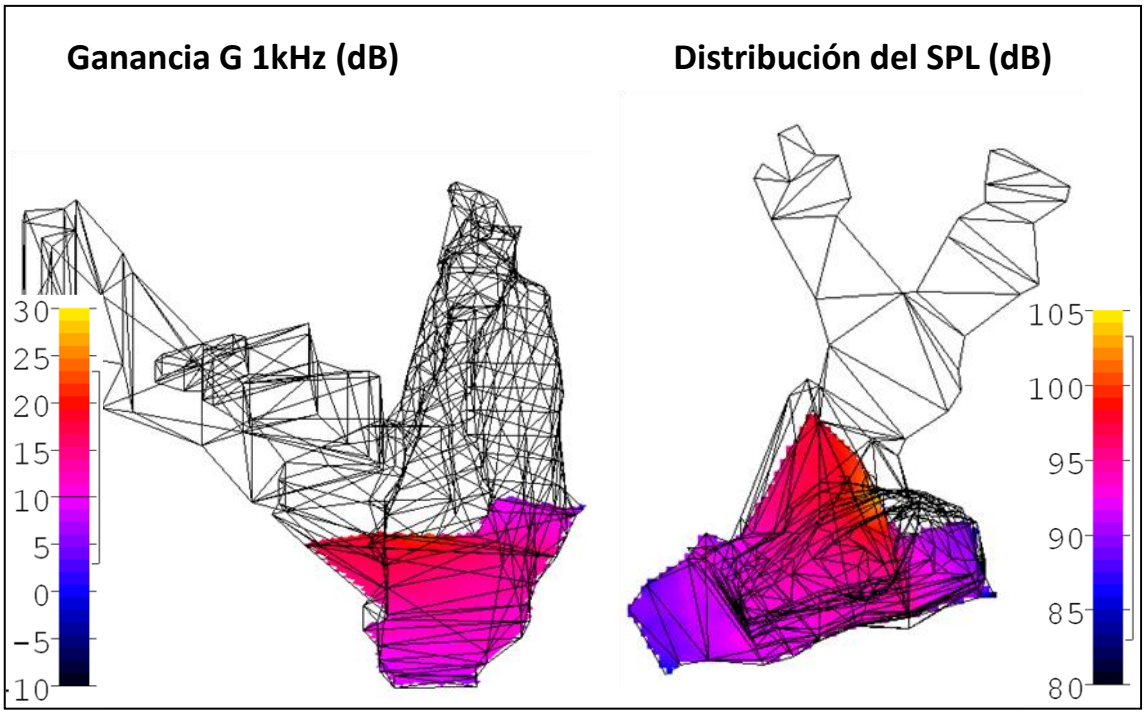


Fig. A1. 35

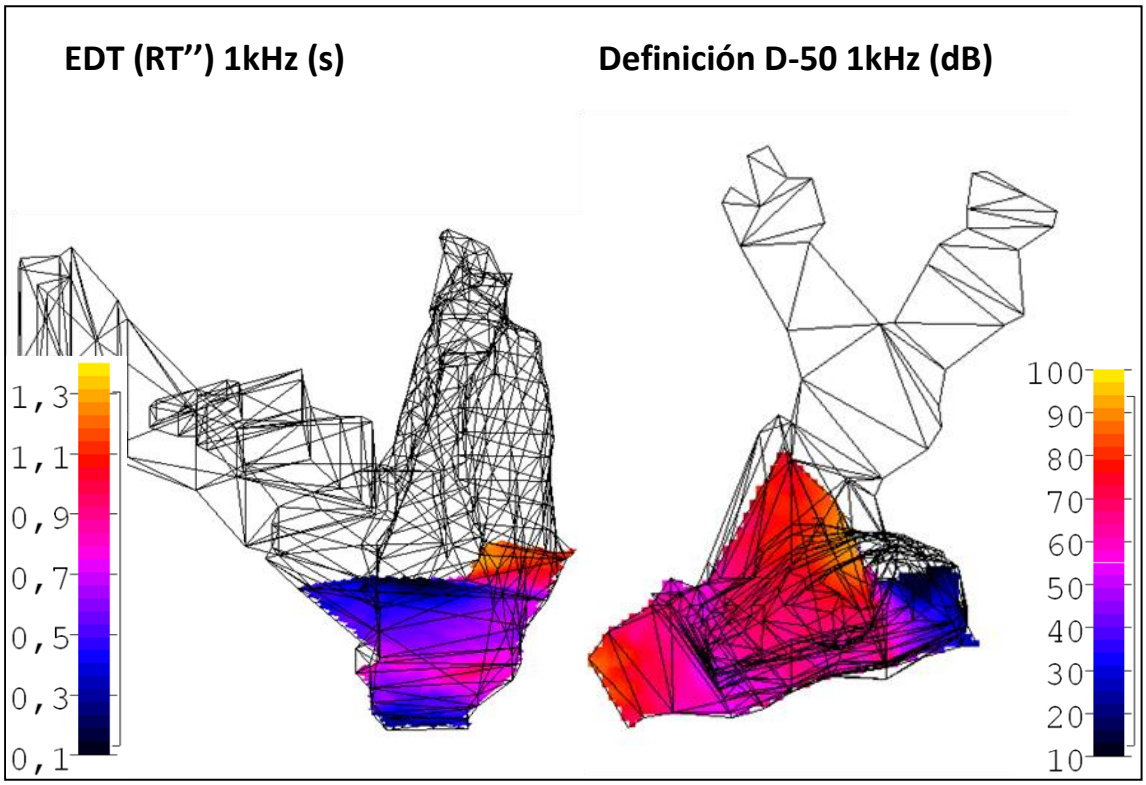


Fig. A1. 36

7.2. Resultados adicionales de la medida

En este anexo se presentan los demás resultados de las simulaciones que por su extensión y repetitividad no se han incluido en el núcleo de la memoria.

Nº Grafica	Parámetro	Presentación
A2. 1	T-30 y EDT para Fuente 1 y receptor 1	Curva tonal
A2. 2	T-30 y EDT para Fuente 1 y receptor 2	Curva tonal
A2. 3	T-30 y EDT para Fuente 1 y receptor 3	Curva tonal
A2. 4	T-30 y EDT para Fuente 2 y receptor 1	Curva tonal
A2. 5	T-30 y EDT para Fuente 2 y receptor 2	Curva tonal
A2. 6	T-30 y EDT para Fuente 2 y receptor 3	Curva tonal
A2. 7	C-50 Fuente S1	Gráfica en función de la frecuencia para todos los receptores
A2. 8	C-50 Fuente S2	Gráfica en función de la frecuencia para todos los receptores
A2. 9	Ts	Gráfica en función de la frecuencia para todos los receptores
A2. 10	STI - S1 R1	Tabla / MTF Matrix
A2. 11	RASTI - S1 R1	Tabla / MTF Matrix
A2. 12	STI - S1 R2	Tabla / MTF Matrix
A2. 13	RASTI - S1 R2	Tabla / MTF Matrix
A2. 14	STI - S1 R3	Tabla / MTF Matrix
A2. 15	RASTI - S1 R3	Tabla / MTF Matrix
A2. 16	STI – S2 R1	Tabla / MTF Matrix
A2. 17	RASTI – S2 R1	Tabla / MTF Matrix
A2. 18	STI – S2 R2	Tabla / MTF Matrix
A2. 19	RASTI – S2 R2	Tabla / MTF Matrix
A2. 20	STI – S2 R3	Tabla / MTF Matrix
A2. 21	RASTI – S2 R3	Tabla / MTF Matrix
A2. 22	Respuesta en frecuencia	S1 R1
A2. 23	Respuesta en frecuencia	S1 R2
A2. 24	Respuesta en frecuencia	S1 R3
A2. 25	Respuesta en frecuencia	S2 R1
A2. 26	Respuesta en frecuencia	S2 R2
A2. 27	Respuesta en frecuencia	S2 R3



Fig. A2. 1

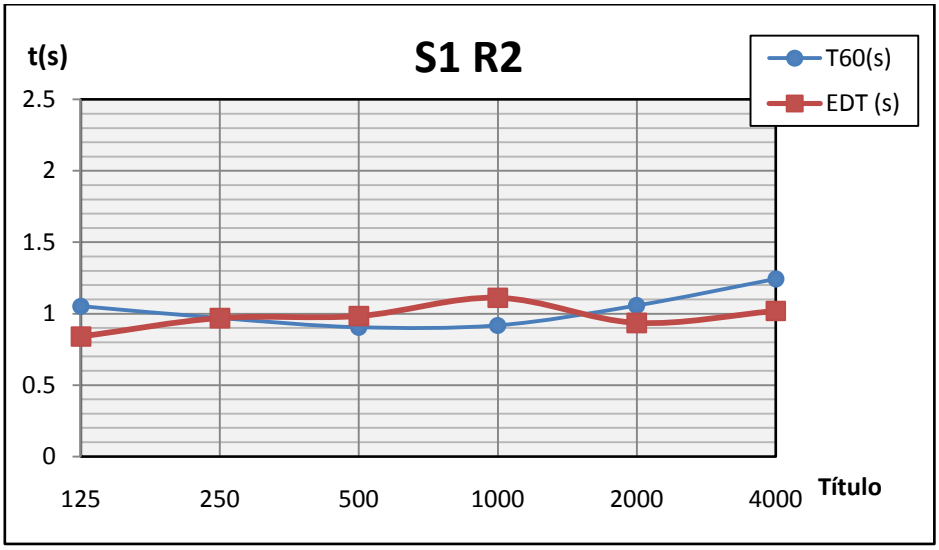


Fig. A2. 2



Fig. A2. 3

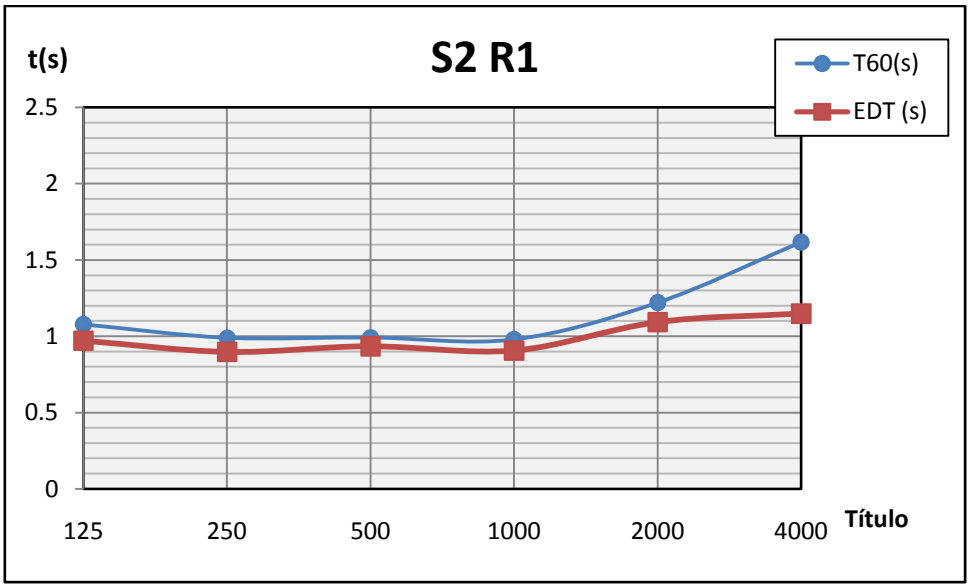


Fig. A2. 4

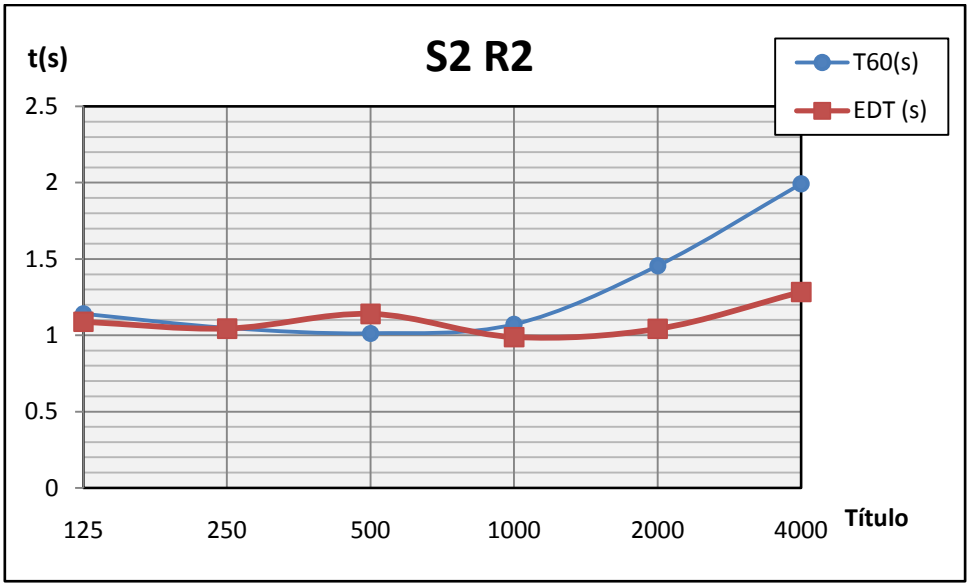


Fig. A2. 5

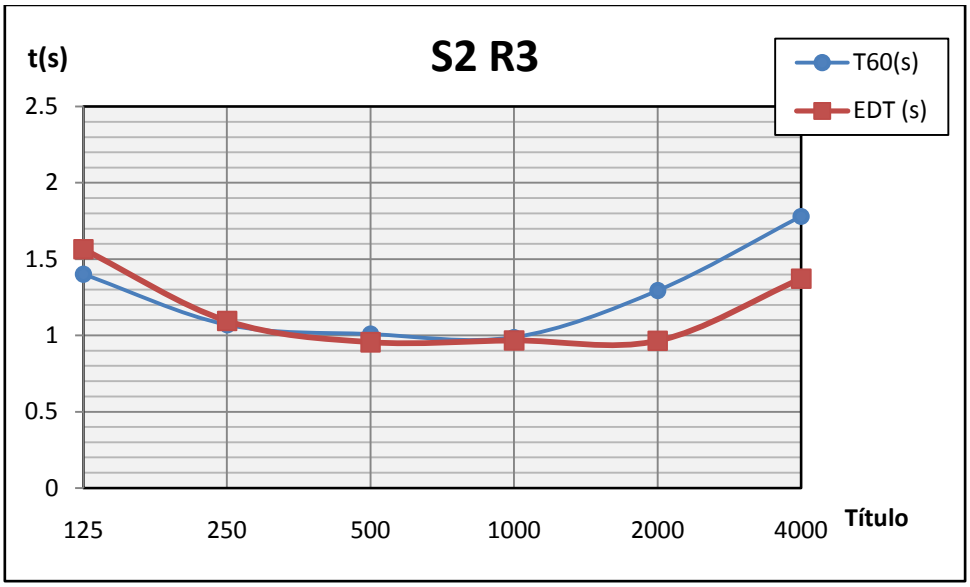


Fig. A2. 6

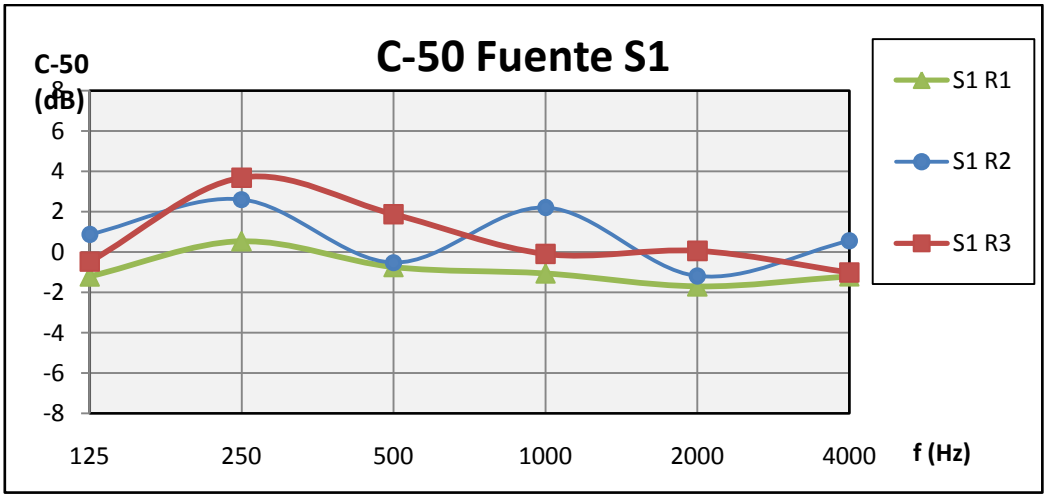


Fig. A2. 7

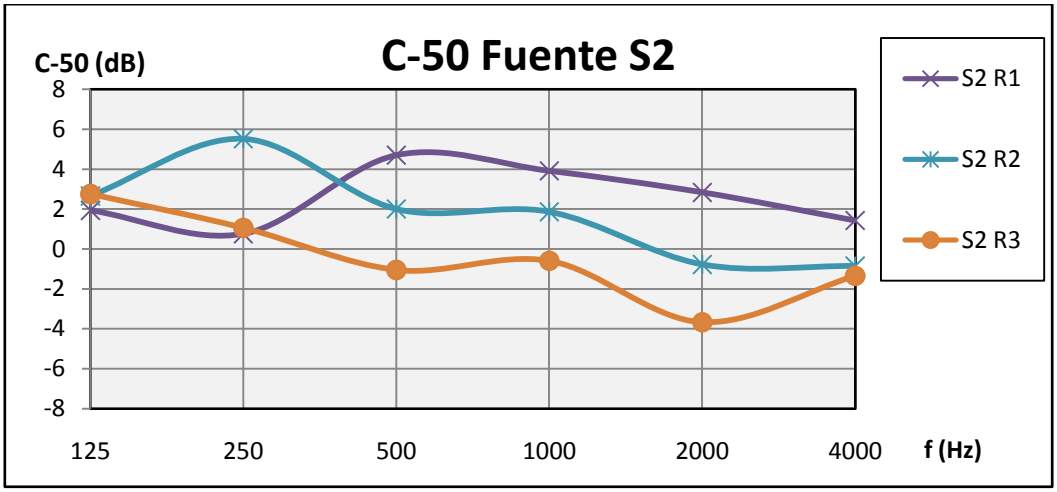


Fig. A2. 8

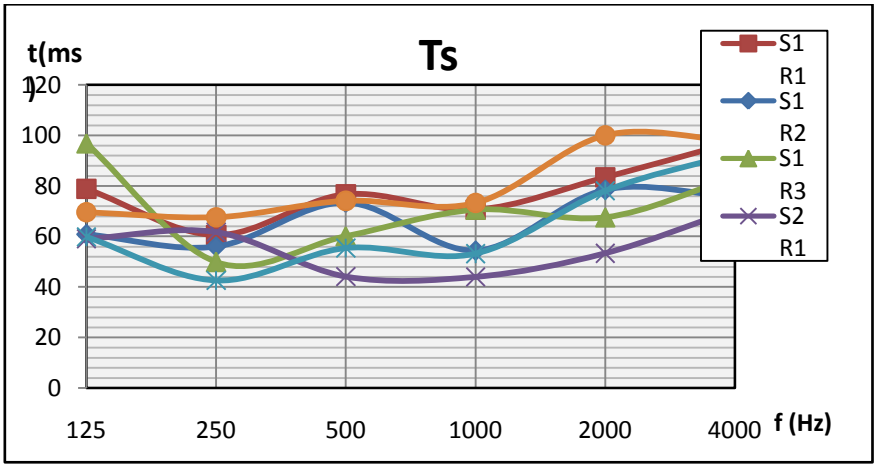


Fig. A2. 9

SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix							
Band	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.63	0.9719	0.9768	0.9725	0.9732	0.9573	0.9339	0.8129
0.80	0.9343	0.9448	0.9326	0.9353	0.9063	0.8651	0.6229
1.00	0.9343	0.9448	0.9326	0.9353	0.9063	0.8651	0.6229
1.25	0.8883	0.9054	0.8798	0.8868	0.8531	0.8123	0.5303
1.60	0.8374	0.8629	0.8188	0.8327	0.8005	0.7772	0.5516
2.00	0.7820	0.8200	0.7528	0.7757	0.7412	0.7366	0.5675
2.50	0.6663	0.7381	0.6159	0.6629	0.6019	0.6135	0.4412
3.15	0.5602	0.6640	0.4880	0.5629	0.4752	0.5117	0.4201
4.00	0.4618	0.5946	0.3811	0.4718	0.3517	0.4040	0.3427
5.00	0.3484	0.4907	0.2754	0.3508	0.2008	0.2805	0.2899
6.30	0.2472	0.3527	0.2179	0.2158	0.1189	0.1947	0.2319
8.00	0.2305	0.2336	0.2167	0.1328	0.1970	0.1886	0.1917
10.00	0.2673	0.1897	0.2677	0.2295	0.2404	0.2195	0.1713
12.50	0.1481	0.1729	0.1765	0.2209	0.2285	0.1721	0.1463
OctTI	0.5913	0.6241	0.5743	0.5854	0.5455	0.5369	0.4482
STI = 0.5501 (male), 0.5442 (female) Rating: FAIR (FAIR)							
(%ALcons = 8.4123)							

Fig. A2. 10

RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix		
Band	500 Hz	2000 Hz
0.71		0.9063
1.00	0.9326	
1.41		0.8005
2.00	0.7528	
2.80		0.5363
4.00	0.3811	
5.60		0.1311
8.00	0.2167	
11.20		0.2392
Octave	STI 0.5713	0.5219
RASTI = 0.5438 Rating: FAIR		

Fig. A2. 11

SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix							
Band	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.63	0.9715	0.9755	0.9737	0.9732	0.9631	0.9464	0.8025
0.80	0.9348	0.9410	0.9352	0.9349	0.9187	0.8916	0.6098
1.00	0.9348	0.9410	0.9352	0.9349	0.9187	0.8916	0.6098
1.25	0.8933	0.8972	0.8836	0.8850	0.8714	0.8497	0.5305
1.60	0.8519	0.8495	0.8231	0.8280	0.8235	0.8201	0.5669
2.00	0.8113	0.8010	0.7563	0.7665	0.7691	0.7840	0.5849
2.50	0.7349	0.7084	0.6134	0.6418	0.6422	0.6782	0.4690
3.15	0.6667	0.6246	0.4730	0.5348	0.5263	0.5892	0.4648
4.00	0.5953	0.5489	0.3457	0.4593	0.4144	0.4983	0.3926
5.00	0.4955	0.4718	0.2124	0.4222	0.2742	0.3898	0.3377
6.30	0.3835	0.4446	0.2036	0.4532	0.1708	0.3005	0.2745
8.00	0.3277	0.4553	0.2928	0.5134	0.1950	0.2598	0.2254
10.00	0.4107	0.4534	0.3332	0.4995	0.2235	0.2444	0.1828
12.50	0.3418	0.4090	0.2259	0.3831	0.1458	0.1874	0.1253
OctTI	0.6446	0.6531	0.5799	0.6367	0.5634	0.5805	0.4587
STI = 0.5778 (male), 0.5705 (female) Rating: FAIR (FAIR)							
(%ALcons = 7,1484)							

Fig. A2. 12

RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix		
Band	500 Hz	2000 Hz
0.71		0.9187
1.00	0.9352	
1.41		0.8235
2.00	0.7563	
2.80		0.5823
4.00	0.3457	
5.60		0.2008
8.00	0.2928	
11.20		0.2074
Octave	STI 0.5826	0.5219
RASTI = 0.5620 Rating: FAIR		

Fig. A2. 13

SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix							
Band	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.63	0.9564	0.9739	0.9720	0.9712	0.9626	0.9418	0.8050
0.80	0.8957	0.9378	0.9319	0.9301	0.9181	0.8807	0.6086
1.00	0.8957	0.9378	0.9319	0.9301	0.9181	0.8807	0.6086
1.25	0.8198	0.8937	0.8803	0.8770	0.8717	0.8318	0.5156
1.60	0.7373	0.8478	0.8233	0.8168	0.8251	0.7958	0.5377
2.00	0.6522	0.8040	0.7652	0.7522	0.7722	0.7535	0.5485
2.50	0.4849	0.7290	0.6578	0.6189	0.6489	0.6313	0.4139
3.15	0.3581	0.6704	0.5707	0.4931	0.5344	0.5233	0.3780
4.00	0.3044	0.6198	0.5012	0.3803	0.4189	0.4132	0.2824
5.00	0.2960	0.5492	0.4269	0.2609	0.2710	0.2757	0.2156
6.30	0.2467	0.5014	0.3851	0.2430	0.1999	0.1625	0.1542
8.00	0.2521	0.5290	0.4242	0.3405	0.3103	0.2008	0.1317
10.00	0.3052	0.5801	0.4277	0.3593	0.4339	0.2864	0.1698
12.50	0.2841	0.5545	0.2996	0.2763	0.4284	0.2967	0.1785
OctTI	0.5442	0.6777	0.6255	0.5909	0.5979	0.5556	0.4270
STI = 0.5751 (male), 0.5714 (female) Rating: FAIR (FAIR)							
(%ALcons = 7.6371)							

Fig. A2. 14

RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix		
Band	500 Hz	2000 Hz
0.71		0.9181
1.00	0.9319	
1.41		0.8251
2.00	0.7652	
2.80		0.5904
4.00	0.5012	
5.60		0.2069
8.00	0.4242	
11.20		0.4605
Octave	STI 0.6266	0.5820
RASTI = 0.6018 Rating: GOOD		

Fig. A2. 15

SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix							
Band	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.63	0.9740	0.9750	0.9777	0.9772	0.9648	0.9415	0.7784
0.80	0.9385	0.9393	0.9465	0.9458	0.9230	0.8831	0.5489
1.00	0.9385	0.9393	0.9465	0.9458	0.9230	0.8831	0.5489
1.25	0.8955	0.8934	0.9077	0.9068	0.8795	0.8401	0.4433
1.60	0.8504	0.8425	0.8663	0.8643	0.8359	0.8099	0.4804
2.00	0.8054	0.7900	0.8260	0.8208	0.7870	0.7714	0.5020
2.50	0.7173	0.6875	0.7578	0.7408	0.6809	0.6637	0.3725
3.15	0.6351	0.5929	0.7095	0.6799	0.5976	0.5783	0.3757
4.00	0.5652	0.5056	0.6696	0.6297	0.5325	0.4911	0.2897
5.00	0.4844	0.3946	0.6092	0.5569	0.4775	0.4040	0.2589
6.30	0.4339	0.3177	0.5554	0.4803	0.4814	0.3612	0.2195
8.00	0.4358	0.3092	0.5456	0.4751	0.5330	0.3848	0.2088
10.00	0.3497	0.3034	0.4798	0.4518	0.5446	0.4280	0.2196
12.50	0.3135	0.2864	0.3728	0.4341	0.5003	0.4094	0.2083
OctTI	0.6444	0.6190	0.6851	0.6732	0.6513	0.6036	0.4294
STI = 0.6248 (male), 0.6137 (female) Rating: GOOD							
(%ALcons = 6.1524)							

Fig. A2. 16

RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix		
Band	500 Hz	2000 Hz
0.71		0.9230
1.00	0.9465	
1.41		0.8359
2.00	0.8260	
2.80		0.6362
4.00	0.6696	
5.60		0.4684
8.00	0.5456	
11.20		0.5230
Octave	STI 0.6926	0.6342
RASTI = 0.6601 Rating: GOOD		

Fig. A2. 17

SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix							
Band	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.63	0.9744	0.9783	0.9726	0.9749	0.9600	0.9326	0.8115
0.80	0.9388	0.9481	0.9334	0.9395	0.9115	0.8630	0.6263
1.00	0.9388	0.9481	0.9334	0.9395	0.9115	0.8630	0.6263
1.25	0.8945	0.9109	0.8829	0.8947	0.8602	0.8101	0.5449
1.60	0.8460	0.8723	0.8270	0.8449	0.8092	0.7752	0.5722
2.00	0.7948	0.8363	0.7704	0.7929	0.7532	0.7335	0.5841
2.50	0.6862	0.7792	0.6700	0.6915	0.6256	0.6067	0.4519
3.15	0.5748	0.7425	0.5991	0.6059	0.5160	0.5096	0.4265
4.00	0.4729	0.7177	0.5531	0.5358	0.4190	0.4096	0.3369
5.00	0.3975	0.6932	0.5057	0.4577	0.3119	0.2995	0.2756
6.30	0.4751	0.6752	0.4464	0.4051	0.2369	0.2003	0.2244
8.00	0.6184	0.6384	0.4207	0.4236	0.2111	0.2117	0.2184
10.00	0.6891	0.5797	0.4413	0.4881	0.2182	0.2860	0.2436
12.50	0.5009	0.4733	0.4641	0.5015	0.2109	0.2633	0.2138
OctTI	0.6639	0.7143	0.6444	0.6509	0.5682	0.5478	0.4609
STI = 0.5908 (male), 0.5809 (female) Rating: FAIR							
(%ALcons = 6.5707)							

Fig. A2. 18

RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix		
Band	500 Hz	2000 Hz
0.71		0.9115
1.00	0.9334	
1.41		0.8092
2.00	0.7704	
2.80		0.5676
4.00	0.5531	
5.60		0.2632
8.00	0.4207	
11.20		0.2159
Octave	STI 0.6355	0.5501
RASTI = 0.5881 Rating: FAIR		

Fig. A2. 19

SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix							
Band	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.63	0.9563	0.9704	0.9724	0.9722	0.9580	0.9237	0.8053
0.80	0.8995	0.9280	0.9327	0.9327	0.9073	0.8477	0.6036
1.00	0.8995	0.9280	0.9327	0.9327	0.9073	0.8477	0.6036
1.25	0.8364	0.8737	0.8810	0.8816	0.8551	0.7953	0.5014
1.60	0.7797	0.8143	0.8228	0.8236	0.8068	0.7658	0.5218
2.00	0.7336	0.7547	0.7615	0.7613	0.7566	0.7277	0.5403
2.50	0.6703	0.6439	0.6382	0.6320	0.6378	0.5956	0.4085
3.15	0.6454	0.5510	0.5211	0.5122	0.5278	0.4869	0.3681
4.00	0.6358	0.4836	0.4135	0.4097	0.4275	0.3643	0.2791
5.00	0.5995	0.4340	0.2829	0.2952	0.3000	0.2245	0.2080
6.30	0.5317	0.3986	0.1956	0.2058	0.1597	0.1234	0.1271
8.00	0.4582	0.3592	0.2197	0.2028	0.0316	0.1990	0.1150
10.00	0.4413	0.2718	0.2433	0.2432	0.0727	0.3033	0.1606
12.50	0.4553	0.3283	0.2316	0.2513	0.1161	0.2684	0.1520
OctTI	0.6364	0.6125	0.5803	0.5809	0.5197	0.5290	0.4171
STI = 0.5393 (male), 0.5300 (female) Rating: FAIR							
(%ALcons = 8.7016)							

Fig. A2. 20

RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX – MTF Matrix		
Band	500 Hz	2000 Hz
0.71		0.9073
1.00	0.9327	
1.41		0.8068
2.00	0.7615	
2.80		0.5799
4.00	0.4135	
5.60		0.2272
8.00	0.2197	
11.20		0.1054
Octave	STI 0.5786	0.5194
RASTI = 0.5457 Rating: FAIR		

Fig. A2. 21

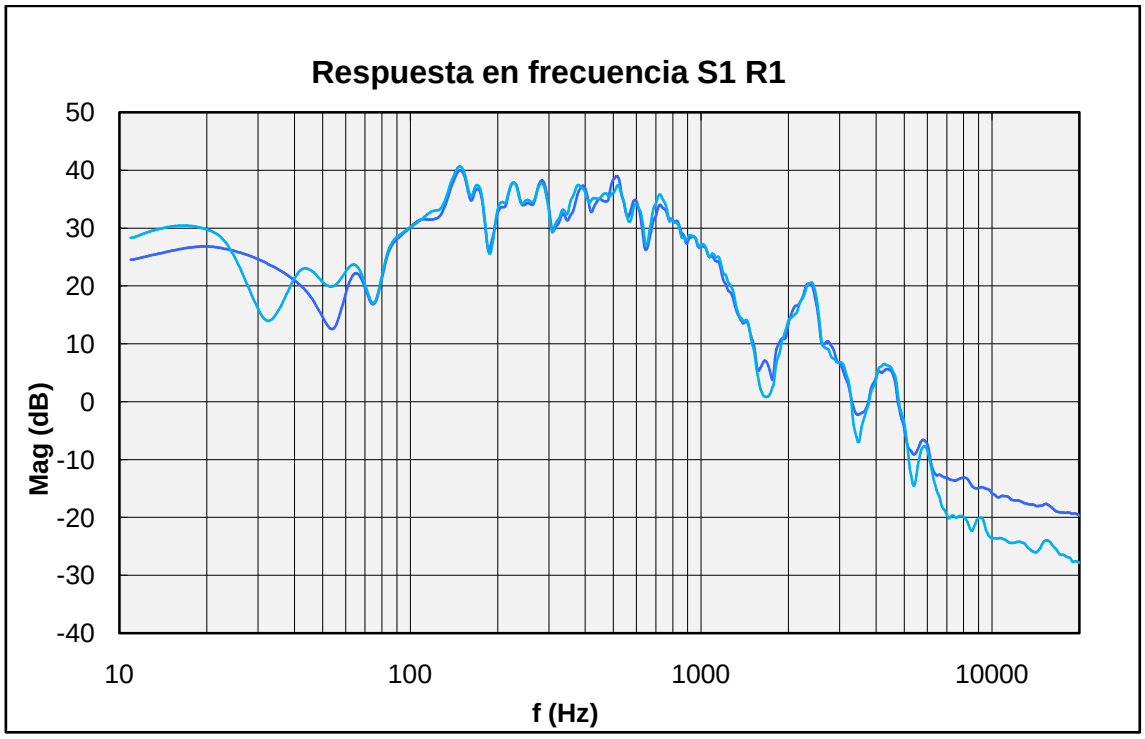


Fig. A2. 22

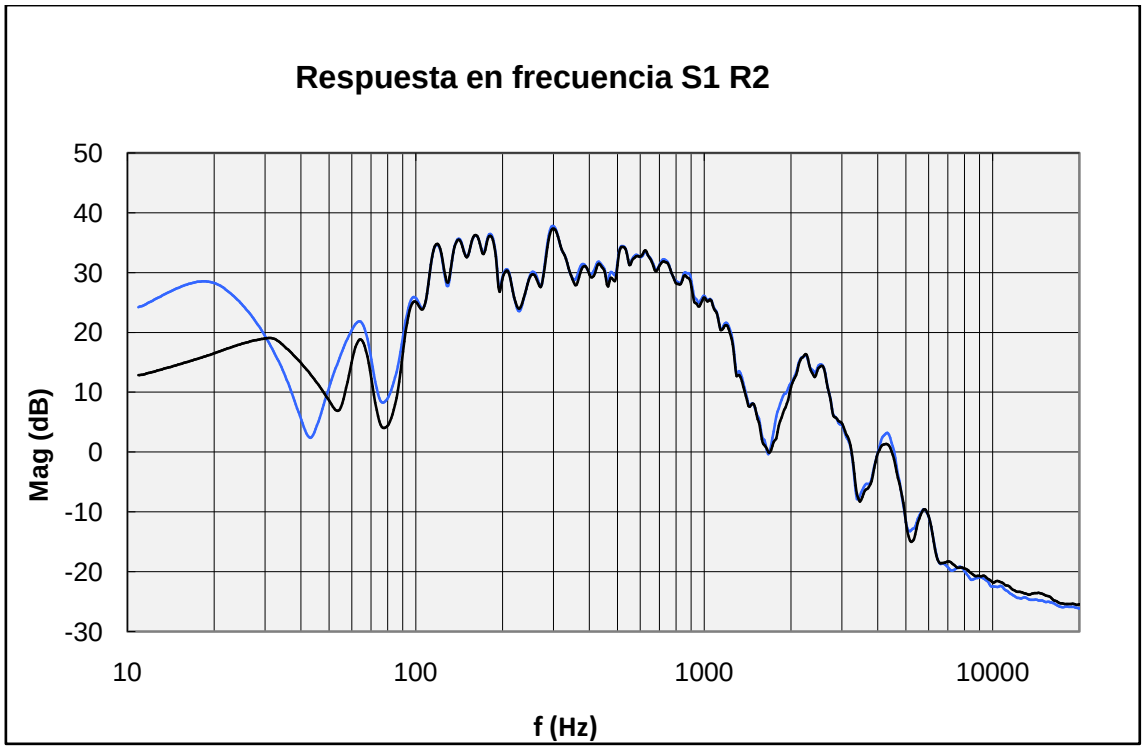


Fig. A2. 23

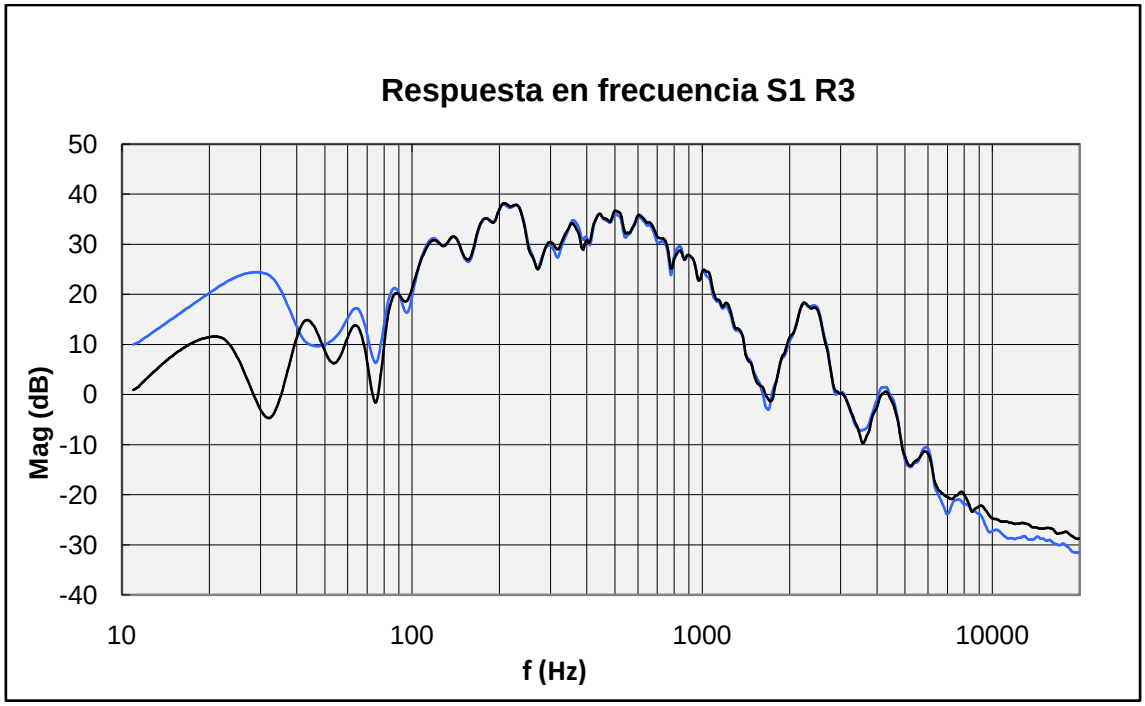


Fig. A2. 24

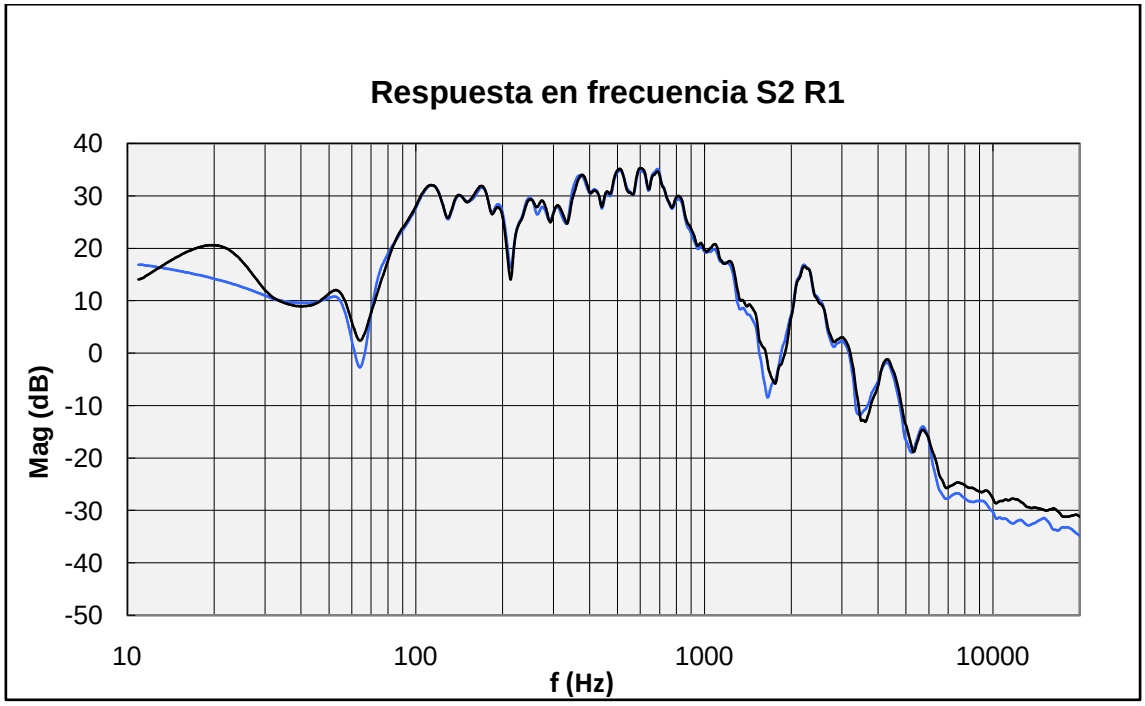


Fig. A2. 25

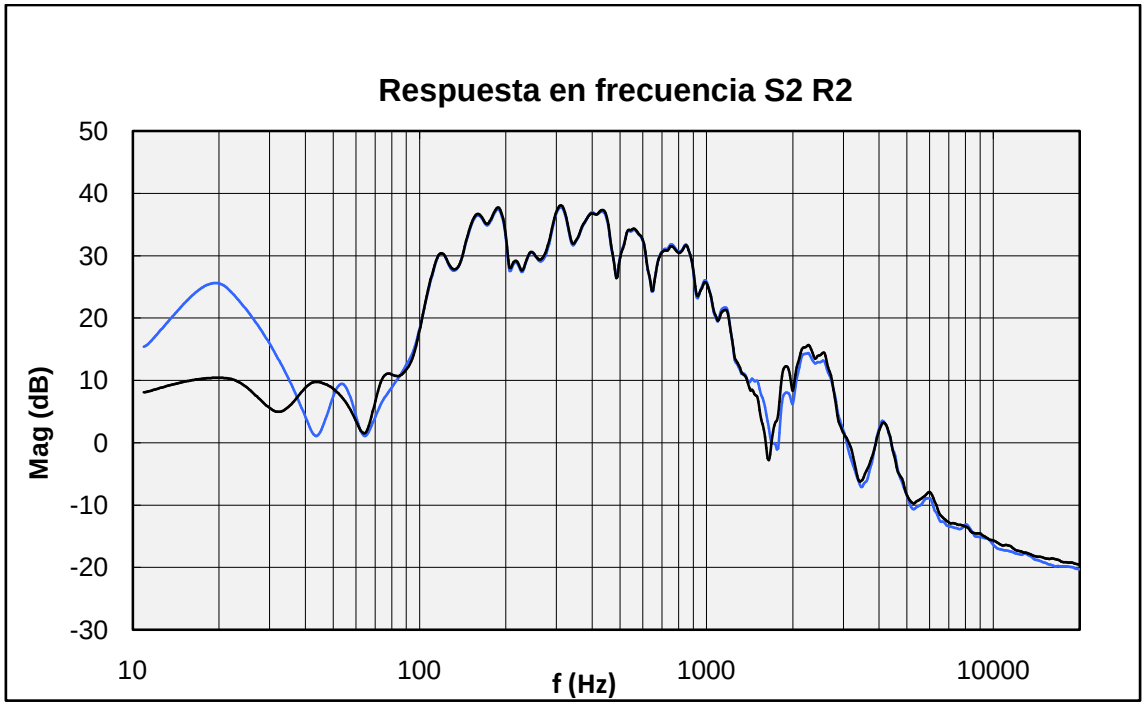


Fig. A2. 26

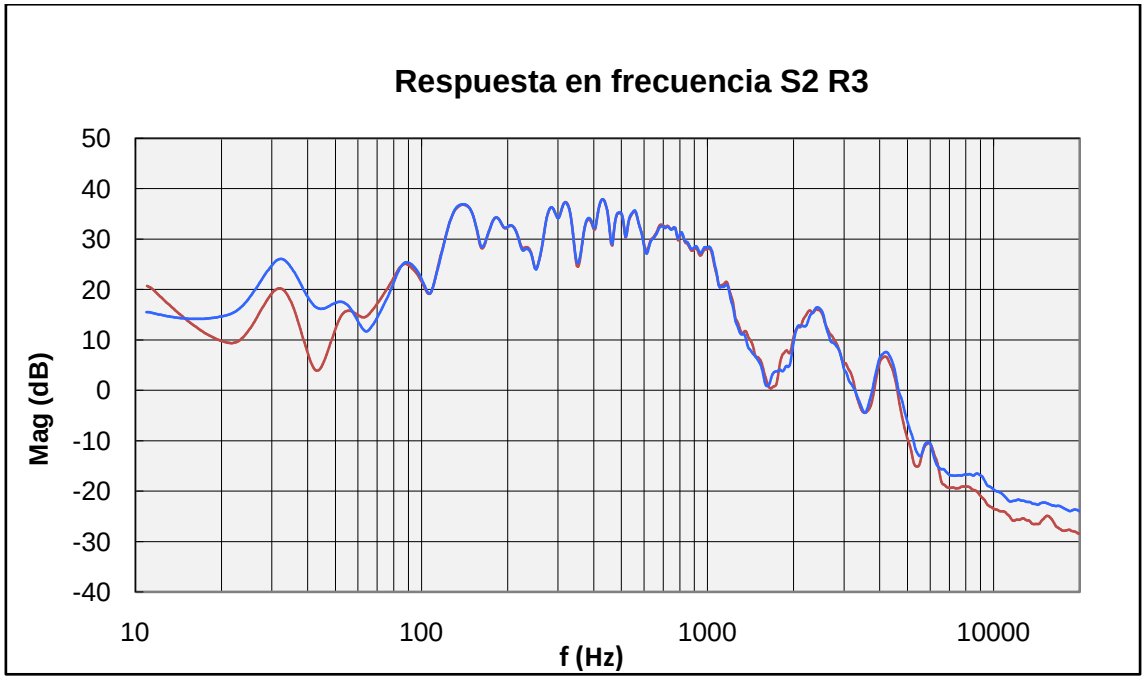


Fig. A2. 27

7.3. Índice de ficheros anexos

[File 1] Fichero de exportación Femlab: cova4.mph
[File 2] Fichero de fuente sonora: src.loc
[File 3] Fichero de receptores sonoros: rec.loc
[File 4] Modelo *"estado acual"*
[File 5] Modelo Interpolado
[File 6] Modelo *"Colmatado2m"*
[File 7] Modelo *"Colmatado4m"*
[File 8] Resultados de las simulaciones
[File 9] Respuestas MLS medidas
[File 10] Respuestas *h(t) medidas*