



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Acústica de salas

Dr. Ing. Ernesto Accolti



CONICET



FACULTAD DE
INGENIERÍA

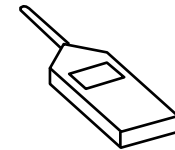
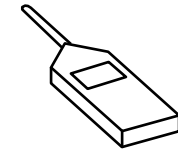
Contenidos

- Introducción
- Breve reseña histórica
- Contenido en frecuencia
- Recreo: 3 salas de concierto con excelente calidad acústica

- El problema de acústica de salas y sus métodos
- Fuentes (directividad y respuesta en frecuencia)
- Medio (métodos para caracterizarlo)
- Receptores (psicoacústica, descriptores clásicos y nuevos)

Propósito y herramientas

- Salas existentes con buena calidad
 - **Conservar** el patrimonio histórico y cultural
- Salas existentes con deficiencias
 - Identificación deficiencias, desarrollo de **soluciones** y realizar pronósticos
- Salas proyectadas a futuro
 - **Proyectar acústica de calidad**



Otras aplicaciones

- Electroacústica:
 - Sistemas inteligentes (Canceladores de eco, seguidores de oyente, ecualización automática, etc.)
 - Mapas de fuentes sonoras y objetos
 - Cines, estudios de grabación, edición de audio-video, etc
 - ...
- Mediciones acústicas
 - Dispositivos electroacústicos (alarmas, sirenas, instalaciones de audio ...)
 - Piezas mecánicas (autopartes, maquinas industriales, ...)
- Salud en el trabajo (Higiene y seguridad)
 - Predecir dosis de ruido y proyectar valores saludables
- ...

Acústica Moderna

- En el siglo XIX comienza la acústica como ciencia y aparecen las primeras publicaciones
 - Hermann von Helmholtz (1860) *Sensations of Tone*
 - John W. Strutt Lord Rayleigh (1877) *Theory of Sound I*, la II parte entre 1894 y 1896
- Estos libros recopilan conocimientos cuyas bases datan del siglo XVII, como la ley de Hooke (Newton, Fourier, Euler)
- Las fuentes sonoras no eran muy controlables en esos días (fuentes naturales) y el instrumento más preciso de detección era una llama
- Al mismo tiempo (1870s) se patentaba el parlante de bobina móvil y el teléfono (primer micrófono)

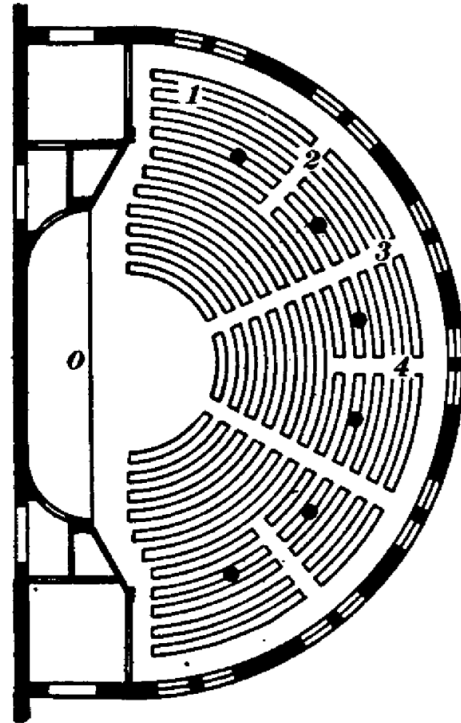
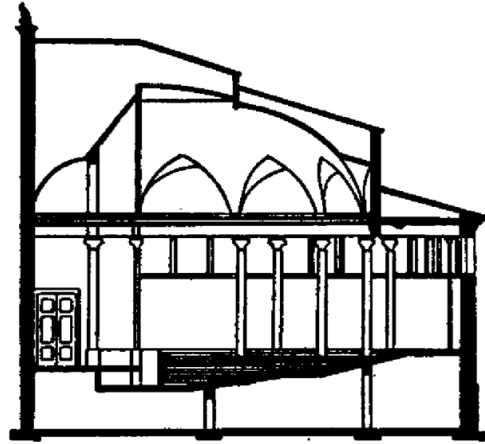
La rama de Acústica de Salas

Wallace Clement Sabine

- En 1885, el auditorio del Fogg Art Museum, de la Universidad de Harvard, evidenciaba serios defectos acústicos. Sabine, un joven profesor de Física, fue comisionado para buscar una solución. Después de dos años de investigaciones, pudo resolver el problema
- Recién en 1898 logró obtener la ecuación del tiempo de reverberación (TR), mientras trabajaba en el proyecto del Boston Symphony Hall

$$T \approx 0,161 \frac{V}{A} \qquad A \approx \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_N S_N$$

Fogg Art Museum

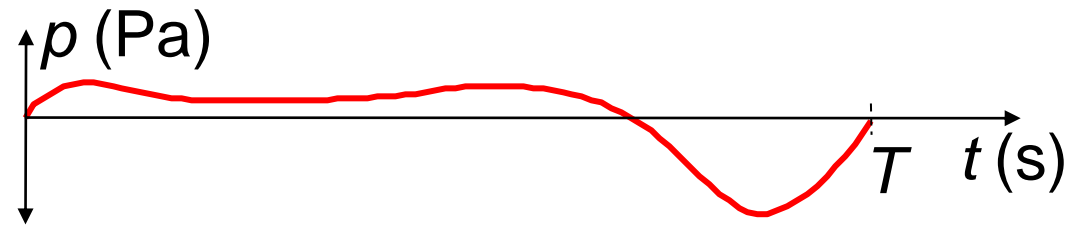


Boston Symphony Hall

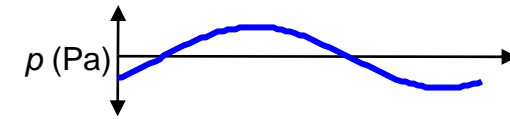
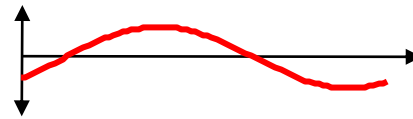


Contenido en
frecuencias de un sonido

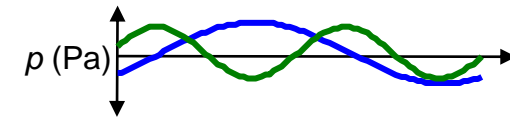
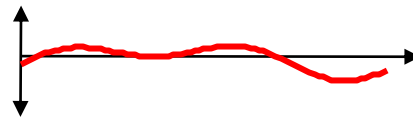
Sonidos periódicos y serie de Fourier



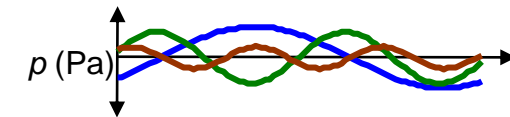
$$p(t) = P_1 \cos(2\pi ft + \varphi_1)$$



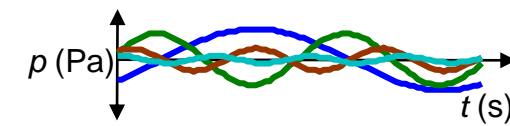
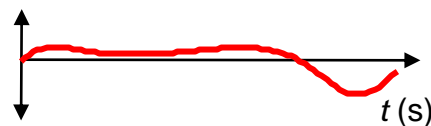
$$p(t) = P_1 \cos(2\pi ft + \varphi_1) + P_2 \cos(4\pi ft + \varphi_2)$$



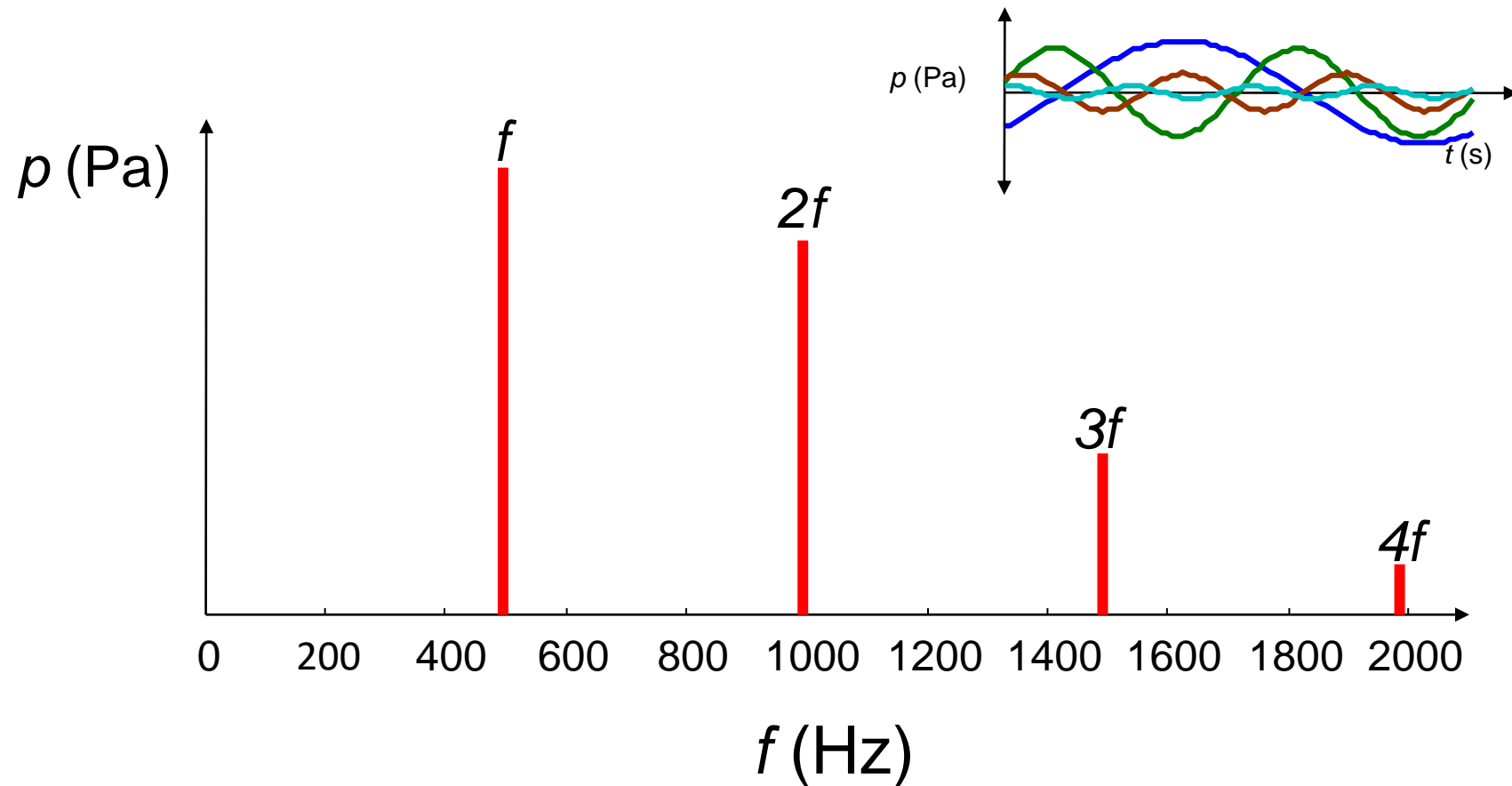
$$p(t) = P_1 \cos(2\pi ft + \varphi_1) + P_2 \cos(4\pi ft + \varphi_2) + P_3 \cos(6\pi ft + \varphi_3)$$



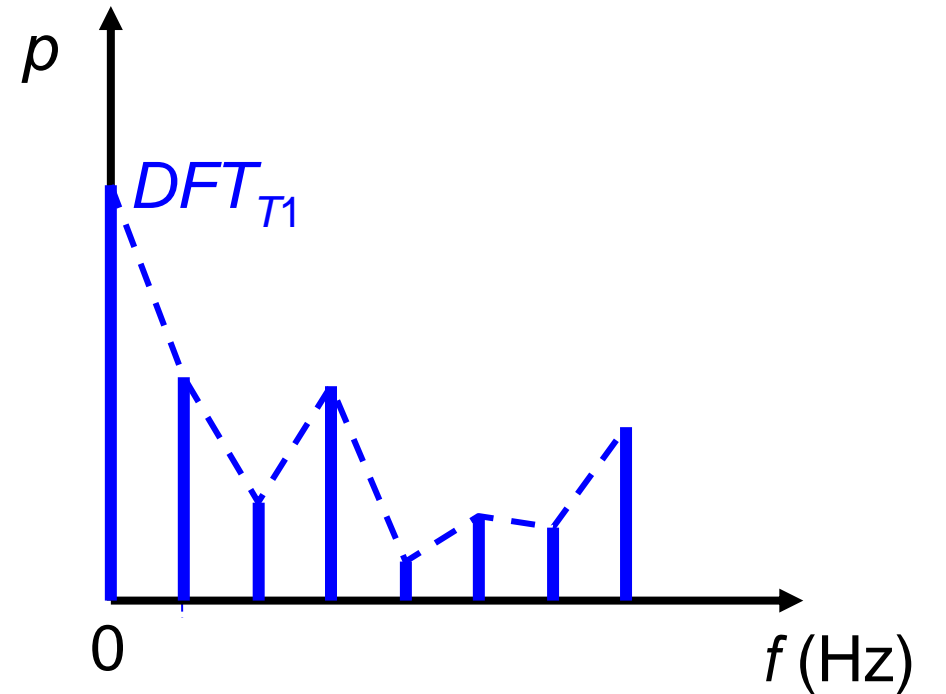
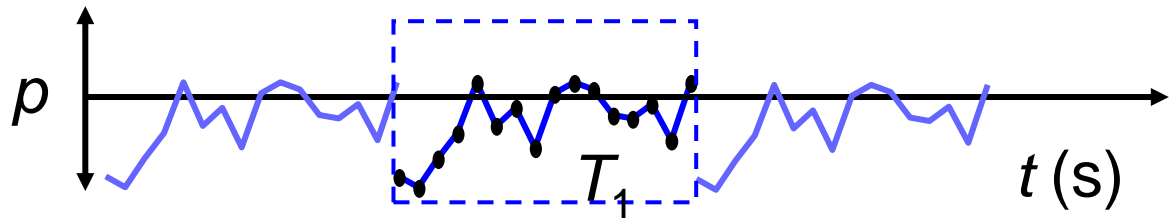
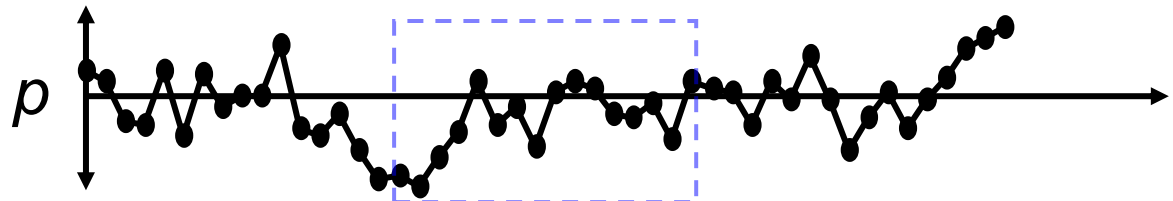
$$p(t) = P_1 \cos(2\pi ft + \varphi_1) + P_2 \cos(4\pi ft + \varphi_2) + P_3 \cos(6\pi ft + \varphi_3) + P_4 \cos(8\pi ft + \varphi_4)$$



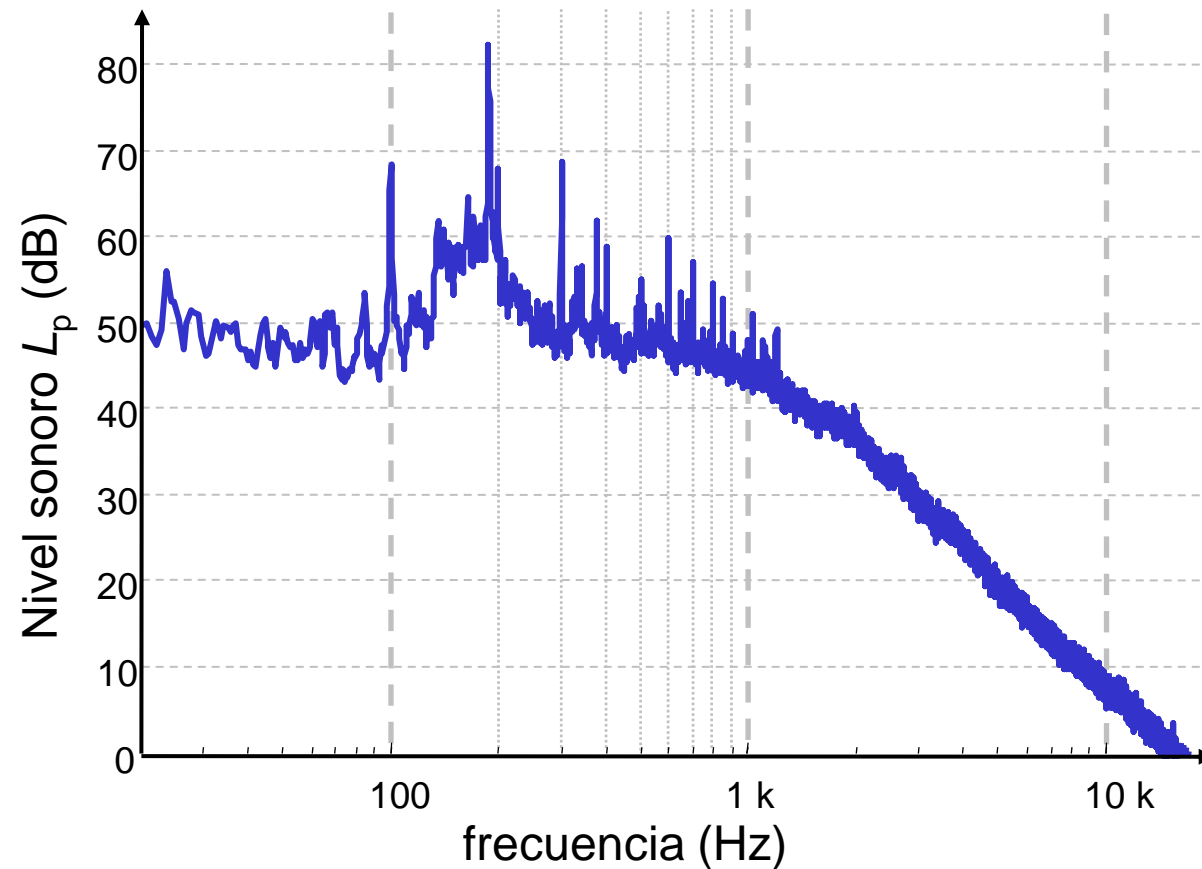
Sonidos periódicos y serie de Fourier



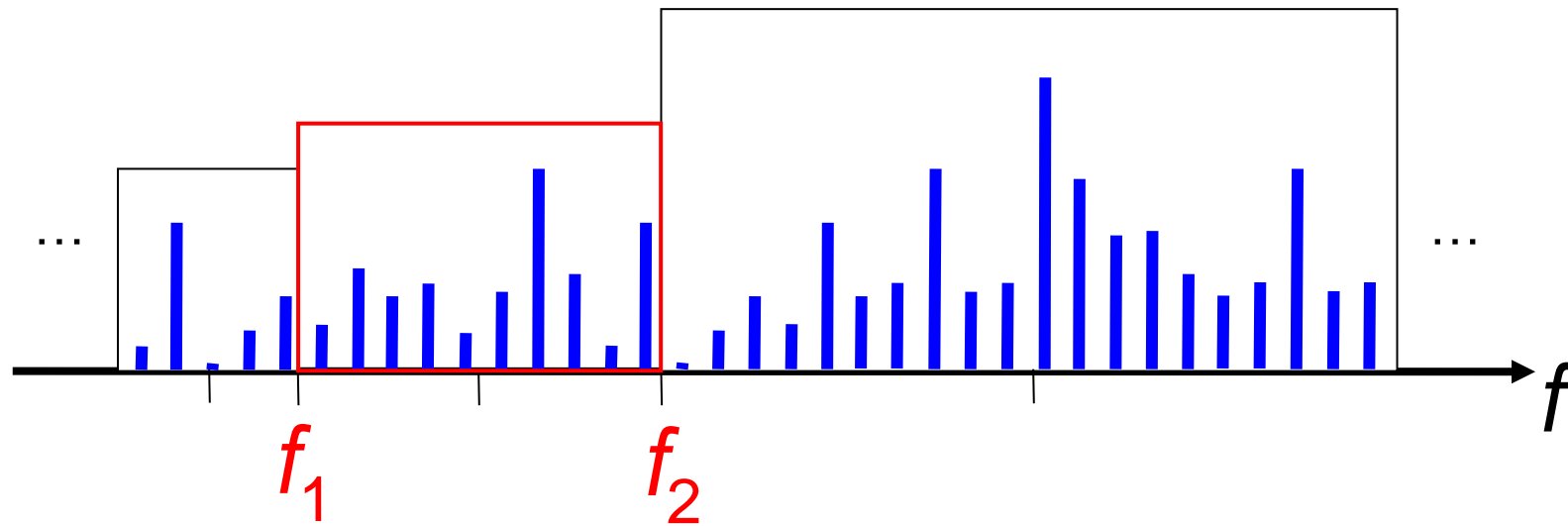
Transformada de Fourier discreta



Espectro de un sonido (Transformada discreta aplicada)

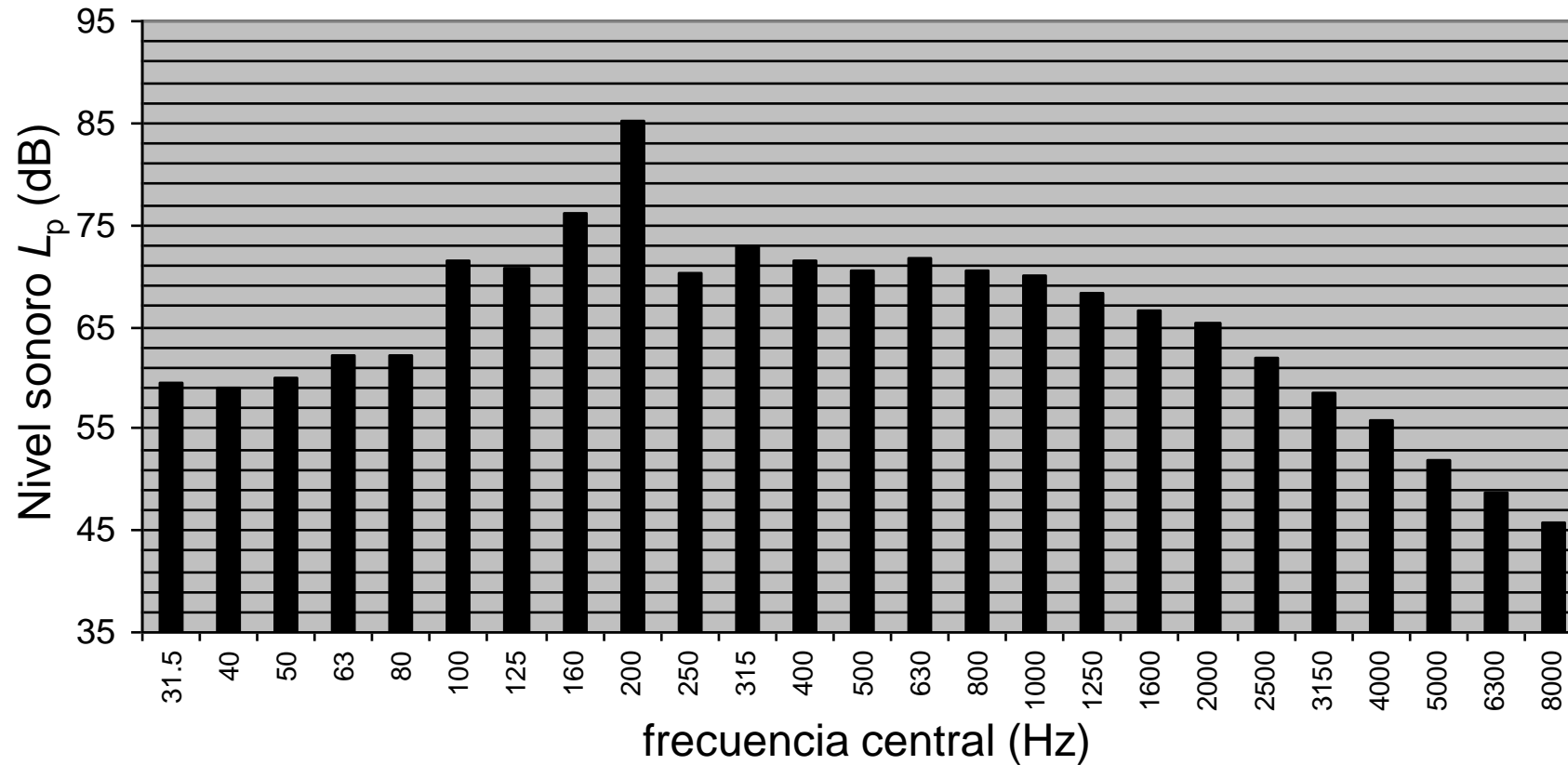


Bandas de proporción de ancho de banda constante

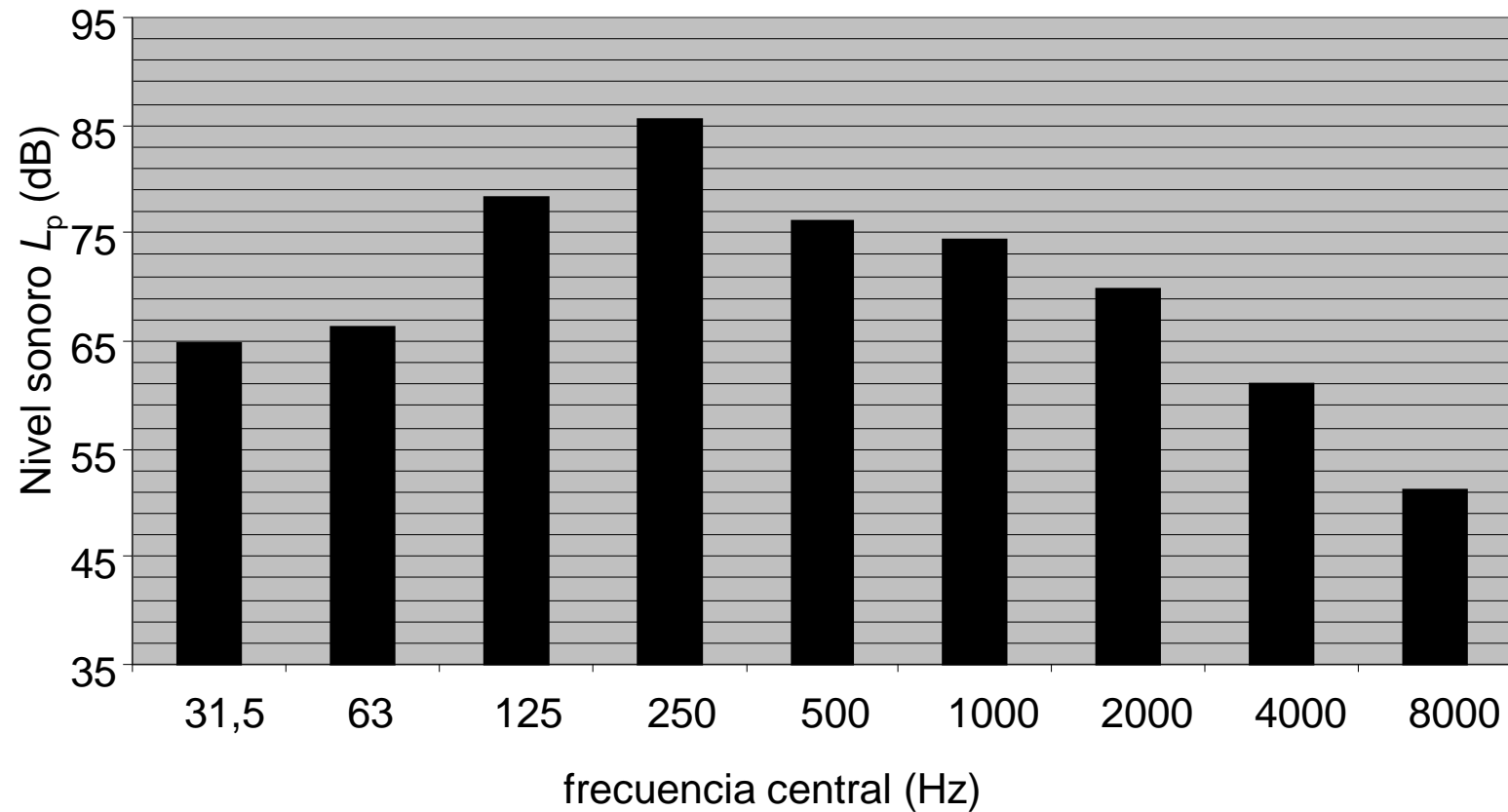


$$f_2 / f_1 = a$$

Bandas de 1/3 de octava $a = 2^{(1/3)} \approx 1,26$



Bandas de 1/1 octava $a = 2^{(1/1)} = 2$



- Veamos algunas salas de fines del siglo XIX, principios del XX (corresponde a estilos arquitectónicos del siglo XIX)

Boston Symphony Hall



Großer Musikvereinssaal, Vienna



Concertgebouw, Amsterdam

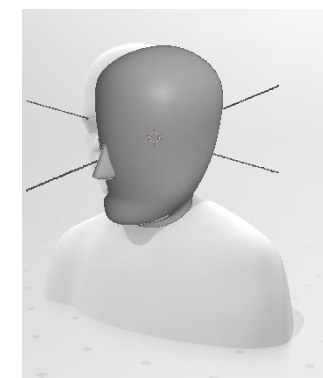
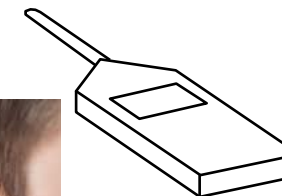
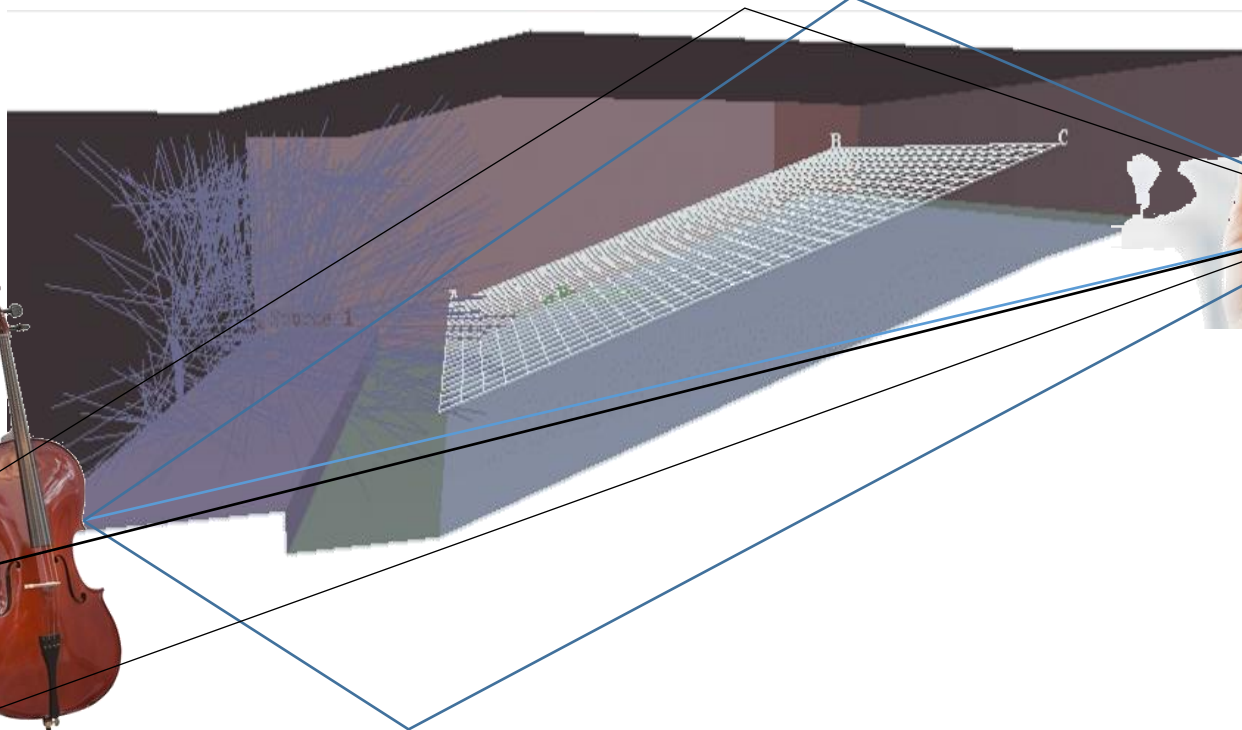


El problema de Acústica de Salas y sus métodos

Fuentes
(instrumentos)

Medio
(sala)

Receptores
(audiencia)



Simulación
Predicción
Medición

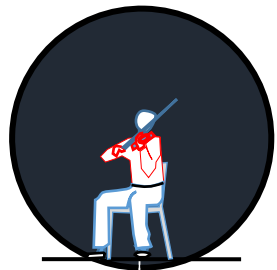


Fuentes

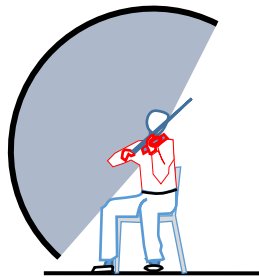
Instrumentos musicales
Voz

Parlantes para amplificar
Parlantes para medir

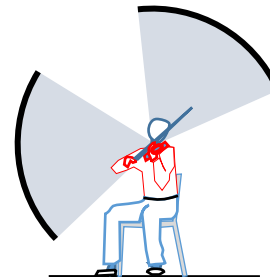
Directividad del violín



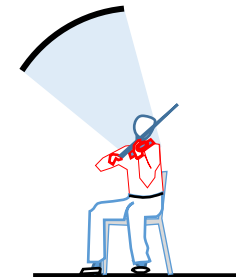
200 Hz a 400 Hz



1 000 Hz a 1 250 Hz



1 500 Hz

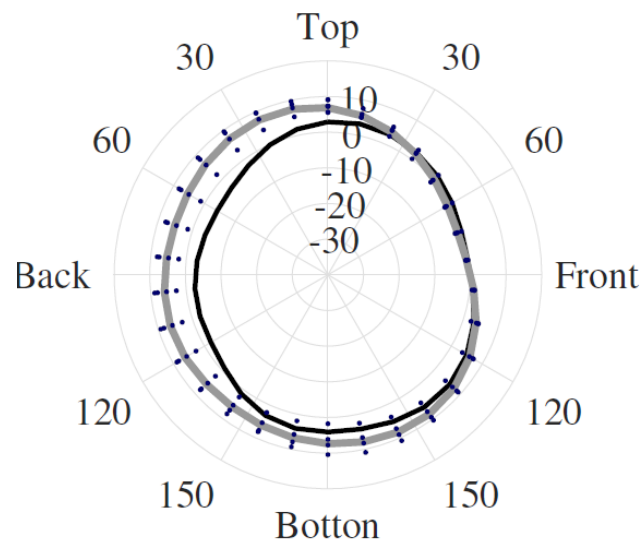


2 500 Hz a 5 000 Hz

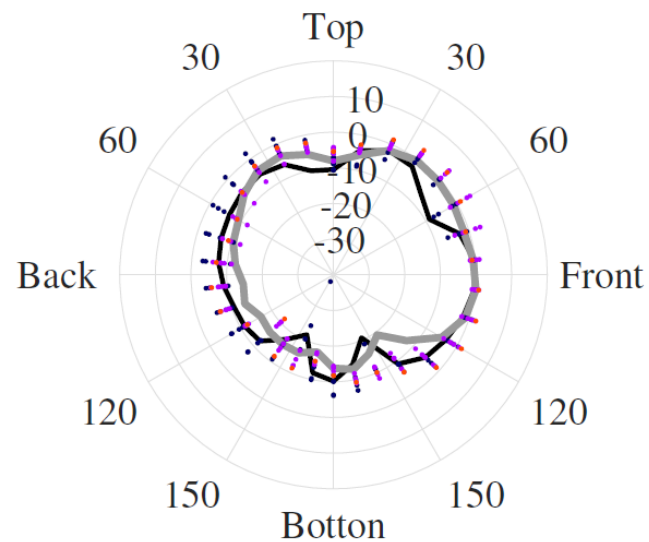
Trompeta en cámara anecoica



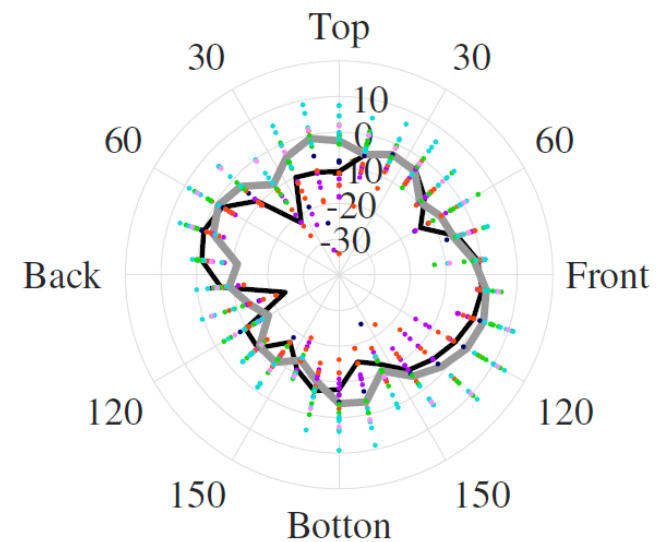
Weinzierl, S., Vorländer, M., Behler, G., Brinkmann, F., Coler, H. V., Detzner, E., Krämer, J., Lindau, A., Pollow, M., Schulz, F., & Shabtai, N. R. (2017, abril 10). *A Database of Anechoic Microphone Array Measurements of Musical Instruments*. Technische Universität Berlin. <https://doi.org/10.14279/DEPOSITONCE-5861.2>



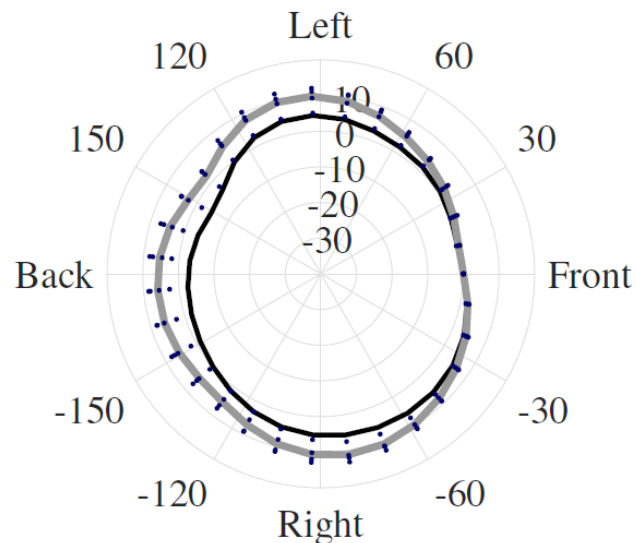
a) 1/3 band centered at 250 Hz



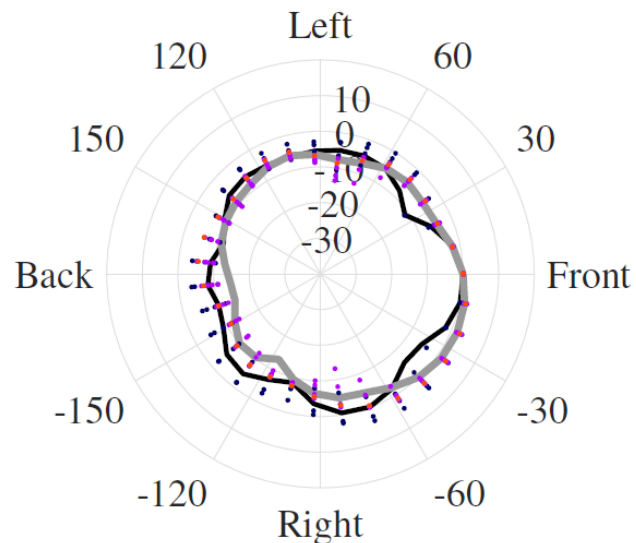
b) 1/3 band centered at 500 Hz



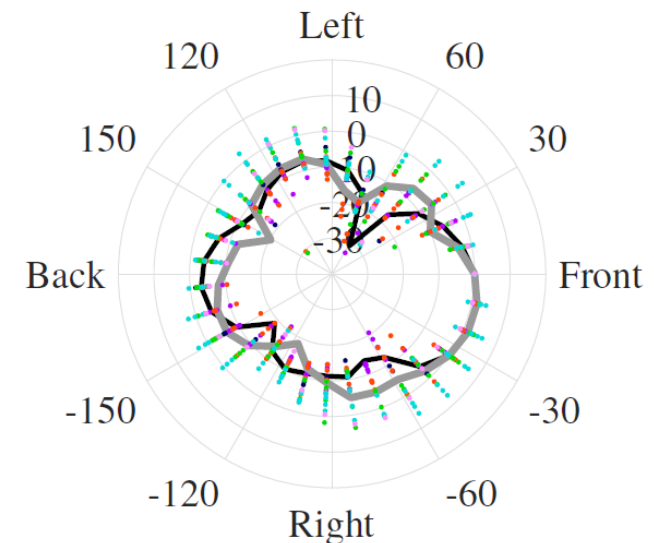
c) 1/3 band centered at 1000 Hz



d) 1/3 band centered at 250 Hz

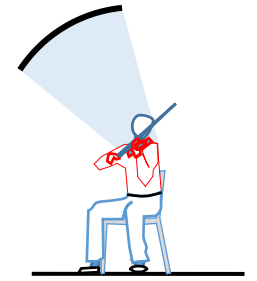


e) 1/3 band centered at 500 Hz



f) 1/3 band centered at 1000 Hz

Fuentes direccionales usando arreglos de armónicos esféricos



2 500 Hz a 5 000 Hz

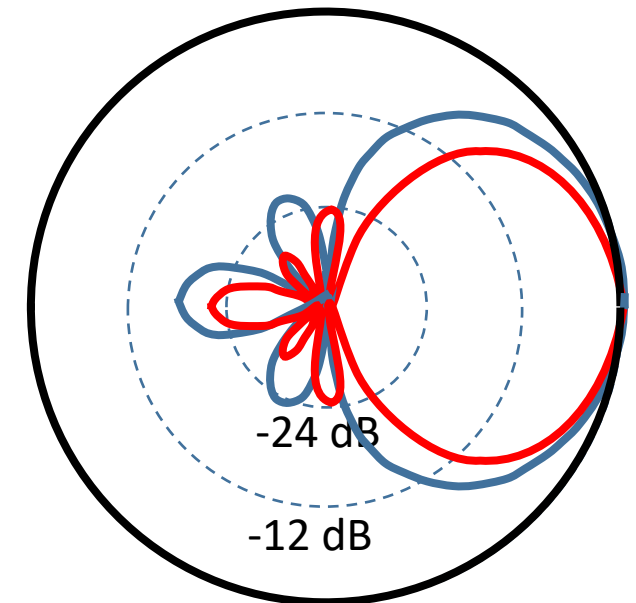
Orden 0



Orden 1



Orden 2

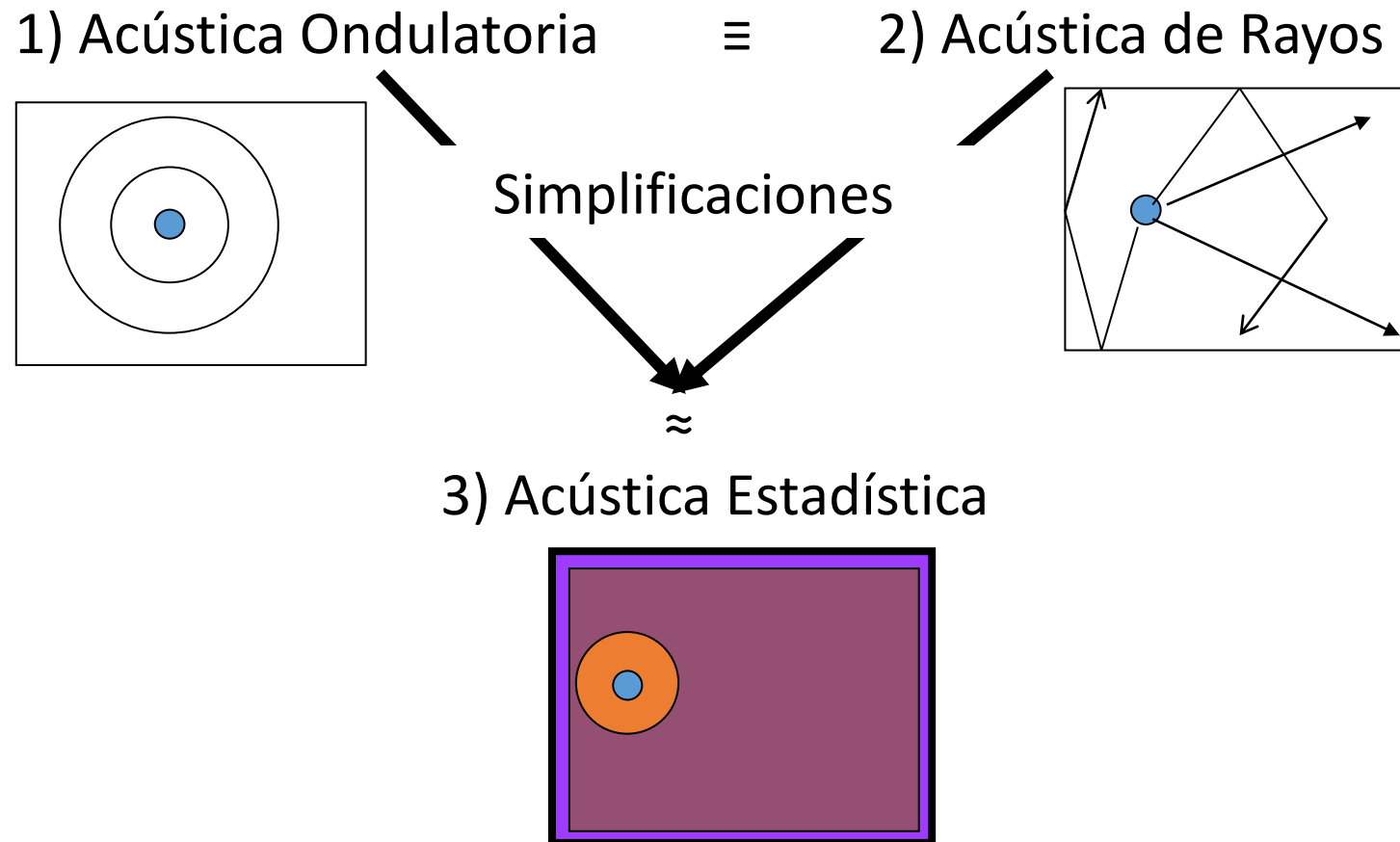




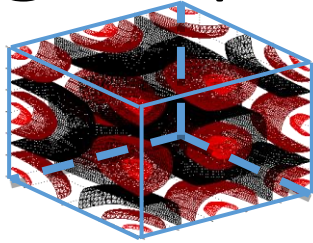
Medio

Sala, la realidad, su descripción matemática y las aproximaciones

Métodos y teorías



Estrategias para elegir métodos

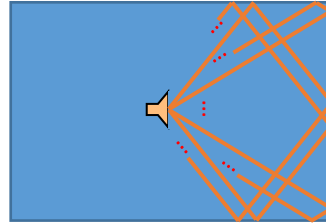


- **Ondulatoria**

- Estudio modos
- Salas pequeñas
- Baja frecuencia
- Puntual

- **Ejemplos:**

- Cabinas
- Teatros pequeños
- Aulas música
- Sala de ensayo

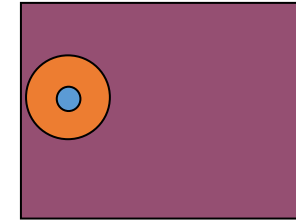


- **Rayos**

- Estudio reflexiones
- Salas grandes
- Frecuen. medias
- Puntual

- **Ejemplos:**

- Iglesias
- Arenas
- Salas concierto
- Teatros grandes



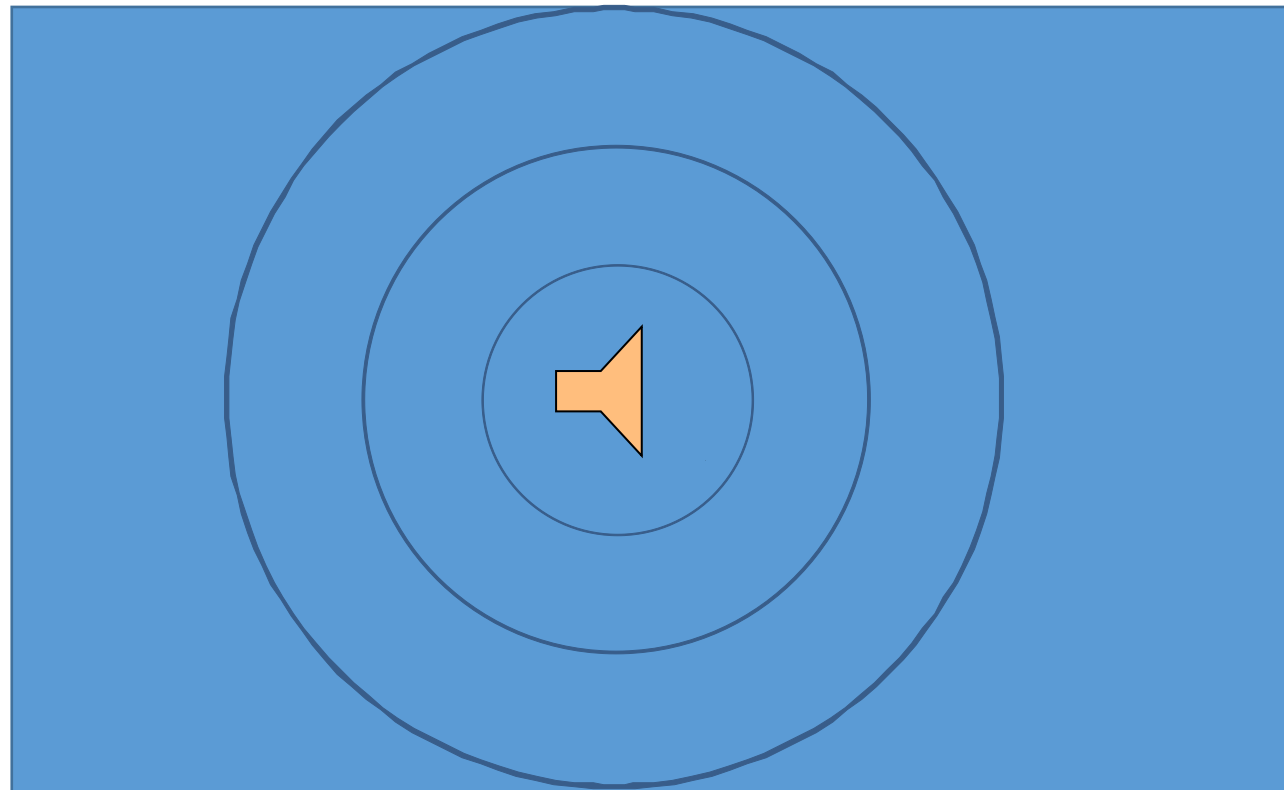
- **Estadística**

- Estudio Inicial
- Salas medianas
- Frecuen. medias
- Global en espacio

- **Ejemplos:**

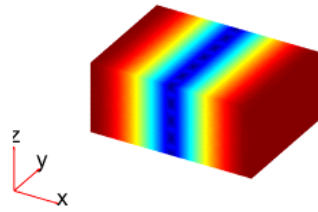
- Aulas
- Música amplificada en salas medianas
- Industria (algunas)

El modelo ondulatorio

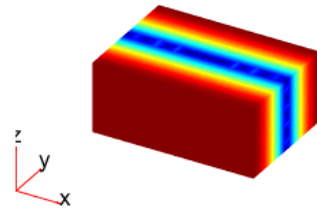


Modos normales

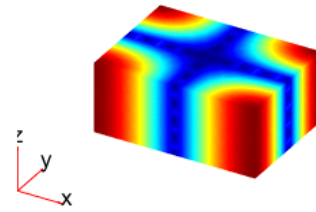
modo: 1 0 0; f_{FEM} : 24 Hz; f_{teo} : 25 Hz



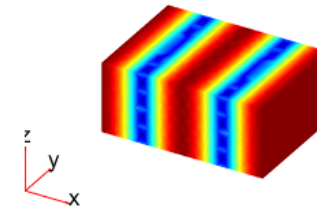
modo: 0 1 0; f_{FEM} : 34 Hz; f_{teo} : 34 Hz



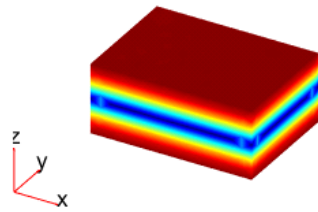
modo: 1 1 0; f_{FEM} : 42 Hz; f_{teo} : 42 Hz



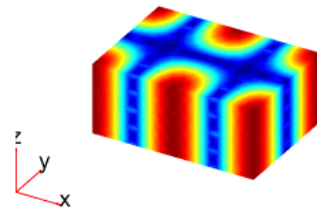
modo: 2 0 0; f_{FEM} : 49 Hz; f_{teo} : 49 Hz



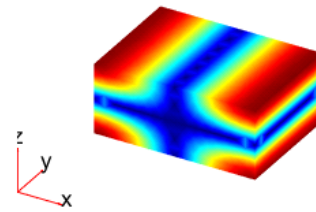
modo: 0 0 1; f_{FEM} : 57 Hz; f_{teo} : 57 Hz



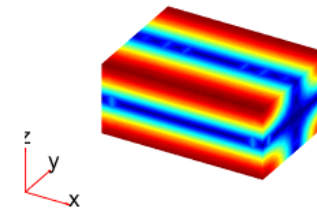
modo: 2 1 0; f_{FEM} : 59 Hz; f_{teo} : 60 Hz



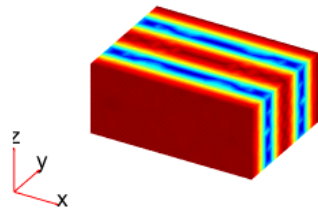
modo: 1 0 1; f_{FEM} : 62 Hz; f_{teo} : 62 Hz



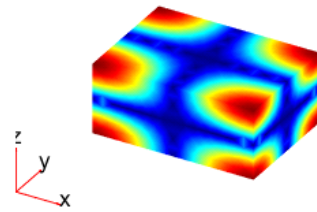
modo: 0 1 1; f_{FEM} : 66 Hz; f_{teo} : 67 Hz



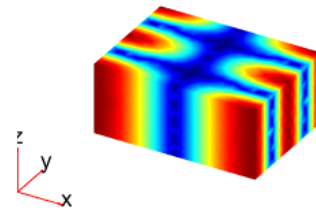
modo: 0 2 0; f_{FEM} : 68 Hz; f_{teo} : 69 Hz



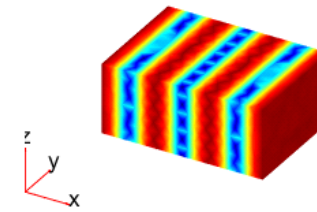
modo: 1 1 1; f_{FEM} : 70 Hz; f_{teo} : 71 Hz



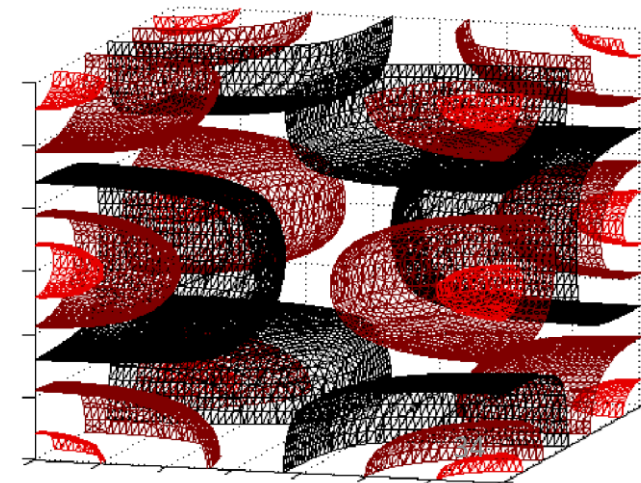
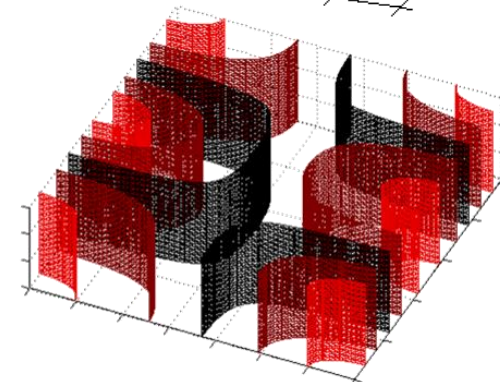
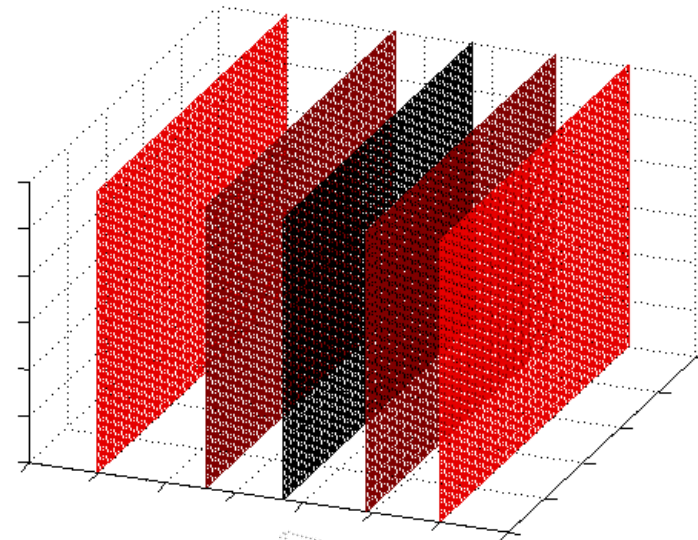
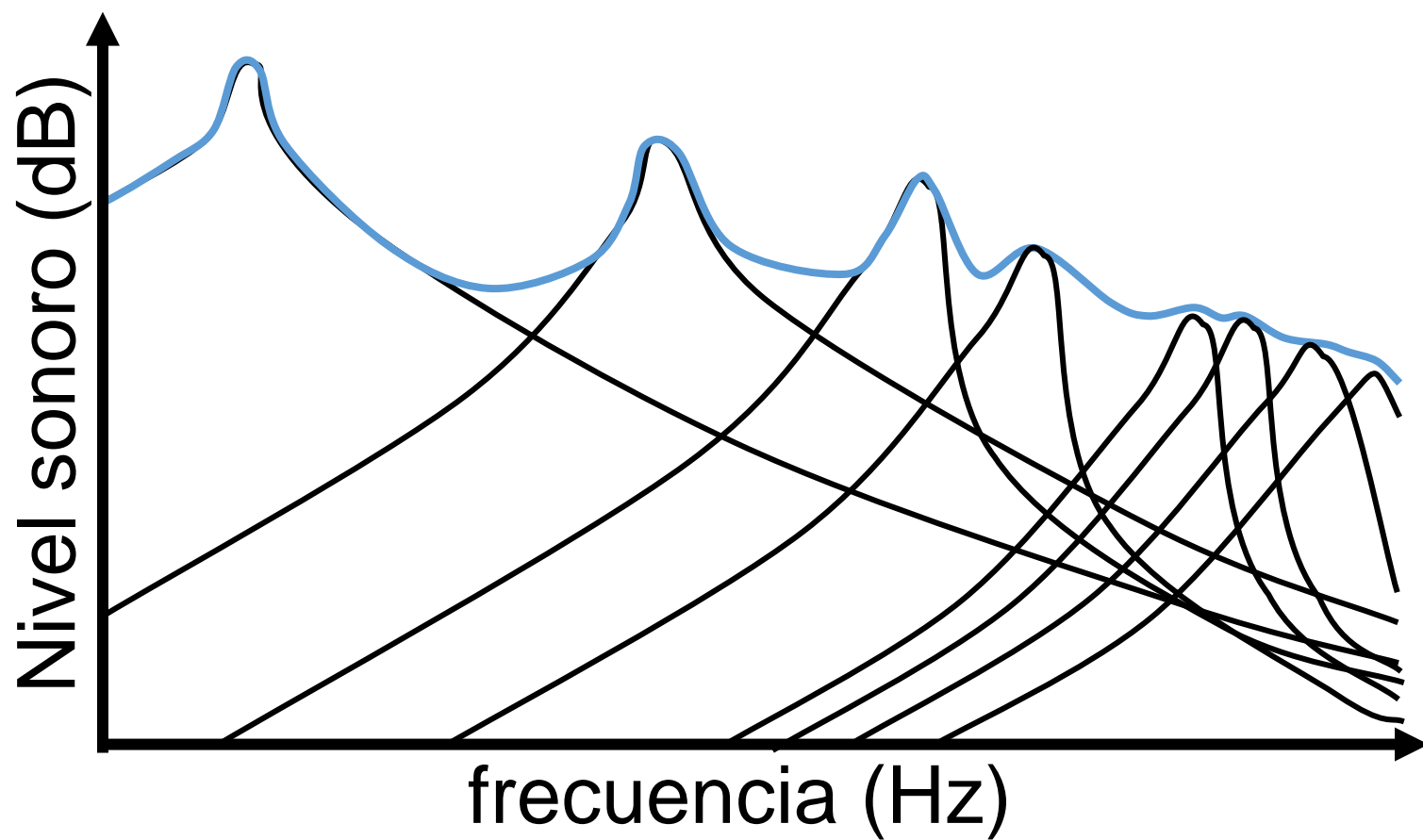
modo: 1 2 0; f_{FEM} : 72 Hz; f_{teo} : 73 Hz



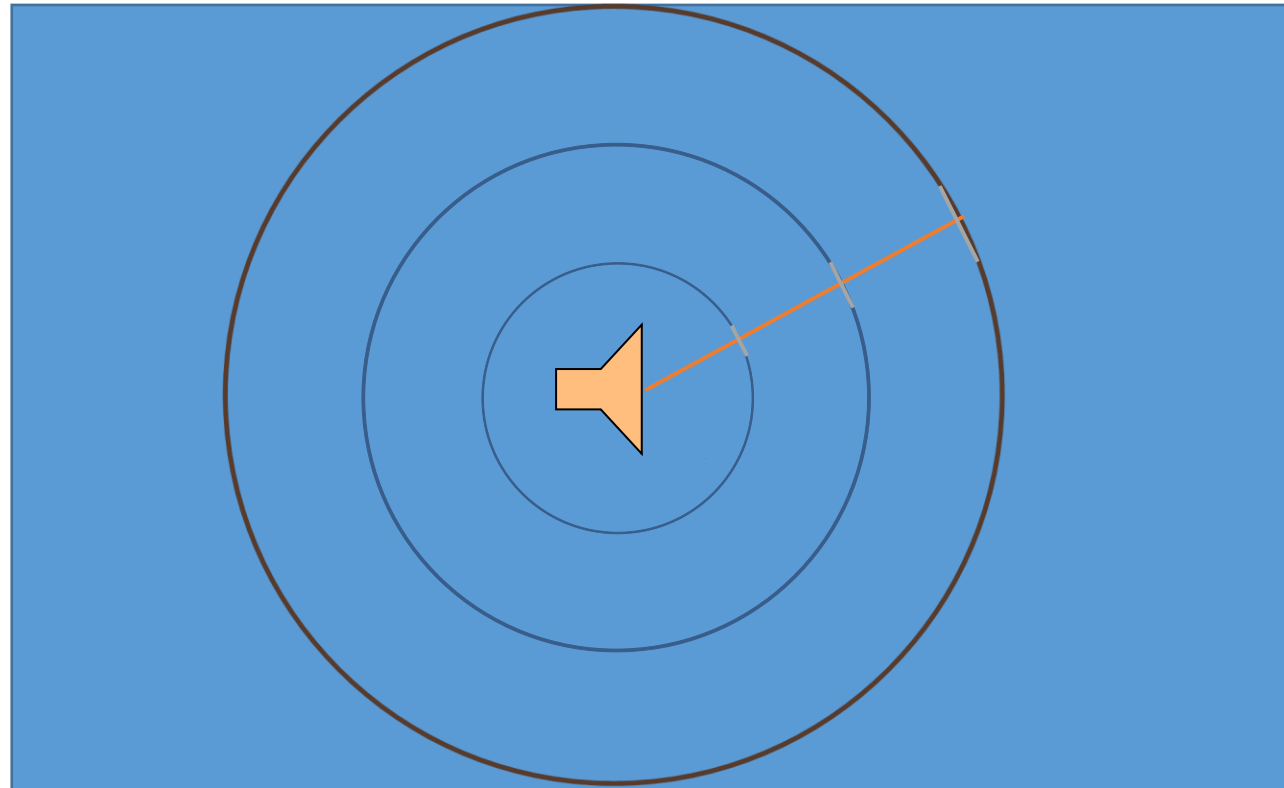
modo: 3 0 0; f_{FEM} : 73 Hz; f_{teo} : 74 Hz



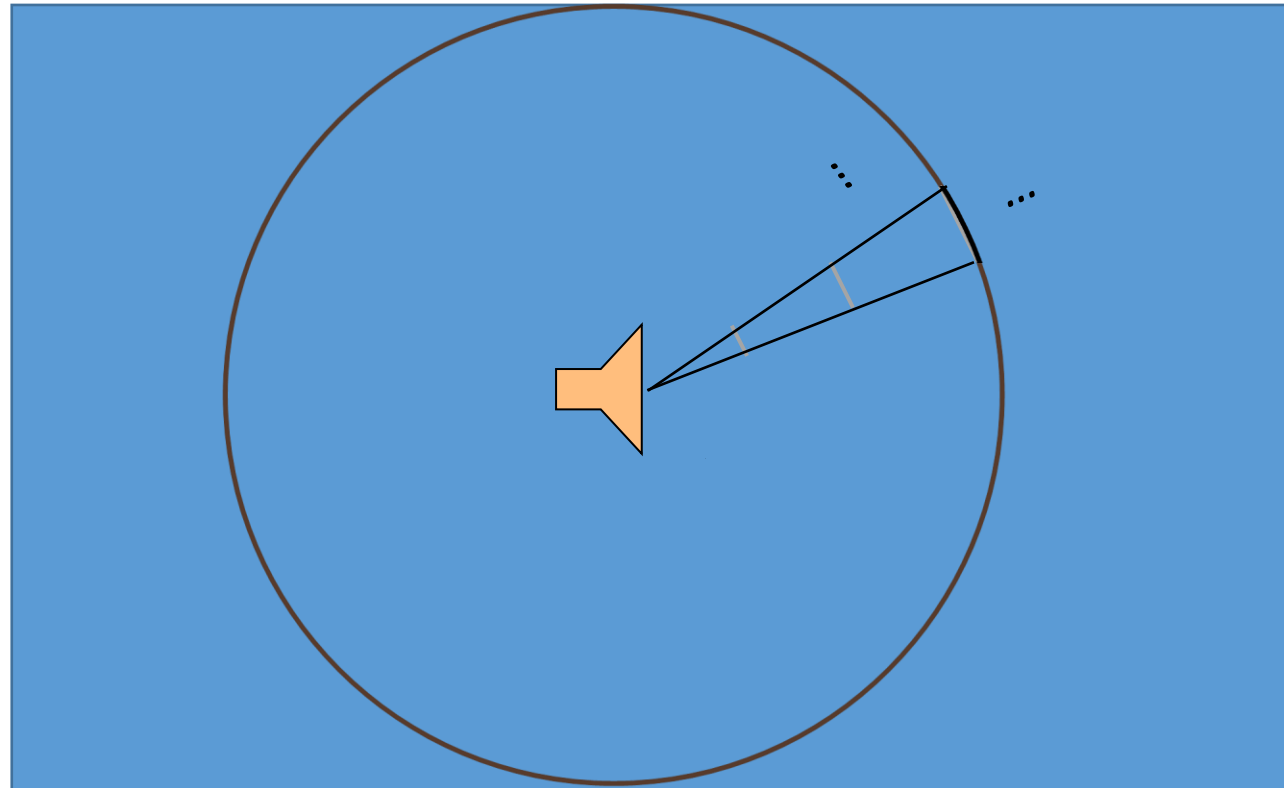
El medio como suma de resonancias



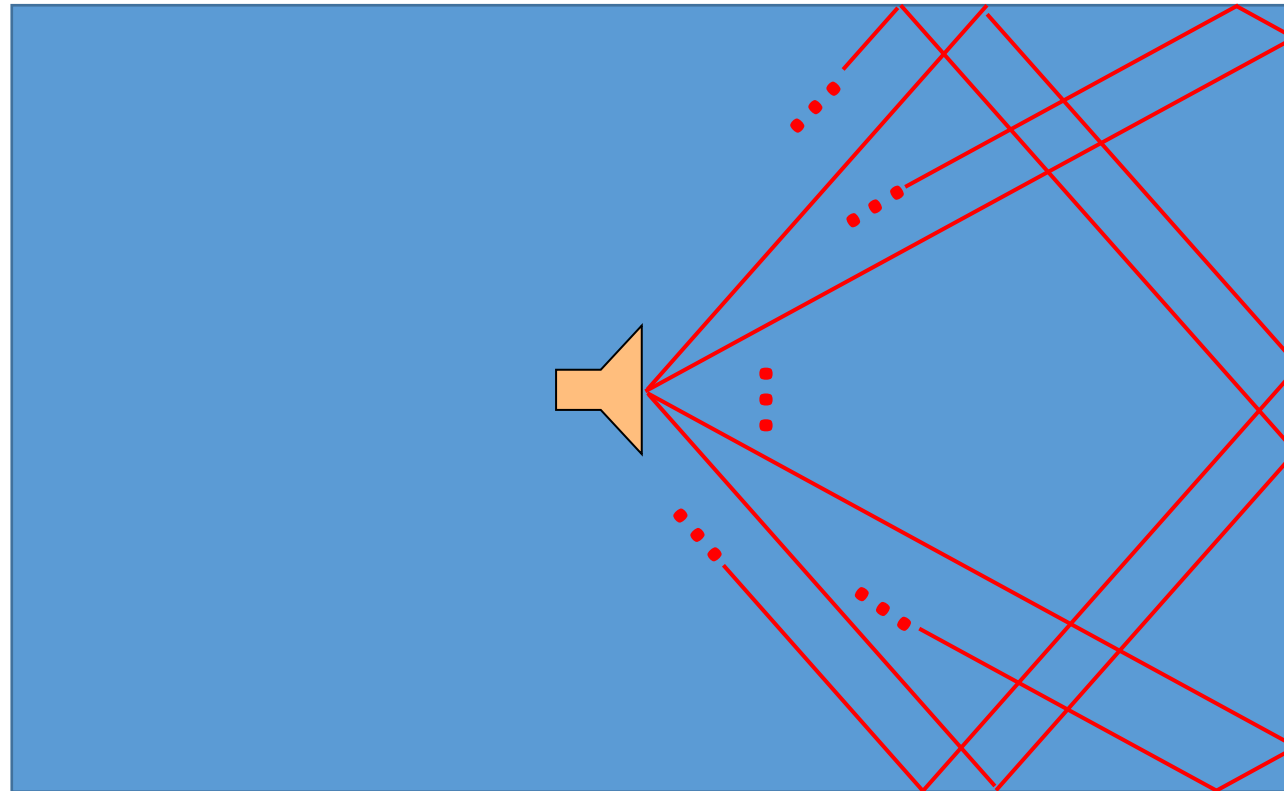
Del modelo ondulatorio al de Rayos



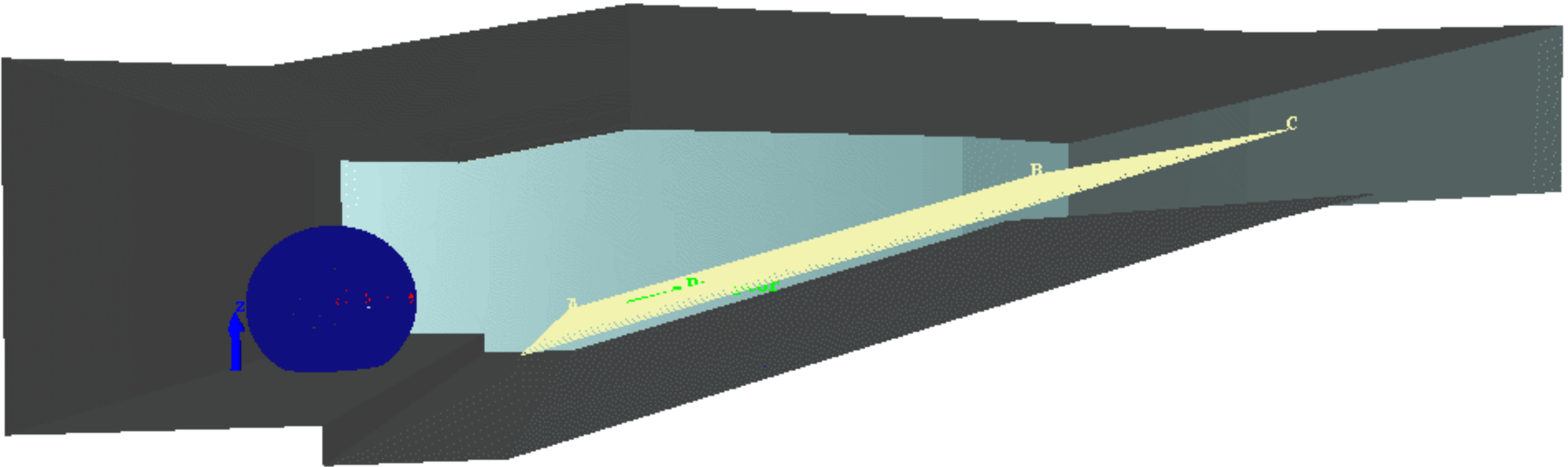
Del modelo ondulatorio al de Rayos



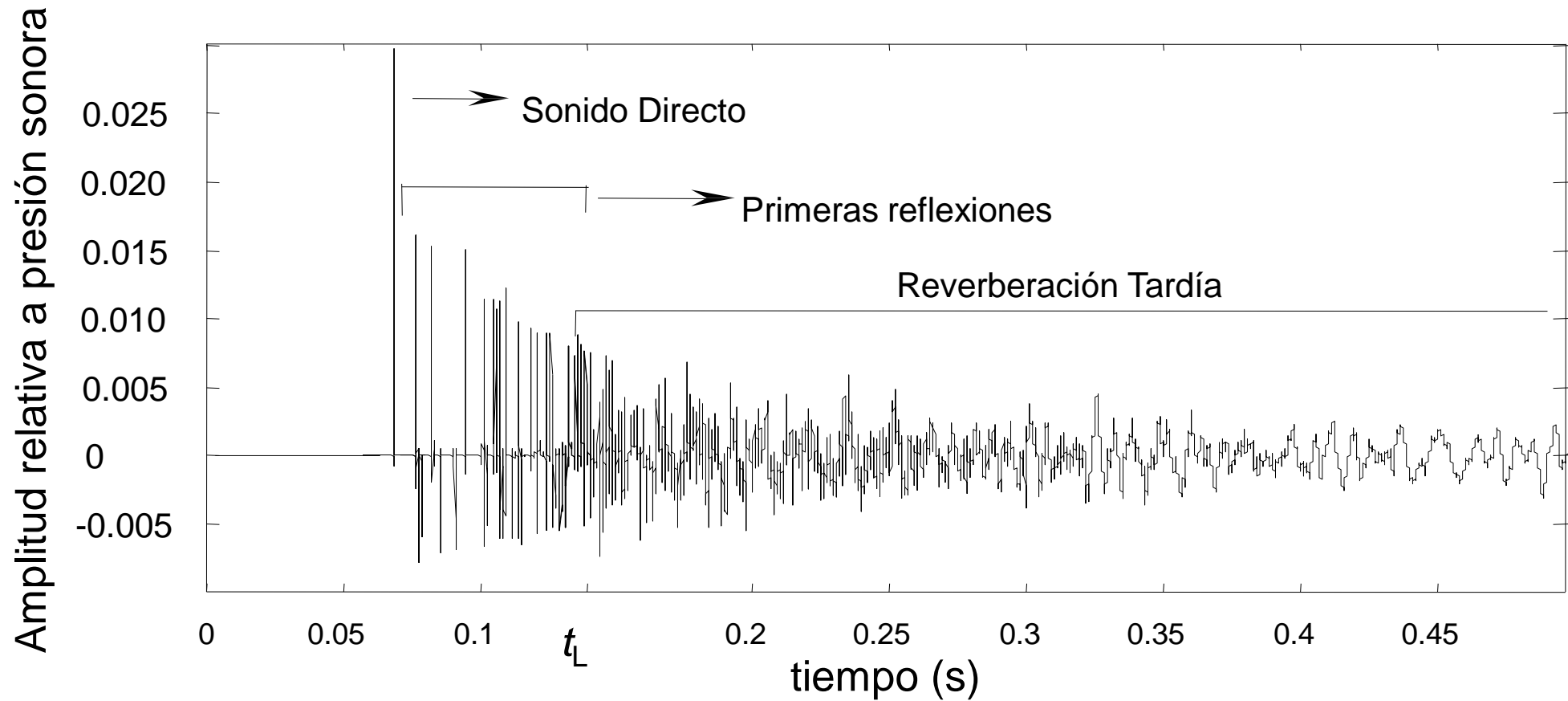
El modelo de Rayos

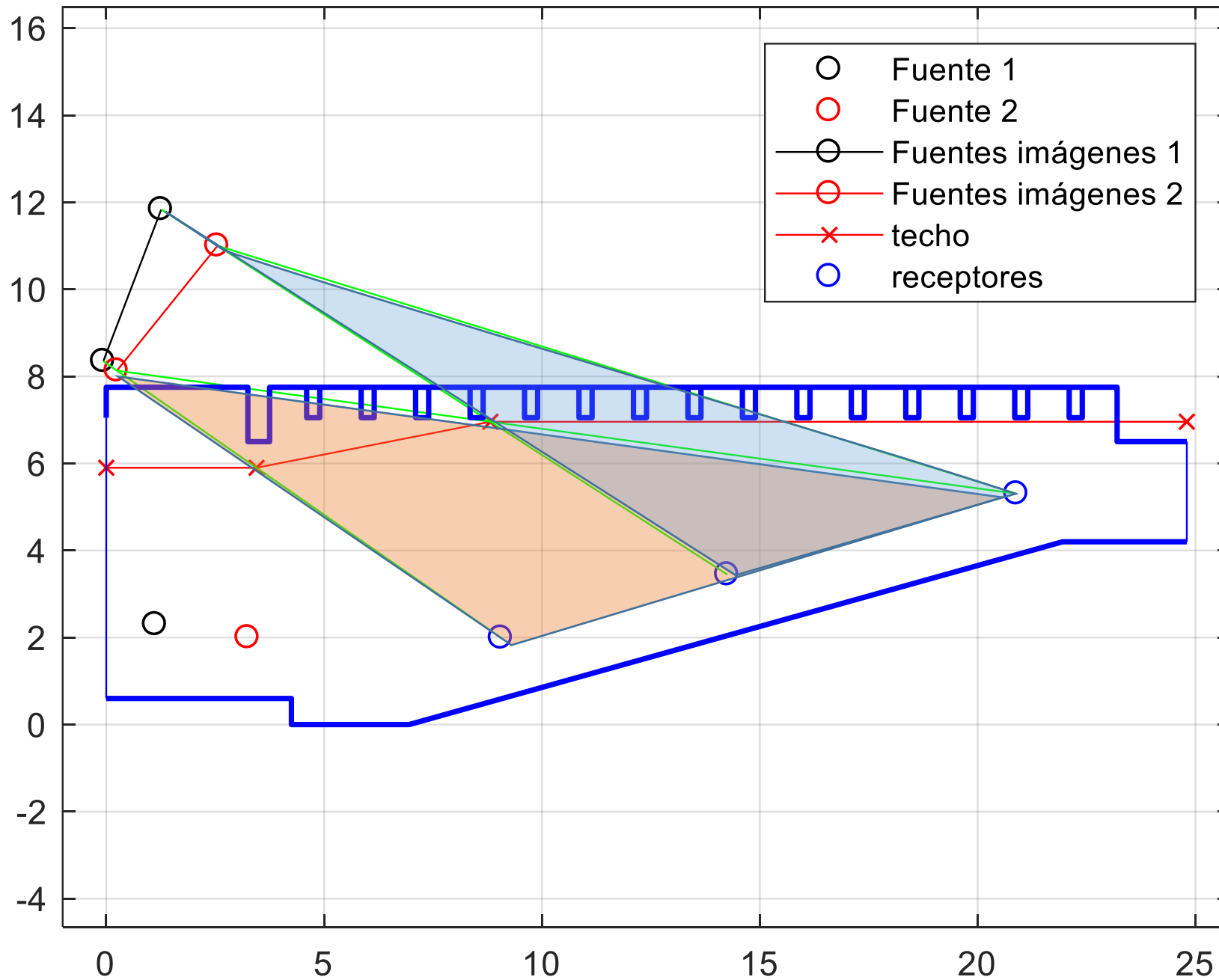


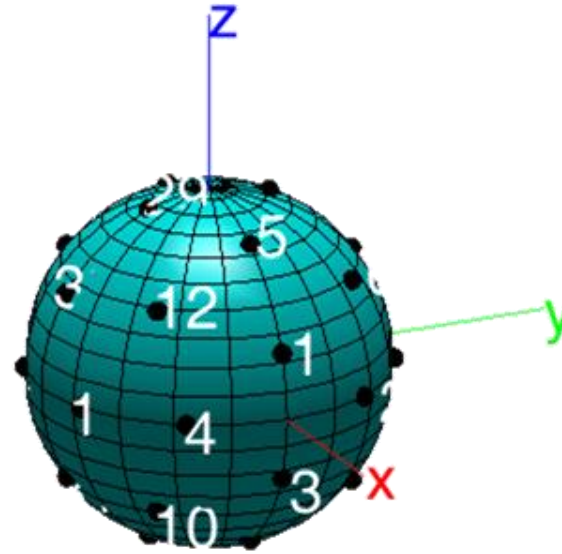
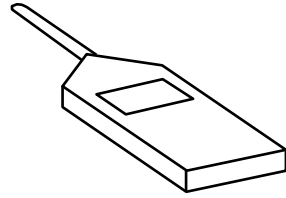
El medio como suma de rayos (o partículas)



El medio como suma de rayos







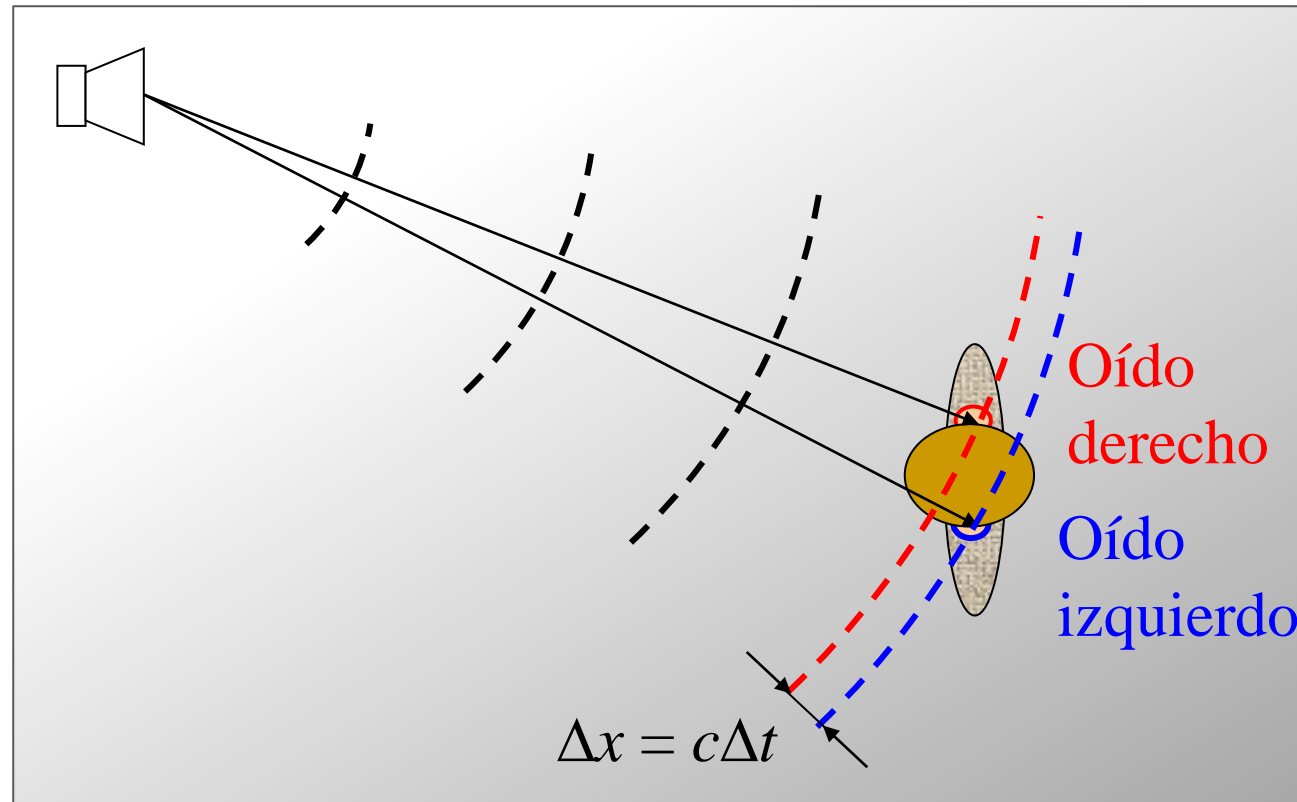
Receptores

Audiencia, músicos: oírse a si mismos y oír a los demás

Calidad Acústica

Breves conceptos de psicoacústica

Algunas pistas para detectar **dirección de arribo** en la audición binaural

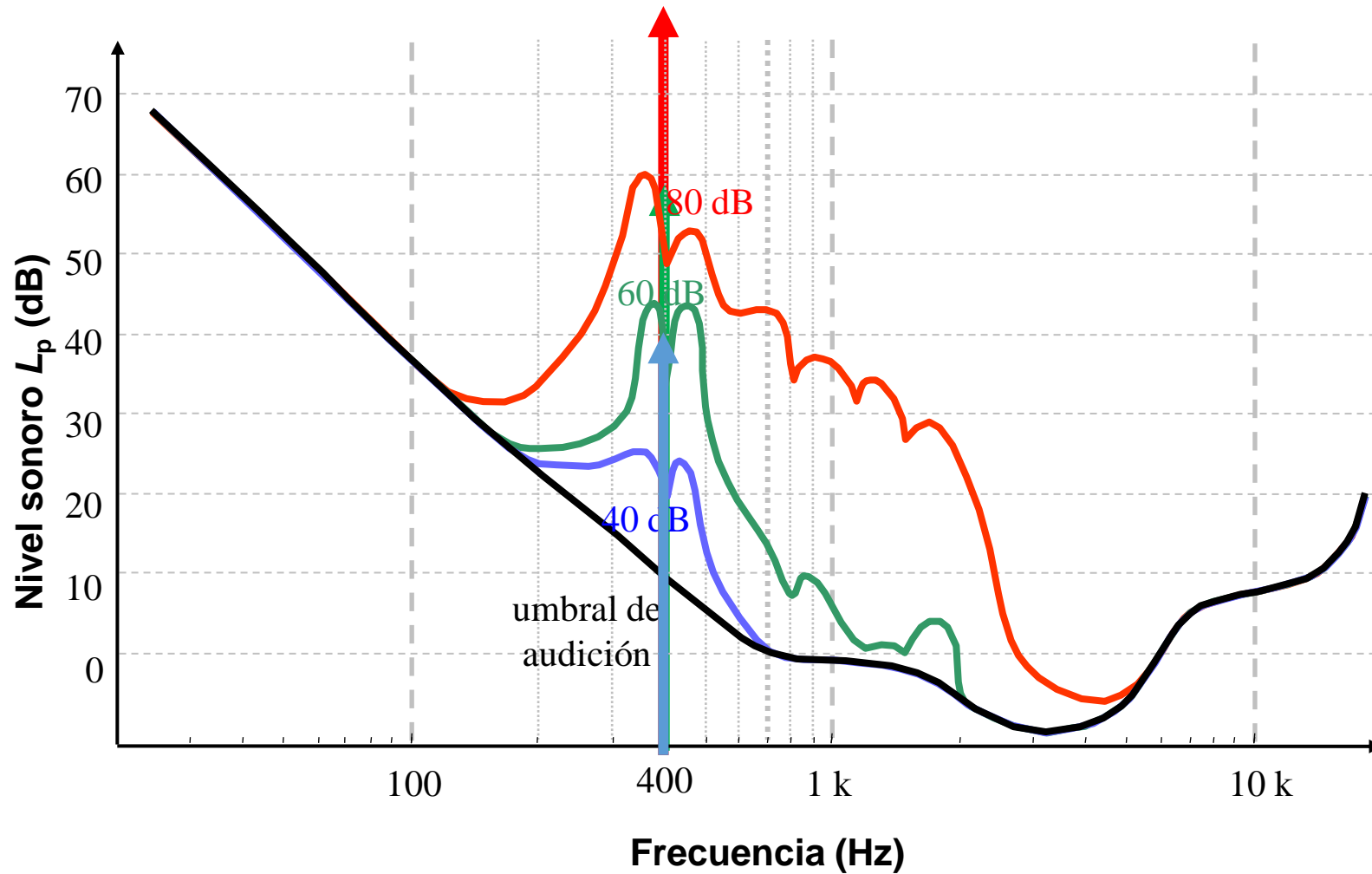


$$\text{ILD} = L_d - L_i$$

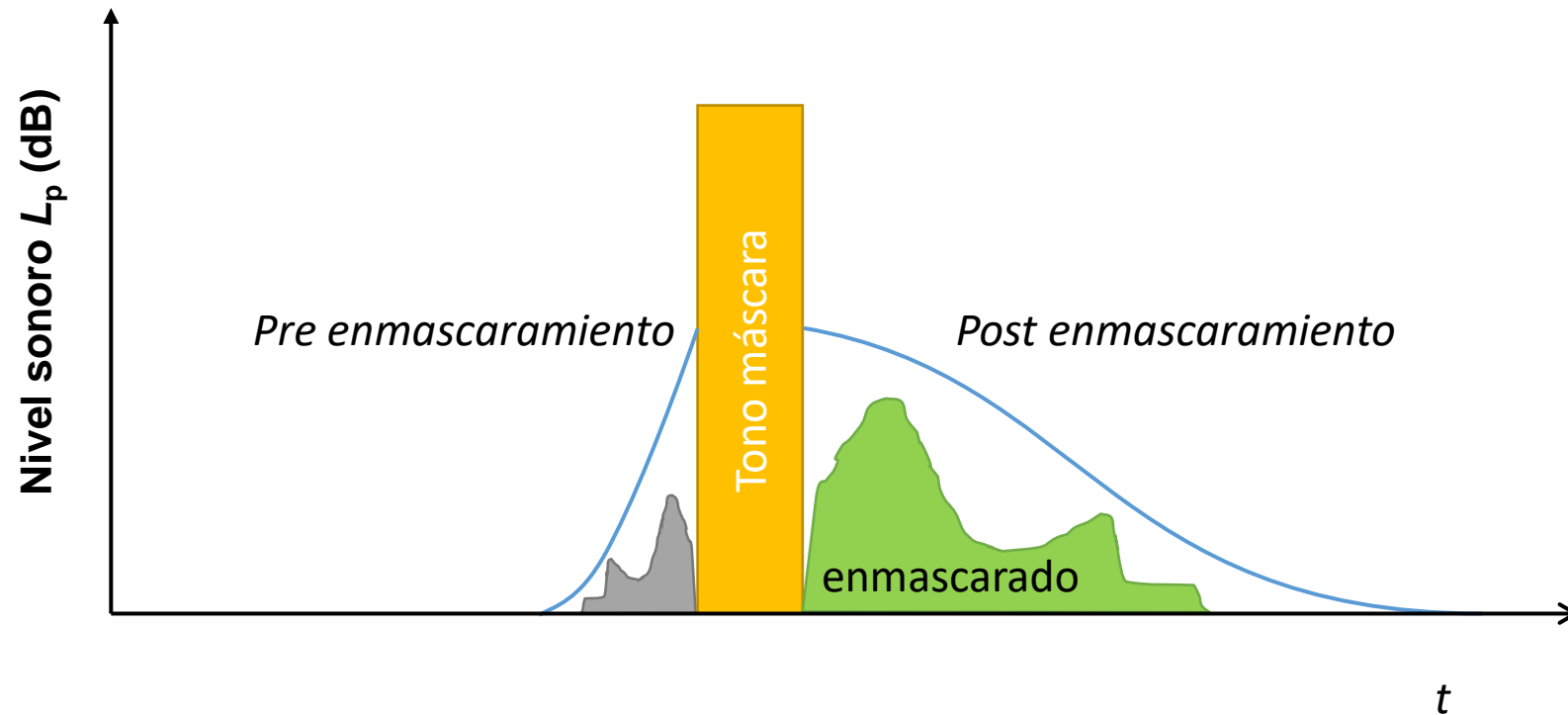
$$\text{ITD} = t_d - t_i$$

Enmascaramiento

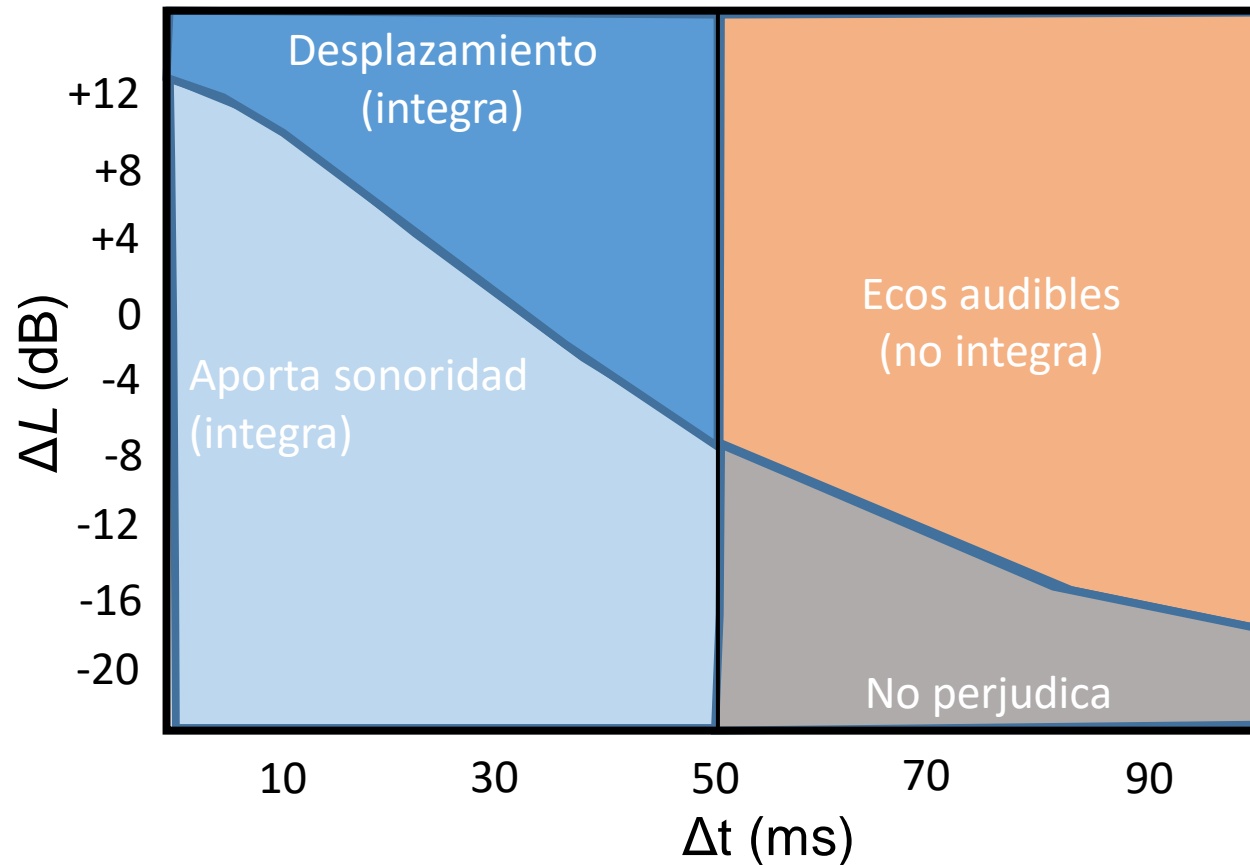
Enmascaramiento espectral



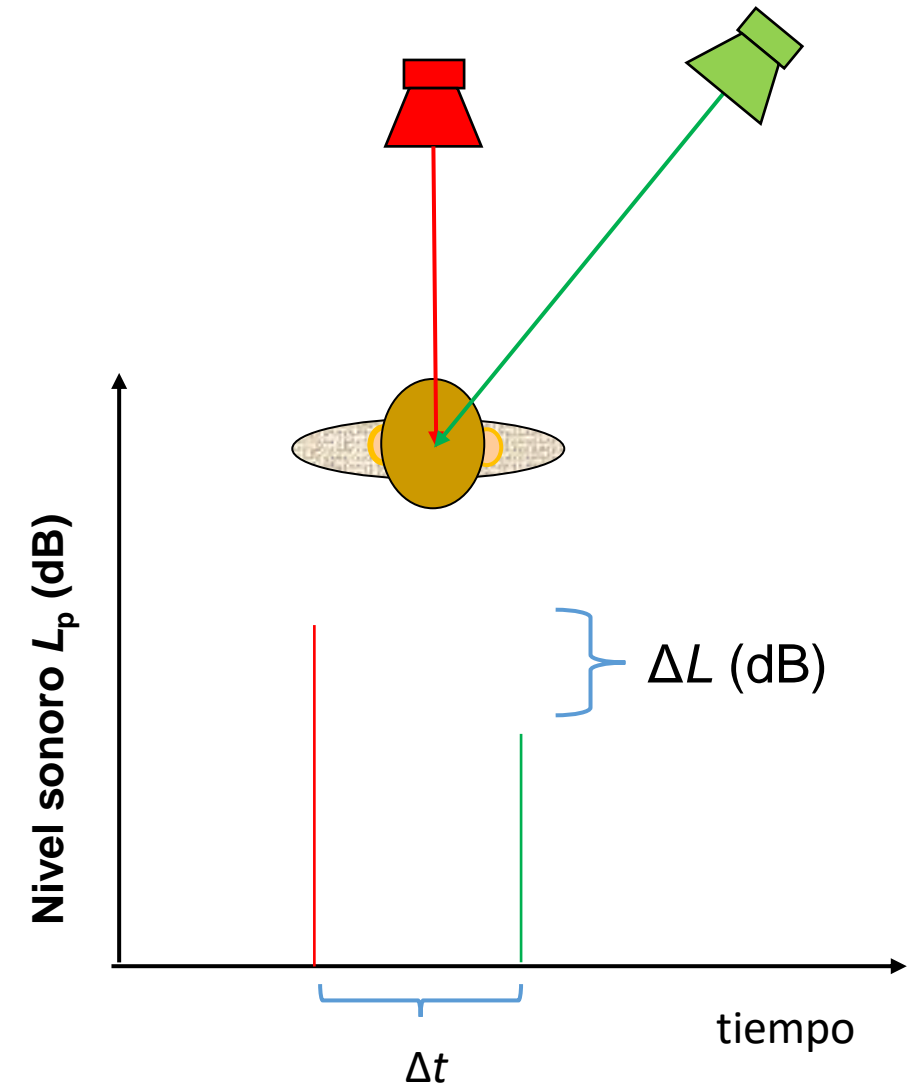
Enmascaramiento temporal



Efecto de precedencia



Para una sola reflexión lateral que llega a 45° respecto al sonido directo que incide frontalmente



Descriptores

Necesidad de otras variables

- El mismo Sabine advertía que además de un TR adecuado:
 - los sonidos deben ser lo suficientemente fuertes
 - que los sonidos sucesivos en una articulación suenen claros y puedan ser diferenciados
- Salas con TR adecuado, especialmente las que no responden a los estilos arquitectónicos del siglo XVIII y XIX no ofrecían una buena calidad acústica
- En 1950 la investigación de los efectos de las reflexiones iniciales comienza a dar nuevas pautas

Otras variables importantes

- En 1950 Haas propone teoría sobre efecto de precedencia
- En 1960 Leo L. Beranek introduce la variable intervalo de la reflexión inicial (t_i) por estar relacionado con la sensación subjetiva de intimidad
- También en 1960 Seraphim, Schubert, Marshall, y otros continúan el trabajo de Haas
- En 1970 Barron demuestra la importancia de la energía lateral

Otros descriptores clásicos

- Corelación Interarual cruzada
 - $IACC_{E3}$: Corelación interaural temprana en frecuencias medias
Temprana: usa solo los primeros 80 ms de la respuesta al impulso
Frecuencias medias: bandas de octava de 1 kHz a 4 kHz
- Fortaleza de la fuente G (source strength)
 - G : Nivel sonoro en audiencia referido al nivel de la fuente al aire libre
- Claridad musical
 - C_{80} : Nivel sonoro temprano referido al nivel tardío
Temprano son los primeros 80 ms y tardío desde 80 ms al final

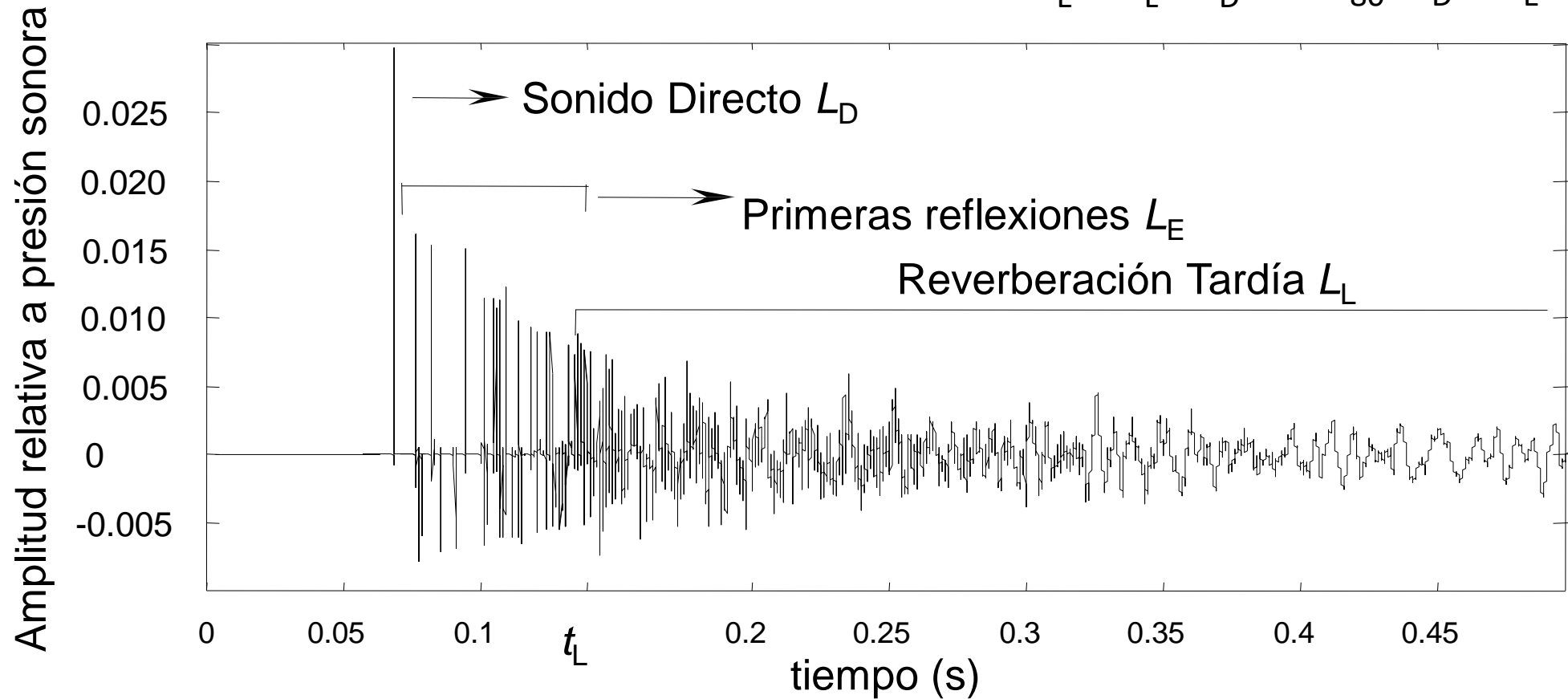


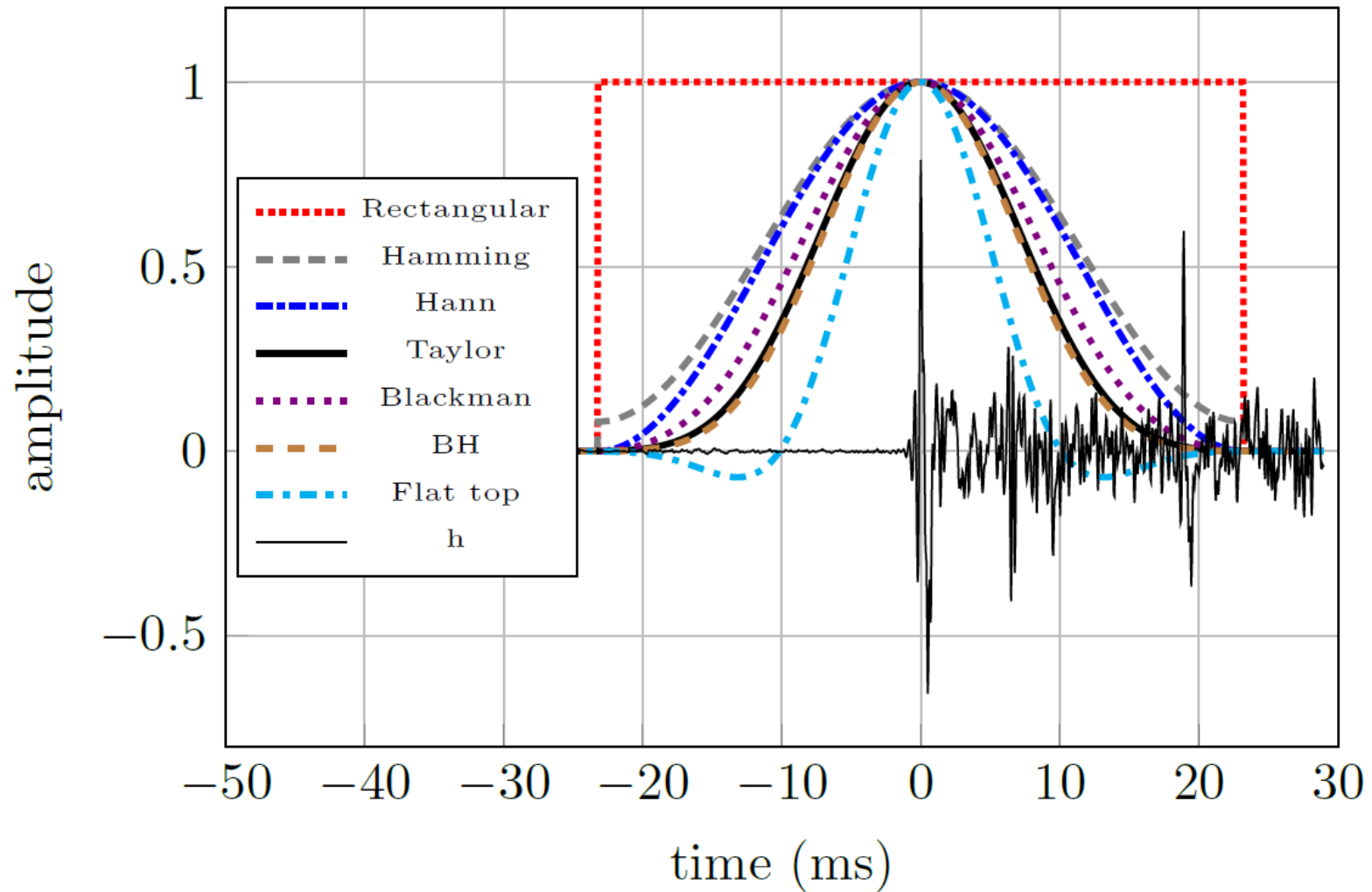
La fuente sonora debe ser “omnidireccional”

Fortaleza de fuente y claridad musical

$$G: L_E \oplus L_L - L_D$$

$$C_{80}: L_D \oplus L_E - L_L$$





Accolti, E., & di Sciascio, F. (2021). On the use of time windows for the determination of sound strength parameter G from uncalibrated room impulse responses measurements. *Applied Acoustics*, 178, 12.

<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108023>

Descriptores

Propiedades del campo sonoro Ultimos 40 años

Reverberación

Correlación interaural

Calridad

Fortaleza de la fuente

Balance espectral

Parámetros psicoacústicos de acústica de salas



Atributos Perceptuales

Reverberancia

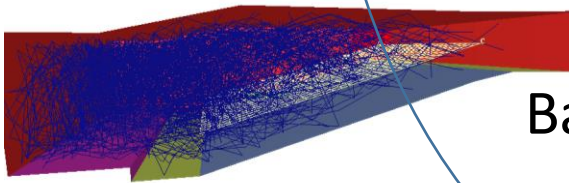
Envolvimiento

Presencia

Facilidad ensamblar

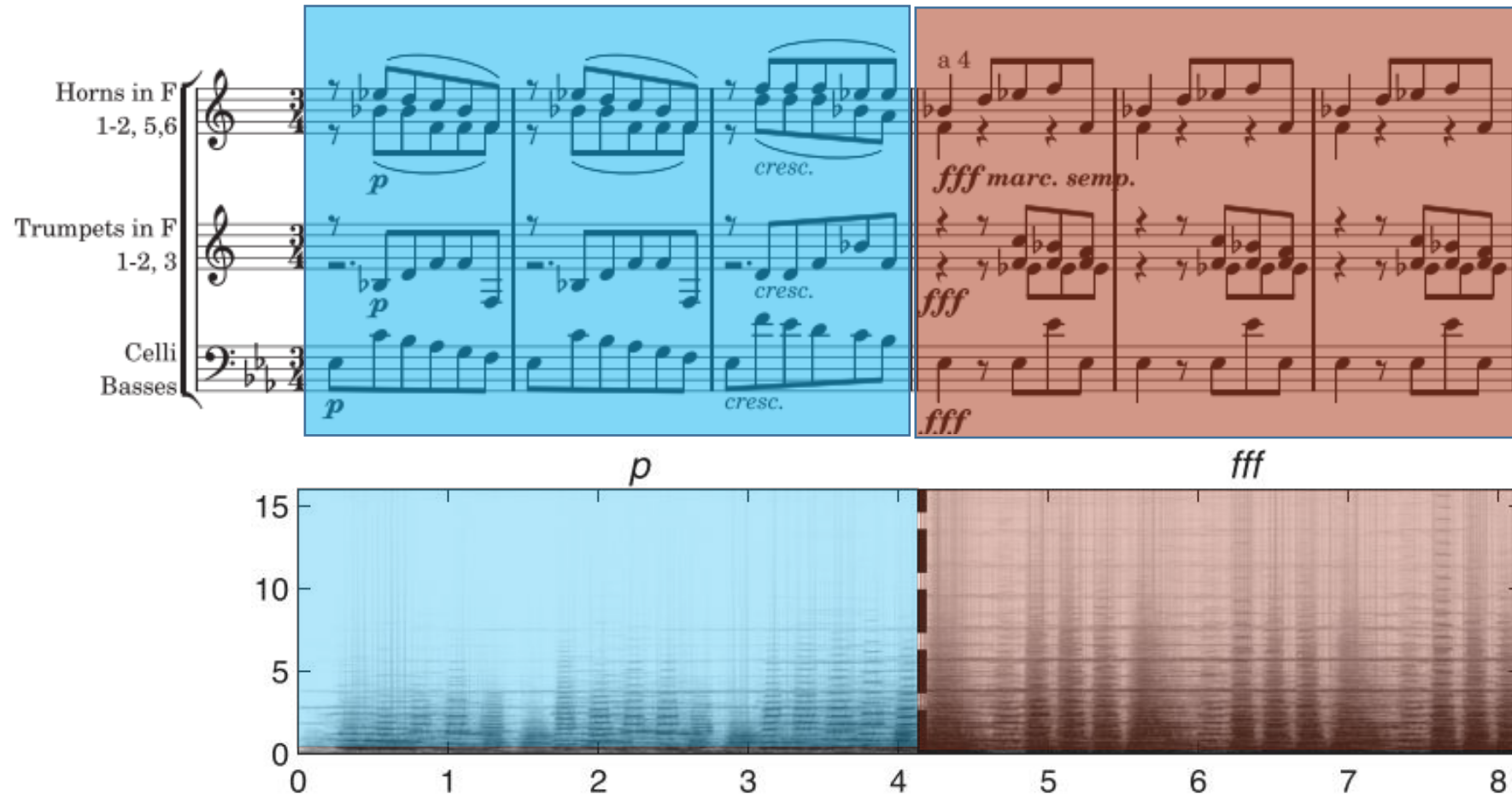
Oírse a si mismo

...

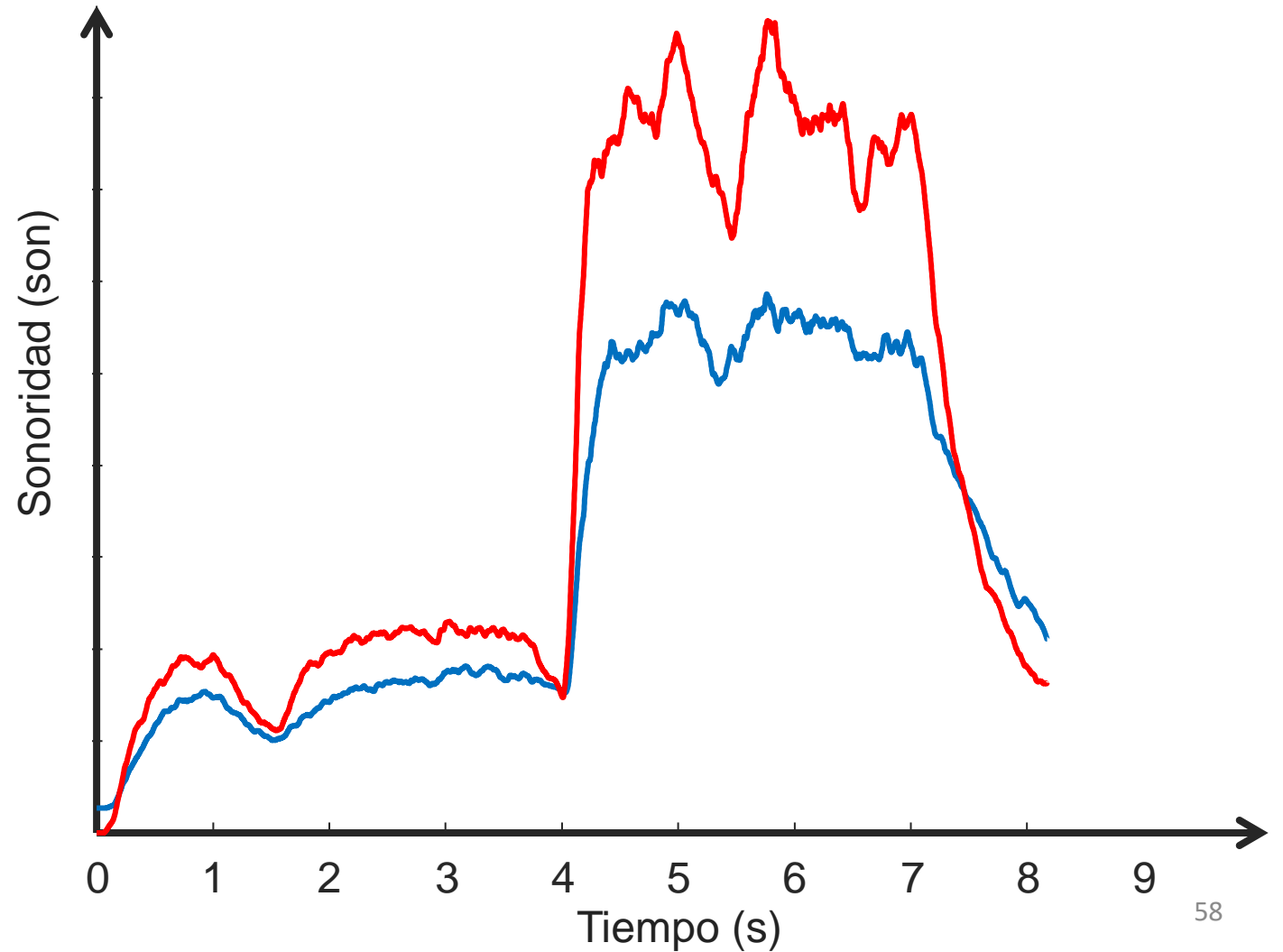
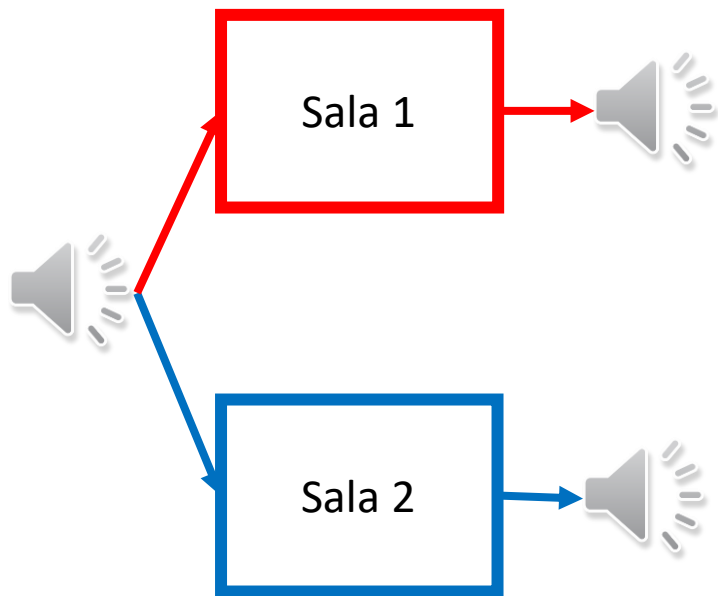


Fuente sonora

pasaje **anecoico** del mov. II de la Sinfonía N°8 de Brukner



Resultados preliminares de aplicar un modelo psicoacústico



Bibliografía. Libros

- Marshall “Architectural Acoustics” Elsevier Academic Press (2006)
- Kuttruff, H. “Architectural Acoustics” CRC Press, 2017
- Beranek L. “Concert and Opera Halls” New York ASA (1996)
- Kuttruff, H. “Acoustics” Taylor & Francis, 2007
- Beranek, Leo. “Acústica”. Editorial A.S.A. 1961.
- Earl G. Williams “Fourier Acoustics: Sound radiation and nearfield acoustics” Academic Press, 1999
- Jürgen Meyer “Acoustics and the Performance of Music” Springer, 2009

Bibliografía Artículos 1/2

- Gardner, M. “Historical Background of the Haas and/or Precedence Effect” Jour. of the ASA Vol 43(6), pp. 1243-1248 (1968)
- Jordan, V. “Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques” Jour. of the ASA Vol 47(2A), pp. 408-412 (1970)
- Schroeder et al. “Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters” Jour. of the ASA Vol 56(4), pp. 1195-1201 (1974)
- Schroeder (1965) "New method of measuring reverberation time“ J of the ASA Vol 37(6) Ando Y., “Architectural Acoustics” New York Editorial Board (1996)

Bibliografía Artículos 2/2

- Hidaka et al., 2000 “Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americas” J of ASA Vol 107(1)
- Accolti (2006) “Propuesta de reacondicionamiento acústico del Auditorio Juan Victoria” Tesis de Ingeniería Civil en Sonido y Acústica Universidad Tecnológica de Chile
- Accolti, E. di Sciascio F. “Room acoustics: Idealized field and real field considerations” Proceedings of Meetings on Acoustics, 2017
- Accolti, E. di Sciascio F. “On the use of time windows for the determination of sound strength parameter G from uncalibrated room impulse responses measurements” Applied Acoustics, 2021