

La Plata, 13 de marzo de 2017

**Obra:** Paraninfo, Universidad Nacional del Litoral.

**Ubicación:** Bv. Pellegrini 2750, Santa Fe

**Documento:** Asesoría en Acústica. Informe 3/2017. Resultados de la simulación digital del Paraninfo

---

En este informe se describen los resultados obtenidos a partir de un modelo digital del Paraninfo desarrollado *ad-hoc*, cuyo objetivo es verificar el comportamiento acústico de la Sala.

Se confeccionó a partir del Software base *Catt -Acoustic- V8*, que utiliza los métodos de imágenes virtuales y trazado de rayos. Diferentes características y algoritmos de cálculo fueron modificados por la coordinación del Programa. Los archivos pueden exportarse sin dificultad a otros paquetes de software similares (Odeon, Ramsete, etc.).

Los coeficientes de absorción de las superficies se tomaron de las mediciones en la sala tal como consta en el Informe 2.

Como es usual en la especialidad, los resultados de la asesoría acústica se manifiestan en gran medida en los planos de arquitectura del proyecto.

## 1. Geometría testada de la sala

Luego de las modificaciones aplicadas al modelo de partida - cambios en la geometría de la sala y rediseño del marco del proscenio, etc.- se llegó a la siguiente geometría de la sala:

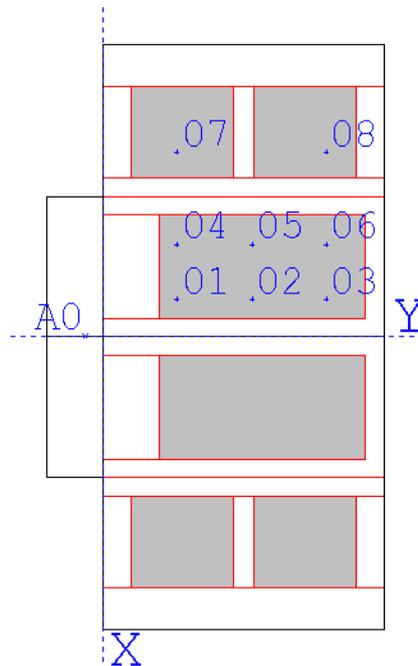


Figura 1. Geometría de la Sala

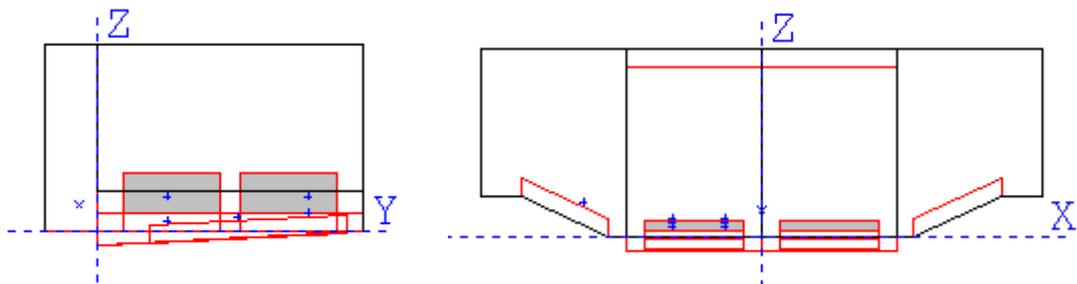


Figura 2. Corte longitudinal y transversal

Dicha geometría fue la que se simuló digitalmente para analizar el comportamiento acústico de la sala.

## 2. Características generales del modelo geométrico vectorial

El modelo almacena la información geométrica en archivos "\*.geo" a partir de un archivo base "MASTER PARANINFO", asignando a cada superficie valores de absorción y difusión específicos. Es un modelo geométrico vectorial que puede escalarse o deformarse fácilmente modificando los argumentos o ángulos de cada punto.

En las figuras que siguen se muestran algunas imágenes del modelo geométrico confeccionado.

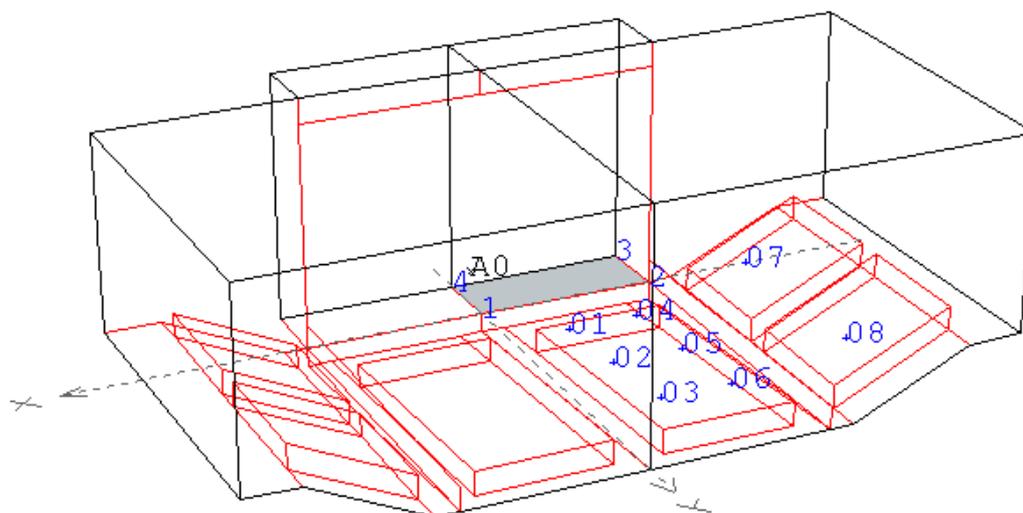


Figura 3. Modelo digital en CATT de la Sala.

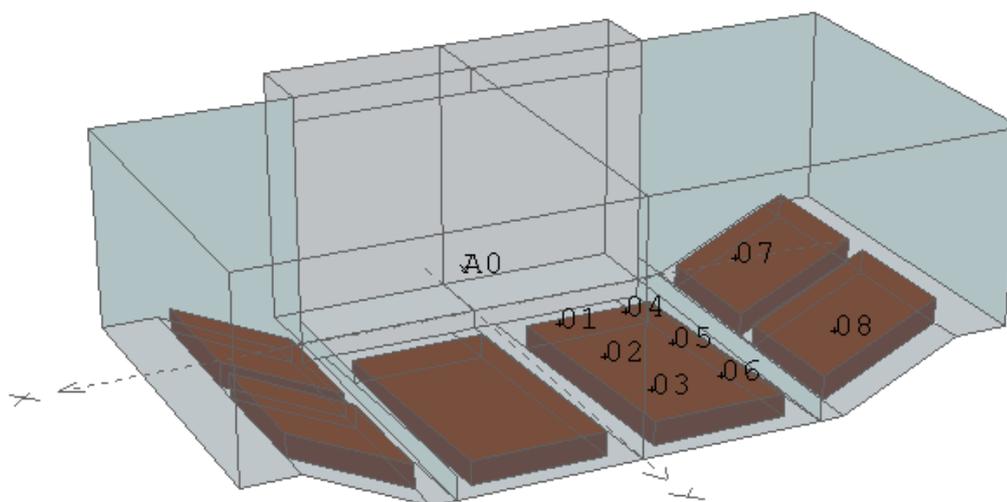


Figura 4. 3D del modelo digital de la Sala.

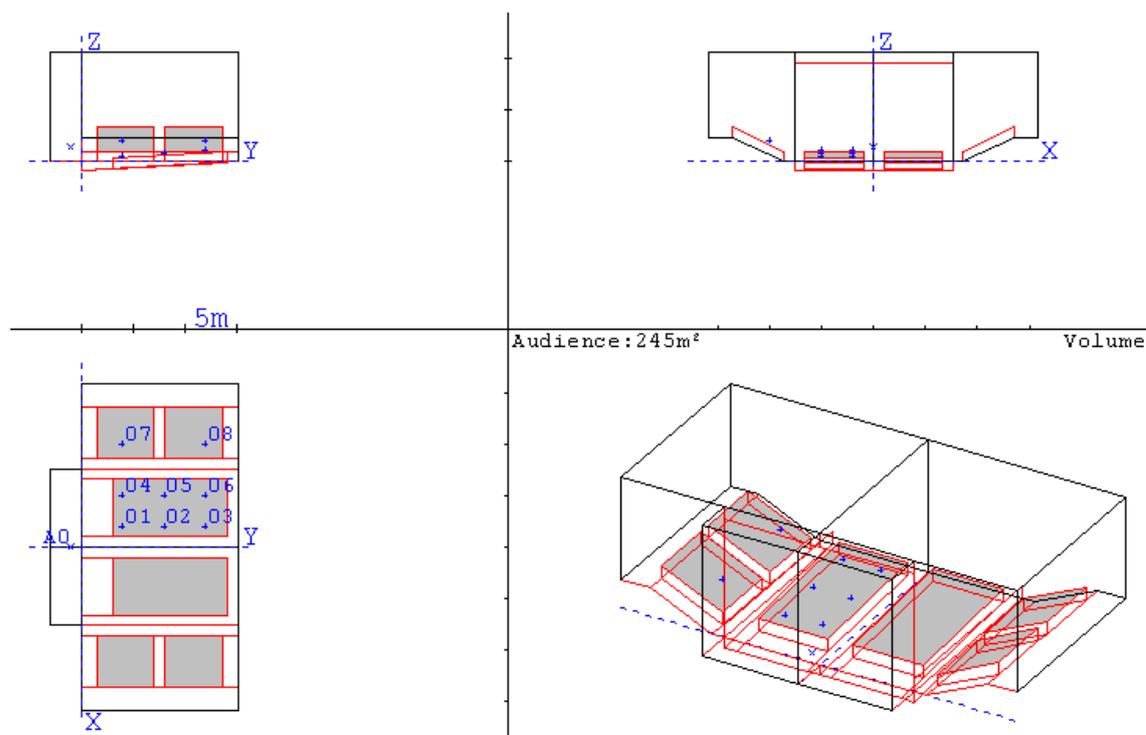


Figura 5. Vistas del modelo vectorial en CATT de la Sala.

## 2.1. Condiciones ambientales y coeficientes de absorción empleados

Para las simulaciones se emplearon los parámetros ambientales característicos de un ensayo climatizado o una función.

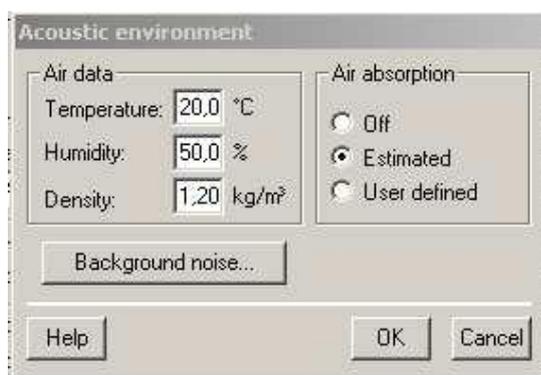


Figura 6. Condiciones ambientales escogidas para las simulaciones.

Los niveles de ruido de fondo por octava empleados en las simulaciones fueron los siguientes:

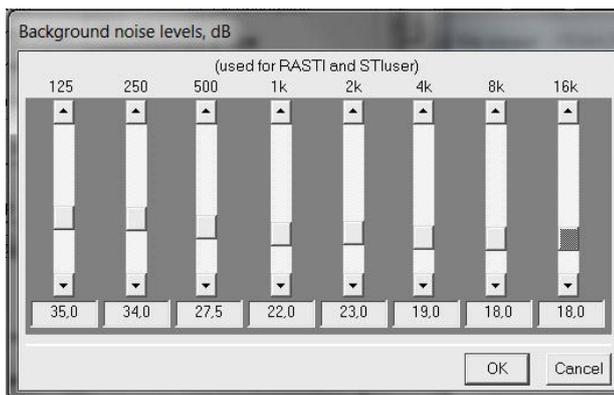


Figura 7. Niveles de ruido de fondo por octava empleados en las simulaciones.

Los coeficientes de absorción y difusión de los materiales de la sala se obtuvieron de mediciones en laboratorio, de mediciones previas en salas similares, y de tablas confiables. Algunos de los valores empleados se muestran en las figuras 8 a 10.

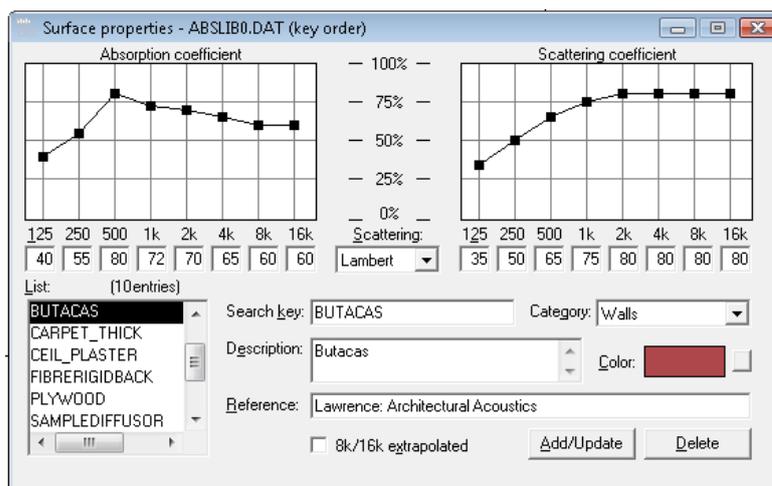


Figura 8. Coeficientes de absorción y de difusión de butacas de platea empleados en las simulaciones.

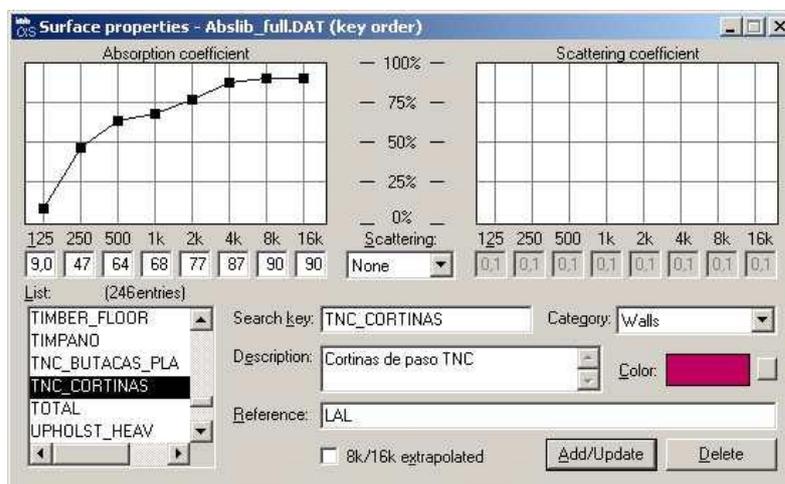


Figura 9. Coeficientes de absorción y de difusión de cortinas empleados en las simulaciones.

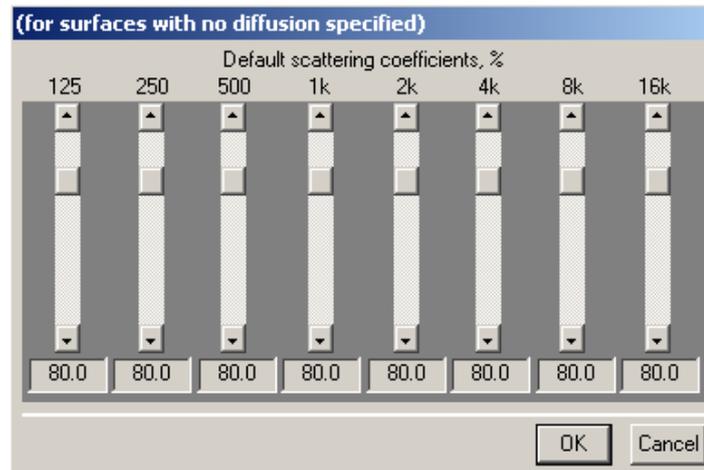


Figura 10. Coeficientes de difusión globales (Lambert).

### 3. Condiciones de las simulaciones

Las condiciones generales fueron:

- Sala desocupada y ocupada al 100%.
- Grandes superficies (escenario, cielorraso, paredes, etc.) con absorción y difusión acústica según cada material.
- Resto de las superficies con absorción residual (Estimada para el Paraninfo).
- Alta difusión global (método de Lambert).
- 40.000 rayos por octava.
- Tiempo de corte de rayo en cada simulación = 3500 ms

### 4. Resultados de las simulaciones con las butacas actuales

En las figuras 11 a 18 se muestran, a modo de ejemplo, algunos resultados de varias de las simulaciones realizadas a sala desocupada.

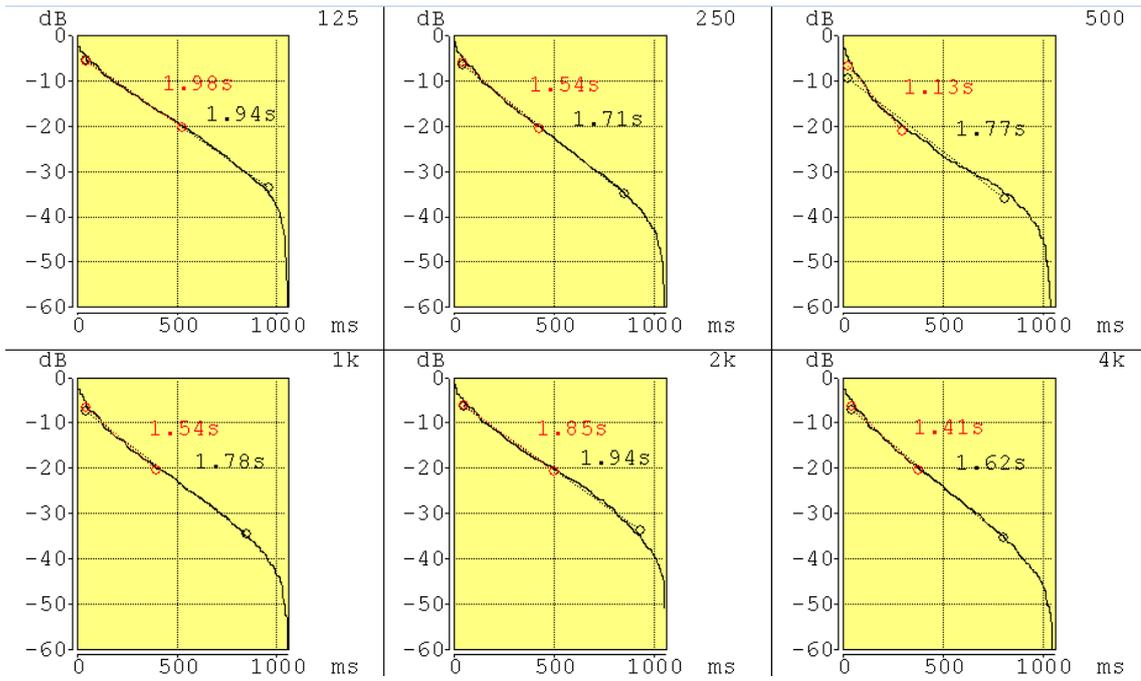


Figura 11. Resultado de la simulación en la posición 01 en platea.

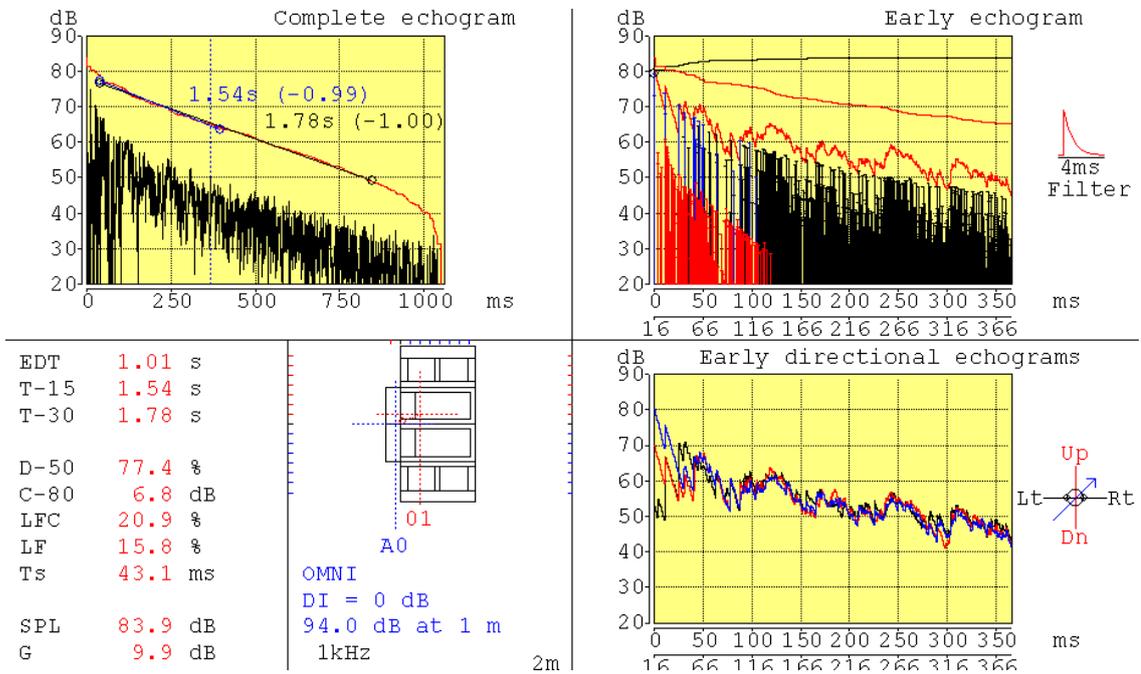


Figura 12. Resultado de la simulación en la posición 01 en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

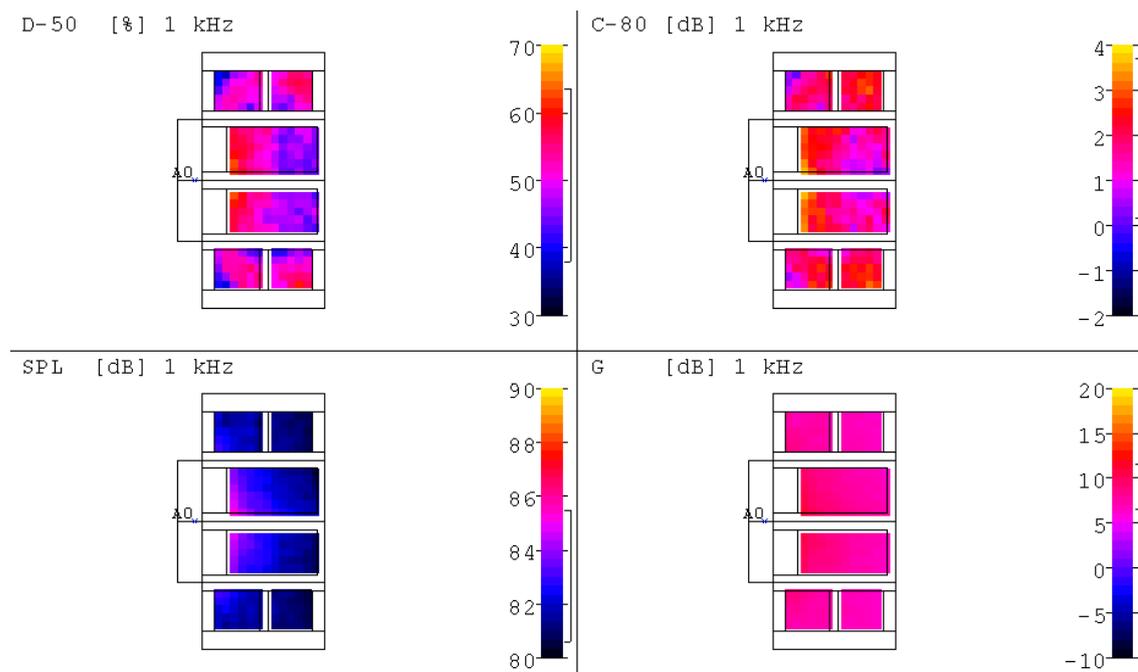


Figura 13. Distribución espacial de algunos parámetros (D50, C80, G y SPL) en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

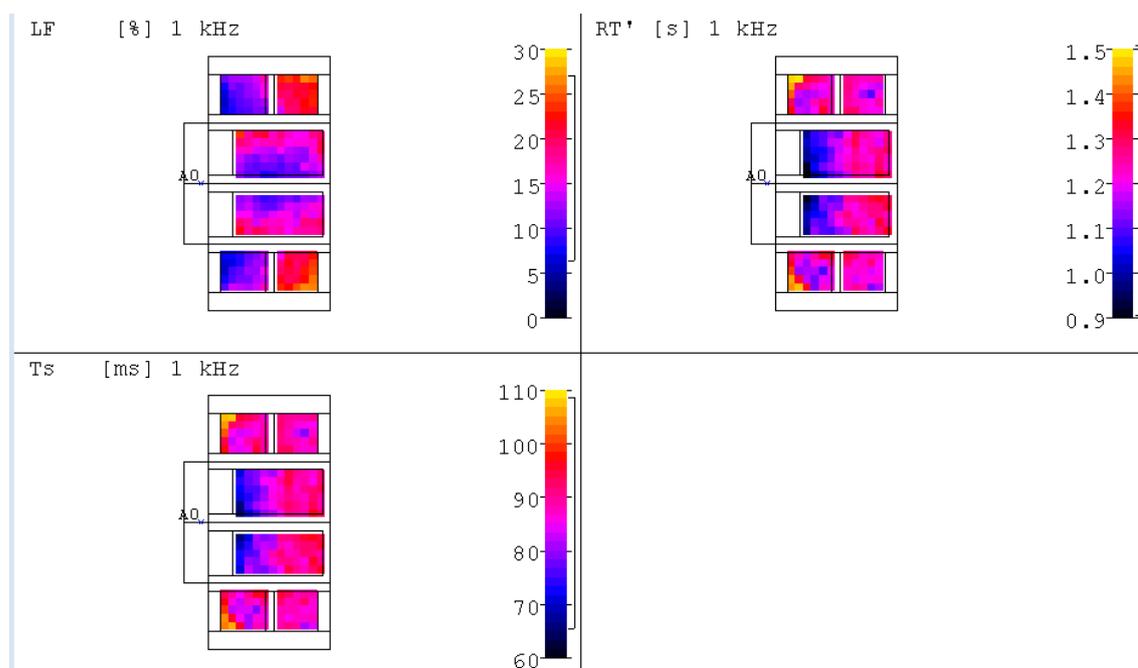


Figura 14. Distribución espacial de algunos parámetros (LF, RT y Ts) en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

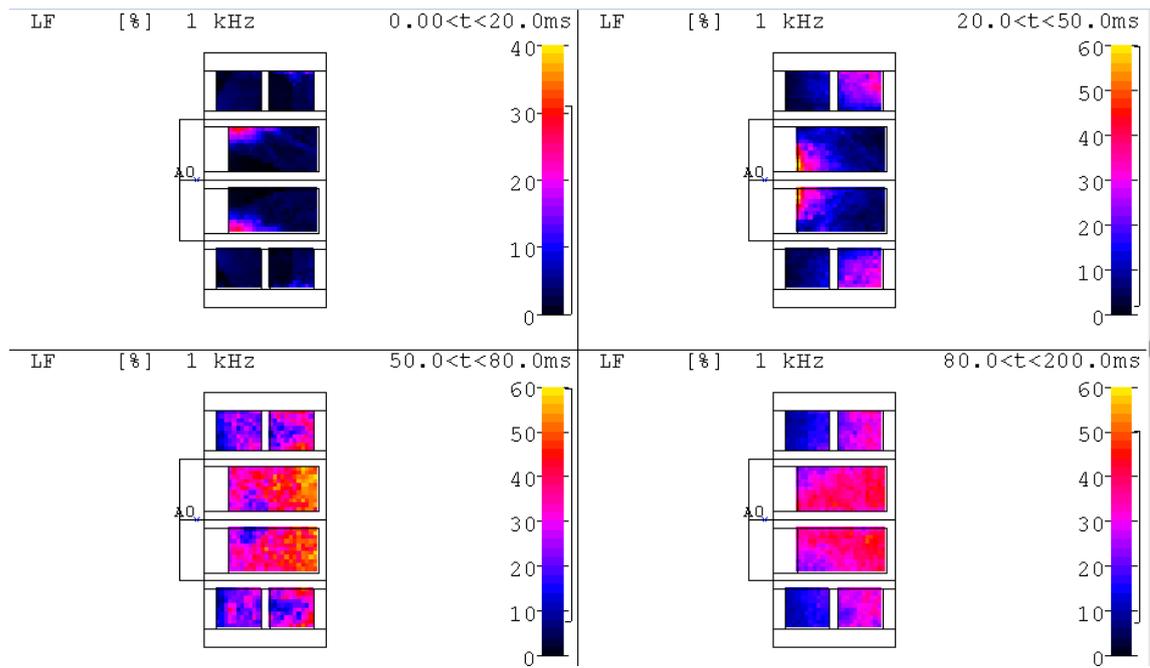
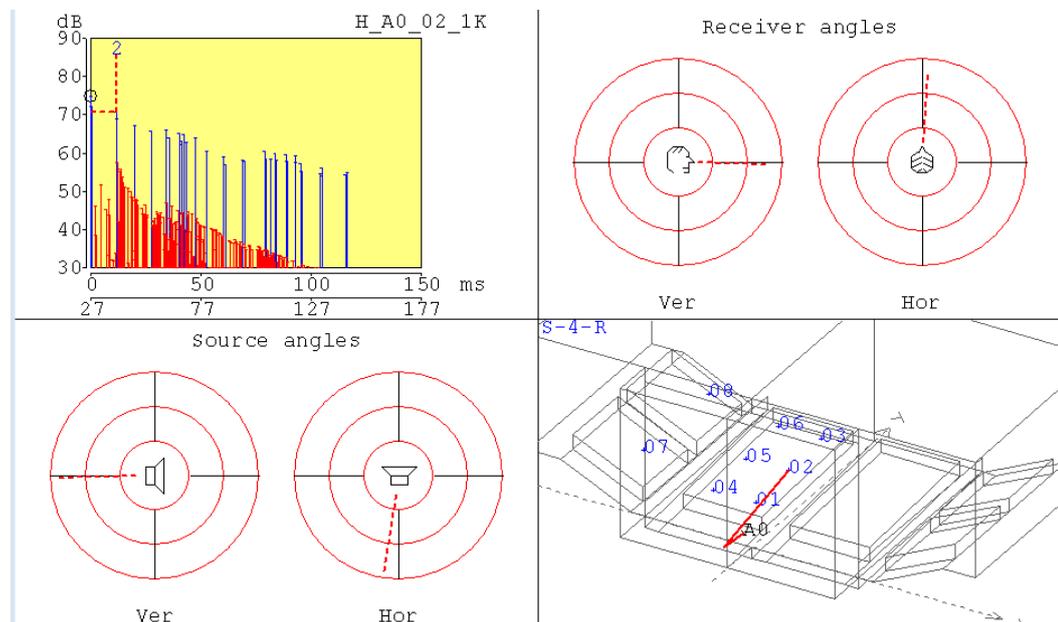


Figura 15. Distribución temporal de la energía lateral en platea para una frecuencia de 1000 Hz.



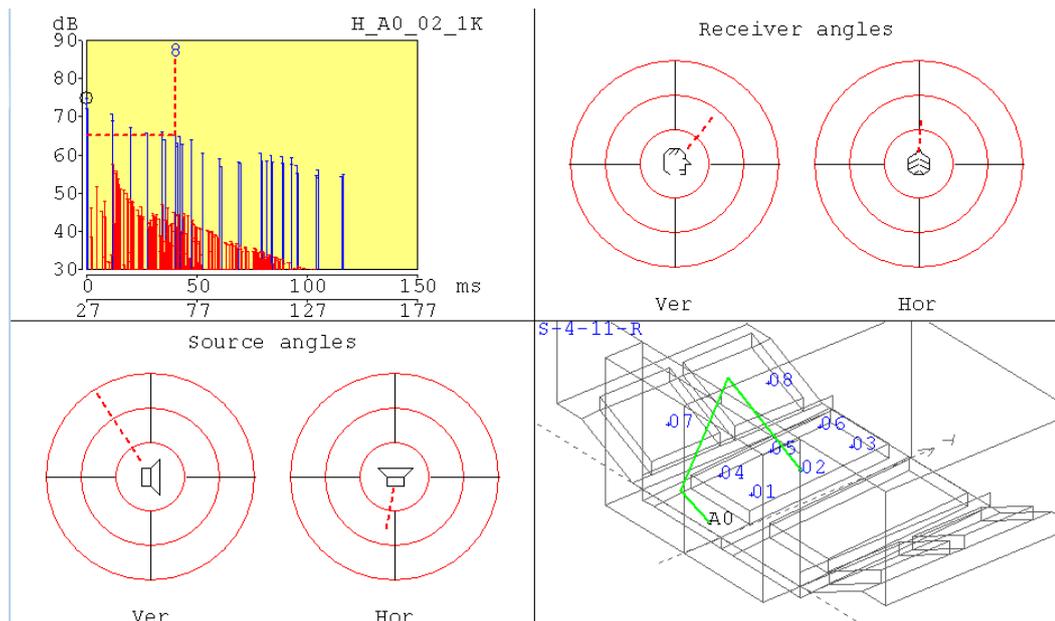


Figura 16. Reflectograma en la posición 02 en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

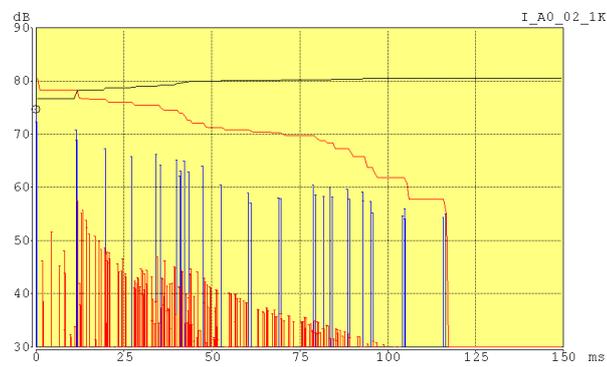


Figura 17. Ecograma en la posición 02 en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

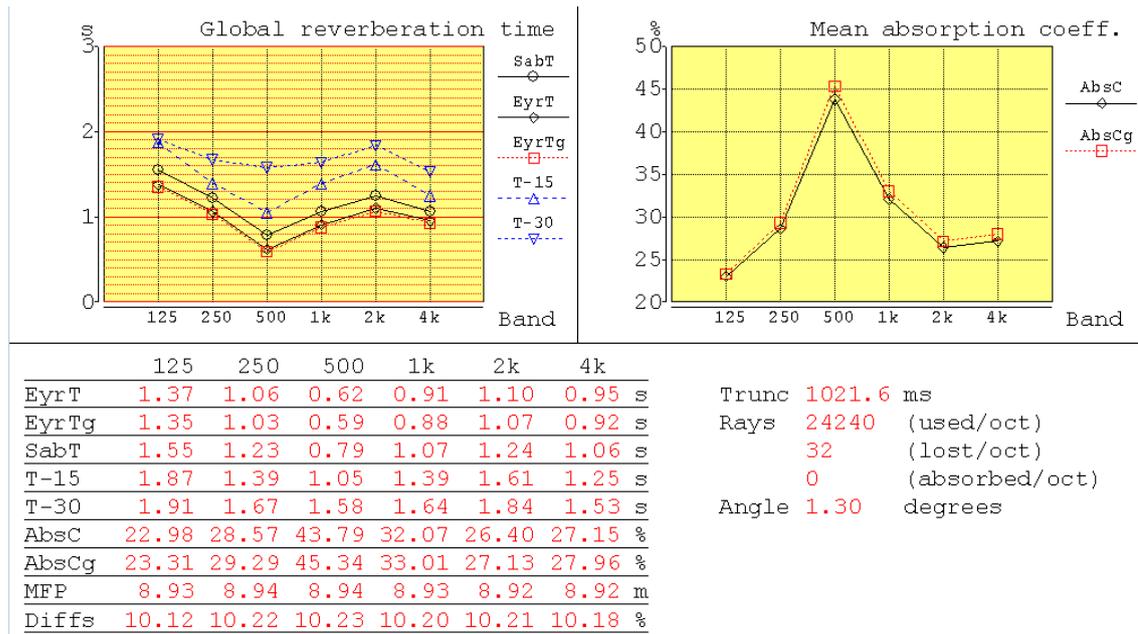


Figura 18. Valores globales a sala desocupada.

## 5. Resultados de las simulaciones a sala llena

En las figuras 19 a 26 se muestran, a modo de ejemplo, algunos resultados de varias de las simulaciones realizadas a sala llena -con coeficientes estimados por tablas.

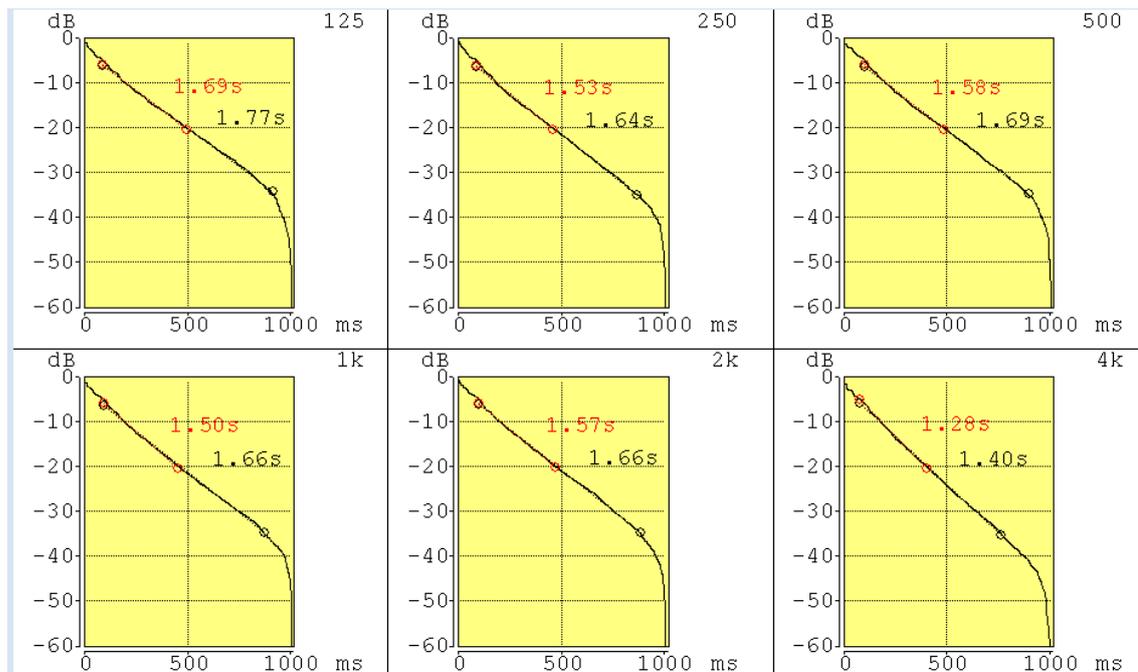


Figura 19. Resultado de la simulación en la posición 02 en platea.

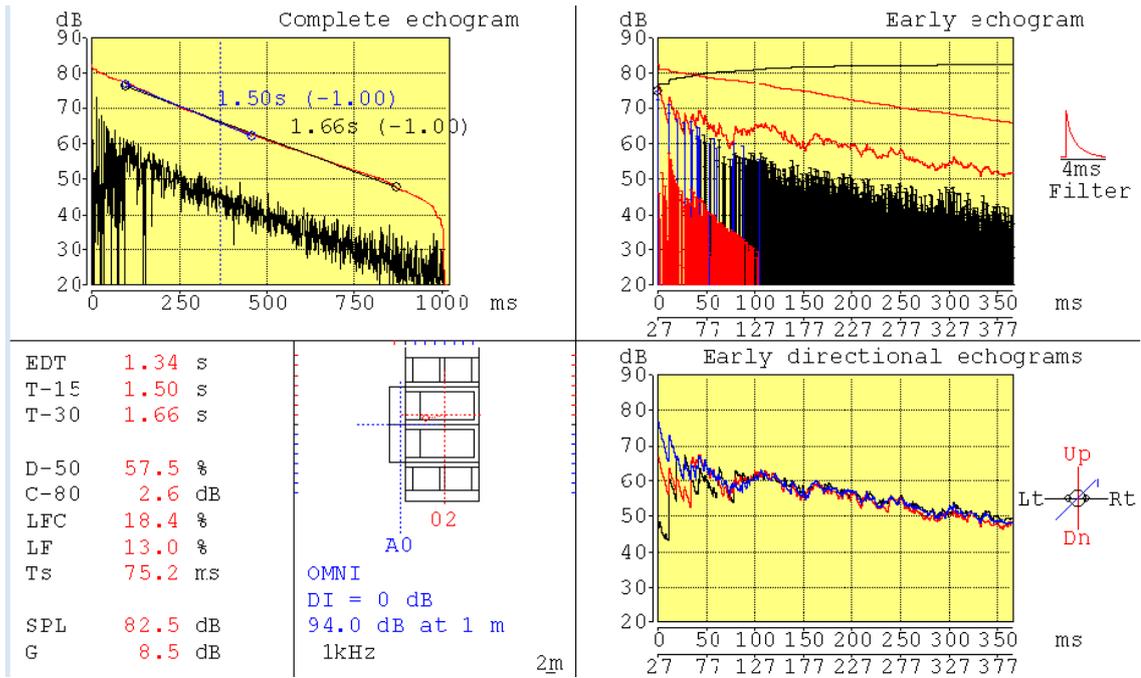


Figura 20. Resultado de la simulación en la posición 02 en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

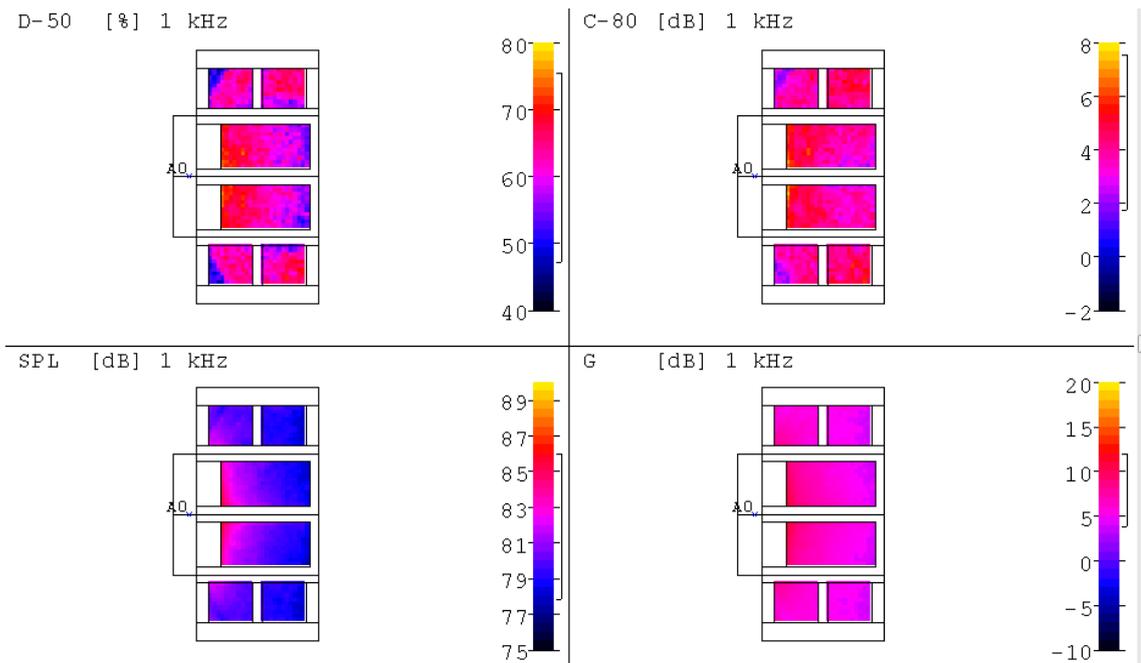


Figura 21. Distribución espacial de algunos parámetros (D50, C80, G y SPL) en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

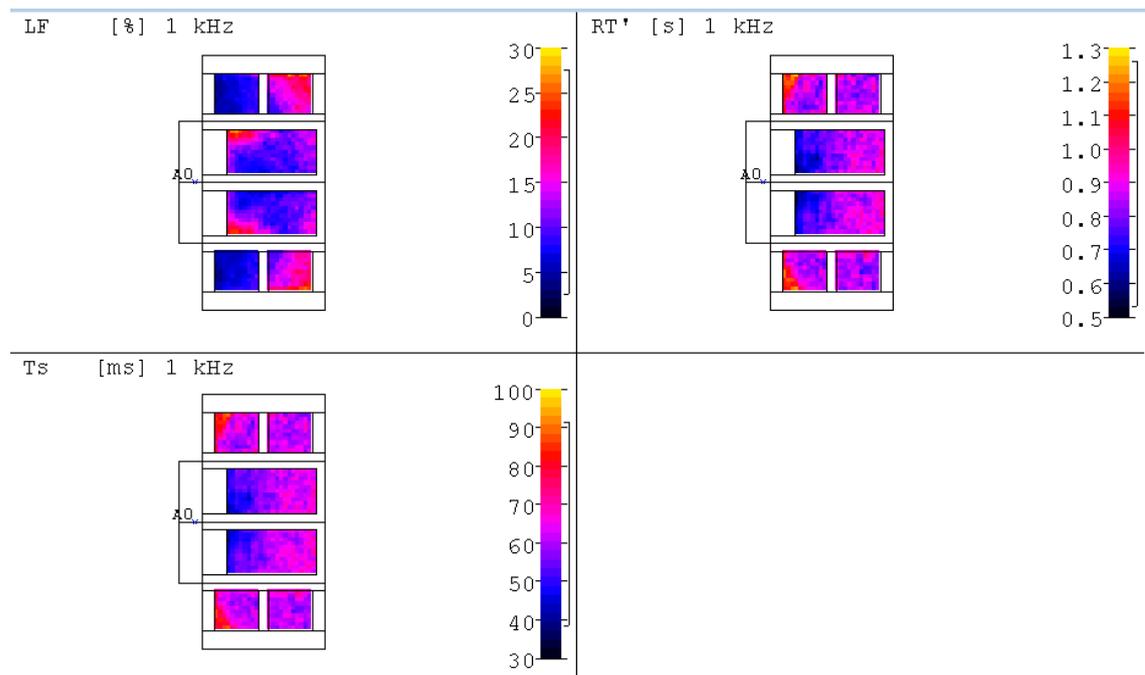


Figura 22. Distribución espacial de algunos parámetros (LF, RT y Ts) en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

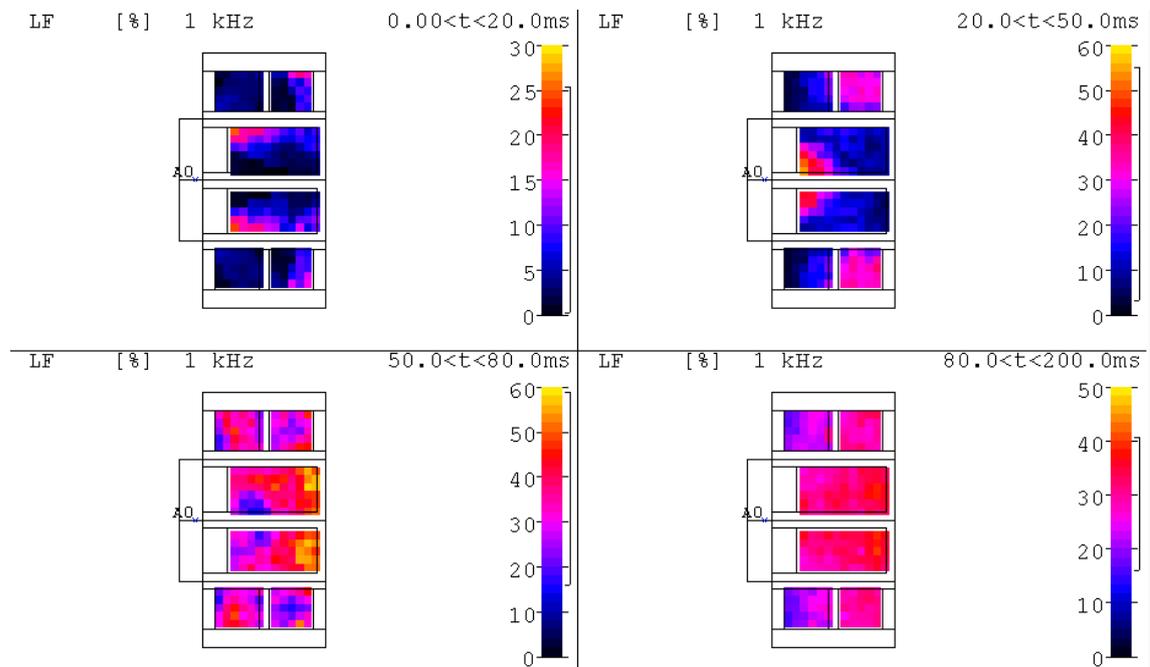


Figura 23. Distribución temporal de la energía lateral en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

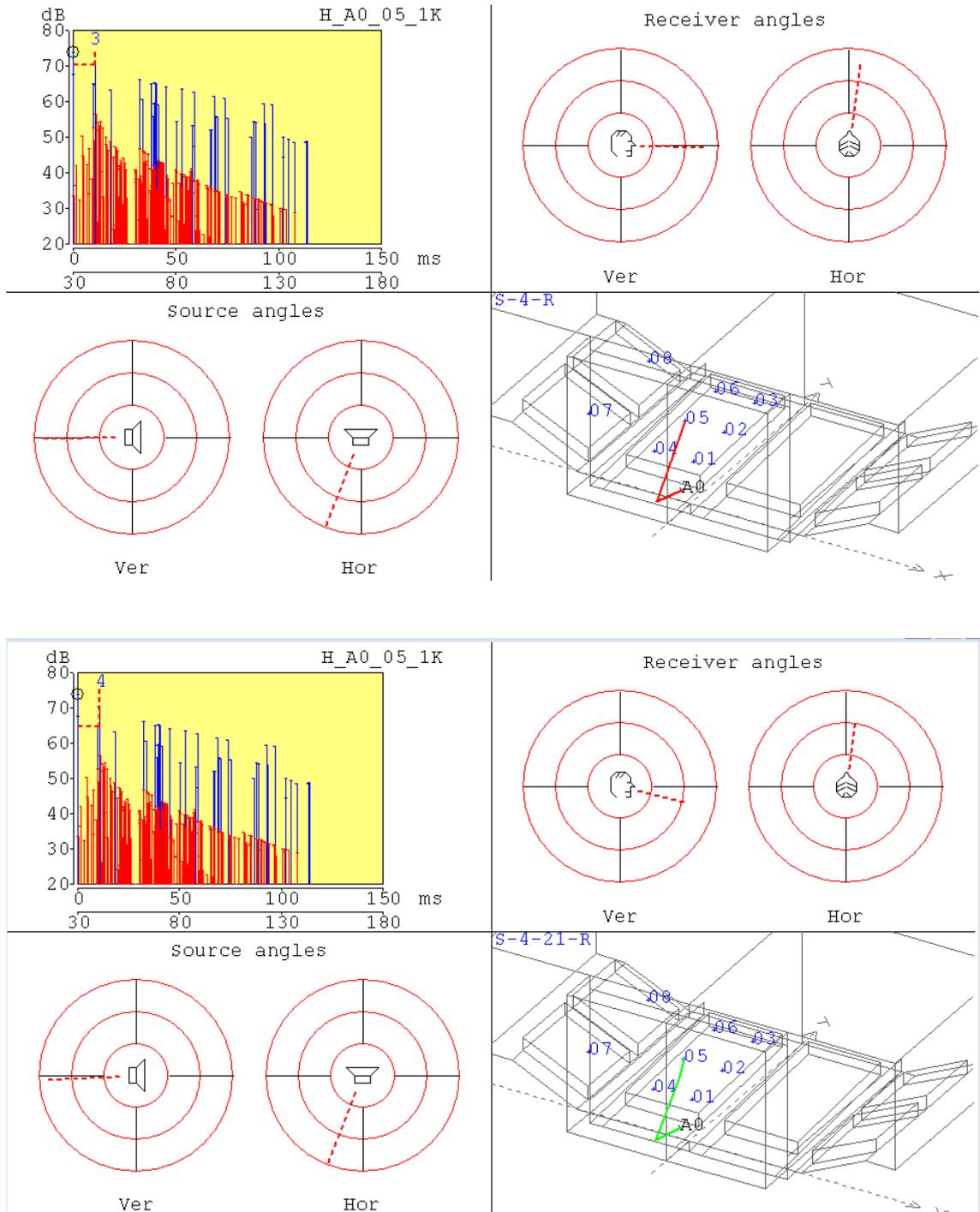


Figura 24. Reflectograma en la posición 05 en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

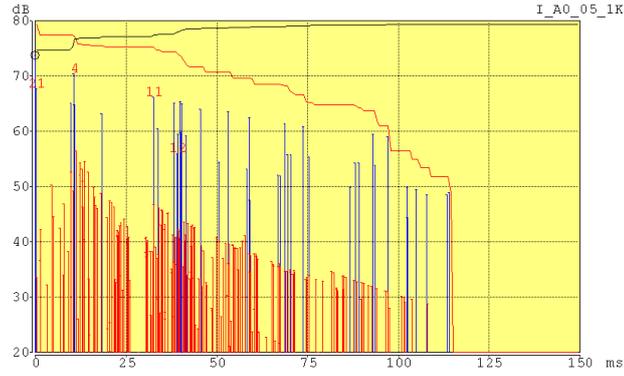


Figura 25. Ecograma en la posición 05 en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

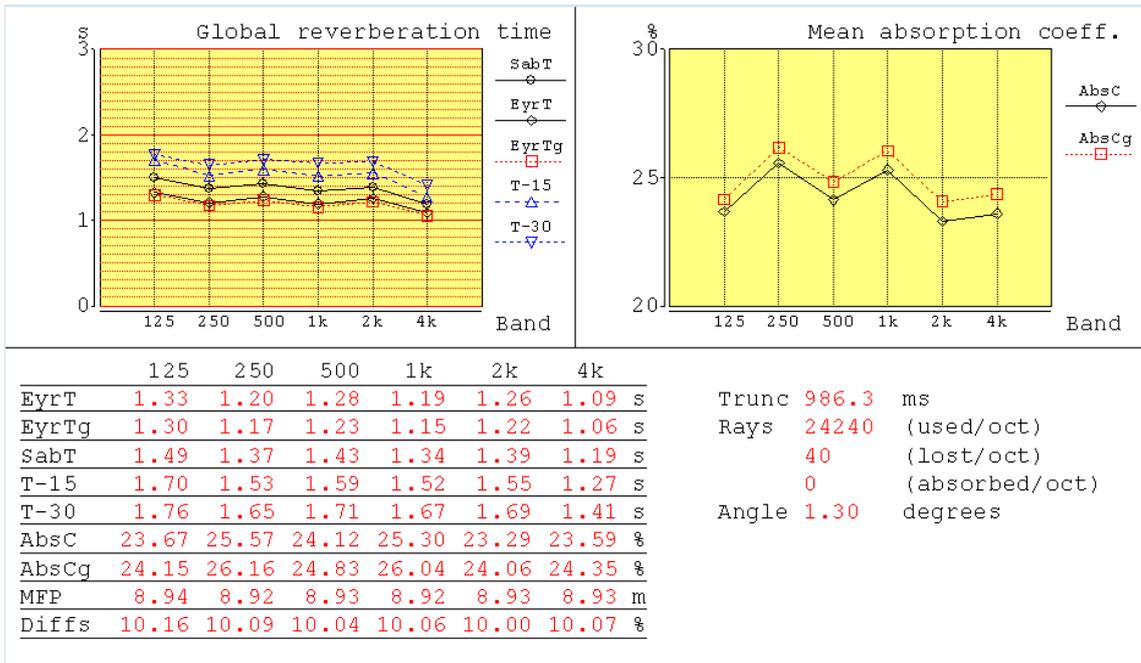


Figura 26. Valores globales a sala ocupada

## **Conclusiones**

Los valores de los parámetros acústicos obtenidos a partir de la simulación digital son adecuados de acuerdo al uso que se le da a la Sala. Sin embargo, existen algunos defectos acústicos -por ejemplo, ecos repetitivos- que deben ser corregidos. Para esto, se propone la colocación de dispositivos difusores de la energía acústica.

En relación a los ruidos de emisión e inmisión, deberán proyectarse con especial cuidado todos los ingresos a la Sala.

Los detalles del tratamiento interior y de los sistemas de aislamiento acústico serán entregados en informes posteriores.

Ing. Gustavo Basso

Arq. María Andrea Farina

## Apéndice

Descripción de los parámetros citados en este informe.

### Tiempo de reverberación (TR y T30)

Es el tiempo, en segundos, que tarda la energía acústica de una sala en caer a  $10^{-6}$  (-60 dB) del valor existente al interrumpirse la fuente de señal. Si se mide entre -5 dB y -35 dB y se multiplica por dos, el tiempo de reverberación se denomina T30.

Es común describir el TR en función de la frecuencia (en bandas de octava o de 1/3 de octava) considerándose el correspondiente a 1.000 Hz como el de referencia cuando se consigna un solo valor. La fórmula de Sabine para calcular el TR es:  $TR = 0,16 V/A$  [s]

En esta expresión, V es el volumen cúbico del recinto [ $m^3$ ] y A la absorción acústica total en *sabinios métricos* [ $m^2$ ].<sup>1</sup>

### Respuesta al impulso

La respuesta al impulso obtenida en cada oído del oyente  $f_i(t)$  y  $f_d(t)$  es el resultado de la convolución entre la señal temporal emitida por la fuente acústica  $p_n(t)$  y las funciones de transferencia que tipifican el recorrido total de ambas las señales con sus reflexiones  $g_i(t)$  y  $g_d(t)$ :

$$f_d(t) = p_n(t) * g_d(t)$$

$$f_i(t) = p_n(t) * g_i(t)$$

Que al presentarse de manera discreta queda:

$$g_{d,i}(t) \Rightarrow \begin{cases} \text{señal directa} = A_0 w_0(t - \Delta t_0) = \delta(t) \\ \text{reflexiones} = A_n w_n(t - \Delta t_n) \\ \text{rta. al impulso de la cabeza} = h_{d,i}(t) \end{cases}$$

$$\therefore f_{(d,i)}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n(t) * A_n w_n(t - \Delta t_n) * h_{n(d,i)}(t)$$

Esta expresión es la base de casi todos los cálculos que se emplean en el procesamiento digital de señales o DSP.

### Fracción lateral de energía (LE)

Parámetro monofónico que compara la salida de un micrófono con diagrama en forma de 8 ( $h_8^2(t)$ ) con la de un micrófono omnidireccional ( $h^2(t)$ ):

---

<sup>1</sup> La anterior es la fórmula de Sabine para calcular la reverberación. Existen otras fórmulas diferentes, entre las que se destacan las de Eyring, Millington, Fitzroy y Poujoule.

$$LE = \left[ \frac{\int_{0.005}^{0.08} h_8^2(t) dt}{\int_0^{0.08} h_0^2(t) dt} \right] 100\%$$

**Función de crecimiento de la energía**

$$ERF(\tau) = \int_0^\tau h^2(t) dt$$

Es la suma acumulativa de energía acústica a medida que transcurre el tiempo  $\tau$ .

**Claridad a 80 ms y a 50 ms (Reichardt, 1974)**

$$C_{80} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^{0.08} h^2(t) dt}{\int_{0.08}^\infty h^2(t) dt} \right] dB$$

$$C_{50} = 10 \log \left[ \frac{\int_0^{0.05} h^2(t) dt}{\int_{0.05}^\infty h^2(t) dt} \right] dB$$

Similar a la definición  $D_{50}$ , pero considerando la relación entre los primeros 50 ms de la señal y el resto de la señal en decibeles. El tiempo de corte a 80 ms se emplea para analizar señales musicales y el de 50 ms para palabra.

**Centro de tiempo (Dietsch y Kraak, 1986)**

$$t_{c(\tau)} = \frac{\int_0^\tau t \cdot h^2(t) dt}{\int_0^\tau h^2(t) dt}; \quad t_c = \lim_{\tau \rightarrow \infty} t_{c(\tau)}$$

Es el baricentro temporal de la respuesta al impulso de la sala.

.....

## Referencias

- Ando, Yoichi (1998). *Architectural Acoustics. Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners* (Springer Verlag, New York).
- Basso, Gustavo (1996). *Elementos de Acústica de Salas* (Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe).
- Beranek, Leo (1996). *Concert Halls and opera houses: How they sound*, Acoustical Society of America, New York, 1996)
- Beranek, Leo (2004). *Concert Halls and Opera Houses*, Springer – Verlag New York, INC.
- Hidaka, T y Beranek, L. (2000). “Objective and subjective evaluations of twenty-three operahouses in Europe, Japan, and the Americas”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1),368-383.
- Norma IRAM 4065/95.
- Norma ISO 3382-1997.