

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SOPORTE DE ESCENA EN TEATROS Y AUDITORIOS

PACS: 43.55.Gx

Planells, Ana<sup>1</sup>; Girón, Sara<sup>2</sup>; Cerdá, Salvador<sup>1</sup>; Segura, Jaume<sup>1</sup>; Cibrián, Rosa<sup>1</sup>; Zamarreño, Teófilo<sup>2</sup>; Giménez, Alicia<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Acústica Virtual Universitat Politècnica de València-Universitat de València. Edificio 5D

Camino de Vera s/n

46022 Valencia-Spain. [acusvirt@upv.es](mailto:acusvirt@upv.es)

<sup>2</sup>Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla.

Av. Reina Mercedes 2

41012 - Sevilla, España,

Tel: +34 954 557 129, Fax: +34 954 557 892

E-mails: [sgiron@us.es](mailto:sgiron@us.es); [teofilo@us.es](mailto:teofilo@us.es)

### ABSTRACT

Acoustics of the stage is of particular interest since it focuses on the study of the acoustic environment and the assessment of the sensation perceived by the performers of classical orchestras in concert halls. The ISO 3382-1 standard introduces two monophonic objective parameters of stage support, ST: early support ( $ST_{\text{Early}}$ ), related to the ease of hearing the other members of an orchestra; and late support ( $ST_{\text{Late}}$ ), related to the response of the hall as perceived by the musician. In this work, the behaviour of these two objective parameters measured in several halls from the Valencian Community of various typologies, acoustic characteristics, and geometric-architectural variables of the stage are analysed in order to study their variability and dependence on the type of hall.

### RESUMEN

La acústica del escenario resulta de especial interés ya que centra el estudio del entorno acústico y la valoración de la sensación percibida por los intérpretes de orquestas clásicas en las salas de conciertos. La norma ISO 3382-1 introduce dos parámetros objetivos monofónicos soporte de escena, ST: soporte precoz ( $ST_{\text{precoz}}$ ), relacionado con la facilidad de audición de los demás miembros de la orquesta, y soporte tardío ( $ST_{\text{tardío}}$ ), relacionado con la respuesta de la sala percibida por el músico. En este trabajo se analiza el comportamiento de estos dos parámetros objetivos medidos en varias salas de conciertos de la Comunidad Valenciana de diferentes tipologías, características acústicas y variables geométrico-arquitectónicas de los escenarios, con objeto de estudiar su variabilidad y su dependencia con el tipo de sala.

### INTRODUCCIÓN

Bajo el concepto de acústica del escenario se hace referencia al estudio del entorno acústico y de la valoración de la sensación percibida por los intérpretes de orquestas clásicas de la escena en las salas de concierto, teatros, auditorios y salas de ópera. Las primeras aportaciones sistemáticas de los requerimientos acústicos de los músicos, basados en experimentos

subjetivos, arrancan de los trabajos de Marshall *et al.* [1], utilizando los resultados de un trío de cuerda que interpreta en un entorno acústico simulado en condiciones de laboratorio; siguen los de Barron [2], basados en los resultados con un mayor número de músicos en una sala existente con un escenario cuya acústica era altamente variable. Ambos trabajos pioneros pusieron de manifiesto el efecto positivo en la sensación percibida por los músicos al recibir reflexiones precoces.

Los factores acústicos más importantes para los intérpretes son la audición de su propio instrumento, la de los otros instrumentos de la orquesta y la percepción de la respuesta acústica de la sala. El equilibrio entre estos factores es importante para la reproducción de *conjunto*. Los parámetros objetivos más reconocidos para valorar la acústica del escenario son los de soporte de escena, ST, en sus dos versiones: soporte precoz ( $ST_{precoz}$ ), para la percepción subjetiva de *conjunto* y *apoyo* entre los músicos de la orquesta; y el soporte tardío ( $ST_{tardío}$ ) para la percepción de la *reverberación* por parte del músico en la escena. Aunque se han propuesto aproximaciones objetivas alternativas o complementarias [3] y se ha criticado la validez de los parámetros ST [4], estos descriptores, introducidos en 1989 por Gade [5, 6], han sido recogidos, con carácter informativo, en el Anexo C de la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [7]. Ambos parámetros se derivan de las respuestas al impulso, omnidireccionales monofónicas, obtenidas a 1 m de la fuente, sin los intérpretes en el escenario, y se definen matemáticamente como:

$$ST = 10 \log \left[ \frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{\int_0^{0.01} p^2(t) dt} \right]_{r=1m} \quad (dB) \quad (1)$$

donde  $t=0$  coincide con la llegada del sonido directo.  $ST_{precoz}$  integra el sonido reflejado inicial, con límites  $t_1=20$  ms y  $t_2=100$  ms, en relación con la energía emitida desde la fuente (sonido directo y reflexión en el suelo) a 1 m. No se ha establecido un umbral de discriminación subjetiva para  $ST_{precoz}$  pero se ha sugerido [8] que una variación de 2 dB puede ser significativa para un músico. Para  $ST_{tardío}$  los límites para el sonido reflejado son  $t_1=100$  ms, y  $t_2=1000$  ms. Las medidas se realizan en bandas de octava y se trabaja con el promedio aritmético de las comprendidas entre 250 Hz y 2000 Hz. Gade definió también el parámetro  $ST_{total}$  para valorar el apoyo desde la sala, pero no se ha incluido en [7]; los límites en este caso son  $t_1=20$  ms y  $t_2=1000$  ms y, por tanto, es la suma logarítmica de los dos anteriores. En [7] se han recogido las principales sugerencias de Gade [9] para su medida, a excepción de medir más allá de 4 m de cualquier superficie reflectante, que se ha reducido a 2 m.

Recientemente este mismo autor [10] ha publicado una revisión sobre la acústica de la escena tras tres décadas de investigación experimental, destacando las aportaciones de Dammerud *et al.* con trabajos puramente objetivos (modelos a escala y computacionales de gran interés) y modelos subjetivos [3,11]. También conviene señalar el estudio realizado por Wenmaekers *et al.* [12] sobre cuáles son los intervalos temporales más apropiados y cuáles las condiciones de medición más adecuadas, haciendo una propuesta de optimización de los parámetros de soporte de escena existentes.

En este trabajo se analiza el comportamiento de los dos parámetros objetivos de escena medidos en varias salas de conciertos de diferentes tipologías de la Comunidad Valenciana que han sido objeto de estudio en varios proyectos de investigación de los autores de la comunicación.

## MÉTODO EXPERIMENTAL







Los procedimientos empleados han sido los establecidos en la ISO-3382-1 [7], y las medidas se llevaron a cabo sin la presencia de público, ni músicos, y el escenario libre de sus instrumentos. Se controlaron la temperatura y la humedad relativa mediante un termohigrómetro de precisión siendo el rango de variación de 22-28°C y 60-70%, respectivamente. La respuesta al impulso se ha obtenido mediante barridos sinusoidales, generados y analizados por el programa WinMLS 2004 mediante una tarjeta de sonido PCMI de la firma DIGIGRAM, mod. VXpocket V2 de dos canales. La fuente omnidireccional DO-12 de 01-dB

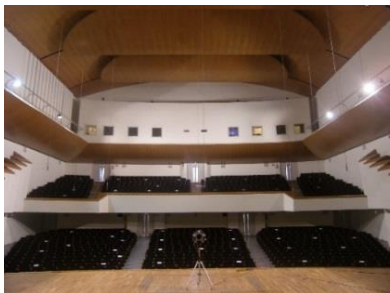







Stell se localiza a 1 m del suelo. Los micrófonos G.R.A.S. tipo 40 AK ½-pulgada omnidireccionales (y su correspondiente fuente, GRAS 12AA, y preamplificador G.R.A.S Type 26AK) se sitúan a 1 m del suelo y a una distancia fuente receptor de 1 m. En algunas salas las respuestas al impulso se han obtenido también con otras señales (MLS y ruido rosa) comprobándose que los parámetros de escena no presentan variaciones significativas obtenidos con una u otra señal. Las respuestas al impulso (RI) monoaurales medidas fueron posteriormente procesadas para obtener los parámetros de soporte de escena para cada banda de octava en el rango de frecuencias de 125-4000 Hz, en cada receptor.

### DATOS ARQUITÉCTONICOS Y ACÚSTICOS DE LAS SALAS

La muestra estudiada está constituida por siete salas de la Comunidad Valenciana de variada tipología y tamaño. En la Tabla 1 se incluyen los datos más relevantes de las mismas, nombre y acrónimos ordenados alfabéticamente, localización, año de construcción o restauración, fotografías y datos geométricos relevantes de la sala y de sus escenarios.

**Tabla 1.** Datos y fotografías de la zona de audiencia y escenarios de las salas estudiadas.

| Acrónimo, localización, fecha. Forma  |  | Datos sala   | Datos escena  |
|---|--|--|---|
| Vista sala zona audiencia   | Vista del escenario  |  |   |
| Auditorio Palacio de Congresos (APC), Castellón de la Plana, 2004. Irregular        |  | $V_S=14850+4891=19741 \text{ m}^3$<br>$N=1200$ butacas<br>$V/N=12.4$<br>Receptores= 51 | $V_E=4891 \text{ m}^3$<br>$S=242 \text{ m}^2$<br>$An=19.6 \text{ m}$<br>$Al=17.2 \text{ m}$<br>$Pr=12.4 \text{ m}$<br>$Al/An=0.88$<br>$Pr/An=0.63$<br>Receptores=8    |
|  |   |  |   |
| Gran Teatro A. Ferrandis de Paterna (GTF), 1928 (2000). Rectangular                 |  | $V=2700+4592=7292 \text{ m}^3$<br>$N=535$ butacas<br>$V/N=4.8$<br>Receptores= 25       | $V_E=4592 \text{ m}^3$<br>$S=276 \text{ m}^2$<br>$An=20.7 \text{ m}$<br>$Al=17.8 \text{ m}$<br>$Pr=12.5 \text{ m}$<br>$Al/An=0.86$<br>$Pr/An=0.60$<br>Receptores= 4   |
|  |  |  |   |
| Palau des Arts Sala Auditori (PAA), 2005. Flecha-abanico                            |  | $V_S=17690+3740=21430 \text{ m}^3$<br>$N=1500$ butacas<br>$V/N=11.8$<br>Receptores=28  | $V_E= 3740 \text{ m}^3$<br>$S=194 \text{ m}^2$<br>$An= 15.3 \text{ m}$<br>$Al= 19.3 \text{ m}$<br>$Pr=12.6 \text{ m}$<br>$Al/An=1.26$<br>$Pr/An=0.82$<br>Receptores=8 |
|  |  |  |   |

| Tabla 1. Datos y fotografías de la zona de audiencia y escenarios de las salas estudiadas. (Cont.) |  |   |  |
|--|--|---|--|
| Acrónimo, localización, fecha. Forma   |  | Datos sala  | Datos escena   |
| Vista sala zona audiencia  | Vista del escenario  |   |  |
| Palau de la Música, Sala Iturbi (PMI), 1987. Abanico   |  | $V_S=14700+2980=17680 \text{ m}^3$<br>$N=1817$ butacas<br>$V/N=8.1$<br>Receptores= 66 | $V_E=2980 \text{ m}^3$<br>$S=187 \text{ m}^2$<br>$An=16.6 \text{ m}$<br>$Al=15.90 \text{ m}$<br>$Pr=10.7 \text{ m}$<br>$Al/An=0.96$<br>$Pr/An=0.64$<br>Receptores=4      |
|                   |    |   |  |
| Teatro de la Banda Primitiva de Liria (TBP), 1951 (1992). Abanico (2 niveles)                      |  | $V=967+2590=3557 \text{ m}^3$<br>$N=967$ butacas<br>$V/N=5.5$<br>Receptores= 81       | $V_E= 2590 \text{ m}^3$<br>$S= 176 \text{ m}^2$<br>$An= 13.4 \text{ m}$<br>$Al= 14.8 \text{ m}$<br>$Pr= 12.9 \text{ m}$<br>$Al/An=1.10$<br>$Pr/An=0.96$<br>Receptores=14 |
|                  |   |   |  |
| Teatro Principal (TPA), Alicante, 1847, 1905-1915. Herradura                                       |  | $V=4539+4765=9304 \text{ m}^3$<br>$N=1072$ butacas<br>$V/N=4.1$<br>Receptores= 39     | $V_E= 4765 \text{ m}^3$<br>$S= 219 \text{ m}^2$<br>$An= 16.9 \text{ m}$<br>$Al= 21.8 \text{ m}$<br>$Pr= 13.5 \text{ m}$<br>$Al/An=1.29$<br>$Pr/An=0.80$<br>Receptores=4  |
|                 |  |   |  |
| Teatro Principal de Valencia (TPV), 1832-1991. Herradura   |  | $V=6986+4091=11077 \text{ m}^3$<br>$N=1924$ butacas<br>$V/N=5.7$<br>Receptores=53     | $V_E=4091 \text{ m}^3$<br>$S= 329 \text{ m}^2$<br>$An= 17.2 \text{ m}$<br>$Al= 12.5 \text{ m}$<br>$Pr= 17.5 \text{ m}$<br>$Al/An=0.72$<br>$Pr/An=1.02$<br>Receptores=12  |
|                 |  |   |  |

En la Tabla 2 se presentan los tiempos de reverberación, promediados espacialmente en cada uno de los recintos escénicos en todos los puntos de medida (Tabla 1, columna 3), en bandas de octava. Destacan las salas, Teatro Principal de Alicante (TPA) y Teatro Principal de Valencia (TPV) como las salas más sordas en todas las bandas de octava.

## RESULTADOS

En la primera sección de este apartado se describen los resultados experimentales de los dos parámetros de escena, en lo que se refiere a su comportamiento espectral, para las

**Tabla 2.** Tiempos de reverberación (en segundos) de las salas.

| Sala | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| APC  | 1.97   | 2.24   | 2.39   | 2.51    | 2.32    | 2.10    |
| GTF  | 2.50   | 2.14   | 1.70   | 1.53    | 1.48    | 1.40    |
| PAA  | 1.55   | 1.73   | 1.94   | 2.02    | 1.99    | 1.92    |
| PMI  | 2.37   | 2.53   | 2.53   | 2.34    | 2.10    | 1.85    |
| TBP  | 1.93   | 1.66   | 1.41   | 1.30    | 1.21    | 1.07    |
| TPA  | 1.43   | 1.43   | 1.26   | 1.17    | 1.15    | 1.09    |
| TPV  | 1.59   | 1.58   | 1.52   | 1.47    | 1.35    | 1.18    |

frecuencias comprendidas entre 125-4000 Hz. En las dos secciones siguientes se realiza un análisis de los valores promedios espectrales de los parámetros.

### Parámetros de Escena en función de la Frecuencia

En la Figura 1 se presenta el comportamiento espectral de los parámetros de escena para los 7 recintos de la Comunidad Valenciana estudiados, considerando las bandas de octava comprendidas entre 125-4000 Hz. La zona gris delimita los valores máximos y mínimos de los parámetros para cada banda de octava. La línea negra es el promedio espacial del parámetro en cada una de las seis bandas de octava. Cabe señalar que en la mayor parte de las salas hay gran variabilidad entre los diferentes puntos de medida, en especial para el parámetro  $ST_{precoz}$ . Presentan una menor variabilidad el teatro Ferrandis de Paterna, el Palau de la Música y el teatro Principal de Alicante, en especial a frecuencias bajas y medias. Los promedios espaciales, marcados por las líneas de color negro, muestran una gran variabilidad con la frecuencia, tanto para el parámetro precoz como el tardío; una tendencia similar se ha observado en otros recintos escénicos españoles [13] y del Reino Unido [14].

Considerando un decaimiento del sonido en el recinto escénico puramente exponencial (campo sonoro difuso), la densidad de energía reflejada normalizada depende del volumen  $V$  del recinto (Tabla 1) y del tiempo de reverberación  $T$  en las diferentes bandas de octava (Tabla 2), que puede expresarse como:

$$\varepsilon'(t) = \frac{\varepsilon(t)}{E_{D10}} = \frac{13.82 \cdot 31200}{V} e^{-\frac{13.82t}{T}} \quad (s^{-1}) \quad 0 \leq t < \infty, \quad (2)$$

Y así, sustituyendo e integrando en el numerador de la ecuación (1), y aproximando el denominador al sonido directo y a la reflexión especular en el suelo, resulta:

$$ST_{precoz} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{31200(T/V)(\exp(-0.276/T) - \exp(-1.38/T))}{100/r^2 + 18} \right\}_{r=1m} = \quad (3)$$

$$= 10 \log_{10} \left\{ (T/V)(\exp(-0.276/T) - \exp(-1.38/T)) \right\} + 24.2 \quad (dB),$$

El efecto de la reflexión en el suelo se evalúa teniendo en cuenta que la atenuación con la distancia por divergencia es aproximadamente 7 dB (correspondiente a  $\sqrt{5} m$ ) lo que supone el 20% del valor correspondiente al sonido directo. La atenuación adicional debida a la absorción en el suelo se ha estimado como el 2% del sonido directo en todos los casos. Análogamente, sustituyendo en la ecuación (1) para los límites de  $ST_{tardío}$ , y las mismas consideraciones anteriores para el denominador, se obtiene la expresión:

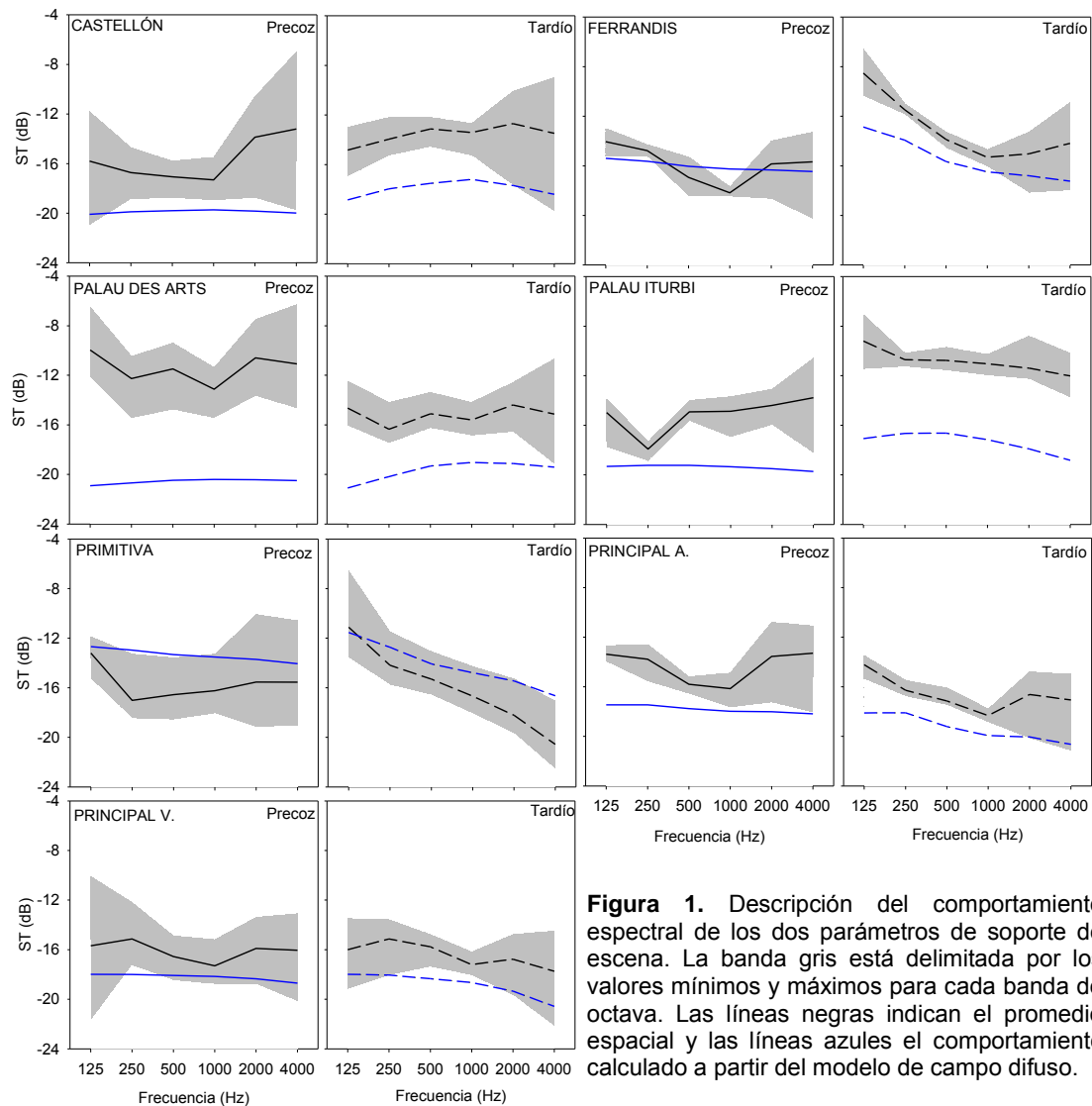
$$ST_{tardío} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{31200(T/V)(\exp(-1.38/T) - \exp(-13.82/T))}{100/r^2 + 18} \right\}_{r=1m} \quad (4)$$

$$= 10 \log_{10} \left\{ (T/V)(\exp(-1.38/T) - \exp(-13.82/T)) \right\} + 24.2 \quad (dB),$$

Los valores de los parámetros de escena calculados de acuerdo con las ecuaciones (3) y (4) se han representado en la Figura 1 (líneas azules). Cabe comentar que es posible escribir las ecuaciones equivalentes a (3) y (4) partiendo del modelo de Barron [15], que se escribirán:

$$ST_{precoz}(Barron) = 10 \log_{10} \left\{ (T/V) \exp(-0.04/T) (\exp(-0.276/T) - \exp(-1.38/T)) \right\} + 24.2 \quad (dB) \quad (5)$$

$$ST_{tardío}(Barron) = 10 \log_{10} \left\{ (T/V) \exp(-0.04/T) (\exp(-1.38/T) - \exp(-13.82/T)) \right\} + 24.2 \quad (dB) \quad (6)$$



**Figura 1.** Descripción del comportamiento espectral de los dos parámetros de soporte de escena. La banda gris está delimitada por los valores mínimos y máximos para cada banda de octava. Las líneas negras indican el promedio espacial y las líneas azules el comportamiento calculado a partir del modelo de campo difuso.

Como era de esperar ambos modelos coinciden a distancias próximas a la fuente, ya que la exponencial adicional que aparece en las ecuaciones de Barron, en los valores extremos de la Tabla 2 son muy próximas a 1:  $\exp(-0.04/2.53) = 0.98$  y  $\exp(-0.04/1.07) = 0.96$ .

En general la dependencia con la frecuencia de los parámetros de escena calculados teóricamente presentan un comportamiento más suave que lo correspondiente a los valores experimentales, y solo en las salas que son propiamente teatros de prosenio de tipología herradura o abanico es donde se aproximan los resultados experimentales a las previsiones de campo difuso: teatro de Paterna, Primitiva de Liria, Principal de Valencia y Principal de Alicante.

También es importante señalar que, a excepción del teatro de la Banda Primitiva de Liria, los resultados experimentales presentan valores superiores que los calculados teóricamente. En algunos casos las diferencias son apreciables (Auditorio de Castellón,  $\sim 2.5$  dB menos para  $ST_{precoz}$  y  $\sim 4$  dB menos para  $ST_{tardío}$ , Palau des Arts  $\sim 7$  dB menos para  $ST_{precoz}$  y  $\sim 3$  dB menos para  $ST_{tardío}$  y en Palau sala Iturbi  $\sim 4.5$  dB menos para  $ST_{precoz}$  y  $\sim 6$  dB menos para  $ST_{tardío}$  a frecuencias medias). La razón de estas notorias diferencias se debe a la existencia de techos y superficies reflectantes que dirigen numerosas reflexiones tempranas a la zona de los músicos.

**Valores Promedios Espectrales de los Parámetros de Escena**

La Tabla 3 muestra los valores aritméticamente promediados, para las octavas 0.25-2 kHz, de los parámetros de escena en las diferentes posiciones de medida de las 7 salas estudiadas. En algunos casos las diferencias entre unas y otras posiciones en la sala exceden los 2 dB de umbral diferencial sugerido para  $ST_{precoz}$  [8]; en particular este hecho ocurre en la sala TBP, donde al incluir muchos puntos de medida se pueden presentar grandes diferencias en el entorno de los mismos. En todos los recintos los resultados están dentro del rango típico que especifica la norma ISO 3382-1 [7]: (-24 dB; -8 dB) para  $ST_{precoz}$  y (-24 dB; -10 dB) para  $ST_{tardío}$ .

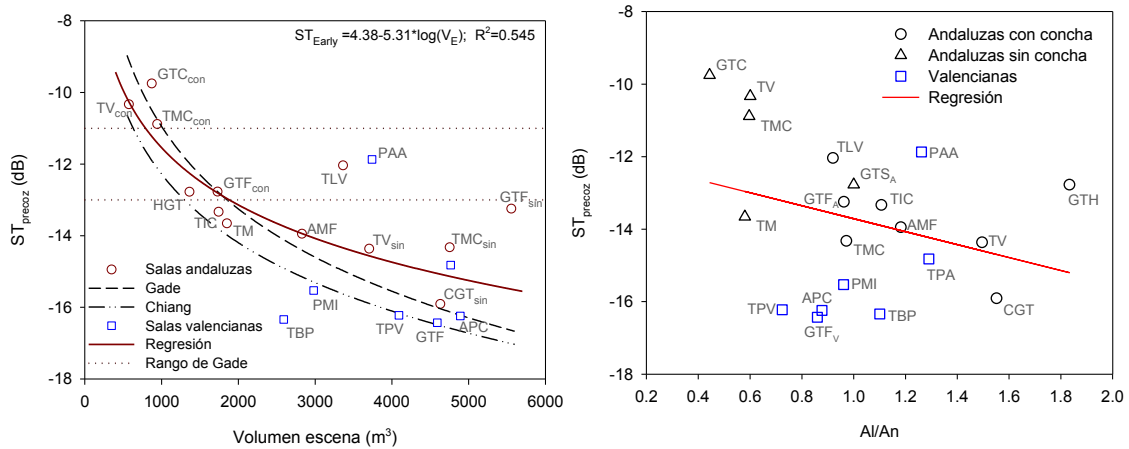
Además, promediando espacialmente los resultados en los diferentes puntos de la escena, cada sala está caracterizada por un valor único de cada parámetro, dichos valores se muestran en la última columna de la Tabla 3. Para  $ST_{precoz}$  los valores promedio están dentro del rango de -16.3 dB del TBP de Liria y -11.9 dB de PAA. En cuanto a  $ST_{tardío}$  el rango de variación es de -17.1 dB del TPA y -11 dB del PMI. De acuerdo con numerosos experimentos subjetivos, Gade [6] estima que valores de  $ST_{precoz}$  en el rango -13 dB y -11 dB corresponden a situaciones de conjunto satisfactorias, también Chiang *et al.* [16] señalan en su trabajo de campo un valor óptimo de  $\sim$ -12 dB para  $ST_{precoz}$ . Por otra parte Ueno *et al.* [17], concluyen de sus experimentos de laboratorio con orquestas, que un nivel muy alto de la energía reflejada precoz, correspondiente a  $ST_{precoz}$  en el rango -10 dB a -7 dB, era displicente para la mayoría de los músicos porque enmascaraba la reverberación, no contribuyendo al apoyo. Si atendemos a esas consideraciones solo PAA se sitúa en el rango óptimo.

Para  $ST_{tardío}$  no existen estudios de percepción subjetiva con músicos relativos a sus valores óptimos, y las escasas valoraciones existentes no son comparables debido a las redefiniciones sufridas en los límites de integración de la energía reflejada en la ecuación (1). En relación al balance óptimo entre los niveles reflejados precoz y tardío las discusiones en la literatura son muy cualitativas, y a veces contradictorias, estimándose que valores de  $ST_{tardío}$  superiores o similares a  $ST_{precoz}$  pueden causar enmascaramiento de parte del sonido reflejado inicial, perjudicando la sensación de conjunto de los músicos. En estos recintos valencianos, a excepción de PAA y TPA, el resto presenta valores de  $ST_{tardío}$  iguales o superiores a  $ST_{precoz}$ .

Estas consideraciones respecto al balance entre los dos niveles, de tal forma que haya contribuciones beneficiosas para el soporte a los músicos, tanto en relación al conjunto como a la percepción de la respuesta acústica de la sala, deben tomarse con reservas. Ya Gade [10] señala que la investigación en el campo de la acústica de la escena es por el momento muy insuficiente y dispersa, y requeriría aunar esfuerzos para reunir datos en más salas, relativos a la percepción de los músicos, y medidas de sus parámetros acústicos de escena objetivos. Si

**Tabla 3.** Valores promediados espectralmente para cada punto de medida,  $ST_{precoz}$  (fila superior) y  $ST_{tardío}$  (fila inferior) en dB, en los diferentes puntos de las escenas y promedio espacial para cada sala.

| Sala | Posiciones de medida |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Promedio |
|------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|      | 1                    | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |          |
| APC  | -16.7                | -17.2 | -14.9 | -16.2 | -17.3 | -14.6 | -18.6 | -14.6 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -16.2    |
|      | -13.0                | -13.4 | -12.4 | -13.1 | -13.7 | -12.4 | -15.7 | -12.7 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -13.3    |
| GTF  | -17.0                | -16.0 | -16.8 | -16.0 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -16.4    |
|      | -14.7                | -13.6 | -13.5 | -13.9 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -13.9    |
| PAA  | -10.2                | -10.7 | -10.2 | -11.0 | -12.5 | -13.2 | -13.3 | -13.9 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -11.9    |
|      | -15.2                | -14.9 | -14.1 | -13.8 | -15.6 | -16.2 | -16.8 | -16.5 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -15.4    |
| PMI  | -15.4                | -15.2 | -16.8 | -14.8 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -15.5    |
|      | -11.4                | -11.5 | -11.0 | -10.0 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -11.0    |
| TBP  | -17.1                | -17.1 | -16.5 | -16.5 | -17.1 | -16.6 | -16.5 | -14.4 | -15.7 | -18.1 | -16.8 | -16.7 | -15.8 | -13.9 | -16.3    |
|      | -16.6                | -15.8 | -15.4 | -16.0 | -17.1 | -16.7 | -16.7 | -15.1 | -16.5 | -17.2 | -16.5 | -16.9 | -15.1 | -14.0 | -16.1    |
| TPA  | -13.9                | -14.9 | -15.3 | -15.2 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -14.8    |
|      | -16.9                | -17.2 | -18.0 | -16.3 | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | -17.1    |
| TPV  | -15.7                | -15.8 | -14.8 | -15.8 | -15.6 | -17.6 | -16.1 | -16.7 | -15.8 | -16.3 | -18.1 | -16.4 | ---   | ---   | -16.2    |
|      | -15.5                | -15.9 | -15.5 | -15.8 | -15.4 | -17.0 | -15.5 | -17.6 | -15.7 | -17.2 | -17.3 | -16.5 | ---   | ---   | -16.2    |



**Figura 2.** (a)  $ST_{precoz}$  en función del volumen de la escena. Las líneas horizontales muestran el rango óptimo de Gade. (b)  $ST_{precoz}$  en función del cociente Alto/Ancho de las escenas.

bien con un amplio acuerdo sobre el número mínimo de preguntas a incluir en el cuestionario a los músicos y el número mínimo de parámetros objetivos a valorar en las escenas.

### Parámetros de Escena versus Factores Geométricos

El parámetro  $ST_{precoz}$  es muy sensible a cambios en la secuencia de reflexiones precoces, por consiguiente es de esperar que presente correlaciones altas con las variables que describen la geometría del escenario. En la Figura 2(a) se representa el valor promedio de  $ST_{precoz}$  en función del volumen de la escena. En la misma grafica se incluye un conjunto de teatros y auditorios andaluces, algunos en la doble configuración con y sin concha orquestal en la escena. La regresión de tipo logarítmico, con todos los datos, corresponde a la ecuación (7):

$$ST_{precoz} = 4.38 - 5.31 \log_{10}(V_E); \quad R^2 = 0.545; \quad P = 0.0002 \quad (7)$$

que da lugar a un descenso de 1.6 dB al doblar el volumen, con las salas PAA y TBP que se apartan especialmente del comportamiento descrito por la ecuación. Esta regresión es semejante, aunque más débil por la variada tipología de las salas, a la que obtiene Gade [18] para un conjunto de salas de concierto europeas y Chiang et al. [19] para un conjunto de escenarios de dimensiones más reducidas que los tratados aquí, que también aparecen en la gráfica.

En la Figura 2(b) se representa el valor promedio de  $ST_{precoz}$  en función del cociente AI/An del escenario, el TPA es el teatro valenciano más próximo a la línea de regresión, en la que también se han incluido los andaluces, integrándose en el grupo con los que mantiene similitud tipológica. Es posible inferir de ambas representaciones que  $ST_{precoz}$  aumenta si el volumen de la escena disminuye y que también aumenta si la razón AI/An disminuye. Esta última tendencia es contraria a la que obtiene Dammerud et al. [14], en cuyo trabajo obtiene una fuerte correlación positiva de esta razón con el atributo subjetivo de Impresión Acústica Global (OAI) por parte de los músicos.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de los parámetros de escena de siete salas escénicas de la Comunidad de Valencia. En función de la frecuencia, los parámetros presentan gran variabilidad espacial para los diferentes puntos de medición. Sus valores promediados espacialmente también son más variables en su comportamiento frente a la frecuencia que los valores teóricos, calculados a partir del modelo de campo sonoro difuso. En las salas que son propiamente teatros de proscenio los cálculos teóricos se asemejan a los experimentales. En los auditorios se obtiene gran desviación y mayores valores de los parámetros.



tros de escena experimentales que teóricos, debido a la presencia de elementos reflectantes y difusores en paredes y techos. Se discuten los valores promediados espectralmente de los parámetros en relación a los valores óptimos propuestos en la literatura y al balance de los dos niveles en los espacios escénicos. Finalmente, se estudian estos valores promediados espectralmente en función del volumen del escenario y de la razón alto/ancho, incluyendo datos de recintos de otra región española y de otros países, de variada tipología.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la dirección de los teatros y auditorios los permisos concedidos para la realización de las medidas. Esta comunicación es parte del trabajo realizado en los proyectos de investigación I+D+i con referencias BIA 2012-36896 y BIA2014-56755-P.

## REFERENCIAS

- [1] A.H. Marshall, D. Gottlob, H. Alrutz. "Acoustical conditions preferred for ensemble". *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 1437-1442 (1978).
- [2] M. Barron. "The Gulbenkian Great Hall. Lisbon II: An acoustic study of a concert hall with variable stage". *J. Sound Vib.* 59, 481-502 (1978).
- [3] J.J. Dammerud, M. Barron, E. Kahle. "Objective assessment of acoustic conditions for symphony orchestras". *Build. Acoust.* 18, 207-219 (2011).
- [4] H. Arau. "Is Gade's "support" parameter STearly a sure method to forecast stage acoustics?". *Proceedings of Internoise 2010, Noise and sustainability, Lisbon, Portugal* (2010).
- [5] A.C. Gade. "Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part I: Method and laboratory experiments". *Acustica* 69, 193-203 (1989).
- [6] A.C. Gade. "Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results". *Acustica* 69, 249-262 (1989).
- [7] UNE-EN-ISO 3382-1:2010. *Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos*. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2010).
- [8] J.Y. Jeon, M. Barron. "Evaluation of stage acoustics in Seoul Arts Center Concert Hall by measuring stage support". *J. Acoust. Soc. Am.* 117, 232-239 (2005).
- [9] A.C. Gade. "Practical aspects of room acoustic measurements on orchestra platforms". *Proceedings of the 14th ICA Beijing*, (1992).
- [10] A.C. Gade. "Acoustics for symphony orchestras; status after three decades of experimental research". *Build. Acoust.* 18, 181-206 (2011).
- [11] J.J. Dammerud, M. Barron. "Attenuation of direct sound and the contributions of early reflections within symphony orchestras". *J. Acoust. Soc. Am.* 128, 1755-1765 (2010).
- [12] A.R.H.C. Wenmaekers, C.C.J.M. Hak, L.C.J. van Luxemburg. "On measurements of stage acoustic parameters: Time interval limits and various source-receiver distances". *Acta Acustica-Acustica* 98, 776 - 789 (2012).
- [13] S. Girón, T. Zamarreño, M. Galindo. "Experimental study of Support parameters in auditorium and proscenium stages". *Acta Acustica-Acustica* 96, 1026-1041 (2010).
- [14] J.J. Dammerud, M. Barron. "Concert hall stage acoustics from the perspective of the performers and physical reality". *Proceedings Inst. of Acoustics* 30 (2008).
- [15] M. Barron, L.J. Lee. "Energy relations in concert auditoriums I". *J. Acoust. Soc. Am.* 84, 618-628 (1998).
- [16] W. Chiang, S-T Chen, C-T Huang. "Subjective assessment of stage acoustics for solo and chamber music performances". *Acta Acustica-Acustica* 89, 848-856 (2003).
- [17] K. Ueno, H. Tachibana. "Experimental study on the evaluation of stage acoustics by musicians using a 6-channel sound simulation system". *Acoust. Sci. & Tech.* 24, 130-138 (2003).
- [18] A.C. Gade. "An acoustical survey of eleven European concert halls - a basis for discussion of halls in Denmark". *The Acoustics Laboratory, Tech. Univ. of Denmark, [Report No.44]*, (1989).
- [19] W. Chiang, Y. Shu. "Acoustical design of stages with large plane surfaces in rectangular recital halls". *Appl. Acoust.* 64, 863-884 (2003).