

IMPORTANCIA DE LAS REFLEXIONES TEMPRANAS EN ESPACIOS ORDINARIOS DEDICADOS A LA COMUNICACIÓN

PACS: 43.55.Fw, 43.55Hy

Negreira, Juan
Saint-Gobain ECOPHON, Príncipe de Vergara 132 (6ªpl), Madrid (España),
juan.negreira@saint-gobain.com

San Millán-Castillo, Roberto
Universidad Rey Juan Carlos – ETSIT – Departamento de Teoría de la Señal y
Comunicaciones, Camino del Molino, 5, Fuenlabrada (España), roberto.sanmillan@urjc.es

Palabras Clave: Reflexiones tempranas, ISO 3382, tiempo de reverberación, inteligibilidad, claridad del habla.

ABSTRACT.

Exposure to high noise levels in ordinary rooms may negatively affect health. The most general requirement for room acoustics is reverberation time (RT). The assessment of RT does not consider early reflections. Hence, users may perceive two rooms with the same RT as different, which suggests that RT alone could not be enough to characterize a room. This article presents the state-of-art concerning the relevance of early reflections to describe acoustics in ordinary rooms, and the potential impact of including different parameters than RT to evaluate acoustic comfort and speech clarity.

RESUMEN

La exposición a niveles elevados de ruido en espacios ordinarios puede tener efectos negativos en la salud. El requisito generalizado de acondicionamiento acústico es el tiempo de reverberación (TR). La evaluación del TR no contempla las reflexiones tempranas. Así, dos salas con el mismo TR pueden ser percibidas diferentes por los usuarios; y sugiere que el TR es insuficiente para la caracterización. Este artículo presenta un estado del arte sobre la relevancia de las reflexiones tempranas para describir el acondicionamiento acústico de salas ordinarias, y el impacto potencial de incluir otros parámetros para evaluar confort acústico y claridad del habla.

1. INTRODUCCIÓN

La exposición a niveles elevados de ruido en espacios no acondicionados acústicamente durante el desarrollo de actividades cotidianas puede tener efectos negativos en las personas. Por ejemplo, se ha demostrado que, en hospitales, una buena acústica reduce los errores de los sanitarios en quirófanos [1], acelera la recuperación de pacientes y reduce la necesidad de ingesta de medicamentos [2]. Asimismo, una buena acústica en entornos escolares facilita una enseñanza y un aprendizaje de calidad (menor esfuerzo vocal y ritmo cardíaco en los profesores; y mejora de las notas y funciones cognitivas de los alumnos) [3]. En oficinas, a su vez, puede

aumentar la productividad, el bienestar y reducir el estrés de los trabajadores [4]. Además, en restaurantes una buena acústica puede no solo mejorar la experiencia de la clientela, sino también aumentar la facturación [5].

Tener al usuario final, es decir, a las personas, en el centro del diseño es de crucial importancia cuando se diseñan espacios públicos ordinarios (de aquí en adelante, este término abarcará cualquier espacio que no sea de espectáculos y donde la comunicación sea importante). Solo así el recinto podrá favorecer las actividades que se realicen en ella, posibilitando el confort y el bienestar.

La forma más común de especificar los requisitos de acondicionamiento acústico en la mayor parte de países son valores diana del tiempo de reverberación (TR); ver *Sección 3*. Debido al procedimiento de evaluación del TR, las reflexiones tempranas no están contempladas en el resultado; la primera parte de la caída no se incluye debido al intervalo de evaluación (e.g. -5 dB a -20 dB para el T_{20}). Además, el tratamiento de acondicionamiento acústico más común en espacios ordinarios (si es que lo hay) suele ser un falso techo fonoabsorbente. Esta distribución no homogénea de la absorción hace que la curva de decaimiento tenga a menudo una doble pendiente (es decir, no es lineal); con una pendiente más pronunciada al comienzo de la caída y una menos pronunciada hacia el final [6]. En consecuencia, la suposición clásica de campo difuso no se cumple en tales casos. Además, a menudo la difusión debida a mobiliario no es despreciable y juega un papel importante en el campo sonoro.

Todo lo anterior sugiere que puedan ser necesarios otros parámetros acústicos de la sala (aparte del TR) para capturar la experiencia subjetiva de las condiciones acústicas. Como se señala en numerosas publicaciones científicas, por ejemplo [7], la parte temprana de la respuesta al impulso es determinante en la percepción subjetiva de las características acústicas de un recinto, y especialmente en términos de inteligibilidad. Actualmente, esos parámetros están todavía “reservados” a recintos de espectáculo [8], a pesar de que su utilidad para describir acústicamente espacios ordinarios dedicados a la comunicación ha sido probada, e.g., [7, 10, 11, 12, 13]. Debido a lo anterior, se ha demostrado que dos salas con el mismo TR puedan ser juzgadas de forma diferentes por los usuarios finales [14]. Lo anterior sugiere que el TR por sí solo no es suficiente para caracterizar las condiciones acústicas de la sala, sino que puede ser necesaria una combinación de diferentes parámetros acústicos, dependiendo los valores objetivo del tipo de estancia y actividad a realizar.

2. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se presenta un estado del arte sobre la importancia de las reflexiones tempranas a la hora de describir el acondicionamiento acústico de una sala ordinaria.

El hecho de utilizar solamente el TR como el único parámetro de acondicionamiento se ha abordado en muchas publicaciones científicas [15, 16, 17, 18, 11, 9, 12, 19]. En ellas se señala como muy relevantes los parámetros que incluyen reflexiones tempranas (y omitidas en la evaluación del TR) como la claridad del habla C_{50} y la fuerza sonora G . Por ejemplo, un estudio realizado con 94 estudiantes [12] mostró correlaciones estadísticamente significativas entre la velocidad de lectura y la claridad del habla del aula, al mismo tiempo que no había correlación entre la velocidad de lectura y el TR del aula. Debe tenerse en cuenta que C_{50} solo aporta información sobre el balance de reflexiones tempranas y tardías; sin embargo, no brinda ninguna información sobre la energía sonora confinada en un espacio, que sí que está contemplada en G . Por lo tanto, teóricamente se podría lograr una alta inteligibilidad sin garantizar suficiente energía sonora para que el sonido llegue al oyente. Además, la fuerza sonora es un parámetro que nos permite controlar los niveles de ruido.

Ya en el año 1964 se demostró que el TR por sí solo da muy poca indicación de la idoneidad del espacio para el habla [20]. Debido a las características de integración y enmascaramiento del sistema auditivo, la inteligibilidad del habla estará determinada más bien por el patrón de reflexión del recinto. En 1986 [21], se compararon tres tipos diferentes de indicadores: relación señal-ruido (SNR), *speech transmission index* (STI), y relaciones sonido temprano/tardío; como predictores de la inteligibilidad del habla en espacios de diferentes tamaños y condiciones acústicas. Se determinó y estableció que el límite entre reflexiones útiles/perjudiciales era de 0,08 s.

Bradley y Sato, quienes investigaron profundamente sobre este tema, confirmaron en [7] la importancia de las reflexiones tempranas para lograr buenas condiciones de inteligibilidad en espacios dedicados a la comunicación. La adición de reflexiones tempranas aumenta la SNR efectiva y en consecuencia mejoran las puntuaciones relacionadas con la inteligibilidad del habla para todo tipo de oyentes (con y sin discapacidad auditiva). Asimismo, en [17], diseñaron experimentos en tres escenarios diferentes (manteniendo constante los niveles de ruido ambiente): uno con solo sonido directo, otro con sonido directo y reflexiones tempranas y por último uno con sonido directo con reflexiones tempranas y reverberación. Los resultados derivados de la comparación entre los 3 escenarios demostraron, entre otras cosas, que la energía temprana reflejada tiene al menos el mismo efecto sobre la inteligibilidad del habla y las opiniones de dificultad auditiva que un aumento equivalente en el nivel de sonido directo. Cuando existe reverberación, el beneficio de las primeras reflexiones es más de lo esperado debido a la energía de reflexión temprana añadida.

En línea con lo anterior, el estudio [10] plantea que el diseño acústico de aulas debería intentar reducir las reflexiones tardías en las posiciones de escucha más distantes a valores aceptables (muy inferiores a los niveles de las reflexiones tempranas y directas útiles del sonido del habla). El estudio postula que solo así se podrían garantizar unas condiciones óptimas para la comunicación; incluso más que diseñando para un TR óptimo. Completando lo anterior, en [22] se comprobó que los valores medios de STI y U_{50} (parámetro similar a C_{50} , pero teniendo en cuenta el ruido de fondo) estaban estrechamente relacionados linealmente para las 12 aulas estudiadas. Los resultados mostraron que aulas con valores $U_{50} + 0.5$ dB corresponden a valores de STI de aproximadamente 0.60, lo que indica "buenas" condiciones acústicas en términos de inteligibilidad del habla. Los resultados ilustran que la medida U_{50} puede ser un medio práctico para evaluar y comprender las condiciones de acondicionamiento acústico de una sala para la comunicación verbal.

Un resultado interesante sobre las diferencias mínimas perceptibles (JND) en parámetros que tienen en cuenta reflexiones tempranas lo presentó Bradley en [23], quien afirmó que las JND varían con la magnitud D_{50} pero no con la magnitud C_{50} y C_{80} , lo que sugiere que las proporciones logarítmicas (C_{50} y C_{80}) son indicadores perceptualmente más apropiados.

En [15], mediante el uso de test perceptuales, se demostró que (i) la correlación entre las calificaciones de dificultad de escucha y el STI es la más fuerte de todas las medidas objetivas probadas, y que (ii) D_{50} , C_{50} (ponderados A) y el tiempo central T_c , obtenidas de las respuestas impulsivas, también correlan fuertemente con las calificaciones de dificultad auditiva (no siendo sus correlaciones estadísticamente diferentes a las obtenidas usando el STI). Las calificaciones de dificultad auditiva ("*listening difficulty rating*") se definen como el porcentaje de respuestas que indican cierto nivel de dificultad. Esta definición indica que el "rendimiento" de la transmisión del habla se optimiza cuando ningún oyente experimenta dificultad para escuchar. Usando este mismo indicador, los resultados en [16] mostraron que (i) la correlación entre las calificaciones de dificultad auditiva y el índice de transmisión del habla revisado (STIr), así como la relación útil-perjudicial (U_{50}) eran altas, independientemente de la edad de los oyentes.

Un resultado notable de [24] fue que los oyentes con problemas auditivos podían beneficiarse de las reflexiones tempranas de la misma manera que los oyentes con audición normal, aunque tuvieran una pérdida auditiva moderada o pronunciada. Esto podría deberse a la integración

auditiva de las reflexiones tempranas con el sonido directo era un proceso monoaural, lo que es una ventaja para las personas con discapacidad auditiva y con capacidades reducidas de procesamiento binaural.

Para obtener una comunicación eficaz, no solo se debería alcanzar la plena inteligibilidad de las palabras, sino que también es aconsejable minimizar el esfuerzo del oyente en el reconocimiento del discurso. Este doble requisito no se describe fácilmente con los indicadores acústicos de salas actuales, que se ocupan principalmente de una calificación subjetiva por medio de test de reconocimiento de palabras o del uso cuestionarios sobre las dificultades auditivas informadas. En [25] se aborda este problema introduciendo el concepto de “eficiencia auditiva”, que se define como una combinación de la precisión de la inteligibilidad y del esfuerzo dedicado a lograr este objetivo. Se demostró que este nuevo indicador es capaz de discriminar claramente entre puntuaciones de inteligibilidad iguales obtenidas en diferentes condiciones acústicas, lo que permite adaptar la acústica de la habitación a grupos de edad específicos, como los niños.

En [19], Arvidsson y sus co-autores analizaron un aula mediante test perceptuales de escucha, para verificar si las personas podían o no percibir alguna diferencia entre diferentes ambientes acústicos en diferentes puntos del espacio. Los casos donde la gente notó una diferencia, fue en los espacios donde la claridad del habla (evaluada a través del C_{50}) variaba. Los oyentes no pudieron percibir subjetivamente cambios en T_{20} . Además, este estudio muestra que no solo es importante considerar valores promedio, sino también fijarse en posiciones específicas para diseñar acústicamente salas ordinarias. En [9], concluyeron que los parámetros acústicos se pueden ajustar individualmente usando tratamientos o combinación de tratamientos (absorción y/o difusión), lo que permite un ajuste fino de los parámetros acústicos relevantes.

3. ESTADO DE LA NORMATIVA ACTUAL

La normalización facilita la incorporación de criterios uniformes en el desarrollo de procesos y productos. En el caso que nos ocupa, las normas tratan de armonizar cómo se evalúan los recintos dedicados a la comunicación desde el punto de vista acústico. Actualmente, también existen códigos y recomendaciones que intentan dar indicaciones en el diseño del acondicionamiento acústico de este tipo de recintos en numerosos países.

3.1. Métodos de medición

Por un lado, tenemos las normas que describen los métodos de medición de parámetros de interés. En este caso la referencia europea es la serie ISO 3382, con sus partes 1 y 2, que suelen estar adoptadas por los países miembros de ISO con denominaciones similares (e.g., en España se trabaja con la UNE EN ISO 3382 - 1, 2). Sin embargo, en EE.UU encontraríamos su equivalente en el standard ASTM E2235. Estas normas detallan los procedimientos de medición de parámetros básicos tales como el TR (con distintos estimadores y metodologías como T_{30} , T_{20} , y EDT) en la parte 2 [27], y otros más avanzados como G, la relación entre la energía precoz y la energía tardía (e.g., C_{50}), y la función de correlación cruzada interaural normalizada (IACC), entre otros, en la parte 1 [28]. Varias tipologías de recintos dedicados a la comunicación (e.g., aulas, oficinas, restaurantes) están excluidos del alcance de la Parte 1 al no ser salas de espectáculos, y se encuadran entre los recintos comunes de la Parte 2. Sin embargo, esta clase de recintos necesitan de un diseño más minucioso que los recintos generales, como por ejemplo los recintos domésticos, pero sin llegar a la complejidad de un auditorio. Por tanto, a nivel normativo experimental se quedarían fuera de los estándares existentes. Las mediciones deberán hacerse a criterio de cada ingeniero responsable, tomando en consideración lo necesario de cada parte de la norma y ajustando lo que no esté descrito (e.g., acudiendo al estado del arte en la literatura científica). De esta forma, se deshace el camino previo de la normalización de procedimientos porque no sería de aplicación directa ninguno de ellos, y en el buen hacer de cada uno, con sus medios y circunstancias, la aplicación sería diferente y por

tanto los resultados incomparables. En cualquier caso, existen muchos más recintos en los que la comunicación es importante y quedarían fuera del alcance de la ISO 3382 como pueden ser salas de reuniones, salas de conferencias, recintos domésticos para trabajo en remoto, e incluso espacios hospitalarios como quirófanos, por nombrar algunos de ellos. Al hilo de este asunto, actualmente la ISO 3382-1 se encuentra en periodo de revisión y consulta en un Comité ISO específico, al cual los autores de este artículo pertenecen. El objetivo es ofrecer procedimientos normativos específicos para recintos dedicados a la comunicación que actualmente no están disponibles.

Una evidencia de la relevancia de este aspecto a nivel normativo es la publicación reciente de la norma ISO 3382-3 que trata la problemática de las oficinas abiertas, recinto previamente incluido en la ISO 3382-2 de manera general. Este estándar se enfoca a la caracterización acústica de estos recintos desde el punto de vista de la inteligibilidad de la palabra y propagación del sonido, más allá de considerar solamente el TR de la sala [29]. Las metodologías empleadas son muy específicas de un recinto concreto, pero se podría decir que da indicaciones interesantes sobre la necesidad de incluir parámetros diferentes al TR en futuros estándares dedicados a recintos para la comunicación.

3.2. Valores diana de parámetros acústicos

Por otro lado, se disponen de códigos y recomendaciones sobre los límites que deben tomar los parámetros evaluados y para el diseño de recintos. Existen requisitos de aplicación obligatoria y necesidad de cumplimiento, y otros que son simplemente facultativos. Generalmente, estos valores se asocian al tipo de recinto y suelen ser muy variables. Haciendo un estudio de este tipo de documentos en Europa, podríamos decir que se dividen en tres tipologías:

- Basados en TR, y/o área de absorción equivalente, y/o coeficientes de absorción, y volúmenes, cuyos límites se basan en medias aritméticas del TR en diferentes rangos de frecuencia y condicionados por volúmenes y usos.
- Basados en máscaras de frecuencia, donde además del TR se consideran sus valores en distintas bandas de frecuencia con tolerancias diferentes.
- Basados en STI y C_{50} , donde además de parámetros básicos como el TR se consideran otros como la inteligibilidad de la palabra.

En la *Tabla 1* se enumeran algunas de estas recomendaciones, indicando el país al que pertenecen. Algunos países aglutinan en un solo documento todas las recomendaciones, mientras que otros hacen uso de varios para el mismo fin, con la consecuente dispersión y dificultad de interpretación de la información.

En acústica aplicada, trabajar con valores globales de cualquier magnitud conduce a resultados parciales, limitados, y con demasiada incertidumbre. En determinadas tipologías de recinto puede ser suficiente un valor global del TR (e.g., una cocina). Sin embargo, en locales donde la inteligibilidad sea determinante, sin necesidad de ser un teatro (e.g., un aula), carecer de información en frecuencia del tiempo de reverberación, al menos, y de parámetros como el STI y el C_{50} , puede dar lugar a diseño fallidos, como se describe en la *Sección 2*. Sirva de ejemplo el análisis de las exigencias de diseño según diferentes reglamentaciones para, quizá, el recinto de comunicación más extendido y sensible: el aula. En la *Tabla 2* se muestra la diferencia de criterios acorde con los distintos grupos de normativas. Vemos como en España solo se tienen en cuenta TR y el volumen del aula en función del mobiliario. En Alemania, a esos criterios se añaden tolerancias en determinadas frecuencias. Por último, en Italia, adicionalmente se contemplan parámetros relacionados con la inteligibilidad (STI y C_{50}) e incluso el uso de sistemas de sonorización, ver *Figura 1*. Según lo expuesto ya en la *Sección 2*, parece razonable que las recomendaciones en el diseño de estos espacios tiendan a requerimientos en línea con los italianos. De esta forma se tendrán en cuenta las reflexiones iniciales de los recintos y su diseño se adecuará al acondicionamiento acústico requerido para su uso. En recintos de comunicación

como son las aulas, prima la inteligibilidad frente a cualquier otra variable, y no siempre el TR está perfectamente correlado con ella.

Tabla 1 – Códigos / Recomendaciones sobre acondicionamiento acústico en diferentes países.

País	Código / Recomendación	Tipo de Recinto
Alemania	DIN 18041:2016	Educativo, oficinas, sanitario, restauración
Rep. Checa	CRR no 73 0527	Educativo, oficinas, sanitario, restauración
Italia	UNI 11532	Educativo, oficinas, sanitario, restauración
Finlandia	SFS 5907	Educativo, oficinas, sanitario, restauración
Polonia	PN-B-02151-4	Educativo, oficinas, sanitario, restauración
Francia	Arrête du 25 avril 2003	Educativo, restauración
	NF S 31-080 & 31-199	Oficinas, restauración
	Arrête du 25 avril 2003	Sanitario, restauración
Reino Unido	BB93	Educativo, restauración
	BS 8233	Oficinas
	HTM 08.01	Sanitario
Dinamarca	SBI 216 / BR18	Educativo, oficinas, sanitario
Suecia	SS 25268	Educativo, oficinas, sanitario, restauración
España	UNE 74201:2021	Educativo, oficinas, sanitario, restauración
	Código Técnico de la Edificación (CTE DB-HR)	Educativo, oficinas, restauración

3.3. Métodos de simulación

En este apartado podría tener cabida una mención a los métodos de simulación de parámetros básicos en el acondicionamiento acústico de recintos. En este ámbito, la armonización de algoritmos es una tarea compleja por diversas circunstancias del entorno y generalmente los programas comerciales se usan como herramientas de diseño y casi nunca de justificación de adecuación a unos límites. Más allá de los bien conocidos algoritmos de teorías clásicas del campo sonoro en recintos desde el punto de vista estadístico (Sabine, Eyring, Arau) y del procedimiento descrito en la EN 12354-6 [27], que es prácticamente la única normativa al respecto y que no suele ser obligatoria en ningún país, el consenso es reducido y disperso. La naturaleza de las teorías geométrica y ondulatoria de recintos requiere un alto coste computacional y existen multitud de versiones y metodologías, muchas veces propietarias, en su aplicación (i.e. método de fuentes imágenes vs. método de rayos, y múltiples hibridaciones de ambos). Por tanto, este tema queda fuera del alcance de este trabajo.

Tabla 2 – Criterios sobre acondicionamiento acústico de aulas en institutos y universidades en diferentes países. Los países marcados en **negrita** contemplan, para el acondicionamiento de aulas, parámetros relacionados con la inteligibilidad, además del TR y/o el volumen del recinto.

País	Código / Recomendación
Alemania	Grupo A4 - Gráfico TR(s) vs V(m³) + Gráfica de tolerancia en frecuencia.
República Checa	Curva N.º3 - Gráfico TR(s) vs V(m³) + Gráfica tolerancia en frecuencia.
Italia	V < 250 m³; STI ≥ 0,55 (sin amplificación) o ≥ 0,60 (con amplificación); C ₅₀ ≥ 2dB +
	Categoría A3, Gráfico TR(s) vs V(m³) [Promedio 125 Hz – 4 KHz]
Italia	V ≥ 250 m³; STI ≥ 0,50 (sin amplificación) o ≥ 0,60 (con amplificación); +
	Categoría A3, Gráfico TR(s) vs V(m³) [Promedio 125 Hz – 4 KHz]
Finlandia	0,5 ≤ RT ≤ 0,6 s (amueblado) [Promedio 125 Hz – 4 KHz]; STI ≥ 0.8 (125-8 KHz)
Polonia	RT ≤ 0,6 s (250 Hz-4 KHz); RT ≤ 0,72 s (<250 Hz) STI_{min} ≥ 0.6 (125-8 KHz)
Francia	V ≤ 250 m³: 0,4 ≤ RT ≤ 0,8 s; V > 250 m³: 0,6 ≤ RT ≤ 1,2 s
Reino Unido	0.6 s ≤ TR ≤ 0,8 s (nueva); TR ≤ 0,8 s (reforma) [Promedio 125 Hz – 4 KHz]
Dinamarca	TR ≤ 0,6 s [Promedio 125 Hz – 4 KHz]
Suecia	TR ≤ 0,6 s [Promedio 125 Hz – 4 KHz]
España	TR ≤ 0,5 s (amueblada); TR ≤ 0,7 s (sin amueblar) [Promedio 400 Hz – 2.5 KHz]
España	V ≤ 350 m³; TR ≤ 0,7 s. (Clase A) [Promedio 400 Hz – 2.5 KHz]

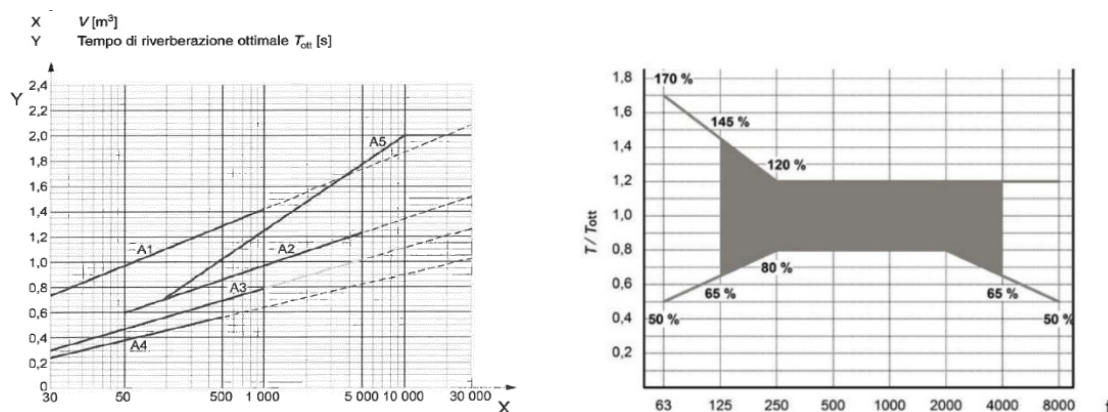


Figura 1 – Izquierda, gráfico TR(s) vs V(m³). Derecha, gráfica de tolerancia en frecuencia del TR óptimo de la gráfica de la izquierda. Ambas en la norma italiana UNI 11532 [13].

3. EXPERIMENTO

Para ilustrar el comportamiento acústico en salas con tratamiento de techo fonoabsorbente y cómo afecta a los parámetros acústicos de la sala, se realizaron medidas acústicas en dos salas teóricamente idénticas del TR, C₅₀ y G. Las dos salas, de 12 m² de superficie en planta y 2.7 m de altura, diferían únicamente en el tipo de techo instalado: la sala 1 tenía un techo con un coeficiente de absorción ponderado (según la ISO 354) de α_w=1,0, y la sala 2 de α_w=0,1. Las medidas de los parámetros acústicos mencionados se pueden ver en la Figura 2.

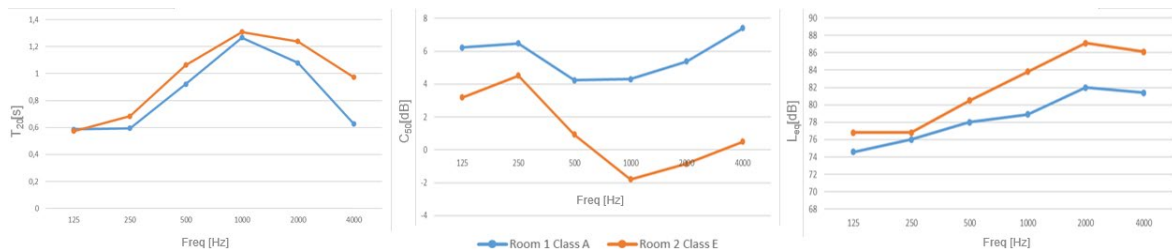


Figura 2 – Medidas del T_{20} (izquierda), C_{50} (centro) y nivel de presión sonora (derecha) en las dos salas (*Room 1* – con techo acústico Clase A- y *Room 2* – techo acústico Clase E).

Como se puede apreciar, aunque el TR es prácticamente idéntico (las pequeñas variaciones se podrían atribuir a incertidumbre en medidas), las desviaciones en C_{50} y presión sonora ascienden, en frecuencias medias, a más de 5 dB. Para verificar la anterior hipótesis, se hicieron medidas con los dos tipos de techos (Clase de absorción A y Clase de absorción E) pero esta vez instalados en la misma sala (*Room 1*), arrojando resultados muy similares (ver Figura 3). Cabe señalar que el T_{20} medido en la sala 1 (promedio 500-1000 Hz) es de 1.1 s, mientras que el calculado según Sabine sería 0.32 s. En la sala 2, la medición arroja $T_{20,500-1kHz}=1.1$ s, y el cálculo Sabine 0.86 s., lo que pone de manifiesto la necesidad de otros parámetros al evaluar el confort.

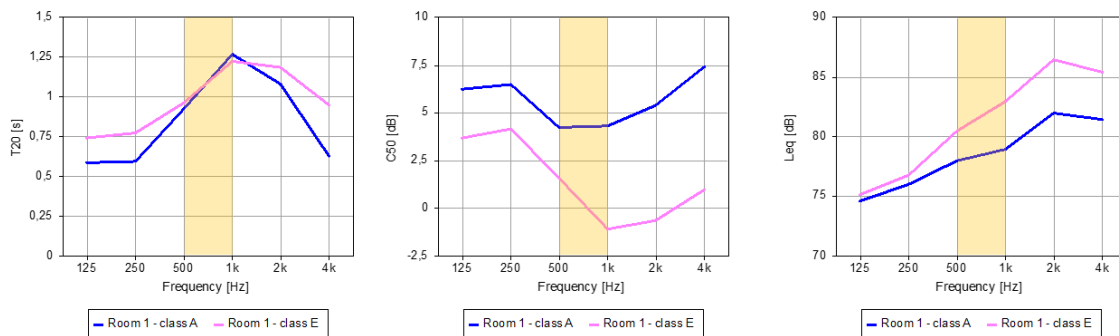


Figura 3 – Medidas del T_{20} (izquierda), C_{50} (centro) y nivel de presión sonora (derecha) en la Sala 1 (*Room 1*), con los dos techos diferentes: Clase A y Clase E.

Lo anterior se verificó con test perceptuales y cuestionarios a personas, quienes tuvieron que juzgar diferentes cualidades acústicas utilizando escalas semánticas. La conclusión general de las pruebas de escucha es que los sujetos notan claramente una diferencia entre las dos salas (ver Figura 4).

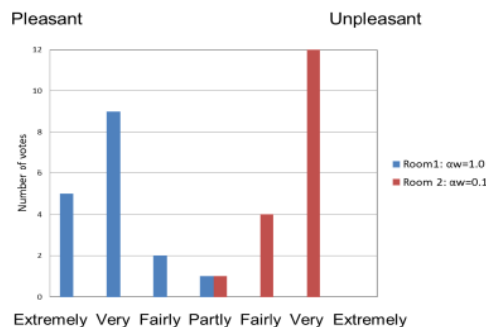


Figura 4 – Resultados de los cuestionarios realizados sobre las dos salas estudiadas.

4. CONCLUSIONES

El comportamiento de las reflexiones tempranas en un recinto tiene una influencia significativa en la percepción acústica de los procesos dedicados a la comunicación. La literatura científica ofrece claras y múltiples evidencias al respecto desde hace unos años. Los estándares, códigos y recomendaciones relacionados con el acondicionamiento acústico empiezan a incluir parámetros que incluyen las reflexiones tempranas tanto para la medición como para el diseño de recintos. Así, STI y C_{50} empiezan a estar presentes como magnitudes de interés, más allá del clásico TR, y explican mejor las diferencias en recintos, como en el experimento mostrado. Parece necesario un trabajo de armonización más extenso en el uso y medición de las mediciones tempranas, así como de su introducción en códigos y recomendaciones de diseño para recintos sensibles a ellas como el caso de los recintos dedicados a la comunicación.

REFERENCIAS

- [1] M. Beldam, «Impact of acoustics on staff performance in operation rooms,» de *Internoise*, Madrid, 2019.
- [2] I. Hagerman, G. Rasmanis, V. Blomkvist, R. Ulrich, C.-A. Eriksen y T. Theorell, «Influence of intensive coronary care acoustics on the quality of care and physiological state of patients,» *International Journal of Cardiology*, vol. 98, nº 2, pp. 267-70, 2005.
- [3] ECOPHON, Saint-Gobain, «Impact of noise in education - A research summary,» Ecophon, 2021.
- [4] A. Seddigh, E. Berntson, F. Jönsson, C.-B. Danielson y H. Westerlund, «The effect of noise absorption variation in open-plan offices: A field study with a cross-over design,» *Journal of Environmental Psychology*, vol. 44, pp. 34-44, 2015.
- [5] J. Negreira, C. Svensson, N. Oseland y R. Canto-Leyton, «Good acoustics as an extra source of income in restaurants – A case study,» de *Internoise*, Madrid, 2019.
- [6] H. Kuttruff, *Room acoustics*, Boca Ratón, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [7] J. Bradley, H. Sato y M. Picard, «On the importance of early reflections for speech in rooms,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 6, p. 3233–3244, 2003.
- [8] ISO, *International standard ISO 3382-1:2008 Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces*, Brussels, Belgium, 2009.
- [9] E. Arvidsson, E. Nilsson, D. B. Hagberg y O. J. I. Karlsson, «The Effect on Room Acoustical Parameters Using a Combination of Absorbers and Diffusers – An Experimental Study in a Classroom,» *Acoustics*, vol. 2, pp. 505-523, 2020.
- [10] J. Sato y J. Bradley, «Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 4, p. 2064–2077, 2008.
- [11] L. Nijs y M. Rychtarikova, «Calculating the optimum reverberation time and absorption coefficient for good speech intelligibility in classroom design using U50,» *Acta Acoust. United Acoust.*, vol. 1, pp. 93-102, 2011.
- [12] G. Puglisi, A. Prato, T. Sacco y A. Astolfi, «Influence of classroom acoustics on the reading speed: A case study on Italian second-graders,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 144, nº 2, 2018.
- [13] UNI, *National standard UNI 11532-2:2020 Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico*, Italia, 2020.
- [14] E. Nilsson, «Decay processes in rooms with non-diffuse sound fields. Part 1: Ceiling treatment with absorbing material,» *Journal of Building Acoustics*, vol. 11, pp. 39-60, 2004.

- [15] J. Sato, M. Morimoto, H. Sato y M. Wada, «Relationship between listening difficulty and acoustical objective measures in reverberant fields,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 4, p. 2087–2093, 2008.
- [16] H. Sato, M. Morimoto y M. Wada, «Relationship between listening difficulty rating and objective measures in reverberant and noisy sound fields for young adults and elderly persons,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 6, p. 4596–4605, 2012.
- [17] H. Sato, J. Bradley y M. Morimoto, «Using listening difficulty ratings of conditions for speech communication in rooms,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 3, p. 1157–1167, 2005.
- [18] W. Yang y J. Bradley, «Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 2, p. 922–933, 2009.
- [19] E. Arvidsson, E. Nilsson, D. Bard-Hagberg y O. Karlsson, «The Difference in Subjective Experience Related to Acoustic Treatments in an Ordinary Public Room: A Case Study,» *MDPI Acoustics*, 2021.
- [20] F. B. J. Lochner, «The influence of reflections on auditorium acoustics.,» *J. Sound Vib*, vol. 4, pp. 426-454, 1964.
- [21] J. Bradley, « Predictors of speech intelligibility in rooms,» *JASA*, vol. 80, 1986.
- [22] Y. Choi, «Comparison of two types of combined measures, STI and U50, for predicting speech intelligibility in classrooms,» *Archives of Acoustics*, vol. 42, nº 3, 2017.
- [23] J. S. Bradley, «Review of objective room acoustics measures and future needs,» *Applied Acoustics*, vol. 72, 2011.
- [24] I. Arweiler y J. M. Buchholz, «The influence of spectral characteristics of early reflections on speech intelligibility,» *JASA*, vol. 130, 2011.
- [25] N. Prodi, C. Visentin y A. Farnetani, «Intelligibility, listening difficulty and listening efficiency in auralized classrooms,» *JASA*, vol. 128, 2010.
- [26] ISO, International standard ISO 3382-2:2008 Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms., Brussels, Belgium., 2008.
- [27] ISO, International standard ISO 3382-3:2022 Acoustics - Measurement of room acoustics parameters - Part 3: Open plan offices, Brussels, Belgium, 2022.
- [28] J. J. RENNIES, H. Schepker, I. Holube y B. Kollmeier, «Listening effort and speech intelligibility in listening situations affected by noise and reverberation,» *JASA*, vol. 136, 2014.
- [29] P. Bottalico, S. Graetzer y E. J. Hunter, «Effects of voice style, noise level, and acoustic feedback on objective and subjective voice evaluations,» *JASA*, vol. 138, 2015.
- [30] E. Arvidsson, E. Nilsson, D. Bard-Hagberg y O. I. Karlsson, «Subjective Experience of Speech Depending on the Acoustic,» *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, 2021.