



LA INFLUENCIA DE LA BAJA FRECUENCIA DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE VENTANAS EN LA MOLESTIA PERCIBIDA FRENTE A ESTÍMULOS URBANOS

Daniel de la Prida^{1,2}*
María Ángeles Navacerrada¹
Antonio Pedrero¹
Luis A. Azpicueta-Ruiz²
David Caballol¹

¹Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid

²Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid

RESUMEN

El aislamiento acústico se mide generalmente en el rango contenido entre las bandas de 1/3 de octava de 100 y 3150 Hz, siendo este rango el más habitual también para el cálculo de sus valores globales. La normativa contempla, no obstante, dos rangos extendidos de alta y baja frecuencia, cubriendo el rango entre 3150 y 5000 Hz y entre 50 y 100 Hz, respectivamente. Si bien la inclusión del rango extendido de alta frecuencia no supone un problema, la medición de la baja frecuencia es tediosa, requiere de la aplicación de un procedimiento de medida específico y suele llevar asociada una mayor incertidumbre. Consecuentemente, existe hoy en día un extenso diálogo científico relativo a la inclusión de este rango en las caracterizaciones de aislamiento. Aunque diversas investigaciones han destacado que la baja frecuencia del aislamiento no tiene una influencia significativa en la percepción de molestia, otros investigadores siguen fomentando su inclusión. Para contribuir a este diálogo se ha realizado un listening test con 100 personas, con aislamientos de ventana y sonidos urbanos. Se ha observado que la baja frecuencia es perceptualmente relevante sólo si el aislamiento en estas bandas es excepcionalmente bajo comparado con el aislamiento promedio de ventanas.

ABSTRACT

Sound insulation is generally measured in the range between the 1/3 octave bands from 100 to 3150 Hz, and this is the range most commonly used to calculate its Single-Number Quantities. However, the standard includes two extended high- and low-frequency ranges, covering the range between 3150 and 5000 Hz and between 50 and 100 Hz respectively.

While the inclusion of the extended high-frequency range is not a problem, the measurement of the low-frequency range is tedious, requires the use of a specific measurement procedure and is usually associated with a higher uncertainty. Consequently, there is now an extensive scientific dialogue on the inclusion of this range in sound insulation measurements and expressions. Although several studies have shown that low-frequency sound insulation does not have a significant effect on annoyance perception, other researchers continue to advocate its inclusion. To contribute to this dialogue, a listening test was conducted with 100 people using sound insulation of façade window elements and urban sounds. It was found that low frequencies are only perceptually relevant when the sound insulation in these bands is exceptionally low compared to the average expected window sound insulation.

Palabras Clave— aislamiento, fachada, percepción, bajas frecuencias

1. INTRODUCCIÓN

El aislamiento acústico de la fachada de los edificios, y de sus elementos, tiene una gran repercusión en la calidad acústica y el confort de sus ocupantes, puesto que determina, en gran medida, el grado de protección acústica del interior frente a sonidos procedentes del exterior.

Para asegurar que las mediciones del aislamiento acústico se lleven a cabo de una manera homogénea y robusta, se han descrito a lo largo de las décadas diversas normativas que, en el caso de fachadas y sus elementos, han llevado a las existentes ahora mismo, para medidas in-situ [1] y en laboratorio [2].

* **Autor de contacto:** dprida@ing.uc3m.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Además de estas normativas de medición, también se han desarrollado estándares, como la ISO 717-1:2021 [3], con la finalidad de describir cómo expresar el aislamiento acústico a través de un valor global, que tenga en cuenta el comportamiento espectral del aislamiento y, en ocasiones, el carácter espectral de los ruidos incidentes.

Tanto en las normativas de medición como de expresión mediante valor global, el rango recomendado de bandas de 1/3 de octava a considerar se restringe al contenido entre 100 Hz y 3150 Hz. Sin embargo, se contemplan rangos extendidos de alta y baja frecuencia, que cubren las frecuencias de 4000 y 5000 Hz, y de 50, 63 y 80 Hz, respectivamente. Si bien la medición del rango de altas frecuencias no supone ningún problema, el rango de bajas frecuencias conlleva, a menudo, un procedimiento de medición específico y una mayor incertidumbre, además de requerir más cuidado. Estos motivos, entre otros, han llevado a que el rango de bajas frecuencias sea utilizado de manera poco frecuente en la expresión global del aislamiento acústico.

Puesto que los valores globales son utilizados para cuantificar y categorizar el aislamiento, es necesario que éstos sean representativos de la percepción de protección aportada por éstos a los ocupantes de los edificios. Para indagar en este hecho, se han llevado a cabo a lo largo de los años diversas investigaciones, entre ellas las resumidas en [4], destinadas a evaluar la representatividad de los valores globales actualmente estandarizados, con la conclusión general de que existe margen para la mejora. Entre las mejoras más habituales se han encontrado valorar extender el rango frecuencial de evaluación hacia las bajas frecuencias y modificar las curvas de referencia que actualmente se utilizan para calcular los valores globales. Sin embargo, y especialmente con respecto al rango frecuencial, no existe a día de hoy un consenso.

En el ámbito del aislamiento acústico de fachadas se han llevado a cabo diversas evaluaciones perceptuales [5–8]. En particular, [5] y [7] determinaron que, en general, para diversos tipos de ruido urbano (tráfico rodado, aeronaves, sirenas, etc.) el actual rango de frecuencias, comenzando en 100 Hz era suficiente para obtener resultados con suficiente representación perceptual. En [6], que evaluó la percepción del aislamiento acústico para diferentes tipos y velocidades de ruido urbano la conclusión fue similar. Sin embargo, la investigación [8], basada en los datos perceptuales de [6], concluyó que, aunque en base a los valores globales existentes era suficiente con comenzar en 100 Hz, la generación de curvas de referencia optimizadas a la percepción desde 50 Hz, distintas de las estandarizadas, permitía una mayor correlación perceptual.

Además, en respuesta a algunas de estas pruebas perceptuales, tanto para aislamiento de fachadas como a ruido aéreo, [9] opinaba de manera crítica que algunos estudios perceptuales, que no encontraban justificación para uso de las bajas frecuencias, no servían para tal fin puesto que no se habían centrado específicamente en el rango de bajas frecuencias.

En base al estado del arte, y considerando la opinión de [9], la presente investigación se centra en evaluar si el comportamiento de las bajas frecuencias del aislamiento acústico de fachadas tiene relevancia en la percepción de molestia. Para ello, se realizó una prueba perceptual (*listening test*) con 100 participantes, siguiendo un protocolo Two-Alternative Choice (2-AC). En esta prueba, los participantes compararon la molestia percibida ante muestras sonoras urbanas (ruido de tráfico mixto y ruido de aeronaves), filtradas por la atenuación que provocarían diversos índices de reducción sonora, diferentes únicamente en las bandas de 50, 63 y 80 Hz.

Los resultados de la prueba, analizados mediante Modelos Thurstonianos, permiten evaluar la detectabilidad perceptual de cambios en la baja frecuencia por los participantes. Asimismo, en caso de detectabilidad estadísticamente robusta, estos modelos permiten cuantificar la distancia perceptual entre diferentes condiciones de aislamiento a bajas frecuencias.

El resto de esta comunicación se distribuye de la siguiente manera: la sección 2 detalla la metodología utilizada para el diseño, desarrollo y análisis de los *listening tests*. La sección 3 presenta y discute los principales resultados de la investigación. Finalmente, la sección 4 resume las conclusiones principales de esta investigación.

2. METODOLOGÍA

2.1 Protocolo experimental y procedimiento

La percepción de los participantes se evaluó mediante un protocolo de evaluación de las diferencias atributivo 2-AC [10]. En este protocolo, se presenta a los participantes, en juicios sucesivos, con parejas de estímulos (denominados “Estímulo A” y “Estímulo B”), que deben escuchar uno después del otro. Tras las escucha, deben aportar su juicio con respecto a cuál de los dos estímulos era más molesto. Para ello, como muestra la Figura 1, disponían de tres posibles opciones: “Estímulo A”; “Estímulo B” y “Sin diferencia”.

En particular, los participantes evaluaron de manera comparativa la molestia de nueve estímulos sonoros, relativos a una muestra sonora urbana filtrada con nueve variaciones diferentes de aislamiento acústico a baja frecuencia, que denominaremos V1 a V9. De esta manera, los participantes,

llevaron a cabo 36 comparaciones de dos estímulos (V1-V2, V1-V3, ..., V8-V9). Esta prueba se repitió para dos muestras sonoras urbanas M1 y M2, relativas a ruido urbano de aeronaves y tráfico rodado mixto a bajas velocidades. En la sección 2.2 se describirán en mayor detalle las muestras sonoras urbanas e índices de reducción sonora considerados.

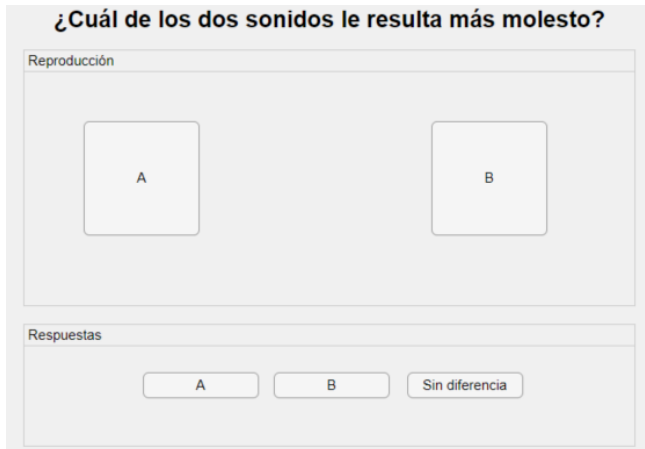


Figura 1: Interfaz de *listening test* mediante protocolo 2-AC

Este protocolo (2-AC) se seleccionó, entre otros motivos, porque cuenta con un alto poder operacional (esto es, que permite a los participantes maximizar su capacidad de detección) y reduce ciertos sesgos, no forzando a los participantes a elegir uno u otro estímulo si no percibían una diferencia significativa. Estas cualidades del protocolo 2-AC han sido destacadas recientemente en dos publicaciones relacionadas con las pruebas perceptuales en aislamiento acústico [11,12], que recomiendan su uso.

Con respecto al procedimiento de evaluación, los pasos fueron los siguientes:

1. Se recibió a cada participante en el día y hora previamente concertados;
2. Se le enseñó el entorno de ensayo, se le suministró una encuesta demográfica (edad, género y nivel de estudios), así como instrucciones escritas. Este tiempo sirvió también para que el participante se adaptara al entorno de ensayo;
3. Se realizó un breve entrenamiento, consistente en dos juicios de comparación con muestras de prueba;
4. Finalizado el entrenamiento y, si no existían más dudas, daba comienzo la prueba.

2.2 Construcción de los estímulos del *listening test*

Los estímulos utilizados durante el *listening test* se construyeron de la siguiente manera:

- Se seleccionaron dos muestras sonoras binaurales altamente representativas;

- Se generaron nueve índices de reducción sonora de ventanas, con variaciones en las bandas de 50, 63 y 80 Hz e igual comportamiento entre 100 y 5000 Hz;
- Se crearon filtros FIR que representaran bien la atenuación aportada por cada uno de los índices de reducción sonora entre 50 y 5000 Hz;
- Se filtró cada una de las dos muestras sonoras mediante los filtros diseñados, utilizando un filtrado zero-phase, para evitar que este proceso modificase la fase original de las muestras sonoras.

Así, se consiguió simular, mediante filtrado, cómo escucharían las personas los dos tipos de ruido urbano, si se encontrasen protegidas del exterior por elementos de aislamiento con índices de reducción sonora como los utilizados para construir los filtros.

2.2.1 Selección de las muestras sonoras urbanas

Para que los resultados del estudio pudieran ser relevantes, se precisaba que las muestras sonoras utilizadas fuesen altamente representativas del ruido urbano.

Por ello, para la obtención de las muestras sonoras se llevaron a cabo campañas de grabación binaural en diversos paisajes sonoros del entorno urbano de Madrid. Éstas incluyen:

1. Grabaciones de 15 minutos de ruido urbano en 13 emplazamientos diferentes de la ciudad de Madrid, con diferentes características, tales como diferentes tipo y velocidades de tráfico rodado, ruido de transeúntes, ruido de alarmas, etc.
2. Grabaciones de una hora de sobrevuelos de aviones en dos zonas urbanas muy próximas al aeropuerto de Madrid-Barajas y sin ruido de tráfico, en las que la fuente principal de ruido era el de las aeronaves.

De estas grabaciones, se extrajeron los principales parámetros psicoacústicos [13] (Loudness, Sharpness, Roughness y Fluctuation Strength) de la duración completa, en el caso del ruido urbano, y del promedio de todos los sobrevuelos, en el de las aeronaves y, siguiendo el procedimiento descrito en [14], se seleccionaron muestras sonoras de corta duración que tuvieran todos sus parámetros psicoacústicos próximos a los de las grabaciones completas. De esta manera, para los distintos tipos de ruido urbano, se pudo asegurar que las muestras de corta duración eran representativas del entorno.

Para esta investigación se seleccionaron las muestras sonoras representativas obtenidas para ruido de tráfico mixto (vehículos ligeros, pesados y motos) a bajas velocidades y el ruido de sobrevuelo de aeronaves, denominadas M1 y M2, respectivamente. M1 era una muestra sonora de tráfico rodado mixto a bajas velocidades que contenía el paso de un coche, así como el ruido de una moto y una furgoneta de

reparto. M2 era el sobrevuelo de una aeronave, cuyo modelo pertenecía a la familia de aeronaves más habitual en [15].

Los niveles en banda de ambas muestras sonoras pueden observarse en la Figura 2. La duración de ambas muestras fue corta, de 10 segundos, siendo suficientemente largas como para caracterizar los entornos, pero no demasiado largas como para fatigar a los participantes o que éstos se centrasen en la escucha sólo en partes de los sonidos [12].

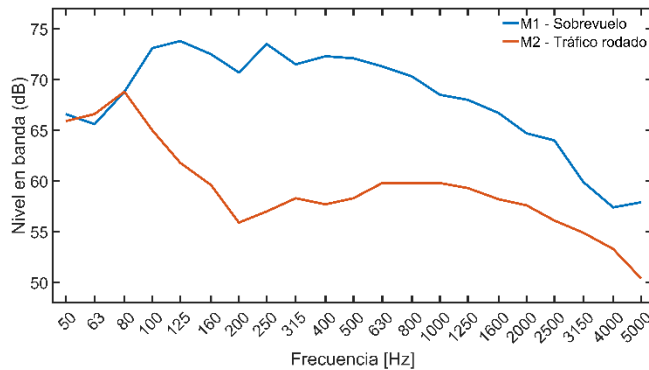


Figura 2: Niveles en banda de las dos muestras sonoras

Como se puede observar, las dos muestras tenían una energía muy similar a bajas frecuencias, lo que permitió evaluar en el análisis si otros factores, tales como la estructural temporal, el contenido energético en frecuencias superiores o la susceptibilidad a un tipo de ruido en particular tenían efectos significativos sobre los juicios de molestia perceptual.

2.2.2 Creación de los índices de reducción sonora

El estudio se centró en evaluar, aisladamente, la influencia que la baja frecuencia del aislamiento de fachadas tiene sobre la percepción de molestia ante estímulos sonoros urbanos. Por ello, era importante que los índices de reducción sonora utilizados sólo tuviesen variaciones en 50, 63 y 80 Hz.

Con esta finalidad se siguió el siguiente procedimiento estadístico, obteniéndose los índices de reducción sonora empleados para filtrar las muestras sonoras:

1. Se tomaron los índices de reducción sonora en laboratorio de 31 mediciones de elementos de ventana de entre las más comunes en la construcción europea de viviendas. La mayoría de estas mediciones se realizaron por los investigadores siguiendo los procedimientos y requisitos descritos en la serie de normas UNE-EN ISO 10140. Los restantes índices de reducción sonora se obtuvieron de catálogos y software de simulación;
2. De estas 31 mediciones se obtuvo su media y desviación típica;
3. Se utilizó una simulación de Montecarlo para obtener 1000 observaciones, dentro del rango de dos

desviaciones típicas, lo que permitió obtener observaciones aleatorias pero representativas del 95% de los casos, en base a la dispersión original;

4. Se seleccionaron nueve índices de reducción sonora: seis aleatoriamente de entre las simulaciones, así como los límites superior e inferior del método de Montecarlo y la media.
5. Los nueve índices de reducción sonora finalmente utilizados para filtrar las muestras sonoras tenían los valores obtenidos en el punto 4, para las bandas de 50, 63 y 80 Hz, teniendo todos las mismas atenuaciones (la del aislamiento promedio) para las bandas entre 100 y 5000 Hz. Estos índices de reducción sonora pueden observarse en la Figura 3.

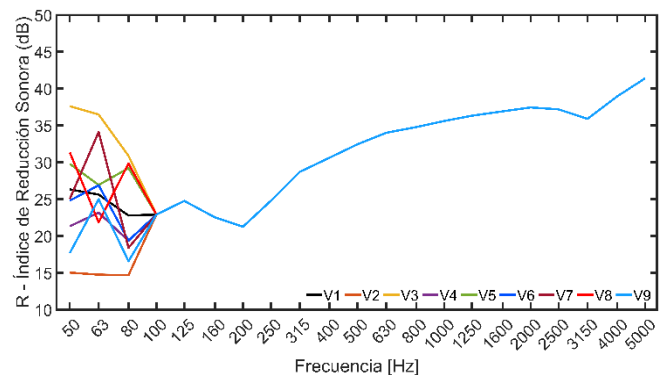


Figura 3: Índices de reducción sonora construidos

Como se puede observar en la Figura 3, los índices de reducción sonora utilizados cubrían bien la dispersión de los datos originales a baja frecuencia, siendo V2 y V3 los límites inferiores y superiores de las dos desviaciones típicas del conjunto de las 31 mediciones originales a partir de las cuales se entrenó la simulación de Montecarlo.

2.3 Participantes, entorno e instrumentación utilizada

Las pruebas perceptuales se llevaron a cabo, de manera simultánea en dos entornos de prueba: (1) cabina insonorizada sita en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y, (2) cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M). 69 participantes llevaron la prueba en la primera localización y los restantes 31 en la segunda. De los 100 participantes, 46 fueron mujeres y, 54, hombres.

Los entornos de ensayo eran en ambas ocasiones muy silenciosos, con ruido de fondo por debajo o cercano al umbral de audición en todas las bandas de interés. Estos sólo contaban con una pantalla, unos auriculares y un ratón, para que los participantes pudiesen manejar la prueba. El resto del equipamiento (ordenador, tarjeta de sonido, amplificadores de auriculares, etc.) se situó en el exterior para evitar posibles fuentes de ruido adicionales en el entorno de ensayo.

En la UPM, los auriculares (Sennheiser HD650) se conectaron al ordenador mediante la interfaz sonora RME Fireface UFX y el amplificador de auriculares Rane HC6S. Los mismos auriculares y equipamiento similar se usaron en la UC3M. El equipamiento fue calibrado mediante una señal de referencia, grabada con el mismo equipamiento utilizado en las grabaciones binaurales. Así se aseguró que los niveles reproducidos durante la prueba simulaban bien situaciones reales del sonido urbano grabado, si entre el entorno y el oyente se encontrasen elementos de aislamiento con índices de reducción sonora como los utilizados.

La prueba se realizó utilizando el software DiTAA toolbox [16] que permite realizar pruebas siguiendo, entre otros, el protocolo 2-AC. Esta aplicación presenta cada juicio, así como cada estímulo en cada juicio, en orden aleatorio para cada participante, asegurando la independencia estadística.

2.3 Análisis de los resultados

La detectabilidad de la diferencia entre los dos estímulos de cada comparación y la cuantificación de su tamaño fue realizada mediante Modelos Thurstonianos. Éstos consideran que la percepción de un determinado atributo de un estímulo puede considerarse distribuida de manera normal [17]. Así, en un enfoque comparativo como el utilizado, la diferencia perceptual entre los dos estímulos en una comparación se puede medir como la distancia entre las medias de las dos distribuciones de probabilidad.

Esta medida de la distancia perceptual, en términos de desviaciones típicas, se denomina d' (d-prima). Además de la métrica d' , los Modelos Thurstonianos permiten obtener el p-valor del juicio, determinando si la distancia perceptual entre los estímulos supone una clara detección de diferencias o no. En esta investigación se utilizó un umbral del 0.05. Así, si el p-valor es inferior a 0.05 en una comparación, se puede asegurar estadísticamente, con un nivel de confianza del 95%, que los participantes fueron capaces de detectar diferencias claras entre los estímulos.

El cálculo, mediante sensR [18], de estas métricas con el Modelo Thurstoniano ajustado a la prueba 2-AC, requiere que se pase a éste, para cada comparación, el número de participantes que seleccionó cada una de las tres posibles opciones: “Estímulo A”, “Estímulo B”, “Sin Diferencia”.

3. RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los resultados de d' y p-valor, para cada muestra sonora y aquellas comparaciones (14 de las 36) en las que la detección de los participantes fue significativa para ambas muestras sonoras. En un enfoque comparativo como el utilizado, valores negativos de d' significan que el primer elemento fue seleccionado como más molesto, con valores

positivos representando lo contrario. El valor absoluto de d' representa la distancia perceptual entre los estímulos.

Por claridad, en la Tabla 1, los p-valores aparecen mediante rangos representados por símbolos: $0.01 < p - \text{valor} \leq 0.05$ (*); $0.001 < p - \text{valor} \leq 0.01$ (**); $0.0001 < p - \text{valor} \leq 0.001$ (***) ; $p - \text{valor} \leq 0.0001$ (★).

Tabla 1: d' y p-valor para los juicios con detectabilidad significativa para ambas muestras sonoras.

Comparación	M1	M2
	d' (p-valor)	d' (p-valor)
V1-V2	0.92 (★)	1.03 (★)
V1-V9	0.61 (***)	0.34 (*)
V2-V3	-1.02 (★)	-0.73 (★)
V2-V4	-0.90 (★)	-0.83 (★)
V2-V5	-0.77 (★)	-0.85 (★)
V2-V6	-0.57 (**)	-0.81 (★)
V2-V7	-1.15 (★)	-0.73 (★)
V2-V8	-0.44 (*)	-0.72 (★)
V2-V9	-0.46 (**)	-0.68 (***)
V3-V7	0.53 (**)	0.49 (**)
V3-V9	0.86 (★)	0.76 (★)
V4-V5	-0.68 (★)	-0.49 (**)
V5-V9	0.50 (**)	0.42 (*)
V8-V9	0.42 (*)	0.36 (*)

Como se puede observar en la Tabla 1, los participantes sólo fueron capaces de detectar diferencias estadísticamente significativas entre variaciones de baja frecuencia para 14 de 36 comparaciones realizadas. En las demás comparaciones, al menos para una de las dos muestras sonoras, pero generalmente para ambas, la detección de cambios en la baja frecuencia no fue significativa.

De los 14 casos presentados en la Tabla 1, ocho se corresponden a las comparaciones de V2 con los demás, siendo juicios, que en general, presentan valores de significancia extremadamente elevados. Esto quiere decir que los participantes fueron capaces, de manera fácil, de detectar perceptualmente diferencias entre los índices de reducción sonora a baja frecuencia de V2 y los demás. Además, observando el signo de d' se comprueba que los participantes seleccionaron V2 siempre como más molesto. Echando un vistazo a la Figura 3, se puede observar que V2 es el índice de reducción sonora más pobre en aislamiento, con valores considerablemente bajos para las bandas de 50, 63 y 80 Hz.

De las restantes seis comparaciones, cuatro se corresponden con comparaciones de V9 frente a V1, V3, V5 y V8. De manera similar a lo acontecido con V2, los participantes seleccionaron como más molesto V9 en todas estas comparaciones. Si se observan los índices de reducción

sonora, el de V9 es el segundo más pobre en aislamiento acústico promedio a bajas frecuencias después de V2.

Por último, el caso V4-V5 es también digno de mención. En este caso, un vistazo a la Figura 3 permite observar que la diferencia entre los elementos comparados no es tan grande como en los casos anteriores, pero, aun así, suscita una diferencia perceptual clara en los participantes. En la Figura 3 se puede ver que V4 se encuentra por debajo del índice de reducción sonora promedio, mientras que V5 se encuentra por encima. Los participantes seleccionaron como significativamente más molesto V4.

De esta manera, los resultados de esta investigación ponen de relieve que, en general, la detectabilidad de las bajas frecuencias es muy limitada, para índices de reducción sonora en baja frecuencia en el rango de lo esperable para ventanas de viviendas y ruidos urbanos de tráfico mixto a bajas velocidades y de aeronaves.

Tan sólo cuando el aislamiento acústico en baja frecuencia es significativamente peor que el promedio, cambios en baja frecuencia generan una detectabilidad clara de éstas y un aumento claro de la molestia. Este hecho pone de manifiesto, como en investigaciones anteriores [5–7], que, en general, una expresión del aislamiento acústico de fachadas mediante los valores globales estandarizados calculados desde 100 Hz aportaría resultados perceptualmente robustos, aunque no tendría en cuenta situaciones particulares como las siguientes, donde una expresión del aislamiento acústico desde 50 Hz podría ser deseable:

1. Elementos constructivos especialmente pobres a baja frecuencia, tales como V2 y V9;
2. Recintos receptores con tiempos de reverberación elevados a bajas frecuencias;
3. Posiciones de oyente muy próximas a una esquina en recintos receptores, como en el caso de un dormitorio con la cama pegada a ésta;
4. Ruidos exteriores menos habituales, pero con mayor contribución energética en bajas frecuencias, tales como ruido de tráfico pesado o ruido de obras en la vía.

En estas situaciones, una caracterización desde 100 Hz sería pobre. Aún así, estudios anteriores, como algunos de los revisados en [4], han destacado que los índices estandarizados calculados desde 50 Hz pueden no ser, en muchas ocasiones, significativamente mejores que los calculados desde 100 Hz, tampoco en situaciones como las recién nombradas.

En vista de todo lo anterior, y aunque se ha comprobado que en situaciones habituales la detectabilidad de las bajas frecuencias es limitada y sólo se maximiza en situaciones extremas, sería deseable que se realicen más estudios

perceptuales similares, con índices de reducción sonora con otras características, así como para más tipos de ruido urbano.

Los resultados de estas investigaciones podrían utilizarse como en [7,8] para definir, mediante Machine o Deep Learning, curvas de referencia del aislamiento acústico que permitan obtener valores globales desde 50 Hz, no sólo representativos del comportamiento habitual del aislamiento y ruido urbano, sino también de casuísticas más particulares y en las que se requiere de una especial protección a bajas frecuencias.

5. CONCLUSIONES

Esta comunicación presenta los resultados de un estudio perceptual llevado a cabo mediante *listening tests* destinado a evaluar si cambios en la baja frecuencia (bandas de 50, 63 y 80 Hz) del aislamiento acústico de ventanas de fachada son detectables y, en caso afirmativo, para cuantificar el tamaño de la diferencia perceptual.

Los resultados de experimento ponen de manifiesto que, en general, para el rango de variabilidad esperable en baja frecuencia, para elementos de ventana, los participantes no fueron capaces de detectar significativamente las diferencias de baja frecuencia. Este hecho suscita que la expresión del aislamiento acústico de fachadas mediante valores globales desde 100 Hz podría ser adecuada en la mayoría de ocasiones.

Sin embargo, los participantes fueron capaces de detectar de manera muy significativa y robusta diferencias en las bajas frecuencias cuando se comparaban índices de reducción sonora alrededor o superiores a la media del aislamiento de ventanas, con índices de reducción sonora muy pobres, pero dentro de lo esperado en base a la dispersión esperable para ventanas. Estas situaciones no se encontrarían contempladas por una expresión del aislamiento a través de los valores globales estandarizados calculados desde 100 Hz.

Se propone llevar a cabo más experimentos perceptuales similares, con otros índices de reducción sonora y muestras sonoras urbanas, de manera que se puedan obtener, mediante optimización u otras técnicas de Machine o Deep Learning, curvas de referencia desde 50 Hz para el cálculo de valores globales del aislamiento acústico más representativos de la percepción que los actualmente estandarizados.

6. REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 16283-3:2016 Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 3: Aislamiento a ruido de fachada. Asociación Española de Normalización y Certificación; 2016.
- [2] UNE-EN ISO 10140-2:2022 Acústica. Medición en

- laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo. Asociación Española de Normalización y Certificación; 2022.
- [3] UNE-EN ISO 717-1:2021 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Asociación Española de Normalización y Certificación; 2021.
- [4] Nikolaos-Georgios Vardaxis DB. Review of acoustic comfort evaluation in dwellings: Part III—airborne sound data associated with subjective responses in laboratory tests. *Build Acoust* 2018;25:289–305.
- [5] Bailhache S, Jagla J, Guigou C, Cstb CG, Environnement P. CSTB - Projet Environnement et ambiances : effet des basses fréquences sur le confort acoustique - tests psychoacoustiques. 2014.
- [6] Hongisto V, Oliva D, Rekola L. Subjective and objective rating of the sound insulation of residential building façades against road traffic noise. *J Acoust Soc Am* 2018;144:1100–12.
- [7] de la Prida D, Pedrero A, Navacerrada MÁ, Díaz-Chyla A. An annoyance-related SNQ for the assessment of airborne sound insulation for urban-type sounds. *Appl Acoust* 2020;168:107432. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107432>.
- [8] Virjonen P, Hongisto V, Mäkelä MM, Pahikkala T. Optimized reference spectrum for rating the façade sound insulation. *J Acoust Soc Am* 2020;148:3107–16.
- [9] Rindel JH. A comment on the importance of low frequency airborne sound insulation between dwellings. *Acta Acust United with Acust* 2017;103:164–8.
- [10] Christensen RHB, Lee H-S, Brockhoff PB. Estimation of the Thurstonian model for the 2-AC protocol. *Food Qual Prefer* 2012;24:119–28.
- [11] de la Prida D, Pedrero A, Navacerrada MÁ, Díaz-Chyla A. Methodology for the subjective evaluation of airborne sound insulation through 2-AC and Thurstonian models. *Appl Acoust* 2020;157. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107011>.
- [12] Chmelík V, Rychtáriková M, Müllner H, Jambrošić K, Zelem L, Benklewski J, et al. Methodology for development of airborne sound insulation descriptor valid for light-weight and masonry walls. *Appl Acoust* 2020;160:107144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107144>.
- [13] Fastl H, Zwicker E. *Psychoacoustics: Facts and Models*. 3rd ed. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2007.
- [14] de la Prida D, Pedrero A, Navacerrada MÁ, Díaz C. Relationship between the geometric profile of the city and the subjective perception of urban soundscapes. *Appl Acoust* 2019;149:74–84. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2019.01.025>.
- [15] Torija AJ, Roberts S, Woodward R, Flindell IH, McKenzie AR, Self RH. On the assessment of subjective response to tonal content of contemporary aircraft noise. *Appl Acoust* 2019;146:190–203.
- [16] de la Prida D, Pedrero A, Azpicueta-Ruiz LA. The protocol matters: A power comparison and a toolbox for the enhancement of precise listening tests in room acoustics. *Proc. 24th Int. Congr. Acoust., Gyeongju, Korea: International Commission for Acoustics*; 2022.
- [17] Hye-Seong Lee MO. Sensory difference testing: Thurstonian models. *Food Sci Biotechnol* 2004;13:841–7.
- [18] Christensen RHB, Brockhoff PB. *sensR---An R-package for sensory discrimination* 2018.