

Mapas de ruido. La medida de la contaminación acústica en el medio urbano



Barrigón Morillas, J.M.^{a1}, Montes-González, D.^{1,2}, Rey Gozalo, G.¹,
Vílchez-Gómez, R.¹

¹ INTERRA, Lambda, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Extremadura, Cáceres, España

² ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal
barrigon@unex.es

PACS: 43.50.Lj; 43.50.Rq; 43.50.Yw

Resumen

La propuesta de planes de acción para la reducción de la exposición de la población que habita en las ciudades a la contaminación acústica precisa de un conocimiento realista de las situaciones bajo estudio. Los mapas de ruido son la herramienta de referencia en Europa para analizar las posibles soluciones a aplicar, ya que permiten conocer los niveles de ruido ambiental a los que está expuesta cualquier fachada a partir de cálculos o mediciones *in situ*. Pero este nivel depende de múltiples factores interrelacionados. Por tanto, es imprescindible conocer los factores de más relevancia. No obstante, cualquier proceso de cálculo o de medida lleva asociado la existencia de incertidumbres, por lo que es preciso ser conscientes de la complejidad propia de la propagación de las ondas acústicas en entornos reales. En este artículo, se muestran los efectos que tiene la selección del punto de medida sobre la incertidumbre, aportando una revisión de los trabajos científicos publicados sobre esta temática. Los estudios actuales en esta línea de investigación permiten tener un conocimiento más preciso de la influencia de los entornos urbanos sobre el proceso de medida del campo sonoro y, en consecuencia, obtener una evaluación más precisa de la exposición sonora a la que están expuestos los ciudadanos.

Palabras clave: Mapas de ruido; Mediciones *in situ*; Incertidumbres en la medida.

Abstract

The proposal for action plans to reduce the exposure of the population living in cities to noise pollution requires a realistic knowledge of the situation under study. Noise maps are the reference tool in Europe to analyse the possible solutions to apply, since they allow knowing the levels of environmental noise to which any facade is exposed from calculations or measurements *in situ*. Nevertheless, this level depends on multiple interrelated factors. Therefore, it is essential to know the most relevant factors. However, any calculation or measurement process is associated with the existence of uncertainties, so it is necessary to be aware of the complexity of sound wave propagation in real environments. In this article, the effects that the selection of the measurement points has on the uncertainty are shown, providing a review of the scientific works published on this topic. Current studies in this line of research allow to have a more precise knowledge of the influence of urban environments on the sound field measurement process and, consequently, to obtain a more precise evaluation of the sound exposure to which citizens are subjected.

Keywords: Noise maps; On-site measurements; Uncertainties in measurement.

1. Introducción

El desarrollo económico y social que se ha ido produciendo a escala mundial, en buena medida durante las últimas décadas, ha supuesto un incremento importante del número de personas que habitan en ciudades y del número y utilización de las infraestructuras de transporte ([1], [2]). Estos hechos han originado un aumento progresivo de los niveles de ruido existentes, tanto en entornos urbanos como rurales, desembocando en un problema de impor-

tante calado, como es el de la contaminación acústica ([3], [4], [5], [6]). Su efecto nocivo sobre diferentes esferas de la salud humana [7] ha sido puesto de manifiesto en diferentes investigaciones relacionadas con el sistema cardiovascular ([8], [9]), el sistema metabólico ([10], [11]), el sistema auditivo [12], las molestias del sueño ([13], [14]), etc.

Cualquier planteamiento de mejora y de búsqueda de soluciones de la situación pasa por la consecución de un conocimiento de la realidad para, en aquellos casos en

los que resulte conveniente, reducir los niveles de contaminación acústica. Este planteamiento ha sido recogido por la Comunidad Europea [15] y, en consecuencia, por los países que la forman, en particular por la legislación española ([16], [17], [18]). Los mapas de ruido, tal y como viene recogido en la Directiva Europea [15], son la principal herramienta para la lucha contra el ruido ambiental en Europa, sirviendo de referencia para las propuestas de Planes de Acción. Además, este planteamiento ha servido de referencia para muchos otros países ([19], [20]).

Un aspecto esencial en la lucha contra la contaminación acústica es la consideración específica de la fuente sonora causante del problema. Diferentes consideraciones son importantes al respecto. Por un lado, el planteamiento de soluciones debe estar fundamentado, en buena medida, pensando en la fuente sonora causante del problema. Es conocido que las actuaciones sobre la fuente representan la mejor forma de lucha contra el ruido ([21], [22], [23]). Por otro lado, también debemos considerar que los efectos del ruido son dependientes de la fuente considerada, existiendo, para algunas de ellas, relaciones específicas entre indicadores sonoros y los efectos producidos ([24], [25]). Por tanto, existe la necesidad de elaborar mapas de ruido específicos en función de las fuentes sonoras. Este hecho, recogido por la Directiva Europea [15], se obtiene de manera natural en los mapas de ruido mediante cálculos, pero es más complicado de conseguir mediante medidas, dado que todas las fuentes sonoras presentes en el entorno en un instante determinado son detectadas por los equipos de medida.

Otro aspecto de relevancia es el tiempo de referencia. Es importante tener en cuenta el periodo de evaluación que debe ser considerado. Naturalmente, este tiempo estará en relación con los efectos que se deseen evitar y con el conocimiento que se tenga sobre la relación entre dosis y efectos. Los efectos del ruido urbano generalmente cuantificados a partir de expresiones propuestas por diferentes normativas son la molestia y perturbación del sueño ([26], [27]). En estos momentos, la Directiva Europea [15] toma la referencia de un año como periodo temporal de referencia para la evaluación de los efectos causados por el ruido. Naturalmente, este hecho debería influir sobre los datos de entrada para los mapas de ruido calculados y, a su vez, sobre los procedimientos de medida adecuados y las estrategias de muestreo tanto espaciales como temporales que deberían ser planteadas.

Pueden considerarse diferentes métodos o estrategias para la obtención de un mapa de ruido. Genéricamente, podemos diferenciar entre: a) Métodos informatizados, realizados mediante cálculos que modelan el comportamiento del campo sonoro. Generalmente, para esta vía, se emplea *software* comercial, que utiliza dife-

rentes normalizaciones del comportamiento del campo sonoro en exteriores ([28], [29]). Este es el procedimiento recomendado por la Directiva [15]. En casos específicos y entornos muy concretos y limitados, en los que se requiere un estudio detallado y preciso del comportamiento del campo sonoro, puede ser adecuado el empleo de métodos de cálculo numérico como BEM (*Boundary Element Method*), FEM (*Finite Element Method*) ([30], [31]). b) Estudios mediante medidas *in situ* que, en gran medida, se diferencian entre ellos en aspectos metodológicos relativos a la selección de los puntos de muestreo, más que en el procedimiento de medida, que se encuentra normalizado ([32], [33], [34]). También, actualmente, ha tomado relevancia la diferenciación entre los modelos estáticos y dinámicos [35]. Las variables introducidas en los modelos de ruido estático no varían durante un determinado periodo de tiempo ([36], [37]) mientras que en los modelos dinámicos se determina el nivel de potencia sonora de cada paso de vehículo en periodos de tiempo, generalmente, de 1 s.

Una de las referencias para la elaboración de mapas de ruido, son las normas internacionales ISO 1996 ([26], [38]) que han servido como base para la elaboración de la legislación, tanto nacional como internacional, ya que describen aspectos relacionados con el cálculo y el procedimiento de medición del nivel de presión sonora en ambientes exteriores.

Si se desea conocer de forma experimental o simulada, con indicación de la fuente sonora considerada, la dosis de ruido recibida por los ciudadanos, el problema fundamental es evaluar el nivel sonoro correspondiente al campo sonoro que incide sobre la fachada considerada, en el punto deseado. Es conocido que el nivel sonoro incidente depende de múltiples factores interrelacionados. Por ello, para que esta evaluación sea lo más precisa posible, resultará necesario tener en cuenta aquellos factores que puedan ser de relevancia. Entre ellos, debemos considerar: las características de la fuente bajo evaluación que puedan tener influencia en el proceso de medida (temporalidad, geometría, situación, potencia, espectro...); las características del entorno bajo evaluación (geometría, configuración, elementos, materiales...); el posible efecto asociado a las condiciones meteorológicas y, además, la situación específica del punto de evaluación respecto al entorno y respecto a la fachada de interés.

Como es conocido, la norma internacional de referencia para la medida del ruido urbano en exteriores [38] contempla, bien en su parte normativa, bien en la informativa, básicamente todos estos factores, realizando una propuesta del procedimiento de medida y dando un cierto margen en las condiciones que deben verificarse.

Además, la norma incluye, en su parte normativa, tres posiciones de referencia en relación con la fachada bajo evaluación y las correcciones a realizar en el caso de que el campo sonoro reflejado deba ser considerado. Igualmente, en ella, pueden encontrarse indicaciones sobre las dificultades en la aplicación de las correcciones asociadas a los efectos de suma, coherente o no, entre el campo sonoro incidente y el campo sonoro reflejado. Estos hechos, como se revisará en este trabajo, podrían resultar determinantes en los resultados obtenidos en la elaboración de los mapas de ruido, sea mediante medidas, sea mediante simulación, dada la necesidad de calibrar los mapas de ruido obtenidos mediante cálculos de acuerdo con la Guía de Buenas Prácticas [39]. Y, como consecuencia, todo ello puede llegar a tener un efecto significativo en la toma de decisiones sobre la reducción de los niveles de ruido existentes en las ciudades y en el planteamiento de los planes de acción.

A partir de la introducción realizada, se puede deducir que la amplitud y las ramificaciones de la problemática planteada pueden llegar a ser muy amplias. Por ello, este trabajo se plantea, y así esperamos que sea considerado, como un acercamiento a la situación actual en este campo tomando como referencia el ruido producido por el tráfico como fuente cuyo impacto se desea evaluar. Para ello, se hará una revisión de la bibliografía científica y técnica existente al respecto para, fundamentalmente, ir revisando las fuentes de incertidumbres correspondientes a los aspectos geométricos del proceso de medida. Sólo en aquellos casos que se vea procedente, se realizará alguna discusión sobre sus implicaciones en el caso del proceso de verificación de los mapas de ruido elaborados mediante cálculos. Y, en ningún caso, se ha pretendido realizar una revisión sobre los aspectos temporales del proceso de medida, relacionados con múltiples aspectos, como condiciones meteorológicas, variabilidad de la emisión de la fuente, etc.; o sobre las incertidumbres específicamente propias del proceso de elaboración de los mapas de ruido mediante cálculo.

2. Análisis

Diferentes aspectos esenciales e interrelacionados han de ser considerados en el momento de la elección del punto de evaluación para obtener, con la mayor precisión y la menor incertidumbre, el valor del campo sonoro incidente en fachada y para, en su caso, aplicar correcciones al valor del nivel sonoro medido. Las múltiples relaciones entre los aspectos a considerar permitirían plantear diferentes sistematizaciones de este estudio, en este trabajo se propone la siguiente estructura:

Consideraciones relacionadas con la geometría del punto de medida. En este epígrafe aparecen los aspectos

relativos a la situación del punto de medida con respecto a los dos elementos esenciales del proceso de elaboración de un mapa de ruido: el emisor y el receptor. En este sentido, debemos considerar:

- i) La fachada. Es el elemento fundamental, el receptor, la superficie de referencia para el cálculo del campo sonoro incidente. Respecto a ella será relevante tanto la distancia entre el punto de medida y la fachada, como la altura a la que realicemos la medida.
- ii) La fuente. Es la otra cara de la moneda del proceso de medida, el emisor, la fuente de sonido cuyo campo sonoro se quiere medir. Para este elemento deberá tenerse en cuenta su distancia al punto de medida, así como el ángulo de visión, etc.

Consideraciones relacionadas con la geometría y características del entorno y de la fachada. En este segundo grupo se encuentran los aspectos relativos al entorno y a la propia fachada y que pueden tener una relación relevante sobre el resultado de la medida. En este sentido, debemos considerar:

- i) El entorno. La configuración, geometría y características globales del entorno bajo evaluación. Se considerarán aquí los diferentes elementos que componen el entorno urbano y que pueden afectar al resultado de la medida. Anchura de la calle, altura de los edificios, características del terreno, presencia de superficies reflectantes, etc.
- ii) La fachada. La geometría de la fachada y sus características respecto al resto de elementos. Aquí, se analizarán, los efectos relevantes a considerar sobre su geometría superficial (irregularidades, presencia de balcones, pórticos, etc.), materiales y ángulo de la fachada respecto a la fuente.

2.1. Referencia normativa

Vamos a comenzar el análisis haciendo referencia a lo que la norma ISO 1996-2:2017 [38] indica respecto a ambos grupos de consideraciones.

Por un lado, en lo relativo a aspectos relacionados con el punto de medida, debe ser tenido en cuenta que:

- Respecto a la fachada, podemos observar que la norma no determina de forma explícita una distancia concreta a la fachada posterior a la que se debe situar el equipo de medida, dejando esta elección en manos del técnico entre diferentes opciones. Este hecho, en realidad, no necesariamente representa un problema. Podría considerarse como el reconocimiento de la realidad urbana. Dado el urbanismo de muchas calles de nuestras ciudades,

es complicado indicar una distancia de referencia para la medida que, a la vez, no implique un montaje algo complejo. La altura de medida, en cambio, se concreta más, indicándose su valor y el rango de incertidumbre, con una referencia a la estructura en altura de los edificios bajo interés.

- Respecto a la fuente, en la parte normativa, la norma no indica ninguna consideración geométrica. Cualquier referencia geométrica en este aspecto aparece solo en la parte informativa de la norma. De nuevo, como se verá, este hecho puede considerarse un reconocimiento de la complejidad de la realidad urbana.

Por otro lado, respecto a aquellos aspectos relacionados con las características del entorno y la fachada, podemos observar que:

- Respecto al entorno, en su parte normativa las referencias al entorno son, en general poco concretas y en la línea de indicar aquellas circunstancias que pueden ser causa de desviaciones respecto a la propuesta de correcciones a aplicar.
- Respecto a la fachada, la referencia que podemos encontrar ya ha sido indicada en relación con la altura de medida.

Asociado a las diferentes opciones de colocación del equipo de medida respecto a la fachada y respecto a la fuente, la norma propone unas correcciones a realizar en los valores de los niveles sonoros medidos. El objetivo de esta propuesta de correcciones es claro, tener en cuenta los efectos de incremento del nivel sonoro que implica la reflexión respecto al campo sonoro incidente en fachada y que es el de interés. Los valores para estas correcciones se dan en función de la distancia a la fachada del punto de medida. Para ello se toma como condición de referencia la situación de campo libre. Naturalmente, en el caso de una medida en estas condiciones, la corrección propuesta es de 0 dB. Cuando el micrófono es montado a ras sobre la superficie reflectante, aunque en el caso ideal la diferencia entre el campo medido y el incidente es de -6 dB, la corrección propuesta es de -5,7 dB. Y cuando el micrófono es situado entre 0,5 m y 2 m en frente de la superficie reflectante, la corrección es de -3 dB. Cualquier otra distancia a la fachada no está contemplada en la normativa. Por tanto, el equipo de medida no debe situarse nunca a una distancia entre ras de superficie y 0,5 m. Y, por otro lado, aunque puedan existir configuraciones de medida a una distancia mayor de 2 m que, sin verificar la condición de campo libre, pudiesen verificar una condición de suma energética entre campo directo y campo reflejado, estas distancias a fachada tampoco están contempladas en la norma. Por último, se

considera de interés indicar que, para la posición del micrófono en campo libre, dado que lo que deseamos es medir el campo incidente en la fachada, deberían contemplarse solo aquellas configuraciones de medida en las que el micrófono se situase a la misma distancia de la fuente a la que se encuentra la fachada a evaluar. Por tanto, no estarían contempladas aquellas medidas que, haciéndose delante del edificio, el micrófono sea situado a una distancia tal que se verifique la condición de campo libre indicadas en la norma. Esta configuración implicaría una distancia a la fuente inferior a la que se encuentra la fachada bajo evaluación. Por tanto, no se estaría evaluando el campo sonoro incidente en la fachada.

Respecto a las correcciones recogidas en la norma, dos aspectos son de interés. En primer lugar, la norma indica explícitamente que las correcciones propuestas se verificarían en casos ideales. En el caso del micrófono montado a ras sobre la superficie reflectante, por tanto, en una situación de suma coherente de los campos sonoros incidente y reflejado, recoge la norma que, en la práctica, pueden producirse desviaciones menores a 6 dB entre el nivel medido y el correspondiente a campo libre. Cuando el micrófono se sitúa entre 0,5 m y 2 m, situación de suma energética entre los campos sonoros incidente y reflejado, la norma señala que la diferencia se aproxima a 3 dB para un caso ideal sin ningún obstáculo reflectante vertical que influya en la propagación del sonido hasta el receptor. Sin embargo, esta diferencia puede ser mucho mayor en situaciones complejas, por ejemplo, en sitios con una alta densidad de edificios, calles tipo cañón, etc.

Si bien, como hemos visto, la norma hace escasas referencias en su parte normativa a las condiciones para que las correcciones propuestas se verifiquen, es en el anexo B en el que, a modo informativo, se indican con detalle diferentes consideraciones que deberían ser tenidas en cuenta.

Para la condición de campo libre, se considera lo más importante la indicación que hace, respecto a aspectos relativos a las distancias, para que la presencia de superficies no ejerza una influencia sobre el campo sonoro incidente.

En el caso de que el micrófono sea colocado sobre la superficie, ninguna consideración explícita aparece respecto a aspectos de distancia a la fuente. Por tanto, es una condición de medida válida para cualquier distancia a la fuente. Aunque, expresamente se dice que esta posición de medida debe de ser evitada en el caso de incidencia rasante. Pero sí hace algunas consideraciones de importancia en aspectos relacionados con las características de la propia fachada o con el tamaño del micrófono. En este sentido, con relación a las características de la

fachada, la norma indica aspectos relativos tanto al tamaño máximo de las irregularidades de la fachada alrededor del punto de medida, como al tipo de material de la fachada, de forma que, en algunos casos refiere a necesidad de medir mediante el uso de una placa cuyas características de tamaño y montaje se detallan. Por otro lado, las características del espectro de emisión de la fuente son tenidas en cuenta al indicar tamaños de micrófono en función del rango en frecuencia a medir.

Para el caso del micrófono cerca de la superficie reflectante (entre 0,5 m y 2 m), se produce una clara interrelación entre el conjunto de aspectos en los que hemos estructurado el análisis. Esto es, se mezclan consideraciones relacionadas con la geometría del punto de medida, con la de la propia fachada, con las características de ésta, con las características de la fuente respecto al punto de evaluación y con su espectro.

Se considera el primer aspecto de relevancia la diferente consideración que hace del tipo de fuente sonora objeto de estudio en función del ángulo de visión, como fuente extendida o como fuente puntual. Este hecho va a influir en las consideraciones geométricas para la colocación del equipo de medida. A su vez, la posición del punto de medida se verá influida por el tamaño mínimo de la fachada. Por otro lado, al igual que en la posición pegado a fachada, en esta posición la norma indica un tamaño máximo de las irregularidades de la fachada. Se consideran también de especial relevancia las consideraciones geométricas para la colocación del equipo de medida respecto a fachada y fuente sonora. Puede verse como la distancia entre la fachada y el micrófono se relaciona con:

- el tamaño mínimo de la fachada,
- la distancia entre la fachada y la fuente y,
- su valor mínimo, con las características espectrales de la fuente sonora.

Por tanto, estas dos últimas están relacionadas con la geometría del punto de medida respecto a la fachada y respecto a la fuente. La figura 1 hace una representación de las implicaciones de estas dos condiciones. Respecto a la distancia entre la fachada y la fuente sonora, para una distancia mínima de 2 m entre ellas, se representan las implicaciones las consideraciones de la norma respecto a la distancia entre la fachada en el sonómetro. La línea punteada indica, respecto a la fachada, la distancia de medida mínima y, la línea sólida, la máxima distancia, en relación con la distancia entre la fachada y la fuente sonora. Puede verse, por ejemplo, que, para la mínima distancia indicada en la norma entre la fachada y el micrófono de 0,5 m, la mínima distancia que debería haber entre el micrófono y la fuente es de 4,5 m. Esto es, en

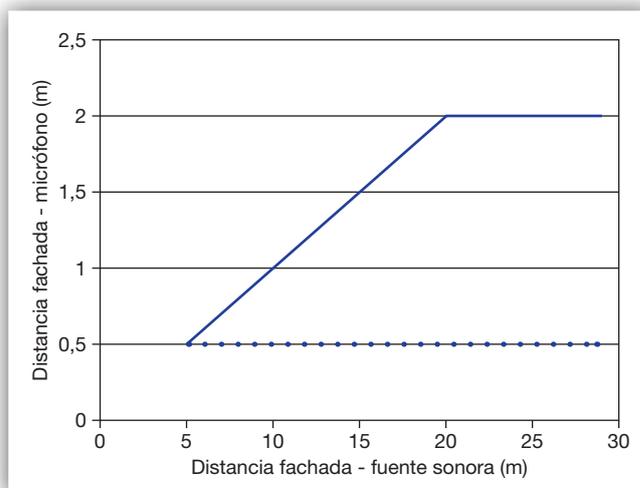


Figura 1. Esquema de las zonas de medida reguladas en el anexo B (informativo) de la norma ISO 1996-2 [38] para la configuración cerca de la superficie de la fachada.

muchas calles de nuestras ciudades es completamente imposible emplear la configuración de medida cerca de la superficie reflectante si se desea cumplir las condiciones para que el campo directo y el reflejado tengan la misma energía sonora.

Diferentes trabajos han analizado los aspectos geométricos relativos a la medida del ruido urbano, los efectos del entorno y las correcciones asociados a las condiciones de medida de forma que lo que se evalúe sea el campo sonoro incidente sobre el edificio de interés.

2.2. Aspectos relacionados con el punto de medida

En muchos de estos trabajos se ha tomado como fuente el tráfico rodado de vehículos; pero no se indican datos suficientes para determinar el cumplimiento de las indicaciones del anexo B de la norma ISO 1996-2 [38].

Hall et al. [40] desarrollaron un estudio en el exterior de 33 viviendas situadas en vías de elevados flujos de tráfico. Para ello, se utilizaron dos equipos de medida, uno de cuyos micrófonos se colocó sobre la fachada de las viviendas y otro, a 2,0 m de esta. Los resultados obtenidos indican que, en promedio, es apropiada una corrección de 3 dB entre estos dos puntos de medida, excepto a frecuencias inferiores a 200 Hz, en las que se observaron fluctuaciones significativas por encima y por debajo de 3 dB.

Quirt [41] realizó un trabajo para investigar sobre el comportamiento del campo sonoro cerca de las superficies exteriores de los edificios. En su trabajo se indica que la asunción de que la energía se duplica a 2 m de la superficie del edificio es una aproximación razonable para una fuente distribuida, tal como el tráfico rodado de vehículos, para bandas de tercio de octava por encima de 100 Hz.

Memoli et al. [42] llevaron a cabo una serie de mediciones de corta duración en diferentes vías con variedad de tipologías. Para ello, se emplearon varios micrófonos midiendo de forma simultánea a 4 m de altura sobre el suelo. Según sus conclusiones, los valores obtenidos indican la precisión de las correcciones propuestas por los estándares internacionales, en especial por la norma ISO 1996-2 [37]. Memoli et al. [42] hacen referencia también a la importancia de la distancia entre la fuente sonora y el micrófono en la aplicación del factor de corrección debido a las reflexiones en la fachada de los edificios sobre el nivel sonoro medido. Establece que la distancia entre la fachada y la fuente es un aspecto que se ha de tener en cuenta a la hora de distinguir entre las diferentes posiciones de medida, debido a las diferentes distancias entre fuente sonora y las viviendas que hay entre Europa del norte y Europa del sur y a la importancia de este parámetro en el modelo incoherente.

Jagniatinskis et al. [43] realizaron un estudio de evaluación del ruido ambiental mediante medidas de larga duración de un año, seleccionando un punto de medida con un elevado flujo de vehículos y con una distancia entre el receptor y la fuente de 250 m. En estos ensayos experimentales, utilizaron dos micrófonos midiendo de forma simultánea, uno situado sobre la ventana de una fachada y otro colocado a 2 m de esta. En este trabajo, se concluye que la diferencia, en términos globales, entre ambos micrófonos es de aproximadamente 3 dBA, pero que no es constante durante todo el día, si no que alcanza valores aproximados a 3 dBA durante el periodo diurno (coincidiendo con el periodo de mayor flujo de vehículos en la vía) y valores que oscilan entre 1 dBA y 2 dBA durante el periodo nocturno y parte de la tarde, indicándose, por tanto, la posibilidad de que la diferencia dependa de las características de la fuente sonora.

En este mismo sentido, otro trabajo [44] planteó un estudio de la corrección de -6 dB realizando medidas simultáneas durante 47 meses. En este caso, se utilizaron tres micrófonos: uno situado directamente sobre el vidrio de una ventana de la fachada, otro fijado en la superficie de la fachada mediante una placa metálica y, el tercero, en campo libre en la parte superior. Se seleccionó una vía con configuración en L y con un considerable flujo de vehículos que circula a una distancia aproximada de 150 m respecto a los micrófonos. Los resultados obtenidos para la diferencia del nivel sonoro entre los micrófonos situados en la fachada y el situado en campo libre oscilan entre 4,0 dBA y 4,9 dBA, por lo que los autores indican que la aplicación de la corrección de -6 dB propuesta por norma podría introducir, en algunos casos, errores significativos.

En el trabajo de Montes González et al. [45], utilizando como fuente sonora el tráfico, se cuida el cumplimiento

de las recomendaciones dadas por el anexo B de la norma y se consideran varios puntos de entornos urbanos que reflejen la realidad urbana propia de las calles de las ciudades. Según los resultados obtenidos a partir de medidas de corta duración, los valores de corrección por reflexión en las condiciones reales de medida en el ámbito urbano resultan de menor importancia que los recomendados por la norma ISO 1996-2 [38]. Cuando los equipos fueron situados a 1,5 m de altura sobre el suelo, la diferencia del nivel sonoro equivalente medido sobre la fachada de los edificios y a 2,0 m de esta fue de $1,1 \text{ dBA} \pm 0,1 \text{ dBA}$. Mientras que, a 4,0 m de altura, esta diferencia fue de $2,0 \text{ dBA} \pm 0,2 \text{ dBA}$. También se observó que, al aplicar una corrección por distancia a la fuente en el análisis de cada uno de los bloques de medidas acústicas, los valores obtenidos presentan un comportamiento cualitativo más cercano a los valores esperados según la norma ISO 1996-2 [38].

Un nuevo estudio fue realizado recientemente [33] en el que se realizó un análisis de las diferencias en el nivel de ruido semanal del tráfico rodado entre un micrófono montado en la fachada de un edificio y uno situado a una distancia entre 0,5 m y 2,0 m de ella. En banda ancha, se encontraron resultados similares para las cuatro distancias analizadas (0,5 m; 1,0 m; 1,5 m y 2,0 m), pero con variaciones de hasta 0,6 dBA respecto al valor de referencia según la norma ISO 1996-2 [38]. Mientras que, en bandas de frecuencia de octava, se obtuvieron diferencias de más de 2 dB entre las cuatro configuraciones de medida en las bandas de frecuencia inferiores a 250 Hz. También se detectó una variación de la diferencia de niveles durante el periodo de medida en función de la hora del día y del nivel sonoro. De modo que las diferencias más pequeñas entre los niveles sonoros medidos por el micrófono situado en la fachada y el micrófono colocado a diferentes distancias de esta, se concentran en la noche entre la 1:00 h y las 6:00 h y para los niveles sonoros registrados más bajos (30-45 dBA).

En todos los trabajos anteriores, el ruido de tráfico rodado era la principal fuente sonora, pero un estudio con una metodología similar fue llevado a cabo tomando en consideración el ruido de los aviones en ciudades como Madrid (España) y Pisa (Italia) [34]. En este caso, dos micrófonos de medida fueron utilizados para hacer las mediciones *in situ* de forma simultánea. Uno de ellos fue empleado como micrófono de referencia, siendo colocado a una altura de 7 m sobre el suelo y a una distancia de 10 m respecto a la fachada. El otro micrófono fue situado a una altura de 4 m y a 2 m de distancia de la fachada de los edificios. Los resultados mostraron una dependencia del factor de corrección a aplicar sobre el nivel sonoro medido en función del ángulo de inclinación del avión. En el rango de 0° a 50° , los valores obtenidos

para el factor de corrección oscilaron entre 1,0 dBA y 2,5 dBA. Mientras que, cuando el ángulo de inclinación aumentó hasta el rango de 60° a 89°, el factor de corrección se redujo a valores inferiores a 1 dBA e incluso a valores negativos en algunos casos.

Por otro lado, la Directiva Europea sobre Ruido [15] establece que los micrófonos de medida o puntos de evaluación deben ser colocados a una altura de 4,0 m \pm 0,2 m cuando las mediciones se lleven a cabo cerca de edificios. Pero también indica que se pueden elegir otras alturas iguales o superiores a 1,5 m, en cuyo caso los resultados deben corregirse para una altura equivalente de 4,0 m. Sin embargo, no determina qué correcciones deben aplicarse en cada caso o cómo determinarlas. En este mismo sentido, la norma ISO 1996-2 [38] establece que, como norma general, se debe utilizar una altura de micrófono o receptores de 4,0 m \pm 0,2 m para realizar los mapas de ruido.

En todo caso, la influencia de la altura de medida sobre su resultado es un aspecto de interés por diferentes razones. Por un lado, si se desea hacer una evaluación preliminar del nivel sonoro en una ciudad, la forma técnicamente más accesible y que permite recorrer un mayor número de calles de la ciudad, es la utilización de una altura de 1,5 m sobre el nivel del suelo. Por otro lado, en las condiciones reales de medida en un entorno urbano, no siempre es posible colocar los equipos de medida a la altura indicada por la norma. Además, existen en la actualidad planteamientos de elaboración de mapas de ruido que pretenden un cambio desde una visión estática a una dinámica ([35], [37]). Por todo ello, es de interés disponer de un conocimiento que permita establecer las relaciones, si las hubiese, entre los valores de los niveles sonoros medidos a diferentes alturas del micrófono. En este sentido, la norma francesa "*Guide du Bruit des Transports Terrestres: Prevision des Niveaux Sonores*" [46] establece, para las calles con perfil en U, algunas correcciones para la previsión de los niveles sonoros en función de la altura del micrófono de medida.

En esta línea, el trabajo de Montes González et al. [45] muestra un estudio del efecto de la variación de la altura del equipo de medida. En este caso, se realizaron medidas simultáneas de corta duración con dos micrófonos situados a 3 m de la fachada de los edificios y a diferentes alturas entre 1,2 m y 6,0 m sobre el suelo. Los resultados obtenidos en banda ancha mostraron signos diferentes a lo esperable, teniendo en cuenta la distancia entre los micrófonos y la fuente sonora. Es decir, el micrófono situado a menor altura registró valores menores del nivel sonoro equivalente. En este trabajo, además, a partir del análisis de las diferencias del nivel sonoro en bandas de octava, los autores indican la existencia de un

posible fenómeno de apantallamiento asociado a la presencia de líneas de aparcamientos, cuyos efectos pueden resultar de importancia a partir de 250 Hz. Este hecho se mantuvo incluso para la comparación entre la configuración de medidas a 4,0 m y 6,0 m de altura. Lo que, además, entraría en contradicción con las correcciones en altura propuestas por la norma francesa "*Guide du Bruit des Transports Terrestres: Prevision des Niveaux Sonores*" [46].

Nicol et al. [47] realizaron una serie de medidas acústicas con el propósito de examinar la variación vertical del nivel de ruido en calles urbanas con perfil en U. Considerando el tráfico de vehículos como principal fuente sonora, se seleccionaron varias calles de la ciudad de Atenas con diferente relación entre la altura promedio de los edificios y la anchura de la calle. Se realizaron medidas simultáneas de 15 min con tres micrófonos situados a una distancia de 1 m de la fachada posterior. Uno de los micrófonos se situó en la calle y los otros en otras dos plantas del edificio cuya altura fue variable. Los resultados muestran una disminución del nivel sonoro a medida que aumenta la altura. A partir de los datos indicados en este trabajo se realizó un promedio de las diferencias obtenidas entre los valores sonoros registrados a las distintas alturas y se obtuvo una disminución de 2,3 dB entre el micrófono de calle y el situado a 8 m, de 3,1 dB entre 8,0 m y 11,5 m, de 3,5 dB entre 11,5 m a 15,0 m, de 2,1 dB entre 15,0 m y 18,5 m y de 7,8 dB entre 18,5 m y 22,0 m.

Soler et al. [48] realizaron un nuevo trabajo en este sentido en el que analizaron las diferencias de micrófonos situados entre 1,5 m y 4,0 m de altura. Para ello, seleccionaron 21 puntos de medida en las calles de Barcelona en los que ambos micrófonos fueron situados a una distancia de entre 1,2 m y 1,5 m respecto al carril de tráfico más cercano y, cuando fue posible, a más de 2,0 m de la fachada de los edificios. Los resultados indican que, en promedio, el micrófono colocado a una altura de 1,5 m registró un nivel sonoro superior en 0,2 dBA.

Janczur et al. [49] llevaron a cabo un estudio del nivel de ruido de tráfico en una calle con perfil en U y una anchura de 43 m, con edificios a ambos lados de aproximadamente 30 m de altura. Varios micrófonos fueron situados en un edificio a las alturas de 2,0 m; 5,3 m; 8,6 m; 14,6 m; 19,1 m; 22,4 m y 25,7 m y a una distancia de 0,5 m de la fachada. Los resultados experimentales muestran que al aumentar la altura entre 2,0 m y 5,3 m se produjo un aumento promedio de los niveles sonoros de 0,5 dB, mientras que entre 5,3 m y 8,6 m y entre 8,6 m y 14,6 m se registraron disminuciones promedio de 0,5 dB y 0,4 dB, respectivamente. A partir de 14,6 m, debido a que la fachada no sigue la misma línea vertical,

se detectó un incremento de los niveles sonoros por efecto de la difracción.

Janczur et al. [50] analizan un nuevo entorno urbano con perfil en L mediante una serie de receptores acústicos colocados en cada una de las 10 plantas de la fachada de un edificio de 34 m de altura situado en las proximidades de una carretera. Se realizaron medidas de 10 min del nivel equivalente mediante un analizador digital de 4 canales, siendo divididas en 3 grupos de medidas simultáneas: en el primero se incluyen los receptores de las plantas 1 a 4, en el segundo los de las plantas 4 a 7 y en el tercero los de las plantas 7 a 10. Para ello, los receptores se colocaron a 1,0 m de la fachada del edificio y a 1,5 m sobre el suelo de la planta correspondiente. Los resultados experimentales muestran un aumento de los niveles sonoros de 1,5 dB aproximadamente entre las alturas de 5,6 m y 13,9 m y de 0,5 dB entre las alturas de 13,9 m y 22,2 m. A partir de los 19,5 m comienzan a disminuir los niveles sonoros con la altura.

En este mismo sentido, Montes González et al. [51] observaron que, en entornos urbanos sin obstáculos entre los carriles de tráfico y los equipos de medida, la diferencia entre los niveles de ruido medidos simultáneamente por dos micrófonos colocados a alturas de 4,0 m y 1,5 m aumentó de forma significativa entre -0,8 dBA y 0,9 dBA con el incremento de la distancia entre el micrófono y la fuente sonora en un rango de 2,0 m a 8,0 m.

2.3. Aspectos relacionados con las características del entorno y la fachada

A veces se evalúan otros elementos del entorno que pueden resultar influyentes en la determinación del nivel de ruido en entornos urbanos. En esta línea, Van Renterghem et al. [52] estudiaron el efecto que tiene la presencia de setos en vías urbanas. Para ello, utilizaron varios micrófonos midiendo de forma simultánea en varias localizaciones en las que existían setos de diferentes dimensiones. Los resultados indican que los setos proporcionan reducción del nivel sonoro que oscila entre 1,1 dBA y 2,2, dBA, dependiendo de la velocidad del vehículo y de la altura del receptor. Biocca et al. [53] llevaron a cabo cuatro ensayos diferentes para evaluar la reducción del ruido debido a los setos presentes en entornos urbanos, incluyendo el uso de dos fuentes sonoras diferentes y realizando medidas a varias distancias tanto del seto como de la fuente de ruido. En tres de los ensayos, se produjo una atenuación significativa del ruido, observándose una reducción promedio del nivel de ruido de 2,7 dBA. Este efecto fue particularmente relevante en la gama de frecuencias entre 2 kHz y 20 kHz.

Otro tipo de elementos que puede modificar el comportamiento del campo sonoro en entornos urbanos son

los obstáculos reflectantes. Una aproximación a la influencia del efecto de apantallamiento acústico debido a los vehículos aparcados fue realizada a través de simulaciones mediante métodos numéricos con BEM [54]. En algunas configuraciones estudiadas, la presencia de vehículos aparcados suponía una diferencia en el nivel sonoro de hasta 8 dBA respecto a las situaciones sin vehículos. Sin embargo, al tratarse de una simulación en dos dimensiones, la separación entre vehículos aparcados no podía ser considerada en el estudio y el efecto de una barrera acústica continua podría haber inducido a una sobreestimación del efecto de apantallamiento. Con el fin de evaluar este aspecto, se realizó un estudio mediante métodos de cálculo comúnmente empleados en los mapas estratégicos de ruido con un modelo tridimensional [55]. Los resultados en banda ancha muestran que este efecto de apantallamiento puede ser significativo en configuraciones comunes en entornos urbanos, incluso a alturas de receptor de 4 m consideradas como referencia en los mapas estratégicos de ruido. La magnitud de este efecto variaba en función de la distancia entre la fachada del edificio, los vehículos aparcados y la fuente sonora, así como de la altura del receptor. En esta misma línea de investigación, se presentó un estudio experimental en entornos urbanos en diferentes configuraciones para evaluar la influencia de la posición del micrófono y de los carriles de estacionamiento en los niveles medidos de ruido del tráfico rodado [51]. En aquellas configuraciones con vehículos aparcados en los laterales de las calles, la diferencia del nivel equivalente medido entre micrófonos a 4,0 m y 1,5 m de altura oscilaba entre 2,7 dBA y 4,5 dBA. Todos estos resultados ponen de manifiesto la importancia de este efecto en la selección de la altura para las mediciones y en la validación de los mapas de ruido calculados.

Pero también existen otros elementos presentes en las fachadas de los edificios como son los balcones, ventanas, salientes, etc. que deben ser tenidos en cuenta al evaluar el nivel sonoro incidente en la fachada. Como hemos indicado, la norma ISO 1996-2 [38] hace una serie de recomendaciones relacionadas con las características que deben tener las fachadas para la aplicación de las correcciones por reflexiones. Estas características están relacionadas con el material de la fachada; pero también con las dimensiones mínimas alrededor del punto de medida y con la profundidad de las discontinuidades que puedan existir en las fachadas. Muchas de estas consideraciones, además, son dependientes de la posición del micrófono respecto a esta superficie. Con relación a esta temática, diferentes investigadores han realizado trabajos que permiten avanzar en la comprensión de lo que ocurre cuando este tipo de condiciones no se verifican. En este sentido, Wang et al. [56] observaron

que las reflexiones sonoras que se generan cuando el ruido de tráfico incide sobre los balcones situados en la fachada de los edificios contribuyen a reducir el efecto de barrera acústica de los propios balcones. Por su parte, Naish et al. [57] realizaron un estudio con nueve tipos de balcón con tratamientos acústicos variables con el fin de actuar sobre las reflexiones que se producen en estos elementos constructivos. Mediante un modelo a escala de un edificio con balcones y una fuente de ruido no paralela a la fachada, Tang [58] llevó a cabo una serie de ensayos para investigar sobre efecto de pantalla de los balcones. Los resultados muestran que el ángulo de inclinación de la fuente respecto a la fachada tiene efectos sustanciales en la pérdida de inserción del balcón cuando se tiene en consideración el espectro de ruido de tráfico. En consecuencia, la presencia de elementos constructivos comunes en las fachadas, como balcones, ventanas, discontinuidades, pórticos, etc., representan un problema importante para conocer el valor de las correcciones a aplicar que permitan tener en cuenta, únicamente, en el valor final asignado el campo sonoro incidente en la fachada.

3. Conclusiones

Dada la importancia de los mapas estratégicos para evaluar la situación acústica, tanto en ciudades como en otro tipo de entornos (ejes viarios, ferroviarios o aeropuertos), y para la toma de decisiones mediante los planes de acción para proteger a la población de los efectos de la contaminación acústica, es deseable que se desarrollen investigaciones que vayan acotando las incertidumbres asociadas a su elaboración. La complejidad de la propagación de las ondas acústicas en entornos reales (no controlados, como puede ser un laboratorio) hace difícil la obtención de medidas más precisas. Pero, por esa misma razón, creemos que existe un campo de investigación amplio y de gran interés científico y social. El presente trabajo ha pretendido un acercamiento a esta temática, aportando una revisión de los trabajos publicados en la bibliografía científica que realizan un análisis de esta problemática mediante mediciones. Puede considerarse que la primera conclusión de este trabajo es que todas las publicaciones en esta línea de investigación están permitiendo tener un conocimiento más certero de la influencia de los entornos urbanos sobre el proceso de medida del campo sonoro y, en consecuencia, permitiendo un acercamiento a una evaluación más precisa de la exposición sonora a la que están expuestos los ciudadanos.

En el análisis de los aspectos geométricos del proceso de medida, tomando como referencia el ruido producido por el tráfico, se han considerado dos aspectos: aquellos relativos a la colocación del micrófono con res-

pecto a la fachada y a la fuente y los relacionados con las características del entorno y la fachada.

Respecto a la colocación del micrófono respecto a la fachada y a la fuente, los trabajos publicados permiten concluir que:

- En general, incluso en situaciones reales existentes en el entorno urbano, los trabajos publicados han indicado que la corrección de -3 dB para el nivel sonoro en banda ancha medido por un equipo situado entre 0,5 m y 2,0 m de la fachada, en promedio, es razonable. Pero que existen muchas situaciones en las que esta corrección de 3 dB se aleja significativamente de la adecuada. Reportándose en algunos trabajos la existencia de discrepancias de hasta 2 dB.
- En el caso de medidas en bandas de octava mediante un equipo situado entre 0,5 m y 2,0 m de la fachada, los trabajos publicados coinciden en indicar que, para frecuencias en la banda de octava de 250 Hz o frecuencias inferiores, las discrepancias respecto a considerar la existencia de una suma energética entre el campo directo y el reflejado pueden llegar a ser importantes, siendo esencial una selección adecuada del punto de medida en función de las características espectrales de la fuente a estudiar.
- Pocos trabajos han publicado estudios relacionados con la corrección de 5,7 dB entre campo sonoro incidente y campo sonoro medido pegado a la fachada. En este caso, para medidas en banda ancha, se han publicado diferencias de hasta 2 dB. Consideramos que es necesario ampliar el número de trabajos que exploren esta configuración de medida.
- Respecto a la altura del equipo de medida, existen diferentes trabajos que han explorado su efecto sobre el resultado de la medida. En este caso, los resultados, en general, indican una disminución del nivel sonoro con la altura. Pero este resultado no es unánime ni existe una coincidencia en los valores de la caída del nivel con la altura. Parece claro que es necesario ampliar los trabajos en esta línea e indicar en ellos, con detalle suficiente todas las condiciones geométricas del entorno de medida y todas las condiciones de los elementos del entorno y de la fachada de medida.

Respecto a los aspectos relacionados con las características del entorno y la fachada, podemos concluir que:

- Algunos trabajos concluyen que los elementos del entorno, como por ejemplo los setos, pueden estar influyendo de forma apreciable en el valor del campo

sonoro recibido en las fachadas, sobre todo a medias y altas frecuencias.

- Existen trabajos que indican que las líneas de aparcamiento, tan comunes en una gran parte de las calles de las ciudades, pueden llegar a tener un efecto importante sobre el campo sonoro incidente en las fachadas y sobre los valores medidos en función de la altura, con valores que, en algunas situaciones superan diferencias de 4 dBA entre micrófonos situados a 1,5 m y 4,0 m. Las repercusiones de este hecho sobre las dosis recibidas por los ciudadanos y sobre los procesos de verificación de los mapas de ruido pueden llegar a ser de relevancia y parece que es de interés que sean exploradas.
- Diferentes investigaciones han profundizado en el efecto de las configuraciones reales de las superficies de las fachadas de los edificios sobre los resultados de la medida del campo sonoro incidente. De estos trabajos, se concluye la gran dificultad de conocer, en estas situaciones realistas, la diferencia que puede existir entre el campo sonoro medido y el realmente incidente en fachada. Dada lo complicado de encontrar puntos de medida del ruido urbano, sobre todo para la medida de larga duración, un conocimiento más preciso del comportamiento del campo sonoro en las fachadas se vuelve un campo de investigación relevante.

4. Agradecimientos

Este proyecto fue cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y la Junta de Extremadura (GR18107 e IB18050). Este trabajo también fue cofinanciado por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura, la Unión Europea y el Fondo Social Europeo (FSE) a través de las ayudas para el fortalecimiento de la I+D+i mediante la movilidad de investigadores postdoctorales (PO17014) y por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura a través de ayudas para la atracción y retorno del talento investigador a los centros de I+D+i del Sistema Extremeño de Ciencia, Tecnología e Innovación (TA18019), donde la Universidad de Extremadura fue la entidad beneficiaria en ambos casos.

5. Referencias

- [1] Mohsin, M., Abbas, Q., Zhang, J. et al., 2019. Integrated effect of energy consumption, economic development, and population growth on CO2 based environmental degradation: a case of transport sector. *Environ Sci Pollut Res* 26, 32824–32835. <https://doi-org.ezproxy.unex.es/10.1007/s11356-019-06372-8>
- [2] Buhaug, H., Urdal, H., 2013. An urbanization bomb? Population growth and social disorder in cities. *Global Environ Chang* 23:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.016>
- [3] World Health Organization (WHO), 1999. Berglund, Birgitta, Lindvall, Thomas, Schwela, Dietrich H & World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team. Guidelines for community noise. World Health Organization, 1999. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/66217>
- [4] European Environment Agency (EEA). Noise in Europe 2014. Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2014. <https://doi.org/10.2800/763331>
- [5] World Health Organization (WHO), 2018. Environmental Noise Guidelines for the European Region. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, 2018. <http://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>
- [6] European Environment Agency (EEA). Environmental noise in Europe — 2020. Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2020. <https://doi.org/10.2800/686249>
- [7] World Health Organization (WHO), 2009. Night noise guidelines for Europe. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, 2009. <http://www.euro.who.int/document/e92845.pdf>
- [8] Khosravipour, M., Khanlari, P., 2020. The association between road traffic noise and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis. *Science of The Total Environment* 731, 139226. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139226>
- [9] Begou, P., Kassomenos, P., Kelessis, A., 2020. Effects of road traffic noise on the prevalence of cardiovascular diseases: The case of Thessaloniki, Greece. *Science of The Total Environment* 703, 134477. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134477>
- [10] Cramer, J., Thering Jørgensen, J., Sørensen, M., Backalarz, C., Laursen, J.E., Ketzler, M., Hertel, O., Jensen, S.S., Simonsen, M.K., Bräuner, E.V., Andersen, Z.J., 2019. Road traffic noise and markers of adiposity in the Danish nurse cohort: A cross sectional study. *Environmental Research* 172, 502–510. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.001>
- [11] Van Kamp, I., Simon, S., Notley, H., Baliatsas, C., Van Kempen, E., 2020. Evidence relating to environmental noise exposure and annoyance, sleep disturbance,

- cardio-vascular and metabolic health outcomes in the context of IGCB (N): A scoping review of new evidence. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17. <https://doi.org/10.3390/ijer-ph17093016>
- [12] Śliwińska-Kowalska, M., Zaborowski, K., 2017. WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and permanent hearing loss and tinnitus. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14. <https://doi.org/10.3390/ijer-ph14101139>
- [13] Basner, M., McGuire, S., 2018. WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030519>
- [14] Douglas, O., Murphy, E., 2016. Source-based subjective responses to sleep disturbance from transportation noise. *Environment International* 92–93, 450–456. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.030>
- [15] COM. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise (END). Official Journal L, 189. Brussels: The European Parliament and the Council of the European Union, 0012–0026; 2012.
- [16] Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido («BOE» núm. 276, de 18/11/2003.)
- [17] Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. («BOE» núm. 301, de 17/12/2005.)
- [18] Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. («BOE» núm. 254, de 23/10/2007.)
- [19] Paiva, K.M., Cardoso, M.R.A., & Zannin, P.H.T., 2019. Exposure to road traffic noise: Annoyance, perception and associated factors among Brazil's adult population. *Science of the Total Environment*, 650, 978–986. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.041>
- [20] Suárez, E., Barros, J.L., 2014. Traffic noise mapping of the city of Santiago de Chile. *Science of the Total Environment*, 466–467, 539–546. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.013>
- [21] Teti, L., de León, G., Del Pizzo, A., Moro, A., Bianco, F., Fredianelli, L., Licitra, G., 2020. Modelling the acoustic performance of newly laid low-noise pavements. *Construction and Building Materials* 247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118509>
- [22] Heutschi, K., Bühlmann, E., Oertli, J., 2016. Options for reducing noise from roads and railway lines. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94, 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.019>
- [23] Altenbaher, B., Goltnik, D., Rosi, B., 2015. Railway noise reduction by the application of CHFC material on the rail. *Transport Problems* 10, 5–14. <https://doi.org/10.21307/tp-2015-015>
- [24] Myllyntausta, S., Virkkala, J., Salo, P., Varjo, J., Rekola, L., Hongisto, V., 2020. Effect of the frequency spectrum of road traffic noise on sleep: A polysomnographic study. *Journal of the Acoustical Society of America* 147, 2139–2149. <https://doi.org/10.1121/10.0000985>
- [25] Chang, T.-Y., Beelen, R., Li, S.-F., Chen, T.-I., Lin, Y.-J., Bao, B.-Y., Liu, C.-S., 2014. Road traffic noise frequency and prevalent hypertension in Taichung, Taiwan: A cross-sectional study. *Environmental Health: A Global Access Science Source* 13. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-37>
- [26] International Organization for Standardization. ISO 1996-1: 2016. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: basic quantities and assessment procedures. Geneva: International Organization for Standardization; 2016.
- [27] Miedema, H.M.E.; Passchier-Vermeer, W.; Vos, H., 2003. Elements for a Position Paper on Night-Time Transportation Noise and Sleep Disturbance; TNO Inro: Delft, The Netherlands.
- [28] Farcas, A., Powell, C.F., Brookes, K.L., Merchant, N.D., 2020. Validated shipping noise maps of the Northeast Atlantic. *Science of the Total Environment* 735. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139509>
- [29] Paschalidou, A.K., Kassomenos, P., Choniani, F., 2019. Strategic Noise Maps and Action Plans for the reduction of population exposure in a Mediterranean port city. *Science of the Total Environment* 654, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.048>
- [30] Li, Q., Duhamel, D., Luo, Y., Yin, H., 2020. Analysing the acoustic performance of a nearly-enclosed noise barrier using scale model experiments and a 2.5-D BEM approach. *Applied Acoustics* 158, 107079. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107079>

- [31] Yang, Z., Li, Z., 2019. Numerical modeling of wheel-rail squeal-exciting contact. *International Journal of Mechanical Sciences* 153–154, 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.02.012>
- [32] Barrigón Morillas, J.M., Gómez Escobar, V., Méndez Sierra, J.A., Vilchez-Gómez, R., Vaquero, J.M., & Trujillo Carmona, J., 2005. A categorization method applied to the study of urban road traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(5), 2844–2852. <https://doi.org/10.1121/1.1889437>
- [33] Montes González, D., Barrigón Morillas, J.M., Rey Gozalo, G., Atanasio Moraga, P., 2020a. Microphone position and noise exposure assessment of building façades. *Applied Acoustics* 160. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107157>
- [34] Flores, R., Asensio, C., Gagliardi, P., Licitra, G., 2019. Study of the correction factors for aircraft noise façade measurements. *Applied Acoustics* 145, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.10.007>
- [35] Rey Gozalo, G., Aumond, P., & Can, A., 2020. Variability in sound power levels: Implications for static and dynamic traffic models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 84, 102339. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102339>
- [36] Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council, 2015. The European Parliament and the Council of the European Union, Brussels, Belgium.
- [37] Can, A., Leclercq, L., Lelong, J., Botteldooren, D., 2010. Traffic noise spectrum analysis: Dynamic modeling vs. Experimental observations. *Appl. Acoust.* 71 (8), 764–770. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.04.002>
- [38] International Organization for Standardization. ISO 1996-2: 2017. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: determination of sound pressure levels. Geneva: International Organization for Standardization; 2017.
- [39] Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN), 2007. Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. European Commission Working Group-Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN); version 2.
- [40] Hall, F.L., Papakyriakou, M.J., Quirt, J.D., 1984. Comparison of outdoor microphone locations for measuring sound insulation of building facades. *J Sound Vib* 92; 559-567. [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(84\)90198-6](https://doi.org/10.1016/0022-460x(84)90198-6)
- [41] Quirt, J.D., 1985. Sound fields near exterior building surfaces. *J Acoust Soc Am* 77; 557-566. <https://doi.org/10.1121/1.391873>
- [42] Memoli, G., Paviotti, M., Kephelopoulos, S., Licitra, G., 2008. Testing the acoustical corrections for reflections on a façade. *Applied Acoustics* 69; 479-495. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.05.006>
- [43] Jagniatinskis, A., Fiks, B., 2014. Assessment of environmental noise from long-term window microphone measurements. *Applied Acoustics* 76; 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.007>
- [44] Mateus, M., Carrilho, J.D., Da Silva M.G., 2015. An experimental analysis of the correction factors adopted on environmental noise measurements performed with window-mounted microphones. *Applied Acoustics* 87; 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.06.019>
- [45] Montes González, D., Barrigón Morillas, J.M., Rey Gozalo, G., 2015. Influence of equipment location on results of urban noise measurements. *Applied Acoustics* 90; 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.11.001>
- [46] Centre d'Etudes des Transports Urbains (CETUR), 1980. Guide du Bruit des Transports Terrestres. Prévision des niveaux sonores. France: CETUR.
- [47] Nicol, F., Wilson, M., 2004. The effect of street dimensions and traffic density on the noise level and natural ventilation potential in urban canyons. *Energy and Buildings* 36, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.051>
- [48] Soler Rocasalbas, S., Torregrosa Avilés, S., Rossell Turull, I., Arnet, V.I., 2005. Comparativa entre medidas de ruido urbano a 1.5 y 4 m. Congreso Nacional de Acústica (Tecnicaústica).
- [49] Janczur, R., Walerian, E., Meissner, M., Czechowicz, M., 2006. Influence of vehicle noise emission directivity on sound level distribution in a canyon street. Part II: Experimental verification. *Applied Acoustics* 67, 659–679. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.12.003>
- [50] Janczur, R., Walerian, E., Meissner, M., Czechowicz, M., 2009. Application of simulation program to specific urban situation. *Applied Acoustics* 70, 973–985. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.11.002>
- [51] Montes González, D., Barrigón Morillas J.M., Rey Gozalo, G., Godinho, L., 2020c. Evaluation of exposure to road traffic noise: effects of microphone height and urban configuration. *Environmental Research* 191, 110055. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110055>

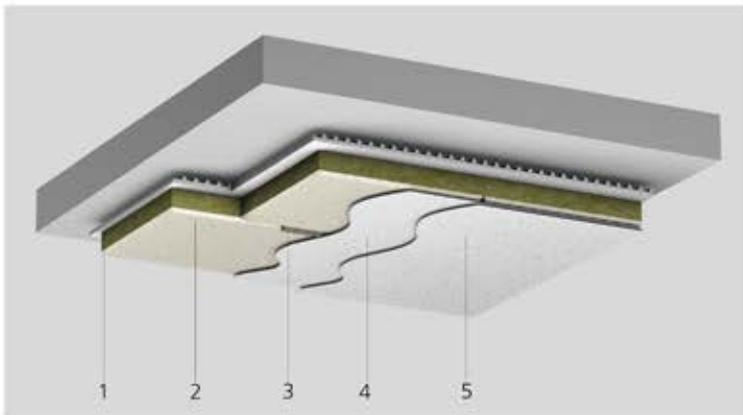
- [52] Van Renterghem, T., Attenborough, K., Maennel, M., Defrance, J., Horoshenkov, K., Kang, J., Bashir, I., Taherzadeh, S., Altreuther, B., Khan, A., Smyrnova, Y., Yang, H.S., 2014. Measured light vehicle noise reduction by hedges. *Appl Acoust* 78: 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.10.011>
- [53] Biocca, M., Gallo, P., Di Loreto, G., Imperi, G., Pochi, D., Fornaciari, L., 2019. Noise attenuation provided by hedges. *Journal of Agricultural Engineering* 50, 113–119. <https://doi.org/10.4081/jae.2019.889>
- [54] Montes González, D., Barrigón Morillas, J.M., Godinho, L., Amado-Mendes, P., 2018. Acoustic screening effect on building façades due to parking lines in urban environments. Effects in noise mapping. *Applied Acoustics* 130, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.08.023>
- [55] Montes González, D., Barrigón Morillas J.M., Rey Gózalo, G., Godinho, L., 2020b. Effect of parking lanes on assessing the impact of road traffic noise on building façades. *Environmental Research* 184, 109299. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109299>
- [56] Wang, X., Mao, D., Yu, W., Jiang, Z., 2015. Acoustic performance of balconies having inhomogeneous ceiling surfaces on a roadside building facade. *Building and Environment* 93, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.027>
- [57] Naish, D.A., Tan, A.C.C., Demirbilek, F.N., 2014. Simulating the effect of acoustic treatment types for residential balconies with road traffic noise. *Applied Acoustics* 79, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.12.021>
- [58] Tang, S.K., 2010. Scale model study of balcony insertion losses on a building façade with non-parallel line sources. *Applied Acoustics* 71, 947–954. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.06.006>

StoSilent Direct

Pared absorbente acústica continua



El sistema de acondicionamiento acústico StoSilent Direct en las fachadas de un atrio reduce la reverberación. Una nueva estructura de acero y vidrio de gran resistencia reemplaza el techo de vidrio de los años 90.



StoSilent Direct

Estructura del sistema (ejemplo sin juntas con StoSilent Top)

- 1 - Fijación con adhesivo con StoSilent Coll MW
- 2 - Panel acústico StoSilent Board MW 100
- 3 - Masilla StoSilent Filler
- 4 - Capa intermedia StoSilent Basic
- 5 - Capa de acabado StoSilent Top Finish

Cliente

Cámara de comercio e Indústria de Múnich y Alta Baviera

Arquitecto

Anderhalten Architekten GmbH, Berlin, DE

Emplazamiento

Max-Joseph 2, Múnich, DE

Áreas de competencia Sto

Sistema acústico (StoSilent Direct) para techos y franjas superiores de paredes

Ejecución

BS Verputz GmbH, Múnich, DE

