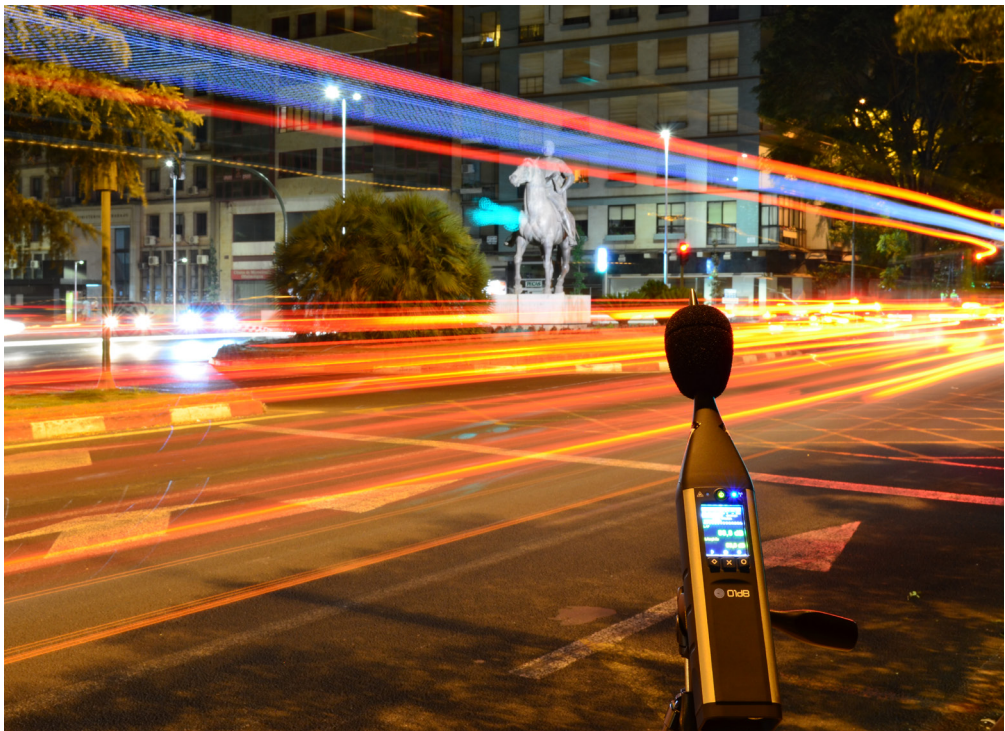


TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES
ELEMENTOS Y CARACTERÍSTICAS DEL ENTORNO
URBANO EN LA APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 1996
PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE RUIDO**



David Montes González
2017



DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS
DIFERENTES ELEMENTOS Y CARACTERÍSTICAS
DEL ENTORNO URBANO EN LA APLICACIÓN DE
LA NORMA ISO 1996 PARA LA OBTENCIÓN DE
MAPAS DE RUIDO**

Para la obtención del

**GRADO DE DOCTOR INTERNACIONAL POR LA
UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA**

David Montes González

Cáceres, 2017

D. Juan Miguel Barrigón Morillas, Titular de Universidad del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Extremadura

INFORMA

Que la presente memoria de Tesis Doctoral, titulada “Estudio de la influencia de los diferentes elementos y características del entorno urbano en la aplicación de la norma ISO 1996 para la obtención de mapas de ruido”, ha sido realizada por **D. David Montes González**, bajo su dirección, en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Extremadura.

Que revisado el trabajo, expresa su conformidad para que éste sea sometido a defensa frente al Tribunal correspondiente, ya que se considera que reúne los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor Internacional.

Fdo.: Dr. Juan Miguel Barrigón Morillas

Cáceres, diciembre de 2016

*"En Ciencia la única verdad sagrada,
es que no hay verdades sagradas"*

Carl Sagan

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mis agradecimientos a todas aquellas personas que han contribuido en la realización esta tesis doctoral y que me han apoyado y ayudado durante el camino.

En primer lugar, un agradecimiento especial a mi director de tesis, Juan Miguel Barrigón Morillas, por su dedicación, esfuerzo y motivación durante mi etapa como investigador en formación, así como por ayudarme a construir una mentalidad más crítica.

A Luís Manuel Cortesão Godinho, por su disponibilidad, trabajo y colaboración en las investigaciones realizadas mediante simulación numérica.

A Guillermo Rey Gozalo, por su trabajo y colaboración en los análisis estadísticos y en las investigaciones llevadas a cabo.

A todos los compañeros del Laboratorio de Acústica de la Escuela Politécnica de Cáceres, por todos los buenos momentos compartidos.

A toda mi familia, muy especialmente a mis padres y a mi hermana, por su cariño y su apoyo incondicionales. Y agradecer enormemente a mis padres el esfuerzo y los sacrificios de toda una vida para ofrecerme las mejores oportunidades.

A Fátima, por su cariño, su comprensión, su paciencia, su ayuda y su apoyo diarios.

A todos mis amigos. Y de una forma un poco más especial a Alberto, Víctor y Javi, con los que además de amistad, he compartido una parte muy importante de mi trayectoria como estudiante y grandes momentos que me han marcado positivamente y me han ayudado a despertar la curiosidad por aprender.

Y por último, a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido positivamente en mi formación durante las diferentes etapas educativas y han aportado su grano de arena en este camino.

¡Muchas gracias!

TÍTULO DE DOCTOR CON MENCIÓN INTERNACIONAL

Con el fin de obtener la mención de doctor internacional, se han cumplido, en lo que se refiere a esta tesis doctoral y a su defensa, los siguientes requisitos:

- Durante el periodo de formación para la obtención del título de doctor, el doctorando ha realizado una estancia mínima de tres meses fuera de España en una institución de enseñanza superior o centro de investigación de prestigio, realizando trabajos de investigación relacionados con la tesis. En concreto, el doctorando ha acumulado tres meses en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Coímbra (Portugal).
- Parte de la tesis doctoral, al menos el resumen y las conclusiones, ha sido redactada y presentada en una de las lenguas habituales para la comunicación científica, distinta a cualquiera de las lenguas oficiales en España.
- La tesis doctoral ha sido informada por un mínimo de dos expertos doctores pertenecientes a alguna institución de educación superior o instituto de investigación no español y de un país diferente al que se ha realizado la estancia.
- Al menos un experto, distinto a los mencionados en el punto anterior, perteneciente a alguna institución de educación superior o centro de investigación no español, con el título de doctor, y distinto del responsable de la estancia, ha formado parte del tribunal evaluador de la tesis doctoral.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	 9
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	11
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS	15
 CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE LA NORMA ISO 1996-2 Y ESTADO DE LA CUESTIÓN	 17
2.1 INTRODUCCIÓN	19
2.2 LA NORMA ISO 1996-2 Y LA MEDIDA DEL RUIDO AMBIENTAL EN EL ÁMBITO URBANO.....	20
2.3 UBICACIÓN DEL MICRÓFONO RESPECTO A LA FACHADA POSTERIOR.....	23
2.3.1 MICRÓFONO MONTADO SOBRE LA SUPERFICIE REFLECTANTE RESPECTO A MICRÓFONO EN CAMPO LIBRE	24
2.3.2 POSICIÓN DEL MICRÓFONO FRENTE A LA SUPERFICIE REFLECTANTE.	26
2.4 UBICACIÓN DEL MICRÓFONO RESPECTO A LA FUENTE SONORA....	36
2.5 ALTURA DEL MICRÓFONO DE MEDIDA	37
2.6 CONCLUSIONES	42
 CAPÍTULO 3: ENSAYOS “IN SITU”	 45
3.1 INTRODUCCIÓN	47
3.2 METODOLOGÍA	48
3.2.1 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	48
3.2.2 PROCEDIMIENTO DE MEDIDA.....	50
3.2.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	52
3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54

3.3.1 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTANCIA A FACHADA A 1.5 m DE ALTURA (GRUPO A)	55
3.3.2 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTANCIA A FACHADA A 4 m DE ALTURA (GRUPO B)	59
3.3.3 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA ALTURA DE MEDIDA (GRUPO C)	64
3.4 CONCLUSIONES	67
CAPÍTULO 4: ENSAYOS MEDIANTE SIMULACIÓN	71
4.1 INTRODUCCIÓN	73
4.2 METODOLOGÍA	77
4.2.1 FORMULACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS DE FRONTERA (BEM)	77
4.2.2 DEFINICIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE ANÁLISIS	80
4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	82
4.3.1 VERIFICACIÓN DEL MODELO BEM	82
4.3.2 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE LA FUENTE SONORA Y LA LÍNEA DE APARCAMIENTO	84
4.3.3 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE LA FACHADA Y LA LÍNEA DE APARCAMIENTO	91
4.3.4 VARIACIÓN DE LA ALTURA DE LA FUENTE SONORA	102
4.4 CONCLUSIONES	108
CAPÍTULO 5 A: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	111
5.A.1 CONCLUSIONES	113
5.A.2 LÍNEAS FUTURAS	116
CHAPTER 5 B: CONCLUSIONS AND FUTURE LINES.....	117
5.B.1 CONCLUSIONS.....	119
5.B.2 FUTURE LINES	121
BIBLIOGRAFÍA.....	123
ANEXOS	133

RESUMEN

El presente trabajo realiza una contribución al estudio de la influencia de los diferentes elementos y características del entorno urbano en la aplicación de la norma ISO 1996 para la obtención de mapas estratégicos de ruido bajo la aplicación de la Directiva Europea sobre Ruido 2002/49/EC.

La precisión en el conocimiento del nivel sonoro incidente en una fachada es esencial para la adecuada planificación de las acciones de control. Independientemente del método elegido para la elaboración de mapas de ruido, si se desea conocer la población expuesta, es esencial medir el nivel de ruido incidente en la fachada. En este sentido, la norma ISO 1996 es considerada en la Directiva Europea sobre el Ruido como una referencia en la elaboración de mapas estratégicos de ruido. Además, en la Directiva indicada, los mapas de ruido son considerados la principal herramienta para evaluar la exposición de la población a la contaminación acústica. En cuanto a la geometría del punto de medida en lo relativo a la fachada y otros elementos del entorno, la parte normativa de la norma ISO 1996-2 hace referencia únicamente a la distancia entre el micrófono y la fachada. El resto de los aspectos geométricos que podrían influir en el resultado de una medición, bien no son tenidos en cuenta en la norma, o bien son considerados en el Anexo B, que sólo tiene carácter informativo.

Para abordar el problema, este trabajo presenta una revisión detallada de la literatura y propone estrategias de investigación para estudiar las relaciones entre el procedimiento de medición de la norma ISO 1996-2 y la precisión de las estimaciones de las dosis de ruido recibidas por las personas, obtenidas mediante la aplicación de la Directiva Europea sobre el Ruido. Los resultados muestran diferencias relativas significativas con respecto a los valores propuestos por la norma para las correcciones e indican la posibilidad de la influencia de estos resultados en el desarrollo preciso de mapas de ruido estratégicos.

A continuación, se plantea un estudio experimental mediante medidas “in situ” de las correcciones propuestas por la norma ISO 1996-2 en función de la posición del micrófono. A tenor de análisis realizado se deduce que, para la comparación de los resultados de las medidas sonoras en diferentes entornos urbanos y a diferentes distancias de la fachada, resulta adecuado realizar correcciones no sólo de reflexión en

fachada, sino también por distancia a la fuente. En esta misma línea, se plantea la importancia de la presencia de obstáculos en el entorno de medida que puedan afectar a la propagación del campo sonoro y, por ello, tanto a la aplicación de las correcciones propuestas por la norma, como a los mapas de ruido que vienen siendo elaborados mediante cálculos.

La propia norma ISO 1996-2 indica que los obstáculos reflectantes presentes en entornos urbanos pueden ejercer una cierta influencia en la propagación del sonido hasta el receptor sometido a estudio. En este sentido, cuando se realizan mapas de ruido a través de métodos informatizados, no suele tomarse en consideración la presencia de líneas de vehículos estacionados a los lados de las vías urbanas, pero estudios recientes sugieren que su efecto sobre la exposición real al ruido en las fachadas de los edificios no es despreciable. En este trabajo se estudia, mediante el método de elementos de frontera (BEM), el efecto de las líneas de estacionamiento sobre la distribución del nivel sonoro. Se observa un efecto de apantallamiento asociado con la presencia de líneas de aparcamiento. Este efecto varía en función de la altura de medida y de las distancias entre la fuente sonora, los vehículos estacionados y la fachada de los edificios. Los resultados indican que este efecto puede ser significativo, en muchas configuraciones de vías urbanas, para determinar la exposición al ruido de tráfico de las viviendas. Por lo tanto, en el caso de no ser considerado, la precisión de los resultados de los mapas de ruido realizados bajo las directrices de la Directiva Europea sobre Ruido puede verse afectada.

ABSTRACT

This work makes a contribution to the study of the influence of different elements and characteristics of urban environments in the application of the ISO 1996 standard in order to obtain strategic noise maps, following the guidelines of European Noise Directive 2002/49/EC.

Accuracy in the knowledge of the sound field incident on a façade is essential for proper planning of control actions. Independent of the chosen method for noise mapping, if we wish to know the exposed population, it is essential to measure the incident noise level on the façade. In connection to this topic, the ISO 1996 standard is considered in the European Noise Directive as a reference in the elaboration of strategic noise maps. Moreover, noise maps are regarded in the Directive itself as the main tool for assessing the exposure of the population to noise pollution. Regarding the geometry of the measuring point in relation to the façade and other elements of the environment, the normative part of the ISO 1996-2 standard only makes reference to the distance between the microphone and the façade. The remainder of the geometric aspects that could influence the result of a measurement are either not taken into account in the standard or are considered in Annex B, which is only informative.

In order to approach the problem, this work presents a detailed review of the literature and proposes research strategies in order to study the relationships between the ISO 1996-2 standard's measurements procedure and the accuracy of the estimations of noise doses received by people obtained by the application of the European Noise Directive. The results show significant relative differences with respect to the values proposed by the standard for the corrections, and indicate the possibility of the influence of these results on the accurate development of strategic noise maps.

Then, an experimental study is proposed through "in situ" measurements of the corrections proposed by the ISO 1996-2 standard according to the position of the microphone. Based on the analysis carried out, it can be concluded that, in order to compare the results of sound measurements in various urban environments and at different distances from the façade, it is appropriate to make corrections not only for façade reflection, but also for distance to the source. In connection to this issue, the importance of the presence of obstacles in the measurement environment is suggested.

This can affect the propagation of the sound field and, therefore, both the application of the corrections proposed by the ISO 1996-2 standard and the noise maps developed by the calculations.

The ISO 1996-2 standard itself indicates that reflective obstacles present in urban environments may influence the propagation of sound to the receiver under study. In this regard, when noise maps are made through computational methods, the presence of lines of parked vehicles on the sides of urban streets is not usually considered; but recent studies suggest the possibility that its effect on real exposure to noise on building façades is not negligible. In this study, the effect of parking lines in urban street design on sound level distribution is studied with the Boundary Element Method (BEM). A screening effect associated with the presence of parking lines is observed. This effect varies depending on the height of measurement and the distances between the sound source, the parked vehicles and the façade of the buildings. The results show that the effect can be significant in many urban street configurations in order to determine the exposure to traffic noise of dwellings. As a consequence, if it is not considered, the accuracy of the outcomes of the noise maps conducted according to the European Noise Directive can be influenced.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. Micrófono situado cerca de una superficie reflectante (ISO 1996-2, 2007)	28
Fig. 2.2. Relación entre las distancias fachada-micrófono y fachada-fuente sonora (a) y relación entre las distancias micrófono-fuente sonora y fachada-fuente sonora (b) según las zonas de medida reguladas en el anexo B (informativo) de la norma ISO 1996-2.....	30
Fig. 2.3. Variación del nivel sonoro en función de la altura del micrófono	41
Fig. 3.1. Vista superior de los puntos de medida seleccionados	49
Fig. 3.2. Configuración de los micrófonos en los grupos A y B (a) y en el grupo C (b) ..	51
Fig. 3.3. Secuencia temporal registrada en una de las medidas	53
Fig. 4.1. Configuración general de las simulaciones.....	82
Fig. 4.2. Vista lateral a) y frontal b) del entorno urbano donde se realizaron las medidas de verificación del modelo BEM con las tres posiciones de micrófono.	83
Fig. 4.3. Configuración de simulación variando la distancia entre la fuente sonora y el vehículo aparcado.....	85
Fig. 4.4. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono	85
Fig. 4.5. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 1.5 m de altura.....	87
Fig. 4.6. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 4 m de altura.....	88
Fig. 4.7. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 8 m de altura.....	89
Fig. 4.8. Simulación con y sin coche aparcado a una frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a una altura de 0.3 m y a distancias de a) 0.5 m, b) 2 m y c) 16 m del vehículo.	90
Fig. 4.9. Configuración de simulación variando la distancia entre la fachada y el vehículo aparcado.....	91
Fig. 4.10. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono y una d FACHADA-FUENTE de 16 m.	92
Fig. 4.11. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 1.5 m de altura.....	94
Fig. 4.12. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 4 m de altura.....	95

Fig. 4.13. Simulación con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a una altura de 0.3 m y para distancias de a) 1 m, b) 2 m y c) 8 m entre la fachada y la línea de aparcamiento.	96
Fig. 4.14. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono y a una $d_{\text{FACHADA-FUENTE}}$ de 29.7 m. ..	97
Fig. 4.15. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 1.5 m de altura.....	99
Fig. 4.16. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 4 m de altura.....	100
Fig. 4.17. Simulación con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a una altura de 0.3 m y para distancias de a) 1 m, b) 8 m y c) 24 m entre la fachada y la línea de aparcamiento.	101
Fig. 4.18. Configuración para las simulaciones realizadas variando la altura de la fuente sonora.....	102
Fig. 4.19. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono y de la fuente sonora.	103
Fig. 4.20. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 1.5 m de altura.....	104
Fig. 4.21. Simulación con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a 2 m del vehículo y a alturas de a) 0.01 m, b) 0.15 m y c) 0.3 m.	105
Fig. 4.22. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono y de la fuente sonora.	106
Fig. 4.23. Simulación con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a 16 m del vehículo y a alturas de a) 0.01 m, b) 0.15 m y c) 0.3 m.	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Diferencias entre los niveles sonoros medidos en condiciones de campo libre y con el micrófono situado sobre una superficie reflectante en el caso de una fuente extendida.	26
Tabla 2.2. Diferencias entre los niveles sonoros medidos con los micrófonos situados sobre una superficie reflectante y cerca de la fachada en el caso de una fuente extendida.	34
Tabla 3.1. Resumen de las diferentes parejas de medidas realizadas.....	50
Tabla 3.2. Valores promedio, error típico y significación de los valores promedio (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) de las diferencias en banda ancha entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo A.....	55
Tabla 3.3. Valores promedio de las diferencias en bandas de octava entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo A y significación de los valores promedio con respecto al valor nulo (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon).	58
Tabla 3.4. Valores promedio, error típico y significación de los valores promedio (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) de las diferencias en banda ancha entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo B.	59
Tabla 3.5. Valores promedio de las diferencias en bandas de octava entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo B y significación de los valores promedio con respecto al valor nulo (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon).	62
Tabla 3.6. Valores promedio, error típico y significación de los valores promedio (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) de las diferencias en banda ancha entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo C.	64
Tabla 3.7. Valores promedio de las diferencias en bandas de octava entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo C y significación de los valores promedio con respecto al valor nulo (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon).	66
Tabla 4.1. Diferencia entre los niveles sonoros de los micrófonos situados sobre la fachada y en campo libre.	83
Tabla 4.2. Diferencia entre los niveles sonoros de los micrófonos situados a 0.5 m de la fachada y en campo libre.	84
Tabla 4.3. Diferencia entre los niveles sonoros de los micrófonos situados sobre la fachada y a 0.5 m ella.....	84

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El desarrollo económico y social que se ha ido produciendo a escala mundial durante las últimas décadas ha supuesto, entre otras muchas consecuencias, un incremento importante del número de personas que habitan en ciudades (Buhaug et al., 2013; Henderson et al., 2007; Mulligan et al., 2005) y del número y utilización de las infraestructuras de transporte. Como resultado, en los países en vías de desarrollo económico ha tenido lugar un aumento progresivo de los niveles de ruido (Zannin et al., 2011), así como otros problemas ambientales posiblemente relacionados (Can et al., 2011; Fernández-Camacho et al., 2015). En los países desarrollados, la situación puede considerarse estabilizada, como en el caso de Europa, donde las estimaciones indican que más de 125 millones de personas podrían estar expuestas a niveles de ruido de tráfico L_{den} por encima de 55 dB, incluyendo más de 37 millones de personas expuestas a niveles de ruido L_{den} superiores a 65 dB (AEMA, 2014).

Ya en el década de los 90 se realizan estudios que ponen de manifiesto el efecto nocivo de la contaminación acústica sobre la salud de los seres humanos (Passchier-Vermeer and Passchier, 2000). Los efectos más importantes son la molestia (Arana and García, 1998; Fidell et al., 1991; Fields, 1998; Guski, 1999) y los trastornos del sueño (Carter, 1996; Öhrström, 1990, 1991, 1995; Thiessen, 1988). Esta sensación de desagrado tiene una relación con el efecto adverso sobre las emociones humanas, como el enfado, la desilusión (Fields, 1998) e incluso el estrés (Evans et al., 1995, 2001). Las hormonas del estrés tienen la capacidad de aumentar el riesgo incidencia de enfermedades cardiovasculares (Babisch et al., 1990, 1994; Ising et al., 1999). En esa misma época, fueron publicados los primeros estudios que revelan los porcentajes aproximados de la población europea que está expuesta a niveles diurnos y nocturnos por encima de 55 dBA (Berglund et al., 1999; Lambert and Vallet, 1994). En los márgenes de incertidumbre de estos estudios, se indica que alrededor del 40% de la población de la Unión Europea está expuesta al ruido de tráfico con un nivel de presión sonora equivalente superior a 55 dBA durante el día; y el 20% se expone a niveles superiores a 65 dBA. Además, más del 30% de la población se encuentra expuesta durante la noche a un nivel de presión sonora equivalente superior a 55 dBA, el cual perturba el sueño. La aparición de esta gran cantidad de estudios en distintos países permitió llevar a cabo un metaanálisis y se obtuvieron unas curvas de síntesis que se pueden utilizar para la

predicción del porcentaje de sujetos molestos (Miedema and Oudshoorn, 2001; Miedema and Vos, 1998). De acuerdo con estas curvas, las estimaciones indican que aproximadamente el 23%, 18% y 10% de la población se encuentra muy molesta debido a niveles sonoros L_{den} superiores a 65 dBA debido al tráfico aéreo, rodado y ferroviario respectivamente.

Teniendo en cuenta los evidentes efectos adversos de ruido ambiental, la Comisión Europea reconoció el ruido como un problema ambiental, y se empezó a actuar de forma internacional sobre el problema. De este modo, el ruido ambiental pasó a ser considerado como un importante problema en la legislación y la política ambiental (EC, 1996). Entonces, la Comisión Europea adoptó la Directiva 2002/49/CE para evaluación y gestión del ruido ambiental (EC, 2002).

La publicación de la Directiva Europea sobre Ruido, en el año 2002, representó una mejora significativa en la concienciación del público en general y de los legisladores acerca del conocimiento de la situación acústica en las ciudades de los estados miembros (Murphy and King, 2010). Sin embargo, la Directiva Europea sobre Ruido no sólo ha tenido una repercusión en los países europeos (D'Alessandro and Schiavoni, 2015; Licitra and Ascari, 2014; Kephelopoulos et al., 2014; Vogiatzis and Remy, 2014), también ha sido tomada como referencia por diferentes estudios realizados en ciudades de todo el mundo (Chang et al., 2012; Suárez and Barros, 2014; Zuo et al., 2014).

La precisión en el conocimiento de la situación acústica resulta de vital importancia para una adecuada identificación de los lugares afectados y, en consecuencia, para el planteamiento de medidas de control apropiadas para cada situación. Además, este conocimiento de la situación acústica puede ayudarnos a combatir otros importantes problemas ambientales por la relación de los niveles sonoros con otros contaminantes atmosféricos (Allen et al., 2009; Morelli et al., 2015; Vlachokostas et al., 2012). Para la realización de estudios de la situación acústica y de sus efectos sobre los habitantes de las ciudades, y para el planteamiento de posibles soluciones, una importante opción a considerar es la realización de mapas de ruido. Los mapas de ruido, tal y como viene recogido en la Directiva Europea sobre Ruido, son la principal herramienta para la evaluación a la exposición de la población al ruido ambiental. De este modo, la búsqueda para la obtención de mapas de ruido más precisos significa una mejor

evaluación de la población expuesta y, por lo tanto, una mejora en el diseño de planes de acción.

Para la obtención de un mapa de ruido pueden considerarse diferentes métodos o estrategias. Genéricamente, podemos diferenciar entre los métodos informatizados, basados en modelos de propagación del campo sonoro, y los estudios mediante la realización de medidas “in situ” que, en gran medida, se diferencian entre ellos en aspectos metodológicos asociados a la selección de los puntos de muestreo. Sin embargo, incluso cuando se utilice un método informatizado, es necesaria la realización de medidas “in situ” para su calibración o validación (WG-AEN, 2007). En relación con este asunto, la norma internacional ISO 1996 (ISO 1996-1, 2003; ISO 1996-2, 2007) describe aspectos relacionados con el cálculo y el procedimiento de medición del nivel de presión sonora en ambientes exteriores y es tomada por la Directiva Europea sobre Ruido como referencia para la elaboración de mapas de ruido. Aunque este trabajo se centra en el estudio de la aplicación de las correcciones propuestas en la norma ISO 1996, algunas consideraciones similares para las mediciones de ruido de tráfico se incluyen en la norma NT ACOU 039 (NT ACOU 039, 2002). Además, algunas normas (ISO 140-5, 1998; ISO 16283-3, 2016; EN 12354-3, 2000) y artículos científicos toman en consideración las reflexiones en la fachada de los edificios para las medidas de aislamiento acústico (Olafsen et al., 2015; Berardi, 2013; Berardi et al., 2011).

Independientemente del método elegido para la realización de un mapa de ruido, si se desea conocer la población expuesta a ruido, el problema fundamental es evaluar el nivel sonoro que incide sobre la fachada a la altura deseada. Es conocido que el nivel sonoro incidente depende de múltiples factores, tanto temporales como espaciales. Por ello, para que esta evaluación sea adecuada, resultará importante tener en cuenta tanto las características de la fuente como la situación del punto de evaluación con relación a la fuente y al entorno urbano específico de cada calle o fachada a evaluar. De forma que, para cada configuración, se evalúe con la mayor precisión posible la energía sonora que incide sobre la fachada del edificio bajo consideración.

Las directrices de la norma ISO 1996-2 son, a menudo, consideradas para la realización de mapas de ruido mediante medidas o para la calibración y validación de mapas de ruido realizados mediante métodos informatizados. Pero, ¿cuál es el nivel de precisión

que podemos obtener con el uso de las recomendaciones proporcionadas por la norma? ¿La norma debe tener en cuenta la variabilidad que existe en los entornos urbanos? Estos aspectos son esenciales si se quiere obtener mapas de ruido precisos y reducir realmente el impacto de la contaminación acústica en la población mediante planes de acción adecuados. Se debe tener en cuenta que una reciente publicación de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) sitúa la contaminación acústica como el segundo de una serie de factores de estrés ambiental con impacto sobre la salud pública en una selección de países europeos.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general propuesto para el presente trabajo de investigación es realizar una contribución en el estudio de la influencia que los diferentes elementos y características del entorno urbano pueden tener, bajo la aplicación de la norma ISO 1996, en la obtención de mapas estratégicos de ruido considerados en la Directiva Europea sobre Ruido.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar las relaciones entre el procedimiento de medida indicado en la norma ISO 1996-2 y la precisión de las estimaciones de la dosis de ruido recibida por los ciudadanos bajo la aplicación de la Directiva Europea sobre Ruido
- Estudiar la influencia de geometría del punto de medida respecto a los diferentes elementos del entorno urbano y de las características de la fuente sonora a evaluar sobre la aplicación de la norma ISO 1996-2.
- Estudiar, mediante medidas “in situ”, las correcciones necesarias a realizar para que las medidas llevadas a cabo bajo diferentes condiciones de la posición del micrófono puedan ser comparables entre diferentes puntos de medida.
- Estudiar, mediante simulación, la propagación del campo sonoro en entornos urbanos y la posible influencia de obstáculos reflectantes en los resultados de los mapas de estratégicos de ruido.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Los contenidos de este trabajo de investigación se han estructurado en cinco capítulos, tal como se describe a continuación.

En el Capítulo 1 se realiza una introducción sobre los mapas estratégicos de ruido, como herramienta fundamental para determinar la exposición de la población al ruido ambiental, y sobre la importancia de la aplicación de la norma ISO 1996 para obtener resultados precisos que permitan un adecuado diseño de planes de acción.

En el Capítulo 2 se lleva a cabo un detallado análisis, tanto de la norma ISO 1996-2 como del estado de la cuestión, relacionado con la geometría del punto de medida respecto a los diferentes elementos del entorno urbano y a las características de la fuente sonora.

En el Capítulo 3 se realiza un estudio experimental, mediante medidas “in situ”, de las diferencias que pueden existir entre los valores de los niveles sonoros medidos en entornos urbanos con el micrófono situado en diferentes posiciones con respecto a la fachada posterior y al suelo.

En el Capítulo 4 se presenta un estudio, mediante simulación, del fenómeno de apantallamiento asociado a la presencia de líneas de aparcamientos de vehículos en los laterales de las vías urbanas y de su posible influencia en la precisión de los resultados obtenidos para el nivel sonoro incidente en las fachadas de las viviendas, cuando se realizan los mapas estratégicos de ruido mediante simulación software.

Para concluir, en el Capítulo 5, se exponen las conclusiones generales y las líneas futuras. Este capítulo se presenta por duplicado (5A y 5B), en español y en inglés.

CAPÍTULO 2:

ANÁLISIS DE LA NORMA ISO 1996-2

Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo de este trabajo se expone la necesidad de conseguir una mayor precisión en la evaluación del nivel sonoro incidente sobre las fachadas de los edificios para determinar la exposición de la población a la contaminación acústica.

En este sentido, la norma ISO 1996 (ISO 1996-1, 2003; ISO 1996-2, 2007), tomada como una referencia por la Directiva Europea sobre Ruido (EC, 2002) para la elaboración de mapas de ruido, plantea una serie de recomendaciones en el procedimiento de medida y cálculo de los niveles sonoros en el medio exterior. Sin embargo, resulta de interés conocer en qué medida la norma tiene en consideración la variabilidad y la complejidad existente en las configuraciones de los diferentes entornos urbanos a evaluar.

A este respecto, se deben tener en cuenta diferentes aspectos esenciales, puede que interrelacionados, que han de ser considerados en el momento de la elección precisa del punto de medida y en el momento de aplicar posibles correcciones al valor del nivel sonoro medido.

1. La geometría del punto de medida respecto a los diferentes elementos del entorno:
 - a. Respecto a la fachada, tanto en altura como en distancia a ella.
 - b. Respecto a la fuente (distancia, ángulo de visión,...).
 - c. Respecto a los diferentes elementos que componen el entorno urbano (anchura de la calle, altura de los edificios, características del terreno, presencia de superficies reflectantes,...).
 - d. Respecto a la geometría y características de la fachada (ángulo respecto a la fuente, materiales que la componen, irregularidades o presencia de pórticos, balcones,...)
2. Las características de la fuente a evaluar (tipo de fuente, espectro, temporalidad, intensidad, geometría,...).

A continuación, se analiza en qué medida y de qué manera estos aspectos son considerados en la norma ISO 1996-2 y se realiza una revisión de la bibliografía para conocer los estudios relativos a estos aspectos realizados por diferentes autores en

condiciones reales de medida en entornos urbanos y las conclusiones que se han alcanzado.

2.2 LA NORMA ISO 1996-2 Y LA MEDIDA DEL RUIDO AMBIENTAL EN EL ÁMBITO URBANO

En relación con la geometría del punto de medida respecto a la fachada y otros elementos del entorno, en el cuerpo normativo de la norma ISO 1996-2 sólo se hace referencia a la distancia entre el micrófono y la fachada. El resto de los aspectos geométricos anteriormente mencionados, que podrían tener una influencia en el resultado de una medición, no son considerados. Además, no determina de forma explícita la distancia a la que se debe situar el micrófono respecto a la fachada posterior, dejando esta elección a criterio científico-técnico. En este aspecto, la norma propone unas correcciones que se deben realizar en los valores de los niveles sonoros medidos, con el objetivo de tener en cuenta los efectos de la reflexión respecto al campo sonoro incidente en fachada. La norma hace distinción entre tres casos:

- a) Posición con el micrófono montado a ras sobre la superficie reflectante: -6 dB.
- b) Posición con el micrófono situado entre 0.5 y 2 m en frente de la superficie reflectante: -3 dB.
- c) Posición de campo libre (condición de referencia): 0 dB.

Se debe tener en consideración que en esta propuesta de correcciones surgen algunas dudas:

- Existe un valor único, -3 dB, para una amplia zona de distancia a la fachada, entre 0.5 y 2 m.
- Y no queda claro que ha de hacerse si la medida se realiza a más de 2 m, ya que la norma no propone corrección alguna. ¿Estas distancias a la fachada corresponden a un campo libre?

Para entender adecuadamente estos hechos, es necesario consultar el anexo B de la norma. Pero debemos tener presente que este anexo ya no pertenece al cuerpo normativo, sino que se encuentra en la norma a título informativo. En el primer caso, se detallan unas condiciones para las que el valor indicado es esperable e, incluso, se indican situaciones en las que no es adecuado medir en todo este rango de distancias. Y

para el segundo caso, se especifican aquellas condiciones para las que el punto de medida puede considerarse que se encuentran en campo libre, pero este rango de distancias a la fachada bajo evaluación tampoco puede considerarse contemplado en la norma.

En segundo lugar, la propia norma indica que las correcciones propuestas pueden no coincidir con los resultados obtenidos en condiciones reales de medida en un entorno urbano, pudiendo producirse en la práctica desviaciones inferiores o superiores a los valores indicados. De nuevo, si bien la norma hace algunas referencias vagas en su parte normativa a las condiciones para que las correcciones propuestas se verifiquen, es en el anexo B (informativo) en el que se indican con detalle diferentes consideraciones que deberían ser tenidas en cuenta. Pero, como veremos, estas condiciones, en muchos casos, no pueden verificarse en el ámbito urbano real.

Es, en estos dos ámbitos de trabajo, en los que resulta de gran interés realizar una detallada revisión de los trabajos existentes hasta la fecha y plantear estrategias de estudio que puedan permitir ir acotando estas indefiniciones de forma que pueda ir mejorándose la precisión con la que se estimen los valores de las dosis recibidas por los ciudadanos en sus viviendas, en sus lugares de trabajo, en hospitales, residencias de ancianos, centros educativos, etc.

En cuanto a las características de la fuente sonora, la norma ISO 1996-2, en su cuerpo normativo, establece ciertos aspectos a tener en consideración, todos ellos relativos a la representatividad de la medida respecto a las condiciones medias de la fuente en el entorno a evaluar y de las variaciones en las condiciones meteorológicas. Nada se indica respecto a la posibilidad de que las correcciones dependan de las características de la fuente. Como posteriormente veremos, existen trabajos que indican una dependencia en este sentido.

También puede ser de interés tener en cuenta que, hasta el momento, no se ha planteado la posibilidad de una interacción entre los aspectos geométricos y los temporales. Esto es, que algunos elementos geométricos, influyentes en el valor final del nivel sonoro incidente en fachada, puedan tener variaciones significativas a lo largo del tiempo, de forma que también deban ser considerados para que la medida o el cálculo sean representativos de la situación media del entorno bajo evaluación.

Diferentes fuentes de incertidumbre deben ser consideradas en la evaluación de la exposición de la población a la contaminación acústica. La norma ISO 1996-2 estima una incertidumbre mínima de 2 dB para niveles de ruido medidos, que se asocia con factores tales como la instrumentación, las condiciones de funcionamiento (repetibilidad), las condiciones climáticas y del terreno y el sonido residual. En el caso de los mapas de ruido mediante cálculo informatizado, se deben añadir la incertidumbre debida al modelo digital del terreno (Arana et al., 2011), al software utilizado (Arana et al., 2009), etc.

También es preciso señalar que la norma ISO 1996, partes 1 y 2, están actualmente en revisión. El borrador de la norma ISO 1996-2 (ISO 1996-2, 2011) recomienda una metodología para el cálculo de la incertidumbre. Siguiendo las directrices de este borrador de la norma ISO 1996-2, Alves et al. (2014) indican que, en las medidas de campo realizadas, la magnitud de la incertidumbre asociada a las medidas de corta duración del $L_{Aeq,1h}$ es de 4.2 dB para tráfico rodado de vehículos (95% de confianza). En relación con este mismo tema, Mateus et al. (Mateus et al., 2015) estudian la influencia de los parámetros de muestreo en medidas de corta duración sobre la incertidumbre del indicador de ruido ambiental L_{den} de acuerdo con el borrador de la norma ISO 1996-2. Los resultados indican que es posible deducir una ley de dos variables que representa la incertidumbre de los valores determinados como una función de los dos parámetros de muestreo: la duración del episodio de muestreo y el número de episodios.

Este trabajo está centrado en los aspectos geométricos y relacionados con el tráfico como fuente sonora. Los aspectos de temporalidad relacionados con la fuente representan una línea de trabajo independiente a la que planteamos y de gran amplitud. En este sentido, por ejemplo Mehdi et al. (Mehdi et al., 2011) estudiaron los patrones espaciales y temporales de la exposición al ruido debido al tráfico rodado en una ciudad de un país en desarrollo (Pakistán). Van Renterghem et al. (Van Renterghem et al., 2012) investigaron acerca de una metodología de medición para conocer la evolución de los niveles de ruido en la fachada de un edificio durante el día debido al tráfico rodado en una ciudad de un país desarrollado (Bélgica). Posteriormente, los efectos de los eventos ruidosos singulares sobre los indicadores de ruido a largo plazo fueron estudiados por Prieto Gajardo et al. (Prieto Gajardo et al., 2014). Más tarde, Rey Gozalo

et al. (Rey Gozalo et al., 2015) realizaron un trabajo sobre la relación entre el método de categorización y la variabilidad temporal del ruido urbano. En otro estudio de interés, un modelo para la estimación de los niveles anuales de tráfico urbano basado en el análisis de Fourier de ruido fue propuesto por Barrigón Morillas et al. (Barrigón Morillas et al., 2015). Finalmente, como último trabajo de interés a señalar en esta línea, Garg et al. (Garg et al., 2016) describen un proyecto piloto sobre el establecimiento de una Red Nacional de Vigilancia del Ruido Ambiental a través de algunas ciudades en un país en desarrollo (India).

2.3 UBICACIÓN DEL MICRÓFONO RESPECTO A LA FACHADA POSTERIOR

La normativa ISO 1996-2 propone correcciones que se deben realizar en los valores de los niveles sonoros medidos. Estas correcciones vendrán dadas en función de la distancia entre el micrófono y la superficie posterior, como se indicaba en el apartado anterior.

El objetivo de esta propuesta es corregir los efectos del incremento del nivel sonoro a causa de las reflexiones sonoras en dicho paramento. De esta manera, se obtiene el valor real del campo sonoro incidente en la fachada (campo libre), siendo éste el que interesa saber para poder evaluar la exposición sonora de los residentes o usuarios de los edificios.

Estas correcciones han sido analizadas en entornos urbanos, mediante medidas o mediante simulación, por diferentes autores. Resulta de interés indicar que los diferentes trabajos publicados al respecto, en general, se han centrado en estudiar las correcciones, en función de la distancia a la fachada posterior, pero en ellos no se ha realizado un detallado estudio de en qué medida se verifican o no las indicaciones del anexo B (informativo) de la norma ISO 1996-2. En algunos casos, incluso, porque los estudios son anteriores a su primera versión.

2.3.1 MICRÓFONO MONTADO SOBRE LA SUPERFICIE REFLECTANTE RESPECTO A MICRÓFONO EN CAMPO LIBRE

A pesar de que la norma indica la corrección de -6 dB entre un micrófono montado sobre una fachada y uno en campo libre, también indica que se trata de un caso ideal, produciéndose en la práctica desviaciones inferiores a este valor.

Con respecto al montaje del micrófono a ras sobre la superficie reflectante, sólo lo indicado previamente aparece en cuerpo normativo, siendo necesario irse al anexo B (informativo) para encontrar dos opciones básicas de colocación del micrófono:

- a) Sobre una placa colocada en la superficie
- b) Sobre la propia superficie

En el primero de los casos, el tipo de micrófono a utilizar en el caso de ruido de tráfico y en banda ancha, es uno de 13 mm (1/2 pulgada). El micrófono puede colocarse en paralelo a la placa o con la membrana del propio micrófono a ras de la placa. Para su montaje se deben respetar una serie de condiciones relativas a las características de la placa y a su configuración. Respecto a la fachada, debe cumplirse que sea lisa dentro de una distancia de 1 m desde el micrófono, con una tolerancia de ± 0.05 m y que la distancia desde el micrófono a los bordes de la superficie de la pared debe ser superior a 1 m.

En el segundo de los casos, la norma ISO 1996-2 establece que la superficie tiene que estar hecha de hormigón, piedra, vidrio, madera o materiales duros similares. En este caso, la superficie reflectante debe ser lisa dentro de un radio de 1 m desde el micrófono, con una tolerancia de ± 0.01 m. Además, la norma indica que, en este caso, para medidas en bandas de octava, se debe usar un micrófono de un diámetro de 13 mm o más pequeño. Si el rango de frecuencia se extiende por encima de 4 kHz, se debe usar un micrófono de 6 mm.

Por otra parte, para esta configuración de medida, la norma ISO 1996-2 no establece, ni en el cuerpo normativo ni en su anexo B (informativo), ninguna condición de distancia entre el micrófono y la fuente sonora, como sí hace para otras posiciones del equipo de medida respecto a la fachada posterior.

Estas correcciones fueron analizadas por Memoli et al. (Memoli et al., 2008) y Mateus et al. (Mateus et al., 2015b) en entornos urbanos. En el trabajo realizado por Memoli et al. se llevaron a cabo medidas “in situ” de 15 minutos de duración en vías con diferente geometría: 5 calles con perfil de tipo “U” y 2 calles con perfil de tipo “L”. La fuente sonora principal era el tráfico rodado y se utilizaron 4 micrófonos, a 4 m de altura, midiendo simultáneamente a diferentes distancias de la fachada. El rango de distancias entre fuente y fachada utilizado iba desde 6.6 m a 34 m. En este trabajo se obtiene una diferencia entre el nivel sonoro medido con uno de los micrófonos colocado sobre la superficie reflectante en una placa y el otro en campo libre, de 5.7 ± 0.8 dB (95% confianza). Aunque la diferencia obtenida es, globalmente, congruente con la corrección propuesta por la norma ISO 1996-2, se puede observar, dentro del rango indicado por los autores, diferencias superiores a 1 dB entre lo indicado en la norma y los valores medidos.

En este mismo sentido, Mateus et al. realizaron medidas simultáneas durante 47 meses con tres micrófonos: uno de ellos situados en campo libre (a 3.5 m por encima de la cornisa del edificio), otro a ras de la fachada, usando una placa metálica, y el último sobre el cristal de una ventana de la misma fachada. La distancia entre el equipo en campo libre y la línea horizontal que une los otros dos equipos sobre la fachada era de 6.3 m. En este caso, se seleccionó una vía urbana con un perfil en forma en “L” y cuya fuente sonora principal era el tráfico rodado. La distancia entre la fuente sonora y el sonómetro era de 150 m. Por lo tanto, en este trabajo se analizaron los resultados de dos de las opciones de colocar el micrófono a ras de la fachada que indica la ISO 1996-2. Los resultados obtenidos muestran que, cuando el micrófono está montado directamente sobre la ventana de la fachada, la diferencia de niveles varía entre 4.0 y 4.4 dB en función de la velocidad del viento. Mientras que en el caso en el que se utiliza una placa de material reflectante, la diferencia es de 4.9 dB. Según estos resultados, se afirma que la aplicación de la corrección de -6 dB propuesta por norma podría introducir, en algunos casos, errores significativos.

Por tanto, los estudios que analizan las diferencias entre los niveles sonoros medidos en condiciones de campo libre y con el micrófono situado sobre una superficie reflectante muestran una disparidad de valores que, dependiendo del caso, pueden alcanzar diferencias de hasta 2 dB respecto a la corrección de -6 dB establecida por la norma ISO

1996-2, como se indica en la Tabla 2.1 (ver Fig. 2.1). Estos resultados pueden tener un impacto importante sobre los resultados obtenidos hasta la fecha bajo la aplicación de la Directiva Europea sobre Ruido. Como esta configuración se utiliza habitualmente para situar los receptores en los mapas estratégicos de ruido realizados mediante simulación, es importante saber qué factores geométricos están causando estos resultados y si estos resultados experimentales se están considerando o no en la aplicación de los modelos de propagación. En consecuencia, es esencial aumentar el número de estudios en esta línea de trabajo teniendo en cuenta la realidad urbana de las ciudades europeas.

Referencia	Micrófono	RO (m)	d' (m)	a' (m)	h (m)	Corrección (dB)
Memoli et al. (2008)	Fachada	6.6 – 34	0	6.6 – 34	4.0	5.7 ± 0.8
	Campo libre		-			
Mateus et al. (2015b)	Fachada	150	0	150	15.2	4.9
	Campo libre		-			
Mateus et al. (2015b)	Vidrio	150	0	150	15.2	4.0 – 4.4
	Campo libre		-			

Tabla 2.1. Diferencias entre los niveles sonoros medidos en condiciones de campo libre y con el micrófono situado sobre una superficie reflectante en el caso de una fuente extendida.

2.3.2 POSICIÓN DEL MICRÓFONO FRENTE A LA SUPERFICIE REFLECTANTE

En su cuerpo normativo, la norma ISO 1996-2 no indica la corrección que habría que aplicar si el micrófono se situase en el rango de distancias que va desde el ras de la superficie de la fachada hasta 0.5 m, pudiendo considerarse que es un rango de distancias de medida excluido de la norma. Sin embargo, algunos investigadores han estudiado este rango de distancias. Por ejemplo, Memoli et al. (Memoli et al., 2008) llevó a cabo un estudio en el cual analizaba las diferencias de niveles sonoros obtenidas entre un micrófono situado sobre la fachada y otro situado a distancias muy pequeñas de la misma. Para ello, utilizó como fuente sonora un altavoz con una señal MLS. Los resultados muestran que las correcciones cerca de la placa metálica, a distancias entre 0.01 y 0.02 m de ella, cambian muy rápido con la distancia, obteniéndose variaciones de hasta aproximadamente 0.6 dB. De forma análoga, se realizó un estudio en el cual el rango de distancias a la fachada era de 0.25 a 0.5 m y en el que se consideraron dos

distancias entre la fuente sonora y la fachada: 10.1 y 13.1 m. Cuando la fuente sonora estaba situada a una distancia de 10.1 m, las diferencias del nivel sonoro entre los dos micrófonos fueron aproximadamente 1.0 dB a 0.25 m y 0.4 dB a 0.5 m, mientras que, para una distancia de 13.1 m, los resultados fueron de aproximadamente 1.9 dB a 0.25 m y 1.3 dB a 0.5 m.

En otro trabajo realizado por Hopkins et al. (Hopkins et al., 2009), se analiza el rango de distancias de 0.1 m a 0.5 m entre la superficie reflectante y la fachada. En él se muestra una comparativa de la variación del nivel de presión sonora predicho por el método de la ecuación integral (IEM) y el nivel medido en un modelo a escala 1:5 en una cámara semianecoica, con una fuente puntual, para diferentes tamaños de reflectores. Se observa que las diferencias entre los reflectores finitos y semiinfinitos son más notables en frecuencias inferiores a 300 Hz.

En este aspecto la norma ISO 1996-2 señala que: “La diferencia entre el nivel de presión sonora en un micrófono situado a 2 m delante de la fachada y un micrófono en campo libre, se aproxima a los 3 dB, en un caso ideal donde ningún obstáculo reflectante vertical influye en la propagación del sonido hasta el receptor sometido a estudio. En situaciones complejas, por ejemplo, sitios con una alta densidad de edificios, calles, etc., esta diferencia puede ser mucho mayor.” Por lo tanto, la propia norma indica la dificultad de conocer con precisión el valor de la diferencia entre el campo incidente en fachada y el realmente medido bajo estas condiciones. En consecuencia, indirectamente, está indicando la necesidad del desarrollo de investigaciones en esta línea. Debe tenerse en cuenta la importancia de esta configuración de medición, ya que es bastante utilizada en la evaluación de la exposición al ruido en las zonas urbanas y, también, como una referencia para validar los mapas de ruido en los sitios seleccionados.

El anexo B (informativo) de la norma ISO 1996-2 da una serie de indicaciones con respecto a las distancias entre micrófono, superficie reflectante y fuente sonora para los cuales sería de aplicación la corrección de - 3 dB:

- La fachada debe ser plana con una tolerancia de ± 0.3 m.
- Con el fin de evitar el fin de evitar los efectos de borde, se establecen unas distancias mínimas entre la imagen del micrófono en la superficie reflectante (punto

O) y los bordes más cercanos de la superficie reflectante: b (distancia horizontal) y c (distancia vertical) (ver Fig. 2.1). Estas distancias deben cumplir unas condiciones:

$$b \geq 4d \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$c \geq 2d \quad \text{Ec. 2.2}$$

Siendo d la distancia perpendicular desde el micrófono a la fachada.

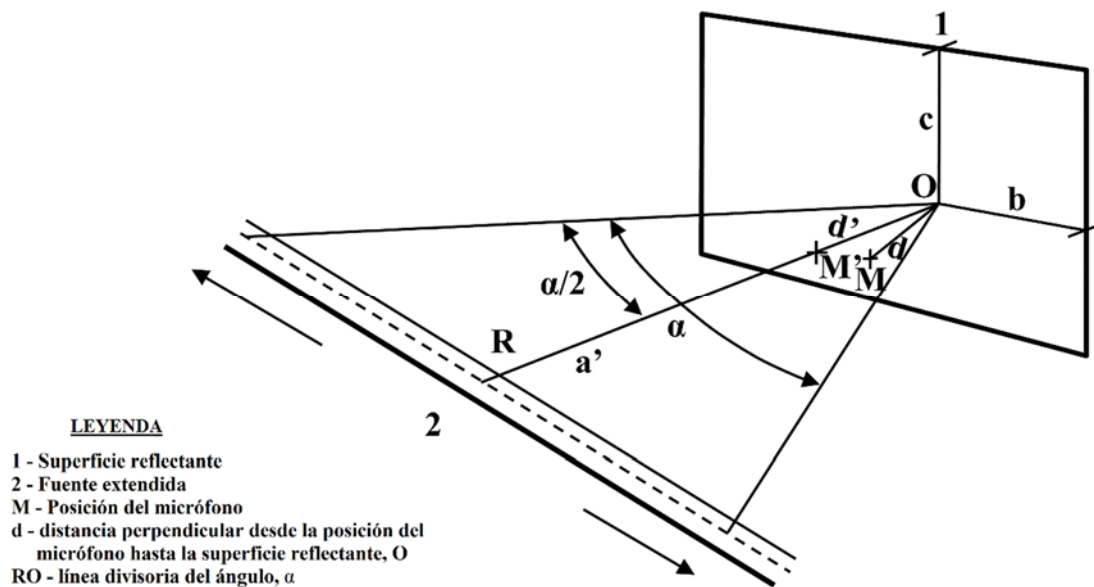


Fig. 2.1. Micrófono situado cerca de una superficie reflectante (ISO 1996-2, 2007)

- Para garantizar que los sonidos incidentes y reflejados sean de la misma magnitud, en el caso de la fuente extendida (tráfico rodado), se debe cumplir el criterio de la Ec. 2.3. Esta ecuación relaciona las distancias a' y d' , tomadas a lo largo de la línea divisoria del ángulo de visión α , como se muestra en la Fig. 2.1. Considerando que M' es el punto sobre la línea divisoria del ángulo α a una distancia d de la fachada, se puede definir d' como la distancia entre M' y la fachada y a' como la distancia entre M' y la fuente sonora.

$$d' \leq 0.1a' \quad \text{Ec. 2.3}$$

- Para garantizar que el micrófono está colocado a una distancia suficiente de la zona de corrección de -6 dB próxima a la fachada, en el caso de la fuente extendida

(tráfico rodado), se debe tener en consideración la Ec. 2.4 cuando se realiza un análisis en banda ancha y la Ec. 2.5 en bandas de octava.

$$d' \geq 0.5 \text{ m} \quad \text{Ec. 2.4}$$

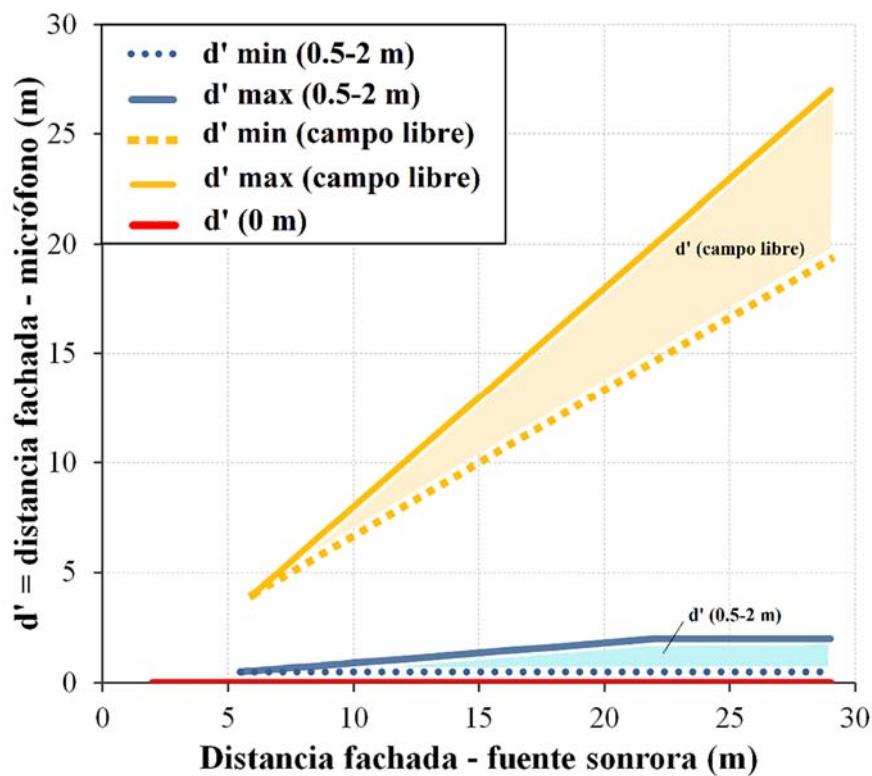
$$d' \geq 1.6 \text{ m} \quad \text{Ec. 2.5}$$

- Para garantizar que el micrófono se encuentra en campo libre, se debe tener en consideración la Ec. 2.6:

$$d' \geq 2a' \quad \text{Ec. 2.6}$$

Teniendo en cuenta estas consideraciones incluidas en la parte informativa de la norma, la distancia entre la fachada y la fuente sonora limita las posibilidades de situar el micrófono respecto a la fachada bajo evaluación. En la Fig. 2.2 se representan las diferentes opciones de colocación del micrófono para las distancias fachada-micrófono y micrófono-fuente sonora en función de la distancia total entre la fachada y la fuente sonora. Para elaborar estas figuras, se ha considerado una distancia mínima de 2 m entre el micrófono y la fuente sonora (siendo el punto de referencia de la fuente sonora la rueda más cercana del vehículo (Jonasson, 2006)).

a)



b)

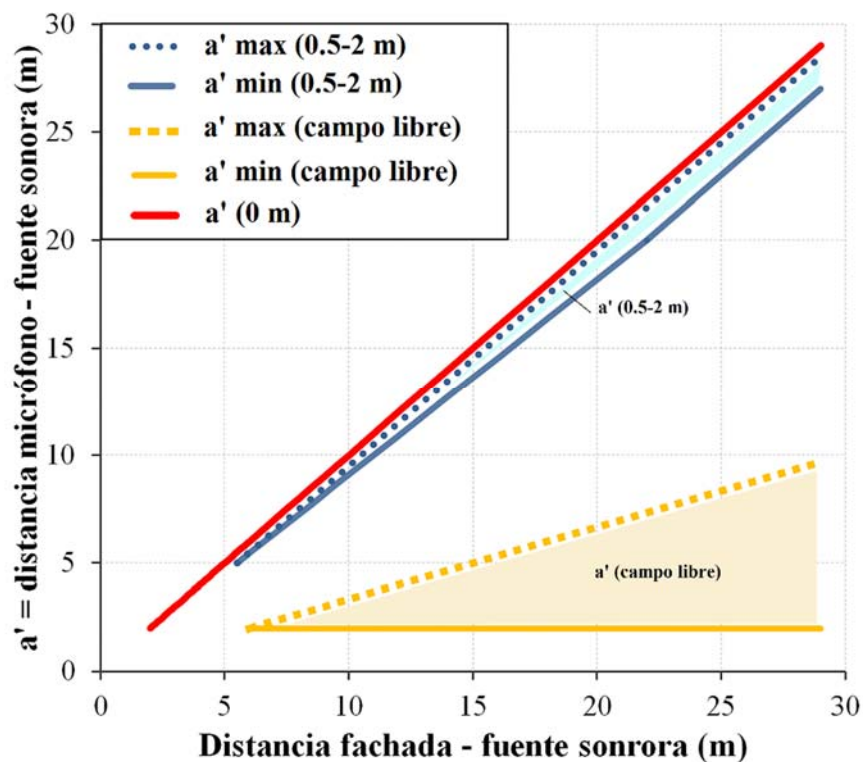


Fig. 2.2. Relación entre las distancias fachada-micrófono y fachada-fuente sonora (a) y relación entre las distancias micrófono-fuente sonora y fachada-fuente sonora (b) según las zonas de medida reguladas en el anexo B (informativo) de la norma ISO 1996-2.

En la Fig. 2.2:

- La línea continua sobre el eje X en la Fig. 2.2a representa la posición de medida a ras de fachada, $d' = 0$ m. Mientras que esta posición de medida viene representada por una línea continua de pendiente unidad en la Fig. 2.2b.
- La zona sombreada inferior de la Fig. 2.2a representa las opciones de medida de 0.5 a 2 m, que se corresponde con la zona sombreada superior de la Fig. 2.2b.
- La zona sombreada superior de la Fig. 2.2a representa la medida en condiciones de campo libre, representada por la zona sombreada inferior de la Fig. 2.2b.

Teniendo en cuenta las ecuaciones 3, 4 y 6, cuyas implicaciones vienen representadas en la Fig. 2.2, se deduce que:

- La medida a distancias inferiores a 0.5 m de la fachada queda excluida explícitamente.
- Para distancias desde la fachada a la fuente sonora inferiores a 5.5 m, sólo la opción de medida a ras de fachada garantizaría que la corrección indicada por la norma, en este caso de -6 dB, se verificara.
- Para distancias entre 5.5 m y 22 m entre la fachada y la línea de tráfico rodado, además de la opción a ras de fachada, se va ampliando el rango efectivo de situar el micrófono de medida en la zona de 0.5 a 2 m de distancia a la fachada. Sin embargo, sólo a partir de una distancia de 22 m desde la fachada a la fuente sonora, una medida realizada con un micrófono situado a 2 m de la fachada garantizaría la corrección de -3 dB indicada por la norma. Sólo para distancias superiores a 22 m entre la fachada y la fuente sonora bajo evaluación, cualquier opción contemplada por la norma podría emplearse para situar el micrófono y permitiría emplear con garantía las correcciones indicadas por la norma. Obsérvese como, para este rango de distancias entre fachada y micrófono de 0.5 a 2 m, en el trabajo de Memoli et al. (Memoli et al., 2008) antes comentado se encuentra una dependencia de la corrección por reflexión en fachada con la distancia entre fuente y fachada.
- Para encontrar una zona de medida que verificase la condición de campo libre sería necesario que la fuente sonora se encontrase, al menos, a 6 m de la fachada u otra superficie reflectante influyente situada detrás de nuestro micrófono. Debe aclararse que esta zona de medida, en el planteamiento de la norma, no es válida para evaluar el campo sonoro que incide sobre la fachada posterior, sino sobre una fachada

cercana al punto de medida y a igual distancia de la fuente sonora. Naturalmente, para distancias superiores a 2 m entre el micrófono y la fachada posterior bajo evaluación y en campo libre, el valor de campo sonoro medido no se corresponde con el valor del incidente en fachada, pues aún habría una atenuación por divergencia geométrica en la propagación desde el punto de medida a la superficie de la fachada.

Al igual que la corrección anterior, esta corrección de -3dB ha sido analizada por diferentes autores en entornos urbanos. Tomando como fuente sonora el tráfico rodado de vehículos que circulaban por autopistas y arterias principales de Toronto, Hall et al. (Hall et al., 1984) llevaron a cabo un estudio de las diferencias entre los niveles de presión sonora medidos en el exterior de 33 viviendas. Para ello se realizó una comparación de las medidas realizadas a 2 m de las fachadas y en sus superficies, en este último caso ubicando directamente el micrófono sobre las ventanas. Los resultados obtenidos indican que, en promedio, es apropiada una corrección de 3 dB entre los dos puntos de medida, excepto a bajas frecuencias. Para frecuencias inferiores a 200 Hz se obtienen en este trabajo valores que fluctúan de forma considerable por encima y por debajo de los 3 dB indicados, llegando a alcanzarse valores de 1.7 y 7.3 dB en las bandas de tercios de octavas de 40 Hz y 50 Hz, respectivamente.

Más tarde, Quirt (Quirt JD, 1985) llevó a cabo un estudio para investigar el comportamiento del campo sonoro cerca de las superficies exteriores de los edificios. Para ello, utilizó un modelo matemático de predicción de niveles sonoros. En la verificación se realizaron una serie de medidas acústicas en una cámara semianecoica y medidas “in situ”, tanto con fuente sonora controlada, como con ruido de tráfico rodado de vehículos. En este estudio se indica que la asunción de que la energía se duplica (+3 dB) a 2 m de la superficie del edificio es una aproximación razonable para una fuente extendida como es el tráfico rodado de vehículos y para bandas de tercio de octava por encima de 100 Hz. Este resultado es congruente con lo indicado por la norma ISO 1996-2 en su anexo B (informativo) en lo relativo a la aparición de efectos de coherencia a baja frecuencia y la indicación de una distancia mínima de medida de 1.6 m para las medidas en banda de octava (Ec. 2.5).

Ambos trabajos, tanto el de Hall et al. (Hall et al., 1984) como el de Quirt (Quirt JD, 1985), fueron realizados previamente a la elaboración de la norma ISO 1996-2 (ISO

1996-2, 1987) pero coindicen en que, en promedio, es adecuada una corrección de 3 dB en la franja entre 0.5 y 2 m frente a la superficie reflectante.

Posteriormente a la elaboración de la última versión de la norma ISO 1996-2 (ISO 1996-2, 2007), Memoli et al. (Memoli et al., 2008) realizan investigaciones acerca de las correcciones acústicas por las reflexiones procedentes de la fachada posterior. En cada uno de los lugares de medida, la distancia del micrófono a la fachada (d) se varió, estableciendo al menos tres valores: 0.5, 1 y 2 m. El objetivo era comparar el promedio de los valores obtenidos en el intervalo de 0.5 a 2 m de la fachada con el establecido por la norma ISO 1996-2. Con respecto a la distancia entre la fuente sonora y la fachada (parámetro D), se tomaron valores en el rango de 6.6 a 34 m. Sin embargo, no se indica de forma explícita los valores de la distancia entre el micrófono y fuente sonora ($D-d$) para cada punto de medida. Los resultados que se muestran en el estudio son los obtenidos para el total de las vías estudiadas, sin realizar un desglose que permita distinguir los valores parciales para las vías con tipología en U y en L, así como tampoco para los diferentes valores de la distancia entre la fuente sonora y el micrófono. En este estudio se obtienen las diferencias entre el micrófono ubicado entre 0.5-2 m y el de campo libre de 3.0 ± 0.8 dB (95% confianza) y de 2.7 ± 0.6 dB (95% confianza), entre el micrófono ubicado entre 0.5-2 m y el receptor a ras de la superficie reflectante. Los resultados muestran, en promedio, una coincidencia con los valores propuestos por la norma ISO 1996-2. Pero puede observarse que existe una variabilidad en los valores experimentales para las condiciones de medida empleadas en este trabajo que implican desviaciones respecto al valor propuesto de hasta aproximadamente 1 dB. De hecho, en este mismo trabajo, mediante el uso de una fuente puntual MLS, se observa que, hasta distancias mayores de 1 m, no hay diferencias de 3 dB entre el micrófono montado a ras de fachada y el micrófono situado a cierta distancia de la misma.

Hopkins et al. (Hopkins et al., 2009) también estudiaron los efectos de difracción en el campo sonoro delante de reflectores de tamaño finito en el intervalo entre 1 y 2 m para la distancia existente entre el micrófono y la superficie reflectante. Se observaron importantes fluctuaciones del campo sonoro en función de las diferentes geometrías fuente-reflector-receptor. Los efectos son significativos hasta 100 Hz si reflector es mayor que 4 x 4 m, pero incluso hasta 630 Hz para reflectores de 2 x 2 m.

En otro estudio, Jagniatinskis et al. (Jagniatinskis et al., 2014) llevaron a cabo medidas sonoras de una duración de un año. En este estudio, se utilizó como fuente sonora el tráfico rodado de vehículos. Fue seleccionada una ubicación con un elevado flujo de vehículos y con una distancia entre el micrófono y la fuente sonora de 250 metros. Se utilizaron dos micrófonos midiendo de forma simultánea conectados a una misma estación de medida, el primero de ellos situado a 2 m de la fachada y el otro pegado a la ventana de la fachada mediante una placa. La primera de las conclusiones que se obtienen de este trabajo es que la diferencia, en términos globales, entre los valores anuales del nivel sonoro día-tarde-noche (L_{den}) registrados por ambos micrófonos es de aproximadamente -3 dB. En este sentido, el resultado coincide con la corrección propuesta por la norma ISO 1996-2 para el caso del micrófono situado entre 0.5 y 2 m frente a superficie reflectante. Otra conclusión de este trabajo es que la diferencia media de los niveles sonoros medidos en ambos sonómetros en el horario nocturno es hasta 2 dB inferior que en el diurno. Este hecho podría estar relacionado con el flujo de vehículos en ambos horarios y, por tanto, con las características de la fuente a estudiar.

Las diferencias entre los niveles sonoros medidos con los micrófonos situados sobre una superficie reflectante y cerca de la propia fachada en el caso de una fuente extendida son resumidas en la Tabla 2.2.

Referencia	Micrófono	RO (m)	d' (m)	a' (m)	h (m)	Corrección (dB)
Hall et al. (1984)	Cerca de fachada	Sin datos	2	Sin datos	Sin datos	3.2 ± 0.2
	Fachada		0	Sin datos		
Memoli et al. (2008)	Cerca de fachada	6.6 – 34	0.5, 1.0, 2.0	4.6 – 33,5	4.0	3.0 ± 0.8
	Campo libre		-	6.6 – 34		
Memoli et al. (2008)	Cerca de fachada	6.6 – 34	0.5, 1.0, 2.0	4.6 – 33,5	4.0	2.7 ± 0.6
	Fachada		0	6.6 – 34		
Jagniatinskis et al. (2014)	Vidrio	250	0	250	Sin datos	≈ 3
	Cerca de fachada		2	248		
	Fachada		0	8.2 – 28.4		

Tabla 2.2. Diferencias entre los niveles sonoros medidos con los micrófonos situados sobre una superficie reflectante y cerca de la fachada en el caso de una fuente extendida.

Otra de las situaciones de indefinición que se plantea en la aplicación de las correcciones propuestas por la norma ISO 1996-2 es la existencia un valor único de corrección para una zona muy amplia comprendida entre las distancias de 0.5 y 2 metros. Quizás, este sea el motivo por el cual, la mayoría de los trabajos mencionados anteriormente, comparan únicamente los valores promedios obtenidos en este rango de distancias. A pesar de que, por ejemplo, en el estudio de Memoli et al. (Memoli et al., 2008), la corrección promedio de las posiciones de 0.5, 1 y 2 m presenta una variación de hasta un 22% aproximadamente.

Esta variación que podría estar motivada por circunstancias muy diversas y que parecen asociadas a una compleja configuración del urbanismo de las ciudades. Esto puede ser debido a que el entorno urbano implica la existencia de distancias entre la fuente sonora y la fachada que, para ciertas configuraciones de medida, no permiten dar cumplimiento a las recomendaciones de la norma ISO 1996-2, o el campo sonoro puede estar influenciado en su propagación por configuraciones urbanas (tamaño y forma de las fachadas) o de elementos urbanos (líneas de vehículos aparcados) que, en algunos casos, pueden ser variables en el tiempo. Ambos aspectos pueden llegar a tener repercusiones sobre la validez de los mapas elaborados hasta el momento bajo la Directiva Europea.

Por tanto, se concluye que es necesario ampliar el número de estudios en los que se compruebe la corrección a realizar en el caso de que se mida a una distancia de la fachada entre 0.5 y 2 m, en función de la gran variedad de configuraciones urbanas y distancias a la fuente sonora que podemos encontrarnos.

En último lugar, otra de la situaciones que puede resultar de interés es qué ha de hacerse si la medida se realiza a más de 2 m de la fachada posterior pero aún sin cumplirse la condición de campo libre (Ec. 2.6). Esta zona, no está contemplada en la norma ISO 1996 y no ha sido previamente analizada con detalle, pero puede ser de mucho interés para la medida de niveles sonoros en el ámbito urbano. Dado que no cumple la condición de campo libre, aún se encuentra influenciada por la fachada posterior de forma que, tal vez, aún nos permita evaluar mediante medidas el campo sonoro libre incidente sobre ella. Siendo, por tanto, de interés la realización de estudios en esta nueva línea de trabajo.

2.4 UBICACIÓN DEL MICRÓFONO RESPECTO A LA FUENTE SONORA.

El anexo B (informativo) de la norma ISO 1996-2, como ya se ha mencionado anteriormente, tanto para el caso del micrófono situado en campo libre (Ec. 2.6), como cuando se coloca a una distancia entre 0.5 m y 2 m de una superficie reflectante (Ec. 2.3), establece relaciones entre las distancias micrófono-fuente sonora y micrófono-superficie reflectante (ver Fig. 2.2). En este sentido, la norma no prevé ningún tipo de dependencia de las correcciones propuestas en función de la distancia entre el micrófono y la fuente sonora, probablemente porque considera efectivo el cumplimiento de esas condiciones. Sin embargo, dada la gran variabilidad en la geometría de las calles, en las condiciones reales del ámbito urbano, en muchos casos, no es posible verificar la condición dada por la Ec. 2.3. Por este motivo, resulta de interés analizar el efecto que posee la distancia entre fachada y fuente sonora sobre las correcciones a aplicar. Esto proporcionaría controles de los modelos de cálculo que se realizan a través de medidas en este rango de distancias.

En relación con este aspecto, Memoli et al. (Memoli et al., 2008), utilizando como fuente sonora un altavoz con una señal MLS, realiza comprobaciones de la diferencia de 3 dB con respecto a un micrófono situado en fachada. Se deduce un aspecto muy importante en este sentido, la dependencia de estas diferencias con la distancia entre la fuente sonora y el punto de medida. Cuando la fuente sonora se coloca a una distancia de 13.1 m, se obtienen diferencias de 3 dB. Sin embargo, si la fuente se situaba a una distancia 10.1 m, la diferencia promedio no superaba los 2.5 dB.

Picaud et al. (Picaud et al., 2005) analizaron en un estudio experimental la propagación del sonido en áreas urbanas. Para ello utiliza una fuente sonora impulsiva y un array de micrófonos situados a alturas comprendidas entre 1.2 y 6.0 m en una calle con perfil en U, cuyos edificios tienen una altura aproximada de 18 m. Los valores obtenidos durante los ensayos indican que se produce una disminución del nivel sonoro a medida que aumenta la distancia entre la fuente y el array, alcanzando aproximadamente los 11 dB en la banda de 1 kHz entre las posiciones del micrófono situadas a 6 m y 50 m de la fuente.

Posteriormente, Lee et al. (Lee et al., 2015) realizaron un trabajo de simulación con el fin de estudiar el comportamiento del campo sonoro en calles urbanas. En concreto,

utilizó una técnica de cálculo basada en un método que combina el trazado de rayos y el modelado mediante fuente imagen. Los resultados obtenidos muestran, para el caso de una fuente puntual, una atenuación del nivel de presión sonora a medida que aumenta la distancia entre fuente y receptor, siendo ésta más significativa en campo cercano, especialmente en el caso de calles estrechas. Sin embargo, en el caso de la fuente lineal, a modo de representación del ruido de tráfico rodado, se obtienen valores del nivel de presión sonora relativamente constantes a medida que aumenta la distancia entre la fuente y el receptor, tanto en calles estrechas como en calles anchas.

Por tanto, no se ha realizado ningún estudio detallado del efecto sobre la corrección a realizar que tiene la distancia entre fuente y fachada, ni bajo el cumplimiento de las condiciones dadas en el anexo B, ni fuera de ellas. Pero, según los resultados publicados hasta el momento, parece detectarse la existencia de un efecto de la distancia sobre estas correcciones. Dadas las configuraciones urbanísticas normales que existen en Europa, este hecho podría tener repercusiones importantes sobre la evaluación del impacto del ruido sobre la población bajo la aplicación de la Directiva Europea sobre Ruido si tenemos en cuenta el proceso de ajuste de los resultados simulados a los medidos.

2.5 ALTURA DEL MICRÓFONO DE MEDIDA

La norma ISO 1996-2 establece que, para realizar un mapa de ruido, se debe utilizar una altura del micrófono de:

- a) 4.0 ± 0.5 m en áreas residenciales con edificios de varios pisos
- b) 1.2 ± 0.1 m o 1.5 ± 0.1 m en áreas residenciales con edificios de un piso de altura y en zonas recreativas

En relación con este aspecto, la Directiva Europea sobre Ruido establece que, cuando los cálculos se realizan para la elaboración de mapas estratégicos de ruido en relación con la exposición al ruido, los puntos de evaluación se deben colocar a una altura de $4.0 \text{ m} \pm 0.2$ m sobre el suelo. De forma similar, indica que, cuando se realizan medidas para mapas de ruido, otras alturas pueden ser utilizadas, pero no deben ser inferiores a 1.5 m sobre el suelo, y los resultados deben ser corregidos de acuerdo con una altura equivalente a 4 m. Sin embargo, ningún método de corrección es propuesto en este sentido.

Por su parte, la norma ANSI S12.18 (1994) propone una altura del micrófono entre 1.2 m y 1.8 m sobre el suelo para realizar medidas acústicas en ambientes exteriores, mientras que la norma ANSI S12.9-3 (1993) establece una altura entre 1 y 2 m. De forma análoga, el informe FHWA-PD-96-046 (FHWA-PD-96-046, 1996) del U.S. Department of Transportation propone una altura del micrófono de 1.5 m como posición preferente, estableciendo otras posibles opciones a 4.5 m y 7.5 m para zonas de edificios de varios pisos.

Las condiciones reales de medida en un entorno urbano no siempre permiten colocar el equipo de medida a la altura de 4 m indicada por la norma ISO 1996-2. Por lo tanto, dado que ni la Directiva Europea sobre Ruido ni la ISO 1996-2 hacen mención alguna al empleo de posibles correcciones si las medidas se realizasen a alturas diferentes, se considera un campo de trabajo y análisis de gran interés.

En este mismo sentido, la “Guide du Bruit des Transports Terrestres: Prevision des Niveaux Sonores” (CETUR, 1980) establece, para las calles con perfil en U, las siguientes correcciones (K_h):

$$k_h = -\frac{2(h-4)}{l} \text{ if } h > 4 \text{ m} \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$k_h = 0 \text{ if } h \leq 4 \text{ m} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde “ l ” es la distancia entre las fachadas a de ambos lados de la calle y “ h ” es la altura sobre el suelo a la que está situado el micrófono de medida.

Las correcciones propuestas por la “Guide du Bruit des Transports Terrestres: Prevision des Niveaux Sonores”, que prevé una disminución del nivel sonoro a medida que la altura del micrófono aumenta por encima de los 4 m, entre otras, han sido tomadas como referencia en diferentes estudios (Rey Gozalo et al., 2013; 2014) para normalizar las medidas acústicas de larga duración realizadas en balcones de viviendas situados a alturas superiores a 4 m de altura. Sin embargo, esta guía propone que no se debe realizar corrección alguna para los micrófonos situados entre 1.5 y 4 m.

En esta línea de trabajo, Nicol y Wilson (Nicol and Wilson, 2004) realizaron un estudio mediante mediciones acústicas de la variación vertical del nivel de ruido en calles urbanas con perfil en U. Para ello, tomando como fuente sonora de referencia el tráfico

rodado de vehículos, 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 minutos con tres micrófonos situados a una distancia de 1 m de la fachada posterior. Uno de los micrófonos se situó a nivel de calle y los otros, en dos plantas del edificio. 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 el valor sonoro registrado por el micrófono situado a nivel de calle y aquellos registrados por micrófonos situados en distintas plantas del edificio situados a unas alturas de 8, 11.5, 15, 18.5 y 22 m. Los resultados muestran una disminución de 2.3 dB, 3.1 dB, 3.5 dB, 2.1 y 7.8 dB respectivamente con la altura. De este modo, la tendencia está en línea con lo que se indica en la “Guide du Bruit des Transports Terrestrial: Prevision des Niveaux Sonores” (CETUR, 1980) en relación con la disminución del nivel sonoro a medida que la altura del micrófono se incrementa por encima de los 4 m, aunque las reducciones obtenidas en este artículo son mayores que las propuestas en la citada norma. Los valores medidos por los autores de esta publicación para dos de las calles estudiadas en este trabajo se muestran en la Fig. 2.3.

Poco después de la publicación del trabajo de Nicol y Wilson, Soler et al. (Soler et al., 2005) centraron su análisis en las diferencias de micrófonos situados entre 1.5 y 4 m de altura. Evaluaron los niveles sonoros en diferentes circunstancias: pendiente de la vía, distancia de la fachada posterior y flujo de tráfico. Los resultados muestran que, en promedio, el micrófono a 1.5 m registró 0.2 dB más que el micrófono a 4 m (ver Fig. 2.3). Por lo tanto, las diferencias entre ambas posiciones de micrófono son muy pequeñas de acuerdo con lo establecido en la “Guide du Bruit des Transports Terrestrial: Prevision des Niveaux Sonores” (CETUR, 1980).

También en este mismo sentido, se han realizado estudios que combinan la simulación mediante software de entornos urbanos y medidas experimentales con el fin de estudiar el comportamiento del nivel sonoro sobre la fachada de los edificios próximos a vías con tráfico rodado (Janczur et al., 2006a, 2006b, 2009; Walerian et al., 2011). En general, en estos trabajos las medidas de campo validan los resultados obtenidos mediante software para el rango de las plantas más elevadas de los edificios. Sin

embargo, para el rango de las plantas inferiores, se observa una sobreestimación del nivel sonoro.

Janczur et al. (Janczur et al., 2006a), en primer lugar, llevan a cabo un estudio de predicción de la distribución del nivel sonoro sobre la fachada de edificios mediante un software de simulación y después dichas estimaciones son verificadas experimentalmente (Janczur et al., 2006b). Esta concordancia entre los resultados de las medidas y las simulaciones fue comprobada para diferentes configuraciones de directividad de la fuente puntual equivalente utilizada para representar los vehículos. El estudio fue realizado en una calle urbana de una anchura de 43.4 m, con edificios a ambos lados con unas alturas de 25.8 y 32.4 m. Se colocaron micrófonos a las alturas de 2.0, 5.3, 8.6, 14.6, 19.1, 22.4 y 25.7 m y a una distancia de 0.5 m de la fachada del edificio de mayor altura. Los resultados experimentales de acuerdo al tráfico real muestran que entre 2.0 y 5.3 m hay un aumento promedio de los niveles sonoros de 0.5 dB. Este incremento, no previsto en la norma, podría tener influencia en la elaboración de los mapas de ruido. Para alturas entre 5.3 y 8.6 m y entre 8.6 y 14.6 m se obtienen disminuciones promedio de 0.5 y 0.4 dB respectivamente, las cuales están en línea con las estimaciones de la Ec. 2.7 (ver Fig. 2.3).

De forma análoga al trabajo anterior, Janczur et al. (Janczur et al., 2009) analizaron un nuevo entorno urbano realizando una comparativa de los datos obtenidos mediante simulación y medidas acústicas. En este caso, se colocaron una serie de receptores acústicos 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 con tipología de calle en L. Se realizan medidas de 10 minutos 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 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 y 13.9 m y de 0.7 dB entre las alturas de 13.9 y 22.2 m. Este incremento del nivel sonoro con la altura es opuesto a lo esperado, incluso solo por razones de divergencia geométrica. A partir de los 22.2 m, los niveles sonoros comienzan a disminuir a medida que aumenta la altura (ver Fig. 2.3).

Walerian et al. (Walerian et al., 2011) llevaron a cabo un nuevo estudio similar al anterior. En este caso, el entorno urbano es el mismo, pero en lugar de colocar los receptores próximos a la fachada del edificio los sitúan en un espacio cercano a la carretera. Para ello, ubican 4 receptores a unas alturas respectivas de 1.4, 2.8, 4.2 y 5.6 m en dos líneas verticales junto a un puente peatonal, una a cada lado de la carretera. Se realizan medidas de 10 minutos del nivel equivalente mediante un analizador digital de 4 canales, siendo divididas en 2 grupos de medidas simultáneas, uno en cada línea vertical. Los resultados experimentales muestran que, para una de las líneas verticales, el nivel sonoro medido aumenta con la altura desde 1.4 m hasta 4.2 m un total de 0.5 dB, disminuyendo en torno a 1.0 dB entre 4.2 y 5.6 m. Sin embargo, para la segunda línea, situada 1 metro más cerca de la carretera (a 5.95 m), los valores del nivel sonoro permanecen prácticamente constantes desde 1.4 m hasta 4.2 m de altura, mostrando una caída de 1.0 dB entre 4.2 y 5.6 m (ver Fig. 2.3).

Además de la variación del nivel sonoro en función de la altura del micrófono en los estudios analizados, en la Fig. 2.3 se muestra la corrección propuesta en la "Guide du Bruit de los Transportes Terrestres: Previsión des Niveaux Sonoras" en caso de calles de perfil en U.

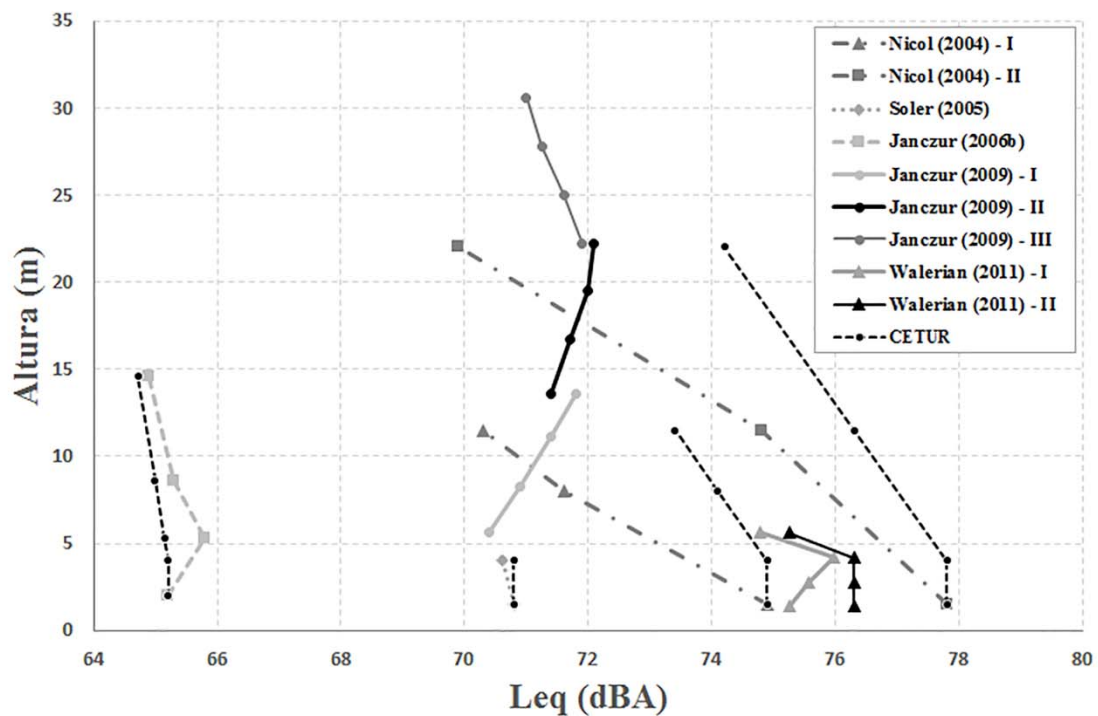


Fig. 2.3. Variación del nivel sonoro en función de la altura del micrófono

El hecho de que estudios recientes registren un aumento de los niveles sonoros entre 1.5 y 4 m puede conllevar subestimaciones de los niveles de exposición sonora representados en los mapas de ruido realizados bajo las indicaciones de la Directiva Europea sobre Ruido y la norma ISO-1996-2. Además, esta tendencia parece sobrepasar los 4 m, lo que entraría en contradicción con las correcciones en altura propuestas por la “Guide du Bruit des Transports Terrestres: Prevision des Niveaux Sonores”.

2.6 CONCLUSIONES

Se ha realizado una detallada revisión bibliográfica y se han propuesto estrategias de investigación con el propósito de estudiar las relaciones entre el procedimiento de medida de la norma ISO 1996-2 y la precisión de las estimaciones de la dosis de ruido recibida por los ciudadanos bajo la aplicación de la Directiva Europea sobre Ruido.

La norma ISO 1996-2 indica unas correcciones para aplicar sobre los valores de los niveles de ruido medidos. Su objetivo es corregir los efectos del incremento del nivel sonoro a causa de las reflexiones sonoras en los paramentos de las fachadas. De esta manera, se obtiene el valor real del campo sonoro incidente en la fachada (campo libre). Estas correcciones han sido analizadas por varios autores en entornos urbanos utilizando medidas “in situ” o simulaciones.

Los diferentes artículos publicados a este respecto, en general, se han centrado en estudiar las correcciones en función de la distancia a la fachada del edificio, pero no se ha analizado en detalle en qué medida se verifican o no las indicaciones del Anexo B (informativo).

Los resultados más relevantes publicados en estos trabajos, que pueden tener una incidencia importante sobre los resultados obtenidos hasta el momento bajo la aplicación de la Directiva Europea, se resumen a continuación:

- Los estudios realizados analizando las diferencias entre el nivel sonoro medido en campo libre y el medido con el micrófono situado sobre la superficie reflectante presentan disparidad de valores, que, según el caso, pueden implicar diferencias de hasta 2 dB respecto a una corrección de -6 dB establecida por la norma ISO 1996-2.

- Se debe tener en mente que esta configuración suele ser la empleada en la realización de los mapas estratégicos mediante simulación para situar los receptores.
- Los estudios realizados analizando la corrección que correspondería aplicar cuando la medida se realiza entre 0.5 y 2 m de la fachada bajo evaluación, los resultados obtenidos en diferentes estudios poseen una amplia variación. Ésta variación puede llegar a ser superior a 1 dB, respecto a los -3 dB propuestos en la norma.
 - En los estudios realizados respecto a la variación del nivel sonoro en función de la altura de medida, también hay bastante disparidad de resultados. En algunos casos, se corresponden con lo esperado y en otros casos se han detectado incrementos del nivel sonoro con la altura, lo que directamente entraría en contradicción con los resultados esperables considerando la divergencia geométrica de la onda sonora.

Además, de los resultados comentados, se abre una posibilidad no contemplada hasta el momento, que las correcciones a aplicar puedan estar relacionadas con el flujo de vehículos y, por tanto, con las características de la fuente sonora a estudiar.

Las diferencias encontradas entre las correcciones propuestas por la norma y los resultados experimentales podrían estar motivadas por circunstancias muy diversas que parecen asociadas a una configuración del urbanismo de nuestras ciudades bastante compleja. Esto implica que la fuente sonora puede llegar a encontrarse bastante cercana a la fachada bajo evaluación o influenciada en su propagación por configuraciones urbanas que incluso, en algunos casos, podrían llegar a ser variables en el tiempo.

Otra conclusión que surge del análisis realizado en este capítulo es que la norma ISO 1996-2 establece, en su parte normativa, unas correcciones en función de la distancia entre el micrófono y la fachada posterior que, de algún modo, parecen intentar abarcar un amplio abanico de posibilidades en cuanto a posibles configuraciones de medida en un entorno urbano y, por tanto, simplificar el procedimiento de medida y cálculo de niveles sonoros en el medio exterior. No obstante, en el Anexo B de la norma, de carácter informativo, se establece otra serie de condiciones más específicas relativas a la geometría del punto de medida para las cuales se verifican las correcciones propuestas. Sin embargo, en condiciones reales de medida en un entorno urbano, es difícil encontrar puntos de medida que den cumplimiento a todos los requisitos establecidos en el Anexo B de la norma.

CAPÍTULO 3:

ENSAYOS “IN SITU”

3.1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la sociedad ha tomado consciencia de los inconvenientes que el desarrollo moderno ha introducido en la vida cotidiana de sus ciudadanos. Entre ellas se encuentra el ruido, que es un efecto secundario del aumento importante en la población de nuestras ciudades y en las comunicaciones necesarias entre sus ciudadanos. Debido a sus conocidos efectos significativos en la población (Öhrström, 2004; Muzet, 2007; Fyhri and Aasvang, 2010; Gopinath et al., 2011) y teniendo en cuenta que la contaminación acústica afecta a una gran parte de la población mundial, el ruido representa un riesgo para nuestra salud y calidad de vida (EEA, 2009; WHO, 2011).

De este modo, el ruido debe ser estudiado y caracterizado con el fin de ayudar a las autoridades en la protección de los ciudadanos. Dado que la metodología de medición puede tener una influencia importante en el nivel de ruido medido, se han propuesto algunas normas para asegurar resultados reproducibles y comparables en las mediciones llevadas a cabo por diferentes técnicos o en diferentes lugares. En este sentido, las normas ISO 1996 (ISO 1996-1, 2003; ISO 1996-2, 2007) pueden ser consideradas como una referencia internacional. Muchos trabajos de investigación que utilizan esta norma para llevar a cabo la medición y evaluación del ruido ambiental se pueden encontrar en la literatura científica (Wang V. et al., 2016; Bastián-Monarca et al., 2016; Gómez Escobar et al., 2012a; Mato-Méndez and Sobreira-Seoane, 2011).

En el capítulo anterior, se han analizado con detalle las condiciones de la norma ISO 1996-2 (ISO 1996-2, 2007) para la aplicación de las correcciones en los niveles de ruido medidos en función de la posición del micrófono con respecto a la fachada de los edificios. Del mismo modo, se han expuesto aquellos aspectos referentes a la altura del micrófono durante las medidas “in situ” para la realización de mapas de ruido según la propia norma ISO 1996-2 (ISO 1996-2, 2007) y la Directiva Europea sobre Ruido (EC, 2002), así como las correcciones propuestas por la norma francesa "Guide du Bruit de los Transportes Terrestres: Previsión des Niveaux Sonoras" (CETUR, 1980).

En este capítulo se realiza un estudio experimental de las diferencias que pueden existir entre los valores de los niveles sonoros medidos en entornos urbanos con el micrófono situado en diferentes posiciones con respecto a la fachada posterior y al suelo.

3.2 METODOLOGÍA

3.2.1 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Para la realización de este trabajo se eligieron seis puntos de medida en la ciudad de Cáceres, todos ellos con características diferentes en cuanto a la geometría de la calle y al flujo de tráfico. En la selección de los puntos de muestreo se prestó especial atención a las consideraciones del anexo B de la norma ISO 1996-2 en relación con:

- Tamaño y características estructurales de la fachada. El objetivo es evitar, entre otros problemas, las reflexiones múltiples y los efectos de difracción.
- Posición del micrófono con respecto a la superficie reflectante. Este anexo establece la distancia mínima entre la proyección del punto de medida en la superficie reflectante y los bordes de la misma en función de la distancia del punto de medida a la fachada y de la altura a la que se sitúa el micrófono.
- Ángulo de visión de la fuente. En este caso, al tratarse de una fuente extendida, el ángulo de visión debe ser igual o mayor a 60°.

Además, se tuvieron en cuenta otras consideraciones como la longitud del acerado, que el tráfico rodado fuese la fuente sonora fundamental y la variabilidad en la estructura urbana y en el número de carriles.

Sin embargo, tal como se indicaba en el Capítulo 2, debido a la dificultad para localizar puntos de medida que den cumplimiento a todas las condiciones establecidas en el Anexo B de la norma, en algunos casos no se pudo verificar la condición de distancias de la Ec. 2.3, cuyas implicaciones se mostraban en la Fig. 2.2.

Como se detalla más adelante en la sección 3.3.2, se pretendía realizar un análisis de las diferentes posiciones de micrófono que considera la norma ISO 1996-2 para aplicar las correcciones por distancia a la fachada, así como un estudio de la influencia de la altura del micrófono en una posición frente a la fachada sin influencia de las reflexiones, aspectos por los que había que establecer una cierta distancia entre el micrófono y dicha superficie reflectante. En la práctica, este hecho supone una doble dificultad para encontrar puntos de medida en entornos urbanos que verifiquen las condiciones establecidas por la norma ISO 1996-2 relativas a las condiciones de distancia entre la

fachada y la fuente sonora (Fig. 2.2) y entre el micrófono y los bordes de la fachada (Ec. 2.1 y Ec. 2.2).

Tener en cuenta todas las consideraciones anteriores a la hora de seleccionar los puntos de muestreo no fue tarea fácil, debido a las formas de las ciudades mediterráneas (calles estrechas, densidad de construcción, presencia de grandes balcones, etc.) y a la gran diversidad de fuentes sonoras que surgen como consecuencia de la gran actividad humana asociada a las buenas condiciones climáticas.

Finalmente, considerando todos los aspectos anteriormente mencionados, se seleccionaron seis puntos de medida (Figura 3.1). Las fachadas donde se realizaron las medidas son planas, sin elementos sobresalientes próximos a los micrófonos. Estas superficies están construidas con diferentes materiales acústicamente duros como hormigón, piedra, mármol y ladrillos y cumplen con los requisitos establecidos en el anexo B de la norma ISO 1996-2 para las características de las fachadas.

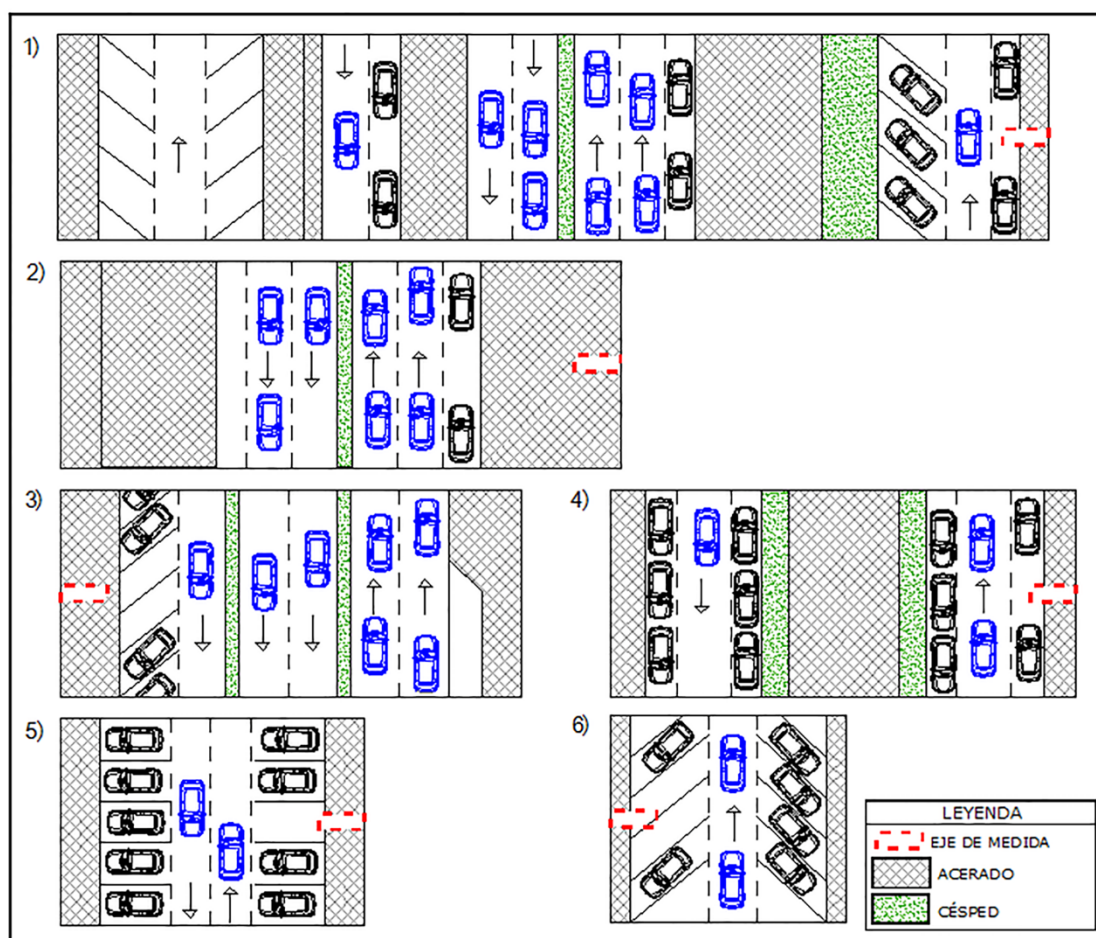


Fig. 3.1. Vista superior de los puntos de medida seleccionados

3.2.2 PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

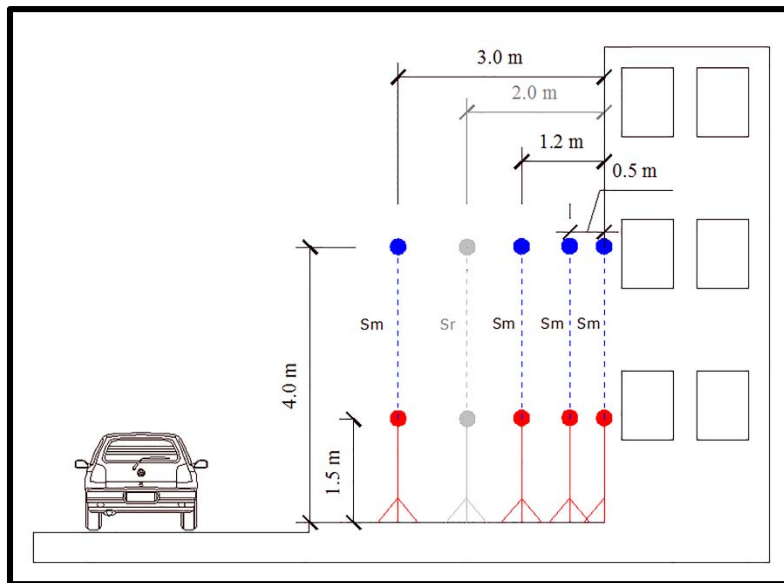
Las medidas fueron llevadas a cabo en tres grupos en cada una de las ubicaciones seleccionadas y para ello se utilizaron dos micrófonos midiendo simultáneamente (Tabla 3.1). En los dos primeros grupos de medidas, A y B, uno de los micrófonos se situó en una posición fija, el sonómetro fijo o de referencia (Sr), a 2 m de la fachada posterior (la distancia límite para tener en cuenta la corrección en los niveles medidos de acuerdo con la norma ISO 1996-2), mientras que la posición del otro, el sonómetro móvil (Sm), fue variando en perpendicular a la fachada y en paralelo al sonómetro fijo (Sr). Las mediciones se realizaron con el micrófono móvil a distancias de 0, 0.5, 1.2 y 3 m con respecto a la fachada y a alturas de 1.5 y 4 m sobre el nivel del suelo. La Fig. 3.2a muestra la ubicación de los micrófonos de medición grupos A y B.

	Grupo A		Grupo B		Grupo C	
	Altura: 1.5 m		Altura: 4.0 m		Distancia a fachada: 3.0 m	
	Distancia a fachada (m)		Distancia a fachada (m)		Altura (m)	
Config.	Móvil (Sm)	Fijo (Sr)	Móvil (Sm)	Fijo (Sr)	Móvil (Sm)	Fijo (Sr)
1	0	2.0	0	2.0	1.2	4.0
2	0.5	2.0	0.5	2.0	1.5	4.0
3	1.2	2.0	1.2	2.0	2.5	4.0
4	3.0	2.0	3.0	2.0	6.0	4.0

Tabla 3.1. Resumen de las diferentes parejas de medidas realizadas

En el grupo C de medidas, el sonómetro fijo (Sr) se mantuvo a una distancia de 3 m de la fachada posterior y a una altura de 4 m, mientras que la altura sonómetro móvil (Sm) fue variando. Las medidas se realizaron con el micrófono móvil a una altura de 1.2, 1.5, 2.5 y 6 m, como se muestra en la Fig. 3.2b.

a)



b)

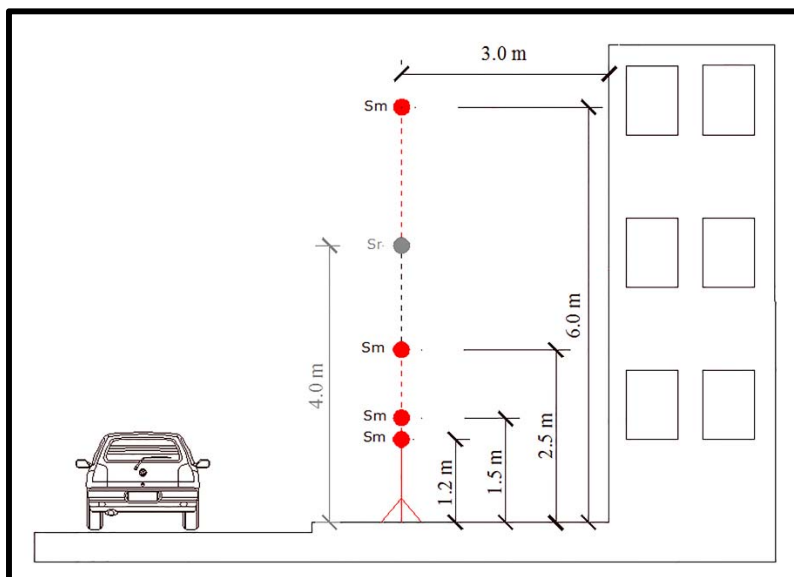


Fig. 3.2. Configuración de los micrófonos en los grupos A y B (a) y en el grupo C (b)

Considerando las diferentes opciones indicadas por la norma ISO 1996-2 para la posición de micrófono sobre la fachada, las medidas a 0 m de distancia fueron llevadas a cabo colocando el micrófono directamente sobre la fachada, sin la utilización de una placa.

Se realizaron medidas simultáneas durante un periodo de 15 minutos para todas las configuraciones, con un tiempo de integración de 1 s y en bandas de tercio de octavas de 50 Hz a 10 kHz. En este trabajo, se han empleado sólo los valores globales y las bandas en tercio de octava se han agrupado en bandas de octava.

Para cada medida, se determinó visualmente el flujo de tráfico y se clasificó en tres categorías: vehículos ligeros (<3500 kg), vehículos pesados (>3500 kg) y motocicletas. Otra información relevante (fuentes de ruido, condiciones meteorológicas, dimensiones de la calle, tipo de superficie de la calzada, condiciones de la superficie de la calle, etc.) fue también registrada.

Las medidas fueron llevadas a cabo utilizando dos sonómetros-analizadores Brüel&Kjaer 2250L de tipo 1 equipados con pantallas antiviento y colocados sobre trípodes y pértigas a diferentes alturas. Previamente y después de cada sesión de medidas, se realizó una verificación de la calibración de los sonómetros-analizadores utilizando un calibrador Brüel&Kjaer 4231 de tipo 1.

3.2.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El principal objetivo de este estudio es analizar las diferencias del nivel sonoro equivalente registrado por ambos equipos de medida (S_m y S_r) para cada una de las configuraciones de los grupos A, B y C.

Como se indicaba en apartados anteriores, se seleccionaron seis puntos de medida. De este modo, si en cada localización se realizaron 3 grupos de medidas (A, B y C) y en cada grupo de medida se llevaron a cabo 4 configuraciones (Tabla 3.1), un total de 12 parejas de medidas (S_m y S_r) se realizaron en cada localización por cada campaña de mediciones. Dado que se realizaron 12 campañas de mediciones, el estudio se compone de 144 parejas de medida de 15 minutos de duración.

Los equipos de medida fueron configurados para registrar el nivel equivalente tanto en banda ancha como en bandas de tercio de octava con un tiempo de integración de 1 s, lo cual permite realizar un registro temporal de las medidas para analizar la diferencia de niveles sonoros entre los dos equipos de medida (S_m y S_r) en el plano temporal. En la Fig. 3.3 se muestra, a modo de ejemplo, el registro temporal obtenido en una de las medidas realizadas.

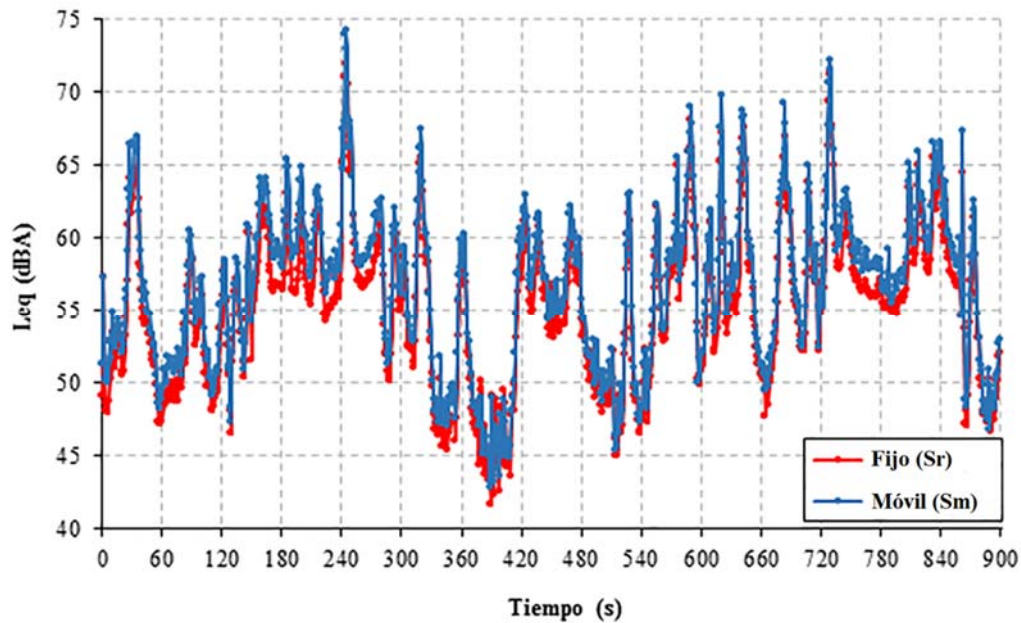


Fig. 3.3. Secuencia temporal registrada en una de las medidas

Un aspecto que se consideró en el estudio es que la variación de la distancia a la fachada o la variación de la altura a la que se coloca el sonómetro móvil (Sm) suponen una variación de la distancia a la principal fuente de ruido, el tráfico rodado, con respecto al sonómetro fijo (Sr). Por este motivo, a pesar de que ni la norma ISO 1996-2 (ISO 1996-2, 2007) ni la Directiva Europea (EC, 2002) tienen en consideración esta circunstancia, se ha estimado de interés aplicar una corrección por distancia a la fuente lineal (Harris, 1998). De esta forma, se pretende eliminar el efecto que la mayor o menor distancia a la fuente va a tener sobre el valor medido. Es de esperar que, con este procedimiento, la causa de las diferencias que puedan medirse entre el sonómetro de referencia y el móvil sea únicamente la reflexión de la onda sonora en la fachada.

Teniendo en cuenta este aspecto, las diferencias entre cada sonómetro de la pareja (Sm-Sr) de cada una de las configuraciones de los grupos A, B y C se analizaron mediante dos sistemáticas diferentes:

1. Empleando los valores sonoros medidos (sin normalización de distancia a la fuente sonora).
2. Corrigiendo, mediante divergencia geométrica, los valores medidos por el sonómetro móvil (Sm), para normalizarlo a la distancia del sonómetro de referencia (Sr). Para este estudio la fuente lineal se ha considerado en el centro del conjunto de carriles que componen la vía (EC, 2015). La ecuación 3.1 fue

utilizada para obtener el nivel sonoro equivalente con normalización por distancia a la fuente sonora (Harris, 1998):

$$Leq (Sm)_n = Leq (Sm) + 10 \cdot \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) [dB] \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde:

- $Leq (Sm)_n$ es el nivel sonoro equivalente normalizado del sonómetro móvil.
- $Leq (Sm)$ es el nivel sonoro equivalente medido del sonómetro móvil.
- r_2 es la distancia entre el sonómetro móvil y la fuente sonora
- r_1 es la distancia entre el sonómetro fijo y la fuente sonora.

A partir de estas diferencias (Sm-Sr), se obtuvo un valor promedio para cada una de las configuraciones de cada grupo. Estos valores medios fueron comparados con las correcciones propuestas por la ISO 1996-2 (ISO 1996-2, 2007), pero también fueron analizados con procedimientos estadísticos inferenciales. Para ello, se aplicó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon (Wilcox, 1945; Mann and Whitney, 1947). Se utilizó este test no paramétrico en lugar de un test paramétrico, ya que el pequeño número de muestras puede implicar que la normalidad de los datos sea dudosa. Esta prueba determina si los valores promedio de la diferencia Sm-Sr no difiere significativamente de cero. Si no hay diferencia significativa, se asume que no existe un efecto significativo de las ondas reflejadas en la fachada sobre los valores sonoros registrados en el sonómetro móvil con respecto a los registrados en el sonómetro fijo.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se indica a continuación, los resultados se muestran en función de los grupos de medición A, B y C. En cada uno de estos grupos, se analizaron primero las diferencias en los valores medios del nivel continuo equivalente en banda ancha y, a continuación, las diferencias en los valores medios por bandas de octava de frecuencia.

3.3.1 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTANCIA A FACHADA A 1.5 m DE ALTURA (GRUPO A)

En este apartado se van a estudiar diferentes configuraciones de medida para distancias a la fachada que oscilan entre 0 y 2 m. En todos los casos las medidas se hacen a una altura de 1.5 m. En la Tabla 3.2 se muestran los valores promedio de las diferencias del nivel equivalente entre los dos sonómetros y su error típico.

Grupo	Config.	Distancia/ Altura (m)		$\bar{x} [Leq(Sm) - Leq(Sr)] \pm \sigma_{\bar{x}}$ (dBA) (p-valor)	
		Móvil (Sm)	Fijo (Sr)	Sin normalización por distancia a la fuente sonora	Con normalización por distancia a la fuente sonora
A (h = 1.5 m)	1	0	2.0	1.1 ± 0.1 (***)	1.7 ± 0.1 (***)
	2	0.5	2.0	-0.4 ± 0.1 (***)	0.1 ± 0.1 (n.s.)
	3	1.2	2.0	-0.2 ± 0.0 (***)	0.1 ± 0.1 (n.s.)
	4	3.0	2.0	0.3 ± 0.1 (**)	-0.1 ± 0.1 (n.s.)

Tabla 3.2. Valores promedio, error típico y significación de los valores promedio (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) de las diferencias en banda ancha entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo A.

Los símbolos (*), (**), (***) indican el nivel de significación de las diferencias ($p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, y $p \leq 0.001$, respectivamente). (n.s.) indica diferencias no significativas ($p > 0.05$).

Si nos fijamos en la columna de las diferencias sin realizar normalización con la distancia del sonómetro a la fuente sonora, se observa que el valor obtenido en la configuración 1 se aleja bastante de las correcciones recomendadas en la norma ISO 1996-2. Para el resto de configuraciones, la diferencia de niveles medidos entre ambos micrófonos es reducida. Por otra parte, el signo de las diferencias, salvo en la configuración 1, es diferente del esperable por la existencia de un efecto de reflexión del campo sonoro en la fachada.

En cambio, si analizamos los resultados mostrados en la columna en la que se realiza la normalización, se observa como los signos de todas las correcciones son coincidentes

con lo que cabría esperar de la existencia de un efecto de reflexión en fachada, siendo positivos para las medidas realizadas con el sonómetro móvil más cerca de la fachada (configuraciones 1, 2 y 3) y negativos en caso contrario (configuración 4). Lo que nos indica la posibilidad de que sea necesario realizar este tipo de normalización para obtener un valor de medida referido a 2 m de la fachada. Pero, incluso con esta normalización, los resultados de la configuración 1 muestran una corrección por reflexión en fachada diferente a la recomendada en la norma ISO 1996-2, aunque en este caso se acerca más al valor esperado (3 dB).

Otro aspecto de interés que se observa en la Tabla 3.2 es la pequeña diferencia obtenida en la configuración 4. Este resultado puede estar indicándonos que, incluso en distancias a la fachada superiores a los 2 m que indica la norma, sea posible encontrarse con una suma de energía entre el campo incidente y el reflejado.

A continuación se va a analizar la significación estadística de las diferencias que se obtienen entre los resultados de las medidas obtenidas con el sonómetro móvil y el de referencia, tanto en el caso de los datos sin normalizar como normalizados. Para ello, se utilizó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon, en la cual se compara esta diferencia con respecto al valor nulo.

En la Tabla 3.2 se observa cómo, en el caso de las medidas sin normalizar, se encuentran diferencias significativas para los resultados obtenidos en las 4 configuraciones. Aunque se debe resaltar que, como antes se ha explicado, los valores de las diferencias no sólo no coinciden con los indicados en la norma, sino que no son coherentes con la existencia de efectos de reflexión en la fachada.

En cambio, en el caso de las medidas normalizadas, con resultados coherentes con la existencia de reflexión en fachada, sólo es significativamente diferente de cero en la configuración en la que el sonómetro móvil se encuentra a 0 m de la fachada. Mientras que en las otras tres configuraciones los valores medios de las diferencias se encuentra alrededor del valor nulo, sin presentar diferencias significativas.

Por tanto, según los resultados obtenidos, en las condiciones reales de medida, en promedio, en el caso de medidas realizadas con el micrófono situado sobre una pared, resulta procedente realizar correcciones por reflexión en fachada. Sin embargo, el valor promedio obtenido para las diferencias entre la medida de un micrófono situado en

fachada y otro situado a 2 m de ella, en el caso más favorable, es de 1.7 dB. Este resultado es bastante inferior a los 3 dB que corresponderían conforme a las correcciones por reflexión en fachada indicadas en la norma.

Para buscar posibles causas de estos resultados, se realizó un análisis de las medidas por banda de octava. En la Tabla 3.3 se muestran, para las cuatro configuraciones empeladas, los valores promedio de las diferencias entre las medidas realizadas con los dos sonómetros y la significación de estos valores medios con respecto al valor nulo, a través de la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.

Obsérvese en la Tabla 3.3 como, para las configuraciones 1 y 2, todas las bandas de octava presentan diferencias significativas cuando no se hacen correcciones por distancia a la fuente. En cambio, cuando hacemos la corrección por distancia a la fuente esto no ocurre, debido a la cercanía al valor nulo de la diferencia en esas bandas entre los valores medidos por el sonómetro móvil y el de referencia. Es interesante comprobar cómo, para la configuración 1, en la banda de 63 Hz, la diferencia entre ambos sonómetros posee un valor cercano a los 5 dB y que hasta la banda de 500 Hz esta diferencia se aproxima o supera los 3 dB que sería el valor esperable a partir de lo indicado por la norma para estas posiciones de micrófono. Este resultado parece congruente con lo indicado por la norma ISO 1996-2 en el caso de las medidas realizadas sobre la fachada, relativo a que el sonido directo y reflejado están en fase por debajo de una frecuencia que, en el caso del ruido de tráfico y un micrófono de 13 mm de diámetro, es de aproximadamente 4 kHz. Aunque en este caso, como se puede apreciar en los datos obtenidos, la frecuencia hasta la que se produce la suma coherente es claramente menor. Estos resultados podrían tener una explicación en el citado efecto de apantallamiento originado por los vehículos estacionados a los lados de las vías urbanas.

Por otra parte, en la configuración 2, en la banda de 63 Hz, la diferencia es cercana a 4 dB y a partir de la banda de 250 Hz las diferencias, cercanas a cero, no son significativas. Este resultado parece estar en línea con lo indicado por la norma ISO 1996-2 en su anexo B en lo relativo a la aparición de efectos de coherencia a baja frecuencia y la indicación de una distancia mínima de medida de 1.6 m para las medidas en banda de octava realizadas frente a la fachada (Ec. 2.5) con el fin de garantizar que el micrófono está colocado a una distancia suficiente de la región de +6 dB.

Grupo	h (m)	Distancia a fachada de S_m (m)	Configuración	$\bar{x} [Leq(S_m) - Leq(S_r)]$ (dB) (p-value)							
				Frecuencia (Hz)							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A	1.5	0	Sin norm.	4.12 (***)	2.82 (***)	2.81 (***)	2.11 (***)	0.90 (*)	-0.89 (***)	-0.53 (**)	-1.88 (***)
			Con norm.	4.76 (***)	3.46 (***)	3.45 (***)	2.75 (***)	1.53 (**)	-0.25 (n.s.)	0.11 (n.s.)	-1.24 (**)
		0.5	Sin norm.	3.31 (***)	1.00 (***)	-0.88 (**)	-0.29 (*)	-0.35 (*)	-0.38 (**)	-0.67 (**)	-0.73 (**)
			Con norm.	3.80 (***)	1.49 (***)	-0.39 (n.s.)	0.19 (n.s.)	0.13 (n.s.)	0.11 (n.s.)	-0.18 (n.s.)	-0.24 (n.s.)
		1.2	Sin norm.	0.58 (n.s.)	-0.96 (*)	0.30 (n.s.)	-0.29 (***)	-0.24 (***)	-0.08 (n.s.)	-0.42 (**)	-0.60 (**)
			Con norm.	0.85 (**)	-0.70 (n.s.)	0.57 (*)	-0.02 (n.s.)	0.03 (n.s.)	0.19 (**)	-0.15 (n.s.)	-0.33 (*)
		3.0	Sin norm.	1.98 (***)	-0.52 (**)	0.37 (**)	0.15 (n.s.)	0.28 (**)	0.41 (**)	0.34 (**)	0.30 (n.s.)
			Con norm.	1.61 (***)	-0.89 (***)	0.01 (n.s.)	-0.22 (*)	-0.08 (n.s.)	0.04 (n.s.)	-0.03 (n.s.)	-0.06 (n.s.)

Tabla 3.3. Valores promedio de las diferencias en bandas de octava entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo A y significación de los valores promedio con respecto al valor nulo (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon).

Los símbolos (*), (**), (***) indican el nivel de significación de las diferencias ($p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, y $p \leq 0.001$, respectivamente). (n.s.) indica diferencias no significativas ($p > 0.05$).

Por otro lado, en las configuraciones 3 y 4 los resultados, globalmente, son poco concluyentes. Pero puede observarse como, en la mayoría de las bandas, las diferencias entre los sonómetros móvil y fijo son cercanas al valor nulo. De este modo, al igual que se indicaba en el análisis en banda ancha para la configuración 4, parece que a distancias superiores a los 2 m respecto a la fachada, es posible encontrarse con una suma energética entre el campo incidente y el reflejado.

De nuevo, parece que los resultados obtenidos en esta sección podrían entenderse si pensamos en la posibilidad de que, en las situaciones normales de medida en el ámbito

urbano, puede estar produciéndose un efecto de apantallamiento asociado a la presencia de líneas de aparcamientos en muchas de las calles de las ciudades.

Además, para llegar a resultados comparables entre diferentes condiciones y puntos de medida, se encuentra la necesidad de una realizar normalización con la distancia entre el punto de medida y la fuente sonora.

3.3.2 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTANCIA A FACHADA A 4 m DE ALTURA (GRUPO B)

En la Tabla 3.4 se muestran los valores promedio y su error típico para las diferencias entre las medidas realizadas con los dos sonómetros en las cuatro configuraciones a una altura de 4 m.

Grupo	Config.	Distancia/ Altura (m)		$\bar{x} [Leq(Sm) - Leq(Sr)] \pm \sigma_{\bar{x}}$ (dBA) (p-valor)	
		Móvil (Sm)	Fijo (Sr)	Sin normalización por distancia a la fuente sonora	Con normalización por distancia a la fuente sonora
B (h = 4.0 m)	1	0	2.0	2.0 ± 0.2 (***)	2.6 ± 0.2 (***)
	2	0.5	2.0	0.6 ± 0.2 (*)	1.1 ± 0.2 (**)
	3	1.2	2.0	0.3 ± 0.1 (**)	0.5 ± 0.1 (**)
	4	3.0	2.0	0.2 ± 0.0 (***)	-0.1 ± 0.0 (n.s.)

Tabla 3.4. Valores promedio, error típico y significación de los valores promedio (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) de las diferencias en banda ancha entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo B.

Los símbolos (*), (**), (***) indican el nivel de significación de las diferencias ($p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, y $p \leq 0.001$, respectivamente). (n.s.) indica diferencias no significativas ($p > 0.05$).

Si se observan las diferencias sin normalización por la distancia del sonómetro móvil a la fuente de la Tabla 3.4, se puede comprobar que el valor obtenido para la configuración 1 resulta de menor importancia que las correcciones recomendadas en la norma ISO 1996-2, aunque en este caso se aproxima un poco más a los 3 dB que en el caso de los micrófonos situados a 1.5 m de altura. Además, en la configuración 2 se

observa una diferencia de 0.6 ± 0.2 dBA entre los micrófonos situados a 0.5 y 2 m, valor que ha de tenerse en cuenta dado que la norma establece un valor único de corrección para el rango de distancias respecto a la fachada entre 0.5 y 2 m. En el resto de configuraciones, aunque las diferencias registradas sean pequeñas siguen siendo significativas entre los equipos situados a distancias diferentes de la fachada. Por otra parte, en cuanto a la coherencia de signos, sólo para la configuración 4 en el caso de las medidas sin normalizar, se obtiene un valor no esperable.

Si se analizan los resultados de la columna en la que se realiza la normalización, se observa como la normalización con la distancia a la fuente implica un acercamiento de los resultados obtenidos en la configuración 1 a las recomendaciones de la norma. Este hecho, de nuevo, parece indicar la necesidad de realizar este tipo de normalización. Por otra parte, en las configuraciones 2 y 3, relacionadas con un único valor de corrección para el rango de distancias de 0.5 a 2 m de la fachada, se detectan valores de 1.1 ± 0.2 dBA entre 0.5 y 2 m y de 0.5 ± 0.1 dBA entre 1.2 y 2 m. Por tanto, al igual que se indicaba en la sección 2.3.2 del capítulo anterior y en función de los resultados obtenidos en otros trabajos de investigación (Memoli et al., 2008), parece necesario ampliar el número de estudios en los que se compruebe la corrección a realizar en el caso de que se mida a una distancia de la fachada entre 0.5 y 2 m. En tercer lugar, tal como ocurría en el grupo A de medidas, en la configuración 4 la diferencia obtenida entre los micrófonos situados a 2 y 3 m de la fachada no resulta significativa. Estos resultados pueden estar indicando la posibilidad de utilizar distancias entre la fachada evaluada y un punto de medida situado a más de 2 m para evaluar mediante medidas el campo sonoro incidente en dicha superficie manteniendo una situación de suma energética entre el campo sonoro directo y el reflejado.

Es interesante resaltar en estos resultados que los valores obtenidos son claramente superiores a los mostrados en el apartado anterior para medidas realizadas a 1.5 m de altura respecto al suelo. Incluso, si se analiza la significación de las diferencias que obtenemos entre los resultados de las medidas realizadas con el sonómetro móvil y con el de referencia a través de la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon, encontramos nuevas diferencias significativas con respecto al valor nulo para las configuraciones 2 y 3 de los datos normalizados. Por tanto, sólo en la configuración 4 las diferencias no presentan diferencias significativas con respecto al valor nulo.

De este modo, según los resultados obtenidos en condiciones reales de medida, en promedio, para medidas realizadas a 4 m de altura, se encuentra que para la configuración en la que el micrófono se sitúa sobre la fachada resulta procedente realizar correcciones por reflexión en fachada. En este caso, se ha encontrado un valor promedio de hasta 2.6 dBA cuando se aplica la normalización por distancia a la fuente sonora, respecto a los 3 dB propuestos por la norma ISO 1996-2.

De nuevo, si comparamos los valores de las correcciones encontrados a 4 m de altura con los obtenidos a 1.5 m, se observa que, en todos los casos recogidos por la norma, las correcciones se incrementan. Esto significa que, en el caso de analizar el valor de la corrección a aplicar cuando se mide sobre fachada, éste se acerca más a las recomendadas de la norma ISO 1996-2. Ahora bien, en el caso de las medidas a distancias de la fachada en el rango de 0.5 m a 2 m, parece encontrarse que la corrección a aplicar no debería ser uniforme, sino que es dependiente de la distancia a la fachada. Estos resultados, en realidad, podrían estar relacionados con un efecto de apantallamiento originado por las líneas de estacionamiento situadas en los lados de las vías urbanas, cuya presencia puede afectar en la propagación del campo sonoro desde la fuente sonora, el tráfico rodado de vehículos principalmente, hasta la fachada de los edificios y, de este modo, modificar la forma en la que las ondas sonoras inciden sobre estas superficies reflectantes. Por tanto, dadas las diferencias obtenidas en condiciones reales de medida entre 1.5 y 4 m y, teniendo en cuenta que estas alturas de medida son consideradas en la norma ISO 1996-2 para la realización de mapas de ruido, como se indicaba en la sección 2.5 del capítulo anterior, parece necesario ampliar el número de estudios de investigación en este sentido.

A continuación, al igual que se realizó para las medidas a 1.5 m de altura, este estudio de las diferencias entre ambos sonómetros se analizó por bandas de octava. En la Tabla 3.5 se muestran los valores promedio de las diferencias en bandas de octava entre las medidas realizadas con los dos sonómetros en las cuatro configuraciones para la altura de 4 m y la significación de estos valores medios con respecto al valor nulo a través de la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.

Grupo	h (m)	Distancia a fachada de S _m (m)	Configuración	\bar{x} [Leq(S _m) – Leq(S _r)] (dB) (p-value)							
				Frecuencia (Hz)							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
B	4.0	0	Sin norm.	5.12 (***)	3.21 (***)	3.71 (***)	3.27 (***)	2.18 (***)	-0.03 (n.s.)	-0.05 (n.s.)	-0.38 (n.s.)
			Con norm.	5.70 (***)	3.80 (***)	4.30 (***)	3.86 (***)	2.77 (***)	0.56 (n.s.)	0.53 (n.s.)	0.21 (n.s.)
		0.5	Sin norm.	4.23 (***)	1.03 (***)	-0.89 (***)	0.57 (n.s.)	0.48 (*)	0.93 (**)	0.33 (n.s.)	-0.20 (n.s.)
			Con norm.	4.68 (***)	1.47 (***)	-0.44 (*)	1.02 (**)	0.93 (**)	1.38 (**)	0.77 (*)	0.25 (n.s.)
		1.2	Sin norm.	1.55 (***)	-0.26 (n.s.)	-0.01 (n.s.)	0.12 (n.s.)	0.23 (*)	0.37 (**)	0.14 (n.s.)	-0.49 (n.s.)
			Con norm.	1.80 (**)	-0.01 (n.s.)	0.23 (n.s.)	0.37 (*)	0.48 (**)	0.61 (**)	0.39 (**)	-0.24 (n.s.)
		3.0	Sin norm.	1.99 (***)	0.14 (n.s.)	0.42 (**)	0.18 (**)	0.19 (***)	0.28 (***)	0.17 (*)	-0.12 (n.s.)
			Con norm.	1.67 (***)	-0.19 (n.s.)	0.09 (n.s.)	-0.14 (**)	-0.14 (*)	-0.04 (n.s.)	-0.15 (*)	-0.45 (***)

Tabla 3.5. Valores promedio de las diferencias en bandas de octava entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo B y significación de los valores promedio con respecto al valor nulo (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon).

Los símbolos (*), (**), (***) indican el nivel de significación de las diferencias ($p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, y $p \leq 0.001$, respectivamente). (n.s.) indica diferencias no significativas ($p > 0.05$).

Si nos fijamos en la configuración 1 de la Tabla 3.5, observamos diferencias significativas hasta la banda de 1 kHz, con valores de las diferencias entre el sonómetro móvil y el de referencia cercanos o superiores a 3 dB. Aquellas bandas sin diferencias significativas presentan valores de las diferencias cercanos a cero. Es interesante comprobar cómo, de forma similar a lo ocurrido en el grupo A, en la banda de 63 Hz, la diferencia entre ambos sonómetros posee un valor cercano a los 6 dB. Este efecto podría entenderse como la existencia de una interferencia destructiva entre la onda directa y la reflejada para esta banda de frecuencia.

Por otro lado, es de interés observar que las diferencias en las diferentes bandas de octava entre el sonómetro situado sobre fachada y el situado a 2 m de ella, para el caso de las medidas a 4 m se acercan a los 3 dB que se podrían esperar a partir de las

consideraciones normativas indicadas en la norma ISO 1996-2 hasta frecuencias mayores que en el grupo A. En el caso de las medidas a 1.5 m, las diferencias se hacían inferiores a la unidad en la banda de 1 kHz y en bandas superiores podrían alcanzar valores cercanos a -2 dB. Hecho que, claramente, no sucede en las medidas a 4 m. Una posible explicación para estos resultados es el efecto pantalla de los vehículos aparcados que, claramente, puede considerarse que debe disminuir con la altura de medida y aumentar con la frecuencia.

En la configuración 2 las diferencias significativas aparecen en casi todas las bandas con valores entre 1 y 2 dB, mientras que el valor de la corrección a 63 Hz es cercano a los 5 dB. En esta configuración es reseñable que, en relación con un único valor de corrección establecido por la norma ISO 1996-2 para el rango de distancias de 0.5 a 2 m de la fachada, hasta la banda de frecuencia de 2 kHz se obtienen diferencias de niveles entre ambos micrófonos de al menos 1 dBA.

En la configuración 3 también encontramos diferencias significativas en algunas bandas de octava, aunque en la mayoría de los casos con valores claramente inferiores a 1 dB. No obstante, en la banda de 63 Hz, la diferencia es cercana a los 2 dB.

Por otro lado, en la configuración 4 puede observarse como, en la mayoría de las bandas, las diferencias obtenidas entre ambos micrófonos son cercanas al valor nulo. Por lo tanto, de forma análoga a los resultados obtenidos para el grupo A y en línea con lo indicado en el análisis en banda ancha en este mismo grupo B, parece que a distancias superiores a los 2 m respecto a la fachada, es posible encontrarse con una suma de energía entre el campo sonoro incidente y el reflejado.

Además, al igual que el resultado obtenido para la altura de 1.5 m, para llegar a resultados comparables entre diferentes condiciones y puntos de medida, se encuentra la necesidad de una realizar normalización con la distancia entre el punto de medida y la fuente sonora.

Estos resultados son coherentes con la suposición indicada en el apartado anterior de la posible existencia de efectos de apantallamiento debidos a los vehículos aparcados en las calles. Este efecto pantalla parece disminuir conforme nos acercamos a la fachada o conforme incrementamos la altura de medida.

Tal y como se indicaba al inicio del estudio, la norma ISO 1996-2 y la Directiva Europea (EC, 2002; ISO 1996-2, 2007) establecen la posibilidad de realizar medidas a 1.5 y 4 m sin indicar correcciones al respecto. Por lo que se puede pensar que no existan diferencias significativas. A tenor de las diferencias obtenidas en los análisis anteriores para 1.5 y 4 m, esto no parece suceder y por ello, se realizó un estudio más detallado para analizar la influencia de la altura en los valores sonoros, cuyos resultados se muestran en el siguiente apartado.

3.3.3 ESTUDIO DEL EFECTO DE LA ALTURA DE MEDIDA (GRUPO C)

Para este estudio de la influencia sobre los niveles sonoros debido a la variación de la altura de medida, se situaron los sonómetros fijo y móvil a una distancia de 3 m de la fachada. El sonómetro fijo se situó a una altura de 4 m. y el sonómetro móvil a unas alturas de 1.2, 1.5, 2 y 6 m, correspondientes a las configuraciones de 1 a 4 (Grupo C). En la Tabla 3.6 se muestran los valores promedio y su error típico para las diferencias en banda ancha entre las medidas realizadas con los dos sonómetros en las cuatro configuraciones a una distancia de 3 m de la superficie reflectante.

Grupo	Config.	Distancia/ Altura (m)		$\bar{x} [Leq(Sm) - Leq(Sr)] \pm \sigma_{\bar{x}}$ (dBA) (p-valor)	
		Móvil (Sm)	Fijo (Sr)	Sin normalización por distancia a la fuente sonora	Con normalización por distancia a la fuente sonora
C ($d_{FACH.} = 3.0$ m)	1	1.2	4.0	-0.7 ± 0.2 (**)	-0.9 ± 0.2 (**)
	2	1.5	4.0	-0.8 ± 0.3 (*)	-1.0 ± 0.3 (**)
	3	2.5	4.0	-0.2 ± 0.1 (*)	-0.4 ± 0.1 (**)
	4	6.0	4.0	0.4 ± 0.2 (n.s.)	0.7 ± 0.2 (*)

Tabla 3.6. Valores promedio, error típico y significación de los valores promedio (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) de las diferencias en banda ancha entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo C.

Los símbolos (*), (**), (***) indican el nivel de significación de las diferencias ($p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, y $p \leq 0.001$, respectivamente). (n.s.) indica diferencias no significativas ($p > 0.05$).

Atendiendo a los resultados mostrados en la Tabla 3.6, si nos fijamos, en primer lugar, en la columna de diferencias sin realizar ninguna normalización con la distancia del sonómetro a la fuente, observaremos que los valores obtenidos poseen signos diferentes a lo esperable, si consideramos, simplemente la cercanía a la fuente conforme disminuimos la altura de medida. Si realizamos una normalización con la distancia a la fuente, tomando como referencia la altura de 4 m, este hecho no sólo permanece inalterado, sino que se incrementa. Fijémonos que el equipo de medida, en promedio, ha medido más conforme se incrementa la altura, lo que representa una mayor distancia a la fuente. Además, si analizamos la significación de estas diferencias entre el sonómetro móvil y el sonómetro de referencia, todas presentan diferencias significativas con respecto al valor nulo en el caso de los resultados con normalización de distancia a la fuente.

A continuación, para estudiar con más detalle las diferencias observadas en banda ancha y analizar las causas, se realizó el análisis de los valores medios de las diferencias y su significación en bandas de octava. Los resultados se muestran en la Tabla 3.7.

Grupo	Distancia a fachada (m)	h_{Sm} (m)	Configuración	$\bar{x} [Leq(Sm) - Leq(Sr)]$ (dB) (p-value)							
				Frecuencia (Hz)							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C	3.0	1.2	Sin norm.	1.54 (***)	1.53 (***)	0.58 (n.s.)	-0.55 (**)	-0.80 (**)	-1.47 (***)	-1.22 (***)	-1.09 (n.s.)
			Con norm.	1.32 (**)	1.31 (***)	0.36 (n.s.)	-0.77 (**)	-1.02 (***)	-1.69 (***)	-1.44 (***)	-1.31 (*)
		1.5	Sin norm.	1.63 (***)	1.30 (***)	0.27 (n.s.)	-0.51 (*)	-1.09 (***)	-1.65 (***)	-1.23 (**)	-1.06 (n.s.)
			Con norm.	1.42 (***)	1.09 (***)	0.06 (n.s.)	-0.72 (**)	-1.30 (***)	-1.86 (***)	-1.44 (***)	-1.27 (*)
		2.5	Sin norm.	1.07 (***)	0.91 (***)	0.07 (n.s.)	-0.36 (**)	-0.36 (**)	-0.20 (n.s.)	-0.36 (*)	-0.59 (*)
			Con norm.	0.92 (***)	0.76 (***)	-0.08 (n.s.)	-0.51 (***)	-0.51 (***)	-0.35 (*)	-0.51 (*)	-0.74 (*)
		6.0	Sin norm.	-0.52 (*)	-0.03 (n.s.)	0.71 (n.s.)	0.27 (n.s.)	0.31 (n.s.)	0.35 (*)	0.07 (n.s.)	-0.60 (***)
			Con norm.	-0.24 (n.s.)	0.26 (n.s.)	0.99 (*)	0.55 (n.s.)	0.59 (n.s.)	0.63 (***)	0.35 (*)	-0.31 (n.s.)

Tabla 3.7. Valores promedio de las diferencias en bandas de octava entre las medidas realizadas con dos sonómetros en las cuatro configuraciones del grupo C y significación de los valores promedio con respecto al valor nulo (prueba de los rangos con signo de Wilcoxon).

Los símbolos (*), (**), (***) indican el nivel de significación de las diferencias ($p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, y $p \leq 0.001$, respectivamente). (n.s.) indica diferencias no significativas ($p > 0.05$).

En los resultados mostrados en la Tabla 3.7, se observa cómo existe una frecuencia de transición, correspondiente a la banda de 250 Hz. Para frecuencias inferiores a ella el efecto de apantallamiento es esperable que sea poco importante, lo que es coincidente con los resultados encontrados. Obsérvese como, para esas bandas, el sonómetro más bajo presenta correcciones de signos coincidentes con los fenómenos físicos esperables. Mientras que para frecuencias superiores a 250 Hz, los efectos de apantallamiento resultan de importancia y el sonómetro de mayor altura mide valores mayores de los niveles sonoros. Este hecho se mantiene incluso para la comparación entre la configuración de medidas a 4 y 6 m de altura, aunque en muchas de las bandas las diferencias entre ambos equipos de medida no llegan a ser significativamente diferentes de cero.

Por tanto, creemos que el incremento de altura implica una disminución de un posible efecto de apantallamiento asociado a las líneas de aparcamiento que suelen existir en la mayoría de las calles de nuestras ciudades. Este efecto, que hemos ido indicando en los grupos de medida anteriores para explicar los resultados obtenidos, parece confirmarse en este apartado. Teniendo en cuenta este hecho, sus implicaciones no afectan únicamente al diseño de una buena sistemática de medida en las ciudades para conseguir resultados normalizables a una distancia a fachada o comparables entre diferentes puntos de medida; también nos indica que, es muy posible que los resultados que se obtienen en los mapas de ruido realizados mediante los software de simulación bajo la aplicación de la Directiva Europea sobre Ruido no hayan tenido en cuenta estos efectos.

Para avanzar en el conocimiento de los efectos encontrados sin las limitaciones que podemos encontrar en la realidad urbana, en la que no se pueden variar a nuestro antojo las diferentes variables influyentes, ni encontrar todos los puntos de medida necesarios para comprobar las diferentes hipótesis que nos permitirían entender los resultados hallados, parece que sería bastante adecuado realizar simulaciones precisas del comportamiento del campo sonoro mediante métodos numéricos como, por ejemplo, BEM (Boundary Elements Method), FEM (Finite Elements Method) o MFS (Method of Fundamental Solutions).

3.4 CONCLUSIONES

Para las situaciones normales de medida en el ámbito urbano, teniendo en consideración los requerimientos indicados por la norma ISO 1996-2 en su anexo B, hemos estudiado las correcciones necesarias a realizar para que las medidas llevadas a cabo bajo diferentes condiciones de posición del equipo respecto a la fachada puedan ser comparables entre diferentes puntos de medida.

Para estudiar el efecto de reflexión en la fachada se ha considerado una distancia de referencia a la fachada de 2 m y para estudiar el efecto de medir a diferentes alturas respecto al suelo se ha considerado una altura de referencia de 4 m. Estos valores fueron comparados con los valores sonoros registrados en los sonómetros móviles, localizados a una distancia entre 0 y 3 m de la fachada y a una altura entre 1.2 y 6 m. Los valores medios de las diferencias sonoras en banda ancha y en bandas de octava entre ambos

sonómetros fueron analizados descriptivamente e inferencialmente a través de la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon. Estos análisis han mostrado que:

- La consideración de una distancia de referencia respecto a la fachada, como indica la norma ISO 1996-2, resulta esencial para que los resultados de las medidas en ciertas condiciones puedan ser comparables a los medidos en otros puntos o en otras condiciones.
- Podría resultar adecuado, para la comparación de los resultados de las medidas sonoras en diferentes entornos urbanos y a diferentes distancias de la fachada, y para evaluar mediante medidas de manera precisa el campo sonoro incidente en una fachada, realizar correcciones no sólo de reflexión en fachada, sino también de distancia a la fuente.
- Se comprueba la existencia de diferencias significativas, para las dos alturas estudiadas, entre el sonómetro situado sobre la fachada de los edificios y el colocado a 2 m de distancia. Pero, aunque consideremos la existencia de un efecto de distancia a la fuente, los valores medidos para las diferencias entre ambos sonómetros son inferiores a los que corresponderían conforme a lo indicado por la norma ISO 1996-2.
- Los análisis en bandas de octava de los valores medios de las diferencias sonoras muestran la existencia de un efecto de apantallamiento, debido a las líneas de estacionamiento de vehículos, para las ondas sonoras con longitudes de onda aproximadamente iguales o inferiores al tamaño característico de un vehículo. Posiblemente esta sea una causa de importancia para que las correcciones a aplicar por reflexión de fachada en las medidas en el ambiente urbano existente en una ciudad sean inferiores a las indicadas por la norma ISO-1996-2. Este efecto apantallamiento disminuye de forma significativa, con el incremento de altura.
- La norma ISO 1996-2 establece un único valor de corrección para el rango de distancias de 0.5 a 2 m de la fachada. Sin embargo, a tenor de los resultados obtenidos en las medidas “in situ” llevadas a cabo en este capítulo, en los que se encuentran diferencias de niveles a tener en cuenta entre micrófonos situados dentro de este rango, parece necesario ampliar el número de estudios en este sentido.

- La norma ISO 1996-2 no contempla la realización de medidas a más de 2 m de la fachada posterior sin cumplirse la condición de campo libre (Ec. 2.6). No obstante, en este trabajo se han realizado medidas “in situ” con dos micrófonos midiendo simultáneamente a 2 y 3 m de la superficie reflectante y los resultados muestran que la diferencia de niveles entre ambos, tanto a 1.5 como a 4 m de altura, son pequeñas. No siendo significativas en la configuración de medida a 1,5 m de altura. Esto parece indicar que, incluso en distancias superiores a los 2 m que indica la norma respecto a la fachada, es posible encontrarse con una suma de energía entre el campo incidente y el reflejado y, por tanto, se abre otra posibilidad no contemplada hasta el momento, que el campo sonoro incidente en fachada pueda estudiarse de forma directa con medidas a distancias superiores a los 2 m.

CAPÍTULO 4:

ENSAYOS MEDIANTE SIMULACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

Los mapas de ruido, tal y como viene recogido en la Directiva Europea 2002/49/CE (EC, 2002), son la principal herramienta para la evaluación a la exposición de la población al ruido ambiental. Como se ha comentado en capítulos anteriores, para la obtención de un mapa de ruido pueden considerarse diferentes estrategias. Una de ellas es mediante métodos de cálculo, realizados generalmente mediante diferentes opciones de software comercial, mientras que una segunda opción son los estudios mediante la realización de medidas “in situ”.

Una de las referencias para la evaluación de la contaminación acústica en ambientes exteriores son las normas internacionales ISO 1996-1:2003 e ISO 1996-2:2007 (ISO 1996-1, 2003; ISO 1996-2, 2007), que han servido como base para la elaboración de la legislación tanto nacional como internacional, ya que, entre otros aspectos, describen aspectos relacionados con el cálculo y el procedimiento de medición del nivel de presión sonora en ambientes exteriores. Otras referencias en este sentido son las normas ANSI S12.9-1, ANSI S12.9-2, ANSI S12.9-3 y ANSI 12.18 (ANSI S12.9-1, 1988; ANSI S12.9-2, 1992; ANSI S12.9-3, 1993; ANSI 12.18, 1994), que describen los procedimientos para la descripción y valoración de sonido ambiental mediante medidas y, en el último de los casos, para la medida del nivel de presión sonora en el medio exterior.

En cualquier caso, si se pretende determinar el nivel sonoro incidente en las fachadas de las viviendas en un determinado entorno urbano, es conocido que este parámetro depende de múltiples factores, tanto temporales (Garg et al., 2016; Barrigón Morillas et al., 2015; Rey Gozalo et al., 2015; Prieto Gajardo et al., 2014; Van Renterghem et al., 2012; Mehdi et al., 2011) como espaciales (Mateus et al., 2015b; Jagniatinskis et al., 2014; Memoli et al., 2008; Picaut et al., 2005). De forma que, para que esta evaluación sea adecuada, resultará necesario tener en cuenta, no sólo las características de la fuente; sino, además, la situación del punto de medida con relación a la fuente y al entorno urbano específico de cada calle o fachada a evaluar; por tanto, el efecto que, sobre el resultado de la medida, van a tener los diferentes elementos o configuraciones del entorno urbano (Barrigón Morillas et al., 2016).

En relación con este tema, varios investigadores consideran el diseño urbano de las calles como un importante factor para reducir la exposición de la población al ruido de

tráfico. Echevarria et al. (Echevarria Sánchez GM et al., 2016) estudian el impacto de la forma de la fachada y la geometría de la calle en la exposición al ruido de la población. En función de la forma del edificio, se producen variaciones de hasta 7.0 dBA sobre los peatones; también se obtienen reducciones sustanciales de la exposición al ruido en las ventanas en relación con el diseño de edificios-fachada. Jang et al. (Jang HS et al., 2015) utilizan un método de modelo a escala para cuantificar la reducción de ruido en los edificios residenciales debido a la vegetación en fachadas. Los resultados muestran que la reducción del ruido es inferior a 2 dB al nivel de los peatones en una calle de tipo cañón de dos carriles. Sakamoto et al. (Sakamoto S. et al., 2015) realizan un estudio numérico y experimental sobre el efecto de apantallamiento acústico de los aleros o cumbreras situadas en fachadas de edificios, llegando a la conclusión de que las de tipo inclinado son eficaces como medida de reducción de ruido.

Del mismo modo, otros investigadores han llevado a cabo estudios de la influencia de elementos comunes en entornos urbanos sobre la propagación del campo sonoro. En esta línea, el estudio llevado a cabo por Van Renterghem et al. (Van Renterghem et al., 2014) trata de evaluar el efecto de apantallamiento producido por presencia de setos en vías urbanas de diferentes ciudades de Europa. Para ello utiliza como fuente sonora tanto el tráfico rodado de vehículos ligeros como el ruido blanco emitido por un altavoz omnidireccional. En el trabajo se analizan setos de diferentes dimensiones mediante medidas “in situ” y métodos informatizados. Las conclusiones obtenidas indican que los setos analizados proporcionan una pequeña reducción del nivel sonoro para vehículos ligeros a bajas velocidades. Las medianas de los valores experimentales obtenidos para la reducción sonora en cada uno de los casos oscilan entre 1.1 y 2.8 dBA, dependiendo de las características del seto y de otros parámetros como la velocidad del vehículo y de la altura del receptor.

Por su parte, el trabajo de Montes et al. (Montes González, D. et al., 2015) muestra un estudio del efecto de la variación de la altura y de la distancia a la fachada posterior del equipo de medida realizado. Para ello, realiza medidas simultáneas mediante dos equipos en varios puntos de una ciudad con diferente geometría urbana. A partir del análisis de las diferencias del nivel sonoro en bandas de octava, los resultados muestran la existencia de un posible fenómeno de apantallamiento asociado a la presencia de líneas de aparcamientos de vehículos en los laterales de las vías urbanas, cuyos efectos resultan de importancia a partir de 250 Hz, de manera que el sonómetro de mayor altura

registra mayores valores del nivel sonoro. Este hecho se mantiene incluso para la comparación entre la configuración de medidas a 4 y 6 m de altura.

Las características de la fuente sonora es otro aspecto de considerable relevancia para valorar los resultados obtenidos mediante la realización de medidas in situ y simulaciones. En este sentido, la norma ISO 1996-2 establece algunas generalidades a tener en cuenta para todo tipo de fuentes sonoras, añadiendo posteriormente algunas consideraciones para los casos particulares de ciertos tipos de fuentes, como tráfico rodado, ferroviario, aéreo, etc. Sin embargo, todas ellas son relativas a la representatividad de la medida respecto a las condiciones medias de la fuente en el entorno a evaluar, de forma que esta norma no entra a valorar el efecto que cada uno de los parámetros de la fuente puede tener sobre los resultados de las medidas.

Puesto que en nuestro caso estamos trabajando con el tráfico rodado de vehículos como fuente sonora, el caso de los mapas de ruido informatizados puede resultar de interés un parámetro tal como la altura asociada a la fuente sonora. En este sentido, el método desarrollado por Federal Highway Administration para el diseño de barreras acústicas (FHWA, 1982) propone diferentes alturas para la fuente sonora puntual equivalente a una fuente lineal en función del tipo de vehículos, siendo de 2.44 m para vehículos pesados, 0.7 para vehículos de peso medio y 0 m para automóviles.

Posteriormente, el investigador S.A.L. Glegg realizó un estudio (Glegg et al., 1990a) en el que se pretendía determinar la altura de la fuente sonora puntual equivalente a una fuente lineal en el caso de una carretera. Para ello utilizó el método descrito en otro trabajo complementario (Glegg et al., 1990b) y llevó a cabo una serie de medidas colocando un array de siete micrófonos sobre una superficie reflectante, cada uno de ellos a diferentes alturas (0.02, 0.07, 0.12, 0.2, 0.4, 0.8 y 1.6 m) y siempre a una distancia de 7.5 m de la fuente. Los ensayos fueron realizados en seis días diferentes con un total de 98 vehículos (37 camiones pesados, 36 camiones con un peso medio y 25 automóviles) circulando a una velocidad constante (en el rango entre 45 mph y 67 mph) en una carretera recta y sin pendiente. Las conclusiones del trabajo indican que la altura de la fuente sonora puntual equivalente a una fuente lineal obtenida es de 1.2 m para camiones pesados, 0.7 m para camiones de peso medio y 0.6 m para automóviles.

En este mismo sentido, en el informe desarrollado por H.G. Jonasson en relación con el modelo de propagación Nord 2000 para tráfico rodado (Jonasson HG, 2001), se propone que cada vehículo sea representado por seis fuentes puntuales, tres de ellas situadas a alturas de 0.01, 0.15 y 0.30 m para modelizar el ruido de rodadura, de motor, del tubo de escape y aerodinámico. Para las tres fuentes restantes se proponen alturas variables en función del tipo de vehículo. Posteriormente, un nuevo informe es publicado para el modelado de fuentes sonoras (Jonasson HG, 2006), relacionado con el método Harmonoise (Harmonoise, 2005). En este documento se propone que cada vehículo sea representado por dos fuentes puntuales, una de ellas simulando la contribución del ruido de rodadura (0.01 m) y la otra, el de ruido de propulsión (0.30 m para vehículos ligeros y 0.75 m para vehículos pesados). Por su parte, la norma francesa NF S 31-133 (NF S 31-133, 2007), recomendada por la Comisión Europea para ruido de tráfico en la Directiva 2002/49/EC (EC, 2002), propone que para la fuente de tráfico rodado se utilicen fuentes puntuales elementales con una altura de 0.5 m. Más tarde, la Directiva 2015/996 (EC, 2015) propuso unos métodos comunes para la evaluación del ruido que sustituyen a los indicados en la Directiva 2002/49/EC, en los cuales se propone la utilización de una fuente equivalente para vehículos ligeros, pesados y de dos ruedas a una altura de 0.05 m sobre el suelo.

Otro aspecto de interés relativo a la fuente sonora en los métodos informatizados para el caso de ruido de tráfico es dónde se debe situar la fuente equivalente en relación con el eje longitudinal de vehículos cuando circula por un carril. En este sentido, existe un informe sobre modelización acústica de fuentes para tráfico rodado de vehículos que utiliza el eje longitudinal del vehículo situado en las ruedas más cercanas como punto de referencia a estos efectos de modelización (Jonasson HG, 2006). Por otra parte, la Directiva 2015/996 (EC, 2015) indica que lo ideal es representar cada carril con una línea de fuentes ubicada en el centro de cada carril, que por tanto se correspondería con el centro del vehículo en sentido longitudinal. No obstante, la propia Directiva también considera como posibles opciones la utilización de una línea de fuentes en el medio de una vía de doble sentido o de una línea de fuentes por cada calzada en el carril exterior de las vías con varios carriles.

Son numerosos los estudios de investigación realizados sobre la propagación de campo sonoro, principalmente en relación con aspectos como el ruido del tráfico y del entorno urbano (Echevarria Sanchez GM et al., 2016; Wang X et al., 2015).

Una amplia variedad de métodos han sido empleados para estudiar el comportamiento del campo sonoro en distintos tipos de entornos: el método de elementos de frontera (BEM) (Prieto Gajardo C. et al., 2015; Shimizu T et al., 2015; Castro, I. et al., 2012; Tadeu, A. et al., 2010), el método de elementos finitos (FEM) (Chai Y.B. et al., 2016; Yao, L.Y. et al., 2010; Richoux, O. et al., 2010), el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) (Asakura T., 2013; Van Renterghem T. et al., 2013; Albert D.G., 2010) o el método de las soluciones fundamentales (MFS) (Godinho L. et al., 2015; Karageorghis A. et al., 2012) son algunos ejemplos de los métodos numéricos más comunes empleados en este campo de investigación.

En este capítulo se presenta un estudio del fenómeno de apantallamiento asociado a la presencia de líneas de aparcamientos de vehículos en los laterales de las vías urbanas y su posible influencia en la precisión de los resultados obtenidos para el nivel sonoro incidente en las fachadas de las viviendas cuando se realizan los mapas estratégicos de ruido mediante simulación software. Para ello, como primera aproximación al problema, se ha realizado un modelo informatizado mediante el método de elementos de frontera (BEM) en dos dimensiones, en el que se han ido modificando varios parámetros que pueden tener relevancia en la propagación del sonido en ambientes exteriores y que están relacionados principalmente con la geometría de la calle y aspectos de la fuente sonora considerada, en este caso el tráfico rodado de vehículos.

4.2 METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta la descripción del problema y el estado de la cuestión incluido en la introducción, en este apartado se definen la metodología y los parámetros utilizados para el análisis. También se describe el modelo numérico utilizado, basado en el método de elementos de frontera (BEM), y se hace un resumen del análisis realizado.

4.2.1 FORMULACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS DE FRONTERA (BEM)

Como se indicaba anteriormente, en este capítulo se estudia el fenómeno de apantallamiento asociado con la presencia de líneas de vehículos estacionados a los lados de las vías urbanas. Para este propósito, se ha elaborado un modelo numérico utilizando el método de elementos de frontera (BEM) en dos dimensiones.

El modelo BEM utilizado en este trabajo está formulado en el dominio de la frecuencia, para lo cual se resuelve la ecuación de Helmholtz (Ec. 4.1) que habitualmente se utiliza en análisis acústico.

$$\nabla^2 p(x, \omega) + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 p(x, \omega) = 0 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde $p(x, \omega)$ es la presión sonora en el punto x para una frecuencia de excitación ω

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \text{ para problemas 3D y } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \text{ para problemas 2D.}$$

Cuando se trabaja con problemas 2D, el efecto de una fuente armónica situada en la posición x_s se puede escribir como:

$$G(x, x_s, \omega) = \frac{-i}{4} H_0^{(2)}(k_\alpha r) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde $r = \|x - x_s\|$ y $k_\alpha = \frac{\omega}{c}$.

El problema a resolver en este trabajo se refiere a un medio acústico uniforme limitado por una superficie plana horizontal, simulando un suelo acústicamente duro como es el pavimento de una vía urbana, y por una superficie vertical, simulando la fachada de un edificio. Además, dentro del medio acústico se colocan algunos objetos que obstaculizan la propagación del sonido. De este modo, el campo sonoro definido por la ecuación 4.2 necesita ser reformulado para satisfacer las condiciones de contorno: velocidades normales nulas en la superficie plana horizontal del suelo y en la fachada vertical. Bajo estas condiciones, la función de Green se puede escribir usando el método de la fuente imagen como:

$$G_4(x, x_0, \omega) = \sum_{j=1}^{NS} \frac{-i}{4} [H_0(k_\alpha r_j)] \quad (\text{Ec. 4.3})$$

En la cual $NS=4$,

$$r_1 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y+y_0)^2}$$

$$r_3 = \sqrt{(x+x_0)^2 + (y-y_0)^2}$$

$$r_4 = \sqrt{(x+x_0)^2 + (y+y_0)^2}$$

A partir de la ecuación de Helmholtz en el dominio de la frecuencia y, aplicando el teorema de reciprocidad, se puede obtener la ecuación integral de frontera (Ec. 4.4)

$$C p(x_0, \omega) = \int_{\Gamma} q(x, \omega, \mathbf{n}) G_4(x, x_0, \omega) d\Gamma - \int_{\Gamma} H_4(x, x_0, \omega, \mathbf{n}) p(x, \omega, k_z) d\Gamma + p_{inc}(x_0, x_s, \omega) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde G representa la función de Green para la presión sonora como se definió anteriormente, y H es su primera derivada con respecto a la dirección normal a la frontera Γ ; de forma similar, p y q son respectivamente la presión y su primera derivada en la dirección normal a la frontera (\mathbf{n}), en el punto x . El factor C toma el valor $1/2$ si $x \in \Gamma$, y 1 para puntos que no están en la frontera pero sí dentro del dominio ($x \in \Omega$). $p_{inc}(X_0, X_s, \omega)$ representa el efecto de una fuente emisora dentro del medio de propagación, y también viene dada por la Ec. 4.3.

Para un problema genérico, en el cual la frontera es discretizada en N segmentos rectilíneos (elementos) de frontera, cada una de las ecuaciones anteriores se pueden definir en cada punto nodal i , y las integrales correspondientes se puede transformar en sumatorios discretos como:

$$C p(x_i, \omega) = \left[\sum_{m=1}^N q(x_m, \omega, \mathbf{n}) \int_{\Gamma_m} G(x, x_i, \omega) d\Gamma_m \right] - \sum_{m=1}^N \left[p(x_m, \omega) \int_{\Gamma_m} H(x, x_i, \omega, \mathbf{n}) d\Gamma_m \right] + p_{inc}(x_i, x_s, \omega) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde n_k representa la normal hacia el exterior al elemento k . Si, como en este caso, sólo se discretizan objetos rígidos mediante el método BEM, la ecuación 4.5 se puede simplificar, y escribirse como:

$$\sum_{m=1}^N \left[p(x_m, \omega) \int_{\Gamma_m} H(x, x_i, \omega, \mathbf{n}) d\Gamma_m \right] + C p(x_i, \omega) = p_{\text{inc}}(x_i, x_s, \omega) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Aplicando la ecuación 4.6 en cada punto nodal, se puede obtener un sistema de ecuaciones con incógnitas; su solución conduce a las presiones acústicas nodales en cada nodo del modelo de BEM. Así, estas presiones nodales van a permitir el cálculo de la presión sonora en cualquier punto dentro del dominio acústico como

$$p(x_i, \omega) = - \sum_{m=1}^N \left[p(x_m, \omega) \int_{\Gamma_m} H(x, x_i, \omega, \mathbf{n}) d\Gamma_m \right] + p_{\text{inc}}(x_i, x_s, \omega) \quad (\text{Ec. 4.7})$$

4.2.2 DEFINICIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE ANÁLISIS

Con el fin de verificar el modelo BEM desarrollado en todos aquellos aspectos relacionados con la propagación de la onda sonora, se ha seleccionado un entorno urbano que ha sido modelado y en el que se ha realizado una serie de medidas, bajo diferentes configuraciones, siguiendo las directrices de la norma ISO 1996-2, tanto las normativas, como las que indica en su anexo B (informativo). Con los resultados de las medidas y los simulados, se han obtenido las diferencias de niveles, globales y en bandas de octava, entre la posición en fachada, en campo libre y a 0.5 m de la fachada.

Posteriormente, se ha aplicado el modelo BEM a una situación en la que, a partir de una configuración geométrica de una calle de referencia, se han ido considerando diferentes hipótesis para la distancia entre la fuente sonora, la fachada del edificio y la posición del apantallamiento asociado a la presencia de una línea de aparcamientos.

En relación con la fuente sonora, se ha considerado como tal el tráfico rodado de vehículos. Al tratarse de una simulación en dos dimensiones, se ha utilizado una fuente puntual. En cuanto al espectro sonoro de la fuente, se ha tomado como referencia el espectro de ruido de tráfico propuesto en la norma EN 1793-3 (EN 1793-3, 1998).

Otro aspecto relevante relacionado con la fuente sonora es la altura de la fuente puntual. En este trabajo se han utilizado las alturas de 0.01, 0.15 y 0.30 m (Jonasson HG, 2001; Harmonoise, 2005; Jonasson HG et al., 2006), 0.05 m (EC, 2015) y de 0.5 m (NF S 31-133, 2007).

En las simulaciones, se ha situado un vehículo como si estuviese aparcado en línea, para lo que se ha utilizado un vehículo con dimensiones frontales de 1.5 x 1.5 m. Teniendo en cuenta que se trata de una simulación en dos dimensiones, se decidió no colocar las ruedas del vehículo para no obstaculizar la propagación de las ondas sonoras a través del espacio situado entre la parte inferior de la carrocería y el suelo, tal como ocurre en la realidad.

Las simulaciones se han dividido en tres bloques teniendo en cuenta algunos aspectos importantes para el diseño urbano y de los mapas de ruido que podrían influir en la distribución de los niveles sonoros en las fachadas de los edificios. En el bloque I se estudia el efecto que tiene la variación de la distancia entre el vehículo aparcado y la fuente sonora. Para ello, dada una posición fija del vehículo aparcado respecto a la fachada bajo evaluación (4 m), se ha ido variando la posición de la fuente sonora respecto al vehículo (a 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8, 16 y 24 m). En el bloque II, para una posición fija de la fuente sonora, se ha estudiado el efecto que tiene la variación de la distancia entre la fachada reflectante y el vehículo aparcado (para los valores de 1, 2, 4, 8, 16 y 24 m). En este trabajo se ha realizado para dos posiciones de la fuente respecto a la fachada (a 16 y 29.7 m). En ambos bloques se ha considerado una altura de la fuente puntual de 0.3 m. Por último, en el bloque III se estudia el efecto que tiene la variación de la altura de la fuente sonora sobre el efecto de apantallamiento, para lo cual se han considerado las alturas 0.01, 0.05, 0.15, 0.3 y 0.5 m. Las simulaciones se han realizado para dos posiciones de la fuente respecto al vehículo aparcado (a 2 y 16 m) y una distancia fija entre la fachada y el vehículo (4 m).

En los tres bloques indicados, los resultados han sido evaluados colocando una línea vertical de micrófonos receptores situados en la superficie reflectante que simula la fachada de un edificio. Estos receptores fueron situados a entre 1.5 y 8 m de altura sobre el suelo (Fig. 4.1).

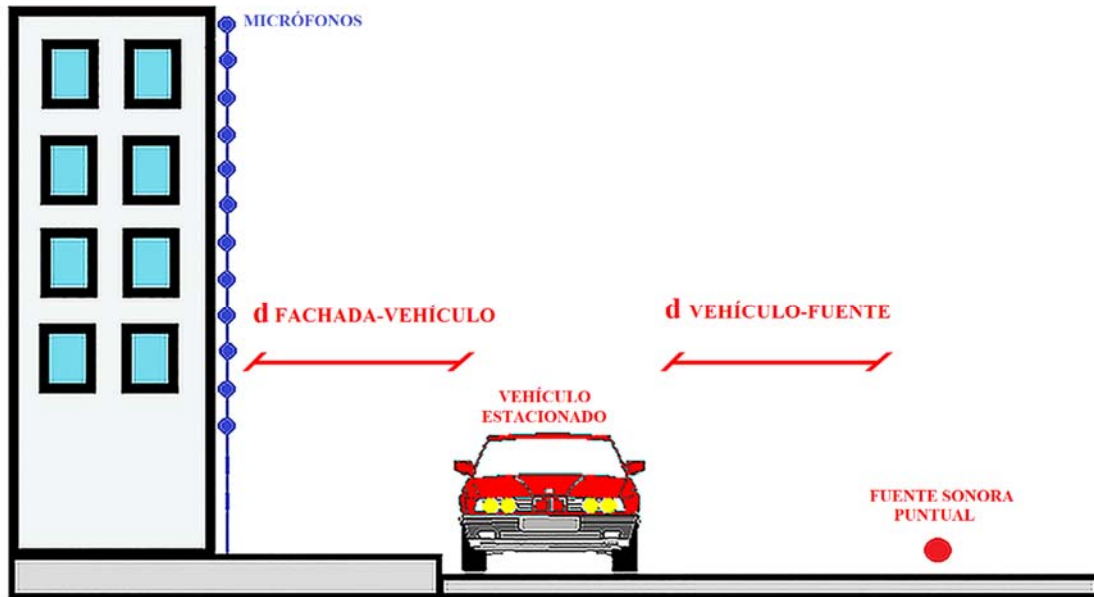


Fig. 4.1. Configuración general de las simulaciones

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1 VERIFICACIÓN DEL MODELO BEM

Inicialmente se ha realizado un proceso de verificación del modelo BEM utilizado para llevar a cabo este estudio, para lo cual se ha realizado una comparativa de los resultados obtenidos mediante medidas “in situ” en un entorno urbano con aquellos obtenidos mediante simulación. En la Fig. 4.2 se muestra un esquema del entorno de medida. Las medidas se han realizado con tres sonómetros midiendo simultáneamente a 1.5 m de altura sobre el suelo. Dos de ellos se situaron en posiciones cercanas a la fachada (Fig. 4.2 a); el primer micrófono se colocó sobre la superficie reflectante y el segundo a 0.5 m de la misma. El tercer micrófono se colocó en condiciones de campo libre (Fig. 4.2 b), a la misma distancia de la fuente que el micrófono situado sobre la fachada. En las simulaciones se ha utilizado una fuente puntual situada en el centro de todos los carriles.

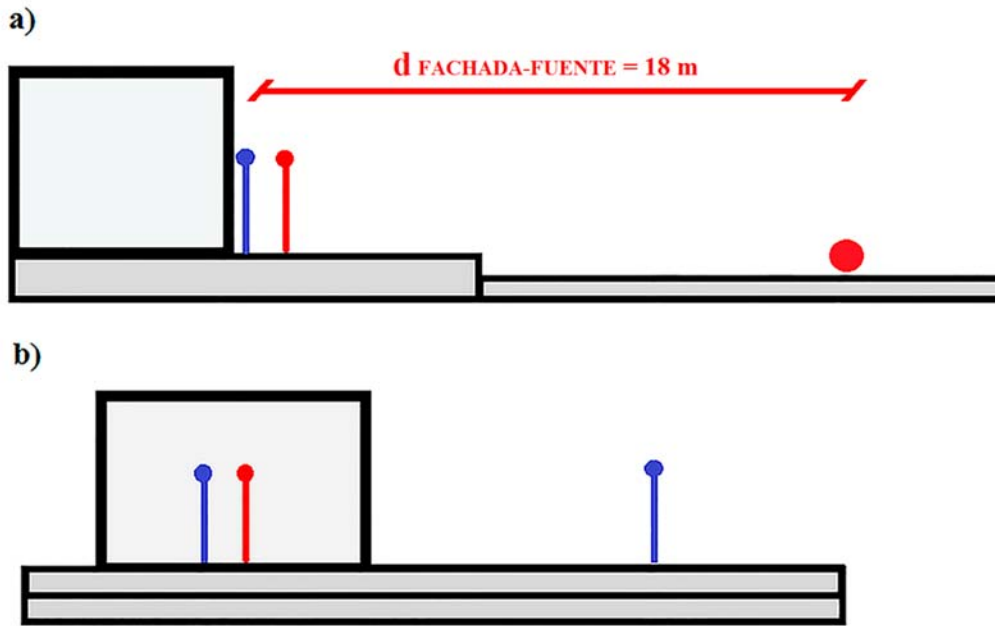


Fig. 4.2. Vista lateral a) y frontal b) del entorno urbano donde se realizaron las medidas de verificación del modelo BEM con las tres posiciones de micrófono.

En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para la diferencia del nivel equivalente mediante medidas y simulación en las diferentes configuraciones de los micrófonos. En el caso de las medidas “in situ”, la diferencia de niveles está referida al nivel equivalente promedio de cinco medidas de una duración de 5 minutos cada una.

f (Hz)	ΔL_P FACHADA-CAMPO LIBRE (dBA)						ΔL_P PROMEDIO (dBA)
	125	250	500	1000	2000	4000	
Medidas "in situ"	6.8	5.6	5.8	6.2	6.1	5.0	6.3
Simulación (ruido tráfico)	7.3	6.0	6.5	6.3	6.3	6.0	6.4

Tabla 4.1. Diferencia entre los niveles sonoros de los micrófonos situados sobre la fachada y en campo libre.

f (Hz)	ΔL_P 0.5-CAMP LIBRE (dBA)						ΔL_P PROMEDIO (dBA)
	125	250	500	1000	2000	4000	
Medidas "in situ"	4.1	0.4	2.4	2.9	3.2	2.9	2.9
Simulación (ruido tráfico)	1.6	3.1	3.1	2.9	2.7	3.0	2.9

Tabla 4.2. Diferencia entre los niveles sonoros de los micrófonos situados a 0.5 m de la fachada y en campo libre.

f (Hz)	ΔL_P FACHADA- 0.5 (dBA)						ΔL_P PROMEDIO (dBA)
	125	250	500	1000	2000	4000	
Medidas "in situ"	2.7	5.3	3.4	3.3	3.0	2.1	3.3
Simulación (ruido tráfico)	5.7	2.9	3.4	3.5	3.6	3.0	3.5

Tabla 4.3. Diferencia entre los niveles sonoros de los micrófonos situados sobre la fachada y a 0.5 m ella.

Como se puede apreciar, los resultados obtenidos para los valores globales con el modelo BEM se aproximan bastante a los obtenidos mediante medidas “in situ”. En el análisis en bandas de octavas, también se aprecia una buena correspondencia entre los valores obtenidos mediante medidas y simulación. Aunque en las bandas de 125 y 250 Hz se detectan algunas diferencias a tener en cuenta para los dos casos en el que uno de los micrófonos se sitúa a 0.5 m de la fachada. En todo caso, puede considerarse un grado de correspondencia aceptable entre los valores medidos y los resultados obtenidos mediante simulación, dado que se trata de un modelo BEM en dos dimensiones.

4.3.2 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE LA FUENTE SONORA Y LA LÍNEA DE APARCAMIENTO

En este bloque se estudia el efecto que tiene la variación de la distancia entre el vehículo aparcado y la fuente sonora ($d_{FUENTE-VEHÍCULO}$). Para ello, dada una posición fija del vehículo aparcado respecto a la fachada bajo evaluación (4 m), se ha ido variando la posición de la fuente sonora respecto al vehículo, considerando distancias de 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8, 16 y 24 m.

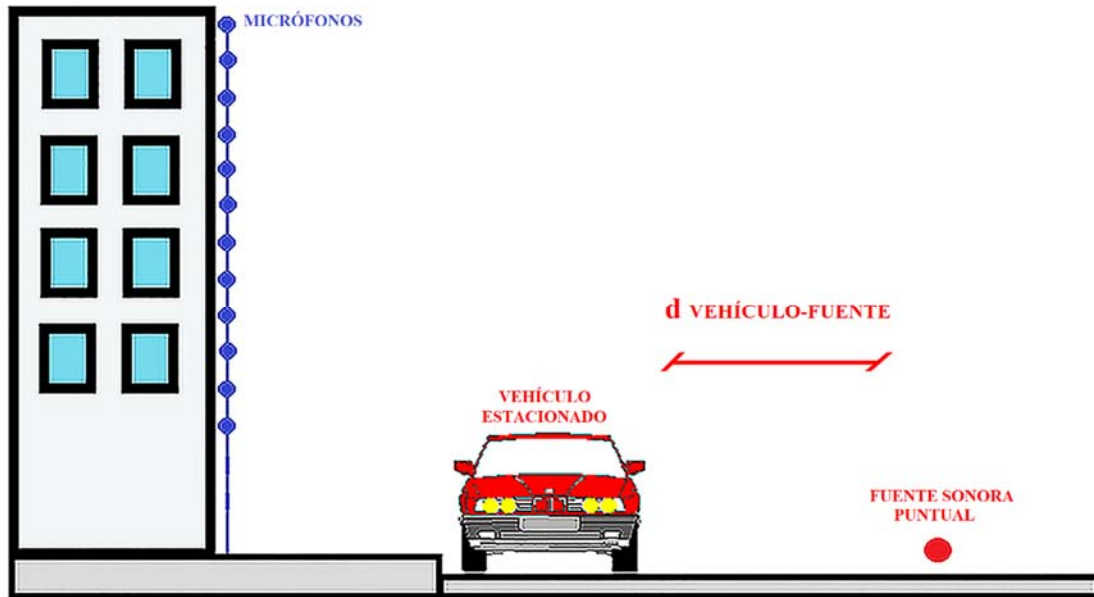


Fig. 4.3. Configuración de simulación variando la distancia entre la fuente sonora y el vehículo aparcado

Los resultados obtenidos en el array vertical de micrófonos situado en la fachada para la diferencia de niveles globales entre la configuración sin vehículo respecto a aquella con vehículo, para diferentes distancias entre la fuente sonora y el vehículo, se muestran en la Fig. 4.4.

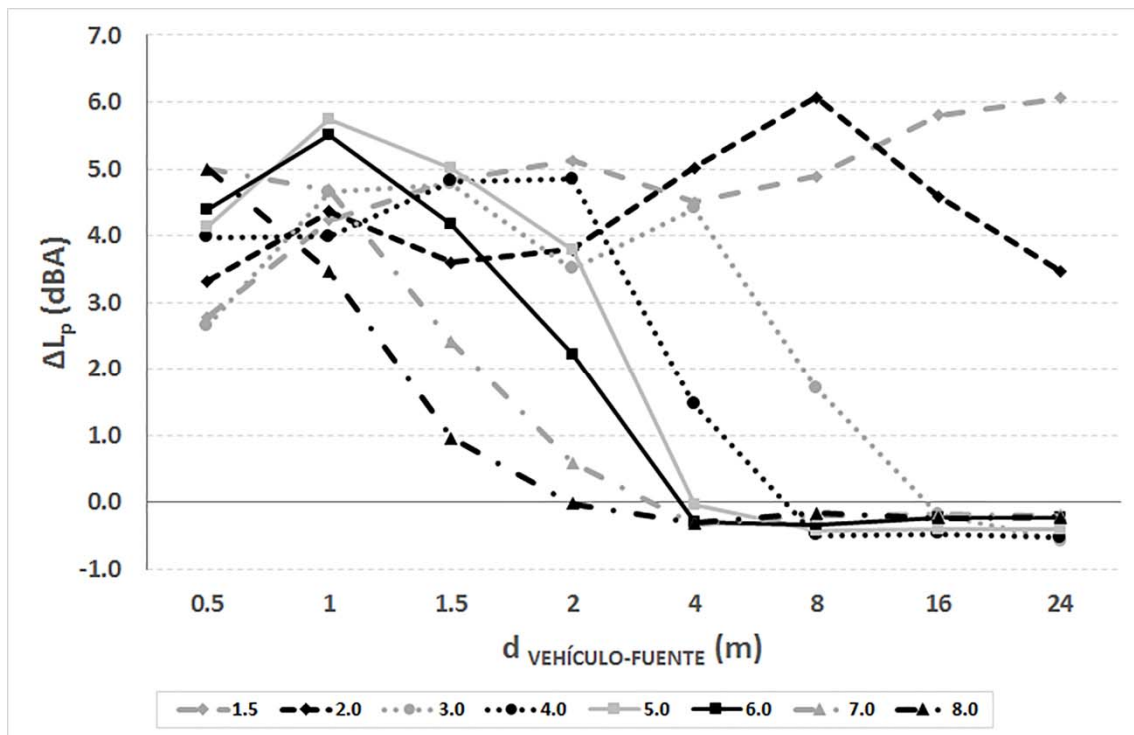


Fig. 4.4. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono

De los resultados mostrados en la Fig. 4.4 se pueden extraer varias conclusiones:

- a) Para distancias entre la fuente sonora y la línea de aparcamientos no superiores a 4 m, y para varias alturas del micrófono, existen diferencias importantes entre las situaciones con y sin un vehículo estacionado. Por ejemplo, más de 3 dB para 2 m de altura. En el caso de distancias pequeñas entre la fuente y los vehículos, estas diferencias importantes tienen lugar incluso a la altura máxima de 8 m.
- b) En los casos de los receptores situados a alturas de 1.5 y 2 m, las curvas de las diferencias de niveles tienen valores, para todas las distancias, de entre 3 y 6 dB. A estas alturas, se detecta un importante efecto de pantalla a todas las distancias estudiadas entre la fuente y los vehículos.
- c) Para el resto de las alturas, una disminución del efecto pantalla se puede observar a medida que aumenta la distancia entre la fuente y los vehículos estacionados. Como es de esperar en el caso de una barrera, se produce una reducción de este efecto a bajas alturas cuando aumenta la distancia.
- d) Las diferencias en el comportamiento del efecto barrera entre las alturas de 1.5 y 4 m o más es de gran importancia en el caso de la evaluación del impacto del ruido sobre la población a través de medidas en un entorno urbano. Téngase en consideración que para cualquier distancia mayor de 4 m, las diferencias entre los resultados del efecto de pantalla a 1.5 y 4 m de altura son muy importantes. Se debe tener en cuenta que estas configuraciones se corresponden con muchas avenidas secundarias de ciudades de todo el mundo.
- e) Por otra parte, se observa una diferencia significativa entre los valores obtenidos a 4 y 8 m de altura en el intervalo de distancias entre la fuente y el vehículo estacionado de 1.5 a 2 m. Debemos tener en cuenta que estas configuraciones corresponden a muchas de las calles de las ciudades europeas con edificios de al menos tres plantas. En este sentido, es importante indicar que 4 m es la altura de referencia para los cálculos de los mapas de ruido utilizando modelos informatizados, para comparar los cálculos y las mediciones y, por consiguiente, para validar los modelos de cálculo.
- f) Otro resultado interesante se observa en la Fig. 4.4. Tienen lugar dos efectos combinados con una tendencia opuesta: el efecto de apantallamiento indicado anteriormente y un efecto de transmisión sonora a través del hueco situado entre el

suelo y la parte inferior del vehículo. Estos efectos opuestos causan un máximo del efecto pantalla para una altura dada que no coincide con la menor distancia fuente-vehículo. Esta distancia a la se observa el máximo disminuye a medida aumenta la altura del receptor situado en la fachada. Obsérvese que a 8 m de altura no existe un efecto apreciable de la transmisión de energía sonora a través del hueco y la curva del efecto apantallamiento es la que se espera para una barrera.

A continuación, se analiza el comportamiento en bandas de octava para algunas alturas seleccionadas (1.5, 4 y 8 m). En primer lugar se muestran, en la Fig. 4.5, los resultados obtenidos para la diferencia de niveles en un receptor situado en fachada a una altura de 1.5 m:

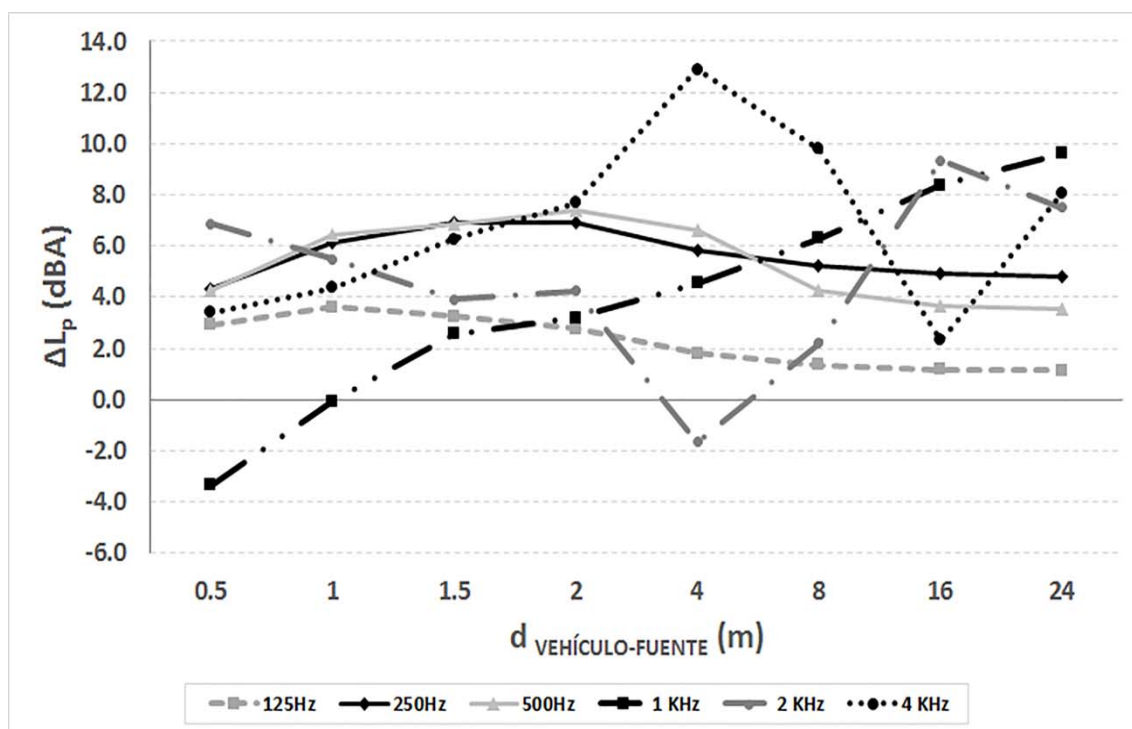


Fig. 4.5. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 1.5 m de altura

A partir de los resultados mostrados en la Fig. 4.5, se pueden extraer algunas conclusiones. A nivel global, se pueden observar importantes efectos de apantallamiento para todas las bandas de octava en todas las distancias consideradas entre la fuente sonora y los vehículos estacionados. En las bandas de octava de 125, 250 y 500 Hz, se observa una tendencia similar. Sin embargo, los valores de la diferencia de niveles

sonoros a 250 y 500 Hz son aproximadamente 3 o 4 dBA superiores a los registrados a 125 Hz para la mayoría de las distancias fuente-vehículo analizadas. En la banda de octavas de 1kHz, se observa un incremento de la diferencia de niveles sonoros a medida que la distancia fuente-vehículo aumenta. El valor de -3.3 dB a 0.5 m de la fuente puede ser debido a la configuración geométrica existente entre el vehículo emisor, el vehículo estacionado y el hueco existente entre el suelo y la parte inferior de este último vehículo. Este resultado es particularmente interesante y no se detecta en otras frecuencias, por lo que creemos que debe ser analizado con más detalle en los siguientes estudios. Finalmente, en las bandas de 2 y 4 kHz, se observa un patrón similar al de las bandas de octava de 250 y 500 Hz, aunque aparecen algunos fenómenos de interferencia.

En la Fig. 4.6 se muestran los resultados obtenidos para la diferencia de niveles sonoros en bandas de octava en un receptor situado en la fachada a una altura de 4 m. El efecto de apantallamiento que se produce cuando la distancia entre la fuente y la línea de aparcamiento se encuentra entre 0.5 y 2 m para las bandas de octava de 1, 2 y 4 kHz es notable. Adicionalmente, se puede comprobar la importante diferencia que produce entre el comportamiento a esta altura en la banda de octava de 1 kHz con respecto a 1.5 m (Fig. 4.5). Además, los resultados obtenidos en las bandas de 250 y 500 Hz pueden indicar la existencia de efectos de interferencia entre las ondas directas y reflejadas.

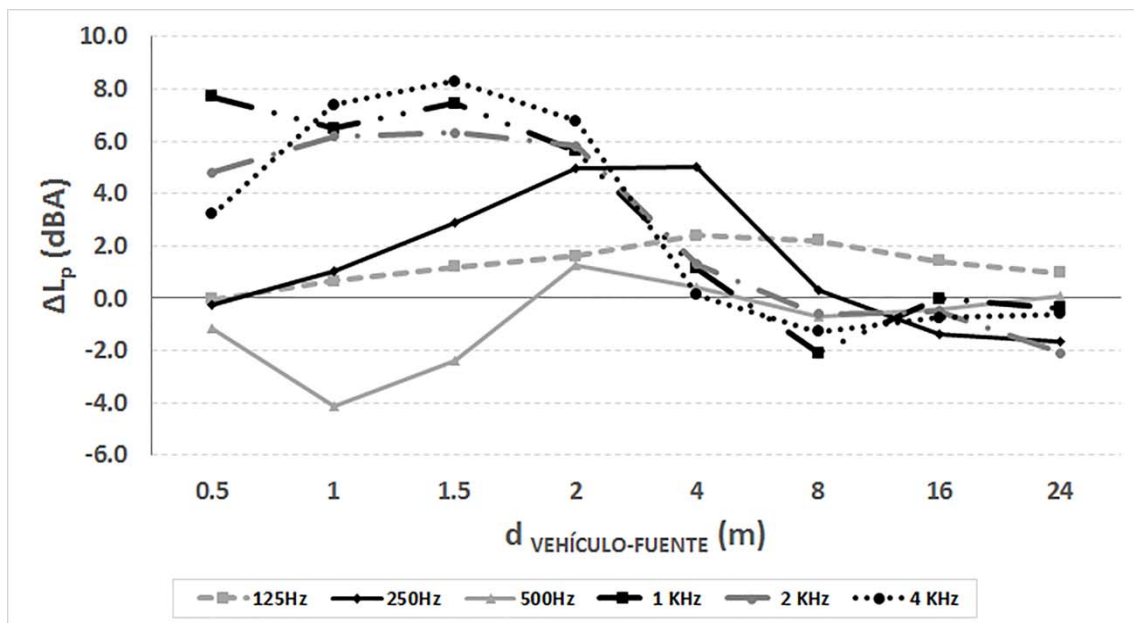


Fig. 4.6. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 4 m de altura

A 8 m de altura (Fig. 4.7), se puede observar que, a partir de una distancia de 2 m, el efecto de los vehículos estacionados se hace despreciable en la mayoría de las bandas de octava. En cambio, en el caso de pequeñas distancias entre la fuente y la línea de estacionamiento, este efecto es importante en casi todas las bandas.

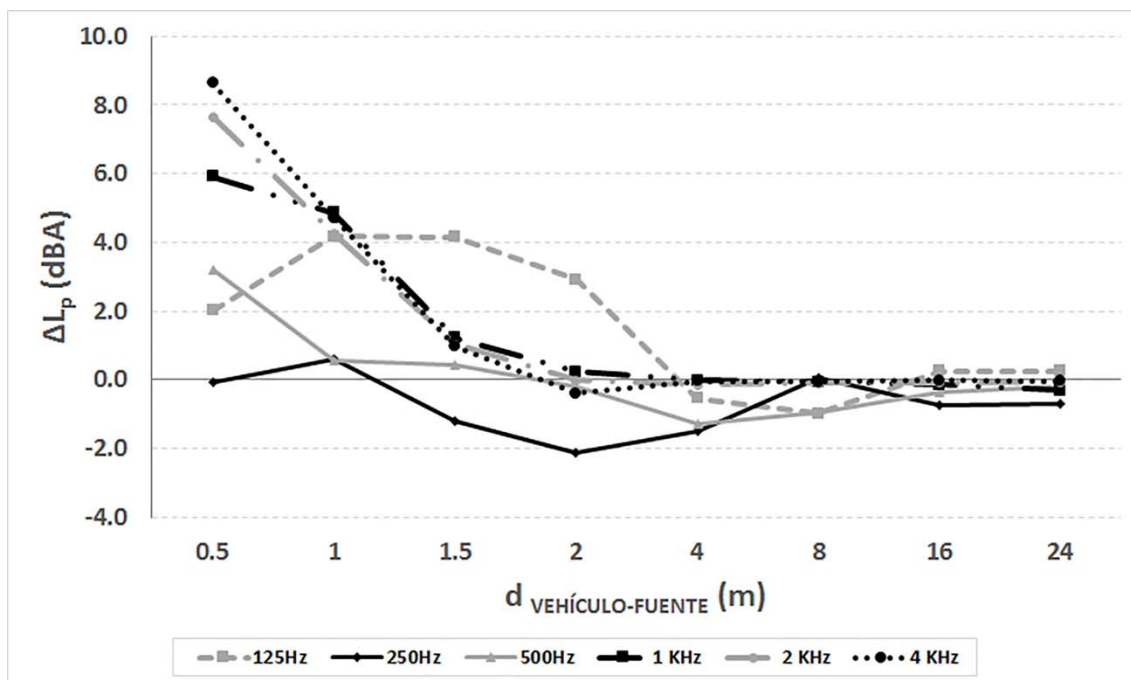


Fig. 4.7. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 8 m de altura

A modo de ejemplo, los resultados de las simulaciones realizadas con y sin coche a una frecuencia de 1 kHz se muestran en la Fig. 4.8 para distancias de 0.5, 2 y 16 m entre la fuente y el vehículo estacionado. Sólo se muestra el área de interés, entre 0 y 6 m desde la fachada.

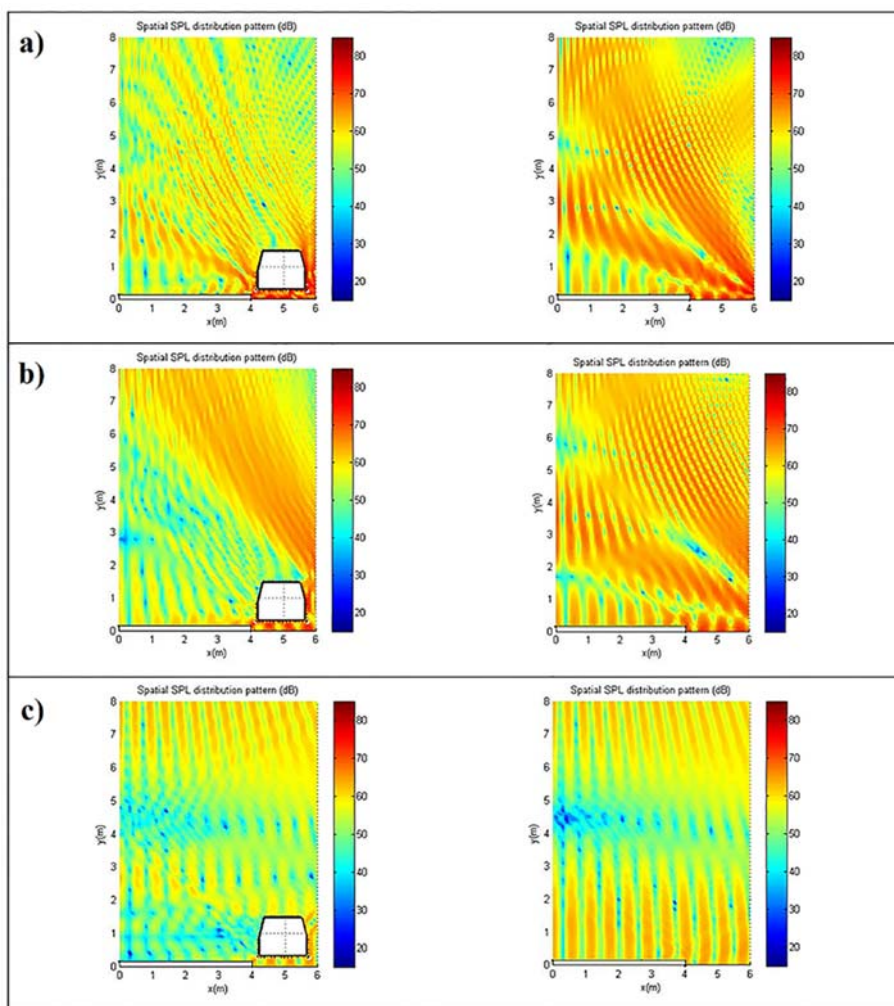


Fig. 4.8. Simulación con y sin coche aparcado a una frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a una altura de 0.3 m y a distancias de a) 0.5 m, b) 2 m y c) 16 m del vehículo.

El primer aspecto a destacar en la Fig. 4.8, que no ha sido apreciado con suficiente claridad en las figuras anteriores, es la importante influencia del vehículo estacionado en el campo sonoro existente en la zona entre la fachada y la línea de estacionamiento. Este efecto, como es sabido, no está siendo considerado en la actualidad en los mapas estratégicos de ruido realizados bajo la Directiva Europea. Otro aspecto interesante que se puede ver en la Fig. 4.8 es el efecto de la transmisión sonora a través del hueco situado entre el suelo y la parte inferior del vehículo estacionado. En este sentido, se observa una disminución de este efecto cuando aumenta la distancia entre la fuente y el vehículo. Además, se observa que el efecto de apantallamiento es especialmente evidente a todas las alturas de micrófono cuando la fuente está cerca del vehículo estacionado (Fig. 4.8a), sigue siendo significativo a alturas entre 1.5 y 6 m a una

distancia de 2 m (Fig. 4.8b), y a 16 m (Fig. 4.8c), sólo es importante para alturas de micrófono por debajo de 2 m.

En resumen, los efectos de apantallamiento sobre las fachadas de edificios asociados con la presencia de vehículos estacionados, en las condiciones discutidas en esta sección, pueden ser de importancia incluso a una altura de 8 m, principalmente en calles estrechas. Como se sabe, esta configuración urbana es común en muchas ciudades europeas, especialmente en las calles de zonas residenciales o barrios de las zonas centrales.

4.3.3 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE LA FACHADA Y LA LÍNEA DE APARCAMIENTO

En esta nueva sección, para una posición fija de la fuente sonora, se estudia el efecto de variar la distancia entre la fachada de los edificios y la línea de aparcamiento (para valores de $d_{\text{FACHADA-VEHÍCULO}}$ de 1, 2, 4, 8, 16 y 24 m). Se utilizan dos posiciones de la fuente con respecto a la fachada (16 y 29.7 m). En el primer caso, se ha considerado una distancia máxima entre la fachada y el vehículo estacionado de 8 m.

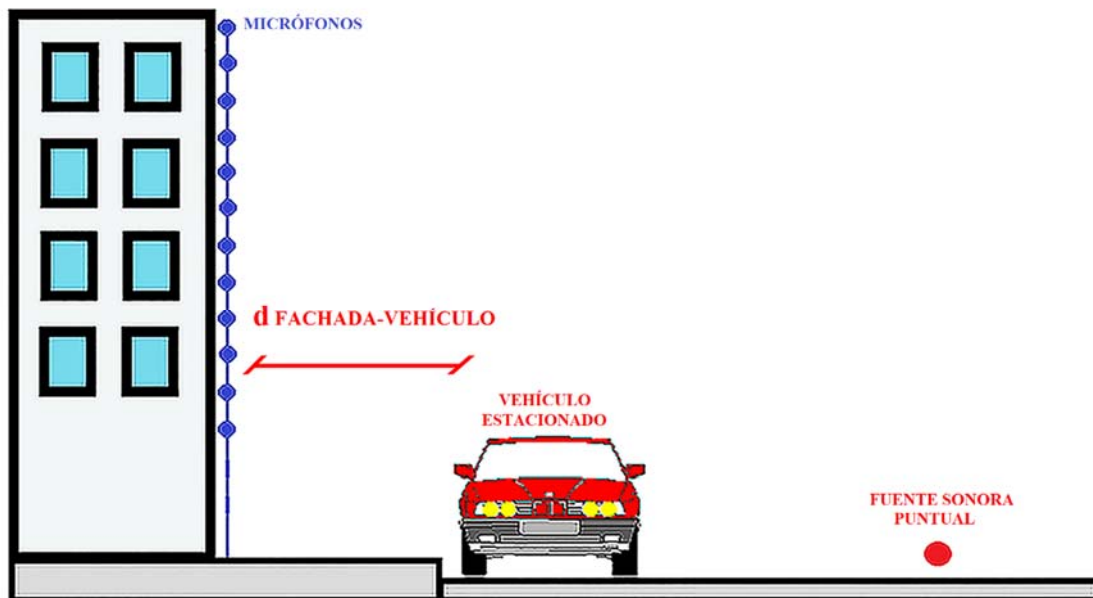


Fig. 4.9. Configuración de simulación variando la distancia entre la fachada y el vehículo aparcado

4.3.3.1.- Fuente sonora situada a 16 m de la fachada

Los resultados obtenidos a diferentes alturas en la fachada del edificio para la diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo aparcado, para una posición fija de la fuente sonora a 16 m de la fachada, se muestran en la Fig. 4.10:

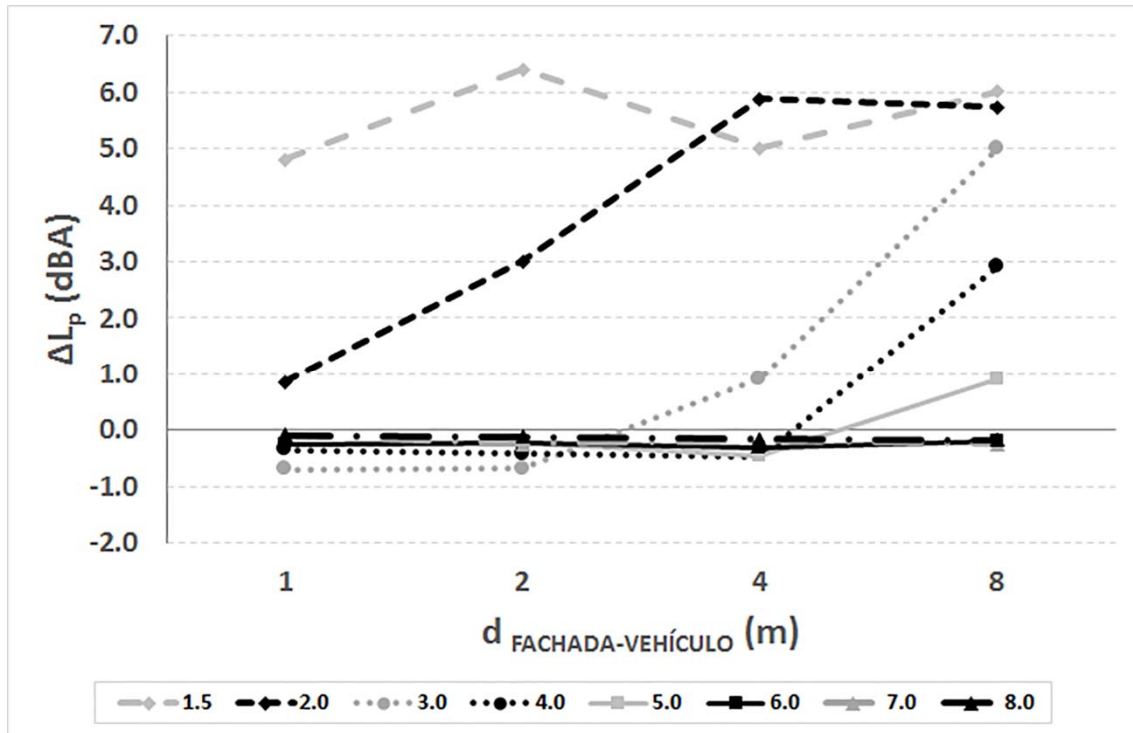


Fig. 4.10. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono y una $d_{\text{FACHADA-FUENTE}}$ de 16 m.

De los resultados mostrados en la Fig. 4.10 se puede concluir que:

- En términos generales, se observa una tendencia de la diferencia en los niveles sonoros a aumentar con la distancia entre la fachada y el vehículo. Obviamente, el aumento de esta distancia significa una mayor proximidad del vehículo estacionado a la fuente sonora.
- A pesar de esta tendencia general, la forma de la curva varía dependiendo de la altura del receptor.
- En el caso del receptor situado a 1.5 m, la diferencia entre los niveles sonoros es bastante constante, independientemente de la distancia entre la fachada y el vehículo, tomando valores que oscilan entre 4.8 y 6.4 dBA. Por las mismas razones que se indican en la sección 4.3.2, la gran diferencia (más de 5 dB) entre

los resultados obtenidos a 1.5 y 4 m de altura hasta una distancia entre la fachada y el vehículo de 4 m es de gran interés.

- d) En receptores situados a alturas de entre 2 y 3 m, se aprecia un incremento progresivo del efecto de apantallamiento con la distancia entre la fachada y el vehículo estacionado.
- e) Para otros receptores colocados a alturas de entre 4 y 8 m, la diferencia de los niveles sonoros es insignificante hasta una distancia de 4 m entre la fachada y el vehículo, aumentando desde este punto en adelante. Este incremento es mayor para los receptores situados en posiciones más bajas.
- f) Resulta interesante destacar la diferencia de 3 dB obtenida en la fachada para una altura de 4 m y una distancia de 8 metros entre la fachada y el vehículo. Para esta distancia de 16 m entre la fuente sonora y la fachada, esta configuración se puede considerar como normal en avenidas con aceras relativamente amplias. La relevancia de estos resultados debe tenerse en cuenta al considerar que 4 m es la altura de referencia de los mapas de ruido utilizando modelos de cálculo.

A continuación, se analiza el comportamiento en bandas de octava para algunas alturas seleccionadas (1.5, 4 y 8 m). En este caso, debido a la falta de interés (ver Fig. 4.10), los resultados obtenidos a 8 m no son mostrados. En la Fig. 4.11 se pueden observar los resultados obtenidos para la diferencia de niveles en un receptor situado en fachada a una altura de 1.5 m:

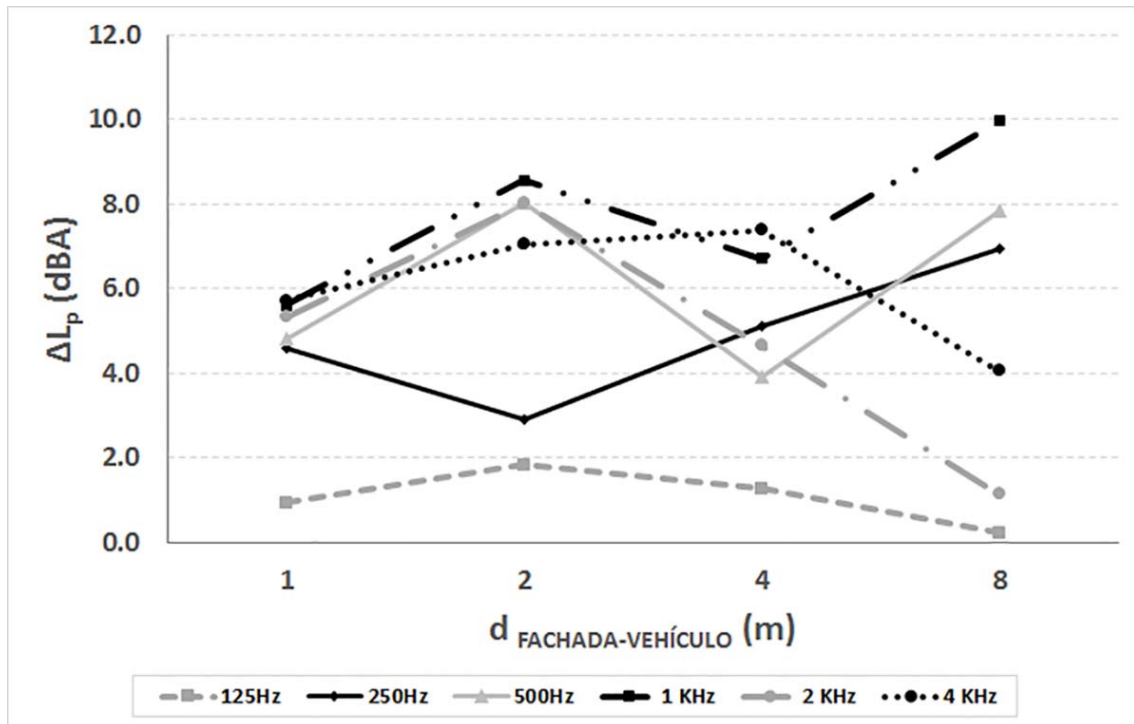


Fig. 4.11. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 1.5 m de altura

A partir de los resultados mostrados en la Fig. 4.11, para un receptor situado en la fachada a una altura de 1.5 m, se puede concluir que, en la banda de octava de 125 Hz, el efecto de apantallamiento es relativamente bajo, alcanzando un valor máximo de alrededor de 2 dBA a una distancia fachada del vehículo de 2 m. En las bandas de octava restantes, con un comportamiento variable en relación a la distancia entre la fachada y el vehículo estacionado, el efecto de apantallamiento es relevante. En general, los valores oscilan entre 4 y 8 dBA. Además, se pueden ver algunos efectos de interferencias en las diferentes bandas de octava.

Para una altura de 4 m (Fig. 4.12), en general, para las configuraciones estudiadas, en las cuales la distancia entre la fuente y la línea de estacionamiento es inferior a 8 m, el efecto de apantallamiento puede considerarse insignificante en el análisis de bandas de octava. Sin embargo, en el caso de una distancia de 8 m entre la fuente y el vehículo, es significativo en la mayoría de las bandas de octava.

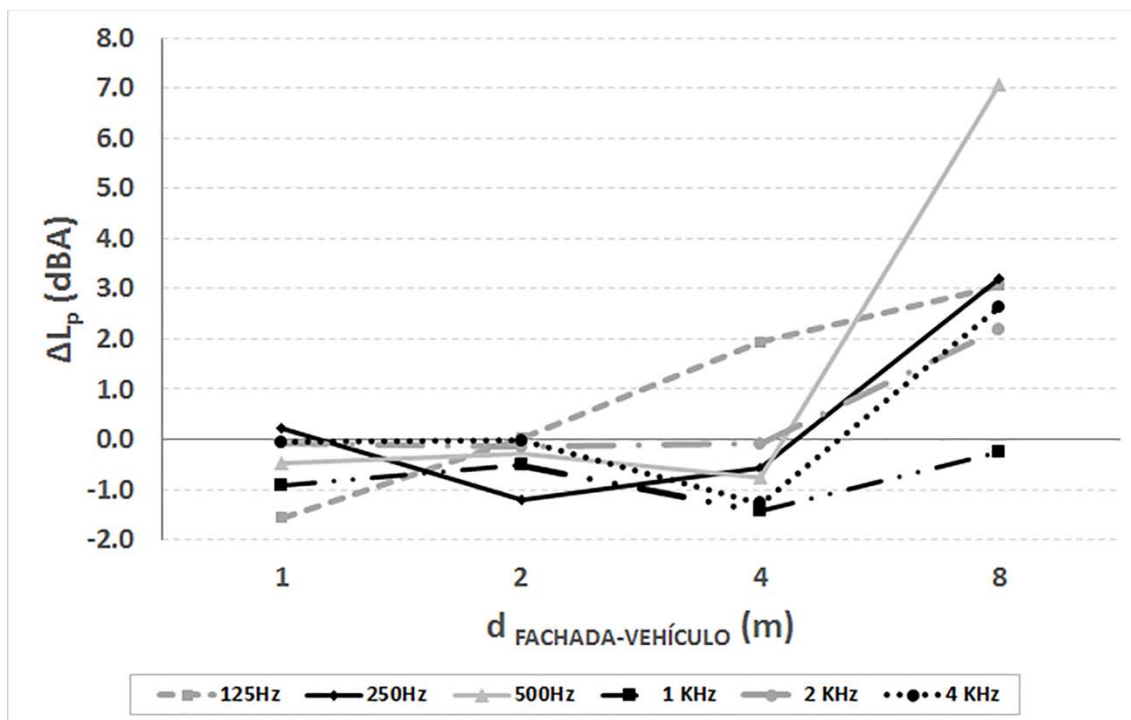


Fig. 4.12. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 4 m de altura

En la Fig. 4.13 se muestran, a modo de ejemplo, los resultados de las simulaciones realizadas con y sin coche octava una frecuencia de 1 kHz para distancias de 1, 2 y 8 m entre la fachada y el vehículo estacionado. Sólo se muestra el área de interés, entre 0 y 10 m desde la fachada.

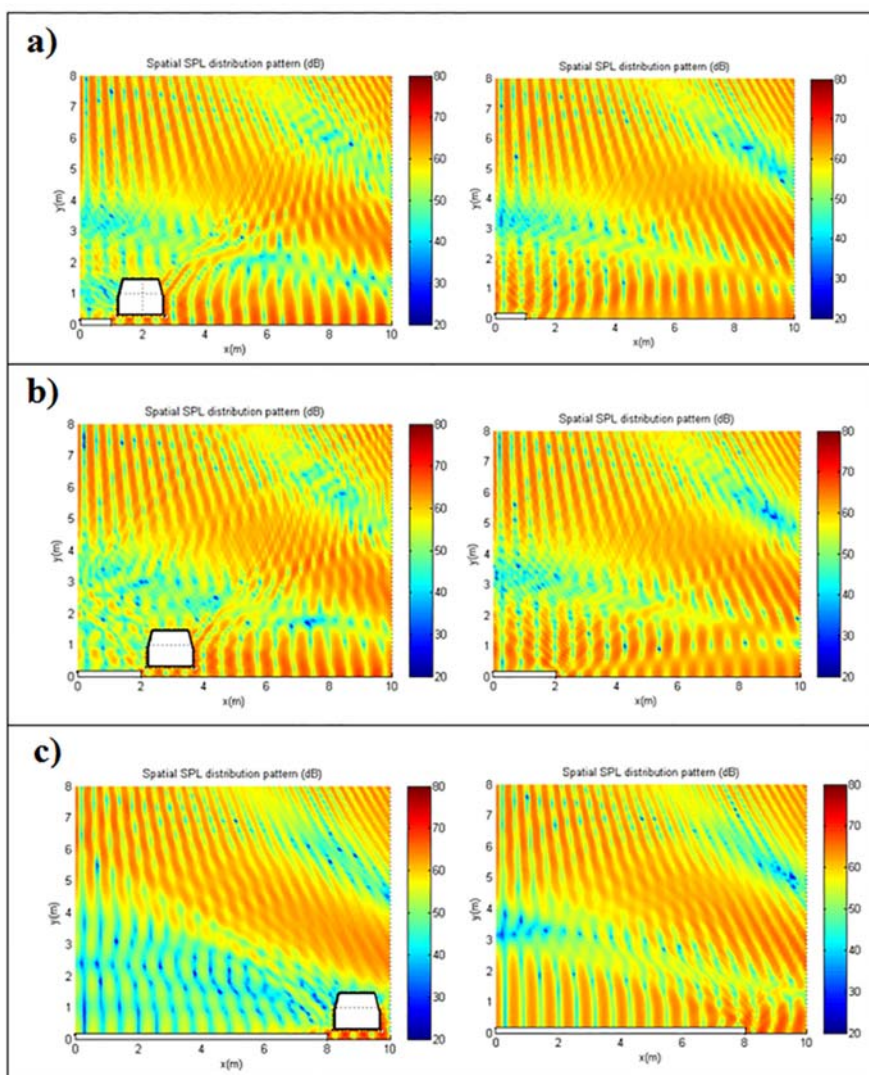


Fig. 4.13. Simulación con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a una altura de 0.3 m y para distancias de a) 1 m, b) 2 m y c) 8 m entre la fachada y la línea de aparcamiento.

Una vez más, la modificación del campo sonoro que implica la presencia de una línea de estacionamiento se puede ver claramente en la Fig. 4.13. Debido a la distancia entre la fuente y la fachada, se puede verificar que la onda sonora incidente puede ser considerada plana. En las imágenes de la Fig. 4.13 para la banda de octava de 1 KHz, se puede observar que a medida que aumenta la distancia entre la fachada y el vehículo aparcado, para la misma posición de la fuente, el efecto de apantallamiento se hace mayor en la zona próxima a la fachada. En el caso de una distancia entre el vehículo y la fachada de 1 m (Fig. 4.13a), el efecto de apantallamiento se localiza justo detrás del vehículo y el resto del campo sonoro prácticamente permanece invariante. A una distancia de 2 m (Fig. 4.13b), se observa una modificación de la forma del campo

sonoro detrás del vehículo hasta una altura de 4 m. En el caso de 8 m (Fig. 4.13c), la modificación del campo sonoro es muy importante en toda la zona detrás del vehículo, que afecta claramente sobre la fachada hasta una altura de alrededor de 4 m.

En resumen, los efectos de apantallamiento sobre las fachadas de edificios que están asociados con la presencia de vehículos aparcados, en las condiciones analizadas en esta sección, pueden ser de importancia incluso hasta una altura de 4 m, principalmente en calles anchas. Esta configuración urbana es común en las avenidas de muchas ciudades de Europa.

4.3.3.2.- Fuente sonora situada a 29.7 m de la fachada

Los resultados obtenidos en el array vertical de micrófonos situado en la fachada para la diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo estacionado para una posición fija de la fuente sonora a 29.7 m de la fachada, se muestran en la Fig. 4.14:

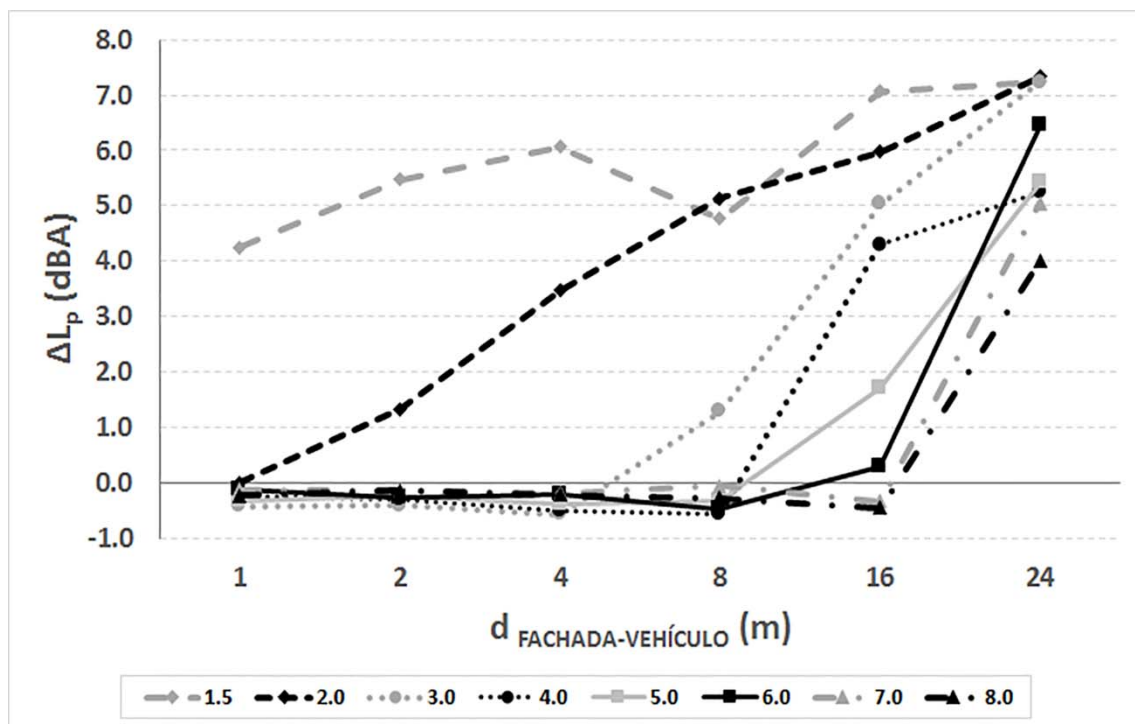


Fig. 4.14. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono y a una $d_{\text{FACHADA-FUENTE}}$ de 29.7 m.

De los resultados mostrados en la Fig. 4.14 se pueden extraer varias conclusiones:

- a) Se aprecia una tendencia muy similar a la obtenida en la sección 4.3.3.1. Es decir, un aumento en el efecto de apantallamiento según aumenta la distancia entre la

fachada y la línea de aparcamiento. Además, la forma de la curva varía dependiendo de la altura del receptor, con un patrón muy similar al de la sección 4.3.3.1.

- b) Para el receptor situado a 1.5 m de altura, la diferencia de los niveles sonoros es relativamente constante, independientemente de la distancia entre la fachada y el vehículo, entre 4 y 7 dBA. De manera similar a los resultados de la sección 4.3.3.1, la gran diferencia que existe entre los resultados a 1.5 y 4 m de altura es de gran interés, pero en este caso en todo el rango de distancias entre la fachada y el vehículo. Obsérvese que esta diferencia es superior a 4 dB hasta una distancia de 8 m entre la fachada y el vehículo aparcado y permanece elevada (entre 2 y 3 dB) para distancias superiores, hasta las 24 m estudiados.
- c) En los receptores situados a alturas de entre 2 y 3 m, se observa un aumento progresivo del efecto apantallamiento con la distancia entre la fachada y el vehículo.
- d) Para otros receptores colocados a alturas de entre 4 y 8 m, la diferencia de los niveles sonoros es insignificante hasta una distancia de 8 m entre la fachada y el vehículo, aumentando desde este punto en adelante. Este incremento es mayor para los receptores situados en las posiciones más bajas. A este respecto, es importante tener en cuenta la gran diferencia obtenida entre los receptores colocados a alturas de 4 y 8 m para una distancia entre la fachada y el vehículo de 16 m.
- e) Resulta de importancia resaltar la diferencia obtenida, mayor de 4 dB, para una altura de 4 m en la fachada y a una distancia entre la fachada y el vehículo de entre 16 a 24 m. También es destacable la diferencia de más de 4 dBA obtenida para una distancia de 24 m en todas las alturas estudiadas, incluso a 8 m. Para la distancia considerada entre la fuente y la fachada (29.7 m), esta configuración se puede asociar con amplias avenidas en las ciudades.

A continuación, se analiza el comportamiento en las bandas de frecuencia de octava para algunas alturas seleccionadas (1.5, 4 y 8 m). Los resultados obtenidos para la diferencia de niveles sonoros en un receptor situado en la fachada a una altura de 1.5 m se muestran en la Fig. 4.15. Se puede concluir que, en el conjunto de bandas analizadas, se observa una tendencia similar a la obtenida en la sección 4.3.3.1. Los valores son muy parecidos hasta la distancia de 8 m entre la fachada y la línea de estacionamiento

analizada en dicha sección. Sólo en la banda de 1 kHz se aprecia una pequeña diferencia, debida a el hecho de colocar la fuente sonora a 29.7 m en lugar de 16 m. De este modo, es destacable la coherencia en los resultados obtenidos en las dos secciones. Por otra parte, cuando la distancia entre la fachada y vehículo aumenta, se obtienen efectos de apantallamiento significativos en casi todas las bandas de octava. También pueden observarse fenómenos de interferencia en algunas bandas de frecuencias.

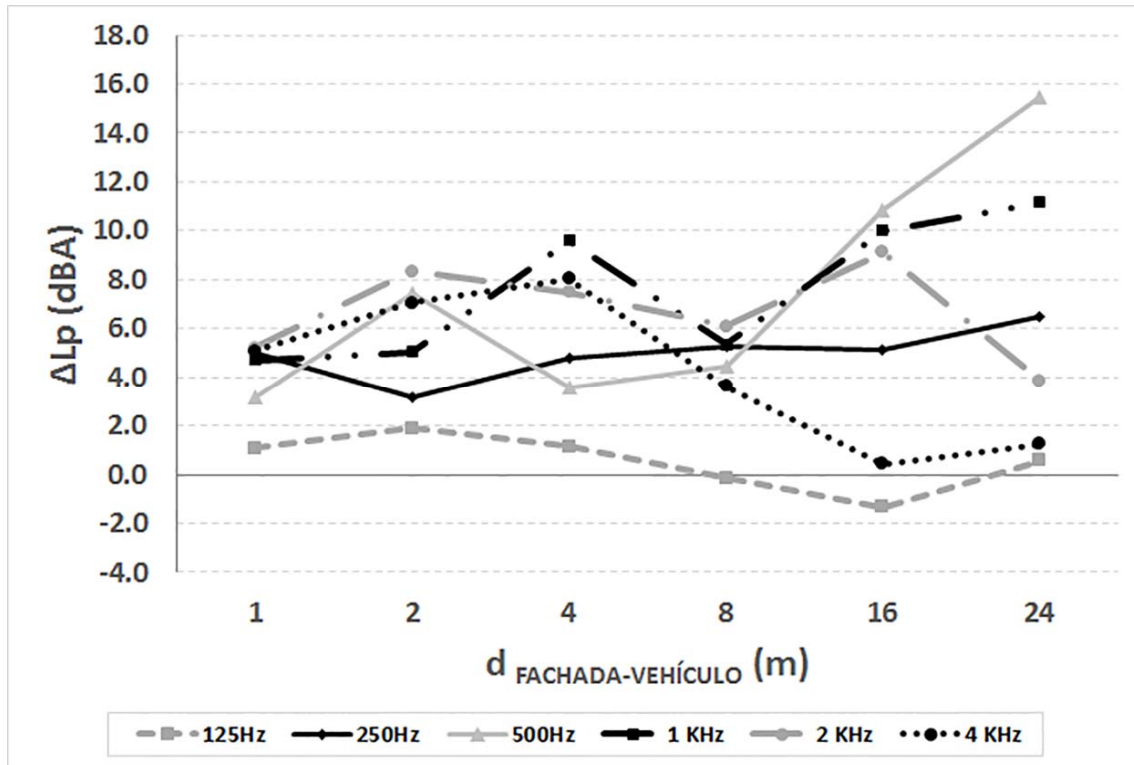


Fig. 4.15. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 1.5 m de altura

De nuevo en la Fig. 4.16, para un receptor colocado a una altura de 4 m, los resultados muestran un comportamiento similar al de la sección anterior, aunque los valores del apantallamiento a 8 m son menores en este caso. También se observan valores bastante altos de apantallamiento en casi todas las bandas de octava a distancias de 16 y 24 m, que van desde aproximadamente 2 a 8 dBA. Por otra parte, los efectos de interferencia se pueden observar en algunas bandas de frecuencias.

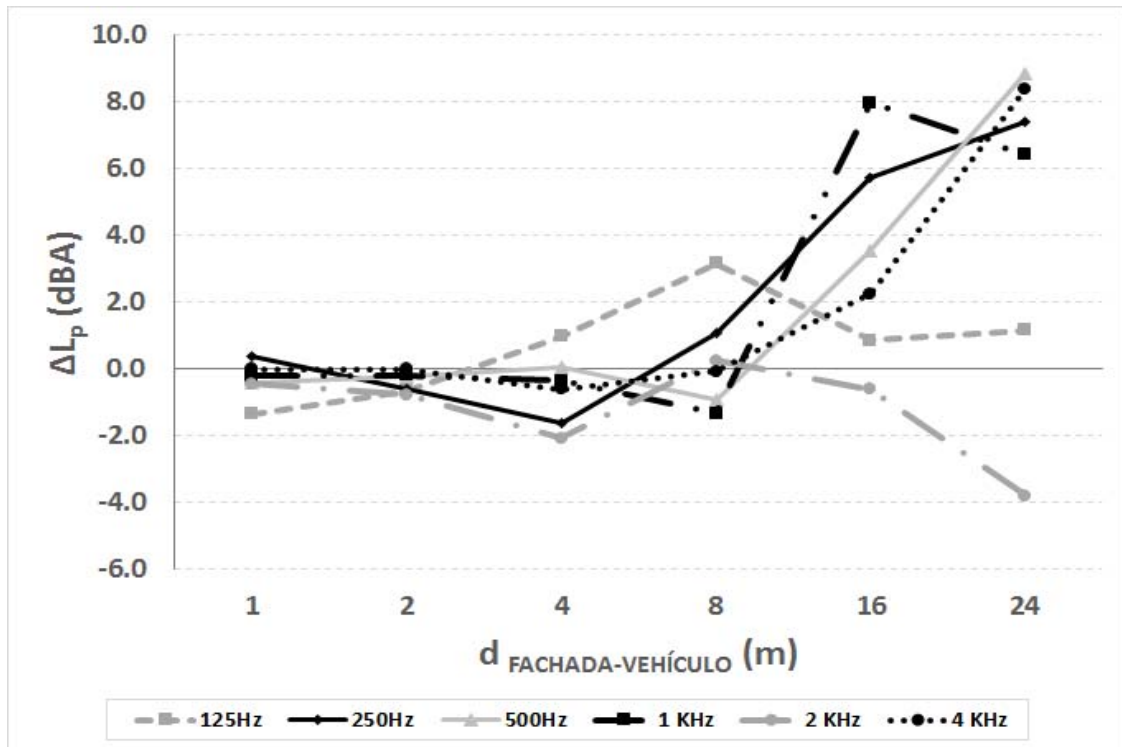


Fig. 4.16. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 4 m de altura

Los resultados de las simulaciones realizadas con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz se muestran en la Fig. 4.17, para distancias de 1, 8 y 24 m entre la fachada y el vehículo.

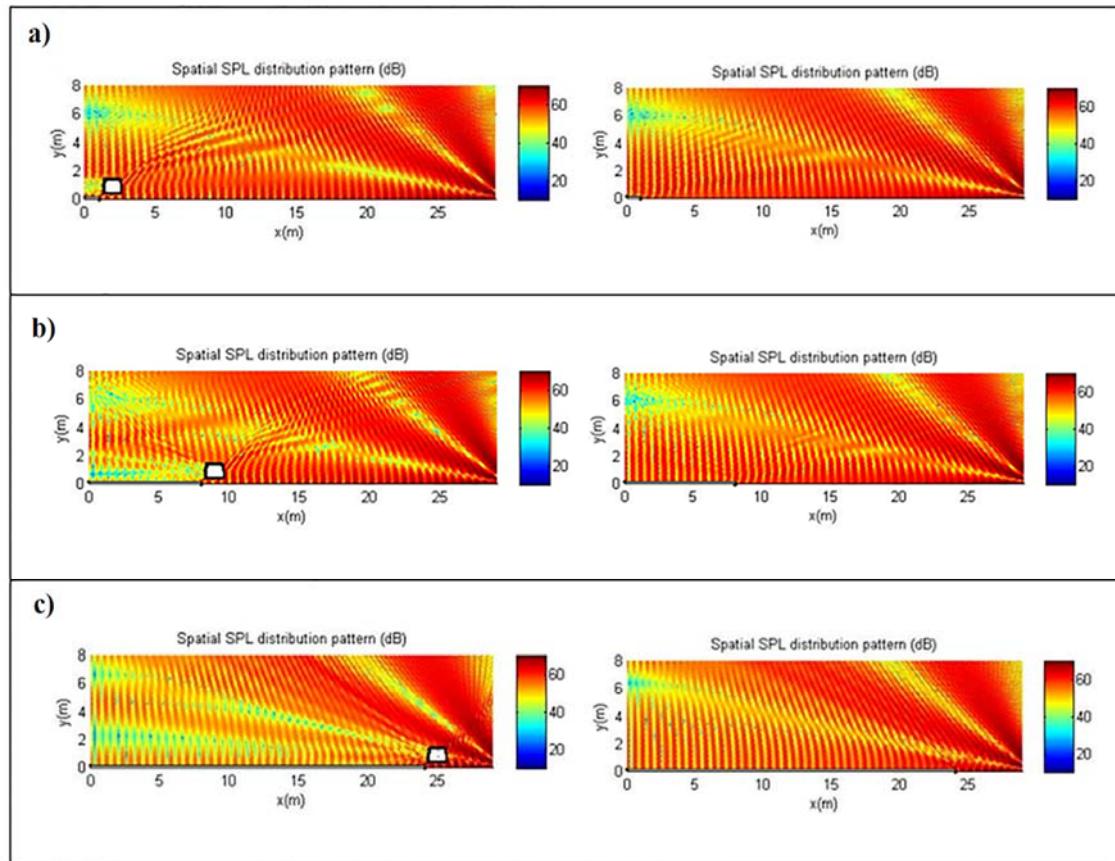


Fig. 4.17. Simulación con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a una altura de 0.3 m y para distancias de a) 1 m, b) 8 m y c) 24 m entre la fachada y la línea de aparcamiento.

En la Fig. 4.17 se puede apreciar de forma evidente la modificación del campo sonoro que origina la presencia de una línea de estacionamiento. Se puede verificar que la onda sonora incidente puede considerarse como plana debido a la distancia entre la fuente y la fachada. Al igual que en la sección anterior, se aprecia que conforme se incrementa la distancia entre la fachada y el vehículo, para la misma posición de la fuente, el efecto de apantallamiento se hace mayor en la zona próxima a la fachada. En el caso de una distancia entre el vehículo y la fachada de 1 m (Fig. 4.17a), el efecto de apantallamiento afecta a la zona situada justo detrás del vehículo y el resto del campo sonoro permanece prácticamente igual (se pueden observar interferencias entre las ondas directas y reflejadas en el vehículo). En el caso de 8 m (Fig. 4.17b), se produce una modificación de la forma del campo sonoro detrás del vehículo, que afecta en la fachada hasta una altura de 2 a 3 m. En el tercer caso, a 24 m (Fig. 4.17c), la modificación del campo sonoro resulta de importancia en toda la zona detrás del vehículo; es evidente que afecta a la fachada hasta una altura de alrededor de 3 a 4 m. Sin embargo, en la configuración

con coche estacionado, la intensidad del campo sonoro parece disminuir a lo largo de la fachada. En este sentido, el fenómeno de la transmisión sonora a través del hueco existente entre el suelo y la parte inferior del vehículo a una distancia de 24 m parece interesante.

En resumen, los efectos de apantallamiento sobre las fachadas de edificios que están asociados con la presencia de vehículos aparcados, en las condiciones analizadas en esta sección, pueden ser de importancia incluso hasta alturas de 8 m, principalmente en calles anchas con líneas de estacionamiento situadas lejos de las viviendas.

4.3.4 VARIACIÓN DE LA ALTURA DE LA FUENTE SONORA

En esta sección, se estudia el efecto de variar la altura de la fuente sonora sobre el apantallamiento causado por la línea de estacionamiento. Las simulaciones se han realizado para dos posiciones de la fuente en relación con el vehículo estacionado (a 2 y 16 m) y una distancia fija entre la fachada y el vehículo (4 m). En la Fig. 4.18 se puede ver un esquema gráfico de esta configuración.

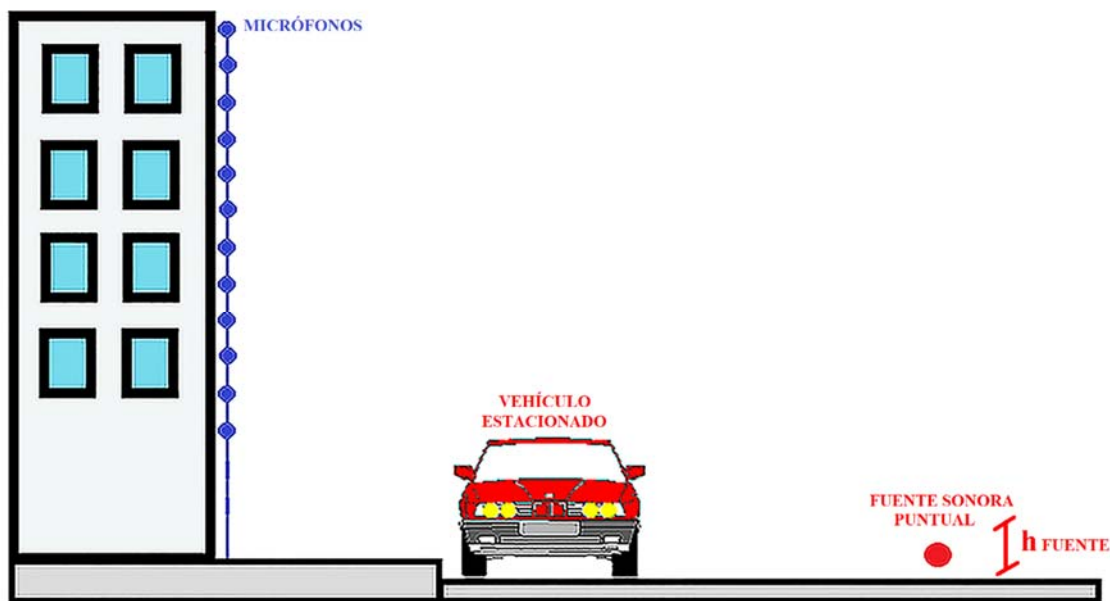


Fig. 4.18. Configuración para las simulaciones realizadas variando la altura de la fuente sonora

4.3.4.1. Fuente sonora situada a 2 m del vehículo aparcado

Los resultados obtenidos en la fachada del edificio para la diferencia de niveles sonoros globales entre configuraciones sin y con vehículo se muestran en la Fig. 4.19 para varias alturas de micrófono.

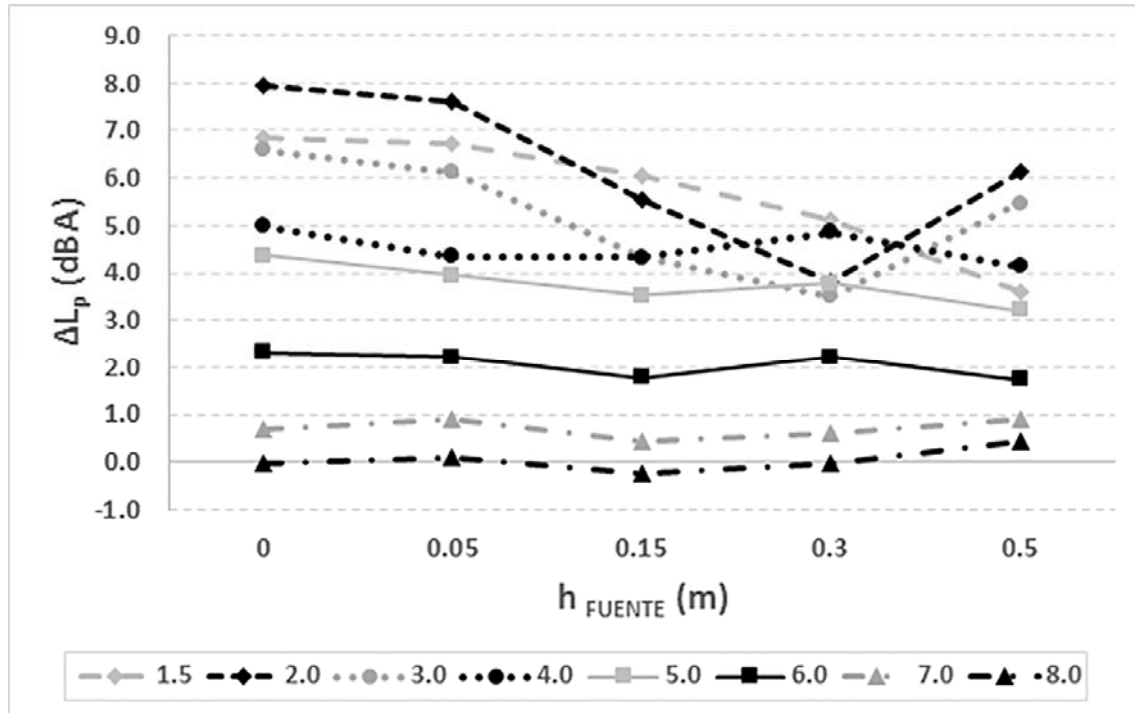


Fig. 4.19. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono y de la fuente sonora.

Tal como se muestra en la Fig. 4.19, en este caso en el que la fuente sonora se encuentra cerca la línea de aparcamiento, para receptores situados a 1.5 m de altura, se observa una tendencia decreciente en la diferencia de niveles sonoros a medida que aumenta la altura de la fuente. Esta tendencia cambia a medida aumenta la altura del micrófono receptor, hasta una altura de 3 m. Por encima de este punto, la diferencia de los niveles sonoros permanece casi constante independientemente de la altura de la fuente. Por lo tanto, en general se puede considerar que el efecto de la posición en altura de la fuente sonora sobre el apantallamiento causados por la línea de aparcamiento es de poca importancia para la mayoría de alturas de interés en fachada.

A continuación, se analiza el comportamiento en bandas de frecuencia de octava. En primer lugar, en la Fig. 4.20 se muestran los resultados obtenidos para la diferencia de niveles sonoros en un receptor situado en la fachada a una altura de 1.5 m. En este caso,

los resultados obtenidos a 4 y 8 m de altura no se muestran debido a la falta de interés (ver Fig. 4.19).

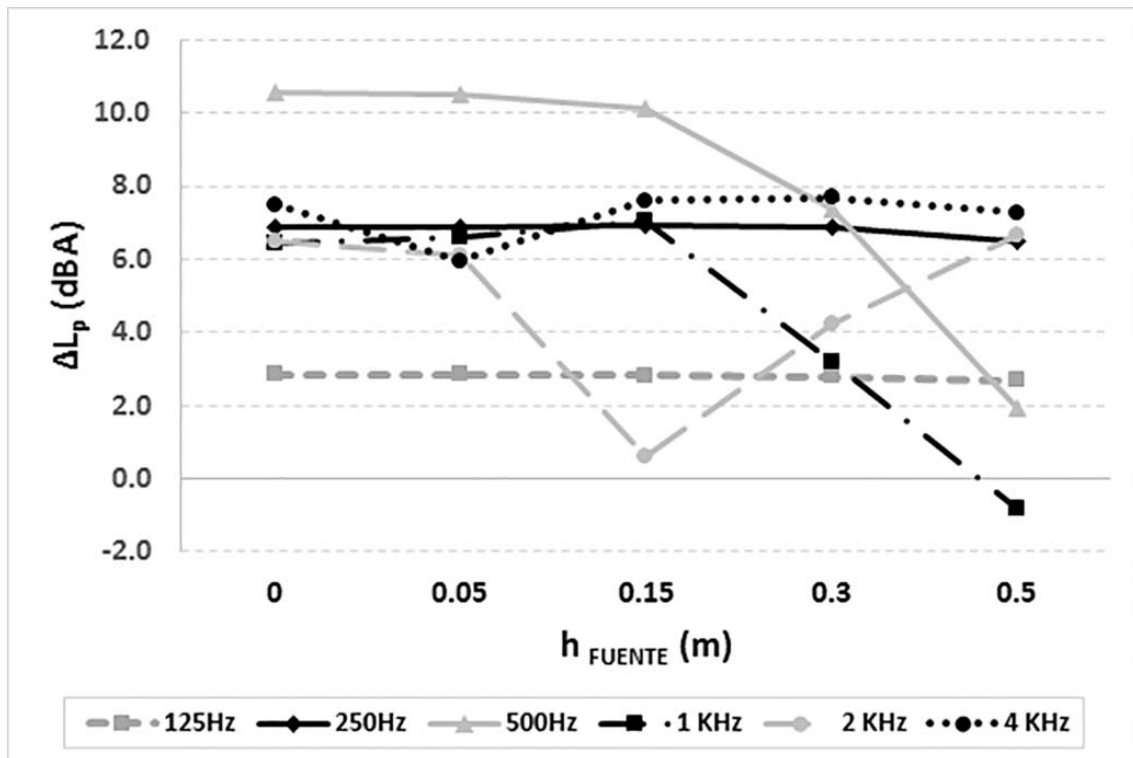


Fig. 4.20. Diferencia de niveles sonoros en bandas de octava entre las configuraciones sin y con vehículo a 1.5 m de altura

Como se observa en la Fig. 4.20, excepto en las bandas de 500 Hz y 1 kHz en las que se aprecia una tendencia descendente de la diferencia en los niveles sonoros a medida que aumenta la altura de la fuente, no se percibe ninguna variación destacable del efecto de apantallamiento en el resto de bandas de octava. Sin embargo, en algunas frecuencias se observan algunos resultados asociados con interferencias.

En la Fig. 4.21 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz para alturas de fuente de 0.01, 0.15 y 0.3 m y una distancia de 2 m entre la fuente sonora y la línea de aparcamiento.

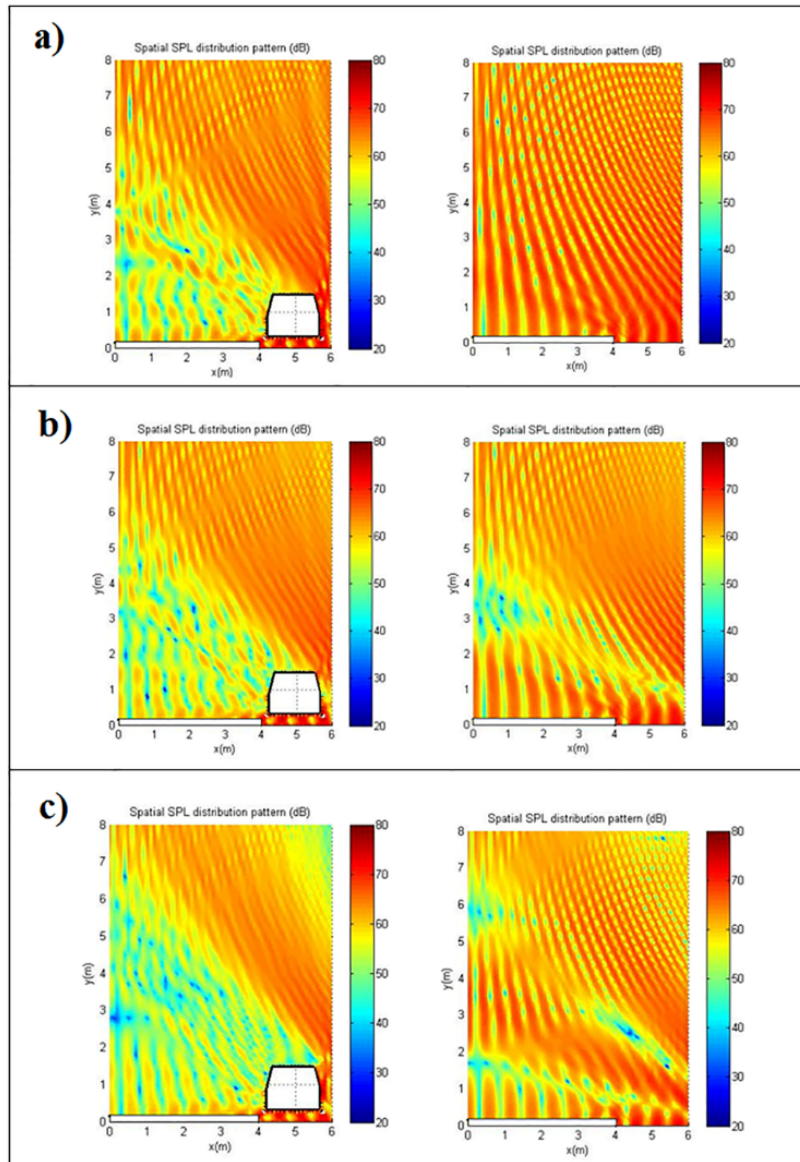


Fig. 4.21. Simulación con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a 2 m del vehículo y a alturas de a) 0.01 m, b) 0.15 m y c) 0.3 m.

El primer aspecto a tener en cuenta en la Fig. 4.21, tal como sucedía en las secciones 4.3.2 y 4.3.3 cuando la fuente de sonido se encuentra cerca del vehículo estacionado, es la modificación importante del campo de sonido en la zona entre la fachada y la línea de estacionamiento. Otro aspecto interesante que se puede ver en la Fig. 4.21, especialmente en los casos sin vehículo estacionado, es un fenómeno de interferencia de ondas destructiva que parece disminuir cuando la fuente se encuentra más cerca del suelo. Este hecho provoca efectos asociados a las interferencias entre las ondas directa y reflejada, que generan una variación en el nivel sonoro en la fachada del edificio a diferentes alturas.

En resumen, se encuentran efectos de apantallamiento en la fachada de edificios relacionados con la presencia de vehículos estacionados. En las condiciones analizadas en esta sección, estos efectos no varían cuando la altura de la fuente aumenta. Excepto en el caso en el que el receptor se encuentra a una altura de 1.5 m, cuando el efecto de apantallamiento muestra una tendencia decreciente conforme la altura de la fuente aumenta. Como se sabe, esta configuración urbana es común en las calles de zonas residenciales o barrios de las zonas centrales de las ciudades.

4.3.4.2. Fuente sonora situada a 16 m del vehículo aparcado

En la Fig. 4.22 se muestran los resultados obtenidos en la fachada del edificio para la diferencia de niveles sonoros globales entre configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas de micrófono.

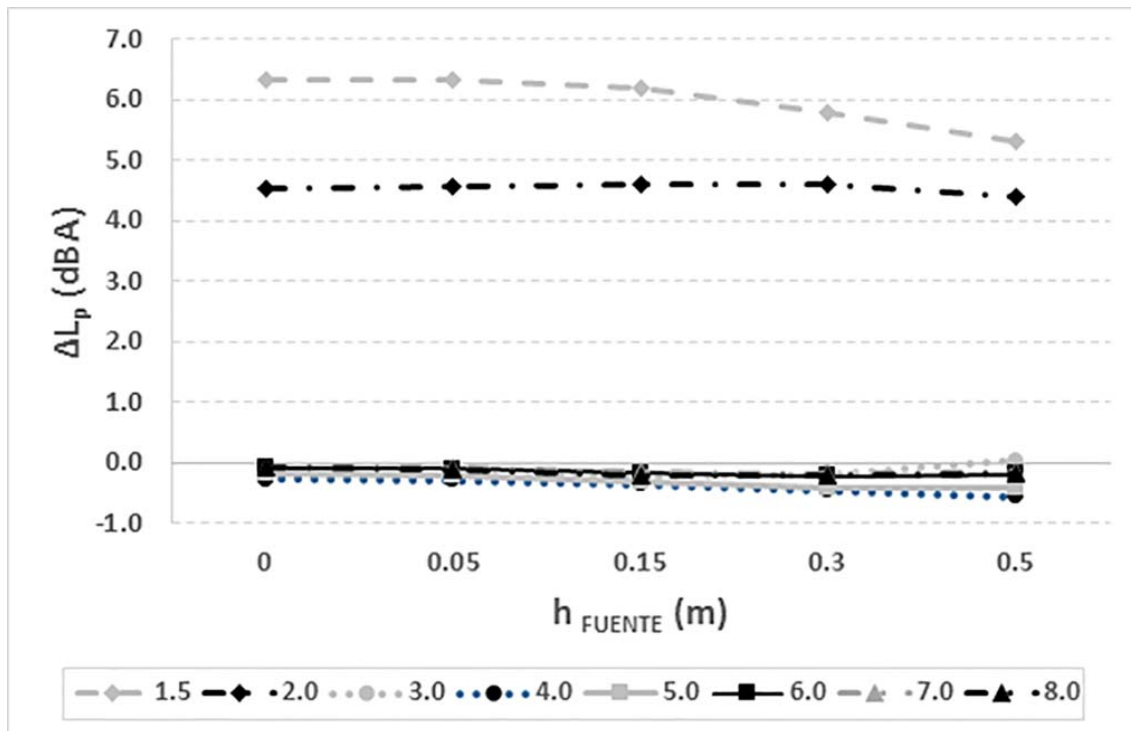


Fig. 4.22. Diferencia de niveles globales entre las configuraciones sin y con vehículo para diferentes alturas del micrófono y de la fuente sonora.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la Fig. 4.22, se puede concluir que en el caso en el que la fuente sonora se encuentra lejos del vehículo estacionado, la diferencia de niveles sonoros no experimenta ninguna variación a medida que se incrementa la altura de la fuente. Esta tendencia se mantiene prácticamente constante independientemente de la altura a la que se coloca el receptor.

En este caso, no se muestran los resultados obtenidos en bandas de octava para algunas alturas de micrófono (1.5, 4 y 8 m) debido a su falta de interés, al igual que en algunas secciones anteriores. En este sentido, la diferencia de niveles sonoros tampoco muestra ninguna variación en función de la frecuencia conforme aumenta la altura de la fuente.

Los resultados de las simulaciones realizadas con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz se muestran en la Fig. 4.23 para alturas de fuente de 0.01, 0.15 y 0.3 m y una distancia de 16 m entre la fuente sonora y la línea de estacionamiento.

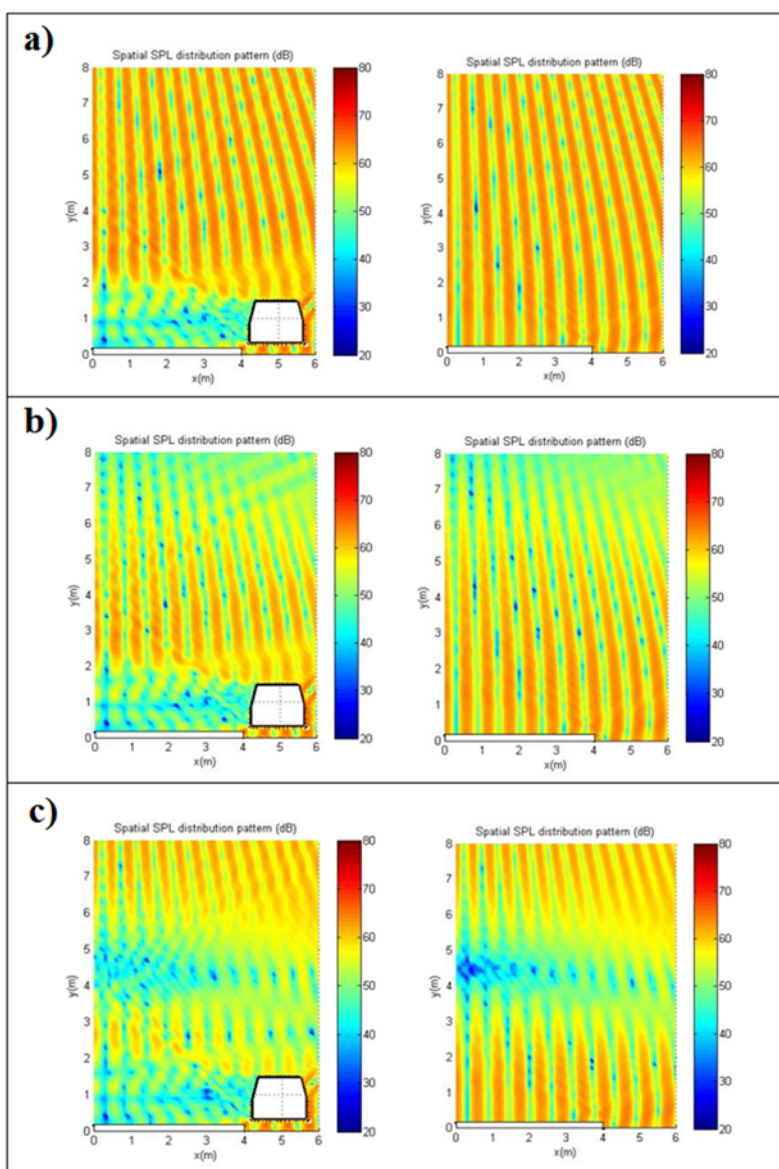


Fig. 4.23. Simulación con y sin vehículo aparcado a la frecuencia de 1 kHz con la fuente sonora situada a 16 m del vehículo y a alturas de a) 0.01 m, b) 0.15 m y c) 0.3 m.

Como se muestra en la Fig. 4.23, no se puede apreciar casi ninguna variación del efecto de apantallamiento a medida que aumenta la altura de la fuente sonora cuando esta se encuentra lejos del vehículo estacionado. También se observa que, dada la distancia entre la fuente y la fachada, cuando el campo sonoro incide en la fachada puede considerarse como plano. Por otra parte, tal como sucedía en el apartado 4.4.4.1, en los casos en que se realiza la simulación sin el vehículo estacionado, se observa un fenómeno de interferencia de ondas que parece disminuir a medida que la altura de la fuente es menor.

Por lo tanto, a modo de resumen se puede indicar que se detectan efectos de apantallamiento en la fachada del edificio asociados a los vehículos estacionados a los lados de las vías urbanas. En las condiciones estudiadas en esta sección, estos efectos no varían cuando aumenta la altura de la fuente sonora. Esta configuración urbana es similar a la de avenidas en ciudades europeas.

4.4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para la verificación del modelo BEM propuesto muestran un buen grado de correspondencia con los valores medidos “in situ”. En este sentido, además se ha de tener en cuenta que se trata de una simulación en dos dimensiones, por lo que el problema está siendo estudiado en un único plano vertical.

La presencia de vehículos estacionados en los lados de las vías urbanas representa una modificación significativa del campo sonoro existente en la zona entre la fachada del edificio y la línea de estacionamiento.

Dada una posición fija del vehículo estacionado con respecto a la fachada del edificio bajo evaluación, si se varía la distancia entre el vehículo estacionado y la fuente sonora, los resultados más relevantes son:

- a. Para distancias entre la fuente y la línea de estacionamiento de hasta 4 m, a diferentes alturas, existen diferencias importantes entre las situaciones con y sin vehículo estacionado. Debe tenerse en cuenta que la configuración más común en el diseño urbano es aquel en que los carriles de tráfico se encuentran cerca de las líneas de estacionamiento.

- b. Se detectan importantes diferencias en el comportamiento del efecto barrera entre las alturas de 1.5 m y 4 o más metros a partir de una distancia de 4 m entre la fuente y el vehículo aparcado. Hay que tener en cuenta que estas configuraciones corresponden a muchas avenidas secundarias de las ciudades de todo el mundo, y es de gran importancia para evaluar el impacto del ruido sobre la población a través de medidas en el entorno urbano.
- c. Se observa una diferencia significativa entre los valores previstos en fachadas de edificios a alturas de 4 y 8 m en el rango de distancias entre la fuente y el vehículo estacionado de 1.5 a 2 m. Consideramos que estas configuraciones corresponden a muchas de las calles de las ciudades europeas con edificios de al menos tres plantas. Estas diferencias entre los resultados de dos alturas, nos llevaría a considerar que el uso de 4 m como altura de referencia para la validación de los mapas de ruido calculados puede no ser apropiado. Si se utiliza, el impacto de ruido del tráfico en la población de las plantas más altas del edificio podría estar distorsionándose.

Dada una distancia fija desde la fuente sonora a la fachada, si se analizan los efectos de la variación de la distancia entre la fachada y la línea de estacionamiento, los resultados más relevantes son:

- a. Para una distancia entre la fuente y la fachada de 16 m y una distancia de 8 m entre la fachada y el vehículo, es interesante resaltar la diferencia de 3 dB obtenida a una altura de 4 m entre las configuraciones con y sin línea de aparcamiento. Hay que señalar que 4 m es una altura de referencia para la elaboración de mapas de ruido y las configuraciones indicadas puede ser consideradas habituales en avenidas urbanas con Acerados relativamente amplios.
- b. Para una distancia entre la fuente y la fachada de 29.7 m, que corresponde con la configuración de anchas avenidas, es importante destacar:
 - La mayor diferencia obtenida entre los receptores colocados a alturas de 4 y 8 m para una distancia entre la fachada y el vehículo de 16 m.
 - La diferencia obtenida, mayor de 4 dB, para una altura de 4 m en la fachada y a una distancia entre la fachada y el vehículo de entre 16 y 24

m. Para esta última distancia, la diferencia es mayor que 4 dBA, incluso a 8 m de altura.

Se observa una tendencia general para el efecto de apantallamiento en la fachada de los edificios de permanecer prácticamente invariable, independientemente de la altura de la fuente sonora. Sin embargo, se produce una excepción en las configuraciones asociadas con calles estrechas, donde la fuente se encuentra cerca del vehículo estacionado y el receptor está situado a una altura de 1.5 m, en la que el apantallamiento muestra una tendencia descendente a medida que aumenta la altura de la fuente sonora.

Otro aspecto interesante que se puede ver en las simulaciones es el efecto de la transmisión sonora a través del hueco existente entre el suelo y la parte inferior del vehículo estacionado. Este efecto varía en función de la ubicación de la fuente sonora en relación con el vehículo.

CAPÍTULO 5 A:

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.A.1 CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se ha realizado una contribución al estudio de la influencia de los diferentes elementos y características del entorno urbano en la aplicación de la norma ISO 1996 para la obtención de mapas estratégicos de ruido bajo la aplicación de la Directiva Europea sobre Ruido.

Para ello, en primer lugar, se ha realizado un amplio análisis de la norma ISO 1996 y del estado de la cuestión. A continuación, se han llevado a cabo una serie de ensayos experimentales, en varios puntos de medida, para realizar un estudio de las diferencias que puedan existir entre los valores de los niveles sonoros medidos en entornos urbanos con el micrófono situado en diferentes posiciones con respecto a elementos como la fachada posterior y el suelo. En este mismo sentido, se ha llevado a cabo un análisis sobre el efecto de aplicar una corrección sobre los niveles medidos en función de la distancia entre el micrófono y la fuente sonora. En último lugar, se han realizado una serie de ensayos mediante simulación, utilizando el Método de Elementos de Frontera (BEM), para estudiar la propagación del campo sonoro en configuraciones urbanas asociadas a diferentes tipos de vías. En esta línea, se ha analizado el efecto de apantallamiento acústico de las líneas de aparcamientos que suelen estar presentes en las calles y avenidas de las ciudades y su repercusión en la aplicación de las directrices de la norma ISO 1996 para obtener mapas de ruido.

A partir del análisis de la norma ISO 1996 y de la revisión del estado de la literatura, se pueden extraer las siguientes conclusiones generales:

- Los estudios que analizan las diferencias del nivel sonoro medido en función de la distancia del micrófono a la fachada reflectante posterior presentan disparidad de valores, que, según el caso, pueden implicar diferencias de hasta un 33% respecto a las correcciones de -6 dB y -3 dB establecidas por la norma ISO 1996-2. Se debe tener cuenta que algunas de estas configuraciones suele ser las empleadas en la realización de los mapas estratégicos de ruido mediante simulación para situar los receptores.
- En los estudios realizados respecto a la variación del nivel sonoro en función de la altura de medida, también existe disparidad de resultados. En algunos casos, los resultados se corresponden con lo esperado y en otros casos se han detectado incrementos del nivel sonoro con la altura, lo que directamente entraría en

contradicción con los resultados esperables considerando la divergencia geométrica de la onda sonora. En este sentido ha de tenerse en consideración que la Directiva Europea sobre Ruido establece que, cuando se emplean alturas de micrófonos distintas de 4 m, los resultados deben ser corregidos de acuerdo con una altura equivalente a 4 m. Sin embargo, ni la norma ISO 1996-2 ni la propia Directiva Europea sobre Ruido proponen corrección alguna.

- Se abre una nueva posibilidad, no contemplada hasta el momento, que las correcciones a aplicar puedan estar relacionadas con el flujo de vehículos y, por tanto, con las características de la fuente a estudiar.
- La norma ISO 1996-2 establece, en su parte normativa, unas correcciones en función de la distancia entre el micrófono y la fachada posterior que, de algún modo, parecen intentar abarcar un amplio abanico de posibilidades en cuanto a posibles configuraciones de medida en un entorno urbano y, por tanto, simplificar el procedimiento de medida y cálculo de niveles sonoros en el medio exterior. No obstante, en el Anexo B de la norma, de carácter informativo, se establece otra serie de condiciones más específicas, relativas a la geometría del punto de medida, para las que se verifican las correcciones propuestas. Sin embargo, en condiciones reales de medida en un entorno urbano, es difícil encontrar puntos de medida que den cumplimiento a todos los requisitos establecidos en el Anexo B de la norma.

En segundo lugar, en función de los resultados obtenidos en los ensayos “in situ” realizados en las condiciones indicadas en este trabajo, se puede concluir que:

- Puede resultar necesario, para la comparación de los resultados de las medidas sonoras en diferentes entornos urbanos y a diferentes distancias de la fachada, realizar correcciones, no sólo de reflexión en fachada, sino también de distancia a la fuente.
- Se detecta un efecto de apantallamiento para las ondas sonoras en entornos urbanos originado por las líneas de vehículos aparcados. Posiblemente, esta sea una causa de importancia para que las correcciones a aplicar por reflexión de fachada, en las medidas en el ambiente urbano existente en una ciudad, sean inferiores a las indicadas por la norma ISO-1996-2.
- Los resultados obtenidos parecen indicar que, incluso a distancias superiores a los 2 m respecto a la fachada que indica la norma, es posible encontrarse con una suma de energía entre el campo sonoro incidente y el reflejado. Por tanto, se abre otra

posibilidad no contemplada hasta el momento, que el nivel sonoro incidente en fachada pueda estudiarse de forma directa con medidas a distancias superiores a los 2 m.

- La norma ISO 1996-2 establece un único valor de corrección para el rango de distancias de 0.5 a 2 m de la fachada. Sin embargo, a tenor de las diferencias de niveles sonoros registrados entre micrófonos situados dentro de este mismo rango, parece necesario ampliar el número de estudios en este sentido.

Por último, a partir del estudio de la propagación del campo sonoro en entornos urbanos llevado a cabo mediante simulación en diferentes configuraciones geométricas, se alcanzan las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos para la verificación del modelo BEM propuesto muestran un buen grado de correspondencia con los valores medidos “in situ”.
- La presencia de vehículos estacionados en los lados de las vías urbanas representa una modificación significativa del campo sonoro existente en la zona entre la fachada del edificio y la línea de estacionamiento.
- Se observa un efecto de apantallamiento asociado con la presencia de líneas de aparcamiento de vehículos a los lados de las vías urbanas. Este efecto no se tiene en consideración en la actualidad en los mapas estratégicos de ruido que se realizan siguiendo la Directiva Europea sobre Ruido para la evaluación de la exposición de los edificios al ruido del tráfico en entornos urbanos.
- En algunas configuraciones analizadas, que se corresponden con ambientes urbanos equivalentes, en muchos casos, a los que pueden presentarse en muchas ciudades, se han obtenido diferencias en los niveles globales, debidas al efecto de apantallamiento, de hasta 8 dB.
- Los resultados muestran la importancia de este efecto en función de la altura de los micrófonos que sea elegida para realizar las mediciones y, en consecuencia, en la validación de los mapas de ruido calculados. Por lo que es de esperar que tenga un efecto al evaluar el impacto del ruido del tráfico en la población.

Como resumen general de las conclusiones generales anteriores, se puede indicar que los resultados obtenidos en los trabajos de investigación realizados hasta el momento, relativos a la aplicación de las correcciones propuestas por la norma ISO 1996-2,

pueden tener una incidencia importante sobre los resultados de los mapas estratégicos de ruido realizados bajo la aplicación de la Directiva Europea sobre Ruido.

5.A.2 LÍNEAS FUTURAS

Teniendo en cuenta la problemática analizada en esta tesis doctoral y los resultados encontrados, que han sido mostrados en los capítulos anteriores, a continuación se indican diferentes líneas futuras de investigación que surgen, tanto como consecuencia de hipótesis planteadas a partir de la revisión del estado de la cuestión, como de nuevas hipótesis que han ido surgiendo como consecuencia de los trabajos realizados y que no han podido ser verificadas en toda la amplitud que presentan.

- Resulta de gran importancia saber qué factores geométricos están originado las diferencias encontradas entre los valores de corrección propuestos por la norma y los resultados experimentales y en qué medida estos resultados experimentales están siendo recogidos o no por la aplicación de los modelos de propagación.
- Resulta esencial ampliar el número de estudios en esta línea de trabajo teniendo en cuenta la realidad urbana de las ciudades europeas. Esto es, la gran variedad de configuraciones urbanas y distancias a la fuente sonora que podemos encontrarnos.
- Resulta necesario, si se desean conocer los efectos específicos de las diferentes configuraciones geométricas del entorno y de éste respecto a la posición del micrófono, que los nuevos estudios analicen e indiquen sus resultados, de forma independiente, para cada configuración del entorno y posiciones de micrófono empleadas.
- A pesar de que los resultados obtenidos para la verificación del modelo BEM propuesto en el Capítulo 4 muestran un buen grado de correspondencia con los valores medidos “in situ”, se ha de tener en cuenta que se trata de una simulación en dos dimensiones, de forma que el problema está siendo estudiado en un único plano vertical. En este sentido, dado que en la propagación del campo sonoro en entornos urbanos, el ruido de tráfico es la principal fuente sonora, y esto conlleva la incidencia de las ondas sonoras sobre el micrófono desde diferentes ángulos, se estima de interés dar continuidad a esta línea de investigación mediante el desarrollo de un nuevo modelo en tres dimensiones que permita tener en consideración la influencia de este parámetro característico de la fuente sonora sobre los resultados obtenidos bajo la aplicación de la norma ISO 1996.

CHAPTER 5 B:
CONCLUSIONS AND FUTURE LINES

5.B.1 CONCLUSIONS

This work has made a contribution to the study of the influence of different elements and characteristics of urban environments in the application of the ISO 1996 standard, in order to obtain strategic noise maps following the guidelines of the European Noise Directive 2002/49/EC.

To this end, a broad analysis of the ISO 1996 standard and the state-of-the-art was first carried out. Then, a series of experimental tests was carried out at several measurement points to study the differences that may exist between the values of sound levels measured in urban environments with microphones located at different positions with respect to elements such as facades of buildings and the floor. In this regard, an analysis of the effect of applying a correction to the measured levels as a function of the distance between the microphone and the sound source was also realised. Finally, a series of simulations was carried out using the Boundary Element Method (BEM) to study the propagation of the sound field in urban configurations associated with different types of streets. The effect of acoustic screening of lines of parked vehicles that exist in the streets and avenues of cities was analysed, as well as and its consequences, in the application of the guidelines of the ISO 1996 standard to obtain noise maps.

From the analysis of the ISO 1996 standard and the literature review, the following general conclusions can be drawn:

- The studies that analyse the differences between measured sound levels based on the distance from the microphone to façade of buildings show a disparity in values that, depending on the case, may involve differences of up to 33% relative to -6 dB and -3 dB corrections indicated by the ISO 1996-2 standard. It should be remembered that these configurations are usually employed to locate receivers in computerised strategy noise maps.
- Studies carried out with respect to the sound level variation depending on the height of the microphone also show quite different results. In some cases, they correspond to that expected; in other cases, increases of sound level with height were detected, which would directly contradict the expected results considering the geometric divergence of the sound wave. In this regard, it should be taken into account that the European Noise Directive states that when microphone heights other than 4 m are used, results must be corrected according to a height equivalent to 4 m. However,

neither the ISO 1996-2 standard nor the European Noise Directive propose any correction.

- A new possibility not hitherto considered has arisen. That is, the corrections applied could be related to the flow of vehicles and, therefore, to the characteristics of the sound source to be studied.
- The ISO 1996-2 standard establishes, in its normative part, some corrections depending on the distance between the microphone and façade that, somehow, try to cover a wide range of possibilities in terms of possible measurement configurations in urban environments, and therefore simplify the procedure of measurement and calculation of noise levels outdoors. However, in Annex B (informative), more specific conditions relating to the geometry of the measuring point are established for which the proposed corrections are verified. Nevertheless, it is difficult to find measuring points in actual measurement conditions in urban environments that fulfil all the requirements set out in Annex B of the ISO 1996-2 standard.

Secondly, according to the results obtained in the "in situ" tests carried out under the conditions indicated in this work, it can be concluded that:

- To compare results of noise measurements in different urban environments and at different distances from the façade, it is suitable to make corrections not only for reflections on the façade but also due to the distance to the sound source.
- An acoustic screening effect is detected for sound waves in urban environments due to lines of parked vehicles. This could be an important cause why the corrections to be applied due to reflections on façades in actual measurement conditions in urban environments are lower than those indicated by the ISO-1996-2 standard.
- The results seem to indicate that even at distances above 2 m indicated in the standard with respect to the façade, it is possible to find the sum of energy between the incident and reflecting sound fields. Therefore, another possibility not hitherto considered arises: that the sound level incident on the façade can be studied directly with measurements at distances greater than 2 m.
- The ISO 1996-2 standard establishes a single correction value for the range of distances from 0.5–2 m from the façade. However, due to differences in the sound levels between microphones located within this range, it seems necessary to increase the number of studies related to this topic.

Finally, from the study of sound field propagation in urban environments carried out by simulation tests in different geometric configurations, the following conclusions are reached:

- The results obtained for the verification of the proposed BEM model show good agreement with “in situ” measured values.
- The presence of parked vehicles on the sides of urban streets represents a significant modification of the existing sound field in the area between building façade and the parking line.
- A screening effect associated with the presence of parking lines for vehicles on the sides of urban streets is observed. This effect is not considered at present in strategic noise maps conducted under the European Directive for assessing the exposure of buildings to traffic noise in urban environments.
- Differences in overall sound levels of up to 8 dB were obtained due to the screening effect in some analysed configurations, which correspond to actual urban environments in many cases.
- The results demonstrate the importance of this effect in the selection of the height for measurements and in the validation of calculated noise maps and, therefore, in assessing the impact of traffic noise on the population.

As an overall summary of these general conclusions, the results obtained in research works carried out so far regarding the application of the corrections proposed by the ISO 1996-2 standard could have a significant impact on the results of the strategic noise maps made under the application of the European Noise Directive.

5.B.2 FUTURE LINES

Taking into account the questions analysed in this doctoral dissertation and the results that have been shown in previous chapters, different future lines of research are shown below, which arise both as a consequence of the hypotheses raised from the review of the state-of-the-art, as well as new hypotheses that have arisen as a consequence of the work carried out and that cannot be verified to its full extent.

- It is of great importance to know what geometric factors cause the differences found between the correction values proposed by the standard and the experimental results,

and to what extent these experimental results are considered in the application of the propagation models.

- It is essential to increase the number of studies in this area by taking into account the urban reality of European cities; that is, the wide variety of urban configurations and distances to the sound source that can be found.
- It is necessary that, if an analysis the specific effects of different geometric urban configurations is sought, new studies analyse and indicate results independently for each different urban environment configuration and microphone position used.
- Although the results obtained for the verification of the BEM model proposed in Chapter 4 show good agreement with the measured values, it must be taken into account that this is a two-dimensional simulation. Therefore, the problem is studied in a single vertical plane. In this regard, since in sound field propagation in urban environments traffic noise is the main sound source, this implies that sound waves reach the microphone from different angles. It is considered of interest to continue this research line through the development of a new three-dimensional model that allows to take into account the influence of this characteristic parameter of the sound source on the results obtained under the application of the ISO 1996 standard.

BIBLIOGRAFÍA

Albert DG, Liu L. The effect of buildings on acoustic pulse propagation in an urban environment. *J Acoust Soc Am* 2010;127(3):1335-1346.

Allen RW, Davies H, Cohen MA, Mallach G, Kaufman JD, Adar SD. The spatial relationship between traffic-generated air pollution and noise in 2 US cities. *Environ Res* 2009;109:334–42.

Alves S, Waddington D. Estimation of uncertainty using revised draft ISO 1996-2. *Acoust Bull* 2014;39:34–41.

ANSI S12.9-1. Quantities and procedures for description and measurement of environmental sound. Part 1. New York: Acoustical Society of America; 1988.

ANSI S12.9-2. Quantities and procedures for description and measurement of environmental sound. Part 2: Measurement of long-term, wide areas. New York: Acoustical Society of America; 1992.

ANSI S12.9-3. Quantities and procedures for description and measurement of environmental sound. Part 3: Short-term measurements with an observer present. New York, USA: Acoustical Society of America; 1993.

ANSI S12.18. Procedures for outdoor measurement of sound pressure level. New York, USA: Acoustical Society of America; 1994.

Arana M, Garcia A. A social survey on the effects of environmental noise on the residents of Pamplona, Spain. *Appl Acoust* 1998;53:245–53.

Arana M, San Martín R, Nagore I, Pérez, D. What precision in the Digital Terrain Model is required for noise mapping? *Appl Acoust* 2011;72:522–6.

Arana M, San Martín R, Nagore I, Pérez, D. Using noise mapping to evaluate the percentage of people affected by noise. *Acta Acust* 2009;95:550–4.

Asakura T, Miyajima T, Sakamoto S. Prediction method for sound from passing vehicle transmitted through building façade. *Appl Acoust* 2013;74(5):758-769.

Babisch W, Ising H, Gallacher JEJ, Elwood PC, Sweetnam PM, Yarnell JWG, et al. Traffic noise, work noise and cardiovascular risk factors: The caerphilly and speedwell collaborative heart disease studies. *Environ Int* 1990;16:425–35.

Babisch W, Ising H, Kruppa B, Wiens D. The incidence of myocardial infarction and its relation to road traffic noise – The Berlin case-control studies. *Environ Int* 1994;20:469–74.

- Barrigón Morillas JM, Gómez Escobar V, Méndez Sierra JA, Vílchez Gómez R, Trujillo Carmona J. An environmental noise study in the city of Cáceres, Spain. *Appl Acoust* 2002; 63:1061-1070.
- Barrigón Morillas JM, Gómez Escobar V, Méndez Sierra JA, Vílchez Gómez R, Vaquero J.M. Effects of leisure activity related noise in residential zones. *Build Acoust* 2005; 12: 265-276.
- Barrigón Morillas JM, Ortiz-Caraballo C, Prieto Gajardo C. The temporal structure of pollution levels in developed cities. *Sci Total Environ* 2015;517:31-37.
- Barrigón Morillas JM, Montes González D, Rey Gozalo G. A review of the measurement procedure of the ISO 1996 standard. Relationship with the European Noise Directive. *Sci Total Environ* 2016;565:595–606.
- Bastián-Monarca NA, Suárez E, Arenas JP. Assessment of methods for simplified traffic noise mapping of small cities: Casework of the city of Valdivia, Chile. *Sci Total Environ* 2016;550:439-448.
- Berardi U, Cirillo E, Martellotta F. Interference effects in field measurements of airborne sound insulation of building façades. *Noise Control Eng J* 2011;59:165–76.
- Berardi U. The position of the instruments for the sound insulation measurement of building façades: From ISO 140-5 to ISO 16283-3. *Noise Control Eng J* 2013;61:1–11.
- Berglund B, Lindvall T, Schwela DH. Guidelines for community noise. Geneva, Switzerland: World Health Organisation; 1999.
- Buhaug H, Urdal H. An urbanization bomb? Population growth and social disorder in cities. *Global Environ Chang* 2013;23:1–10.
- Can A, Rademaker M, Van Renterghem T, Mishra V, Van Poppel M, Touhafi A, Theunis J, De Baets B, Botteldooren D. Correlation analysis of noise and ultrafine particle counts in a street canyon. *Sci Total Environ* 2011;409:564–72.
- Carter NL. Transportation noise, sleep, and possible after-effects. *Environ Int* 1996;22:105–16.
- Castro I, Tadeu A. Coupling of the BEM with the MFS for the numerical simulation of frequency domain 2-D elastic wave propagation in the presence of elastic inclusions and cracks. *Eng Anal Boundary Elem* 2012;36(2):169-180.
- CETUR (Centre d'Etudes des Transports Urbains). Guide du Bruit des Transports Terrestres. Prévision des niveaux sonores. France: CETUR; 1980.
- Chai YB, Li W, Gong ZX, Li TY. Hybrid smoothed finite element method for two dimensional acoustic radiation problems. *Appl Acoust* 2016;103:90-101.

Chang TY, Lin HC, Yang WT, Bao BY, Chan CC. A modified Nordic prediction model of road traffic noise in a Taiwanese city with significant motorcycle traffic. *Sci Total Environ* 2012;432:375–81.

D'Alessandro F, Schiavoni S. A review and comparative analysis of European priority indices for noise action plans. *Sci Total Environ* 2015;518–519:290–301.

EC (European Commission). Green Paper on Future Noise Policy. COM (96) 540. Brussels, Belgium: European Commission; 1996.

EC (European Commission). Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise. *Offic J Euro Commun L* 189, p. 12–26. Brussels, Belgium: European Commission; 2002.

EC (European Commission). Directive 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. *Official Journal L*, 168. Brussels: The European Commission, 0001–0823; 2015.

Echevarria Sanchez GM, Van Renterghem T, Thomas P, Botteldooren D. The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads. *Build Environ* 2016;97:96–110.

EEA (European Environment Agency). Transport at a crossroads. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European. EEA, Copenhagen: EEA; 2009.

EEA (European Environment Agency). Noise in Europe 2014. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2014.

EN 1793-3:1997. Road traffic noise reduction devices. Test method for determining the acoustic performance. Part 3: Normalized traffic noise spectrum. European Committee for Standardization, Brussels, 1998.

EN 12354-3. Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 3. Airborne sound insulation against outdoor sound. Bruxelles: European Committee for Standardization; 2000.

Evans GW, Hygge S, Bullinger M. Chronic noise and psychological stress. *Psychol Sci* 1995;6:333–8.

Evans GW, Lercher P, Meis M, Ising H, Kolfer WW. Community noise exposure and stress in children. *J Acoust Soc Am* 2001;109:1023–7.

Fernández-Camacho R, Brito Cabeza I, Aroba J, Gómez-Bravo F, Rodríguez S, de la Rosa J. Assessment of ultrafine particles and noise measurements using fuzzy logic and data mining techniques. *Sci Total Environ* 2015; 512–513:103–13.

FHWA-PD-96-046. Measurement of Highway-Related Noise. Washington D.C., USA: US Department of Transportation, Research and Special Programs Administration; 1996.

Fidell S, Barber DS, Schultz TJ. Updating a dosage–effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise. *J Acoust Soc Am* 1991;89: 221–33.

Fields JM. Reactions to environmental noise in an ambient noise context in residential areas. *J Acoust Soc Am* 1998;104:2245–60.

Fyhri A, Aasvang GM. Noise, sleep and poor health: modeling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems. *Sci Total Environ* 2010; 408; 4935–4942.

Garg N, Sinha AK, Gandhi V, Bhardwaj RM, Akolkar AB. A pilot study on the establishment of national ambient noise monitoring network across the major cities of India. *Appl Acoust* 2016;103:20–29.

Godinho L, Amado-Mendes P, Carbajo J, Ramis-Soriano J. 3D numerical modelling of acoustic horns using the method of fundamental solutions. *Eng Anal Boundary Elem* 2015; 51:64–73.

Gómez Escobar V, Barrigón Morillas JM, Rey Gozalo G, Vílchez-Gómez R, Carmona del Río FJ, Méndez Sierra JA. Analysis of the grid sampling method for noise mapping. *Arch Acoust* 2012a; 37; 499–514.

Gopinath B, Thiagalingam A, Teber E, Mitchell P. Exposure to workplace noise and the risk of cardiovascular disease events and mortality among older adults. *Prev Med* 2011; 53; 390–394.

Guski R. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise Health* 1999;1:45–56.

Hall FL, Papakyriakou MJ, Quirt JD. Comparison of outdoor microphone locations for measuring sound insulation of building façades. *J Sound Vib* 1984;92;559–67.

Harmonoise Project, Final Technical Report HAR7TR041213AEAT04 - 2005.

Harris CM. Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control. New York, USA: McGraw-Hill; 1998.

Henderson JV, Gun Wang H. Urbanization and city growth: The role of institutions. *Reg Sci Urban Econ* 2007;37:283–313.

Hopkins C, Lam Y. Sound fields near building facades – comparison of finite and semi-infinite reflectors on a rigid ground plane. *Appl Acoust* 2009;70:300–8.

Ising H, Babisch W, Kruppa B. Noise-induced endocrine effects and cardiovascular risk. *Noise Health* 1999;4:37–48.

ISO 140-5. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1998.

ISO 1996-1. Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basis quantities and assessment procedures. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2003.

ISO 1996-2. Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Acquisition of data pertinent to land use. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1987.

ISO 1996-2. Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise levels. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2007.

ISO 1996-2. Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels (11-02-02) 2nd working draft. ISO TC43 SC1 Working Group 45; 2011.

ISO 16283-3. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 3: Façade sound insulation. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2016.

Jagniatinskis A, Fiks B. Assessment of environmental noise from long-term window microphone measurements. *Appl Acoust* 2014;76:377–385.

Janczur R, Walerian E, Czechowicz M. Influence of vehicle noise emission directivity on sound level distribution in a canyon street, part I: simulation program test. *Appl Acoust* 2006a;67:643–58.

Janczur R, Walerian E, Meissner M, Czechowicz M. Influence of vehicle noise emission directivity on sound level distribution in a canyon street, part II: experimental verification. *Appl Acoust* 2006b;67:659–79.

Janczur R, Walerian E, Meissner M, Czechowicz M. Application of simulation program to specific urban situation. *Appl Acoust* 2009;70: 973–85.

- Jang HS, Kim HJ, Jeon JY. Scale-model method for measuring noise reduction in residential buildings by vegetation. *Build Environ* 2015 4;86:81-88.
- Jonasson, HG; Storeheier, S. Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Road Traffic Noise. SP Swedish National Testing and Research Institute, Boras, 2001.
- Jonasson, HG. Acoustic Source Modelling of Nordic Road Vehicles. SP Swedish National Testing and Research Institute, Boras, 2006.
- Karageorghis A, Johansson BT, Lesnic D. The method of fundamental solutions for the identification of a sound-soft obstacle in inverse acoustic scattering. *Appl Numer Math* 2012;62(12):1767-1780.
- Kephalopoulos S, Paviotti M, Anfosso-Lédée F, Van Maercke D, Shilton S, Jones N. Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping. *Sci Total Environ* 2014;482-483:400-10.
- Lambert J, Vallet M. Study related to the preparation of a communication on a future EC noise policy, LEN Report No. 9420. Bron, France: Institut National de Recherche sur les Transport et leur Sécurité; 1994.
- Lee PJ, Kang J. Effect of Height-To-Width Ratio on the Sound Propagation in Urban Streets. *Acta Acustic* 2015;101:73-87.
- Licitra G, Ascari E. Gden: An indicator for European noise maps comparison and to support action plans. *Sci Total Environ* 2014;482-483:411-9.
- Mann HB, Whitney DR. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann Math Stat* 1947: 18; 50-60.
- Mateus M, Carrilho JD, Da Silva MG. Influence of short-term sampling parameters on the uncertainty of the Lden environmental noise indicator. *J Phys* 2015 (Conference Series):588; id. 012026.
- Mateus M, Dias Carrilho J, Gameiro Da Silva M. An experimental analysis of the correction factors adopted on environmental noise measurements performed with window-mounted microphones. *Appl Acoust* 2015b;87:212-218.
- Mato-Méndez FJ, Sobreira-Seoane MA. Blind separation to improve classification of traffic noise. *Appl Acoust* 2011: 72; 590-598.
- Mehdi MR, Kim M, Seong JC, Arsalan MH. Spatio-temporal patterns of road traffic noise pollution in Karachi, Pakistan. *Environ Int* 2011;37(1):97-104.
- Memoli G, Paviotti M, Kephalopoulos S, Licitra G. Testing the acoustical corrections for reflections on a façade. *Appl Acoust* 2008;69(6):479-495.

Miedema HME, Vos H. Exposure–response relationships for transportation noise. *J Acoust Soc Am* 1998;104:3432–45.

Miedema HME, Oudshoorn CGM. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environ Health Perspect* 2001;109:409–16.

Montes González D, Barrigón Morillas JM, Rey Gozalo G. The influence of microphone location on the results of urban noise measurements. *Appl Acoust* 2015;90:64-73.

Morelli X, Foraster M, Aguilera I, Basagana X, Corradi E, Deltell A, et al. Short-term associations between traffic-related noise, particle number and traffic flow in three European cities. *Atmos Environ* 2015;103:25–33.

Mulligan GF, Crampton JP. Population growth in the world's largest cities. *Cities* 2005;22:365–80.

Murphy E, King EA. Strategic environmental noise mapping: methodological issues concerning the implementation of the EU Environmental Noise Directive and their policy implications. *Environ Int* 2010;36:290–8.

Muzet A. Environmental noise, sleep and health. *Sleep Med Rev* 2007; 11; 135-142.

NF S 31-133. Bruit des infrastructures de transports terrestres. Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques. AFNOR (Association Française de Normalisation). France, 2007.

Nicol F, Wilson M. The effect of street dimensions and traffic density on the noise level and natural ventilation potential in urban canyons. *Energ and Build* 2004;36:423–34.

NT ACOU 039. Road Traffic: Measurement of Noise immission – Engineering method. Espoo, Finland: Nordtest Tekniikantie 12; 2002.

Öhrström E. Effects of noise during sleep with reference to noise sensitivity and habituation. *Environ Int* 1990;16:477–82.

Öhrström E. Psycho-social effects of traffic noise exposure. *J Sound Vib* 1991;151:513–7.

Öhrström E. Effects of low levels of road traffic noise during the night: a laboratory study on number of events, maximum noise levels and noise sensitivity. *J Sound Vib* 1995;179:603–15.

Öhrström E. Longitudinal surveys on effects of changes in road traffic noise annoyance, activity disturbances, and psycho-social wellbeing. *J Acoust Soc Am* 2004; 115; 719-729.

- Olafsen, S.; Bard, D.; Strand, M.K.; Fernández Espejo, T. Methods of field measurements of façade sound insulation. *Noise Control Engin Jour*, Vol 63 (5), 2015, pp 467-477.
- Passchier-Vermeer W, Passchier WP. Noise exposure and public health. *Environ Health Perspect* 2000;108:123–31.
- Picaud J, Le Pollès T, L'Hermite P, Gary V. Experimental study of sound propagation in a street. *Appl Acoust* 2005;66(2):149-173.
- Prieto Gajardo C, Barrigón Morillas JM, Gómez Escobar V, Víchez-Gómez R, Rey Gozalo G. Effects of singular noisy events on long-term environmental noise measurements. *Pol J Environ Stud* 2014;23:2007–17.
- Prieto Gajardo C, Godinho L, Amado-Mendes P, Barrigón Morillas JM. Numerical analysis of acoustic barriers with a diffusive surface using a 2.5D boundary element model. *J Comput Acoust* 2015;23(3).
- Quirt JD. Sound fields near exterior building surfaces. *J Acoust Soc Am* 1985;77;557–66.
- Rey Gozalo G, Barrigón Morillas JM, Gómez Escobar V, Vílchez-Gómez R, Méndez Sierra JA, Carmona del Río FJ, Prieto Gajardo C. Study of the Categorisation Method Using Long-term Measurements. *Arch Acoust* 2013;38; 397–405.
- Rey Gozalo G, Barrigón Morillas JM, Gómez Escobar V. Analyzing nocturnal noise stratification. *Sci Total Environ* 2014;479–480:39–47.
- Rey Gozalo G, Barrigón Morillas JM, Prieto Gajardo C. Urban noise functional stratification for estimating average annual sound level. *J Acoust Soc Am* 2015;137(6):3198-3208.
- Richoux O, Ayrault C, Pelat A, Félix S, Lihoreau B. Effect of the open roof on low frequency acoustic propagation in street canyons. *Appl Acoust* 2010;71(8):731-738.
- Sakamoto S, Aoki A. Numerical and experimental study on noise shielding effect of eaves/louvers attached on building façade. *Build Environ* 2015 12;94, Part 2:773-784.
- Shimizu T, Koizumi S. Study of the compatibility between sound insulation performance and ventilation performance in gaps by installing nonwoven fabrics. *Build Environ* 2015;94(P1):335-343.
- Soler Rocasalbas S, Torregrosa Avilés S, Rossell Turull I, Arnet Vilaseca I. Comparativa entre medidas de ruido urbano a 1.5 y 4 m. *Proceeding of National Congress of Acoustic Tecniacústica*; 2005.

- Suárez E, Barros JL. Traffic noise mapping of the city of Santiago de Chile. *Sci Total Environ* 2014;466-467:539–46.
- Tadeu A, António J, Castro I. Coupling the BEM/TBEM and the MFS for the numerical simulation of acoustic wave propagation. *Eng Anal Boundary Elem* 2010;34(4):405-416.
- Thiessen GJ. Effect of traffic noise on the cyclical nature of sleep. *J Acoust Soc Am* 1988;84:1741–3.
- Van Renterghem T, Botteldooren D, Dekoninck L. Evolution of building façade road traffic noise levels in Flanders. *J Environ Monit* 2012;14(2):677-686.
- Van Renterghem T, Hornikx M, Forssen J, Botteldooren D. The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Build Environ* 2013;61:34-44.
- Van Renterghem T, Attenborough K, Maennel M, Defrance J, Horoshenkov K, Kang J, et al. Measured light vehicle noise reduction by hedges. *Appl Acoust* 2014;78:19-27.
- Vlachokostas Ch, Achillas Ch, Michailidou AV, Moussiopoulos N. Measuring combined exposure to environmental pressures in urban areas: an air quality and noise pollution assessment approach. *Environ Int* 2012;39:8–18.
- Vogiatzis K, Remy N. From environmental noise abatement to soundscape creation through strategic noise mapping in medium urban agglomerations in South Europe. *Sci Total Environ* 2014;482–483:420–31.
- Walerian E, Janczur R, Czechowicz M, Smirnowa J. Validation of a complex urban noise model close to a road. *Appl Acoust* 2011;72:790–802.
- Wang V, Lo E, Liang C, Chao K, Bao B, Chang T. Temporal and spatial variations in road traffic noise for different frequency components in metropolitan Taichung, Taiwan. *Environmental Pollution* 2016 12;219:174-181.
- Wang X, Mao D, Yu W, Jiang Z. Acoustic performance of balconies having inhomogeneous ceiling surfaces on a roadside building facade. *Build Environ* 2015;93(P2):1-8.
- WG-AEN (Working Group Assessment of Exposure to Noise). Good practice guide for strategic noise mapping and the production associated data on noise exposure. Version 2. Brussels, Belgium. European Commission, Position Paper 2; 2007.
- Wilcoxon F. Individual comparisons by ranking methods. *Biometr Bull* 1945: 1; 80-83.
- World Health Organization (WHO). Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. WHO Regional Office for Europe, Denmark, 2011.

Yao LY, Yu DJ, Cui XY, Zang XG. Numerical treatment of acoustic problems with the smoothed finite element method. *Appl Acoust* 2010;71(8):743-753.

Zannin PHT, Sant'Ana DQD. Noise mapping at different stages of a freeway redevelopment project – A case study in Brazil. *Appl Acoust* 2011;72:479–86.

Zuo F, Li Y, Johnson S, Johnson J, Varughese S, Copes R, et al. Temporal and spatial variability of traffic-related noise in the City of Toronto, Canada. *Sci Total Environ* 2014;472:1100–7.

ANEXOS

ANEXO A: PUBLICACIONES

A partir de los contenidos de esta tesis doctoral se han publicado los siguientes artículos y comunicaciones en revistas científicas JCR y actas de congresos:

ARTÍCULOS

- Montes González D, Barrigón Morillas JM, Rey Gozalo G. The influence of microphone location on the results of urban noise measurements. *Appl Acoust* 2015;90:64-73.
- Barrigón Morillas JM, Montes González D, Rey Gozalo G. A review of the measurement procedure of the ISO 1996 standard. Relationship with the European Noise Directive. *Sci Total Environ* 2016;565:595-606.

COMUNICACIONES

- Montes González D, Barrigón Morillas JM, Rey Gozalo G, Atanasio Moraga P, Vilchez Gómez R, Méndez Sierra JA, Maderuelo Sanz R. Mapas de ruido y metodologías de medida basadas en ISO 1996. 9º Congreso Ibérico de Acústica (Tecnacústica 2016) – EuroRegio 2016.
- Montes González D, Barrigón Morillas JM, Rey Gozalo G, Atanasio Moraga P, Vilchez Gómez R, Méndez Sierra JA, Maderuelo Sanz R. ISO 1996 Measurement procedure and the uncertainty associated in Strategic Noise Maps. 22nd International Congress on Acoustics (ICA 2016).

