

(04-015) - Green Synergy: Shifting the paradigm of acoustic barriers design

Castiñeira-Ibáñez, Sergio ¹; Tarrazó-Serrano, Daniel ¹; San Bautista, Alberto ¹; Uris, Antonio ¹; Rubio, Constanza ¹

¹ Universitat Politècnica de València

The need to reduce the nuisance caused by noisy environments and their pollution associated with the mobility of people and goods is today, more than ever, a target of analysis in multiple investigations. This project explores the use of trees as acoustic barriers in peri-urban environments, applying sonic crystals concepts. The research focuses on tree species' selection and spatial arrangement to create natural barriers against noise pollution. Different tree configurations are analyzed using numerical models to determine their effectiveness in sound absorption and dispersion, complemented with field studies to validate the models. Preliminary results show that specific species arrangements and combinations can significantly reduce noise, proposing a sustainable and aesthetically pleasing solution for noise mitigation in peri-urban areas. This approach offers an effective method of acoustic control and contributes to biodiversity and the beautification of urban spaces. Integrating acoustic and ecological principles in this study opens new perspectives in urban design and acoustic engineering, marking a milestone in the search for innovative and environmentally friendly solutions.

Keywords: Noise control; open acoustic barrier; sustainability; sonic crystal; mobility

Sinergia Verde: Cambiando el paradigma del diseño de las pantallas acústicas

La necesidad de reducir las molestias provocadas por los entornos ruidosos y su contaminación asociada a la movilidad de personas y mercancías es hoy más que nunca, un objetivo de análisis en múltiples investigaciones. Este proyecto explora la utilización de árboles como pantallas acústicas en entornos periurbanos, aplicando conceptos de cristales de sonido. La investigación se enfoca en la selección y disposición espacial de especies arbóreas para crear barreras naturales contra la contaminación acústica. Mediante modelos numéricos, se analizan diferentes configuraciones arbóreas para determinar su efectividad en la absorción y dispersión de sonido, complementándose con estudios de campo para la validación de los modelos. Los resultados preliminares muestran que ciertas disposiciones y combinaciones de especies pueden reducir significativamente el ruido, proponiendo una solución sostenible y estéticamente agradable para la mitigación del ruido en zonas periurbanas. Este enfoque no solo ofrece un método efectivo de control acústico, sino que también contribuye a la biodiversidad y al embellecimiento de los espacios urbanos. La integración de principios de acústica y ecología en este estudio abre nuevas perspectivas en el diseño urbano y la ingeniería acústica, marcando un hito en la búsqueda de soluciones innovadoras y respetuosas con el medio ambiente.

Palabras clave: Control de ruido; pantalla acústica abierta; sostenibilidad; cristal de sonido; movilidad

Correspondencia: sercasib@fis.upv.es

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el proyecto: PAS-Eco con referencia 20230632 (CIGE/2022/32), Conselleria d'Innovació, Universitats, Ciència i Societat Digital, Generalitat Valenciana.



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Los autores agradecen a M. Pilar Pita Andreu y a Eduardo Pita Andreu su disposición para permitir realizar las medidas en su parcela y su interés por la conservación de este tipo de estructuras singulares.

1. Introducción

1.1 Antecedentes de la investigación

En la última década ha surgido una gran preocupación por la problemática del aumento del ruido producido por el ser humano. Este aumento es debido al crecimiento de las poblaciones humanas, el transporte y la extracción de recursos (Gaudon et al., 2022). En los entornos urbanos y periurbanos, la contaminación acústica se ha convertido en un problema omnipresente que afecta profundamente a la salud y el bienestar humano. El continuo zumbido del tráfico, las actividades industriales y la expansión urbana contribuyen a crear un paisaje acústico persistentemente ruidoso y perturbador. Este fenómeno no es una mera molestia, sino un importante problema medioambiental, ya que la exposición prolongada a niveles elevados de ruido puede tener consecuencias negativas para la salud, como estrés, trastornos del sueño e incluso problemas cardiovasculares. Además, la complicada relación entre sonido y espacio en estos entornos pone de manifiesto la necesidad de estrategias eficaces de gestión y mitigación para preservar la tranquilidad y la calidad de vida en estas zonas densamente pobladas. En la actualidad, el ruido del tráfico rodado es el tipo más común de ruido ambiental que afecta a la exposición humana (Khan et al., 2018).

Muchos ciudadanos optan por una solución drástica para evitar el problema: mudarse de las grandes urbes a zonas rurales o periurbanas, donde los efectos del ruido son menores. Los movimientos migratorios de las grandes urbes a zonas rurales han acarreado una modificación en los afectados por la contaminación acústica. Mientras que antes los principales afectados era la población humana, ahora, ésta afecta tanto a humanos como a diferentes poblaciones de animales (Costello & Symes, 2014).

En respuesta al creciente desafío del ruido ambiental, las pantallas acústicas se han convertido en una solución viable para mitigar la contaminación acústica. Estas pantallas, diseñadas para absorber o desviar las ondas sonoras, varían considerablemente en su construcción y materiales, desde los tradicionales muros de hormigón hasta soluciones innovadoras con materiales avanzados. El mercado comercial ofrece muchas opciones, cada una de ellas adaptada a distintos requisitos ambientales y estéticos. Sin embargo, en medio de esta variedad, un creciente interés por soluciones sostenibles y ecológicamente armoniosas ha llevado a explorar pantallas naturales, como el uso de árboles y vegetación (Ow & Ghosh, 2017; Maleki et al., 2010). Las pantallas vegetales ofrecen atenuación acústica, mejoran el paisaje visual y contribuyen positivamente al ecosistema urbano, abordando la contaminación acústica de una manera que se alinea con objetivos medioambientales y de sostenibilidad más amplios (Nowak et al., 2006; Bowler et al., 2010; Mori et al., 2015). Se conoce que, con cinturones vegetales se obtienen reducciones de hasta 15 dB, dependiendo de la anchura del cinturón y el marco de plantación de este (Van Renterghem et al., 2014; Ow & Ghosh, 2017), además de la importancia ecológica que tiene sobre el medio ambiente y, la protección que le confiere a las ciudades en la moderación del CO₂. Con un cinturón de entre 40-60 metros se podría moderar el CO₂ que proporciona los vehículos que por allí pasaran (Senanayake et al., 2017). La necesidad de la integración paisajística hace que este tipo de pantallas sean las idóneas ya que si la vegetación natural es lo suficientemente alta, amplia y densa existen estudios que afirman que disminuye el ruido tráfico (Ow & Ghosh, 2017).

La vegetación reduce los niveles sonoros de tres formas distintas. En primer lugar, los elementos vegetales como troncos, tallos y hojas pueden reflejar y difractar las ondas sonoras. En segundo lugar, las vibraciones mecánicas de la vegetación provocadas por las ondas sonoras disipan la energía sonora. Por último, la interferencia destructiva entre las ondas sonoras directas procedentes de la fuente y las ondas reflejadas por el suelo provoca una reducción del sonido.

1.2 Concepto de pantallas acústicas

Las pantallas acústicas se sitúan entre la fuente y el receptor para controlar la transmisión del ruido. El efecto acústico de la pantalla se puede explicar de la siguiente manera: el ruido generado por la fuente viaja en línea recta hacia el receptor. Esta trayectoria se interrumpe por la pantalla acústica cuando esta se sitúa entre ambos. Una porción de la energía acústica emitida por la fuente de ruido es o bien reflejada o dispersada hacia la propia fuente, otra porción es transmitida a través de la pantalla, difractada por el borde de la pantalla o absorbida por el material del que está construida ésta.

Las pantallas acústicas tradicionales consisten básicamente en un medio continuo de material rígido. La utilización de este tipo de pantallas presenta, aparte de su baja capacidad de limitar el nivel de ruido (sobre todo a bajas frecuencias), problemas de diversa índole. Por una parte, debido a la carga de viento aplicada sobre la pantalla es necesaria una cimentación que produce un encarecimiento del producto. Por otra, su colocación provoca cierto rechazo en la población debido a la falta de visión y a la estética poco cuidada en general. Además, los materiales que se suelen utilizar son poco ecológicos (hormigón, plexiglás, metales...). Por tanto, el diseño de dispositivos de control basados en nuevas tecnologías y que aporten soluciones a dichos problemas abre un vasto campo de actuación tecnológica.

Las pantallas acústicas abiertas pueden ser la llave de este cambio tecnológico. En concreto, la existencia de pantallas basadas en cristales de sonido (CS) (Rubio et al., 2016), que son pantallas formadas por dispersores cilíndricos aislados inmersos en aire (ver Figura 1), permiten abrir un nuevo horizonte de manera que sea posible el diseño de una pantalla con una buena calidad acústica y de integración en el paisaje.

Figura 1: Pantalla acústica abierta basada en CS. (Universitat Politècnica de València)



La utilización de estas estructuras presenta una serie de ventajas respecto a las pantallas tradicionales: acústicamente, las pantallas abiertas consiguen altos niveles de atenuación a muy bajas frecuencias ($f < 500$ Hz), las más difíciles de atenuar. Permiten mediante una disposición determinada inhibir la transmisión del sonido evitando bloquear la visión a través de la pantalla, produciendo un efecto paisajístico positivo para la población. Esta nueva propuesta de pantalla vegetal basada en CS estará formada por árboles que actuarán como centros dispersores dispuestos de tal manera que los picos de atenuación, predichos mediante la Ley de Bragg, permitirán atenuar las frecuencias no deseadas (Rubio et al., 2016). Por lo tanto, son sintonizables, es decir, se puede elegir la frecuencia o banda de frecuencias en la que la atenuación acústica es máxima, y con ello, se pueden utilizar para atenuar diferentes fuentes de ruido, siendo posible diseñar pantallas personalizadas, ya que trabajan como filtros acústicos. Sin embargo, necesitan una anchura mínima, mayor que las pantallas tradicionales, para ser efectivas. Esto último no es un problema en el contexto de este proyecto ya que la utilización de este tipo de pantallas es para zonas periurbanas, donde el

espacio no es limitado. Para su diseño utilizaremos estructuras bidimensionales en los que el medio transmisor será el aire. Además, estos sistemas, son más sencillos de diseñar ya que solo hay que actuar sobre los dispersores.

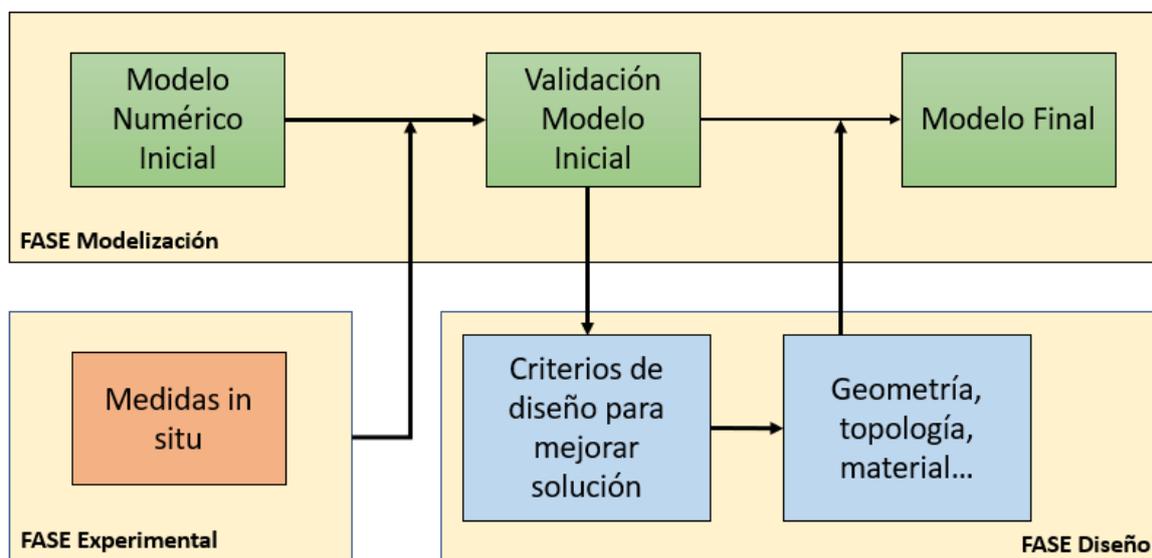
2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar el diseño de una pantalla acústica abierta basada en CS que utiliza como dispersores árboles autóctonos para su uso en zonas periurbanas. El diseño se realiza utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF), en concreto mediante el software comercial COMSOL Multiphysics® (COMSOL, 2022). Para el diseño se parte de una estructura existente en el término municipal de Colmenar Viejo (Madrid). Dado su singularidad, única a nivel nacional, se obtienen de la misma datos fundamentales para la modelización y futuro diseño de pantallas acústicas de este tipo. Finalmente, se muestran los resultados de medidas experimentales llevados a cabo con la citada estructura y se proponen mejoras, mediante diseños obtenidos con el MEF.

3. Metodología

Como se muestra en la Figura 2, el proyecto se lleva a término en tres fases. En primer lugar y conociendo la localización geográfica de la pantalla acústica formada por árboles, así como sus características geométricas, se realiza un modelo numérico para ser comparado con las medidas experimentales realizadas in situ. Posteriormente se valida el modelo numérico y, en la fase de diseño, se analizan las posibles mejoras a incorporar a la pantalla. Por último, y con las mejoras incorporadas al modelo inicial, se obtienen los resultados numéricos del modelo final. Estos resultados numéricos se comparan con los iniciales para justificar las mejoras obtenidas.

Figura 2: Esquema de las áreas de trabajo y metodología que propone el proyecto



Los métodos numéricos son una buena alternativa a los teóricos para encontrar soluciones a problemas que involucran la interacción de ondas con dispersores acústicos. Con el fin de predecir el rendimiento de una pantalla acústica, en la simulación el dispositivo propuesto se ha desarrollado considerando una pantalla con cilindros rígidos con una longitud infinita (en 2D son círculos rígidos). La pantalla acústica se considera infinitamente larga con el fin de evaluar la eficacia de esta y evitar así que los resultados no sean enmascarados por la

difracción en los bordes últimos o laterales de la misma. Dado un diseño, la simulación determina la atenuación del sonido en función de la frecuencia. Las simulaciones se han llevado a cabo utilizando el MEF. En este método se parte de la ecuación de Helmholtz que viene dada por:

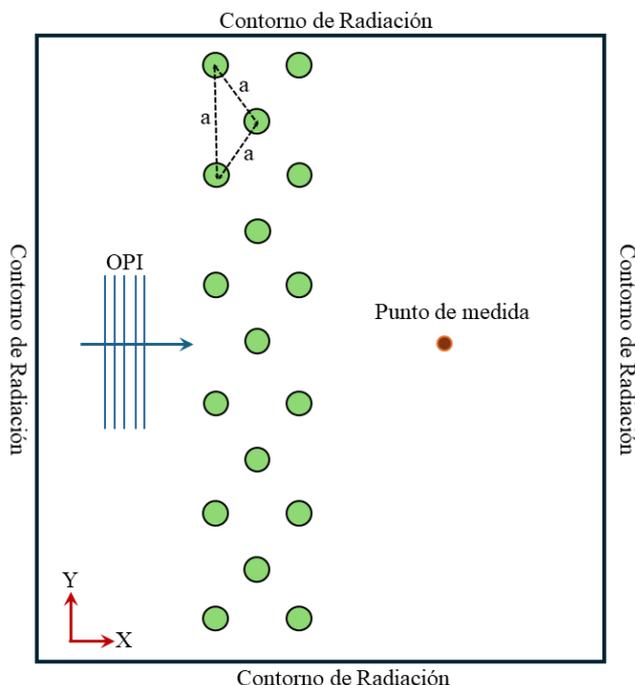
$$\nabla\left(\frac{1}{\rho}\nabla p\right) = \frac{\omega^2}{\rho c^2} p \quad (1)$$

donde, ρ es la densidad del aire, c es la velocidad del sonido en el medio de propagación (aire), ω es la frecuencia angular y p es la presión acústica.

Para abordar el problema mediante el MEF, primero se define la geometría de la estructura, se discretiza el dominio y se consideran las condiciones iniciales y de contorno (Reddy, 2019). Posteriormente, el software utilizando la Ecuación (1), resuelve numéricamente en cada punto del dominio seleccionado, obteniendo las soluciones al problema.

Las simulaciones se han llevado a cabo analizando numéricamente una estructura formada por tres filas de círculos en red triangular separados entre sí una distancia a (parámetro de red), tal y como muestra la Figura 3. Los círculos que simulan los cilindros son de radio R . Al considerar la estructura acústicamente rígida se aplica la condición de contorno de Neumann (velocidad de sonido cero) a sus superficies. Estos círculos están confinados en una región con paredes cuyas condiciones de contorno simulan campo libre (condición de contorno Sommerfeld) (Rubio et al., 2016). La finalidad es que la onda plana incidente a la pantalla (OPI), que viaja de izquierda a derecha (sentido eje X positivo), no se refleje en las paredes. La presión total que se obtiene de este modo en cada punto es la suma de la presión dispersada y la presión incidente.

Figura 3: Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno



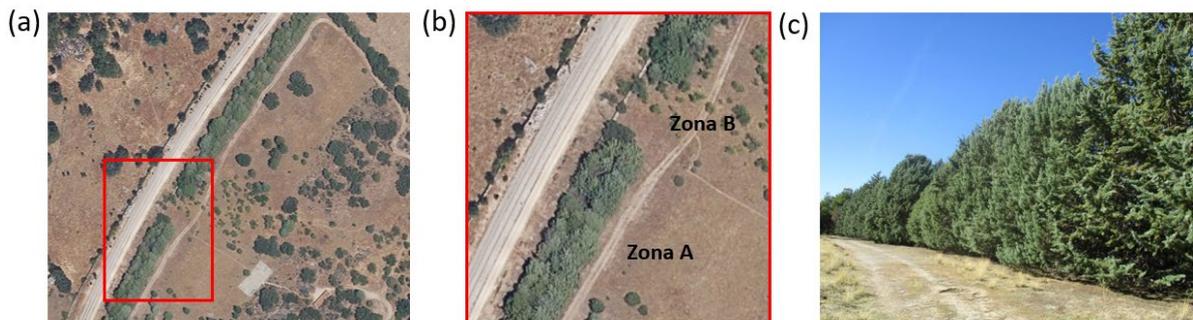
Las propiedades de atenuación acústica de la pantalla constituida por los elementos periódicos mostrada en la Figura 3, están representadas por su espectro de atenuación en el rango de frecuencias elegido (10-5000 Hz), caracterizado mediante la pérdida por Inserción

(Atenuación acústica o *Insertion Loss*, IL), definida como la diferencia entre los niveles de presión sonora registrados en el mismo punto sin pantalla (medición directa, p_d) y con pantalla (medición interferida, p_i), mediante la expresión:

$$IL = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{p_d}{p_i} \right| \text{ (dB)} \quad (2)$$

La pantalla acústica real que se estudia en este proyecto se encuentra en el término municipal de Colmenar Viejo, Madrid (España). La zona de la pantalla se define entre la esquina SO con coordenadas UTM 30T E 431609, N 4505718, y la esquina NE con coordenadas UTM 30T E 431785 y N 4506030. Esta estructura, es una distribución periódica de árboles plantados en triple hilera en red triangular, perteneciente a la especie *Cupressus arizonica* Greene, colocados junto a una vía férrea Madrid-Burgos. Los parámetros geométricos medios de esta estructura son parámetro de red 3.5 m y diámetro 0.4 m. En la Figura 4 (a) se muestra una imagen de satélite de la pantalla acústica, donde se aprecia su longitud (aproximadamente 500 m), La Figura 4 (b) es una ampliación de la Figura 4 (a), para indicar dos zonas: la zona A donde se realizan las medias experimentales de IL con pantalla y la zona B, donde se realizan las mismas medidas sin pantalla, ya que es una zona abierta. En la Figura 4 (c) se muestra la imagen de la pantalla desde el suelo. El modelo numérico que simula esta pantalla es el descrito en la Figura 3.

Figura 4: Imágenes de la pantalla acústica formada por árboles de la especie *Cupressus arizonica* Greene, tomadas desde diferentes perspectivas.



Las mediciones se realizaron en la mañana del 23 de noviembre de 2023. Los registros climatológicos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) fueron temperatura de 8,5°C, viento de 1,3 km/h en dirección noreste y racha máxima de 2,9 km/h. Esto permitió obtener valores sin alienación debida al viento u otros factores. En cuanto a la posición, se tomaron datos de las zonas A y B (ver Figura 4 (b)). El equipo de investigación midió las distancias entre árboles para verificar la colocación escalonada correspondiente a una malla SC triangular. También se tomaron medidas de los diámetros de los árboles para modelar la pantalla con mayor exactitud (Figura 3).

Las medidas con pantalla se realizaron en la zona A, mientras que sin pantalla la zona B, tal y como se indica en la Figura 4 (b). En ambos casos se siguió el mismo procedimiento. Para ello se realizó una emisión frente a la pantalla (a 1 m de distancia), lo más centrada posible sobre ésta. Se utilizó un trípode que permitía el movimiento rotativo para que la emisión fuera lo más perpendicular posible al plano de la pantalla. La medida se realizó en una cuadrícula de 9 puntos en la zona de sombra de la pantalla, creando un plano de medida a 0.25 m de distancia, del plano posterior de la pantalla.

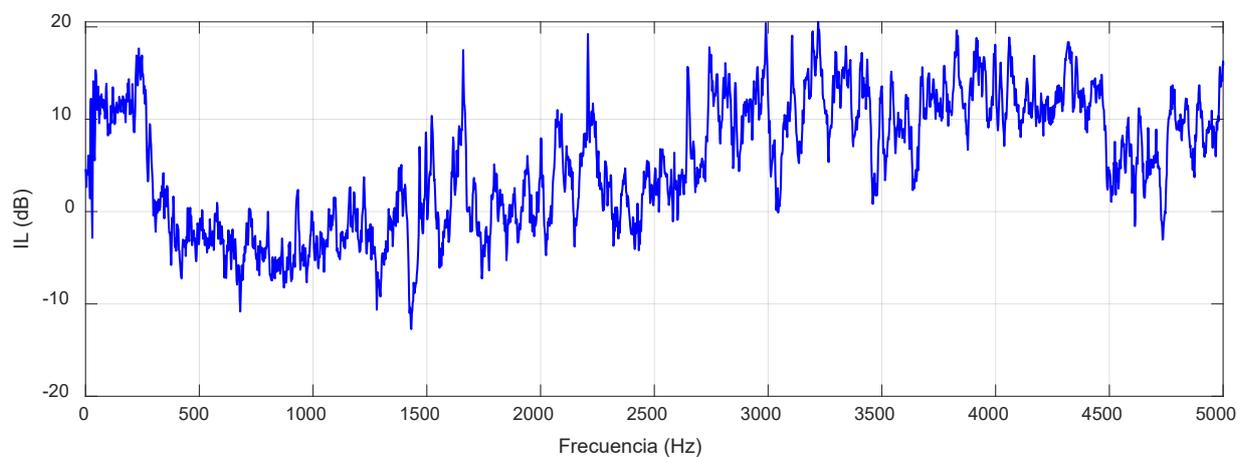
La distancia entre puntos de la cuadrícula de medida fue de 0.4 m. El ruido de fondo era mínimo lo que ayudó a evitar interferencias en los resultados de la medida. La medida se realizó con la emisión de una señal sonora omnidireccional de ruido rosa. Para ello, se utilizó

una fuente de sonido Brüel & Kjær Type 4224 ruido rosa 50 Hz a 10 kHz. Para captar la señal experimental se utilizó un equipo Brüel & Kjær PULSE Tipo 3560-C, que controlaba tanto la emisión como la recepción de la señal. Cada medida duró aproximadamente un minuto con 1000 promedios FFT de la señal recogida por el micrófono, que era del tipo Brüel & Kjær 4935 ¼". Se obtuvieron resultados del espectro sonoro no ponderado (en forma FFT) entre 10 y 5000 Hz en los puntos indicados anteriormente. Finalmente, para cada grupo de medidas se realizó una media energética y se aplicó la Ecuación (1).

4. Resultados

En primer lugar, se muestra en la Figura 5, el espectro de IL para la medida experimental de la pantalla acústica.

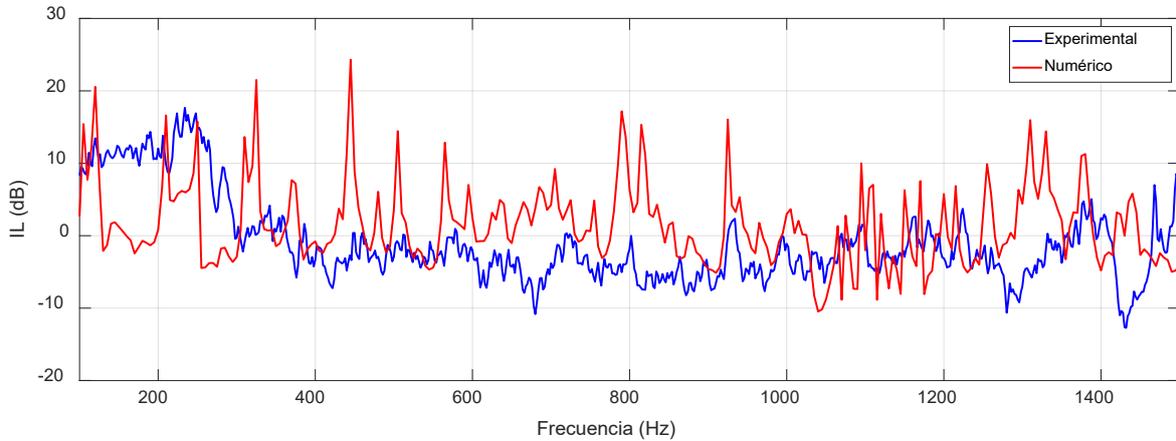
Figura 5: Resultado IL (dB) experimental de la pantalla acústica formada por árboles



Como se puede apreciar, la atenuación (IL) solo se presenta a muy bajas frecuencias y a altas frecuencias. Estos resultados se explican de la siguiente manera: dado que la separación entre árboles es considerable, la difracción Bragg se produce a muy bajas frecuencias, en torno a 100 Hz, mientras que la atenuación a altas es debida a la presencia de vegetación. Hay que tener en cuenta que los árboles ocupan una franja de aproximadamente 20 m, ya que las ramas se abren considerablemente y tienen una altura de unos 9 m de media, con lo que queda justificado este hecho.

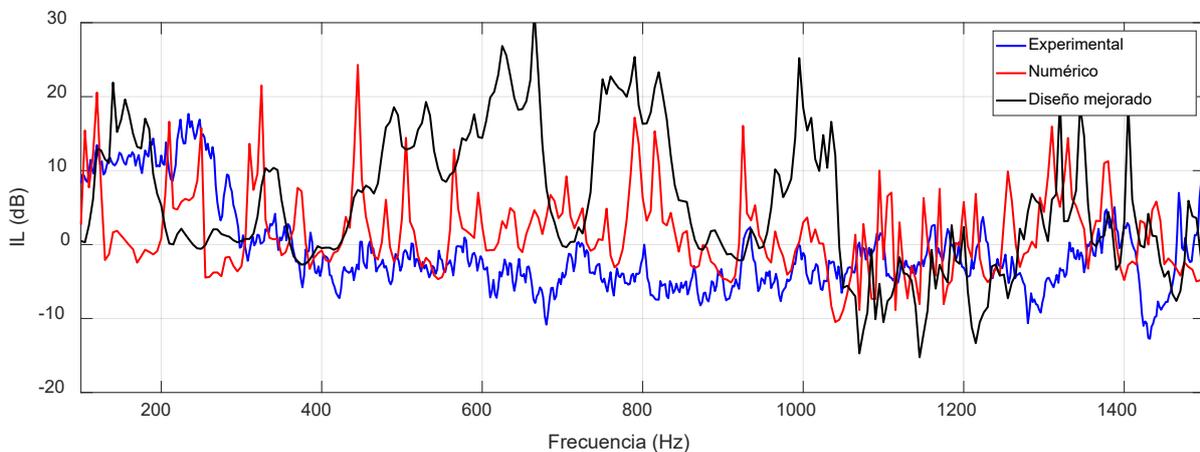
En la Figura 6 se comparan los espectros del resultado experimental y del modelo numérico correspondiente, centrándonos en el intervalo de 100 a 1500 Hz, que es en el que habitualmente se intenta maximizar el IL en las pantallas acústicas. Las diferencias observadas en el espectro de frecuencias son debidas al hecho de que en el numérico no se está teniendo en cuenta la altura de los árboles y por lo tanto la difracción por los bordes de la pantalla.

Figura 6: Resultado IL (dB) experimental de la pantalla acústica formada por árboles frente al numérico



Para mejorar el diseño de la pantalla formada por árboles se plantea la siguiente solución: reducir la separación de los dispersores (árboles), ya que es lo que está provocando que la difracción Bragg ocurra a muy bajas frecuencias. Evidentemente, la limitación la establece el marco de plantación de los árboles. Se establece un metro como límite inferior, aunque se tenga que elegir otra especie arbórea. En la Figura 7 se muestra la comparativa entre el espectro del modelo numérico inicial (pantalla original) con el espectro obtenido con el diseño mejorado. Se puede comprobar como el rango de frecuencias de 400 a 1100 Hz ha mejorado considerablemente.

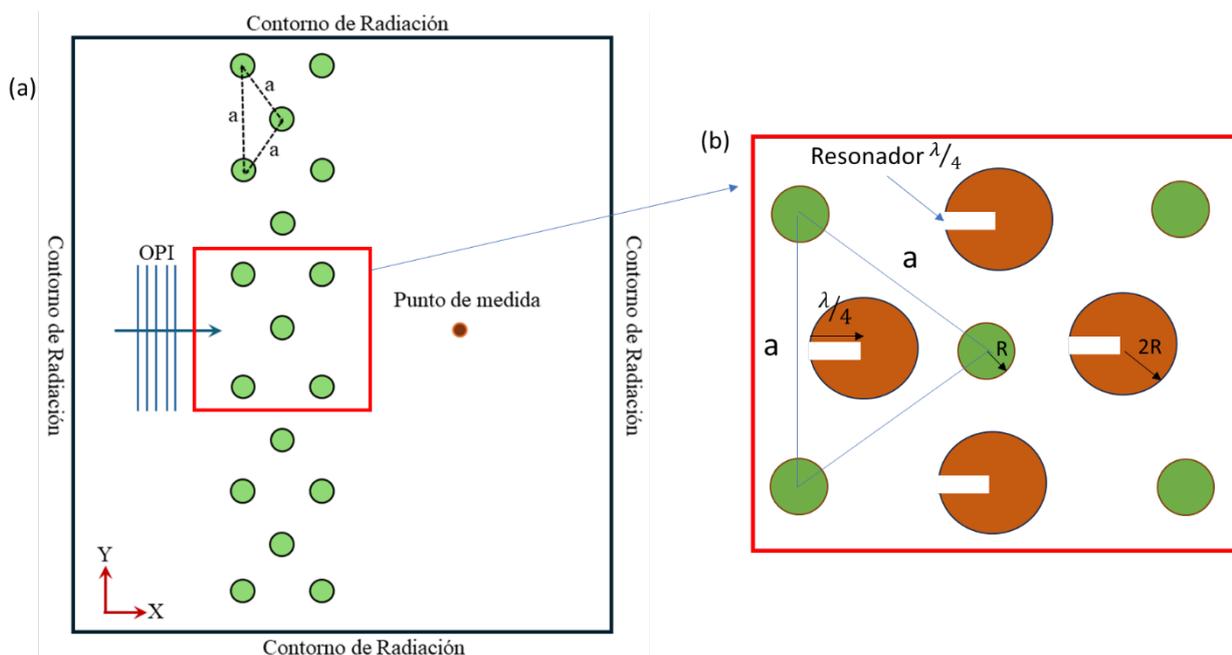
Figura 7: Resultado IL (dB) del diseño mejorado de la pantalla acústica formada por árboles frente al numérico inicial



Dado que a la pantalla estudiada de Colmenar Viejo no le cabe aplicar la solución descrita, se plantea dar una solución práctica que sea viable. Esta, consiste en añadir elementos artificiales dentro de la red de árboles existente en la pantalla original, con un tamaño de diámetro superior y que tengan mecanizado un resonador $\lambda/4$.

Físicamente, al introducir más elementos dispersores, y por otro lado los resonadores, se tendrán dos mecanismos de atenuación del ruido actuando al mismo tiempo. En la Figura 8 se muestra la nueva red de dispersores. A partir del modelo numérico utilizado inicialmente (Figura 8(a)) se sustituye la red inicial por la formada por los mismos árboles más los dispersores artificiales con resonador (Figura 8(b)).

Figura 8: Esquema del nuevo modelo numérico y condiciones de contorno: (b) es la nueva red que se introduce en (a)



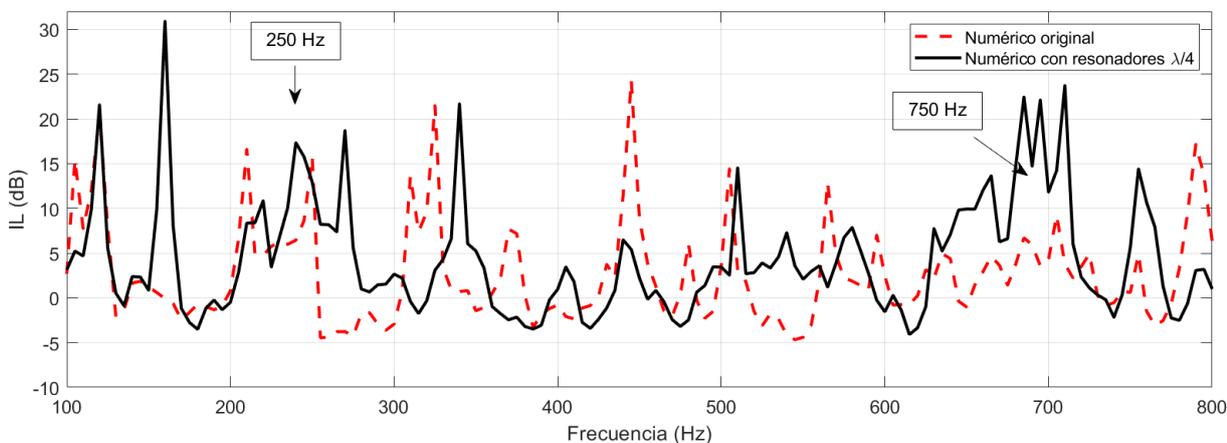
Los resonadores se caracterizan por atenuar la frecuencia que resulta de la expresión:

$$f_n = n \cdot c / 4L \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (3)$$

donde c es la velocidad del sonido en el aire, L la longitud del resonador y n un número entero impar.

Se ha realizado la simulación numérica diseñando el resonador para 250 Hz, lo que implica que a bajas frecuencias mejorará el espectro de atenuación acústica (IL) respecto a la pantalla original a esa frecuencia y a 750 Hz. Este resultado se muestra en la Figura 9, donde en trazo continuo en color negro se representa el espectro de IL para la pantalla con resonadores y en trazo discontinuo rojo el espectro de IL para la pantalla original. De esta manera se consigue mayor atenuación en el espectro de frecuencias y queda abierto el diseño del resonador a aquellas frecuencias que se quieran atenuar.

Figura 9: Resultado IL (dB) del diseño mejorado con dispersores artificiales de la pantalla acústica formada por árboles frente al numérico inicial



5. Conclusiones

Para el diseño de una pantalla acústica abierta 2D formada por árboles y que presente buenos resultados de atenuación, este trabajo ha tomado como punto de partida una pantalla acústica real situada en el término municipal de Colmenar Viejo, Madrid (España), formada por una distribución periódica de árboles plantados en triple hilera en red triangular, perteneciente a la especie *Cupressus arizonica* Greene. Se ha verificado que solamente atenúa las muy bajas frecuencias y también las altas, presentando poca atenuación en el entorno de 1000 Hz. A partir de estos resultados, se ha diseñado una pantalla acústica abierta 2D basada en CS y formada por árboles que trabaja en un rango de bajas frecuencias (100 a 1500 Hz). Este primer diseño mejora sustancialmente la atenuación acústica en el rango de frecuencias próximo a 1000 Hz con respecto al que se obtiene con la pantalla original. Para conseguir este resultado, se ha tenido que modificar el marco de plantación, dado que el de la pantalla original era demasiado grande, debido principalmente a la especie arbórea utilizada. En un segundo diseño y manteniendo el marco de plantación original, se han añadido dispersores artificiales que incluyen resonadores a la red de árboles. Esta segunda opción pretende mantener la pantalla original y dar una solución razonable. Los resultados muestran que permite seleccionar ciertas frecuencias para ser atenuadas. Con los resultados obtenidos se propone una solución sostenible y estéticamente agradable para la mitigación del ruido en zonas periurbanas, teniendo presente las restricciones debidas al marco de plantación de la especie arbórea utilizada. Utilizar pantallas acústicas abiertas formadas por especies arbóreas, contribuye a velar por la conservación de los ecosistemas montañosos, permitiendo la recuperación de los bosques degradados y la protección de su diversidad biológica, además de contribuir a la reducción de la cantidad de CO₂ de la zona donde se instale la pantalla.

Referencias

- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning* 97, 147–155.
- Castiñeira-Ibáñez, S., Rubio, C., Sánchez-Pérez, J. V. (2013). Acoustic wave diffraction at the upper edge of a two-dimensional periodic array of finite rigid cylinders. *A comprehensive design model of periodicity-based devices. Euro Physics Letters*, 101, 64002.
- COMSOL AB, Stockholm, Sweden (2022). COMSOL Multiphysics® (6.0) [Software]. <https://www.comsol.com>
- Costello, R. and Symes, L. B. (2014). Effects of Anthropogenic Noise on Male Signalling Behaviour and Female Phonotaxis in *Oecanthus* Tree Crickets. *Animal Behaviour*, vol. 95, pp. 15-22.
- Gaudon, J. M., McTavish, M. J., Hamberg, J., Cray, H. A. & Murphy, S. D. (2022). Noise attenuation varies by interactions of land cover and season in an urban/peri-urban landscape. *Urban Ecosyst* 25, 811–818
- Khan, J., Ketzler, M., Kakosimos, K., Sørensen, M., Solvang Jensen, S. (2018). Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques. *Science of The Total Environment*, 634, 661-676
- Maleki, K., Hosseini, S., Nasiri, P. (2010). The effect of pure and mixed plantations of robinia pseudoacasia and pinus eldarica on traffic noise decrease. *International Journal of Environmental Sciences* 1, 213–224.
- Mori, J., Hanslin, H. M., Burchi, G., Sæbø, A. (2015). Particulate matter and element accumulation on coniferous trees at different distances from a highway. *Urban Forestry & Urban Greening* 14, 170–177.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban forestry & urban greening* 4, 115–123.
- Ow, L. F. & Ghosh, S. (2017). Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. *Applied Acoustics*, vol. 120, pp. 15-20.
- Reddy, J. N. (2019). *Introduction to the finite element method*. McGraw-Hill Education.
- Rubio, C., Castiñeira-Ibáñez, S., Sánchez-Pérez, J. V., Candelas, P., Belmar, F., & Uris, A. (2016). Open Acoustic Barriers: A New Attenuation Mechanism. *InTech*. doi: 10.5772/64360
- Senanayake, I. K. G. A., Rupasinghe, H. T. & Halwatura, R. U. (2017). Mitigation of traffic induced carbon dioxide concentration through road-side greenery. *Engineering Research Conference (MERCon)*, Moratuwa.
- Van Renterghem, T., Attenborough, K., Maennel, M., Defrance, J., Horoshenkov, K., Kang, J., Bashir, I. & Taherzade, S. (2014). Measured light vehicle noise reduction by hedges., *Applied Acoustics*, vol. 78, pp. 19-27.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

