

# GUI PARA LA EXTRAPOLACIÓN DE LOS NIVELES DE RUIDO DE CAMPO PRÓXIMO DE UN VEHÍCULO AL CAMPO LEJANO

David Ibarra, Pedro Cobo, Teresa Bravo

Centro de Acústica Aplicada y Evaluación no Destructiva (CAEND), CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid (ESPAÑA).

[david.ibarra@caend.upm-csic.es](mailto:david.ibarra@caend.upm-csic.es), [pcobo@caend.upm-csic.es](mailto:pcobo@caend.upm-csic.es), [teresa.bravo@caend.upm-csic.es](mailto:teresa.bravo@caend.upm-csic.es)

## Resumen

En este trabajo se describe la GUI (Graphical User Interface) diseñada en MATLAB para calcular el filtro de propagación de los niveles de ruido de campo próximo de un vehículo al campo lejano. Su implementación permite seleccionar los parámetros de la posición de la fuente y del receptor, así como las condiciones atmosféricas. Considera modelos de impedancia de superficies con diferentes configuraciones físicas, (homogéneas o en capas), ya sean de reacción local o de reacción extendida. La interfaz de usuario permite representar gráficamente la impedancia normalizada, la impedancia característica, los coeficientes de reflexión de onda plana o esférica, la atenuación por divergencia geométrica, un término constante que depende de la separación entre fuente y receptor, la atenuación por la absorción del aire, que depende de la frecuencia y de las variables atmosféricas (temperatura, presión y humedad). A distancias largas, puede ser cuantitativamente importante y la atenuación por absorción del suelo, que contiene esencialmente la interferencia del ruido directo con el reflejado en el suelo, que puede ser constructiva (refuerzo) o destructiva (atenuación).

**Palabras-clave:** interfaz gráfica, filtro de propagación, extrapolación de niveles, impedancia del suelo.

## Abstract

A GUI is described in MATLAB designed to calculate the propagation filter of noise levels measured in the near field of a vehicle to the far field position. Its implementation allows selecting the parameters of the position of the source and receiver, and the atmospheric conditions. Impedance models are considered with different surfaces configurations (homogeneous or layered), either with local or extended reaction. The user interface allows plotting the normalized impedance, characteristic impedance, the reflection coefficients of plane or spherical waves, the geometrical divergence attenuation by a constant term, that depends on the separation between source and receiver and the attenuation by absorption of air, which depends on the frequency and the atmospheric variables (temperature, pressure and humidity). A long distances this effect can be quantitatively important. And the attenuation by absorption of ground contains essentially the direct interference with the reflected noise into the soil, which may be constructive (reinforcement) or destructive (attenuation).

**Keywords:** propagation filter, noise levels extrapolation, ground impedance.

**PACS no.** 43.28.+h.

## 1 Introducción

La hipótesis inicial [1], es que la molestia del ruido de tráfico está muy correlacionada con los niveles máximos. Por tanto, si fuéramos capaces de detectar y/o controlar aquellos vehículos/conductores que generan los niveles máximos, tendríamos una herramienta muy eficaz para reducir la molestia por ruido del tráfico rodado.

Para medir el ruido radiado al campo próximo usamos dos micrófonos embarcados en el vehículo: uno en el interior del capó, para medir, por tanto, el ruido generado por el motor, y otro cerca de la rueda trasera más alejada del tubo de escape, para medir el ruido de rodadura[2]. Es bien conocido, [3], la entrada de a dimisión de aire en el motor y la interacción ruedas/pavimento son las dos fuentes que contribuyen de manera predominante al ruido radiado por un vehículo. El ruido aerodinámico también contribuye, aunque a un nivel mucho menor y a frecuencias más bajas [4]. Como sabemos, el ruido del motor aporta componentes periódicas del fundamental (orden 2N) al ruido de banda ancha. El ruido de rodadura (y por ende el ruido global) decae con la frecuencia a partir de 1000 Hz, con una pendiente aproximada de unos 40 dB/década.

En este trabajo se Analiza la propagación del ruido de un vehículo desde los micrófonos de campo próximo (cerca de una de las ruedas traseras y dentro del capo) de un vehículo hasta un micrófono en el campo lejano (7.5 m desde la línea central del coche y 1.2 m del suelo) [5]. La diferencia de niveles entre ambas posiciones, o exceso de atenuación, depende fuertemente del tipo de suelo y su configuración física. Este efecto se simula mediante la superposición de la señal directa proveniente de la fuente, más la señal reflejada en el suelo. Para poder explicar las observaciones experimentales se tiene que asumir una reflexión en el suelo de onda esférica, que incluye dos términos: la reflexión de onda plana, más un segundo término, que contiene una función de variable compleja, denominada función de pérdidas en el suelo. El cálculo de esta función de variable compleja no es fácil, y a lo largo de los últimos años se han propuesto diferentes técnicas numéricas para hacerlo. El objetivo de este trabajo es la elaboración de una interfaz gráfica de usuario GUI, que permita de manera sencilla estimar un filtro de propagación con todos los parámetros necesarios. En la sección 2 se describe el modelo de propagación de onda esférica. En la sección 3 se explica la geometría establecida para la extrapolación de los niveles. En la Sección 4 se describen las características de la GUI desarrollada, ilustrándose su aplicación para nuestro caso.

## 2 Modelo de propagación de onda esférica

La norma ANSI S1.18 [6], se basa en un modelo de propagación de onda esférica descrito por Attenborough [7]. Sea la configuración de la Figura 1, con un receptor separado de una fuente una distancia  $R_1$ . El campo producido por la fuente incide en el suelo con un ángulo  $\theta$ . En el receptor, la presión acústica será la suma de la señal directa, que viene desde la fuente, más la señal reflejada en el suelo, que recorre una distancia  $R_2$ . Si aplicáramos un modelo de onda plana, obtendríamos  $p = p_d + R_p p_r$ , siendo  $R_p$  el coeficiente de reflexión de onda plana.

Para suelos duros la impedancia del suelo,  $Z_s$ , es mucho mayor que la impedancia del aire,  $Z_0$ . En esas condiciones  $R_p \approx 1$ , y la presión acústica en el receptor se doblaría. En incidencia rasante, sin embargo,  $R_p \approx -1$ , y la presión acústica en el receptor se anularía, en contra de lo que se obtiene en medidas

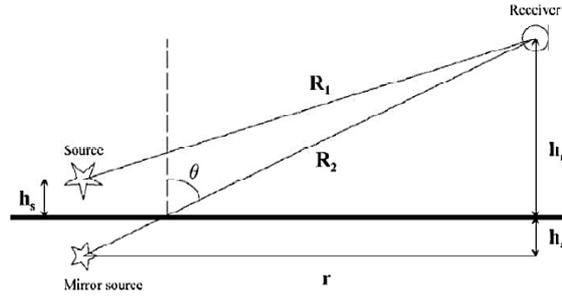


Figura 1 – Geometría para el estudio de propagación de onda esférica sobre el suelo [8]

experimentales. Esta paradoja se resuelve considerando un modelo de propagación de ondas esféricas, según el cual

$$p(x, y, z) = \frac{e^{jk_0 R_1}}{4\pi R_1} + [R_p + (1 - R_p)F(w)] \frac{e^{jk_0 R_2}}{4\pi R_2}, \quad (1)$$

donde

$$Q = R_p(\theta) + [1 - R_p(\theta)]F(w), \quad (2)$$

es el coeficiente de reflexión de onda esférica en el suelo. La contribución del segundo término de la Ec. (2) al campo total en el receptor tiene en cuenta que los frentes de onda son esféricos, en lugar de planos. Esta contribución también se denomina onda de tierra;  $w$  es una variable compleja denominada distancia numérica, que será definida más tarde, y  $F(w)$  es una función denominada factor de pérdidas en el suelo. Si la fuente y el receptor se situasen sobre el suelo, entonces

$$p(x, y, z) = 2 F(w) \frac{e^{jk_0 R}}{4\pi R}, \quad (3)$$

donde  $R$  es la distancia horizontal emisor-receptor. La Ec. (3) es la que permite la interpretación de  $F(w)$  como un factor de pérdidas en el suelo.

El efecto del suelo en la señal reflejada se puede caracterizar por su impedancia. Podemos considerar un suelo homogéneo, determinado por una impedancia única,  $Z_s$ , o un suelo estratificado, en cuyo caso, la impedancia de entrada, o impedancia superficial, será una función de las impedancias y los espesores de las capas consideradas.

Por lo que respecta al coeficiente de reflexión de onda plana, se puede obtener una expresión considerando la geometría de la Figura 2,

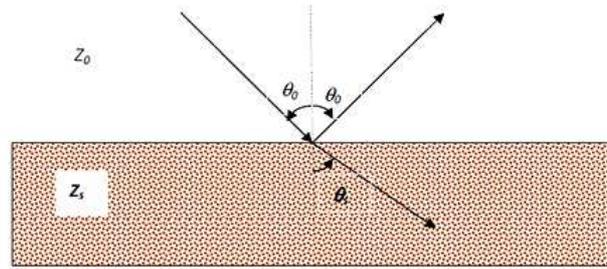


Figura 2 – Ondas incidente, reflejada y transmitida en una interfaz entre dos medios

$$R_p = \frac{Z_s \cos \theta_0 - Z_0 \cos \theta_s}{Z_s \cos \theta_0 + Z_0 \cos \theta_s'} \quad (4)$$

donde los ángulos de incidencia y transmisión están relacionados por

$$k_0 \sin \theta_0 = k_s \sin \theta_s, \quad (5)$$

siendo \$k\_0\$ y \$k\_s\$ el número de onda en el aire, y en el suelo, respectivamente. Sustituyendo la Ec. (5) en la Ec. (4) encontramos que, puede ponerse también como

$$R_p = \frac{Z_s \cos \theta_0 - Z_0 \left[ 1 - \left( \frac{k_0}{k_s} \sin \theta_0 \right)^2 \right]^{1/2}}{Z_s \cos \theta_0 + Z_0 \left[ 1 - \left( \frac{k_0}{k_s} \sin \theta_0 \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (6)$$

Un suelo con un comportamiento tal se dice que es de reacción extendida. Muchos suelos, sin embargo, se pueden considerar de reacción local, en cuyo caso, el coeficiente de reflexión es

$$R_p = \frac{Z_s \cos \theta_0 - Z_0}{Z_s \cos \theta_0 + Z_0}. \quad (7)$$

En un suelo con reacción local, por tanto, los rayos se propagan siempre en dirección perpendicular a la interfaz (\$\cos \theta\_s=1\$, \$\theta\_s=0\$). Pues bien, según Chessell [9], la distancia numérica, \$w\$, tiene la expresión

$$w = \begin{cases} \frac{2jk_0 R_2}{(1-R_p)^2 \sin^2 \theta} \beta^2 \left( 1 - \frac{k_0^2 \sin^2 \theta}{k_s^2} \right) & \text{Reacción extendida} \\ \frac{1}{2} j k_0 R_2 \frac{(\cos \theta + \beta)^2}{1 + \beta \cos \theta} & \text{Reacción local} \end{cases} \quad (8)$$

donde  $\beta=Z_s/Z_0$  es la admitancia del suelo. Las formulas de Attenborough [6], con el procedimiento de Pirinchieva [10,11] para calcular la función de perdidas, son más apropiadas para el cálculo de la distancia numérica y la función de perdidas.

La Ec. (1) puede escribirse, también como

$$p(x, y, z) = \frac{e^{jk_0 R_1}}{4\pi R_1} \left[ 1 + Q \frac{R_1}{R_2} e^{jk_0(R_2-R_1)} \right]. \quad (9)$$

Por consiguiente, el exceso de nivel de presión sonora sobre el que existiría en ausencia de suelo (o en campo libre), puede ponerse como

$$\Delta L = 20 \log \left| \left| 1 + Q \frac{R_1}{R_2} e^{jk_0(R_2-R_1)} \right| \right|, \quad (10)$$

o también

$$\Delta L = 10 \log \left\{ 1 + |Q|^2 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 + 2 |Q| \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \cos[k_0(R_2 - R_1) + \phi] \right\}, \quad (11)$$

donde  $\phi$  es la fase de  $Q$ . En muchos trabajos aparecen  $\Delta L$  promediadas en bandas de 1/3 de octava. En estos casos, segun Chessell [9], la Ec. (11) ha de ser modificada a

$$\Delta L = 10 \log \left\{ 1 + |Q|^2 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 + 2 |Q| \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \cos[f_a k_0(R_2 - R_1) + \phi] \frac{\sin[f_b k_0(R_2 - R_1)]}{f_b k_0(R_2 - R_1)} \right\}, \quad (12)$$

siendo  $f_a = [1 - (\Delta f / f_i)^2]^{1/2}$ ,  $f_b = \Delta f / f_i$ ,  $\Delta f$  el ancho de banda de tercio de octava, y  $f_i$  la frecuencia central de la banda. Para el caso de bandas de 1/3 de octava,  $f_b = 0.116555$  y  $f_a = 0.99318$ .  $\Delta L$  también se denomina exceso de atenuación con respecto a la presión que existiría en campo libre. Así pues, para poder calcular el efecto del suelo, se requiere un modelo de impedancia que puede ser de un parámetro como el de Delany y Bazley [12], de 2 parámetros como el de la norma ANSI S1.18 [7], de 3 parámetros como el de Hamet ó el de Wilson [13], o de 4 parámetros como el de Wilson [14]. Estos modelos de impedancia se pueden aplicar para reacción local o extendida. Segun Anfosso-Ledee *et al.* [15] y Li *et al.* [16], la hipótesis de reaccion local es apropiada para la mayor parte de suelos, excepto para aquellos con resistividad al flujo baja ( $< 10 \text{ kN s/m}^4$ ), tales como nieve, bosques o pavimentos porosos. En este caso, es más conveniente un modelo de suelo de reacción extendida.

### 3 Micrófonos de campo cercano y campo lejano

En las medidas realizadas a lo largo de un proyecto anterior [17] se asumió la geometría esquematizada en la Figura 3. Los micrófonos  $m_1$  y  $m_2$  están a una altura sobre el suelo  $h_1$  y  $h_2$ , respectivamente, y están separados por una distancia  $l_{12}$ . El micrófono de campo lejano  $m_3$  está a una altura  $h_3$  sobre el suelo, y a unas distancias de  $l_{13}$  y  $l_{23}$  de los micrófonos  $m_1$  y  $m_2$ , respectivamente. Si aceptamos que el micrófono de campo lejano está donde especifica la norma ISO 11819-1 [18], entonces  $h_3 = 1.2 \text{ m}$  y  $l_{13} = 7.5 \text{ m}$ . Las alturas de los micrófonos de campo cercano,  $h_1$  y  $h_2$ , y su distancia

relativa,  $l_{12}$ , dependerán de cada vehículo específico. Las alturas aproximadas de los micrófonos de campo cercano fueron de  $h_1=0.8$  m y  $h_2=0.08$  m, y la separación horizontal entre ellos fue de  $l_{12}=0.75$  m.

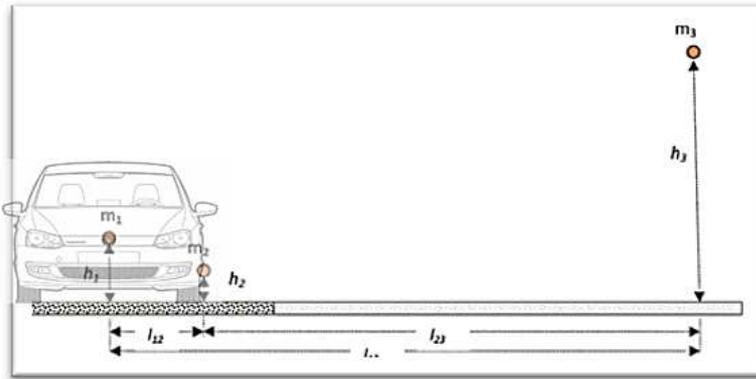


Figura 3 – Posiciones de los micrófonos de campo próximo y de campo lejano

#### 4 Extrapolación del campo cercano al campo lejano mediante el diseño de una GUI

La interfaz gráfica de usuario es una herramienta ideal para facilitar el cálculo de la extrapolación de los niveles de campo cercano al campo lejano. La implementación es sencilla y funcional ya que brinda las opciones necesarias para conseguir un filtro de propagación final, permitiéndonos introducir los parámetros de la ubicación de la fuente y del receptor, así como las condiciones atmosféricas. En la Figura 4 podemos apreciar la primera parte de la pantalla de inicio de la GUI para la extrapolación del campo cercano al campo lejano, que permite calcular la distancia de la señal directa entre la fuente y el receptor ( $r_s=6.84$  m), la señal reflejada ( $r_i=6.87$  m), y el ángulo de incidencia ( $\theta=79.26^\circ$ ). Los datos de entrada son: altura de la fuente  $h_s=0.08$  m, altura del receptor  $h_r=1.2$  m, y distancia entre fuente y receptor  $d_r=6.75$  m.

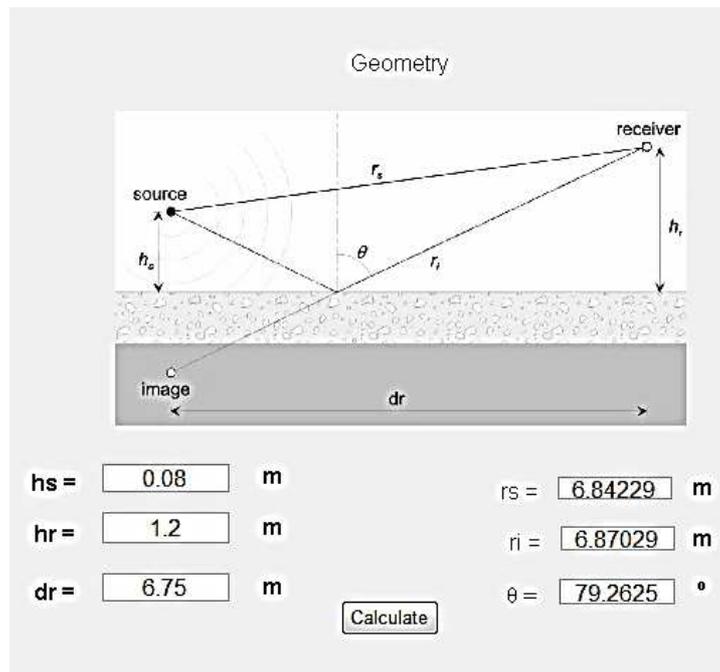


Figura 4 – Geometría para la extrapolación del campo cercano al campo lejano.

La segunda parte de la pantalla de inicio que se muestra en la Figura 5, nos permite introducir los valores de las condiciones atmosféricas. Para este ejemplo, éstas se han elegido como: temperatura  $T=20^\circ$ , presión atmosférica  $P_a=1000$  mb y humedad relativa  $H=50\%$ , que nos permiten obtener la densidad del aire ( $\rho_0=1.18$  kg/m<sup>3</sup>), la velocidad del sonido en el aire ( $c_0=343.2$  m/s) y la impedancia del aire ( $Z_0=406.04$  N s/m<sup>2</sup>). Esto nos conducirá a un cálculo más preciso para condiciones específicas en las que nos encontremos.

En la pantalla 2 podemos elegir si la propagación se hará sobre suelos de reacción local o de reacción extendida, también podemos seleccionar si son superficies homogéneas o por capas. En este caso elegimos un suelo homogéneo de reacción local. Una vez que seleccionamos el medio para la propagación, tenemos que elegir qué tipo de modelo de impedancia para el suelo queremos utilizar, para este caso elegimos el modelo de un parámetro de Delany y Bazley, con una resistividad al flujo de 8350 k N s/m<sup>4</sup>.

En la Figura 6 podemos observar los distintos modelos de impedancia que podemos elegir para el cálculo del filtro de propagación. Encontramos: el modelo de Delany-Bazley que solo necesita el valor de la resistividad al flujo  $\sigma$ ; el modelo de porosidad variable que considera el mismo parámetro que el modelo anterior más el de la porosidad variable  $\alpha$ ; el modelo de Hamet y Wilson de 3 parámetros que son, la resistividad al flujo  $\sigma$ , la porosidad  $\phi$  y la tortuosidad  $T$  y el modelo de la norma ANSI S1.18 y el modelo de Wilson de 4 parámetros que son los mismos parámetros del modelo de 3 parámetros más el factor de forma  $S_p$ .

Atmospheric conditions

T =  °C       $\rho_0 =$   kg/m<sup>3</sup>

Pa =  mb      Co =  m/s

H =  %      Zo =  N s/m<sup>2</sup>

Figura 5 – Condiciones atmosféricas para la extrapolación del campo cercano al campo lejano

**Type of Ground Surface**

**Impedance Model**

Delany - Bazley (1)       Hamet (3)       ANSI S1.18 (4)

$\sigma$          $\sigma$          $\sigma$

$\phi$          $\phi$

T       T

Sp

Variable Porosity (2)       Wilson (3)       Wilson (4)

$\sigma$          $\sigma$          $\sigma$

$\alpha$          $\phi$          $\phi$

T       T

Sp

Figura 6 – Tipo de superficie y modelo de impedancia para la propagación al campo lejano.

Una vez que hemos seleccionado el tipo de superficie y tipo de modelo, presionamos el botón de ok y el de Next, para pasar a la tercera y última pantalla que se muestra en la Figura 7. En esta imagen podemos ver todos los resultados que nos ofrece esta interfaz gráfica de usuario. En las primeras gráficas de la izquierda, aparecen la impedancia  $Z_s$ , la impedancia característica  $Z_g$ , el número de onda  $k_s$ , el coeficiente de reflexión de onda plana  $R_p$  y el coeficiente de reflexión de onda esférica  $Q$ , cada uno de ellos con su parte real y su parte imaginaria. En los otros gráficos de la derecha obtenemos la constante de la atenuación por divergencia geométrica, que en este caso es de 36.7 dB/m y la absorción del aire que aumenta conforme aumenta la frecuencia. En este caso es casi despreciable ya que la distancia es muy corta. También tenemos representada la atenuación debida al suelo que depende de la frecuencia. Finalmente la suma de todos estos factores de atenuación, nos da como

resultado el filtro de propagación para las condiciones descritas previamente, que fluctúa entre 25 y 45 dB/m dependiendo de la frecuencia.

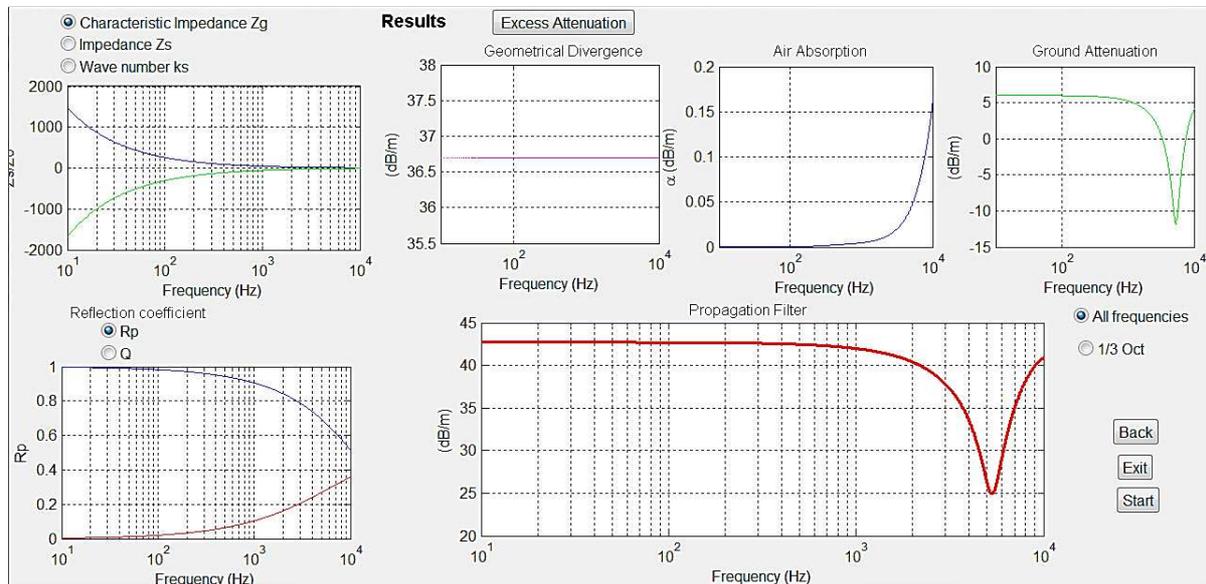


Figura 7 – Pantalla de resultados del exceso de atenuación.

En la Figura 8 se muestran los mismos resultados, pero esta vez representando el número de onda  $k_s$ , el coeficiente reflexión de onda esférica  $Q$  y el filtro de propagación expresado en tercios de octava.

## 5 Conclusiones

El cálculo del filtro de propagación para la extrapolación de niveles de campo cercano al campo lejano requiere de una geometría de partida y unas condiciones atmosféricas iniciales, que son importantes en la propagación del sonido. Se ha presentado una interfaz gráfica de usuario que facilita la extrapolación del campo cercano al campo lejano con una herramienta sencilla e interactiva. Además de proporcionar las curvas de atenuación por divergencia geométrica, la absorción debida al aire, la atenuación por el suelo, la impedancia característica, el número de onda y los coeficientes de reflexión de onda plana y onda esférica, proporciona como resultado final la suma de todos estos factores de atenuación, expresado como el filtro de propagación en todo el espectro de frecuencias, ya sea en banda estrecha o en tercios de octava.

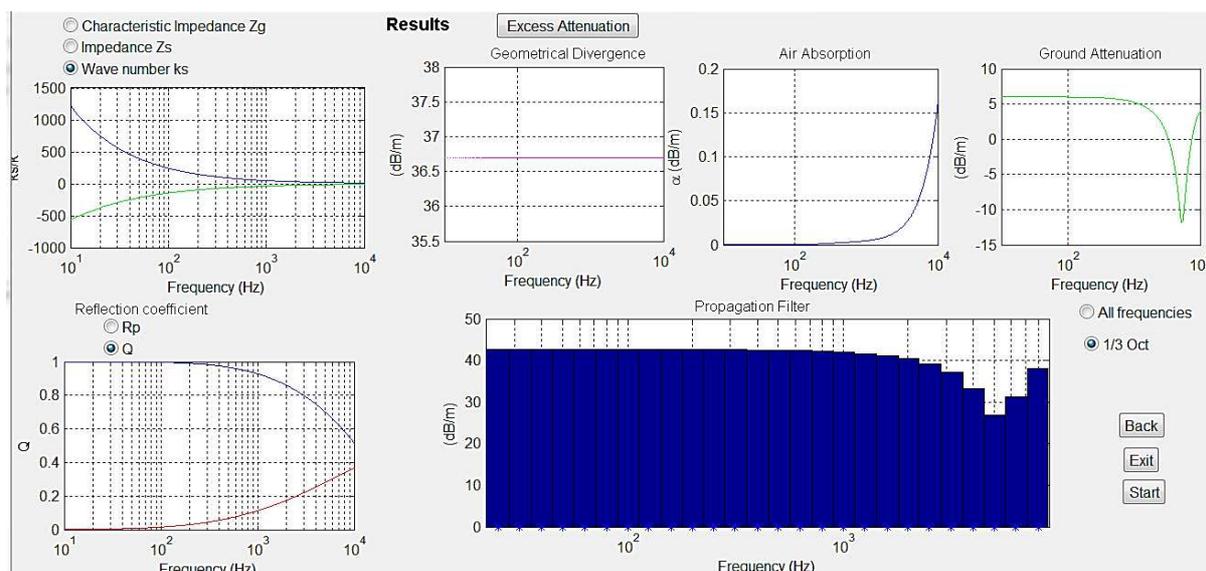


Figura 8 – Pantalla de resultados del exceso de atenuación, resultado del filtro de propagación mostrado en tercio de octavas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto TRA2011-26261-C04-01.

## Referencias

- [1] T. Sato, T. Tano, M. Bjorkman and R. Rylander, “Road traffic noise annoyance in relation to average noise level, number of events and maximum noise level”, *J.Sound Vib.*, 223, 775-784, 1999.
- [2] Ibarra, D., Cobo, P., Calvo, J.A., San Román, J.L. Relating the near field noise of passenger cars with the driving behavior. *Noise Con. Eng. J.*, 60, 2012.
- [3] Stücklschwaiger, W. “Experimental pass-by noise source analysis.” Technical report D.D10, Project Silence, European Commission, 2006.
- [4] F. Anfoso-Lédée, “The development of a new tire-road noise measurement device in France”, 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics SURF 2004, PIARC (World Road Association), 2004.
- [5] Cobo, P., Atenuación del ruido de un vehículo entre el campo próximo y el campo lejano. Informe 1, Proyecto TRA2011-26261-C04-01, 2012.

- [6] ANSI S1.18, Template method for ground impedance. American National Standards Institute, ASA, 1999
- [7] Attenborough, K., Sound propagation close to the ground. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 34:51-82, 2012
- [8] Taraldsen, G., A note on the reflection of spherical waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117: 3389-3392, 2005
- [9] Chessell, C.I., Propagation of Noise along a finite impedance boundary. *J. Acoust. Soc. Am.*, 62. 825-834, 1978.
- [10] Pirinchieva, R.K., Model study of sound propagation over ground of finite impedance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 90: 2678-2682, 1991.
- [11] Pirinchieva, R.K., Erratum: Model study of sound propagation over ground of finite impedance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 93: 1722, 1993.
- [12] Delany, M.E., Bazley, E.N., Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl. Acoust.*, 3: 105-116, 1970.
- [13] Attenborough, K., Bashir, I., Therzadeh, S., Outdoor ground impedance models. *J. Acoust. Soc. Am.*, 129: 2806–2819, 2011.
- [14] Sutherland, L.C., Daigle, G.A., Atmospheric sound propagation. In *Handbook of Acoustics* (M.J.Crocker, Ed.), John Wiley&Sons, New York, 1999.
- [15] Anfosso-Ledee, F., Dangla, P., Berengier, M., Sound propagation above a porous road surface with extended reaction by boundary element method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122: 731-736, 2007.
- [16] Li, K.M., Waters-Fuller, T., Attenborough, K., Sound propagation from a point source over extended-reaction ground. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104: 679-685, 1998.
- [17] Ibarra, D., Cobo, P., Bravo, T., Calvo, J.A., Álvarez, C., Quesada, A., San Román, J.L., Medidas de ruido de un vehículo en campo cercano y su relación con el campo lejano. Informe No 10, Proyecto TRA2008-05654-C03-03, 2012
- [18] ISO 11819-1. Medición de la influencia de las superficies de carretera sobre el ruido de tráfico. Parte 1: Método estadístico del paso de vehículos. International Standard Organization, Geneve. 2002.