

## PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN BOSQUES: VALIDACIÓN DE UN MODELO

PACS 43.28.En

A.I. Tarrero Fernández<sup>1</sup>; J. González<sup>2</sup>; M<sup>a</sup>. Machimbarrena<sup>2</sup>; M. Arenal<sup>2</sup>, M<sup>a</sup> A. Martín Bravo<sup>1</sup>  
Universidad de Valladolid

<sup>1</sup> Dpto. de Termodinámica y Física Aplicada de la E.U.Politécnica  
Francisco Mendizábal s/n. 47014 Valladolid  
Tef: 983-423500 Fax:983-423490 E-mail: ana@sid.eup.uva.es

<sup>2</sup> Dpto. de Física Aplicada de la ETS de Arquitectura  
Avda. Salamanca s/n. 47014 Valladolid  
Tef: 983-423446 E-mail: juliog@opt.uva.es

### ABSTRACT

The research work described in this paper intends to validate a newly developed outdoor sound propagation model [1] when the sound propagates inside a forest. This theoretical model includes ground effects, scattering of sound due to the presence of the trees and the atmospheric absorption.

In order to validate the model, a great number of measurements of the sound pressure level have been made in a poplar forest with and without leaves. When the experimental results are compared with those predicted by the model, it is possible to evaluate the behaviour of the model under different conditions.

### RESUMEN

El objetivo fundamental que perseguimos al realizar este trabajo es tratar de validar un modelo de propagación de sonido en exteriores [1] como en el caso del interior de un bosque. El modelo contempla el efecto del suelo, la dispersión del sonido producido por la presencia de los árboles y la absorción atmosférica.

Para conseguir este objetivo se han realizado ensayos midiendo el nivel de sonidos en varios puntos de un bosque de chopos en dos épocas distintas del año. Comparando los resultados experimentales con los predichos por el modelo es posible evaluar su comportamiento en diversas situaciones.

### INTRODUCCIÓN

Desde Eyring, Wiener and Keast [2,3] hasta la actualidad aparecen en la literatura científica varios trabajos relacionados con la propagación del sonido en el interior de bosques y praderas pero algunos de los modelos de propagación, que existen actualmente, no tienen en cuenta los efectos de dispersión producidos por irregularidades en la superficie u obstáculos en la trayectoria del sonido.

En [1] se propone un modelo sencillo que desarrolla, con un algoritmo simple, los efectos de dispersión encontrados en las ref [4,5,6] cuando el sonido se propaga a través de áreas abiertas y densas. Para comprobar la validez del modelo se han hecho medidas en situaciones

muy diferentes: bosques regulares, donde los árboles están equiespaciados, bosques irregulares con los árboles colocados de forma aleatoria, distintas densidad de árboles y distintos diámetros de los troncos.

Los bosques regulares eran de hoja caduca y en alguno de ellos se han hecho medidas en 2 épocas del año para tener información sobre la influencia de las hojas.

Los bosques irregulares eran de hoja perenne, y también en uno de ellos se han hecho medidas en 2 épocas del año diferentes y en 2 direcciones en las que la densidad de vegetación variaba.

## DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para que se produzca el fenómeno de la dispersión la longitud de onda del sonido que se propaga, tiene que ser menor que algunas dimensiones características del obstáculo que se encuentre en su trayectoria. El obstáculo difunde el sonido en todas las direcciones, y en este contexto, la dispersión es un fenómeno de frecuencias altas y no afecta mucho a la propagación de las frecuencias bajas. La frecuencia límite, por encima de la cual se producen los fenómenos de dispersión, es función de las dimensiones de los objetos que lo producen, y además, la dispersión interfiere con otros efectos de propagación y muestra una dependencia específica con la frecuencia. Los efectos de dispersión están descritos utilizando aproximaciones estadísticas.

Basándose en el desarrollo de la dispersión de Leschnik [7] en el modelo que se va a aplicar se estima que la corrección del nivel de presión sonora,  $A_e(r)$  en dB y a una distancia  $r$ (m) de la fuente, para el caso de una fuente puntual, viene dada por:

$$A_e(r) = \Delta L(h', \alpha, r') + 20 \log(r \cdot 8 \cdot nQ)$$

$\Delta L(h', \alpha, r')$  es la corrección del nivel dada por la dispersión y la extensión esférica desarrollada en [7],  $r$  (m) es la distancia entre la fuente y el receptor,  $r'$  es la distancia efectiva normalizada a través del área de dispersión,  $r' = R_{sc} \cdot nQ$ ,  $h'$  es la altura normalizada del objeto que produce la dispersión,  $h' = h \cdot nQ$ ,  $nQ$  está relacionado con el proceso de dispersión y toma valores específicos para cada objeto. En el caso de bosques  $nQ$  viene expresado por:  $nQ(\text{forest}) = n'' \cdot d$  donde  $n''$  es la densidad de árboles y  $d$  es el diámetro medio de los troncos de los árboles y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción del objeto que dispersa, comprendido entre 0.1 y 0.4

Se asume que la dispersión desarrollada es significativa por encima de una frecuencia límite dada por la expresión:  $f' = c / (p \cdot d)$ . Siendo  $c$  la velocidad del sonido. Por encima de esta frecuencia, la función de ponderación  $k_f$ , que compara el tamaño del tronco con la longitud de onda, se estima por medio de la función de intensidad relativa dispersada en el caso de cilindros dada en [8] y está estimada por interpolación en el apéndice 3 de [1].

Huisman en [9] indica que el mecanismo de dispersión no es un proceso de difusión sino que está mas cerca de un proceso de extinción de energía. Para los procesos de extinción, la energía disipada de la onda directa propagada, causa una reducción del nivel de presión sonora, que es proporcional a la longitud total de la trayectoria del sonido,  $R_{sc}$ , dentro de la zona que contiene a los objetos que producen la dispersión.

La dispersión produce pérdidas de coherencia del sonido e incrementa la incoherencia. Combinando los efectos del suelo ( $g_r$ ) y de la dispersión ( $sc$ ) para cada frecuencia, la corrección del nivel total (en dB referidos a campo libre) puede ser expresada aproximadamente por:

$$K_{g_r+sc} = 10 \log \left[ (1 - k_f \cdot T) \left( 1 + |pr|^2 \right) + k_f \cdot T \left( 1 + |pr|^2 \right) \right] + k_f \cdot T \cdot k_p \cdot A_e(r)$$

$k_f$  actúa como la fracción de sonido coherente que es transformada en sonido incoherente.

$pr$  es la presión sonora compleja reflejada en el suelo.

$T$  es una función que da una transición suave evitando superestimaciones a cortas distancias.

$$T = \min \left[ \left( \frac{R_{sc} \cdot nQ}{1.25} \right)^2, 1 \right]$$

$k_p$  es una constante de proporcionalidad igual a 1.25 para el caso de bosques. Para la impedancia del suelo se ha utilizado el modelo de Delany y Bazley y los efectos de la absorción del aire se han calculado de acuerdo a la ISO 9613-1.

El modelo de propagación de sonido se ha implementado en Matlab y los datos que hay que introducir en el programa son: altura de la fuente, altura del receptor, distancia fuente-receptor, diámetro medio de los troncos, altura media de los árboles, distancia horizontal del bosque entre fuente y receptor, todos ellos expresados en m, densidad de árboles, en árboles/m<sup>2</sup>, coeficiente de absorción de los árboles, que en nuestro caso se ha tomado 0.1, temperatura del aire en °C y la humedad relativa en %.

En el modelo se contempla la posibilidad de que en la trayectoria del sonido no haya bosque y entonces la contribución de este se anula y de esta forma pueden verse los diferentes comportamientos de un mismo suelo, con árboles y sin ellos, predichos por el modelo (en las gráficas viene indicado por model with forest and model without forest).

## DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE MEDIDA, PROCEDIMIENTO Y EQUIPO UTILIZADO

El lugar de medida fue una plantación extensa, de unos 300 m de largo por 66 m de ancho, con chopos, colocados de forma regular en hileras, separadas 5 m unas de otras, dentro de cada hilera la distancia entre árboles también era de 5 m. La altura media de los árboles era de 9 m, el diámetro medio 0.27 m y la densidad de 0.042 árboles/m<sup>2</sup>. El suelo era terroso con muy pocas hierbas, y se regaba frecuentemente.

Se midió el nivel equivalente durante un minuto para las siguientes distancias fuente-receptor: 2,10,20,40,60,80 y 87 m. La medición se realizó en tercios de octava, sin ponderación frecuencial y constante de tiempo fast. Como receptor se utilizó el analizador modular 2260 de B&K. La fuente, modelo 4224 de B&K, emitiendo un ruido rosa en banda ancha, se colocó justo en la orilla del bosque a 0.8 m de altura y el receptor a 1,2 m de altura. Siempre la dirección fuente receptor era paralela a la línea de los árboles y distaba lo mismo de 2 filas de árboles consecutivas.

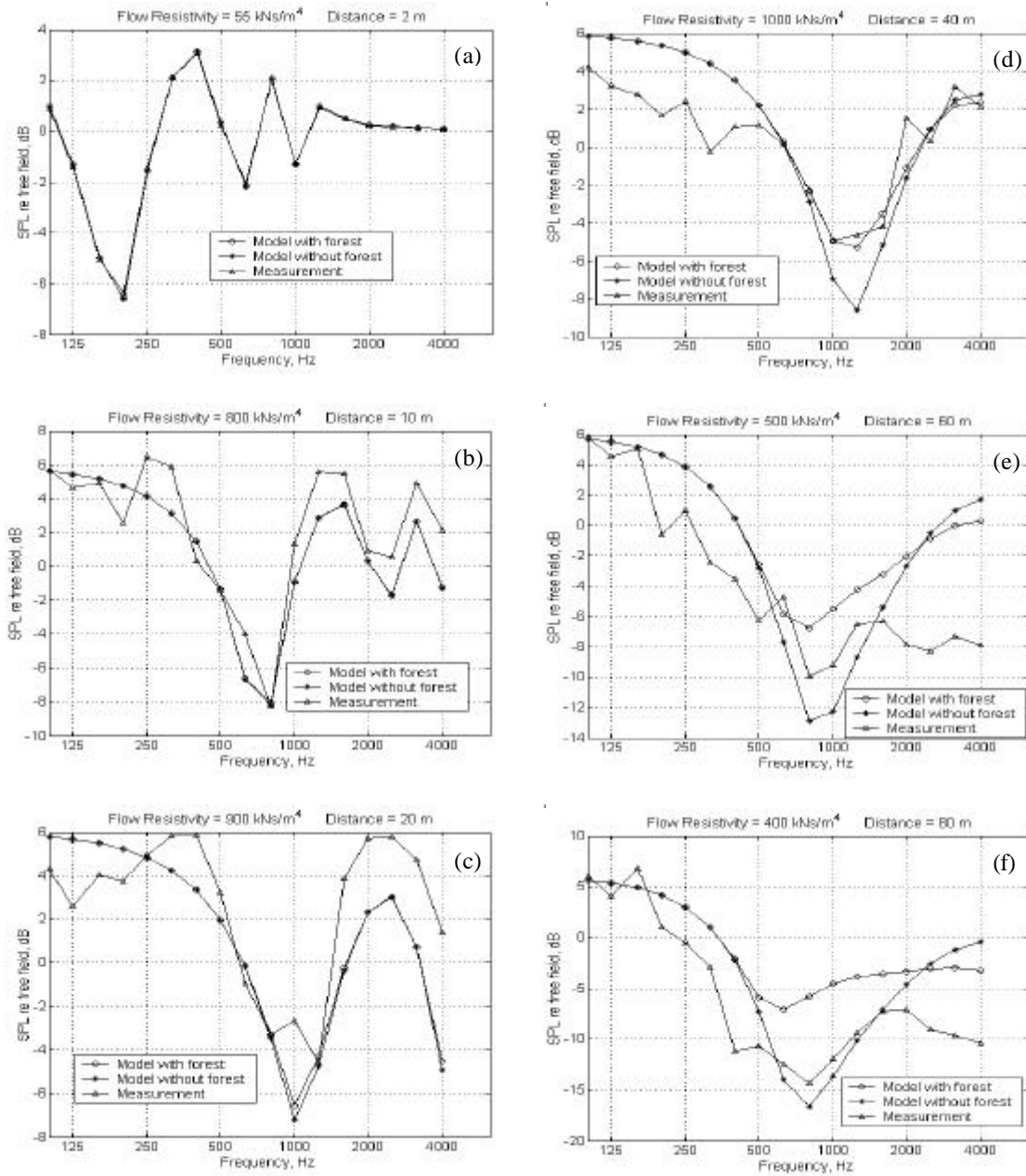
## RESULTADOS EXPERIMENTALES

A menudo es deseable estudiar solo el efecto del suelo, separado de la divergencia geométrica. El camino usual para hacer esto es estudiar el SPL en un punto relativo a campo libre, es decir, sin superficie. Para ello a los valores experimentales obtenidos en cada punto se les ha restado el valor correspondiente a campo libre. El programa calcula para cada distancia fuente receptor el SPL referido a campo libre, en dB, predicho por el modelo para dos situaciones: con bosque y sin bosque. Los datos teóricos y experimentales correspondientes se representan en función de la frecuencia, se comparan y se ajusta el valor de la resistividad al flujo, para que los datos teóricos coincidan, o se aproximen lo máximo posible, a los experimentales. Este es el procedimiento de trabajo que se ha seguido. Los resultados obtenidos para las distintas distancias fuente-receptor se exponen en la fig.1 y fig.2, árboles sin hojas y con hojas respectivamente.

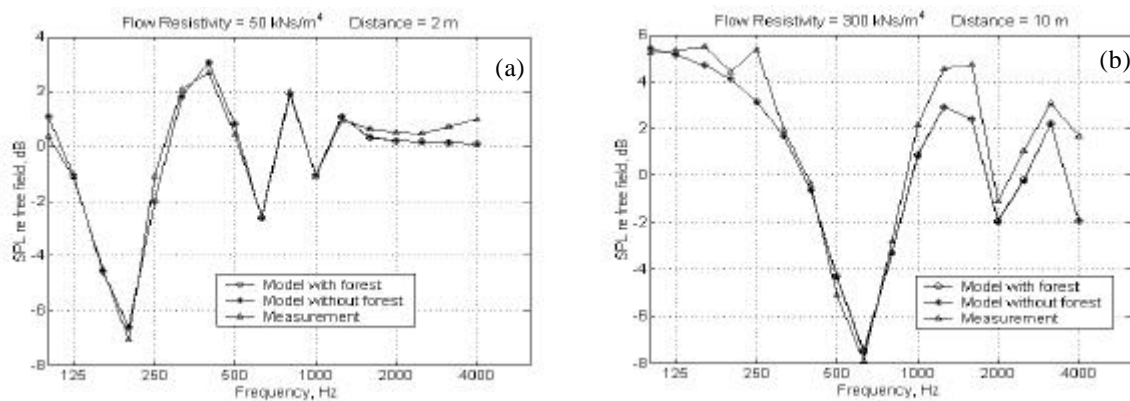
El mínimo en las curvas está relacionado con la interferencia destructiva entre el sonido directo y el reflejado en el suelo. El primer mínimo corresponde a una diferencia de fase entre ambos rayos de  $\pi$  radianes, el segundo a  $2\pi$ , el tercero a  $3\pi$ ,... El número de mínimos que aparece en las gráficas disminuye al aumentar la distancia fuente receptor. Para 2 y 10 m se aprecian 3 mínimos en las gráficas, para  $d=20$  m solamente 2 y para distancias superiores a los 20 m solamente aparece un mínimo.

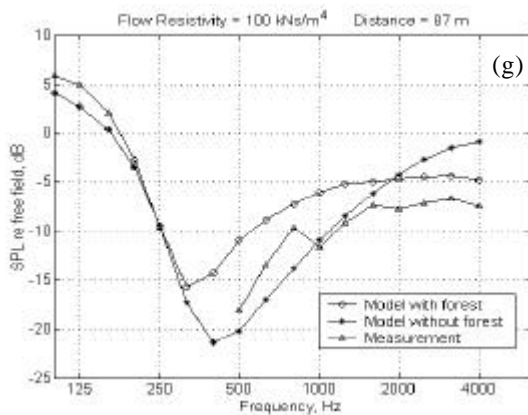
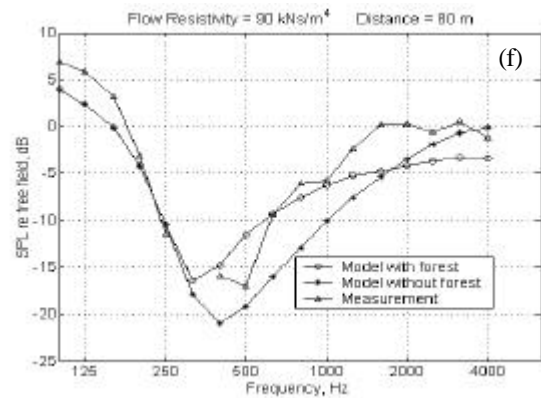
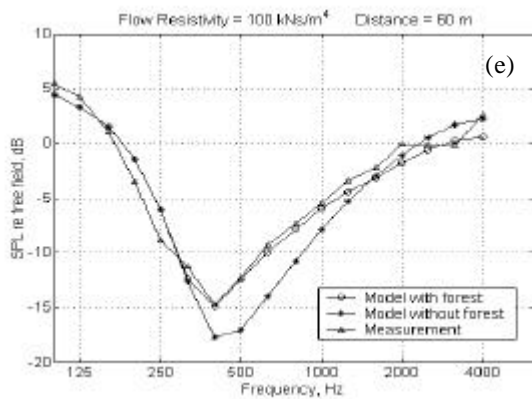
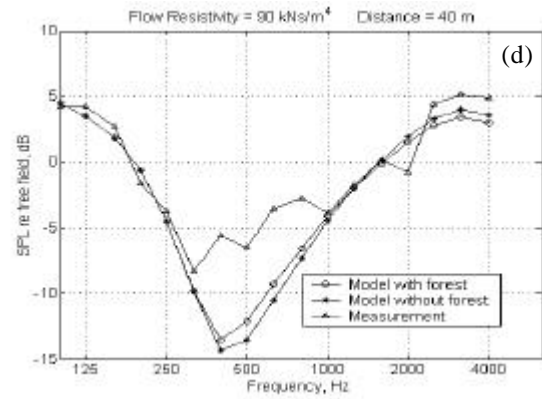
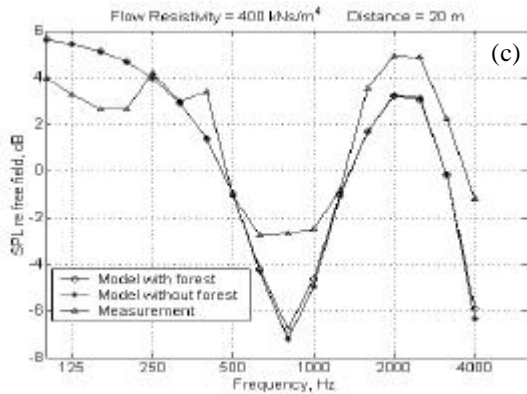
En un mismo suelo el hecho de tomar distintas distancias hace que se comporte de manera diferente y por ello cambia su resistividad observándose que, en general, a menores distancias mayor es la resistividad al flujo, ver tabla 1. Este parámetro influye principalmente a frecuencias bajas para las cuales el efecto del suelo es el más importante.

**Fig.1:** SPL referido a campo libre teórico y experimental, en tercios de octava, para diferentes distancias fuente-receptor en un bosque de chopos sin hojas.



**Fig.2:** SPL referido a campo libre teórico y experimental, en tercios de octava, para diferentes distancias fuente-receptor en un bosque de chopos con hojas.





Distancia	Sin hojas	Con hojas
10	800	300
20	900	400
40	1000	90
60	500	100
80	400	90
87	-	100

Table 1: Resistividad al flujo ( $\text{kNs/m}^4$ ) para varias distancias (m) fuente receptor.

## CONCLUSIONES

De todas las gráficas presentadas podemos sacar las siguientes conclusiones:

- El mínimo es mas profundo cuanto mayor es la distancia.
- Para cortas distancias el modelo con bosque y sin bosque aporta los mismos resultados y se empiezan a diferenciar a  $d = 40$  m.
- Los valores de la resistividad al flujo son más pequeños cuando los árboles tienen hojas que cuando no las tienen, tabla 1.
- El efecto de apantallamiento es pequeño en la mayoría de los casos, sólo se presenta un exceso de atenuación para las distancias fuente-receptor=60 y 80 m, fig.1(e) y Fig.1(f) respectivamente para el caso de los árboles sin hojas y en otras 2 para las medidas con hojas a las distancias de 80 y 87 m fig.2(f) y fig.2(g) respectivamente. En todos los casos señalados el modelo predice un exceso de atenuación menor del que realmente se produce.

De las gráficas que se presentan para este bosque hay pocos puntos en los que las discrepancias son superiores a los 5 dB que pueden darse como aceptables en medidas en tercios de octavas, como en este caso. Es de destacar la buena concordancia entre las medidas aportadas por el modelo con bosque y los resultados experimentales que se produce en la gráfica (e) de la fig.2. Las causas de las posibles discrepancias que aparecen entre los datos teóricos y experimentales pueden ser debidas a:

- En el modelo la atenuación está dividida en dos partes. La primera es la atenuación del suelo, debida a las reflexiones y calculada de la misma forma que en una superficie sin árboles. La segunda parte es el exceso de atenuación obtenido porque los troncos de los árboles bloquean parcialmente la propagación. Algunos de los parámetros utilizados para calcular el exceso de atenuación son también utilizados para reducir la coherencia entre el campo directo y el reflejado en la parte de la atenuación del suelo, por tanto, si la segunda parte incrementa la coherencia disminuye. El incremento de la incoherencia entre el campo directo y el reflejado, en la parte de la atenuación del suelo, separa los resultados del modelo de las medidas experimentales y en Fig.1(f) se ve que está sobreestimada.

- Con el fin de reducir la complejidad del problema, en el modelo se asume que la superficie es de reacción local, y por tanto, la impedancia de la superficie sería independiente del ángulo de incidencia aunque en la realidad el suelo no era totalmente plano ni homogéneo.

- Hay que tener en cuenta que el modelo es muy general y se utiliza para tipos de obstáculos muy diferentes, como son las casas y los árboles, y para este último caso no distingue entre árboles con hojas y sin hojas.

- Por otra parte, las medidas fueron llevadas a cabo durante días sin viento pero en la realidad la atmósfera no es homogénea, la velocidad del viento cerca del suelo es próxima a cero pero la velocidad del viento incrementa con la altura. Por otra parte la temperatura del aire varía en las capas mas bajas de la atmósfera. Ambos, gradientes, en la velocidad del viento y en la temperatura producen un gradiente en la velocidad del sonido que refractará el sonido. Todo esto puede estar acompañado de turbulencias y estos tres fenómenos producen un cambio en el SPL en el punto de observación pudiendo crearse zonas de sombra. Las refracciones que pueden afectar a las medidas reales no son contempladas en el modelo y esto dificulta la obtención de conclusiones.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica de Dinamarca y a la empresa Delta Acoustic por habernos permitido llevar a cabo este trabajo y a la CICYT por la ayuda concedida.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]-S.Å. Storeheier, " Nord 2000: Sound Scattering outdoors. Revised Simple Models". SINTEF Memo 40-NO990003
- [2]- C. F. Eyring, Jungle acoustics, J.Acoust. Soc. Am. 18, 257-270, (1946)
- [3]- F. M. Wiener and D. N. Keast, Experimental study of the propagation of sound over ground, J.Acoust. Soc. Am. 31, 724-733, (1959)
- [4]- S.Å. Storeheier, " Dispersión effects in Sound propagation Outdoors. Dispersión at Terrain surfaces. Sub-project 1997-10. SINTEF Memo 40-NO970225
- [5]- S.Å. Storeheier, " Dispersión effects in Sound propagation Outdoors. Sound Dispersión in Housing Areas and Forests. N2000 Sub-project 1997-10. SINTEF Memo 40-No970226
- [6]- T. Berg, "Nord2000: Study of Sound Dispersión in denses systems. SINTEF Report STF40A98073
- [7]- Leschnik, W. : "Zur Schallausbreitung in bebauten und bepflanzten Gebieten".
- [8]- Morse, P., Ingard, K.U. : " Theoretical acoustics". (chpt. 8.1), MCGRAW-HILL, 1968.
- [9]- Huisman, W. H.T., Attenborough, K.: " Reverberation and Attenuation in a Pine forest", J. Acoust. Soc. Am. 90(5), Nov. 1991.