



Università degli studi di Bologna
Facoltà di Ingegneria

**49498 - Acustica Applicata e
Illuminotecnica L (A-K)**

Dispensa n. 5

PROPAGAZIONE IN AMBIENTE ESTERNO

Docente: Paolo Guidorzi

Rev. 9 gennaio 2008



Università degli studi di Bologna

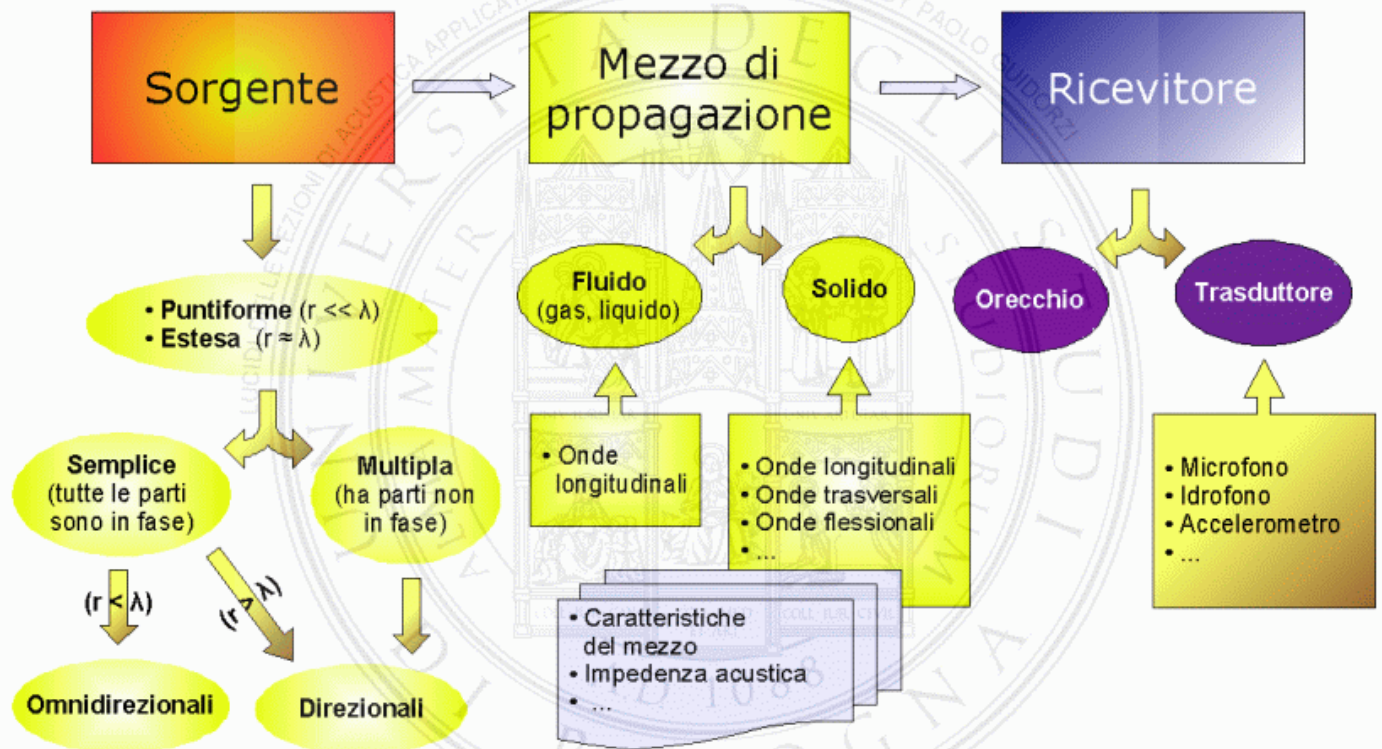
49498 - ACUSTICA APPLICATA E
ILLUMINOTECNICA L (A-K)
Ing. Paolo Guidorzi

Indice

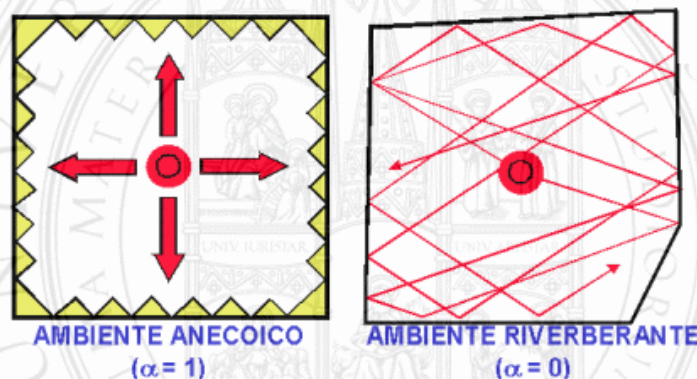
PROPAGAZIONE NEGLI SPAZI APERTI

Pag. 2

- 1 - Introduzione
- 2 - La propagazione in campo aperto - Sorgente puntiforme
- 3 - La propagazione in campo aperto - Sorgente lineare
- 4 - La propagazione in campo aperto - Sorgente piana
- 5 - La direttività della sorgente
- 6 - Attenuazioni aggiuntive
- 7 - Assorbimento dovuto all'aria
- 8 - Effetto del suolo
- 9 - La diffrazione
- 10 - Relazione di Maekawa
- 11 - Gradiente di temperatura e vento
- 12 - Altri effetti



Campo libero: campo acustico che presuppone assenza di superfici riflettenti o ostacoli
 oppure
 presenza di superfici altamente assorbenti (camera anecoica)



Campo riverberante o diffuso: campo confinato in cui è preponderante l'energia riflessa dalle pareti; in ogni punto le onde sonore provengono da tutte le direzioni (camera riverberante)

Campo semi-riverberante: campo sonoro totalmente o parzialmente confinato in cui sono presenti sia onde sonore provenienti direttamente dalla sorgente che onde riflesse.

SORGENTI:

- puntiformi
- lineari
- piane

Si considera il **campo lontano**, ovvero a una distanza dalla sorgente maggiore o uguale a 1,6 volte la lunghezza d'onda del suono in esame.

Una sorgente si considera puntiforme, lineare o piana per la sua forma ma anche e soprattutto per la distanza dal ricevitore. Ciò che conta sono le sue dimensioni in rapporto a tale distanza.

Es. una sorgente si considera puntiforme quando le sue dimensioni sono piccole rispetto alla distanza dal ricevitore.

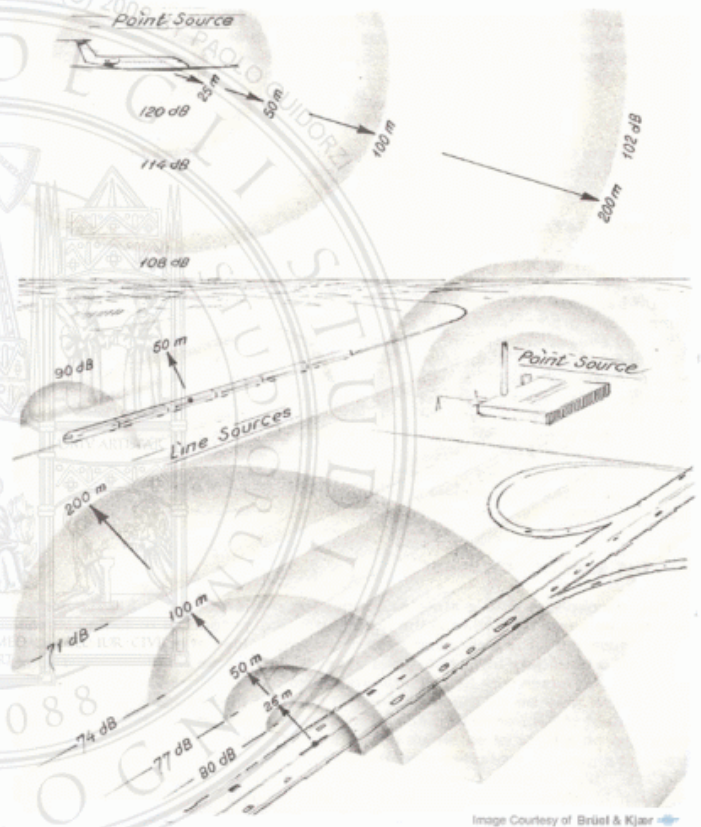
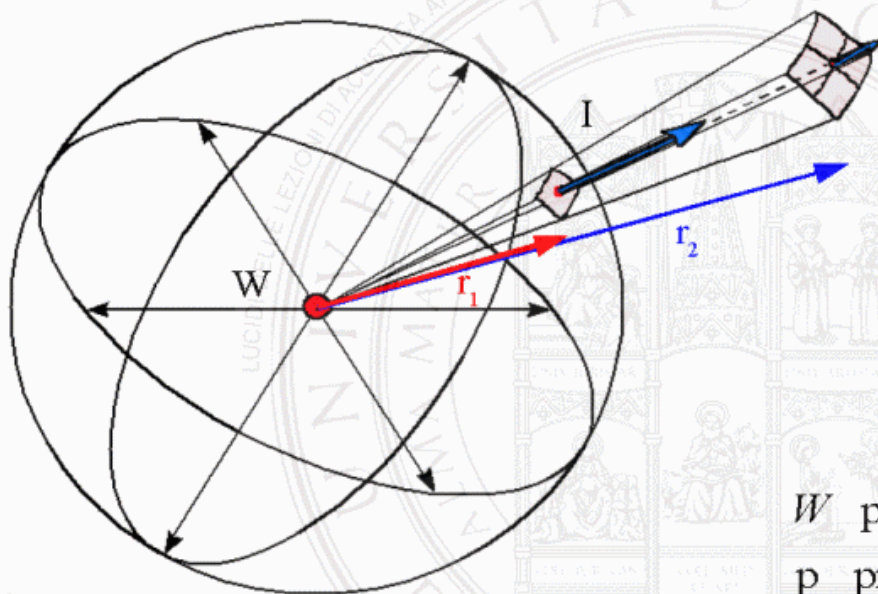


Image Courtesy of Brüel & Kjær

LA PROPAGAZIONE IN CAMPO APERTO – SORGENTE PUNTIFORME

$$W = \int_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS = I \cdot S$$

$$I = \frac{W}{S}$$

W potenza acustica [W]

p pressione acustica [Pa]

I Intensità acustica [W/m^2]

$\rho_0 c$ Impedenza acustica [Pa s/m]

Sorgente puntiforme in campo libero che irradia in modo uniforme in tutte le direzioni una potenza acustica costante W

$$\begin{cases} I = \frac{W}{S} \\ S = 4\pi r^2 \\ I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \end{cases} \Rightarrow$$

$$W = \frac{p^2}{\rho_0 c} 4\pi r^2$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{1}{W_0} \frac{p^2}{\rho_0 c} \frac{p_0^2}{p_0^2} 4\pi r^2 \Rightarrow \frac{W}{W_0} = \frac{p^2}{p_0^2} r^2 \frac{4\pi p_0^2}{\rho_0 c W_0}$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{1}{W_0} \frac{p^2}{\rho_0 c} \frac{p_0^2}{p_0^2} 4\pi r^2 \Rightarrow \frac{W}{W_0} = \frac{p^2}{p_0^2} r^2 \frac{4\pi p_0^2}{\rho_0 c W_0}$$

$$10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) + 10 \log(r^2) + 10 \log \left(\frac{4\pi p_0^2}{\rho_0 c W_0} \right)$$

$$10 \log \left(\frac{4\pi p_0^2}{\rho_0 c W_0} \right) \Rightarrow 10 \log \left(\frac{4\pi \cdot 400 \cdot 10^{-12}}{\rho_0 c \cdot 10^{-12}} \right) \Rightarrow 10 \log(4\pi) + 10 \log \left(\frac{400}{\rho_0 c} \right)$$

$$\approx 11 \quad \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow L_W = L_p + 20 \log r + 11 \quad (\text{dB})$$

$$W_0 = 10^{-12} \quad [\text{W}]$$

$$p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \quad [\text{Pa}]$$

$$I_0 = 10^{-12} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\rho_0 c = 400 \quad [\text{rayl oppure Pa s/m}]$$

(a 39 °C, 1 Atm)

$$\vec{z} = \frac{p}{u} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] = [\text{rayl}]$$

Per onde piane: $\vec{z} = \rho_0 c$

Impedenza caratt. Dell'aria (alla pressione di 1 Atm)			
Mezzo	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	z (rayl)
Aria 0°C	331	1,29	428
Aria 20°C	343	1,20	415
Aria 39°C	354	1,12	400

$$10 \log \left(\frac{400}{\rho_0 c} \right)$$

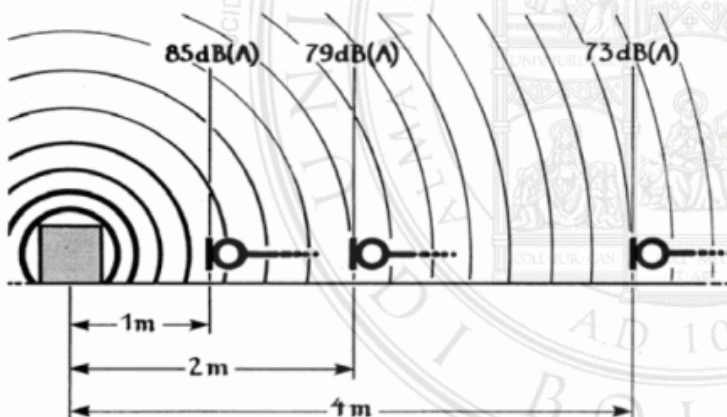


$$\left. \begin{array}{l} 0^\circ \text{C} \Rightarrow \left| 10 \log \left(\frac{400}{428} \right) \right| \approx 0,29 \text{ dB} \\ 20^\circ \text{C} \Rightarrow \left| 10 \log \left(\frac{400}{415} \right) \right| \approx 0,16 \text{ dB} \\ 39^\circ \text{C} \Rightarrow \left| 10 \log \left(\frac{400}{400} \right) \right| = 0 \text{ dB} \end{array} \right\}$$

$$L_W = L_p + 20 \log r + 11 \quad (\text{dB})$$

Il livello di potenza è costante, il livello di pressione cala allontanandosi dalla sorgente

$$L_p = L_W - 20 \log r - 11 \quad (\text{dB})$$



In assenza di ostacoli, il Livello di pressione cala di 6 dB al raddoppio della distanza

L'attenuazione per divergenza di onde sferiche ΔL si calcola nel seguente modo:



$$L_{p1} = L_W - 11 - 20 \log r_1$$

$$L_{p2} = L_W - 11 - 20 \log r_2$$

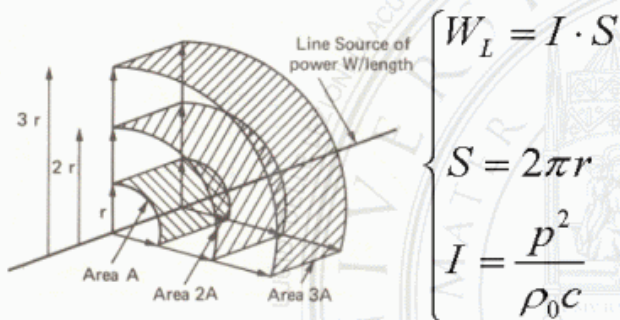
$$\Delta L = L_{p1} - L_{p2} = -20 \log r_1 + 20 \log r_2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

Nel caso di raddoppio della distanza si ottiene un'attenuazione di 6 dB.

Ciò è anche fisicamente spiegabile dal momento che raddoppiare la distanza significa quadruplicare la superficie del fronte d'onda; Raddoppiare la superficie significa dimezzare l'energia ($I=W/S$) e ottenere un'attenuazione di 3 dB. Se la superficie diventa $\frac{1}{4}$, come nel caso di onde sferiche, l'attenuazione diventa 6 dB.

LA PROPAGAZIONE IN CAMPO APERTO - SORGENTE LINEARE

Per una sorgente lineare di lunghezza infinita si ha propagazione per onde cilindriche



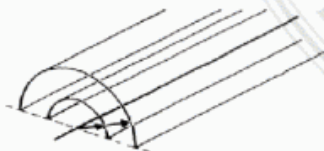
$$\begin{cases} W_L = I \cdot S \\ S = 2\pi r \\ I = \frac{P^2}{\rho_0 c} \end{cases}$$

$$L_p = L_W - 10 \log r - 8 \quad (\text{dB})$$

Il calcolo si effettua in modo analogo al precedente caso di onda sferica. In questo caso si considera una superficie cilindrica di lunghezza unitaria.

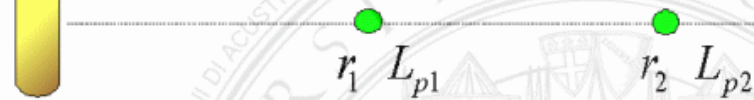
In assenza di ostacoli, il Livello di pressione cala di 3 dB al raddoppio della distanza

Per una sorgente lineare di lunghezza infinita su spazio riflettente (strade o ferrovie) si ha propagazione per onde semicilindriche



$$L_p = L_W - 10 \log r - 5 \quad (\text{dB})$$

L'attenuazione per divergenza di **onde cilindriche** ΔL si calcola nel seguente modo:



$$L_{p1} = L_W - 8 - 10 \log r_1$$

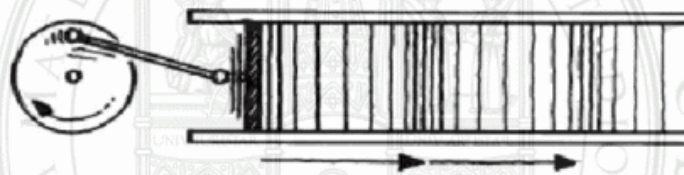
$$L_{p2} = L_W - 8 - 10 \log r_2$$

$$\Delta L = L_{p1} - L_{p2} = -10 \log r_1 + 10 \log r_2 = 10 \log \frac{r_2}{r_1}$$

Nel caso di raddoppio della distanza si ottiene un'attenuazione di 3 dB.

LA PROPAGAZIONE IN CAMPO APERTO - SORGENTE PIANA

Per una sorgente piana, non si ha diminuzione di livello all'aumentare della distanza

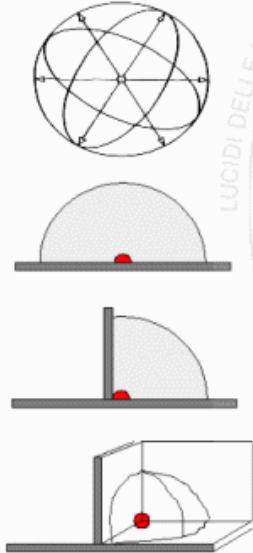


Un esempio di sorgente di onda piana può essere una lastra vibrante o la facciata di un edificio. La condizione di onda piana si perde vicino ai bordi o all'aumentare della distanza sorgente-ricevitore.

LA DIRETTIVITA' DELLA SORGENTE

Se la sorgente è posizionata in prossimità di una superficie solida, la formula diventa:

$$L_p = L_w - 20 \log r + 10 \log Q - 11 \quad (\text{dB})$$



$$Q = 1 \quad 10 \log Q = 0$$

$$Q = 2 \quad 10 \log Q = 3$$

$$Q = 4 \quad 10 \log Q = 6$$

$$Q = 8 \quad 10 \log Q = 9$$

$$DI = 10 \log Q$$

DI = Indice di direttività
 Q = fattore di direttività



$$Q = 1 \quad 10 \log Q = 0$$

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 \quad (\text{dB})$$



$$Q = 2 \quad 10 \log Q = 3$$

$$L_p = L_w - 20 \log r - 8 \quad (\text{dB})$$

Le sorgenti reali non sono omnidirezionali



Esempio di diagramma contenente informazioni sulla direttività per emissione di una sorgente

Entrambi i contributi (direttività per posizione e per emissione di una sorgente) vanno considerati quando si calcola la direttività complessiva.

ATTENUAZIONI AGGIUNTIVE

Nella propagazione in atmosfera, oltre alla divergenza geometrica vanno tenuti in conto altri fattori di attenuazione. Considerando la formula per la sorgente puntiforme si aggiunge un ulteriore termine Att , che include vari contributi

$$L_p = L_w - 20 \log r + DI - \sum_i Att_i - 11 \quad (\text{dB})$$

- DI $10 \log Q$ Indice di Direttività
- Att_1 $\alpha \cdot r$ α = coeff. assorbimento dell'aria dB/m; r = distanza
- Att_2 Effetto del suolo
- Att_3 Ostacoli, barriere acustiche
- Att_4 Condizioni meteorologiche
- Att_5 Effetto del fogliame e altre attenuazioni

ASSORBIMENTO DOVUTO ALL'ARIA

L'attenuazione dell'intensità di un'onda piana in atmosfera (in dB/km) per effetto dei fenomeni di assorbimento, in funzione della temperatura e dell'umidità relativa.

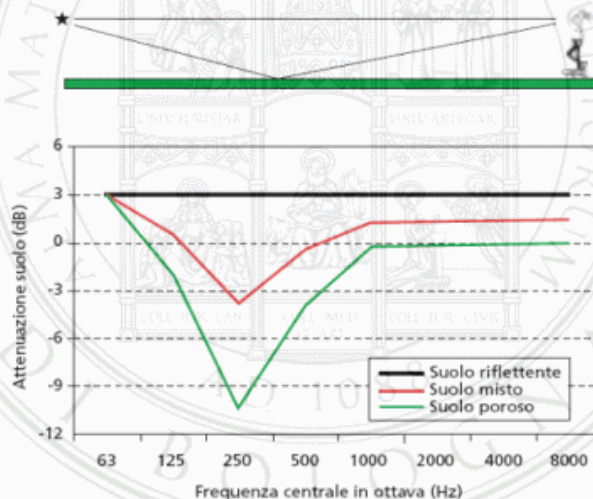
Temp. (°C)	Umidità φ (%)	62,5 (Hz)	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1 (kHz)	2 (kHz)	4 (kHz)	8 (kHz)
0	10	0.424	1.300	4.00	9.25	14.0	16.6	19.0	26.4
	20	0.256	0.614	1.85	6.16	17.7	34.6	47.0	58.1
	30	0.219	0.469	1.17	3.73	12.7	36.0	69.0	95.2
	50	0.181	0.411	0.82	2.08	6.8	23.8	71.0	147.0
	70	0.151	0.390	0.76	1.61	4.6	16.1	55.5	153.0
	90	0.127	0.637	0.76	1.45	3.7	12.1	43.2	138.0
10	10	0.342	0.788	2.29	7.52	21.6	42.3	57.3	69.4
	20	0.271	0.579	1.20	3.27	11.0	36.2	91.5	154.0
	30	0.225	0.551	1.05	2.28	6.8	23.5	76.6	187.0
	50	0.160	0.486	1.05	1.90	4.3	13.2	46.7	155.0
	70	0.122	0.411	1.04	1.93	3.7	9.7	32.8	117.0
	90	0.097	0.348	1.00	2.00	3.5	8.1	25.7	92.4
20	10	0.370	0.775	1.58	4.25	14.1	45.3	109.0	175.0
	20	0.260	0.712	1.39	2.60	6.5	21.5	74.1	215.0
	30	0.192	0.615	1.42	2.52	5.0	14.1	49.5	166.0
	50	1.123	0.445	1.32	2.73	4.7	9.9	29.4	104.0
	70	0.090	0.339	1.13	2.80	5.0	9.0	22.9	76.6
	90	0.071	0.272	1.00	2.71	5.3	9.1	20.2	62.6
30	10	0.362	0.958	1.82	3.40	8.7	28.5	96.0	260.0
	20	0.212	0.725	1.87	3.41	6.0	14.5	47.1	165.0
	30	0.147	0.543	1.68	3.67	6.2	11.8	32.7	113.0
	50	0.091	0.351	1.25	3.57	7.0	1.7	24.5	73.1
	70	0.065	0.256	0.96	3.14	7.4	12.7	23.1	59.3
	90	0.051	0.202	0.78	2.71	7.3	13.8	23.5	53.3

L'aria non è un mezzo perfettamente conservativo, e una parte dell'energia meccanica dovuta alla propagazione dell'onda acustica viene trasformata in calore, ovvero dissipata. Questo crea un'attenuazione dell'intensità dell'onda sonora che si propaga. L'assorbimento dipende dalla **temperatura** e dall'**umidità relativa** dell'aria.

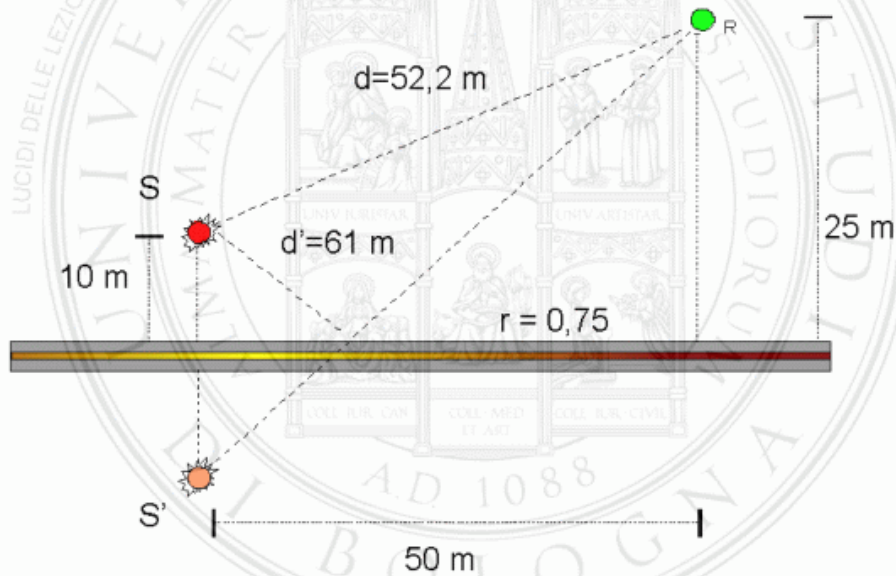
Da "Elementi di Fisica Tecnica Ambientale" Alessandro Cocchi

EFFETTIVO DEL SUOLO

Il suono riflesso dal terreno interagisce col suono che arriva al ricevitore direttamente dalla sorgente. L'effetto è diverso a seconda delle proprietà acustiche del terreno (assorbente, riflettente, misto...). Anche le precipitazioni (pioggia, neve, ecc.) possono condizionare l'attenuazione del terreno, quindi in generale è buona norma effettuare le misurazioni a terreno asciutto. Per calcolare il livello sonoro al ricevitore occorrerà quindi conoscere le proprietà del terreno e valutare anche se le onde dirette e riflesse sono tra loro coerenti o no.



Per calcolare il contributo dovuto alla riflessione sul terreno si può utilizzare il metodo delle "sorgenti virtuali". Si immagina cioè la presenza di una sorgente in posizione speculare rispetto a quella realmente presente, e con un livello di potenza diminuito (utilizzando il coefficiente di riflessione o di assorbimento del terreno). Si andrà quindi a sommare alla posizione del ricevitore i contributi dati dalla sorgente reale e da quella virtuale.



IPOTESI DELL'ACUSTICA GEOMETRICA

Si fa l'ipotesi che la lunghezza d'onda del suono che si sta considerando sia trascurabile rispetto alle dimensioni degli ostacoli contro cui va a riflettersi.

Quando questa ipotesi è verificata, invece di onda sonora si può trattare il problema parlando di *raggi sonori* e *sorgenti virtuali*.

Un raggio sonoro quindi sarà originato da una sorgente e si rifletterà contro gli ostacoli che incontrerà, attenuandosi a causa dell'assorbimento delle superfici e della divergenza geometrica (il raggio sonoro può essere pensato anche come una piccola porzione di un'onda sferica).

Si noti che questa teoria può essere applicata con buona approssimazione solo per le medie frequenze, ovvero per quei suoni la cui lunghezza d'onda non è paragonabile né alle dimensioni dell'ambiente o degli ostacoli né alla dimensione delle irregolarità delle superfici.

Si noti che questa teoria può essere applicata con buona approssimazione solo per le medie frequenze, ovvero per quei suoni la cui lunghezza d'onda non è paragonabile né alle dimensioni dell'ambiente o degli ostacoli né alla dimensione delle irregolarità delle superfici.

In l'aria ($c = 340$ m/s a 14 °C):

$f = 10$ Hz	$\lambda = 340/10 = 34$ m
$f = 20$ Hz	$\lambda = 340/20 = 17$ m
$f = 50$ Hz	$\lambda = 340/50 = 6,8$ m
$f = 100$ Hz	$\lambda = 340/100 = 3,4$ m
$f = 340$ Hz	$\lambda = 340/340 = 1$ m
$f = 1000$ Hz	$\lambda = 340/1000 = 0,34$ m
$f = 10000$ Hz	$\lambda = 340/10000 = 0,034$ m

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

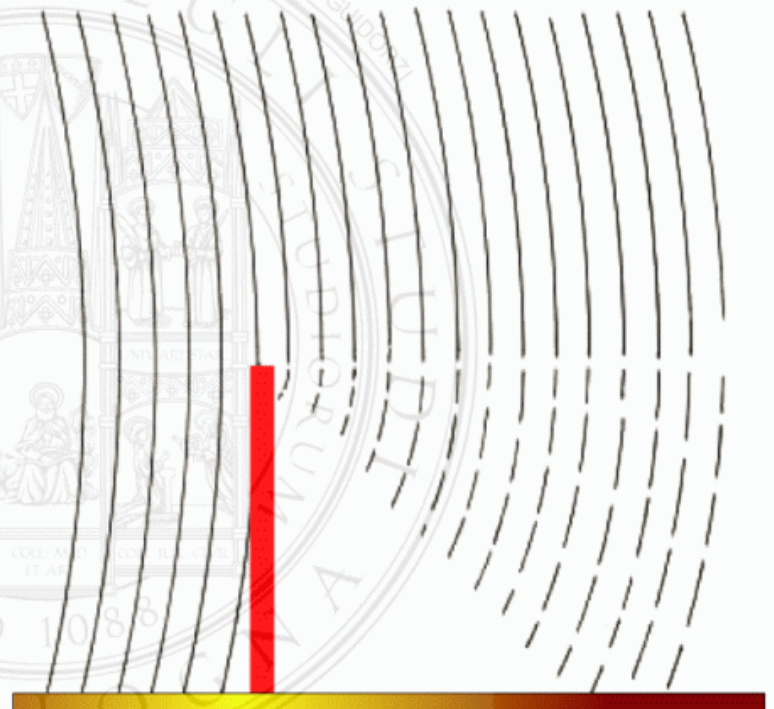
LA DIFFRAZIONE

Il fenomeno della diffrazione si verifica quando un'onda sonora incontra un ostacolo. L'effetto di tale interazione è diverso a seconda delle dimensioni dell'ostacolo rispetto alla lunghezza d'onda del suono incidente.

Ad esempio, una fenditura diventa sorgente di un'onda sferica se l'onda incidente ha bassa frequenza (ovvero lunghezza d'onda maggiore rispetto alla dimensione della fenditura).

Se invece un'onda sonora incontra una barriera, il suo bordo superiore si comporta come una nuova sorgente e l'effetto *ombra acustica* al di là della barriera dipende fortemente dalla frequenza dell'onda.

Lo studio dell'attenuazione di una barriera acustica, in dipendenza dalla frequenza dell'onda incidente, è stato studiato dal giapponese Maekawa.



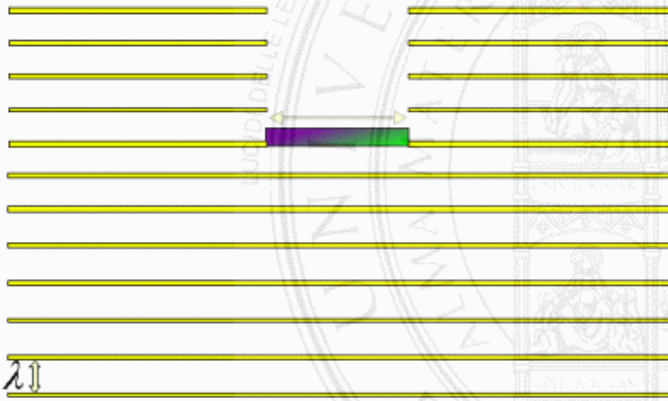
$d \gg \lambda \Rightarrow$ l'onda oltrepassa l'apertura
e si propaga in una zona limitata

$d < \lambda \Rightarrow$ l'onda si propaga anche
in zone limitrofe all'apertura



$d \gg \lambda \Rightarrow$ l'onda oltrepassa l'ostacolo e crea una zona d'ombra

$d < \lambda \Rightarrow$ l'onda si propaga anche nella zona d'ombra oltre l'ostacolo



Esperimento per capire il fenomeno: porre uno schermo rigido davanti a una cassa acustica che emette prima un suono acuto e poi un suono grave. L'effetto di schermatura con il suono acuto sarà marcato. L'attenuazione del suono grave invece sarà trascurabile. Calcolare le lunghezze d'onda dei suoni emessi e valutare se sono maggiori o minori delle dimensioni dello schermo utilizzato.

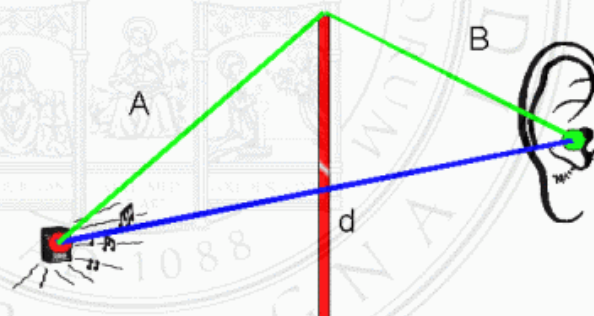
RELAZIONE DI MAEKAWA

Lo studioso Maekawa ha trovato una relazione che ci permette di calcolare l'attenuazione dovuta a una barriera. Per attenuazione si intende la differenza tra il livello che si avrebbe senza barriera acustica e il livello in presenza della stessa. Questa grandezza si chiama più propriamente *Insertion Loss*.

L'attenuazione dovuta alla barriera dipende dalla lunghezza d'onda del suono λ e dalla differenza δ tra il cammino diretto (che si avrebbe in assenza della barriera) e il cammino reale, percorso dall'onda che "scavalca" la barriera e viene diffratta dal suo bordo superiore. Si calcola il **numero di Fresnel** N .

$$\delta = A + B - d$$

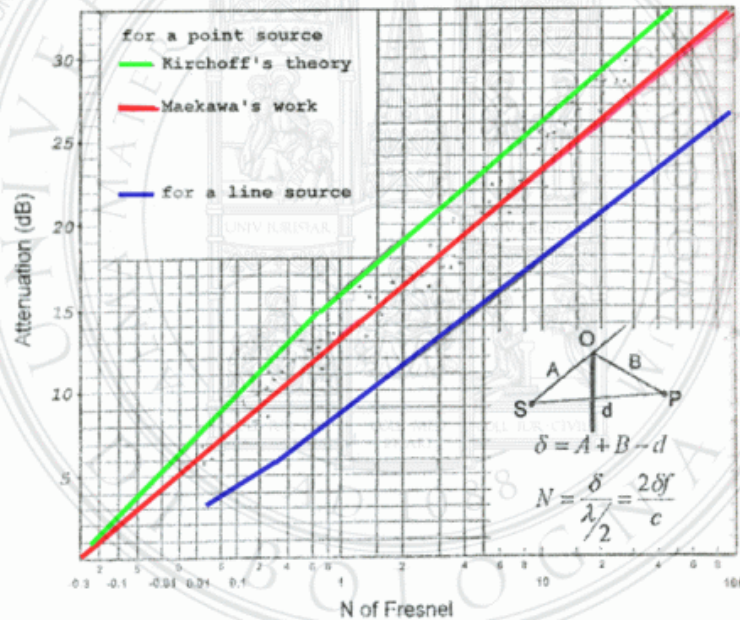
$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\delta f}{c}$$



Calcolato il numero di Fresnel N, l'attenuazione vale:

$$\Delta L = 10 \log[3 + 20N] \quad \text{sorgente puntiforme}$$

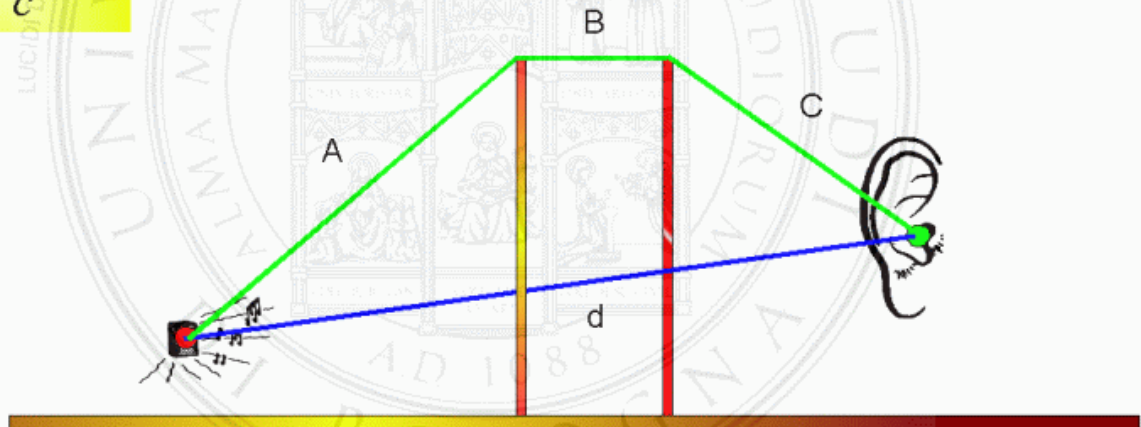
$$\Delta L = 10 \log[2 + 5,5N] \quad \text{sorgente lineare}$$



Nel caso di schermi non sottili, la differenza di percorso si calcola come mostrato in figura.

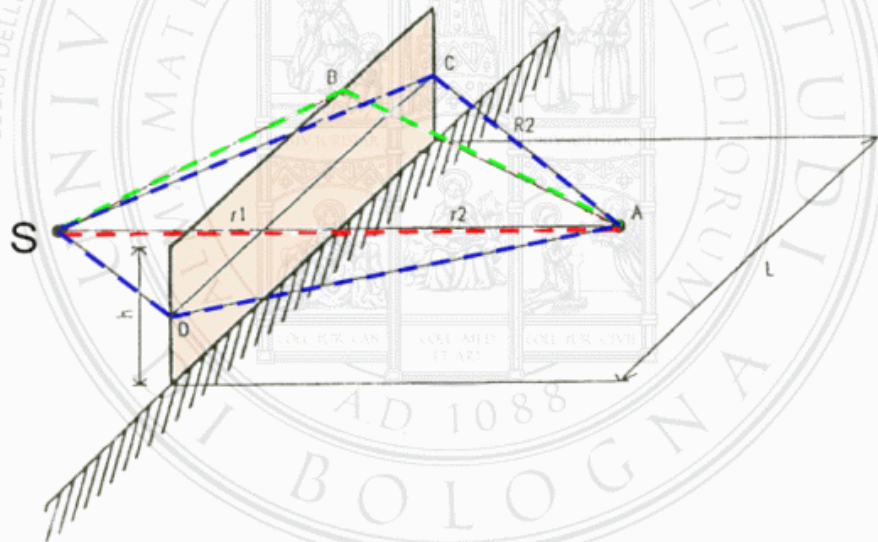
$$\delta = A + B + C - d$$

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2\delta f}{c}$$



Se occorre valutare anche il suono che *scavalca* la barriera lateralmente, ovvero si considera la diffrazione attraverso i bordi laterali, si utilizza la seguente relazione, dove N_1 e N_2 sono i numeri di Fresnel relativi ai percorsi laterali:

$$\Delta L = \Delta L_{\text{bordo superiore}} - 10 \log \left(1 + \frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2} \right) \quad N, N_1, N_2 > 1$$



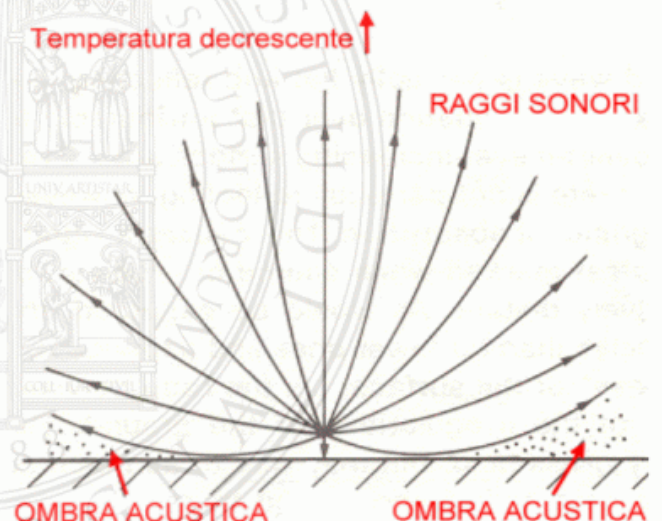
GRADIENTE DI TEMPERATURA E VENTO

E' noto che la velocità del suono è legata alla temperatura dell'aria dalla formula (approssimata):
 $c = 331 + 0,6T$ m/s dove T è la temperatura dell'aria in gradi centigradi. Quindi se la temperatura dell'aria aumenta o diminuisce con l'altezza, si avrà una curvatura nella direzione di propagazione.

CASO NORMALE - GIORNO

La temperatura decresce allontanandosi dal suolo. Ciò avviene solitamente di giorno, quando la temperatura al suolo è maggiore della temperatura in quota grazie al riscaldamento solare.

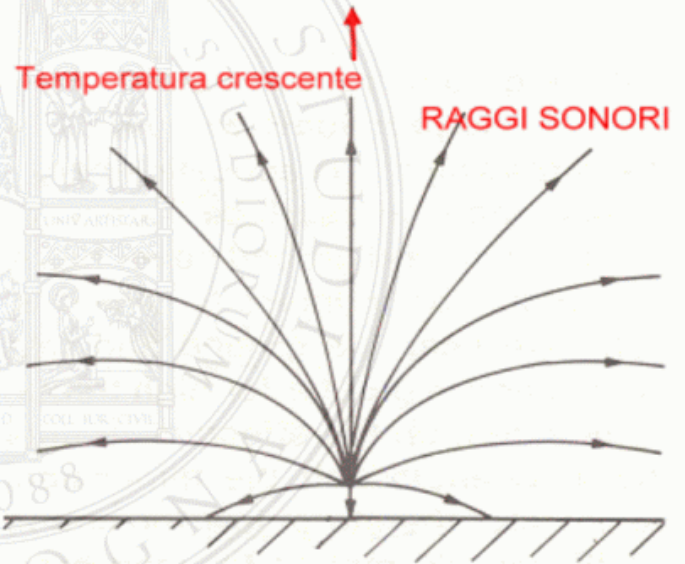
A causa della curvatura verso l'alto dei raggi sonori si formano delle vere e proprie zone d'ombra in cui il suono risulterà particolarmente attenuato o assente.



CASO DI INVERSIONE TERMICA – NOTTE O NUVOLOSO

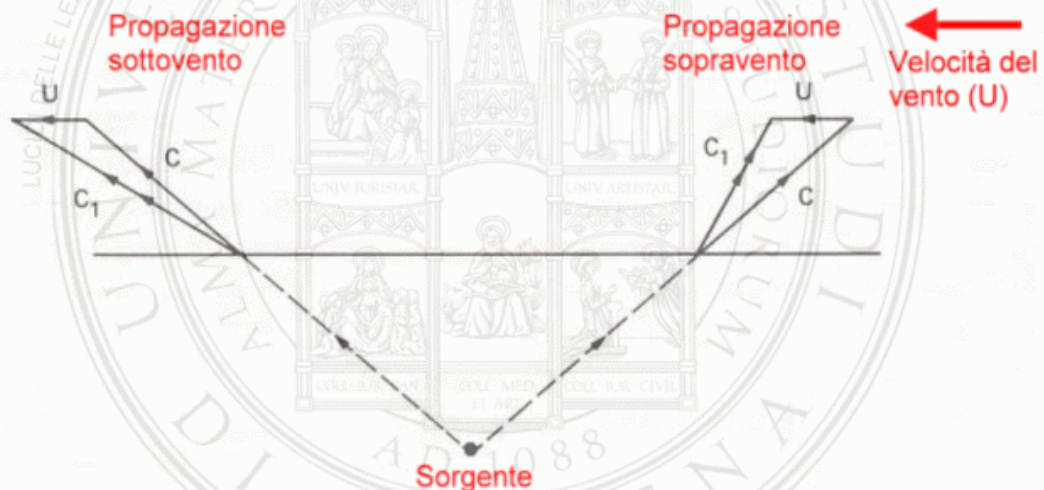
La temperatura cresce allontanandosi dal suolo. Ciò avviene solitamente di notte o in presenza di nuvole o in generale quando la temperatura al suolo è minore di quella dell'aria. In questo caso si ha la curvatura dei raggi sonori opposta rispetto al caso precedente: il suono può propagarsi più lontano di quanto avverrebbe normalmente.

Può manifestarsi un caso particolare, detto "canale sonoro", quando si ha uno strato d'aria a una temperatura diversa rispetto agli strati superiore e inferiore. In questo caso il suono viene "intrappolato" e trasportato anche a notevole distanza. Ciò ad esempio può accadere in caso di presenza di banchi di nebbia.



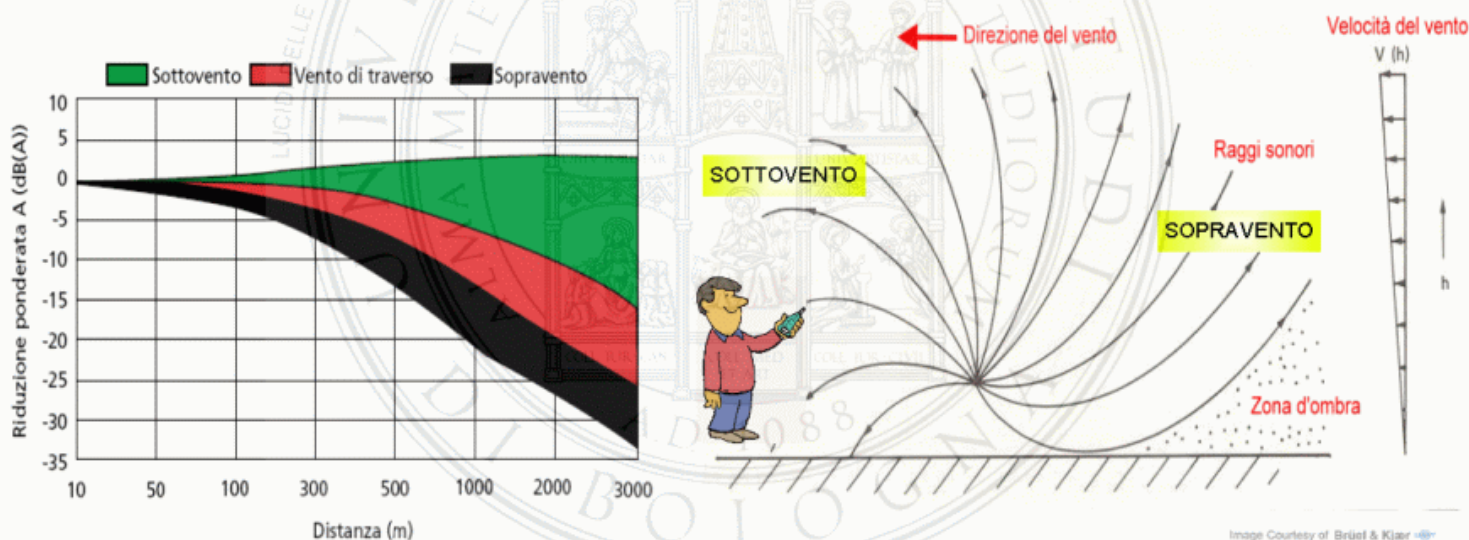
EFFETTO DEL VENTO

La velocità del vento si somma vettorialmente a quella del suono.



EFFETTO DEL VENTO

Se è presente un gradiente di velocità al variare della quota, si osserva una curvatura dei raggi sonori nel modo presentato in figura. In particolare, sopravvento si creano vere e proprie zone d'ombra. Per questo è raccomandato effettuare le misure sottovento, anche se questo può portare a una lieve sovrastima dei livelli sonori. La misura sopravvento porterebbe invece a una notevole sottostima a causa delle zone d'ombra.



ASSORBIMENTO DOVUTO ALLA VEGETAZIONE

La presenza di vegetazione contribuisce ad attenuare il suono, su grandi distanze. Esistono grafici che permettono di calcolare tale tipo di attenuazione, che comunque non superano i pochi dB. L'attenuazione in generale è presente alle alte frequenze a causa del fogliame, mentre se sono presenti alberi e piante di fusto consistente, si ha attenuazione anche in bassa frequenza.

ASSORBIMENTO DOVUTO AD ALTRE CAUSE

La presenza di fogliame, siti industriali o aree abitative può portare altre attenuazioni. Esistono tabelle e formule approssimate per valutare tali valori.

CORREZIONE METEO

Esistono formule correttive per il calcolo del Livello Equivalente da applicare quando la misura è effettuata sottovento. In generale questa correzione varia tra 0 e 5 dB.