

LA MAPPA ACUSTICA DINAMICA DI MILANO DA UN NUMERO LIMITATO DI PUNTI DI MONITORAGGIO. PRIMI RISULTATI.

Giovanni Zambon (1), Roberto Benocci (1), Alessandro Bisceglie (1)

1) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio - Università degli Studi di Milano Bicocca, Milano

1. Introduzione

Il rumore da traffico veicolare è oggetto da anni di numerosi studi volti a indagarne l'impatto sul territorio e sulla popolazione. Inizialmente, il rumore ambientale è stato studiato utilizzando un campionamento sistematico, ovvero selezionando punti di misura mediante la sovrapposizione di griglie su una mappa. Tuttavia, questo approccio si è dimostrato lungo e dispendioso per le amministrazioni stradali e le autorità locali o centrali, oltre a fornire mappe imprecise. In generale, il rumore emesso da una strada dipende dai suoi volumi di traffico, dalla funzione nel contesto urbano, e da caratteristiche quali larghezza, presenza di superfici riflettenti o altri ostacoli, tipo di pavimentazione, ecc.

Gli algoritmi di simulazione acustici, implementati all'interno di software, permettono di stimare le emissioni e la propagazione del rumore su una area vasta, a partire da alcune informazioni statiche relative alle sorgenti sonore mediate su lungo periodo e all'ambiente di propagazione. Il progetto Dynamap ha lo scopo di sviluppare un approccio che consenta una mappatura acustica dinamica, in grado cioè di fornire livelli di rumore ambientale aggiornati, in tempo reale, attraverso la scalatura di mappe acustiche precalcolate mediante un collegamento diretto con un numero limitato di stazioni di monitoraggio. La possibilità di controllare la mappa acustica di una rete stradale estesa mediante pochi punti di controllo si attua mediante una necessaria aggregazione degli archi stradali in gruppi omogenei (mediante una procedura di cluster analysis). Per una migliore descrizione del comportamento acustico della rete stradale di Milano, si è adottato un metodo di aggregazione basato sulla similarità degli andamenti dei livelli orari equivalenti di rumore (LAeq) sulle 24 ore. Tali profili di rumore, una volta normalizzati, rappresentano uno strumento di aggregazione delle strade strettamente legato alle dinamiche veicolari, permettendo quindi una più reale descrizione della rete. Per ottenere la mappa acustica dinamica di una vasta area urbana è necessario che tutti gli archi da mappare siano assegnati a un gruppo. A tale scopo, poiché solo di poche strade si conoscono i livelli sonori, è stato selezionato il parametro non acustico che meglio permette l'attribuzione di un'arco non monitorato ad uno dei gruppi ottenuti per mezzo delle

strade monitorate. In base al valore del parametro non acustico saranno infine selezionati gli archi stradali presso i quali verranno installati i sistemi di monitoraggio utilizzati per rappresentare l'intera rete stradale.

2. Analisi statistica dei profili acustici

Il dataset considerato nel presente lavoro comprende i risultati di una campagna di monitoraggio condotta nella città di Milano ed è costituito da 93 andamenti giornalieri di livelli sonori orari misurati, appartenenti a 8 tipologie funzionali di strade (da A ad F e sotto-gruppi, secondo il Nuovo Codice della Strada). Tutti i dati sono riferiti a giorni feriali, in assenza di pioggia come prescritto dalla D.M. Ambiente 16/3/1998, e sono stati processati in modo da comprendere unicamente il contributo sonoro da traffico veicolare.

A causa della non omogeneità dei profili, legata alle condizioni di misura sito-specifiche quali la distanza dalla sorgente o la presenza di conformazioni urbanistiche differenti, ogni i -esimo livello orario L_{Aeqhj} della j -esima serie temporale è stato normalizzato rispetto al livello del periodo di riferimento diurno L_{Aeqdj} :

$$(1) \quad \delta_{ij} = L_{Aeqhj} - L_{Aeqdj} \text{ [dB]} \quad (i = 1 \text{ h}, \dots, 24 \text{ h}; j = 1, \dots, 93)$$

Per i siti per cui erano presenti monitoraggi di più giornate, la serie temporale considerata è stata calcolata con la mediana dei valori di δ_{ij} . La mediana è stata scelta perchè meno influenzata dalla presenza di outliers.

L'approccio di raggruppamento degli archi basato sulle classi funzionali non consente, una discriminazione degli effettivi "comportamenti acustici" sostenuti dalle diverse arterie stradali. Si è deciso quindi di analizzare i monitoraggi continui di 24 ore (andamenti di livelli equivalenti orari normalizzati), sulla base di similarità statistiche mediante una analisi di cluster.

In altre parole, l'obiettivo è quello di modificare l'approccio al campionamento stratificato del rumore da traffico urbano, basato sulla classificazione legislativa delle strade, definendo una nuova stratificazione basata su una categorizzazione in cluster, come proposto in precedenti studi. A questo scopo, sono state applicate tecniche di clusterizzazione non controllate (*unsupervised clustering algorithms*) per raggruppare i profili di 24 ore di livello sonoro orario normalizzato, δ_{ij} , che risultano essere statisticamente simili.

Nel caso in esame sono stati applicati i seguenti algoritmi:

- aggregazione gerarchica, usando l'algoritmo di Ward;
- algoritmo K-means;
- Partitioning Around Medoids (PAM);
- Expectation Maximization algoritmo implementato nel "mclust" package.

I risultati ottenuti mediante il software open source "R" assegnano le migliori performance di clusterizzazione alla soluzione a 2 cluster, ottenuti con tecnica di clustering gerarchico (algoritmo di Ward).

La figura 1 mostra i profili dei valori medi normalizzati $\bar{\delta}$ e la corrispondente deviazione standard per ogni cluster.

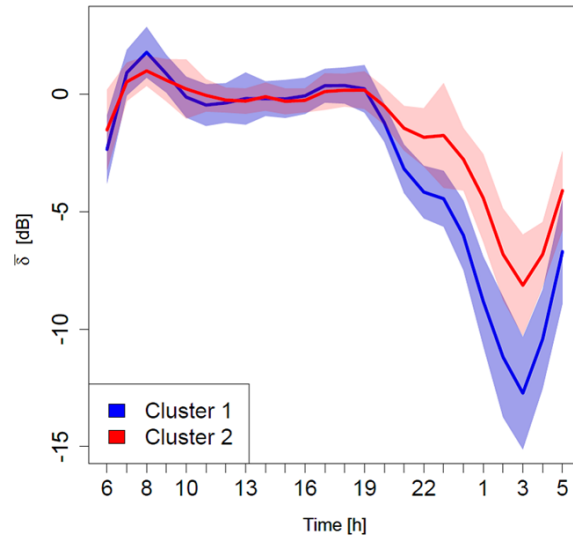


Figura 1 - Profili dei valori medi normalizzati, $\bar{\delta}$, per ciascun cluster e relativa deviazione standard

La distribuzione dei profili in gruppi ottenuta con la cluster analysis è strettamente correlata all'effettivo utilizzo della strada e corrisponde a una reale descrizione delle dinamiche viabilistiche urbane. Questo risultato però può essere direttamente utilizzabile solo se collegato a un parametro (parametro non-acustico) che determini l'associazione di ogni arco stradale (non facente parte del campione monitorato) con uno dei due cluster. La scelta del parametro non acustico dovrà essere effettuata tra quelli che meglio discriminano i due cluster.

Il parametro non acustico può essere scelto considerando una funzione dei flussi veicolari circolanti relativi a due o più ore della giornata. Per la definizione del parametro consideriamo la definizione che utilizza il valore del logaritmo del flusso veicolare $F_{i,j}$, a orari differenti (i,j), sommati secondo la seguente formula:

$$(2) \quad x = \sqrt{(\text{Log}F_i)^2 + (\text{Log}F_j)^2}$$

dove F_i e F_j sono i flussi alle ore i e j .

Alternativamente può essere considerato come parametro non acustico il logaritmo di T_d (valore del traffico giornaliero nel periodo diurno, 06-22), di T_n (valore del traffico notturno, 22-06), le loro combinazioni e il logaritmo del flusso giornaliero totale T_t .

La bontà del parametro non-acustico è stata valutata mediante le curve ROC (Receiver Operating Characteristic) ovvero degli schemi grafici impiegati per un classificatore binario. L'indicatore relativo all' "area sotto la curva" (AUC) equivale alla probabilità che il risultato del test effettuato su un elemento estratto a caso dal gruppo di strade con parametro non-acustico superiore alla soglia appartenga al cluster designato. Nella tabella 1 sono riportati i valori di soglia e di "Area sotto la Curva" per ciascun parametro non-acustico.

I risultati migliori si hanno per $\log T_n$ e sue combinazioni. Tuttavia, a causa dell'incertezza del calcolo di tali valori con il modello del traffico abbiamo optato per il $\log T_t$.

Tabella 1 - Valore di soglia del classificatore binario e corrispondente “Area sotto la Curva”

Parametro non-acustico	Valore di soglia	Area Sotto la Curva (AUC) (%)
$X = \log T_t$	4.45	79.6
$X = \log T_d$	4.42	79.1
$X = \log T_n$	3.21	81.3
$X = \sqrt{(\log F_{8-9})^2 + (\log F_{21-22})^2}$	4.16	78.9
$X = \sqrt{(\log F_{8-9})^2 + (\log F_{18-19})^2}$	4.69	77.5
$X = \sqrt{(\log F_{8-9})^2 + (\log F_{3-4})^2}$	3.65	79.2
$X = \sqrt{(\log F_{8-9})^2 + (\log F_{21-22})^2 + (\log T_t)^2}$	6.20	79.1
$X = \sqrt{(\log F_{8-9})^2 + (\log T_n)^2}$	4.47	80.1

3. Analisi di profili temporali con diversa discretizzazione temporale

Un aspetto importante in tema di mappature dinamiche riguarda la definizione dell'intervallo di tempo minore con cui la mappa può essere aggiornata senza una perdita significativa di informazione rispetto al dato originale (livello orario). A questo scopo, sono stati estratti cinque nuovi profili di rumore con risoluzione temporale di 30, 20, 15, 10, 5 minuti. Ogni profilo è stato analizzato statisticamente; la figura 2 riporta i risultati dei valori medi $\bar{\delta}$, rispettivamente per il cluster 1 e per il cluster 2.

I profili a “bassa” e ad “alta” risoluzione temporale presentano andamenti piuttosto simili, con alcune eccezioni specialmente nel periodo notturno.

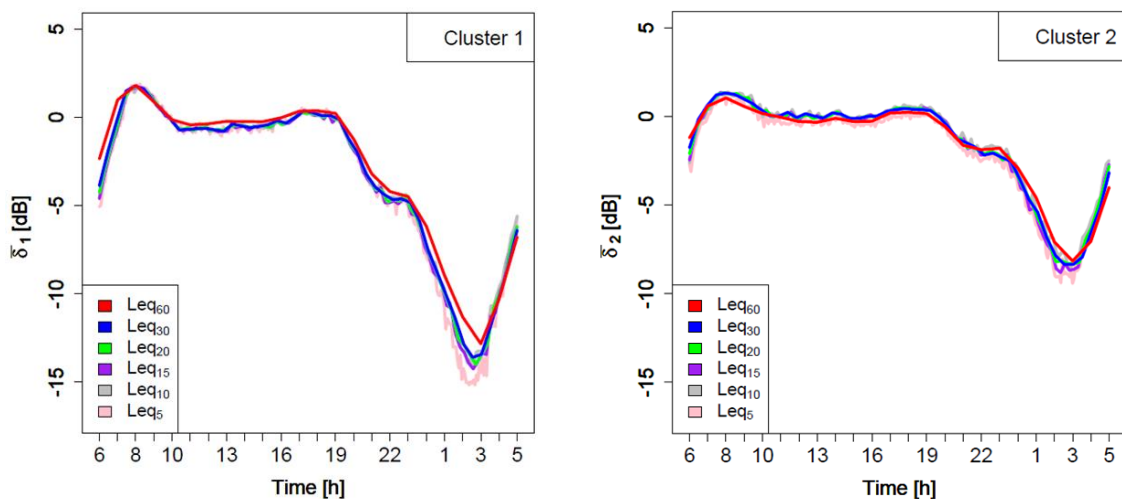


Figura 2 - Confronto tra i profili medi, $\bar{\delta}_1$ per il cluster 1 e $\bar{\delta}_2$ per il cluster 2, con differenti discretizzazioni temporali

La figura 3 riporta la deviazione standard complessiva associata al cluster 1 e al cluster 2, in funzione del tempo. Durante il periodo diurno la discretizzazione temporale di 60 minuti mostra valori di circa 1 dB, che crescono a 2-3 dB nel periodo notturno. Gli altri intervalli di discretizzazione presentano valori di σ di circa 2 dB nel diurno, mentre nel notturno si passa da valori di 3-4 dB per i 30 minuti fino a 4-6 dB per i 5 minuti. L'alta variabilità del rumore da traffico tende ad amplificarsi durante la notte, specialmente con intervalli di integrazione brevi. Questa tendenza si evince anche dall'analisi del grafico in figura 4, dove la deviazione standard media $\bar{\sigma}$, con la corrispondente deviazione standard, è rappresentata in funzione del tempo di integrazione crescente.

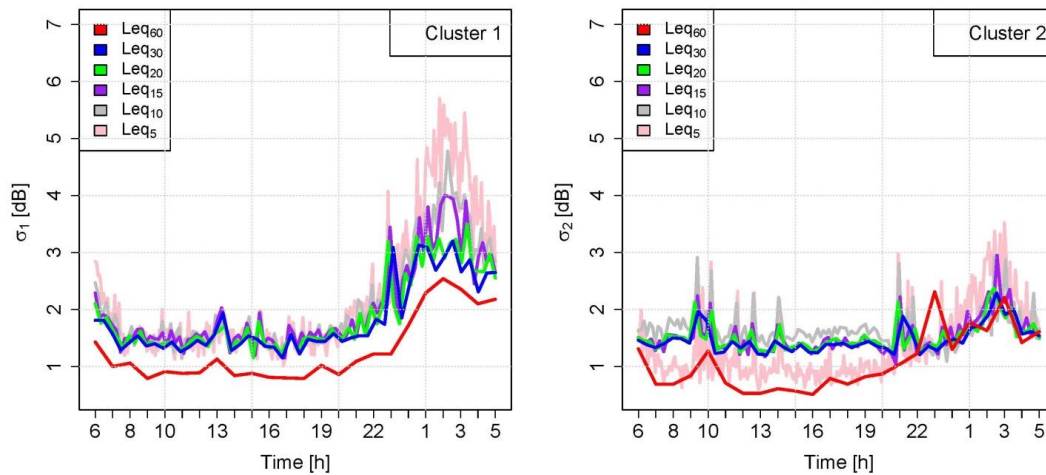


Figura 3 - Deviazione standard complessiva, σ , associata ad ogni discretizzazione temporale, in funzione del tempo

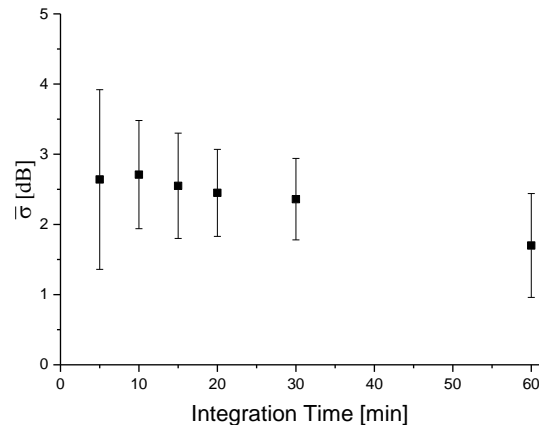


Figura 4 - Deviazione standard media, $\bar{\sigma}$, con la corrispondente deviazione standard, per ogni discretizzazione temporale

Dagli andamenti della deviazione standard complessiva, si osserva come questa tenda ad aumentare fortemente dalle ore 20 fino a raggiungere valori massimi alle ore 3. Per questa ragione, e anche considerando la maggior necessità di informazioni sulla mappa acustica in periodo diurno, il tempo di aggiornamento sarà diversificato nei diversi periodi della giornata.

Un altro aspetto nella quantificazione dell'errore associato ai diversi tempi di integrazione proposti, riguarda il fatto che i cluster così ottenuti possono non avere la stessa composizione in strade di quelli ottenuti on l'intervallo orario. Questa componente di errore è stata stimata, fornendo valori di errore massimo contenuti entro 1 dB.

4. Modellizzazione Acustica e della viabilità in aree urbane

Lo studio della propagazione del rumore nell'ambito urbano della città di Milano sarà ottenuto mediante l'impiego di un modello di simulazione che implementa lo standard di calcolo europeo per il rumore da traffico veicolare (NMPB). Le informazioni relative al tracciato degli archi stradali, all'orografia del suolo e alla morfologia dell'edificato, ovvero tutte le caratteristiche di tipo statico, saranno ricavate dal sistema informativo territoriale del Comune di Milano.

La caratterizzazione acustica delle sorgenti sonore nel modello di calcolo si basa invece sui dati ottenuti mediante un modello di distribuzione del traffico, implementato da AMAT.

Il dato del flusso veicolare è il dato di input nel modello che consente il calcolo della potenza sonora emessa da ciascun arco della rete, secondo l'algoritmo NMPB.

All'interno del progetto Dynamap, questa informazione sarà introdotta per la produzione della mappa acustica di base, assumendo come input per l'intera rete un dato di flusso veicolare ad un tempo x sincronizzato con l'acquisizione del livello sonoro dal sistema di monitoraggio low cost. L'aggiornamento dei livelli della mappa nel tempo seguirà quindi i livelli sperimentali acquisiti (per ciascun cluster e integrati nell'intervallo di aggiornamento definito) dai sensori.

Alcuni parametri, tuttavia, inducono una variazione nella produzione o propagazione del rumore, e di conseguenza nella modellizzazione acustica, indipendente dai livelli sonori sperimentali acquisiti:

È stata pertanto condotta una analisi di sensitività del modello acustico con lo scopo di determinare la funzione di risposta nel calcolo dei livelli sonori rispetto al variare di alcuni parametri (la cui variazione è indipendente dai livelli sonori emessi dalla sorgente). Tipicamente, in ambito urbano, questi parametri sono rappresentati da:

- condizioni di traffico, ovvero scorrevolezza del flusso veicolare (che può essere definito: continuo, accelerato, decelerato, interrotto);
- velocità media di percorrenza;
- composizione del traffico (percentuale di mezzi pesanti).

I risultati ottenuti possono indirizzare il modellista nella definizione di differenti mappe base dell'ambiente urbano, che prendano in considerazione l'occorrenza di condizioni di traffico particolari in alcune arterie durante determinati intervalli della giornata, come ad esempio la presenza di traffico interrotto (congestionato) nelle ore di punta.

5. Individuazione dei siti di monitoraggio

L'individuazione dei siti di collocazione della rete di monitoraggio a supporto della mappatura dinamica viene ottenuta attraverso la discretizzazione del parametro non acustico X e l'aggregazione degli archi stradali negli intervalli discreti individuati.

A questo scopo, il parametro non acustico, $X = \text{Log}(T_T)$ è stato calcolato su tutti gli archi stradali, circa 2000, afferenti all'area pilota (Zona 9) nel comune di Milano. La distribuzione di tale parametro è stata confrontata con la distribuzione della funzione di probabilità, $P(x)$, ottenuta dalle misure nei 93 siti di monitoraggio del database iniziale (vedi Fig. 5).

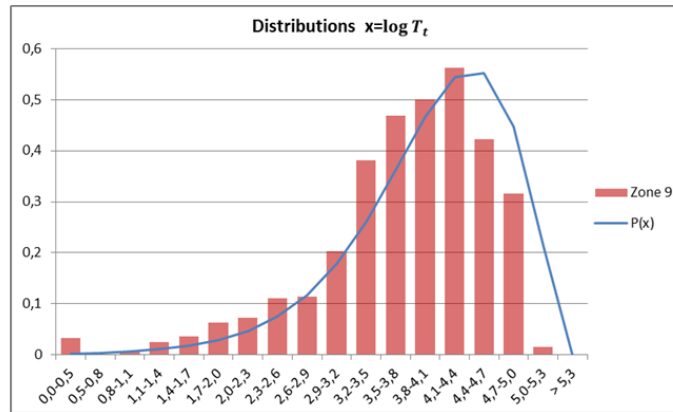


Figura 5 - Distribuzione di frequenza del parametro x per tutte le strade dell'area pilota (istogramma) e funzione di probabilità (curva blu) per il campione di strade monitorate

Come si osserva dalla figura 5, la distribuzione di X per le 93 misure sperimentali è consistente con la distribuzione di X nell'intera Zona 9. Questo risultato conferma che le stazioni di monitoraggio scelte presentano dei valori del parametro X che coprono il range di valori di X della zona per cui deve essere predetto il comportamento acustico da traffico veicolare.

Da questa distribuzione sono stati ricavati 6 intervalli equamente popolati di X , come riportato nel grafico a torta in figura 6.

Ad ogni gruppo di valori di X sarà associata una mappa acustica, aggiornata in tempo reale misurando l'andamento dei livelli sonori in un numero limitato di stazioni selezionate all'interno del medesimo gruppo.

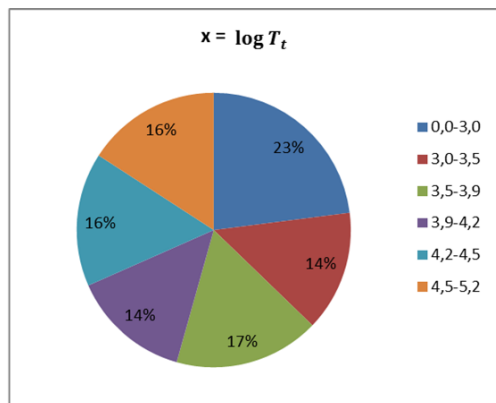


Figura 6 – I 6 gruppi di valori del parametro $X=\log T_T$

La localizzazione ottimale dei siti di monitoraggio low-cost per l'attuazione del progetto Dynamap, all'interno della Zona 9 di Milano, si basa sui flussi di traffico orari per ogni arco di strada, desunti dal modello di simulazione del traffico già citato nel Cap. 4.

All'interno di ogni gruppo è stato calcolato il flusso di traffico orario medio lungo le 24 ore. Per ogni strada appartenente ad un gruppo, è stata poi calcolata la deviazione standard media (mediata sulle 24 ore) rispetto al valore medio del gruppo di riferimento. Per ciascuno dei 6 gruppi, tutti gli archi stradali sono quindi stati ordinati in un elenco con deviazione standard crescente, ovvero dal più "vicino" alla media al più "lontano". Le posizioni di monitoraggio per il progetto Dynamap dovranno essere selezionate tra quelle col miglior ranking all'interno di ciascun gruppo.

6. Conclusioni

Dato il gran numero di strade presenti nella città di Milano, per ottenere la relativa mappa acustica è necessario un approccio di tipo statistico nel quale le strade che hanno flussi veicolari simili e quindi trend di rumore simili, siano raggruppate. Al fine di ricavare questi gruppi (cluster), è stata eseguita una vasta campagna di misurazione. Dai dati orari dei livelli di rumore rilevati, è stata applicata una cluster analysis e le strade monitorate sono state classificate in due gruppi (cluster 1 e 2). Successivamente, per ogni strada da mappare, è stato calcolato il parametro non acustico $X = \text{Log}Tt$. Al fine di ottenere le mappe acustiche, è stata analizzata la distribuzione del parametro non-acustico $P(X)$ per tutti gli archi appartenenti alla zona 9 (l'area pilota selezionata) e ne è stata verificata la sovrapposizione con la distribuzione $P(X)$ relativa a soli archi in cui era stato eseguito il monitoraggio. L'intervallo totale dei valori di X è stato diviso in sei intervalli o gruppi, ciascuno contenente un numero simile di strade. Gli archi stradali dove posizionare le stazioni di monitoraggio, per un totale di 24, sono stati selezionati in base al valore del parametro non acustico X : all'interno di ognuno dei 6 gruppi, sono stati individuati 4 archi. Successivamente i 24 archi sono stati classificati nei cluster 1 e 2. Le stazioni di registrazione, contemporaneamente, determinano l'aggiornamento delle mappe acustiche di ognuno dei 6 gruppi. Infine, in funzione dell'errore associato, sono stati verificati i tempi ottimali di aggiornamento delle mappe: ogni 5 minuti nell'intervallo di tempo che va dalle 07 alle 21, ogni 15 minuti nel tempo di intervallo che va dalle 21 alle 01 ore, ogni ora il periodo notturno (01-07).

7. Bibliografia

- [1] Fawcett T, An introduction to ROC analysis, *Pattern Recogn. Lett.* 27, 861–874 (2006)
- [2] Rey Gozalo G., Barrigón Morillas J.M., Gajardo C.P. (2015), Urban noise functional stratification for estimating average annual sound level, *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(6), 3198-3208.
- [3] Barrigon J.M., Gomez V., Mendez J., Vilchez R., and Trujillo J. (2005). A categorization method applied to the study of urban road traffic noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 117, 2844-2852.
- [4] Brambilla G., and Gallo V. (2010). Andamenti dei livelli LAeq orari nelle 24 ore del rumore urbano e indicazioni per il campionamento spaziale stratificato. AIA 2010, Siracusa, Italy, May 26-28.
- [5] Angelini F., Bisceglie A., Brambilla G., Gallo V., and Zambon G. (2012). Campionamento spaziale stratificato per il rumore da traffico stradale: un'applicazione alla rete viaria di Milano. AIA 2012, Roma, Italy, July 4-6.
- [6] J. H. Ward, *Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function*, *Journal of the American Statistical Association*, **58**, 236–244, 1963.
- [7] J.A. Hartigan, M.A. Wong, *A K-means clustering algorithm*, *Applied Statistics*, **28**, 100–108, 1979.
- [9] C. Fraley et al., “*mclust*” version 4 for R: *Normal Mixture Modeling for Model-Based Clustering, Classification, and Density Estimation*, <http://cran.r-project.org/web/packages/mclust/index.html>.
- [11] G. Zambon , R. Benocci, G. Brambilla, V. Gallo, *Statistics-based functional classification of roads in the urban area of Milan*. Forum Acusticum, 7-12 Sept, Krakow, 2014.
- [12] G. Brock, V. Pihur, S. Datta, S. Datta, *clValid: An R Package for Cluster Validation*, *Journal of Statistical Software*, **25**, 1-22, 2008.