

Computer code based on experimental results for acoustical mapping of urban areas

Angelo Farina (*), Giovanni Brero (**), Giuseppe Pollone(**)

(*) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma - viale delle Scienze - 43100 PARMA
tel. +39 521 905701 fax + 39 521 905705 E-MAIL: farina@pcfarina.eng.unipr.it

(**) IPSE s.r.l. - Via Bologna, 87 - 10187 TORINO

tel. +39 11 2480529 fax +39 11 2481359 E-MAIL: ipselab@mbox.vol.it

Abstract

This paper reports some of the results of a DISIA research project, sponsored by the Italian Environment Ministry, named “**Definition of the acoustic recovery goals in urban areas**”. In more detail, the authors developed two computer codes covering different tasks: the first is a simplified acoustic model, capable of mapping the sound pressure level ($L_{A,eq,day}$ or $L_{A,eq,night}$) over large portions of a town or even on the whole urban area. The second is an highly detailed numerical code, based on the new Pyramid Tracing algorithm, more suited for detailed analysis of small areas, where acoustic recovery is needed.

In this paper the first computer program is described, among with the experimental measurements undertaken for building the input data-base, and with the validation procedure. An application example is then reported.

In the following paragraphs the main goals of the research project are first described, followed by the results of the experimental characterization of urban noise sources. Then the computing algorithm is explained in detail, and some aspects of the user's interface and of the interaction with other computer programs (CAD, GIS and mapping utilities) are described. The results of the verification procedure, by comparison with experimental measurements in some test sites, are reported, and eventually an application example in the urban area of Mestre (Venice) is shown.

Riassunto

Questo lavoro riporta alcuni dei risultati ottenuti nell'ambito di un progetto di ricerca DISIA, promosso dal Ministero dell'Ambiente, denominato “**Individuazione degli obiettivi di risanamento acustico nelle aree urbane**”. In maggior dettaglio, gli autori hanno sviluppato due programmi per computer aventi scopi diversi: il primo è un modello di propagazione acustica semplificato, in grado di mappare il livello sonoro ($L_{A,eq,diurno}$ o $L_{A,eq,noct.}$) su larghe porzioni di territorio urbano. Il secondo è un codice numerico di dettaglio, basato sul nuovo algoritmo di *Pyramid Tracing*, più indicato per l'analisi particolareggiata di aree limitate, ove è necessario progettare interventi di bonifica acustica.

In questo articolo viene descritto il primo programma di calcolo, assieme con i rilievi sperimentali utilizzati per la caratterizzazione delle sorgenti di rumore urbano. Viene poi spiegato in dettaglio l'algoritmo di calcolo, e vengono illustrate l'interfaccia utente del programma e la sua interazione con altri programmi (CAD, GIS, programmi di mappatura). Vengono infine presentati i risultati della procedura di validazione del programma, ottenuti per confronto con rilievi sperimentali in alcuni siti di prova, ed un esempio di applicazione nell'area urbana di Mestre (VE).

1. Introduzione e scopo del lavoro

Sia nella fase di zonizzazione acustica del territorio urbano, che nella successiva fase di gestione del problema del rumore nelle aree urbane, si sente la necessità di disporre di un sistema informatico in grado di fornire la mappatura acustica del territorio. Questa può essere derivata integralmente da rilievi sperimentali, ma può essere ottenuta viceversa anche mediante l'impiego di modelli numerici, molti dei quali disponibili in Europa anche in forma di raccomandazioni ufficiali dei Ministeri competenti in vari Paesi. La superiorità della soluzione basata sul modello numerico consiste soprattutto nel fatto che essa consente il ricalcolo immediato della nuova situazione per effetto di modifiche al Piano Urbano del Traffico (P.U.T.), per effetto della edificazione di nuove costruzioni, o per la realizzazione di opere di contenimento delle emissioni sonore.

Tuttavia in passato è risultato evidente come l'impiego dei modelli di calcolo, anche i più raffinati, porti a stime della rumorosità estremamente disperse in assenza di qualsiasi forma di taratura del modello mediante rilievi sperimentali: in occasione di un *Round Robin* fra modelli di calcolo europei, alla cui organizzazione ha partecipato uno degli autori [1], è risultato che anche in casi geometricamente molto semplici si verificano differenze di 4-5 dB(A) fra i vari programmi di calcolo, e che nel caso la situazione geometrica si complichino anche di poco, queste variazioni arrivano fino a 12 dB(A). Si noti poi che le differenze riscontrate non riguardano solo la modellazione di fenomeni di propagazione a lunga distanza (che in ambito urbano sono comunque poco rilevanti), ma anche la vera e propria **emissione** da parte delle sorgenti sonore. Considerando che il *Round Robin* di cui sopra teneva in considerazione solo sorgenti di rumore legate al traffico stradale fluente (tipo autostrada), ci si aspetta una situazione ancora peggiore applicando simili modelli semplificati di emissione in campo urbano, in presenza di traffico non fluente, e magari anche in presenza di linee ferroviarie che attraversano la città.

Si è pertanto deciso di realizzare un sistema di calcolo che privilegiasse l'accuratezza nella stima delle emissioni sonore, descrivendo con grande dettaglio i tipi di sorgente e le loro modalità di emissione. E' stata dunque realizzata una imponente campagna di rilievi sperimentali, onde disporre di un data-base di emissione, tarato sulla realtà italiana, e comunque sempre modificabile ed aggiornabile in funzione di ulteriori rilievi. In tal modo il modello di calcolo non contiene al suo interno le informazioni legate all'emissione sonora, che sono viceversa disponibili come dati di ingresso, eventualmente modificabili onde adattare il funzionamento del modello a realtà urbane diverse da quelle in cui è stata condotta la sperimentazione.

Ai fini di realizzare con tempi di calcolo ragionevoli la mappatura di una intera città, si è scelto poi di impiegare i dati di emissione come *input* di un algoritmo di calcolo molto semplificato, tenuto conto del fatto che all'interno delle aree urbane non sono solitamente molto importanti i fenomeni di propagazione su lunga distanza. E' ovviamente possibile (e necessario) disporre di un modello molto più raffinato allorchè, anzichè mappare l'intera città, si decide di studiare in dettaglio un singolo gruppo di edifici, onde ad esempio verificare l'efficacia di diversi sistemi di contenimento del rumore: a questo scopo è stato realizzato un diverso programma di calcolo, di cui si relaziona a parte [2].

Affinchè l'operazione di mappatura dell'area urbana possa venire intrapresa in tempi ragionevoli ed a costi contenuti, è necessario che la base cartografica ed i dati di input del modello siano disponibili in forma informatizzata: pertanto il programma di mappatura del livello sonoro nelle aree urbane, che è stato battezzato CITYMAP, è stato dotato di idonea interfaccia software verso i sistemi CAD comunemente usati per applicazioni di G.I.S. (Geographical Information Services). Tramite questo collegamento, è possibile creare all'interno dei sistemi CAD l'insieme di dati geometrici (tracciato delle strade e dei binari, sorgenti di tipo industriale), agganciare alle entità geometriche i dati di emissione (traffico stradale e ferroviario, emissione delle sorgenti industriali) ed ottenere all'uscita del modello di calcolo una mappatura isolivello acustico perfettamente sovrapponibile alla cartografia digitale. Tutte queste operazioni sono possibili senza abbandonare l'ambiente *multitasking* di MS Windows, che funge da elemento di collegamento trasparente ai vari programmi.

E' ovvio come queste possibilità siano utili nella fase di classificazione del territorio di un comune in zone acustiche ai sensi del DPCM 1 marzo 1991 e della nuova Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico (L. 26 ottobre 1995, n. 447): diviene infatti possibile porre a confronto diretto, all'interno del software di mappatura acustica, la cartografia che riporta i limiti di rumorosità con quella che riporta i livelli effettivamente esistenti sul territorio. E' possibile così ottenere automaticamente una **carta dei superamenti**, in cui vengono evidenziate con diversi colori le zone in cui la rumorosità è superiore al limite proposto. Sul-

la base di tale rappresentazione, sarà possibile adottare le opportune scelte tecniche, ma anche politiche: infatti l'adozione della zonizzazione acustica è un'operazione eminentemente politica (come la realizzazione di un P.R.G.), e di fronte alla possibilità di trovarsi con livelli molto più alti dei limiti su una vasta porzione del territorio, potrebbe risultare conveniente adottare classi con limiti di rumorosità più elevati, tranne che nelle zone in cui si prevede di poter effettivamente realizzare bonifiche tali da consentire il rientro nei limiti.

Per quanto riguarda invece la gestione del territorio, in seguito all'adozione della zonizzazione acustica, è evidente come sia di immediata applicazione la possibilità di ricalcolare rapidamente la nuova mappa del rumore in occasione di interventi sulle sorgenti sonore (modifica del P.U.T.), sull'edificato o in occasione della realizzazione di opere di bonifica. Queste ultime, comunque, andranno progettate facendo impiego del secondo programma di calcolo, che tiene conto di fenomeni acustici molto più complessi di quanto implementato nel programma CITYMAP.

2. Rilievi sperimentali per la determinazione delle emissioni sonore

I modelli previsionali sviluppati si basano in primo luogo sull'esistenza di una banca dati input relativa ai livelli di emissione. Questa banca dati è infatti il frutto di regressioni effettuate su una ampia famiglia di dati di emissione rilevati al transito di veicoli isolati.

Parametrizzando le condizioni di transito è stato possibile quantificare gli effetti acustici associati ad alcune variabili: pendenza della strada, tipo di pavimentazione, velocità del flusso, tipo di veicolo. Dall'emissione dei singoli veicoli, e dal numero degli stessi che transita nel periodo di riferimento considerato (diurno o notturno), il modello calcola un valore di emissione da associare alla strada, tenendo anche conto delle caratteristiche di quest'ultima.

Per far ciò è necessario conoscere il SEL (livello di singolo evento) relativo al transito di un veicolo di ciascun tipo. Pertanto la banca dati di emissione altro non è che una raccolta di valori di SEL, relativi ai diversi tipi di veicolo, alle diverse fasce di velocità, ed agli effetti delle variabili di cui sopra.

Pertanto i rilievi sperimentali sono consistiti nella misurazione di un grande numero di passaggi singoli di veicoli (sia stradali che ferroviari), di ciascuno dei quali è stato misurato il profilo temporale, e dunque il SEL. Ovviamente ciò è possibile soltanto in presenza di transiti isolati in contesti ambientali standardizzati.

2.1 Rumore da traffico stradale

La distinzione tra rilievi urbani ed extraurbani è in questo caso finalizzata essenzialmente alla possibilità di individuare in questi diversi contesti transiti a velocità medio-basse (ambiente urbano, classi di velocità C1-C4) e transiti a velocità medio-alte (ambiente extra-urbano, classi C5-C8), anche se in realtà tutti questi dati servono poi per calcoli del rumore soltanto in ambito urbano.

In entrambi i casi viene caratterizzato l'effetto pendenza della sede stradale (+5% e -5%). Nel caso urbano viene inoltre caratterizzato l'effetto della superficie stradale in pavé; nel caso autostradale viene caratterizzata la superficie stradale con pavimentazione di tipo drenante-fonoassorbente.

Per la gestione del database di input del modello si è reso necessario uniformare la classificazione dei transiti rilevati. Ne risulta come riferimento lo schema che segue per il riconoscimento delle tipologie di superficie stradale, per la classificazione dei veicoli e per l'identificazione delle classi di velocità.

TIPO DI SEDE STRADALE

- A1 - condizione standard 1: pavimentazione bituminosa tradizionale, pendenza nulla;
- A2 - condizione parametrica 2- pavimentazione bituminosa tradizionale, pendenza +5%;
- A3 - condizione parametrica 3- pavimentazione bituminosa tradizionale, pendenza -5%;
- A4 - condizione parametrica 4- pavimentazione in pavé, pendenza nulla;
- A5 - condizione parametrica 5- pavimentazione bituminosa fonoassorbente, pendenza nulla.

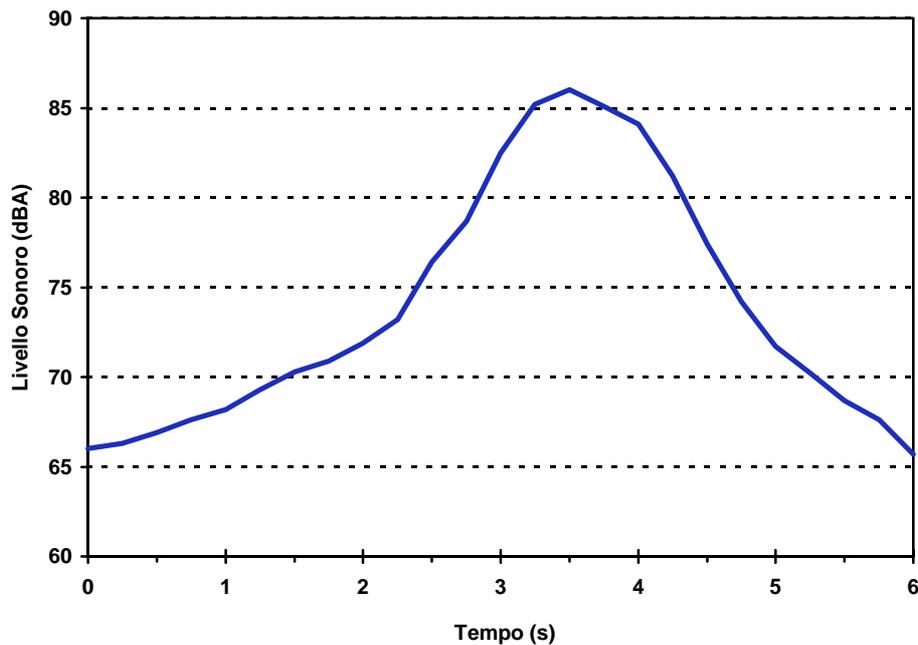
CATEGORIA DI VEICOLI

- V1 - autovetture e veicoli commerciali fino a 5 t;
- V2 - veicoli commerciali medi, con 2 assi più di 4 ruote, autobus extraurbani;
- V3 - veicoli commerciali medio-pesanti, con 3 o più assi e peso totale fino a 10 t;
- V4 - veicoli pesanti con più di 3 assi, con rimorchi o semirimorchi;
- V5 - motocicli.

FASCE DI VELOCITA'

C1 - $0 < V \leq 25$	km/h in accelerazione;
C2 - $25 < V \leq 50$	km/h in accelerazione;
C3 - $0 < V \leq 25$	km/h in decelerazione;
C4 - $25 < V \leq 50$	km/h in decelerazione;
C5 - $50 < V \leq 70$	km/h;
C6 - $70 < V \leq 90$	km/h;
C7 - $90 < V \leq 110$	km/h;
C8 - $V > 110$	km/h.

La metodologia di rilievo prevede l'utilizzo di un microfono posizionato a 7.5m dal centro della corsia di misura, ed 1.2 m al di sopra del piano stradale. Il sito presenta un tratto rettilineo, omogeneo, privo di ostacoli o superfici riflettenti lungo almeno 100m, al cui centro è collocata la postazione di rilievo. Ad essa è associato un sistema di cronometraggio a fotocellula per la determinazione della velocità di ciascun veicolo in transito. La seguente figura riporta un tracciato temporale relativo al passaggio di un veicolo, utilizzato per il calcolo del SEL.



Profilo temporale del passaggio di un autoveicolo - d=7.5 m

I dati di emissione acquisiti sono stati organizzati in forma parametrizzata estraendo per ogni tipo di veicolo ed ogni classe di velocità un valore medio di SEL ottenuto come media logaritmica dei valori corrispondenti dei singoli transiti. In corrispondenza di ciascun SEL medio sono inoltre riportate le corrispondenti correzioni medie associate agli effetti considerati: correzione pavé, asfalto fonoassorbente, discesa e salita. In realtà oltre che misurare soltanto il SEL in dB(A), ciascun rilievo, effettuato tramite analizzatore di spettro in tempo reale, ha fornito un **spettro di SEL**, ed analogamente è stato ottenuto un spettro per ciascuna delle 4 correzioni di cui sopra. Ovviamente il programma Citymap utilizza soltanto il valore in dB(A) sia del SEL medio di emissione, sia delle 4 correzioni.

La seguente tabella riporta il numero di passaggi singoli di cui è stata prevista la misura per ciascuna categoria di veicoli e per ciascuna classe di velocità:

Condizione	Tipo veicolo	Cl.Vel. C1	Cl.Vel. C2	Cl.Vel. C3	Cl.Vel. C4	Cl.Vel. C5	Cl.Vel. C6	Cl.Vel. C7	Cl.Vel. C8	Totale
A1	V1	200	200	200	200	200	200	200	200	400
	V2	50	50	50	50	50	50	50	50	400
	V3	50	50	50	50	50	50	50	50	400
	V4	50	50	50	50	50	50	50	50	400
	V5	40	40	40	40	40	40	40	40	320
A2	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
A3	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
A4	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
A5	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
		1620		1620		1620		1620		6480

Rispetto al numero complessivo di rilievi previsti, alcune combinazioni parametriche meno usuali (transiti veloci di mezzi pesanti su strada con pavé o di veicoli in accelerazione su pavimentazione drenante) sono risultate prive di rilievi validi. In questi casi i dati mancanti per la costruzione del data-base sono stati ottenuti mediante tecniche numeriche di interpolazione e/o estrapolazione, sulla base dei dati validi ottenuti nelle classi di velocità contigue. Questo fatto sta peraltro a significare che c'è ancora spazio per un affinamento del data-base di emissione, non appena i risultati di nuove campagne di rilievo saranno disponibili.

Ciascun spettro di SEL con le relative 4 correzioni è organizzato in un file .TXT utilizzato come input da entrambi i modelli di calcolo. Il singolo file è denominato SELSCiVj.txt dove SEL indica la grandezza acustica, S sta per *strada*, C_i è la i-esima fascia di velocità, V_j è la j-esima categoria di veicoli. In totale sono stati ottenuti 40 di questi files (8 fasce di velocità x 5 classi di veicoli), ciascuno dei quali contiene 5 spettri in bande d'ottava + banda "A". La seguente tabella riporta a titolo di esempio i valori contenuti nel file SELSC8V1.TXT (autoveicoli alla massima velocità):

SC8V1									
Condizione	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dB(A)
Asfalto Liscio	81.7	87.4	81.4	76.2	75.1	73.8	70.6	71.1	81.3
Corr. Pavé'	+1.1	+1.2	+2.1	+2.3	+1.5	+1.6	+1.8	+1.3	+1.9
Corr. Asf.Ass.	-0.1	-0.3	-1.1	-1.8	-2.4	-2.1	-1.2	-1.3	-1.4
Corr. Salita 5°	+2.2	+2.4	+3.1	+2.1	+2.0	+1.3	+1.6	+1.4	+2.2
Corr. Discesa 5°	-1.2	-1.3	-0.8	-1.1	+1.0	-0.2	+0.7	+0.8	+0.1

2.2 Rumore da traffico ferroviario

Anche in questo caso sono stati condotti rilievi su singoli passaggi, ma si è dovuto tenere conto della lunghezza variabile dei singoli convogli, normalizzando i valori di SEL rilevati ad una lunghezza standard del convoglio di 100m tramite la relazione:

$$SEL_{norm} = SEL_{sper} + 10 \cdot \lg \left[\frac{100}{L_{eff}} \right]$$

In questo modo è stato possibile mediare energeticamente i valori di SEL ottenuti da passaggi di convogli dello stesso tipo, nella stessa fascia di velocità ma di lunghezza diversa.

Per quanto riguarda il tipo di sede ferroviaria viene caratterizzato l'effetto dovuto a due distinte tipologie di armamento: rotaie lunghe saldate su traversine in c.l.s. + ballast, e rotaie corte con presenza di scambi/deviatoi/incroci. Ne risulta come riferimento lo schema che segue per il riconoscimento delle tipologie di armamento, per la classificazione dei convogli e per l'identificazione delle classi di velocità.

TIPOLOGIA DI ARMAMENTO

A1 - rotaie lunghe saldate su traversine in c.l.s. e ballast;

A2 - rotaie corte con presenza di scambi/deviatoi/incroci.

CATEGORIA DI VEICOLI

V1 - treni merci;

V2 - treni passeggeri a breve percorso (composizione bloccata);

V3 - treni passeggeri a lungo percorso (composizione variabile);

FASCE DI VELOCITA'

C1 - $V \leq 60$ Km/h;

C2 - $60 < V \leq 90$ Km/h;

C3 - $90 < V \leq 120$ Km/h;

C4 - $V > 120$ Km/h.

La seguente tabella riporta il numero di passaggi singoli elaborati per ciascuna categoria di veicoli e per ciascuna classe di velocità:

Condizione	Tipo Veicolo	Cl. vel. C1	Cl. vel. C2	Cl. vel. C3	Cl. vel. C4	Totale
A1 (binario continuo)	V1	60	60	40	40	200
	V2	60	60	60	40	220
	V3	40	60	60	60	220
A2 (scambi)	V1	40	40	30	30	140
	V2	40	40	40	30	150
	V3	30	40	40	40	150
Totale		270	300	270	240	1080

Ciascun spettro di SEL con le relative correzioni è organizzato in un file .TXT utilizzato come input da entrambi i modelli di calcolo (ovviamente Citymap impiega solo il valore complessivo in dBA di ciascuno spettro). Il singolo file è denominato SELTCiVj.txt dove SEL indica la grandezza acustica, T sta per *treno*, C_i è la i-esima fascia di velocità, V_j è la j-esima categoria di veicoli. In totale sono stati ottenuti 12 di questi files (4 fasce di velocità x 3 classi di veicoli), ciascuno dei quali contiene 3 spettri in bande d'ottava + banda "A". La seguente tabella riporta a titolo di esempio i valori contenuti nel file SELTC1V3.TXT (treni passeggeri lunga percorrenza alla velocità più bassa):

TC1V3									
Condizione	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dB(A)
BASE	84.1	81.7	87.3	86.2	86.2	83.5	80.5	72.9	93.3
Corr. Scambio	+3.1	+4.7	+2.6	+1.7	+1	+0.8	+2.3	+3.6	+1.0

3. Algoritmo di calcolo del programma Citymap

Ogni tratto stradale (o ferroviario) è costituito da una “polyline” piana (non 3DPOLY) sul piano $z=0$ e sul layer “STRADE” (o “BINARI”) (il modello è bidimensionale, per cui anche se c’è una quota diversa da 0 essa viene ignorata), divisa in numerosi tratti. Dal punto di vista geometrico, ciascun tratto è caratterizzato dalle coordinate dei suoi due estremi, nonché dalla larghezza (se la larghezza iniziale è diversa da quella finale, viene assunto il valore medio). Le informazioni suddette sono desunte dal file .DXF.

All’interno di CityMap vengono poi aggiunte le informazioni di rilevanza acustica, che sono differenti per le strade e le ferrovie. In particolare, per ciascuna categoria di veicoli, viene assegnato il numero degli stessi che transita nel periodo diurno e notturno, la classe di velocità, nonché alcune informazioni morfologiche (pendenza, tipo di pavimentazione o di armamento, altezza degli edifici, etc.).

Il primo problema è dunque calcolare il livello equivalente medio a 7.5m dalla strada (o dalla ferrovia) a partire dai SEL unitari esistenti nel data-base di emissione. A tal proposito si ha questa relazione, valida per il periodo diurno:

$$L_{eq,7.5m} = 10 \cdot \lg \left[\sum_{i=1}^5 \left(10^{\frac{SEL_i + \Delta L_{asfalto,i} + \Delta L_{pendenza,i}}{10}} \cdot \frac{N_i}{16 \cdot 3600} \right) \right]$$

Chiaramente nel periodo notturno il numero di ore è pari ad 8 anziché a 16. Si deve inoltre tenere conto che sia i valori di SEL per i 5 tipi di veicoli, sia i corrispondenti termini correttivi per tipo di asfalto e/o pendenza della strada, sono in generale dipendenti dalla classe di velocità assegnata al corrispondente tipo di veicoli. Pertanto essi andranno letti dal file relativo alla opportuna classe di velocità.

Per quanto riguarda il rumore ferroviario, va osservato che i valori di SEL sono normalizzati ad una lunghezza fissa dei convogli, pari a 100 m. Pertanto è necessario tenere conto della lunghezza effettiva dei convogli, in rapporto al valore fisso pari a 100:

$$L_{eq,7.5m} = 10 \cdot \lg \left[\sum_{i=1}^3 \left(10^{\frac{SEL_i + \Delta L_{binario,i} + \Delta L_{pendenza,i}}{10}} \cdot \frac{N_i}{16 \cdot 3600} \cdot \frac{L_i}{100} \right) \right]$$

Una volta ottenuto il Livello equivalente a 7.5 m, non viene considerata alcuna altra differenza fra strade e binari, e la trattazione del rumore emesso da entrambi è dunque unificata. CityMap non tiene conto nè della composizione in frequenza del rumore emesso, nè della direttività dei diversi tipi di sorgenti sonore.

Per operare il calcolo del livello sonoro in ciascun punto della griglia di calcolo, si considera il contributo di tutti i singoli tratti di tutte le strade e binari.

Si verifica anzitutto che la distanza dal centro del tratto al punto di calcolo considerato sia almeno doppia della lunghezza del tratto; se così non è, si procede suddividendo il tratto in due sottotratti uguali, per ciascuno dei quali viene ripetuto tale controllo, eventualmente suddividendo ulteriormente i sottotratti finchè essi non divengono abbastanza corti. In questo modo il raffittimento viene operato soltanto per i tratti più vicini al punto di calcolo.

Si considera un singolo contributo di energia sonora da ciascun sottotratto, come se ci fosse una sorgente concentrata nel suo centro. Il Livello di Potenza L_W di tale sorgente concentrata può essere ottenuta a partire dal Livello di Potenza per metro $L_{W,1m}$ del tratto considerato, a sua volta legato al Livello equivalente a 7.5m dalla relazione:

$$L_{W,1m} = L_{eq,7.5m} - 10 \cdot \lg(\pi \cdot 7.5)$$

Considerando poi la lunghezza l del tratto, si ottiene il livello di potenza complessivo del tratto:

$$L_W = L_{W,1m} + 10 \cdot \lg(l)$$

La propagazione è considerata di tipo sferico con però l'aggiunta di un termine esponenziale di estinzione con la distanza per modellare l'attenuazione in eccesso, e pertanto fornisce questo valore di Livello Equivalente nel punto di calcolo situato a distanza d dal centro del tratto:

$$L_{eq} = L_W + 10 \cdot \lg\left(\frac{e^{-\beta \cdot d}}{4 \cdot \pi \cdot d^2}\right)$$

Un valore di prima stima per la costante b è pari a 0.007; tale valore è tratto dai risultati di ricerche condotte sulla propagazione del rumore nell'ambito di attività estranee al presente progetto di ricerca.

Passando dalla rappresentazione in dB a quella in pseudo-energia, si ricava globalmente questa espressione:

$$E_d = E_{7.5m} \cdot \frac{\pi \cdot 7.5 \cdot 1}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot e^{\beta \cdot d}$$

Rimane da considerare l'eventuale effetto di schermatura causato dagli edifici situati lungo la strada, caratterizzati da una opportuna altezza media. Ciò viene fatto considerando valida una relazione derivata dalla nota formula di Maekawa, che fornisce l'attenuazione ΔL prodotta dalla schermatura:

$$\Delta L = 10 \cdot \lg\left(1 + 40 \cdot \delta \cdot \frac{f}{c}\right)$$

La frequenza viene assunta pari a 340 Hz, e la differenza di cammino viene calcolata come somma dei due raggi diffratti meno il raggio diretto.

Il problema per operare questo calcolo è duplice: innanzitutto occorre trovare la distanza w_{eff} del punto di intersezione con il fronte degli edifici lungo la congiungente fra centro del tratto e punto di calcolo. Essa è in generale sempre maggiore della semilarghezza della strada, e può essere ottenuta dividendo quest'ultima per il seno dell'angolo fra il tratto stradale e la congiungente sorgente e ricevitore. Chiaramente se la distanza d fra sorgente e ricevitore è inferiore a questa, non si ha alcun effetto di schermatura in quanto il punto considerato è dentro la sede stradale. Il coseno dell'angolo fra tratto stradale e congiungente sorgente-ricevitore viene facilmente ottenuto come prodotto scalare fra i versori:

$$\cos(\alpha) = \frac{(X_2 - X_1) \cdot (X_c - X_p) + (Y_2 - Y_1) \cdot (Y_c - Y_p)}{d \cdot l}$$

il seno dell'angolo viene poi ottenuto dal coseno mediante la relazione a tutti nota.

Il secondo problema consiste nello stabilire se il punto di calcolo considerato si trova "a sinistra" o "a destra" del tratto stradale considerato, e dunque se va considerata la altezza media degli edifici sul lato sinistro h_l o quella sul lato destro h_r . Per far ciò si opera il prodotto vettoriale fra i coseni direttori del tratto considerato e della congiunte fra punto di calcolo e primo punto del segmento:

$$\text{Sig} = \frac{(X_p - X_1)}{(X_2 - X_1)} - \frac{(Y_p - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)}$$

Se tale valore è positivo significa che il punto di calcolo è a destra del segmento orientato 1->2, e pertanto il calcolo della differenza di cammino d andrà fatto considerando l'altezza degli edifici h_r :

$$\delta = \sqrt{w_{eff}^2 + (h_r - .5)^2} + \sqrt{(d - w_{eff})^2 + (h_r - 1.5)^2} - d$$

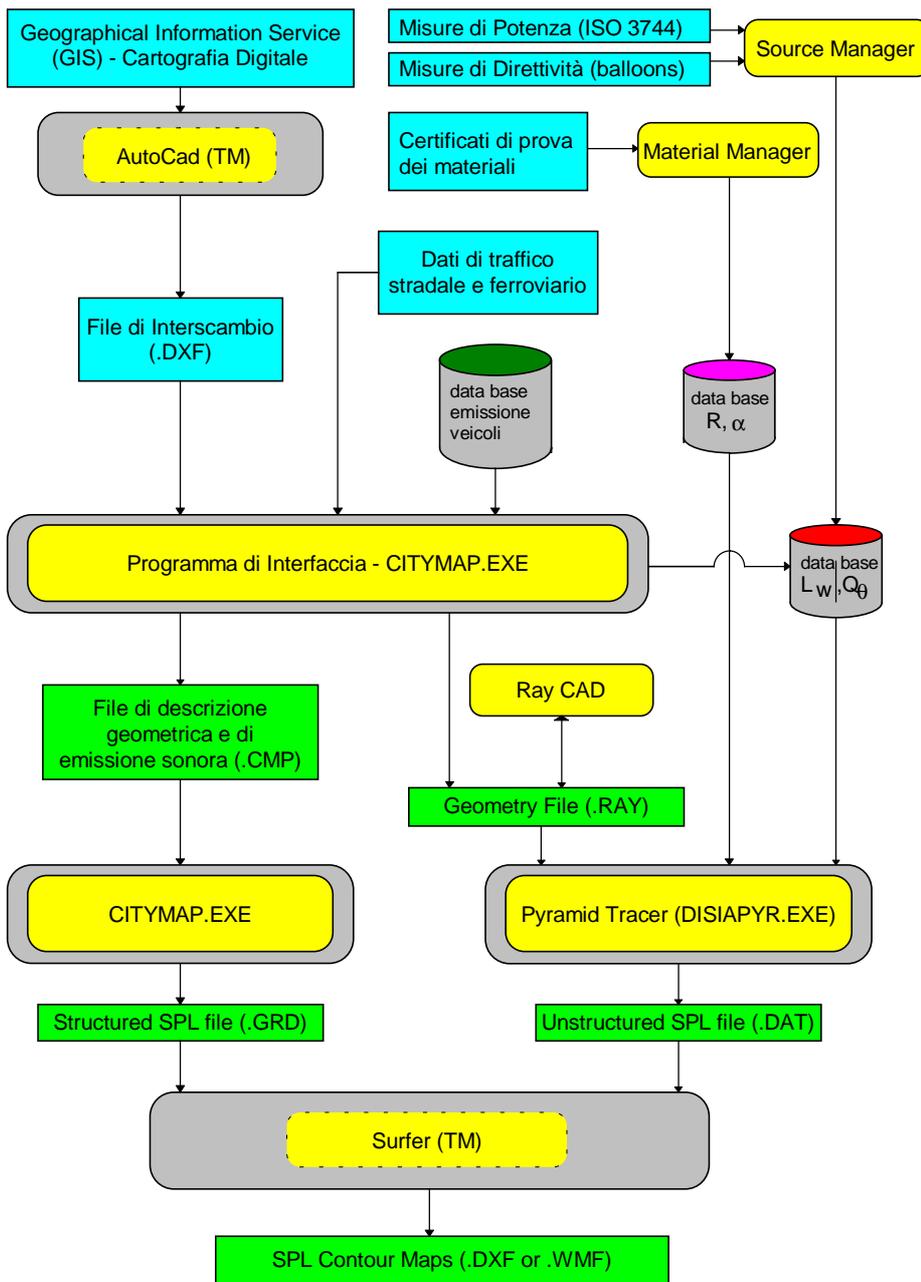
Si noti come l'altezza della sorgente è stata prudenzialmente assunta a 0.5m dal terreno, e quella del ricevitore ad 1.5m dal suolo.

Se viceversa il punto di calcolo fosse risultato a sinistra del tratto considerato, lo stesso calcolo sarebbe stato operato utilizzando h_l . Si è infine assunto di considerare nullo l'effetto di schermatura se l'altezza media degli edifici è inferiore ad 1m.

Vengono infine applicate correzioni per riflessioni multiple nel caso la sede stradale presenti una sezione ad L, ad U largo o ad U stretto pari rispettivamente a +1, +3 e +5 dB(A).

4. Interfaccia con l'utente e con altri programmi

Il seguente diagramma di flusso illustra schematicamente le interazioni fra Citymap e gli altri programmi di calcolo:



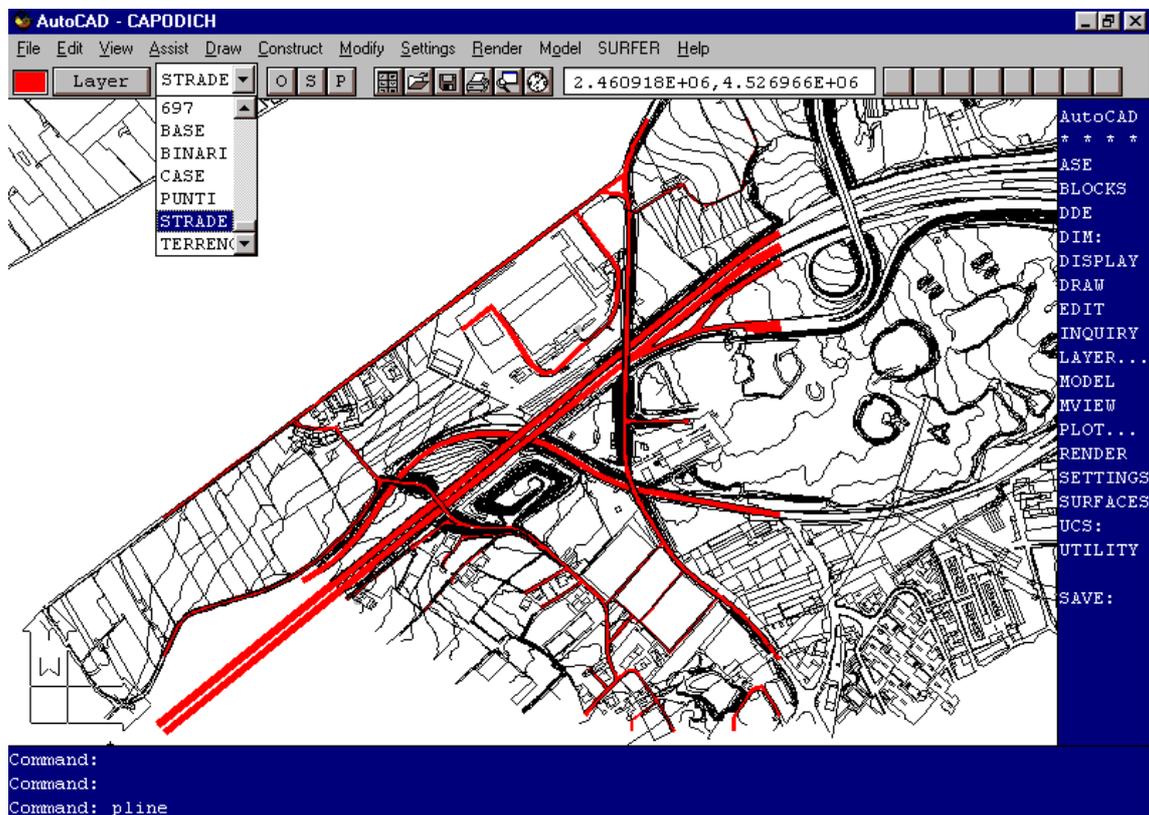
Come si nota numerosi programmi sono chiamati ad interagire: di essi due sono programmi commerciali (Autocad™ e Surfer™), mentre gli altri sono stati realizzati in proprio.

Si parte da Autocad, che serve per tradurre le informazioni cartografiche in un file DXF leggibile da Citymap. All'interno di Citymap, avviene l'introduzione dei dati di traffico stradale e ferroviario, che vengono "agganciati" alle entità geografiche (strade e binari). Si provvede poi al calcolo del Livello Equivalente di Emissione, sulla base dei dati di emissione unitari (SEL) dei veicoli. Si salva infine l'insieme delle informazioni geometriche ed acustiche in un file .CMP (ASCII ed autodocumentato), che può ovviamente venire riletto da Citymap.

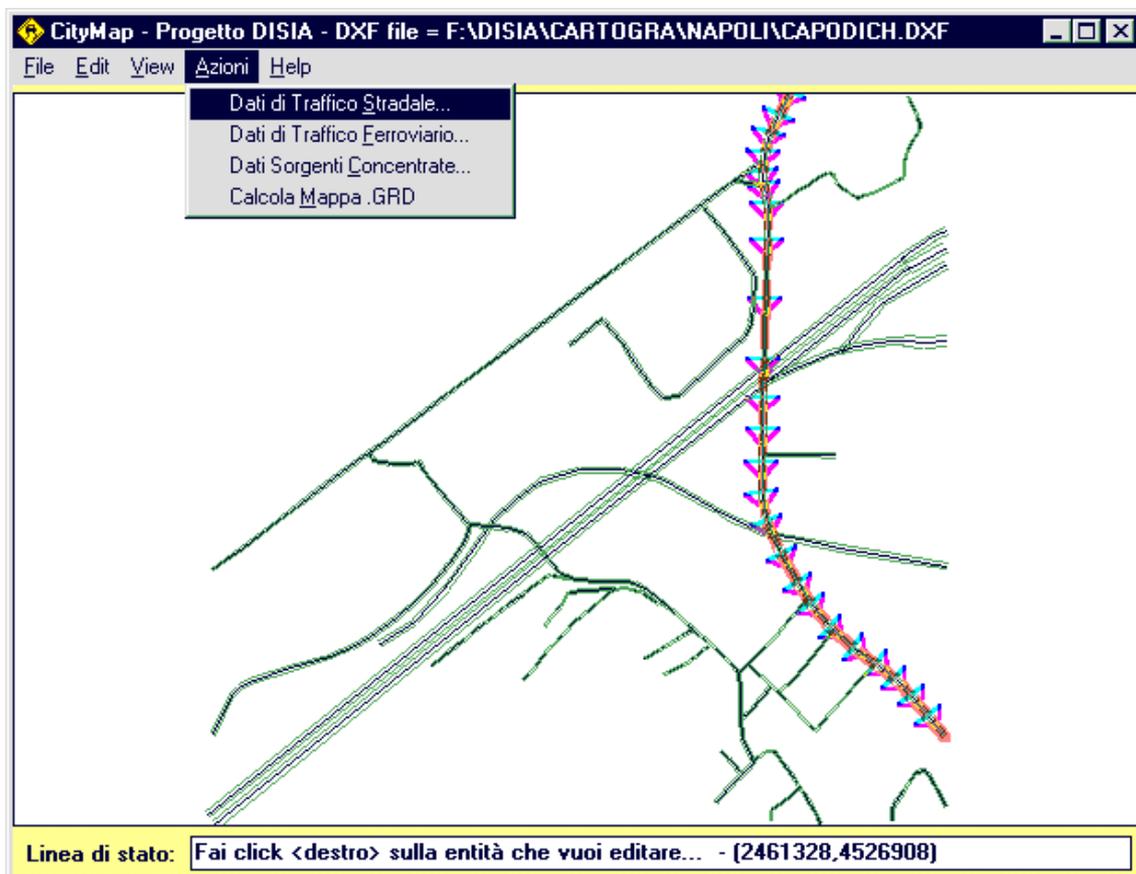
A questo punto, volendo operare un calcolo della mappa del rumore con l'algoritmo semplificato, si impiega ancora Citymap, che produce un file .GRD leggibile da Surfer, e contenente i valori del livello sonoro su una griglia rettangolare equispaziata.

Viene qui di seguito brevemente presentata la sequenza delle operazioni suddette. Innanzitutto si parte dalla rappresentazione digitale della cartografia del sito, in questo caso utilizzando Autocad. All'interno di tale ambiente, occorre organizzare le informazioni contenute nella cartografia digitalizzata affinché esse risultino acusticamente congrue: in particolare le sorgenti sonore (strade e binari) vanno descritte mediante segmenti di polilinea omogenei, ovvero caratterizzati da traffico e caratteristiche morfologiche uniformi. La seguente figura mostra una cartografia digitalizzata con evidenziate le entità di rilevanza acustica, che andranno esportate nel file .DXF.

Viene qui di seguito brevemente presentata la sequenza delle operazioni suddette. Innanzitutto si parte dalla rappresentazione digitale della cartografia del sito, in questo caso utilizzando Autocad. All'interno di tale ambiente, occorre organizzare le informazioni contenute nella cartografia digitalizzata affinché esse risultino acusticamente congrue: in particolare le sorgenti sonore (strade e binari) vanno descritte mediante segmenti di polilinea omogenei, ovvero caratterizzati da traffico e caratteristiche morfologiche uniformi. La seguente figura mostra una cartografia digitalizzata con evidenziate le entità di rilevanza acustica, che andranno esportate nel file .DXF.



Una volta salvate le informazioni geometriche, si lancia il programma Citymap, che consente di rileggerle dal file .DXF. Dopo aver letto il file .DXF, è possibile effettuare l'aggancio dei dati di traffico alle sorgenti di rumore stradale e ferroviario. Per far ciò si può semplicemente "clickare" su ciascuna entità grafica, oppure si attiva una apposita tendina, che provvede ad evidenziare in sequenza i singoli tratti omogenei di strada o di binario, come mostrato dalla seguente figura:



Contemporaneamente appare sullo schermo una seconda finestra, all'interno della quale occorre specificare i dati di flusso relativi al tratto evidenziato. L'aspetto di questa seconda finestra è diverso a seconda che il tratto evidenziato sia una strada oppure un binario, come mostrato dalla figura:

Editazione dati traffico ferroviario

Selezione Tratto Ferroviario

Tratto n. Nome:

Leq,7.5m (G/N) Fisso Calcola

Proprietà

Tipo di Armamento	1-Bin. cont. saldato
hmed edifici lato Sinistro	0
hmed edifici lato Destro	0

Traffico diurno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)	34	450	C1-{0-60 km.}
tr.pass. locali (V2)	44	300	C1-{0-60 km.}
tr.pass. l.perc. (V3)	45	160	C1-{0-60 km.}

Traffico notturno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)	68	600	C1-{0-60 km.}
tr.pass. locali (V2)	6	300	C1-{0-60 km.}
tr.pass. l.perc. (V3)	10	160	C1-{0-60 km.}

Editazione dati traffico stradale

Selezione Tratto Stradale

Tratto n. Nome:

Leq,7.5m (G/N) Fisso Calcola

Proprietà

Tipo di Pavimentazione	1-Asfalto Liscio
Pendenza (% , + -)	0-5%
hmed edifici lato Sinistro	6
hmed edifici lato Destro	0

Traffico diurno complessivo

N.autovetture (V1)	12800	C7-{90-110 km/}
N.camion 2 assi (V2)	1600	C6-{70-90 km/h}
N.camion 3 assi (V3)	640	C6-{70-90 km/h}
N.TIR (V4)	640	C6-{70-90 km/h}
N.motocicli (V5)	640	C7-{90-110 km/}

Traffico notturno complessivo

N.autovetture (V1)	800	C7-{90-110 km/}
N.camion 2 assi (V2)	240	C6-{70-90 km/h}
N.camion 3 assi (V3)	80	C6-{70-90 km/h}
N.TIR (V4)	80	C6-{70-90 km/h}
N.motocicli (V5)	40	C8-> 110 km/h}

Cat.A - Autostrada	Cat.B - Extraurb. princ.
Cat.C - Extraurb. sec.	Cat.D - Urbana scorr.
Cat.E - Urbana quart.	Cat.F - Locale

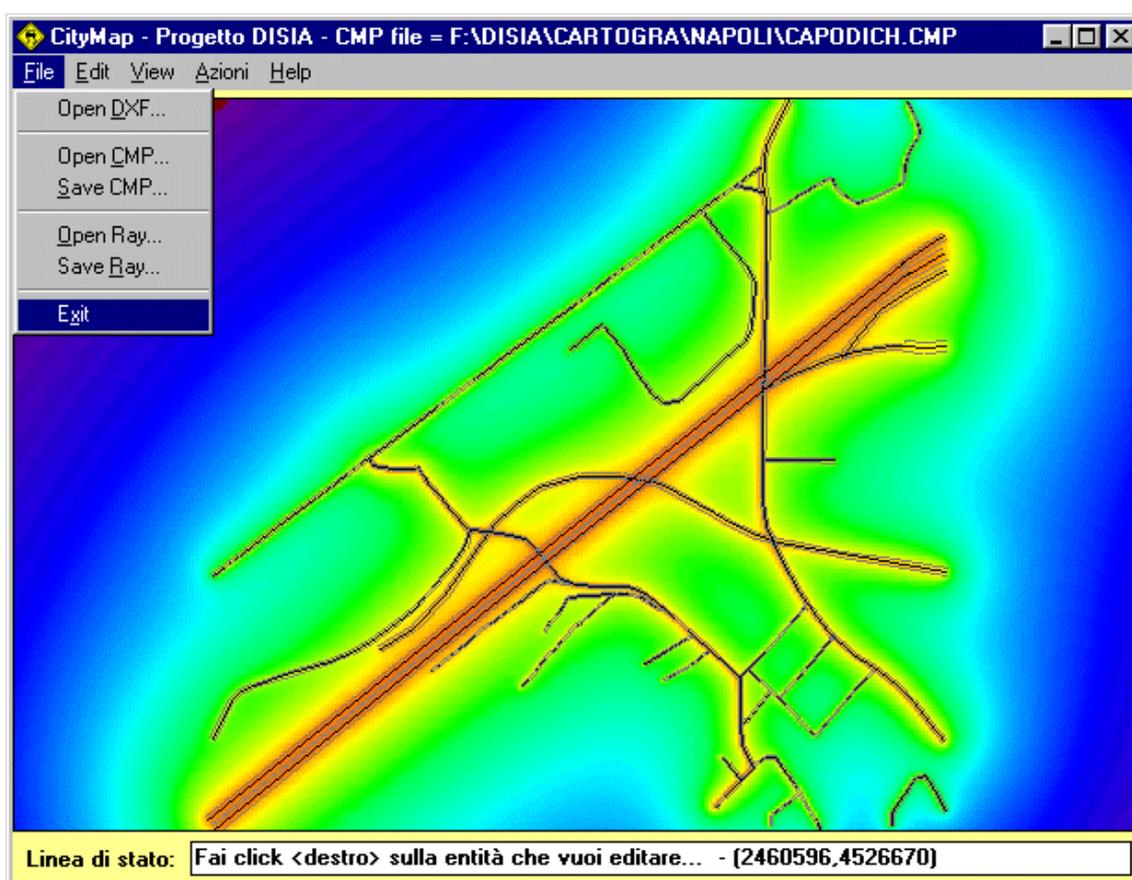
Come si nota, per le strade sono disponibili 6 “bottoni” che impostano automaticamente i dati di traffico “tipici” di 6 diversi tipi di strade. Per le sorgenti lineari di tipo industriale (caso tipico il perimetro di uno stabilimento), è necessario aver preventivamente disegnato un tratto “pseudo-stradale” o “pseudo-ferroviario” 7.5m all'interno del confine dell'area stessa. A tale tratto si assegnerà poi un livello di emissione fisso (non calcolato sulla base di dati traffico), pari al livello sonoro che è stato rilevato sperimentalmente al confine dello stabilimento.

Dopo aver introdotto i dati di traffico di tutte le sorgenti sonore, è possibile salvare l'insieme dei dati geometrici e di emissione in un unico file ASCII autodocumentato, con estensione .CMP, che può poi venire riletto da Citymap stesso.

A questo punto si può effettuare il calcolo della mappatura isolivello; si deve anzitutto visualizzare l'area che interessa mappare, mediante la usuale operazione di “zoom” di un'area rettangolare con il mouse. Poi si lancia il processo di calcolo, specificando il periodo di interesse (diurno o notturno), il nome del file che conterrà la mappatura (in formato .GRD) e la dimensioni della griglia di calcolo, come mostrato dalla seguente figura:

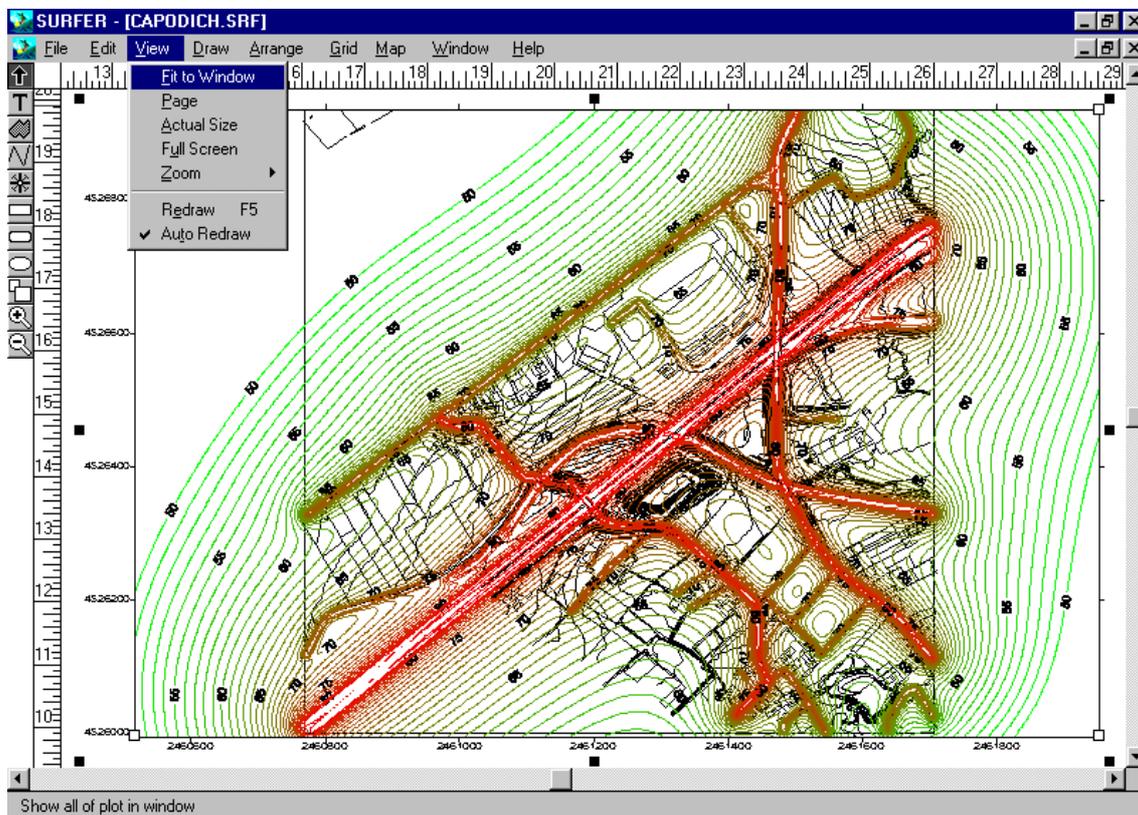


Nel corso del calcolo, il programma provvede a colorare progressivamente l'area mappata, in modo da fornire all'utente un'indicazione sulla frazione del lavoro totale già compiuta. Al termine lo schermo risulta completamente colorato, come mostra la seguente figura:



Questa rappresentazione non costituisce tuttavia il risultato finale del modello, che è invece costituito dal citato file .GRD, contenente in forma numerica il livello sonoro in tutti i punti della griglia di calcolo. Esso viene letto direttamente dal programma di mappatura vettoriale Surfer™, che fornisce la rappresentazione grafica mediante curve isolivello, ed all'interno del quale è estremamente agevole ottenere elaborazioni matematiche. In particolare, operando all'interno di Surfer si può realizzare il confronto fra mappatura acustica del livello sonoro e mappatura dei limiti di legge, oppure direttamente la mappatura dei superamenti dei limiti stessi.

Surfer consente di realizzare mappature sia mediante colorazione dello sfondo, sia mediante tracciamento di curve isolivello: questa forma è quella preferita volendo sovrapporre la mappatura stessa alla cartografia digitalizzata di partenza, come mostrato dalla seguente figura:

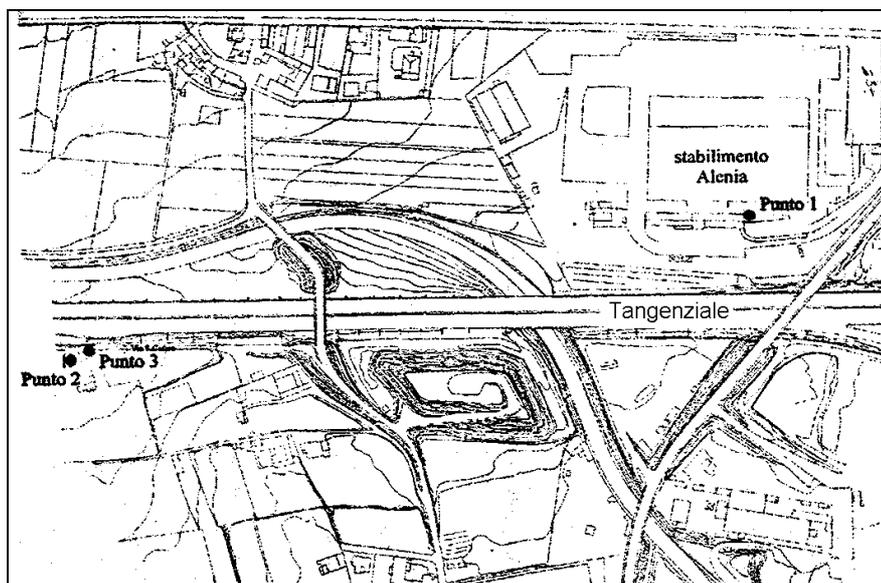


5. Verifiche di taratura del modello

La verifica del corretto funzionamento del modello di calcolo Citymap è stata effettuata per confronto con rilievi sperimentali eseguiti in 4 diversi siti, caratterizzati da condizioni di emissione e propagazione molto diverse. Nei seguenti sottoparagrafi vengono brevemente descritti i risultati conseguiti in ciascuno di essi.

5.1 - Area urbana prospiciente la tangenziale (Napoli Est)

Il sito extraurbano di Napoli comprende la zona circostante l'aeroporto di Capodichino. In particolare è stata modellizzata un'area di lato 950 m circa, comprendente i 3 punti di taratura, dislocati presso lo stabilimento Alenia di Casoria (1) e presso la Massaria Ferrara in Via Selva Cafaro, fronte autostrada (2) e fronte traversa (3).



Alle strade urbane ed extraurbane comprese nell'area esaminata sono stati attribuiti flussi di traffico standardizzati, mentre all'autostrada sono stati associati i dati di traffico forniti dalla Direzione della Tangenziale di Napoli. Per tutte le strade sono poi stati impostati i parametri pendenza inferiore al 5% ed asfalto di tipo liscio. Non sono stati inseriti dati relativi alla presenza di edifici ai lati delle strade.

Il calcolo previsionale è stato effettuato, per la fascia oraria diurna, su una matrice di 300 x 225 punti, ed i risultati rappresentati graficamente mediante l'interpolazione effettuata dal programma SURFER.

Punto n.	1	2	3
L _{eq} sperimentale	68.1	74.2	71.0
L _{eq} calcolato	73	77	74

Dall'esame dei risultati si osserva, in corrispondenza dei punti di taratura, una sovrastima variabile da 3 a 5 dB(A): ciò è imputabile sostanzialmente a queste cause:

1. i dati di traffico attribuiti alla tangenziale sono stati erroneamente raddoppiati (fatto che giustifica un incremento di 3 dB(A) dei livelli di pressione sonora), in quanto si è poi scoperto che la Direzione della Tangenziale intendeva fornire i dati complessivi, mentre nel modello sono stati inseriti per ciascuna direzione di marcia;
2. il modello non tiene conto di informazioni circa l'altimetria del terreno, mentre, in corrispondenza del punto 1 (stabilimento Alenia Casoria), la tangenziale procede ad una quota inferiore a quella del piano di campagna dello stabilimento Alenia, giustificando pertanto una sovrastima quantificabile in 1 - 2 dB(A).
3. Il livello stimato in corrispondenza del punto 3 è influenzato dall'assenza dell'effetto schermante delle abitazioni, che in questo contesto non sono state prese in considerazione.

5.2 Area urbana prospiciente via Foria (Napoli)

La modellizzazione dell'area urbana di Napoli interessa i quartieri che costeggiano Via Foria, nel tratto compreso fra il Museo Nazionale e l'Albergo dei Poveri.



La zona esaminata si estende all'interno di un perimetro di dimensioni 850 x 1150 m comprendendo le 3 posizioni di misura nelle quali sono stati effettuati i rilevamenti fonometrici finalizzati alla taratura del modello.

Sia alla Via Foria (punti 1 e 2) che alla Via Duomo (punto 3) sono stati attribuiti i dati di traffico stradale rilevati in loco, mentre per le restanti strade sono stati definiti flussi di traffico standardizzati. A tutte le strade comprese nell'area esaminata sono stati attribuiti pendenza inferiore al 5%, asfalto tipo pavè e presenza di edifici di altezza media 15 m su entrambi i lati.

La modellizzazione è stata lanciata, sempre relativamente al periodo diurno, con una griglia di 300 x 225 punti.

Punto n.	1	2	3
L _{eq} sperimentale	64.3	68.1	71.3
L _{eq} calcolato	61	68	69

La mappa acustica risultante si presenta con un "affollamento" di curve isolivello lungo le strade, causato dalla presenza di edifici alti sui lati delle stesse, con rilevante effetto schermante verso le zone circostanti (cioè rispetto ai ricevitori collocati "dentro" i blocchi edificati). La discrepanza fra i valori calcolati e quelli rilevati, in punti situati in facciata agli edifici, è contenuta entro i 3 dB(A): è riscontrabile, infatti, una sottostima dei livelli da parte del modello. Tale sottostima è probabilmente legata al fatto che il modello considera in modo molto semplicistico l'effetto delle riflessioni multiple.

5.3 - Area urbana prospiciente Via F.lli Bandiera di Mestre

Il sito di Mestre - Via Fratelli Bandiera è stato modellizzato prendendo in considerazione un'area di forma quadrata avente il lato di circa 800 m, centrata sulla postazione di misura nella quale sono stati effettuati i rilevamenti fonometrici di taratura.

Benché livelli di pressione sonora rilevati nel punto di taratura siano in massima parte imputabili al flusso veicolare esistente sulla Via Fratelli Bandiera e sulla via in essa confluyente poco più a Nord, per completezza di studio sono state inserite nel modello tutte le strade esistenti nell'area esaminata.

In mancanza di dati relativi al sito in esame, a ciascuna delle strade sono stati associati flussi di traffico standardizzati, differenziati a seconda del tipo di strada (urbana di scorrimento, urbana di quartiere, locale), pendenze inferiori al 5%, asfalto liscio.

Per quanto riguarda la presenza di edifici ai lati delle strade stesse, ai fini della presente validazione, sono state create due differenti configurazioni: nella prima è stata dichiarata la presenza di edifici con altezza media pari a 10 m su ambo i lati, mentre nella seconda non sono stati dichiarati edifici, e quindi simulando un campo aperto.

Il modello è stato quindi lanciato su ciascuna delle due configurazioni (con e senza edifici), solamente con riferimento alla fascia oraria diurna, adottando un reticolo di 500 x 380 punti.

Punto n.	1	2	3
L_{eq} sperimentale	66.1	68.2	64.3
L_{eq} calcolato (config. 1)	67	70	66
L_{eq} calcolato (config. 2)	63	64	61

Poiché i livelli di pressione sonora indicati dal modello sono riferiti all'intero periodo considerato, i livelli equivalenti di pressione sonora misurati in situ con cadenza oraria fra le ore 6 e le 22, sono stati mediati al fine di ottenere un valore globale diurno.

Il confronto fra quest'ultimo e quello calcolato dal modello in corrispondenza del punto di taratura consente di formulare le seguenti considerazioni:

1. per quanto riguarda la configurazione con edifici, si riscontra, in corrispondenza del punto di taratura, una sostanziale corrispondenza fra i valori calcolati e quelli rilevati: le differenze, tenendo pure conto dell'incertezza della lettura sul grafico, sono contenute entro 1 dB(A); come già osservato per il sito di Napoli - Via Foria, un "affollamento" delle curve isolivello in prossimità del margine della strada, e pertanto l'incertezza di lettura aumenta.
2. per la configurazione senza edifici, la situazione di campo libero giustifica la sottostima dei livelli.

5.4 Sito di Mestre - Via Trieste

Il sito di Mestre - Via Trieste è stato modellizzato prendendo in considerazione non solo l'area circostante il punto di taratura di via Trieste interessato da traffico veicolare (punto1), ma anche i 3 punti di taratura in area ferroviaria (1° e 2° posto movimento e cabina B. rispettivamente punti 2,3,4)). L'area di modellizzazione è pertanto costituita da un rettangolo avente lati rispettivamente pari a 2500 m e 1100 m circa.

Anche in questo caso, come nel precedente, sono state prese in considerazione tutte le strade presenti nell'area. Ad esse sono stati attribuiti dati di traffico standardizzati a seconda della tipologia di strada (urbana di scorrimento, urbana di quartiere, locale, extraurbana principale, extraurbana secondaria). A tutte le strade è stata attribuita pendenza inferiore al 5%, asfalto liscio ed assenza di edifici ai lati. Quest'ultima scelta, benché non rispecchi la realtà, almeno per una parte dell'area in esame, è stata ritenuta la più idonea allo studio in esame: infatti, pur trattandosi di un modello di taratura, per cui sarebbe auspicabile rispettare il più possibile la realtà del sito, la lettura dei valori del livello sonoro in prossimità delle facciate degli edifici risulterebbe molto più difficoltosa a causa dell'"affollamento" delle linee isolivello allorché le facciate stesse vengano dichiarate..

Alle 3 vie di corsa della ferrovia sono stati attribuiti dati di traffico mediati sui rilevamenti eseguiti. Non sono stati presi in considerazione i binari costituenti il fascio di smistamento, né quelli relativi al deposito locomotive.

Il modello è stato quindi lanciato, solamente con riferimento alla fascia oraria diurna, adottando un reticolo di 250 x 190 punti.

Punto n.	1	2	3	4
L_{eq} sperimentale	66.2	60.1	68.3	67.9
L_{eq} calcolato	68	62	67	67

Dall'esame dei risultati, è possibile osservare una sostanziale corrispondenza dei livelli di pressione sonora rilevati in situ e di quelli calcolati dal modello, con uno scarto inferiore ai 2 dB(A).

6. Esempio di applicazione

Anche l'esempio di applicazione, così come due dei casi utilizzati per la verifica di taratura del modello, trae origine dallo studio della città di Mestre. In questo caso è stata studiata la zona di Via Puglie, che comprende uno dei punti di taratura illustrati al precedente paragrafo 5.4, ed in particolare il punto situato presso il 1° Posto Movimento della linea ferroviaria.

E' stata utilizzata in questo caso la cartografia digitalizzata disponibile, sulla quale sono state disegnate sull'apposito *layer STRADE* le *polyline* che descrivono i singoli tratti stradali dell'intera maglia urbana.

A tali entità geometriche sono poi stati agganciati i dati di traffico stradale e ferroviario, disponibili da conteggi eseguiti in questa zona. Per le strade secondarie, di cui non erano disponibili i dati di traffico, sono stati assunti i dati "tipici" previsti dal modello in funzione del tipo di strada.

Per i dati di traffico ferroviario sono stati impiegati i valori di movimento giornaliero forniti dalle F.S., distribuendoli uniformemente sui fasci di binari.

E' stata eseguita la mappatura isolivello di un'area praticamente quadrata, avente lato di circa 1000m.

La mappatura isolivello è stata sovrapposta alla cartografia digitalizzata di partenza, impiegando il programma Surfer. In tal modo è stata ottenuta la rappresentazione grafica riportata nella pagina successiva.

Sulla stessa è visibile in fotografia anche la posizione del punto di rilievo, la cui posizione è evidenziata sulla planimetria, nonchè il valore di livello sonoro equivalente del periodo diurno rilevato sperimentalmente in tale punto.

Taratura del modello di simulazione numerica per la pianificazione del territorio urbano



Punto: P1

**Città di Mestre
via Puglie
1° posto movimento**

**Rilievi fonometrici
dal martedì 19/5/95
al sabato 30/5/95**

**Livello equivalente medio
rilevato: Leq = 73.2 dB(A)**



RESTITUZIONE GRAFICA DEI LIVELLI SONORI SUL TERRITORIO

7. Conclusioni

Nella memoria è stato presentato un nuovo programma di calcolo, funzionante in ambiente MS Windows, in grado di effettuare la costruzione della mappa del livello sonoro in una area molto vasta di territorio urbano.

La principale peculiarità del modello numerico implementato è quella di essere basato su dettagliati rilievi delle emissioni sonore delle sorgenti, che hanno consentito la creazione di un data-base di emissione separato dal programma e continuamente aggiornabile. In questo modo i livelli di emissione, qui intesi come livelli equivalenti a 7.5m dalla sorgente, possono venire tarati sulla base di ulteriori campagne di rilievo sperimentale. Lo stesso può dirsi per i termini di correzione che tengono conto della pendenza della strada e del tipo di pavimentazione stradale, oppure del tipo di armamento ferroviario.

Un altro notevole pregio del programma è il fatto di integrare in unico sistema di calcolo la gestione del rumore prodotto dal traffico stradale, da quello ferroviario e dalle sorgenti fisse di tipo industriale.

Il programma interagisce utilmente con altri programmi di calcolo sotto Windows: in particolare viene importata la geometria del sito da studiare da una cartografia digitalizzata in formato .DXF, ed i risultati del calcolo sono resi disponibili per ulteriori elaborazioni grafiche nei formati .DXF e .WMF. Inoltre i valori dei livelli sonori sono salvati in un file ASCII (.GRD), che consente di operare facilmente post-elaborazioni e confronti sui dati stessi.

E' convinzione degli autori che la disponibilità di programmi per la mappatura acustica del territorio sia di grande utilità sia per gli studi relativi alle procedure di zonizzazione acustica, sia per l'individuazione delle aree in cui realizzare piani di bonifica acustica. L'impiego del modello di calcolo numerico consente infatti di ridurre di almeno un ordine di grandezza il numero dei rilievi sperimentali della rumorosità ambientale, con conseguente drastica riduzione dei tempi e dei costi dell'indagine. Inoltre consente di valutare rapidamente gli effetti di proposte modifiche ai flussi di traffico stradale o ferroviario, oppure di interventi edilizi o di inserimento di ostacoli alla propagazione del rumore.

Ovviamente per la progettazione dettagliata delle opere di bonifica risulta più idoneo l'impiego di un modello di calcolo più sofisticato, quale quello sviluppato dagli autori in parallelo a quello qui presentato [2]. Tuttavia è evidente come sia improponibile l'impiego di un modello di dettaglio per l'esecuzione della mappatura acustica di una intera città, e questo non solo per i tempi di calcolo proibitivi, ma soprattutto per la mole considerevolmente superiore di dati in ingresso richiesti dai modelli più raffinati.

Pertanto il modello proposto, pur adottando algoritmi molto semplificati per il calcolo della propagazione del suono, consente di ottenere con ragionevole accuratezza la mappatura di aree molto vaste, comprendenti centinaia di migliaia di punti di calcolo del livello sonoro, senza richiedere nè lunghi tempi di calcolo, nè il reperimento di molte informazioni.

8. Bibliografia

- [1] Pompoli R., Farina A., Fausti P., Bassanino M., Invernizzi S., Menini L., "Intercomparison of traffic noise computer simulations", in: atti del XXIII Convegno Nazionale AIA - 18th International Congress for Noise Abatement AICB, Bologna, 12-14 settembre 1995, supplemento, p.523-559.
- [2] Farina A., Brero G. - "Modello numerico basato su rilievi sperimentali per la progettazione di dettaglio delle opere di bonifica acustica in area urbana" - Atti del Convegno NOISE & PLANNING '96 - Pisa, 29-31 maggio 1996.