

ANALISI E MONITORAGGIO DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO ATTRAVERSO IL 3D CITY MODEL

P. Celani¹, G. Mazzei², R. Falcone³

¹ Università della Calabria – Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale

² Università della Calabria

³ Università della Calabria - Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica

1. Introduzione

All'interno delle nostre città, il problema legato alla propagazione delle vibrazioni ambientali va assumendo un'importanza sempre maggiore a causa sia dell'incremento di mezzi pesanti in circolazione sulle strade sia della realizzazione di nuove infrastrutture. Le principali cause d'impatto ambientale nell'esercizio dei sistemi di trasporto terrestre, stradali e ferroviari, sono il rumore e le vibrazioni. Il rumore provocato dalle autovetture costituisce uno dei principali fenomeni inquinanti incidendo dell'83% sull'impatto acustico, con gravi ripercussioni sull'ambiente.

L'inquinamento acustico è di fatto un problema non solo per gli ecosistemi, ma anche per la salute umana in quanto arreca disturbo al sonno e al normale svolgersi delle attività quotidiane e provoca una maggiore incidenza di alcune malattie quali infarti, ictus, problemi cardiovascolari, etc.

Dal rapporto *Noise in Europe 2014*¹ si evince infatti che:

- 125 milioni di persone sono esposte a livelli superiori a 55 dB
- 10.000 casi di morte prematura in Europa
- 20 milioni di adulti risultano disturbati dal rumore
- 8 milioni subiscono effetti di disturbo del sonno
- 900.000 casi di ipertensione

Un ulteriore studio dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e del Joint Research Centre della Commissione europea² indica che il rumore dovuto al traffico è responsabile annualmente della perdita di oltre un milione di anni di "vita in buona salute" negli Stati membri dell'Unione Europea e in altri Paesi dell'Europa occidentale e, secondo l'OMS, il rumore ambientale costituisce la seconda causa di effetti avversi sulla salute dopo l'inquinamento atmosferico da polveri fini.

Appare dunque evidente la necessità di tenere in considerazione questo fenomeno sia nelle attività di gestione delle strutture di trasporto esistenti, sia nell'ambito della progettazione preliminare di nuove strutture. A questo proposito si evidenzia all'interno del quadro normativo nazionale la legge 26 ottobre 1995, N.447, *Legge quadro sull'inquinamento acustico*, che imponendo ai Comuni l'adozione di piani di risanamento acustico in caso di superamento dei valori limite, ha segnato una vera propria svolta per la prevenzione e la tutela dell'ambiente e delle persone, prevedendo la possibilità di ricorrere ad interventi di mitigazione di tipo passivo, come ad esempio l'installazione di barriere antirumore.

2. Il caso studio della città di Cosenza

Lo studio effettuato nel Comune di Cosenza prevede la possibilità di simulare la propagazione delle onde sonore individuando, in un modello tridimensionale georeferenziato della città, i punti maggiormente colpiti da queste ultime e studiando ogni edificio come ricettore di rumore (specificandone i livelli assorbiti dalla base fino alla linea di gronda).

L'area presa in esame è situata nel centro urbano della città e presenta come asse principale Viale Mancini. Quest'area è delimitata da strade di tipo D (urbana di scorrimento) e da strade a carreggiate separate e interquartiere (fig.1), secondo quanto stabilito ai fini acustici dal Codice della Strada.

¹ <http://www.eea.europa.eu/publications/noise-in-europe-2014>

² http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf



Fig. 1 – Zona d'intervento

Il DPR 142/04 stabilisce, per tale tipologia di strade, i valori limite assoluti d'immissione nella fascia di pertinenza acustica³ pari a 70 dBA nel periodo diurno e 60 dB(A) nel periodo notturno per tutti i ricettori diversi da scuole, ospedali, case di cura e di riposo per i quali si osservano limiti, rispettivamente, di 50 e 40 dBA. Al fine di verificare i livelli di rumorosità provocati dal traffico veicolare transitante sulle strade considerate, sono stati utilizzati i dati inerenti al flusso veicolare presente nelle sezioni stradali studiate, messi a disposizione da un precedente monitoraggio effettuato dalla Sezione Trasporti del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università della Calabria.

3. Metodologia

Nella realizzazione del modello 3D di Cosenza, resa possibile attraverso l'utilizzo del software City Engine⁴, si è raggiunto un livello di dettaglio LOD3, in cui oltre all'andamento altimetrico del terreno, si hanno gli edifici tridimensionali con dettagli delle facciate e delle coperture.

Nella realizzazione di un modello tridimensionale urbano complesso sono stati necessari elementi di modellazione procedurale che hanno consentito, a valle di un lavoro di pianificazione, di automatizzare la realizzazione di geometrie complesse come intere parti della città (fig. 2).

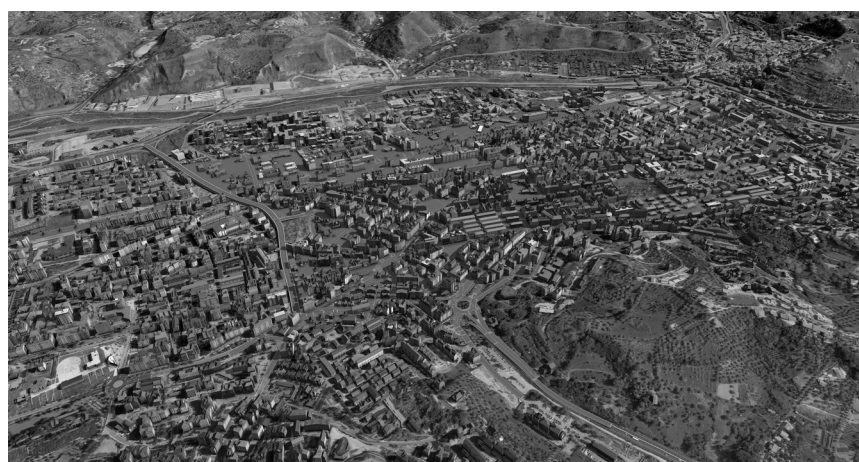


Fig. 2 – Il 3D City Model di Cosenza

³ Per zona di pertinenza acustica si intende la striscia di terreno misurata in proiezione orizzontale, per ciascun lato dell'infrastruttura, a partire dal confine stradale, per la quale il presente decreto stabilisce i limiti di immissione del rumore. Nel caso specifico questo valore è pari a 100 m.

⁴ City Engine è un software della ESRI che permette la creazione di ambienti urbani virtuali in 3D attraverso tecniche di modellazione procedurale.

Al 3D City Model, strumento demandato allo studio dei complessi livelli di informazioni disponibili oggi per un oggetto eterogeneo e dinamico come l'ambiente urbano, è possibile associare i dati provenienti da sistemi di sensori e database informativi disponibili.

Attraverso il modello tridimensionale dell'intero sistema urbano della città di Cosenza, quindi, è stato possibile implementare un sistema di analisi e simulazione inserendo i dati relativi all'inquinamento acustico causato dai mezzi di trasporto.

Per il calcolo dell'inquinamento acustico si è utilizzato il *modello di Burgess (Australia)*. Questo modello previsionale macroscopico tiene conto di parametri caratterizzanti il traffico veicolare (veicoli/ora, composizione del traffico), nonché della distanza tra le sorgenti del rumore e i recettori.

La formula che consente la stima del Leq^5 orario è ottenuta con un coefficiente di correlazione multiplo di 0.95 e un errore standard di 1.5 dB(A):

$$Leq = 55,5 + 10,2 \log Q + 0,3 p - 19,3 \log d$$

dove “ Q ” è il numero di veicoli/ora, “ p ” è la percentuale di veicoli pesanti e “ d ” è la distanza in metri tra il centro della carreggiata e il punto di osservazione, posto sul ciglio della carreggiata stessa.

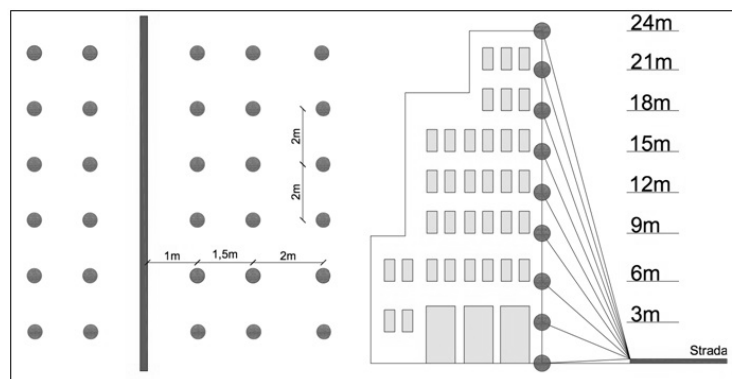


Fig. 3 – Distanza dalla fonte ai ricettori in pianta e in alzata

Il modello descritto è stato applicato all'area di studio effettuando delle simulazioni sulla base dei dati geometrici delle sezioni stradali, delle portate veicolari e delle caratteristiche dei veicoli riscontrate durante gli intervalli di misura in sito.

Estrapolati i flussi stradali “ Q ”[v/h] su più di 120 archi stradali, sono stati associati a questi ultimi le percentuali di veicoli pesanti con un intervallo da 3% a 6% in base al tipo di strada e al tipo di collegamento e dai calcoli effettuati si evince un valore massimo di 83,80791 dB ed un valore minimo di 63,98808 dB. Questi valori rappresentano l'intervallo del livello di rumore in decibel riguardanti la zona considerata.



Fig. 4 – Rappresentazione bidimensionale dei livelli di rumore delle strade del centro urbano di Cosenza

⁵ Leq - livello sonoro equivalente.

4. La visualizzazione 3D della mappa acustica

La rappresentazione bidimensionale del rumore calcolato sulle strade è stata realizzata utilizzando ArcGIS assegnando agli archi stradali presi in esame il livello di rumore computato con il modello di Burgess.

Tramite 3D Analyst⁶ è stato possibile mettere in relazione i livelli di inquinamento acustico di ogni strada, ottenendo così una mappa del rumore dettagliata (fig. 5). In particolare è stata utilizzata la funzione *Interpolation IDW* che permette al software di interpolare gli assi stradali in funzione del livello di rumore. Inoltre è stato possibile considerare e verificare l'impedimento della propagazione del rumore provocato da ogni edificio considerandolo una vera e propria barriera acustica.



Fig. 5 – Mappa acustica della città di Cosenza

Sovrapponendo la mappa acustica al 3D City Model è possibile individuare facilmente le zone con un livello acustico superiore ai valori consentiti dalla normativa. La possibilità di dialogo tra i due strumenti rende possibile una visione complessiva della problematica facilitandone quindi le azioni messe in atto per contrastarla.

Sfruttando la versatilità del modello tridimensionale della città è stato possibile simulare la propagazione del livello d'inquinamento acustico anche sugli edifici, che diventano veri e propri recettori. Sulla superficie, infatti, si possono misurare i livelli inquinanti in funzione della distanza dalla fonte rumorosa ottenendo differenti risultati alla base dell'edificio ed alla linea di gronda.

Il modello di Burgess utilizzato, nel nostro caso, presenta dei termini noti e una sola variabile ovvero la distanza dalla fonte di rumore. L'altezza di ogni edificio diventa, di conseguenza, il fattore principale per la determinazione del livello acustico a qualsiasi livello di altezza.

A tale scopo l'operazione più importante nella modellazione del rumore 3D risulta essere la generazione di punti di osservazione in altezza, che rappresentano dei microfoni virtuali, tramite i quali vengono calcolati i livelli di inquinamento acustico per ogni punto.

Per i punti alla base degli edifici si è assegnato il valore del rumore corrispondente al singolo pixel della mappa acustica e al ricettore ricadente su esso. Questa operazione è stata eseguita con 3D Analyst in particolare con la funzione *Extract values to point*. Per lo sviluppo in altezza dei fabbricati, non è possibile procedere nello stesso modo in quanto tutti i punti al di sopra del perimetro di base presentano una distanza maggiore dalla fonte di rumore e, di conseguenza, presentano un livello di inquinamento acustico diverso in funzione dell'altezza dell'edificio (fig. 6). Utilizzando 3D Analyst è stato possibile individuare la distanza "*d*" di ogni punto di osservazione dalla fonte "*Q*". Applicando nuovamente il modello di Burgess con le nuove distanze si è assegnato ad ogni ricettore il livello di rumore in funzione della loro distanza dalla fonte e, quindi, in funzione dell'altezza di ogni edificio (fig. 7).

⁶ 3D Analyst è un'estensione di ArcGIS che permette creare, visualizzare e analizzare dati GIS in un contesto tridimensionale.

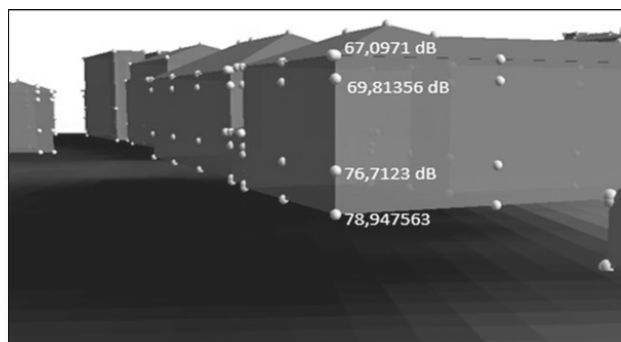


Fig. 6 – Valori Leq ai vertici

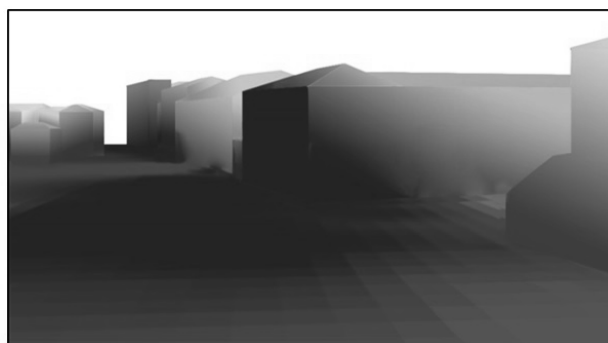


Fig. 7 – Rappresentazione grafica dell'interpolazione del livello acustico tridimensionale sugli edifici

Con ArcScene⁷, è stato possibile effettuare le operazioni precedenti per tutti i punti e, successivamente, interpolando quest'ultimi si è ottenuta una mappatura che rappresenta l'inquinamento acustico su ogni piano degli edifici presenti nell'area (fig. 8).



Fig. 8 – Rappresentazione grafica dell'implementazione del 3d City Model con mappa acustica tridimensionale

5. L'introduzione di un nuovo sistema di trasporto: la metrotramvia

Il modello descritto può essere verificato aggiungendo alle condizioni al contorno un'ulteriore variabile, che va a modificare il contesto di riferimento: l'inserimento di una metrotramvia che collega il comune di Cosenza, il comune di Rende e l'Università della Calabria.

Sono state analizzate in particolar modo le zone maggiormente colpite da livelli di rumore superiori ai limiti consentiti dalla legge e attraversate dal tracciato della metrotramvia (fig.9):

- Viale Giacomo Mancini, che presenta un valore medio di rumore pari a $Leq = 81,87$ dB;
- Via Cesare Baccelli, con un valore medio di rumore pari a $Leq = 78,33$ dB;
- Piazza Giacomo Mancini, con un valore medio di rumore pari a $Leq = 79,95$ dB;
- l'intersezione tra Corso Umberto I e Via Sertorio Quattromani con un valore medio di rumore pari a $Leq = 78,29$ dB.

⁷ ArcScene è l'applicazione del sistema ArcGis che permette di visualizzare l'informazione geografica in tre dimensioni

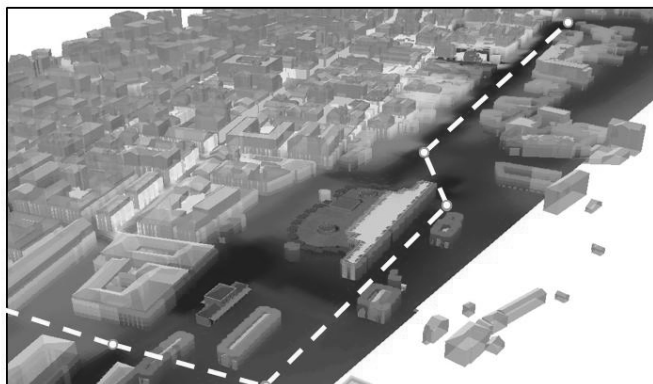


Fig. 9 – Mappa acustica all'interno del 3d City Model con indicazione della linea tranviaria

Prendendo in considerazione viale Giacomo Mancini, si sono calcolati i nuovi livelli di inquinamento acustico relativi a questo specifico tratto stradale dopo l'inserimento della metrotranvia. Con il progetto della linea tranviaria la sezione stradale risulta modificata, con l'inserimento di un doppio binario in affiancamento al parterre pedonale, e privata al contempo di una corsia, riducendo così il flusso veicolare (fig. 10).



Fig. 10 – Sezione tipo di progetto viale Giacomo Mancini

Sul piano acustico, in seguito alle modifiche apportate, si riscontra una diminuzione del 50 % del flusso veicolare “ Q ”, che da 3270 v/h passa a 2788 v/h producendo un livello acustico pari a $Leq1 = 78,5340$ dB. A questi valori relativi al rumore, provocati dal solo traffico veicolare, è necessario aggiungere il rumore che provocherebbe l'ipotetico passaggio della metrotranvia. Consultando le schede tecniche disponibili sul sito della CAF - Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles⁸ e, in particolare, i dati relativi alla famiglia dei rotabili URBOS, scelti nel progetto, è stato possibile individuare il livello di rumore emesso da tali sistemi di trasporto a rotaie, pari a $Leq2 = 79$ dB. Al fine di caratterizzare correttamente l'emissione sonora da parte dei tram Urbos 100, è stato impiegato un modello matematico in grado di descrivere l'intero profilo temporale di un transito: il *modello di Cato*.

L'utilizzo di questo modello è indicato al fine di ricostruire il profilo temporale del livello sonoro durante un transito sfruttando le caratteristiche geometriche (lunghezza del convoglio, velocità di transito, distanza del microfono), e la caratteristica direttiva dell'emissione tipica delle sorgenti sonore correlate con il contatto ruota-rotaia. All'interno del modello originale sono però presenti costanti di taratura valide per la simulazione dei valori assoluti di emissione di treni lunghi e veloci, non adatte alla descrizione del rumore prodotto da tram in esercizio urbano, che dunque verranno trascurate. La relazione matematica che fornisce il profilo temporale secondo *Cato* è la seguente:

⁸ www.caf.net

$$L = K - 10 * \lg(l) + 10 * \lg \left\{ \frac{l}{a} \left[a * \frac{b+l}{(a^2 + (b+l)^2)} - a * \frac{b}{a^2 + b^2} + \tan^{-1} \left(\frac{b+l}{a} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \right] \right\}$$

in cui compaiono i parametri adimensionali a (distanza adimensionale del ricettore: $a=d/l$) e b (posizione adimensionale del convoglio: $b=x/l$). Entrambe le grandezze sono adimensionalizzate con riferimento alla lunghezza l del convoglio. La posizione adimensionale b può anche essere intesa come tempo adimensionale, nota che sia la velocità v del convoglio:

$$x = v * t \quad b = x/l = v * t/l$$

Considerando come dati di input: $l=20m$, $d=7,5m$, $V=40 km/h$, $v=11,11m/s$ ed utilizzando la costante K di Cato per treni elettrici veloci pari a

$$K = 42 * \lg(v) + 34,86 \text{ dB}$$

si ottiene un profilo con un valore massimo raggiunto pari a 74.8 dB(A), mentre il valore dichiarato per il tram URBOS è di 79 dB(A).

E' stato pertanto necessario "ricalibrare" il valore della costante di taratura K contenuta nel modello di Cato. Tale ricalibrazione ha portato a stimare come ottimali la seguente espressione:

$$K = 29 * \lg(v) + 50,6 \text{ dB}$$

Per ottenere il Leq relativo al passaggio di un tram è stato necessario distribuire il SEL su una ora, poiché il *Single Event Line* rappresenta il livello sonoro della durata di un secondo.

$$Leq(tram) = SEL - 10 * \log(3600) = 86,52 - 10 * \log(3600) = 51,64 \text{ dB}$$

Dalle schede informative sul progetto della metrotranvia si è potuto stabilire il numero dei tram transitati in un'ora che, considerando il doppio binario, è pari a 24 tram/ora.

$$Leq(24tram) = Led(1tram) + 10 * \log(24) = 65,542 \text{ dB}$$

Effettuando una sovrapposizione degli effetti, tenendo conto sia della sorgente del traffico veicolare e sia del rumore prodotto della linea tranviaria si è ottenuto il nuovo livello di rumore relativo a viale Giacomo Mancini.

$$Leq_{tot} = Leq_1 + Leq_m = 10 \log_{10}(10^{(Leq_1/10)} + 10^{(Leq_m/10)}) = 78,74 \text{ dB}$$

Nel caso specifico, nonostante ci sia una diminuzione del livello di rumore, da 81,87dB a 78,74dB il valore ottenuto supera la soglia consentita. Appare chiaro come in questo segmento di viale l'inserimento della metrotranvia, nonostante provochi una diminuzione del traffico su gomma, non risulta sufficiente per l'abbassamento del livello acustico sotto i limiti previsti dalla legge.

Inserendo nel 3D City Model di Cosenza il valore di rumore ottenuto, si può rappresentare e valutare il nuovo scenario d'inquinamento acustico dovuto alla nuova sezione stradale, arricchita dalla metrotranvia, e le relative conseguenze sui fabbricati circostanti, rendendo così possibile una previsione di intervento.

6. Conclusioni

Rappresentare e simulare diversi scenari rende possibile una previsione accurata delle future condizioni ambientali permettendo la valutazione di diverse alternative tecniche e consentendo una progettazione più consapevole. Nello specifico, il modello digitale della città di Cosenza ha svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo di varie ipotesi di progetto, permettendo di rappresentare e simulare differenti scenari.

La rappresentazione degli interventi all'interno del 3D City Model, ha confermato l'importanza di tale strumento per ottenere, mediante un approccio scientifico e non meramente figurativo, una percezione degli spazi differente. La possibilità di interrogare il modello rende possibile la prevenzione in materia di inquinamento acustico e rappresenta un valido strumento di supporto alla redazione di piani di risanamento necessari in alcune realtà urbane, ma è utilizzabile anche per valutare gli effetti di altri

inquinanti all'interno di differenti scenari. Questa possibilità rende flessibile l'utilizzo del modello e lo rende adattabile a differenti realtà.

Il 3D city Model di Cosenza è infatti uno strumento interattivo e dinamico, tramite la cui visualizzazione tridimensionale è possibile pianificare e progettare in modo strategico.

Bibliografia

Adami A. e Guerra F., 2013, *Modelli 3D della città e del territorio: uno strumento per analisi urbane e territoriali*, Università IUAV di Venezia.

Agugiario G., 2014, *I modelli digitali 3D di città come hub informativo per simulazioni, energetiche a scala urbana*, ASITA 2014, Federazione ASITA, Firenze.

Biljecki Ir. F., 2013, *The concept of level of detail in 3D city models*, Section GIS technology OTB Research Institute for the Built Environment TU, Ed. Delft.

Borga G., 2013, *City Sensing. Approcci, metodi e tecnologie innovative per la Città Intelligente*, Franco Angeli, Milano.

Bretoni D. e A.Franchini, 1997, *Metodi di Previsione del Rumore da Traffico*. Lezione tenuta presso la Scuola di Acustica dell'Università di Ferrara nell'A.A. 1997-98.

Celani P., Bozzo V. e Mazzei G., 3D City Model Cosenza: un modello urbano avanzato per la gestione della città, Atti della Conferenza ESRI Italia 2016, 20-21 aprile 2016, Roma, Italia.

D'Alessandro E. e Celani P., 2016, "*Il 3D City Model come strumento avanzato di pianificazione e partecipazione*", *Reds2ALPS 2016*, Università di Trento, Trento.

Dipartimento di Pianificazione Territoriale, 2002, *Piano generale del traffico urbano, Comune di Cosenza*, Università degli studi della Calabria.

European Environment Agency, 2014, *Noise in Europe 2014*, EEA Report No 10/2014, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2800/763331.

World Health Organization e JRC European Commission, 2011, *Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization - Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.