

STUDIO SULL'INQUINAMENTO DA TRAFFICO AUTOVEICOLARE NELL'AREA URBANA DI MODENA

Stefano Zauli Sajani, Paolo Lauriola
del Centro per la Prevenzione dei Danni Ambientali e Sanitari da Traffico
ARPA Emilia Romagna

Daniele Bertoni, Daniela Campolieti,
del Comune di Modena, Settore Risorse e Tutela Ambientale

Stefano Forti, Daniela Sesti
della Sezione Provinciale di Modena - ARPA Emilia Romagna

Introduzione

Vengono qui presentati i risultati di uno studio sull'inquinamento da traffico nell'area urbana di Modena. Lo studio, commissionato all'ARPA Emilia Romagna dal Comune di Modena, si inquadra nel contesto di iniziative previste dal D.M. 21 aprile 1999 che fa obbligo ai Comuni con particolari problematiche ambientali di redigere un rapporto annuale sulla qualità dell'aria e di predisporre eventuali provvedimenti preventivi a salvaguardia della salute della popolazione. Detti provvedimenti sono indirizzati prioritariamente a varie forme di limitazione, anche permanente, del traffico autoveicolare, del quale viene in tal modo sancita la centralità nella generazione dell'inquinamento urbano.

I provvedimenti vengono vincolati ad una preventiva analisi della situazione esistente, da effettuare sia tramite attività di tipo sperimentale che modellistico.

Il monitoraggio sperimentale è affidato sia alle centraline fisse operanti in continuo sia a campagne sperimentali organizzate ad hoc. Le centraline rappresentano ad oggi la principale e talvolta unica fonte di informazione sullo stato della qualità dell'aria. Esse hanno il vantaggio della continuità temporale e possono quindi fornire lunghe serie storiche di dati che si rivelano molto utili sia da un punto di vista analitico che previsionale. Gli svantaggi sono legati al loro limitato numero, alla loro specifica collocazione e quindi, in definitiva, alla loro rappresentatività. A questo si aggiunge il ritardo nell'installazione rispetto al delinearsi delle problematiche, dovuto in gran parte al loro costo di acquisto e di manutenzione.

Si rende quindi necessario, per la quasi totalità degli inquinanti, integrare i dati delle centraline fisse con campagne di misura ad hoc che permettano di arri-

chire o addirittura impostare in modo differente l'approccio sperimentale. A causa tuttavia della dispendiosità di questo tipo di indagini, esse vengono condotte in limitati periodi di tempo, esponendole in tal modo al rischio di fenomeni anomali e transitori che possono perturbare la "generalità" del dato ottenuto.

Una ulteriore e sempre più importante fonte di dati e informazioni è costituita dalle simulazioni modellistiche. Esse, oltre a fornire dati caratterizzati da un dettaglio spaziale molto superiore anche alle campagne sperimentali più accurate, forniscono valori meno legati alla particolarità del periodo di misura; permettono inoltre di studiare singole variabili e soprattutto di simulare scenari futuri, compito questo fondamentale in un'ottica di programmazione del territorio. Occorre tuttavia ricordare che un modello rappresenta solo una semplificazione più o meno grossolana della realtà e questo ne costituisce una debolezza intrinseca. Si rivela quindi ineludibile una attenta attività di calibrazione e validazione per verificarne l'efficacia nel riprodurre la "realtà" o, più propriamente, ciò che della realtà si è interessati a conoscere.

L'utilità e talvolta la necessità dell'uso sinergico delle attività sperimentali e modellistiche viene recepito da un punto di vista legislativo dal DM 21 Aprile 1999. Esso ne rappresenta un aspetto particolarmente innovativo che si aggiunge alla importante riaffermazione della logica della programmazione rispetto alla logica dei provvedimenti di emergenza.

I parametri legislativi di riferimento per lo studio sono quelli relativi a medie annuali: i "valori limite" e i "valori guida di qualità dell'aria" per gli inquinanti convenzionali (Biossido di azoto, Polveri Totali Sospese) e gli "obiettivi di qualità dell'aria" per gli inquinanti cosiddetti non convenzionali (PM10 e Benzene). Alcuni di essi rappresentano parametri legislativi meno vincolanti dei "livelli di attenzione e di allarme" definiti per il breve periodo ma spesso addirittura più significativi in un'ottica di programmazione della mobilità in chiave ambientale e sanitaria. I valori medi annuali, infatti, non solo hanno una importanza riconosciuta per gli effetti di sostanze cancerogene come il benzene ma anche per gli effetti di tipo cronico sull'apparato respiratorio di inquinanti come il biossido di azoto e il monossido di carbonio. Inoltre, le aree identificate come più critiche in termini di valori medi annuali sono anche le aree dove con più probabilità si riscontrano i valori massimi di concentrazione sul breve periodo e quindi eventualmente i superamenti dei livelli di attenzione e di allarme. I valori medi annuali sono quindi i termini di riferimento preferenziale in quanto permettono una valutazione sia diretta che indiretta degli effetti dei livelli di inquinamento, indipendentemente dalle particolari e specifiche condizioni meteorologiche responsabili dei

Tabella 1 - Valori limite e valori guida per NO₂ e PTS

Inquinante	Valori limite	Valori guida
biossido di azoto (98* perc.)	200 *g/m ³	135 *g/m ³
polveri totali sospese (media)	150 *g/m ³	da 40 a 60 *g/m ³ fumo nero
polveri totali sospese (95* perc.)	300 *g/m ³	da 100 a 150 *g/m ³ fumo nero

picchi di concentrazione.

I valori limite e i valori guida stati definiti nel DPR 203 del 24/5/1988 e vengono riportati, per il biossido di Azoto e le PTS, nella tabella 1.

Il DM del 25/11/1994 ha invece fissato gli "obiettivi di qualità dell'aria" per gli inquinanti non convenzionali, che per il benzene e il PM10 assumono i valori riportati nella tabella 2.

Tabella 2 - Valori obiettivo per benzene e PM10

Inquinante	Valori obiettivo
benzene	10 *g/m ³
PM10	40 *g/m ³

Impostazione dello studio

Una valutazione critica della disponibilità di dati ha costituito il primo passo nell'analisi dei livelli di inquinamento. Le postazioni fisse operative nell'area urbana di Modena comprendono:

1. Quattro analizzatori per la misura del Biossido di Azoto (Largo Garibaldi, Via Giardini, Corso Cavour, Via Nonantolana);
2. Tre analizzatori per la misura delle polveri totali sospese (PTS) (Largo Garibaldi, Via Giardini, Via Nonantolana);
3. Due analizzatori per la misura del PM10 (Via Nonantolana e P.zza XX Settembre);
4. Un'analizzatore per la misura del PM2.5 (Via Nonantolana), attivo da pochi giorni e non ancora utilizzabile per lo studio;
5. Un'analizzatore in automatico per la misura del benzene (Via Nonantolana).

A questi dati occorre aggiungere quelli risultanti dalle campagne periodiche con campionatori passivi per la misura del benzene condotte dal 1996 a cadenza mensile e della durata di una settimana cadauna, in 5 postazioni in area urbana. La tabella 3 illustra le caratteristiche dei siti di misura.

Tabella 3 - Caratteristiche dei siti di campionamento periodico di benzene

Nome della stazione	Caratteristiche del sito
Via Nonantolana	Prima periferia: strada a medio traffico
Lgo Garibaldi	Area ad alta densità di traffico
V. Scudari	Centro storico: zona a traffico limitato
P.co Amendola	Area verde residenziale
Via Fontanelli	Area a medio traffico

Il posizionamento di un sito di campionamento passivo in corrispondenza del sito di misura in automatico (Via Nonantolana) è servito per la verifica della comparabilità con il dato fornito dalla misura in automatico.

I siti di campionamento del benzene sono stati scelti in corrispondenza delle centraline di misura in automatico di altri inquinanti per poterne studiare eventuali correlazioni. I dati disponibili, pur abbastanza ricchi se confrontati con quelli del panorama italiano, sono stati giudicati comunque inadeguati nell'ottica della individuazione delle aree cittadine più a rischio.

Si è quindi proceduto, d'intesa con il Comune di Modena, alla pianificazione di alcune attività di tipo informativo che si potessero conciliare con la vicinanza delle scadenze imposte dalla legislazione.

In particolare, lo schema logico adottato prevede

1. l'utilizzo di serie storiche di dati sperimentali (centraline fisse e campionamenti periodici), per il calcolo dei valori medi annuali e degli andamenti dei rapporti di concentrazione tra varie zone della città;
2. la pianificazione e l'utilizzo di campagne sperimentali con campionatori passivi per avanzare prime ipotesi sulle aree cittadine più a rischio e per verificare, in un maggior numero di postazioni, l'esistenza di rapporti di concentrazione approssimativamente costanti;
3. l'acquisizione e la validazione di supporti di tipo modellistico che permettano dapprima la verifica della riproducibilità tramite simulazioni dei valori medi annuali misurati e dei rapporti di concentrazione e, in un secondo tempo, l'individuazione delle aree della città più esposte al rischio inquinamento.

Questo schema logico, una volta testato, potrebbe permettere di risalire, utilizzando solo poche stazioni fisse (nel caso ideale una sola), al livello di inquinamento in tutti gli archi stradali inseriti nel modello.

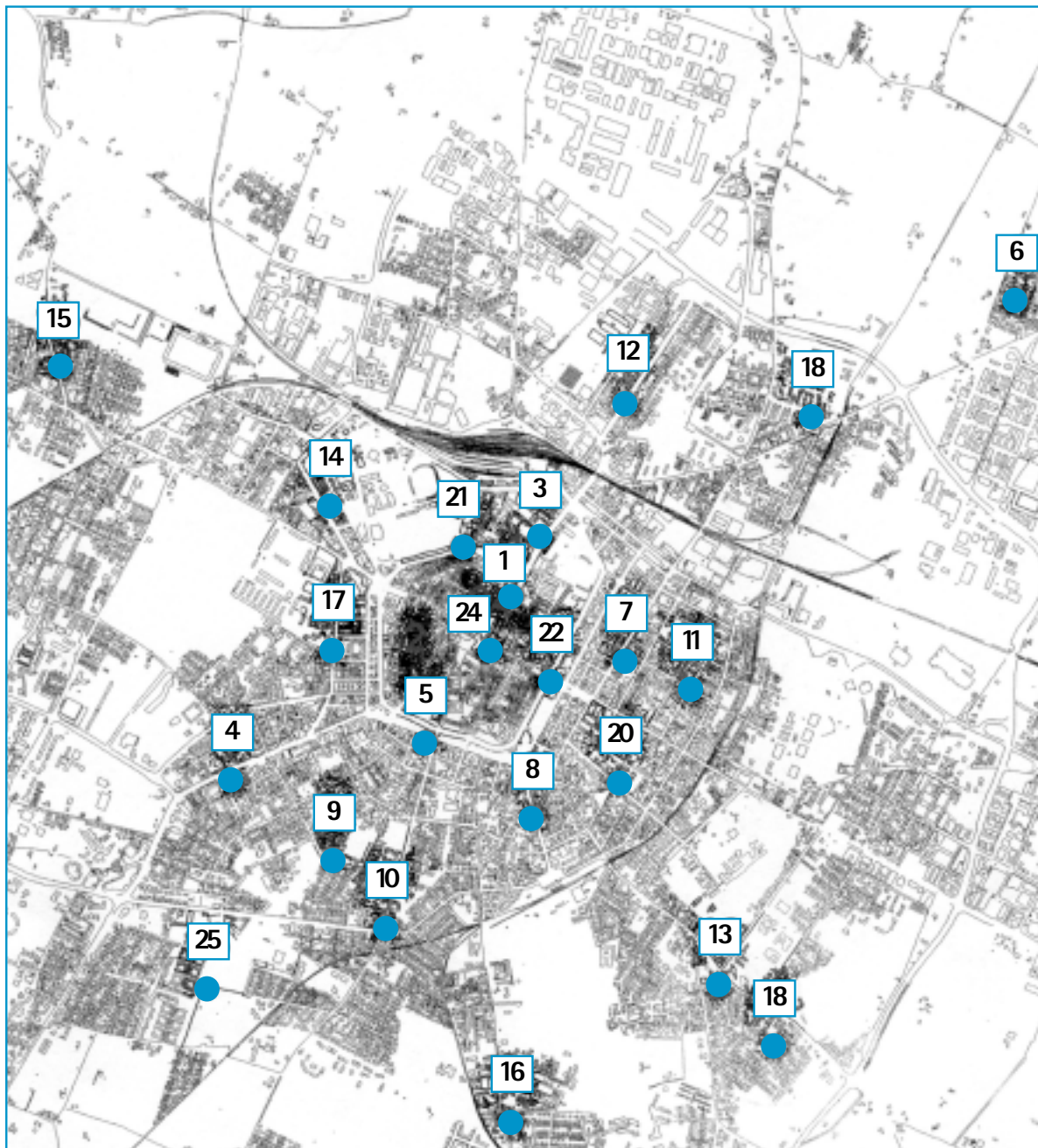
Data la ristrettezza dei tempi e delle risorse lo schema è stato interamente utilizzato solo per il benzene; una campagna intensiva di misura del benzene tramite campionatori passivi da realizzarsi nel mese di novembre, unitamente all'acquisizione e all'utilizzo di un modello di simulazione per tutti gli inquinanti oggetto dello studio, sono state le attività programmate per questo primo anno. La parte sperimentale è stata condotta dalla Sezione di Modena dell'ARPA e, d'intesa con il Comune di Modena, si è indirizzata soprattutto verso l'individuazione di punti di particolare criticità e quindi, in generale, verso aree ad elevato traffico. Questa impostazione della campagna sperimentale ha anche permesso di raccogliere dati utili per la verifica e la calibrazione della parte modellistica. I dettagli della campagna di misura sono riportati nella relazione annuale 1999 sulla qualità dell'aria nella Provincia di Modena. La tabella 4 e la figura 1 illustrano la distribuzione dei campionatori passivi nell'area cittadina.

La parte modellistica è stata condotta dal Centro per la Prevenzione dei Danni Ambientali e Sanitari da Traffico di ARPA Emilia Romagna, che si è avvalso dell'utilizzo del software IMMIS LUFT (IVU - Germania), un modello

Tabella 4 - Siti scelti per la campagna di misura del benzene (24-30 novembre 1999)

1 P.zza Roma	14 Viale Storchi
2 C.so Canalchiaro	15 Via per Carpi Sud
3 Viale Vittorio Emanuele	16 Via Morane
4 Via Giardini	17 Via Barozzi
5 Viale Muratori	18 Via Zamenhof / Via Gandini
6 Via Peru	19 Viale Resistenza
7 Via Ciro Menotti	20 Viale Moreali / Via Valdrighi
8 Viale Medaglie D'oro	21 Via Fontanelli
9 Via Sassi	22 Lgo Garibaldi
10 Via Rosselli / Viale Amendola	23 Via Nonantolana
11 Via Puccini / Via Crespellani	24 Via Scudari
12 Viale Gramsci	25 Parco Amendola
13 Via Vignolese / Via Campi	

Fig. 1 - Mappa dei siti scelti per la misurazione del benzene.



di simulazione dell'inquinamento da traffico autoveicolare in area urbana. Gli inquinanti stimati dal modello sono il benzene, le polveri, gli Ossidi di azoto (sia NO che NO₂), gli Idrocarburi Incombusti, il Monossido di Carbonio e l'Anidride Carbonica. Esso permette di stimare le medie annuali e i valori al 98* percentile delle concentrazioni di inquinanti all'interno dell'ambito stradale racchiuso tra edifici ("canyon" stradale): questo rappresenta l'approccio comunemente utilizzato per la valutazione delle concentrazioni di inquinanti in ambito urbano. Al "canyon" sono associate una porosità, intesa come percentuale di spazio vuoto tra edifici rispetto alla lunghezza totale della strada, una altezza e una distanza medie degli edifici sui due lati

opposti della strada; basandosi sulla conoscenza del territorio e utilizzando in modo opportuno questi parametri, è stato possibile fornire una rappresentazione modellistica di tutti gli archi stradali della rete urbana.

La meteorologia viene considerata dal modello nei termini di vento medio annuale e di andamenti tipici annuali della temperatura al suolo e del vento. Il vento medio annuale è stato calcolato tramite la centralina meteorologica di C.so Cavour (vento medio annuale *1.3 m/s). Gli andamenti tipici annuali della temperatura e del vento utilizzati nelle simulazioni sono invece quelli propri del modello e riferiti all'Germania. La ristrettezza dei tempi a disposizione ha infatti impedi-

to alla ditta fornitrice del software di ricalcolare le costanti presenti all'interno del modello in funzione degli andamenti reali dell'area modenese. L'adozione degli andamenti osservati a Modena non dovrebbe comunque incidere in modo particolarmente significativo in virtù della comparabilità tra gli andamenti meteorologici utilizzati e quelli reali.

Altre informazioni richieste in input dal modello sono la composizione del parco macchine e il traffico giornaliero sui singoli archi stradali.

La composizione del parco macchine adottata è riferita all'area provinciale per l'anno 1998 (Tabella 5). Non è stato possibile, a causa della ristrettezza dei tempi a disposizione, avere dall'ACI dati più recenti e riferiti all'area comunale.

Tabella 5: composizione parco macchine

	< 1400 cc	1400 < cil < 2000 cc	> 2000 cc
Benzina non catalizzate	37 %	12 %	1 %
Benzina catalizzate	25 %	13 %	1 %
Diesel		7 %	4 %

I flussi di traffico sui principali archi stradali sono quelli forniti dal Settore Traffico del Comune di Modena e ricavati utilizzando il modello di simulazione del traffico TRIPS. I dati forniti da TRIPS si riferiscono ad una rete stradale semplificata comprendente comunque tutti i principali archi stradali dell'area comunale. I valori di traffico giornaliero sono stati desunti dalle simulazioni riferite all'ora di punta (7.30 - 8.30) considerando il picco di flusso come il 13,5% del flusso totale giornaliero. Questo coefficiente è stato ricavato sulla base di campionamenti su alcuni archi stradali cittadini effettuati dal Comune e dalla Provincia di Modena. Gli stessi dati sono serviti anche per dare una prima valutazione del flusso di mezzi pesanti sulla rete. I rilievi di traffico disponibili sulle arterie maggiormente utilizzate dal trasporto commerciale sono stati utilizzati per stimare un valore percentuale medio del flusso del trasporto pesante rispetto al flusso totale (13%). Questo valore è stato poi utilizzato nelle simulazioni solo sulle tangenziali e sui tratti esterni alle tangenziali della Via Emilia, della Via Vignolese, della Via Giardini, della Nazionale per Carpi e dell'Estense; sugli altri archi stradali il contributo del trasporto pesante è stato considerato nullo. Il flusso di automezzi del trasporto pubblico è stato considerato in modo dettagliato desumendolo dai percorsi e dalle frequenze delle linee cittadine.

Risultati

Benzene

Il benzene è l'inquinante per il quale è stato possibile mettere maggiormente a frutto la sinergia tra la parte sperimentale e quella modellistica.

La stazione automatica di Via Nonantolana e i già menzionati campionamenti periodici rappresentano la prima fondamentale fonte di informazione sui livelli di benzene nell'ambito urbano. Essi mostrano valori medi annuali sempre al di sotto dei limiti di legge (Tabella 6).

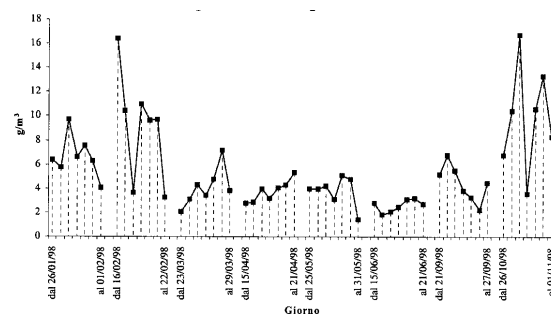
Tabella 6 - Valori medi annuali di benzene nei 5 siti di campionamento periodico

Sito di campionamento	1998
Via Nonantolana	4.2 - 5.2*
Lgo Garibaldi	5.6
V. Scudari	3.2
P.co Amendola	2.2
Via Fontanelli	5.6

* Ottenuto con campionatore automatico

I valori più elevati si riscontrano spesso nelle postazioni di Via Fontanelli e di Lgo Garibaldi; di quest'ultima viene riportato l'andamento annuale riferito al 1998 che evidenzia come nei periodi autunnali ed invernali si riscontrino valori di concentrazione più elevati rispetto ai mesi estivi e primaverili (Figura 2).

Fig. 2 Benzene misurato in Lgo Garibaldi - anno 1998



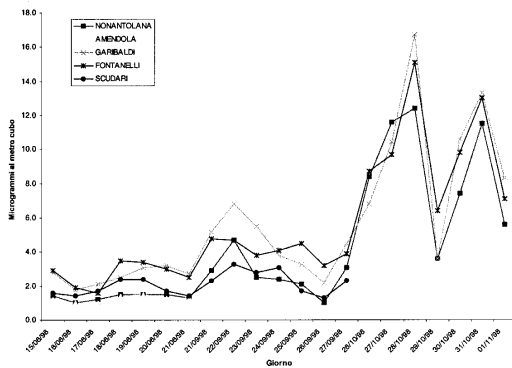
In tre di questi siti è stato possibile operare un confronto tra i valori medi annuali sperimentali e quelli stimati dal modello. Ciò ha costituito una prima verifica della affidabilità della parte modellistica. La concordanza, come evidenziato dalla tabella 7, appare soddisfacente soprattutto se si considera la particolarità delle configurazioni geometriche degli ambiti stradali in cui sono collocati i campionatori, con estrema difficoltà assimilabili a "canyon". Si consideri inoltre che i picchi di concentrazioni in ambito cittadino raggiungono valori di circa 20 *g/m³ e che differenze di pochi *g/m³ sono quindi piccole.

Tabella 7 - Confronto fra valori misurati e valori simulati dal modello

Postazione	Misurato (1998)	Simulato
Via Nonantolana	4.2	6.9
Via Fontanelli	5.6	4.3
Largo Garibaldi	5.6	2.9

Si è poi proceduto alla verifica dell'ipotesi di esistenza di coefficienti costanti che leghino le concentrazioni di benzene nelle varie zone della città analizzando i dati dei campionamenti periodici. La figura 3 esemplifica, per il secondo semestre del 1998, gli andamenti dei rilevamenti di benzene nei cinque siti; l'impressione visiva sembra suggerire una notevole correlazione fra le concentrazioni misurate nei diversi siti. L'analisi quantitativa, condotta tramite lo studio dei coefficienti di correlazione, ha confermato tale impressione. La tabella 8 evidenzia i risultati di questa indagine, condotta utilizzando i rilevamenti degli anni 1998 e 1999.

Fig. 3 Benzene misurato nel secondo semestre 1998

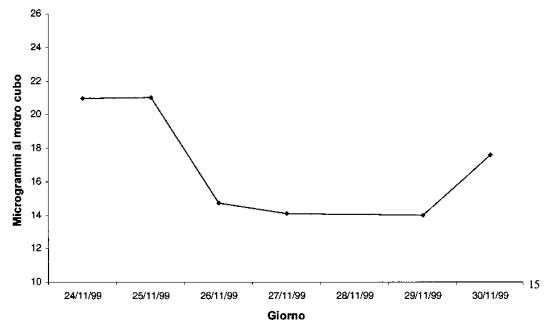


I valori misurati nei cinque siti sono quindi altamente correlati. I coefficienti di significatività (p-value) assumono, per tutte le correlazioni studiate, valori inferiori a 0.01.

Si è quindi proceduto con la verifica del grado di correlazione tra gli andamenti delle concentrazioni in varie zone della città, utilizzando la campagna intensiva di novembre. Alla maggior disponibilità di siti fa in questo caso da contraltare la breve estensione temporale delle misure, una settimana, che impedisce una analisi statistica affidabile (il numero dei dati per ogni stazione è troppo esiguo per permettere il calcolo dei coefficienti di correlazione). Si è quindi scelto di analizzare i dati nei termini di andamenti temporali dei rapporti tra le concentrazioni di benzene misurate nelle singole stazioni e la media giornaliera delle concentrazioni nei venticinque siti di campionamento. Nonostante che nei sei giorni della campagna vi sia stata una variabilità abbastanza marcata della concentrazione media (la figura 4 illustra l'andamento delle concentrazioni medie) i rapporti di concentrazione tra i diversi siti si sono mantenuti ragionevolmente costanti.

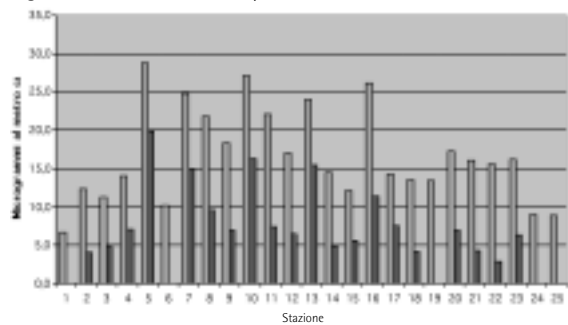
In conclusione, l'esistenza di coefficienti fissi tra le concentrazioni medie annue nei vari punti della città emerge come ipotesi ragionevole sia dai dati delle serie storiche che da quelli della campagna sperimentale di novembre. Essa dovrà tuttavia essere ulteriormente verificata con dati sperimentali e solo successivamente utilizzata come metodologia di monitoraggio. Questo aspetto appare molto significativo anche nell'ottica della appropriatezza degli strumenti modellistici utilizzati nello studio. L'ottima correlazione tra i diversi siti di misura suggerisce infatti l'uniformità meteorologica dell'ambito urbano anche nel medio periodo, così come ipotizzato dal modello adottato. Si è proseguito lo studio con la verifica della affidabilità del modello in rapporto alla campagna di misure.

Fig. 4 Andamento valore medio giornaliero del benzene



Il confronto, in questo ambito, non può che avvenire nei termini di rapporti di concentrazione tra stazione e stazione: il dato medio annuale fornito dal modello non può infatti coincidere numericamente con il dato della campagna, che rappresenta un valore di picco (novembre, ed i mesi invernali in genere, rappresentano i periodi con la minor capacità dispersiva dell'atmosfera e quindi con i valori più alti delle concentrazioni di benzene).

Fig. 5 Confronto tra valori sperimentali e valori stimati



La figura 5 illustra la comparazione tra i valori delle 25 stazioni e i valori del modello (solo per i siti in prossimità di archi stradali). La concordanza appare buona in quanto i rapporti di concentrazione tra le diverse stazioni appaiono coerenti (le colonne azzurre rappresentano i valori sperimentali). Verificata la soddisfacente affidabilità del modello rispetto ai dati sperimentali, si è proceduto alla stima delle concentrazioni medie annue su tutti gli archi della rete utilizzata dal modello di traffico. I valori ottenuti nelle simulazioni risultano, in alcuni archi stradali, ben al di sopra dei limiti di legge. Le aree più a rischio, come evidenziato dalla tabella 7, appaiono quelle in prossimità del centro storico (Viale Muratori, Via C. Menotti) e alcuni importanti archi stradali nella immediata periferia (Viale Amendola, Via Morane). Detti valori devono essere considerati realistici solo

Tabella 8 – Coefficienti di correlazione di Pearson tra i siti di misura del benzene

	P.co Amendola	Via Fontanelli	L.go Garibaldi	Via Nonantolana	Via Scudari
P.co Amendola	1	0,956	0,958	0,948	0,964
Via Fontanelli	0,956	1	0,916	0,926	0,904
L.go Garibaldi	0,958	0,916	1	0,925	0,909
Via Nonantolana	0,948	0,926	0,925	1	0,901
Via Scudari	0,964	0,904	0,909	0,901	1

all'interno dei "canyon" stradali. Le concentrazioni anche a poca distanza dagli archi stradali (20-30 m) possono differire fino a 3-4 volte da quelle rilevate all'interno degli stessi. Pur rappresentando quindi valori di picco, appaiono comunque molto importanti in quanto identificano aree dove non solo avviene il transito quotidiano di una parte consistente della popolazione ma anche dove si riscontrano elevate densità di popolazione residente.

Tabella 9 – Archi stradali con le concentrazioni più alte di benzene

VIA - DA VIA - A VIA	CODICE STRADA	BENZENE (*G/M3)
REITER-FERRARI-PIAVE	10321027	19.95
MURATORI-SADOLETO-CAVEDONI	13321005	19.87
MURATORI-SADOLETO-MEDAGLIE D'ORO	10051340	19.55
AMENDOLA-PISANO-NIEVO	13801381	18.33
MURATORI-MEDAGLIE D'ORO-TRENTO TR	13401343	17.68
MURATORI-CAVEDONI-FOGLIANI	13341332	17.43
MORANE-GOBETTI-ARCHIROLA	13901391	17.22
AMENDOLA-AGNINI-PISANO	13791380	16.98
AMENDOLA-WILGELMO-NIEVO	10881381	16.96
AMENDOLA-GIARDINI-AGNINI	13781379	16.95
VIGNOLESE-MARZABOTTO-LA SPEZIA	14771478	16.53
SIGONIO-TAMBURINI-BUON PASTORE	13621363	16.46
AMENDOLA-TAMBURINI-BUON PASTORE	10901382	16.25
MURATORI-FOGLIANI-GIANNONE	13361334	15.63
AMENDOLA-WILGELMO-TAMBURINI	10881090	15.54
VIGNOLESE-ABBA-CAMPI	10971479	15.5
MONTEKOSICA-GANACETO-MONTECUCCOLI	10481354	15.45
MENOTTI-EMILIA EST-PUCCINI	13461025	15.39
MORANE-PRAMPOLINI-GOBETTI	10131390	15.31
MONTEKOSICA-CRISPI-GALVANI	13521353	15.25
MENOTTI-MORSELLI-DIVISIONE ACQUI	14041407	14.97
GOBETTI-MANZONI-ARCHIROLA	13891546	14.96
VIGNOLESE-CUCCHIARI-FREGNI	13871388	14.93
VIGNOLESE-FREGNI-MARZABOTTO	13881477	14.93
FERRARI-MENOTTI-REITER	14071032	14.87
MINZONI-RIVA DEL GARDA-MORANE	10841390	14.58
EMILIA OVEST-AUTODROMO-PER CARPI	14251522	14.25
MINZONI-PORTA-RIVA DEL GARDA	10841091	14.16
MINZONI-BUON PASTORE-PORTA	10911382	14.09
MONTEKOSICA-GANACETO-GALVANI	10481353	13.98

Biossido di azoto e monossido di carbonio

Le conclusioni sul biossido di azoto (NO₂) e sul monossido di carbonio (CO) vengono qui unificate in quanto rappresentano due degli inquinanti "tradizionali" confrontabili con i dati delle centraline fisse. Le tabelle 10, 11 e 12 riportano i valori medi stimati dal modello e quelli sperimentali per le stazioni di Via Giardini, Via Nonantolana e L.go Garibaldi.

Il modello sembra sottostimare in modo sensibile le

concentrazioni di questi inquinanti. Occorre tuttavia ricordare che le sopra menzionate stazioni sono collocate in posizioni poco riproducibili con un approccio di tipo "canyon" e si prestano quindi poco ad essere utilizzate come confronto sperimentale. A questo si aggiunge che soprattutto gli ossidi di azoto sono emessi anche da altre sorgenti quali impianti di riscaldamento, di smaltimento rifiuti, industriali, etc. Il contributo del traffico veicolare alle emissioni totali è stimabile in circa il 70% per il biossido di azoto e in circa il 95% per il monossido di carbonio.

Tabella 13 – Archi stradali con le concentrazioni più alte di biossido di azoto

VIA - DA VIA - A VIA	CODICE STRADA	NO ₂ (*G/M3)
MONTEKOSICA-CRISPI-GALVANI	13521353	138.10
MONTEKOSICA-GANACETO-GALVANI	10481353	133.80
MONTEKOSICA-GANACETO-MONTECUCCOLI	10481354	132.99
MORANE-GOBETTI-ARCHIROLA	13901391	132.01
CRISPI-BRUNI-MONTEKOSICA	13511352	126.35
VIGNOLESE-MARZABOTTO-LA SPEZIA	14771478	122.93
GALVANI-DANTE ALIGHIERI-MONTEKOSI	10471353	122.33
AMENDOLA-PISANO-NIEVO	13801381	119.84
SIGONIO-CAVEDONI-MORANE	10801383	115.87
EMILIA OVEST-AUTODROMO-PER CARPI	14251522	115.85
SIGONIO-TAMBURINI-BUON PASTORE	13621363	114.69
REITER-FERRARI-PIAVE	10321027	114.52
MURATORI-SADOLETO-CAVEDONI	13321005	114.32
GOBETTI-MORANE-ARCHIROLA	13901546	113.93
MURATORI-SADOLETO-MEDAGLIE D'ORO	10051340	113.54
PUCCINI-CREPELLANI-BONACINI	13111400	113.19
EMILIA OVEST-CORTESE-POZZO	10331485	112.36
VIGNOLESE-ABBA-CAMPI	10971479	111.83
GOBETTI-MANZONI-ARCHIROLA	13891546	110.21
PUCCINI-MENOTTI-VERDI	10251398	109.36
MURATORI-MEDAGLIE D'ORO-TRENTO TR	13401343	108.78
EMILIA EST-MENOTTI-VERDI	13461395	108.24
MURATORI-CAVEDONI-FOGLIANI	13341332	108.13
MINZONI-PORTA-RIVA DEL GARDA	10841091	107.58
EMILIA EST-CREPELLANI-BONACINI	13011397	107.46
SIGONIO-PRAMPOLINI-MORANE	10071383	107.34
MINZONI-BUON PASTORE-PORTA	10911382	107.33
EMILIA EST-CORTESE-BONACINI	10331397	106.99
AMENDOLA-AGNINI-PISANO	13791380	106.90

I valori ottenuti per il biossido di azoto mostrano picchi di 138 microgrammi al metro cubo, appena al di sopra del valore guida. Considerando anche i valori di "fondo" aggiuntivi derivanti da altre sorgenti, è pro-

Tabella 10 – Confronto tra dati sperimentali e simulazioni per stazione Via Giardini

	CO medio (mg)	NO ₂ medio (*g)	NO ₂ 98* perc. (*g)
Valore sperimentale	1.3	70	143
Valore modello	0.9	38	83

Tabella 11 – Confronto tra dati sperimentali e simulazioni per stazione Via Nonantolana

	CO medio (mg)	NO ₂ medio (*g)	NO ₂ 98* perc. (*g)
Valore sperimentale	1.5	58	128
Valore modello	0.8	33	71

Tabella 12 – Confronto tra dati sperimentali e simulazioni per stazione L.go Garibaldi

	CO medio (mg)	NO ₂ medio (*g)	NO ₂ 98* perc. (*g)
Valore sperimentale	1.6	72	143
Valore modello	0.4	30	65

babile che nelle aree dove il traffico produce le concentrazioni più elevate, si possano verificare superamenti di questo valore guida. Le aree critiche sono risultate abbastanza sovrapponibili con quelle evidenziate per il benzene, con l'aggiunta di Viale Monte Kosica (Tabella 13). Valori in proporzione più elevati si riscontrano però in alcuni archi stradali come le tangenziali, viale Gramsci e alcune strade periferiche ad alta densità di traffico.

La tabella 14 mostra come gli archi stradali con le concentrazioni più alte di monossido di carbonio siano anch'essi in gran parte sovrapponibili con quelli già evidenziati per il benzene. I valori medi annuali non sono confrontabili con limiti di legge.

Tabella 14 – Archi stradali con le concentrazioni più alte di monossido di carbonio

VIA - DA VIA - A VIA	CODICE STRADA	CO (MG/M3)
MURATORI-SADOLETO-CAVEDONI	13321005	2.432
MURATORI-SADOLETO-MEDAGLIE D'ORO	10051340	2.392
AMENDOLA-PISANO-NIEVO	13801381	2.255
MURATORI-MEDAGLIE D'ORO-TRENTO TR	13401343	2.164
MORANE-GOBETTI-ARCHIROLA	13901391	2.140
MURATORI-CAVEDONI-FOGLIANI	13341332	2.134
AMENDOLA-AGNINI-PISANO	13791380	2.079
AMENDOLA-WILIGELMO-NIEVO	10881381	2.076
AMENDOLA-GIARDINI-AGNINI	13781379	2.075
VIGNOLESE-MARZABOTTO-LA SPEZIA	14771478	2.044
SIGONIO-TAMBURINI-BUON PASTORE	13621363	2.025
AMENDOLA-TAMBURINI-BUON PASTORE	10901382	1.989
MONTEKOSICA-GANACETO-MONTECUCCOLI	10481354	1.930
MONTEKOSICA-CRISPI-GALVANI	13521353	1.915
MURATORI-FOGLIANI-GIANNONE	13361334	1.913
VIGNOLESE-ABBA-CAMPI	10971479	1.906
AMENDOLA-WILIGELMO-TAMBURINI	10881090	1.902
MENOTTI-EMILIA EST-PUCCINI	13461025	1.883
MORANE-PRAMPOLINI-GOBETTI	10131390	1.875
GOBETTI-MANZONI-ARCHIROLA	13891546	1.841
MENOTTI-MORSELLI-DIVISIONE ACQUI	14041407	1.832
VIGNOLESE-CUCCHIARI-FREGNI	13871388	1.828
VIGNOLESE-FREGNI-MARZABOTTO	13881477	1.828
FERRARI-MENOTTI-REITER	14071032	1.821
MINZONI-RIVA DEL GARDA-MORANE	10841390	1.784
EMILIA OVEST-AUTODROMO-PER CARPI	14251522	1.762
MONTEKOSICA-GANACETO-GALVANI	10481353	1.756
MINZONI-PORTA-RIVA DEL GARDA	10841091	1.742
MINZONI-BUON PASTORE-PORTA	10911382	1.733

Polveri

Le polveri rappresentano un inquinante particolarmente problematico da un punto di vista sperimentale, modellistico, sanitario e legislativo. La ricerca scientifica ha dedicato e ancora dedica grande attenzione a questo problema. Mentre fino a qualche anno fa il problema "polveri" era affrontato nei termini di monitoraggio delle polveri totali sospese (PTS), ora l'attenzione è focalizzata verso le frazioni più fini del materiale particolato (PM10, PM2.5) che sono le responsabili dei danni sanitari più significativi sia a breve che a lungo termine. I primi sono rappresentati soprattutto da difficoltà respiratorie e infiammazioni delle vie aeree; i secondi invece sono in gran parte connessi con effetti cancerogeni o tossici legati alle sostanze veicolate dalle polveri stesse.



La legislazione e la predisposizione degli apparati sperimentali ha seguito questa evoluzione della ricerca scientifica e ancora oggi si riscontra un comprensibile ritardo nell'impostazione delle reti di monitoraggio rispetto alle esigenze legislative e sanitarie.

Nell'area urbana di Modena, come già detto, sono ad oggi disponibili i dati di 3 analizzatori di PTS e 2 analizzatori di PM10 attivi dal 1998.

In questo studio l'attenzione è focalizzata sulle polveri prodotte dal traffico autoveicolare.

La frazione di polveri addebitabile al traffico è un argomento ancora dibattuto. In generale è possibile dire che il traffico è direttamente responsabile solo della frazione più fine del materiale particolato e cioè sotto il PM10 e ancor più sotto il PM2.5. In esso sono presenti le polveri più pericolose da un punto di vista sanitario. Il traffico è tuttavia responsabile anche indirettamente della concentrazione delle polveri. Esso infatti, tramite il movimento degli autoveicoli, ne genera il ri-sollevamento e provoca la dispersione in atmosfera di materiale stradale (asfalto, gomma, etc). Per una trattazione completa, sarebbe poi necessario tenere conto anche dei fenomeni di ricombinazione delle molecole gassose emesse dagli scarichi degli autoveicoli, che possono aggregarsi in materiale particolato attraverso complicati meccanismi fisico-chimici.

Tutti questi fenomeni incidono in maniera significativa sulla concentrazione delle polveri in prossimità degli archi stradali anche se è ancora oggetto di studio la quantificazione dei sopracitati contributi.

Il modello utilizzato considera solo il contributo derivante dalla emissione diretta di materiale particolato da parte degli autoveicoli. Le simulazioni effettuate hanno evidenziato una notevole sottostima delle concentrazioni delle polveri previste dal modello rispetto a quelle rilevate dalle centraline (anche un ordine di grandezza di differenza rispetto al dato del PM10). Sono in corso alcuni approfondimenti per verificare quanto della sottostima derivi da carenze nelle informazioni richieste in input dal modello (in particolare nella classificazione delle autovetture diesel) e quanto da carenze strutturali dello stesso. Parallelamente si inizierà uno studio specifico per l'identificazione della percentuale di PM10 e di PTS attribuibile direttamente o indirettamente al traffico autoveicolare; ciò permet-

terà di poter disporre di un dato di confronto sperimentale per le simulazioni modellistiche.

Prove di sensibilità del modello e scenari

I parametri geometrici assegnati ai "canyon" stradali sono risultati particolarmente determinanti per il calcolo delle concentrazioni degli inquinanti. L'evidenza di questa sensibilità emerge dalla analisi dei livelli di inquinamento in prossimità delle tangenziali, che, pur essendo caratterizzate da elevatissimi flussi di traffico sia leggero che pesante, risultano affette da basse concentrazioni di inquinanti proprio grazie alla conformazione "aperta" della strada. Si rivelano quindi molto più esposti al rischio inquinamento quegli archi stradali racchiusi fra file contigue di edifici.

Si è riscontrata una particolare sensibilità del modello anche rispetto all'intensità media del vento, un limitato aumento del quale può provocare radicali riduzioni delle concentrazioni stimate. Ciò costituisce, del resto, una conferma della evidenza sperimentale delle particolari problematiche ambientali che si riscontrano nelle città del bacino padano, caratterizzate da scarsa ventilazione.

L'utilizzo all'interno dello studio di strumenti modellistici ha permesso di poter anche simulare scenari ipotetici di traffico autoveicolare. Vari sono stati gli scenari studiati. In questa relazione vengono presentati i due più significativi.

Il primo scenario analizzato si riferisce ad un caso ipotetico legato a scelte amministrative a breve e medio termine. Il caso ipotizzato è rappresentato dalla riduzione del 20% del parco macchine non catalizzate. Questo equivale ad un blocco del traffico delle macchine non catalizzate per 1 o 2 giorni durante tutto l'anno per tutte le macchine non catalizzate (o misure equivalenti). I risultati rimangono validi anche se considerati su singoli archi stradali, in quanto per il modello ogni arco stradale è indipendente. I risultati possono essere quindi utilizzati anche per stimare gli effetti di chiusure di un limitato numero di archi stradali. (Si potrebbe intal modo, per esempio, prevedere le conseguenze di una chiusura in tutti i fine settimana delle zone più critiche in prossimità del centro storico). Le simulazioni hanno evidenziato, per provvedimenti di questo tipo, un effetto significativo: riduzione del 30-40% per il benzene, e del 15-20% per ossidi di azoto e monossido di carbonio. L'effetto in tal caso risulta amplificato anche perché associato ad una riduzione del numero totale di macchine circolanti.

Il secondo scenario analizzato rappresenta una simulazione di un futuro parco macchine "ideale" senza auto non catalizzate (tutte le macchine sono state trasformate in macchine catalizzate, mantenendo quindi inalterato il numero totale di macchine circolanti).

Questa scelta è stata suggerita dalle prevedibili conseguenze a medio-lungo termine (3-4 anni) della prossima eliminazione delle benzine super dalla rete di distribuzione (gennaio 2002), che, insieme alla probabile adozione di incentivi da parte dello stato per lo svecchiamento del parco macchine, porterà ad una drastico calo delle macchine non catalizzate che nel



territorio provinciale sono ancora il 40% del parco macchine totale. La simulazione ha evidenziato un nettissimo decremento del benzene (circa 70%) e un meno marcato ma significativo decremento di ossidi di azoto e monossido di carbonio (circa 30%).

Conclusioni e linee di sviluppo

L'analisi della distribuzione spaziale di benzene, polveri e ossidi di azoto nell'area urbana di Modena è stato l'obiettivo principale dello studio.

Lo studio, a causa della scarsa disponibilità di tempi e risorse, è stato focalizzato soprattutto sul benzene. Per questo inquinante, grazie alla disponibilità di dati sperimentali ottenuti da una campagna intensiva di misure realizzata tramite campionatori passivi, è stata possibile la verifica diretta della affidabilità delle simulazioni modellistiche.

I risultati hanno permesso non solo di evidenziare alcune aree particolarmente esposte al rischio di superamenti dei limiti di legge (viali in prossimità del centro storico, Via Amendola e Via Morane), ma anche di verificare l'utilità di un utilizzo sinergico di dati sperimentali e simulazioni.

Un aspetto importante dello studio riguarda la scelta di dotarsi di uno strumento modellistico per la stima delle concentrazioni medie annue e non delle concentrazioni di breve e brevissimo periodo. Pur essendo infatti centrale in gran parte della legislazione e dell'epidemiologia l'esposizione acuta agli inquinanti, grande attenzione deve essere dedicata anche alle medie di lungo periodo. Le medie annuali sono variabili ambientali di grande significato epidemiologico, non solo per gli effetti a lungo termine degli inquinanti cancerogeni e per la stima delle aggravanti croniche ma anche per la stima della probabilità di picchi di concentrazione nelle diverse zone della città. Le aree infatti con le medie annue più alte risultano in senso probabilistico quelle più esposte agli episodi acuti di inquinamento (non in senso causale, perché nel breve periodo giocano un ruolo determinante gli effetti della meteorologia alla piccola scala). L'ottica delle medie annuali permette inoltre di ridurre la

meteorologia ad un fattore medio e non ad un fenomeno fisico complesso e difficilmente prevedibile alla scala spaziale sopra menzionata. Si ritiene pertanto che le medie annuali rappresentino una delle informazioni più importanti nell'ottica epidemiologica e sicuramente la più importante nell'ottica della programmazione del territorio urbano e della mobilità.

Le principali linee di sviluppo dello studio si indirizzano sia verso l'aspetto modellistico che verso quello sperimentale e vengono qui di seguito riportate.

1. Utilizzo di una composizione del parco macchine più fedele a quello reale.
2. Adozione di coefficienti differenziati per tipologia di strada per la stima del flusso di traffico giornaliero rispetto al traffico dell'ora di punta. Questo rappresenta un punto abbastanza importante in quanto può in alcuni casi produrre uno scartamento significativo tra il valore medio giornaliero reale di traffico e quello stimato.
3. Verifica della possibilità di inserimento dei motorini all'interno della composizione dei mezzi circolanti. A questo proposito occorrerebbe anche una preventiva valutazione del flusso di motorini su ogni arco stradale (o su quelli più critici).
4. Stima più accurata dei flussi dei mezzi pesanti.
5. Studio per archi stradali o per zone del tempo medio di stasi dei veicoli ("daily stop and go") e dei tempi di marcia medi con motore freddo (importanti per le emissioni delle macchine catalitiche)
6. Affinamento delle simulazioni di traffico tramite VISUM verificando l'opportunità di inserimento di nuovi archi stradali.
7. Affinamento delle caratteristiche geometriche dei

"canyon" stradali. Studi di approccio a casi particolari (strade con edifici su un solo lato, strade alberate, incroci)

8. Simulazioni di ulteriori scenari ambientali di traffico.
9. Verifica in letteratura e tramite misure sperimentali del grado di correlazione tra i vari inquinanti da traffico per pianificare una eventuale semplificazione dell'attività di studio e monitoraggio.
10. Campagna sperimentale per la valutazione dell'inquinamento di fondo, con l'utilizzo di campionatori passivi dislocati in parchi, giardini e aree residenziali.
11. Verifica ulteriore dell'esistenza di coefficienti fissi tra le concentrazioni dei vari inquinanti in differenti zone della città.
12. Verifica dell'opportunità e della fattibilità di campagne sperimentali simili a quella realizzata per il benzene, per altri inquinanti.
13. Approfondimento del "problema polveri" ed eventuale adozione di ulteriori supporti modellistici.

Una volta messe in atto queste azioni, sarebbe possibile ottenere mappe bidimensionali di isoconcentrazione sull'intero territorio comunale. Lo sforzo economico necessario sarebbe con ogni probabilità compensato anche da un risparmio di risorse derivante dalla possibile adozione di nuove metodologie di studio e monitoraggio (approccio tipo rapporti di concentrazione fissi e correlazioni tra inquinanti). Una volta ottenuti campi di isoconcentrazione sarebbe poi possibile uno studio sui livelli di esposizione medi dell'intera popolazione o di sottogruppi di cittadini residenti in aree particolarmente esposte.

