

L'UTILIZZO DEI MODELLI DI SIMULAZIONE PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA IN CORRISPONDENZA DELLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE

Sascia Canale ⁽¹⁾

Salvatore Leonardi ⁽²⁾

Maurizia Barone ⁽³⁾

1. Premesse

L'inquinamento atmosferico delle aree urbane è uno dei principali problemi ambientali. Esso dipende fortemente dal grado di urbanizzazione e dalle condizioni meteorologiche dell'area in esame: gli apporti principali di inquinanti provengono dalle fonti di combustione, soprattutto mezzi di trasporto e riscaldamento urbano.

La concentrazione di inquinanti è solitamente tale da indurre effetti dannosi di tipo cronico con riscontro probabilistico e con un elevato numero di persone esposte. Esiste però una gradualità di rischio per cui:

- i bambini, i malati e le donne in gravidanza sono più sensibili degli adulti;
- la concentrazione di inquinanti è maggiore nelle zone centrali delle città;
- la concentrazione di inquinanti da traffico è maggiore a livello del suolo e dei piani più bassi;
- la concentrazione di inquinanti è maggiore in alcune ore della giornata.

Riguardo specificatamente l'inquinamento da traffico, definito anche *inquinamento da fonti mobili*, si deve rilevare come esso sia caratterizzato soprattutto dalla generazione di grandi quantità di ossidi di azoto (NO_x), ossidi di carbonio (CO) ed idrocarburi.

Questo tipo di inquinamento si manifesta acutamente nei centri urbani ad alta densità di traffico, con valori di punta tipici delle ore di ingresso e uscita dei luoghi di lavoro.

⁽¹⁾ Professore associato di “Costruzioni di Strade Ferrovie ed Aeroporti” presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Catania.

⁽²⁾ Dottorando di ricerca in “Riqualificazione e potenziamento della rete stradale” presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Catania.

⁽³⁾ Ingegnere, collaboratrice volontaria all'attività di ricerca presso l'Istituto di Strade Ferrovie ed Aeroporti dell'Università degli Studi di Catania.

In questo contesto va sottolineato come, in ambito urbano, le intersezioni, e in particolare quelle semaforizzate, in quanto interessate dai flussi di traffico più consistenti, si evidenziano come punti critici per quanto concerne l'inquinamento dell'aria. Questa situazione è dovuta principalmente al fatto che i veicoli trascorrono molto tempo in prossimità delle intersezioni, fermi o a bassa velocità con un movimento "a singhiozzo" che determina emissioni (in particolare di CO) concentrate in pochi metri ed in quantità maggiore rispetto alle fasi a velocità equivalente ma costante.

Si ritiene importante, inoltre, porre in risalto il fatto che la dinamica delle manovre in corrispondenza delle intersezioni semaforizzate è un processo difficilmente riconducibile a schemi standardizzati in quanto influenzato da diversi fattori, tra cui:

- ✓ Il numero di veicoli presenti "in coda".
- ✓ I dispositivi di controllo del traffico.
- ✓ L'attività pedonale.
- ✓ Le operazioni di traffico.
- ✓ I veicoli parcheggiati o in fase di parcheggio.
- ✓ Il comportamento dei guidatori.

Simulare le reali condizioni viarie presso gli incroci regolati da lanterne semaforiche è, quindi, un obiettivo per il cui perseguimento si rende necessario l'utilizzo di procedure informatizzate fondate su modelli analitici complessi.

Nell'ambito di questo studio si intende proporre l'applicazione del software TRAF-NETSIM (opportunamente "adattato" alla realtà italiana) per la valutazione delle emissioni di inquinanti, ed il successivo impiego dei modelli gaussiani per l'identificazione delle concentrazioni al suolo degli inquinanti.

L'applicazione di tale metodologia ad una serie di intersezioni semaforizzate appartenenti ad un'infrastruttura del tessuto viario urbano della città di Catania (la circonvallazione nord) è oggetto di una ulteriore trattazione, pubblicata su questo numero della rivista e portata avanti da questo stesso gruppo di ricerca.

2. Le emissioni inquinanti dei veicoli stradali.

Il traffico stradale costituisce una delle cause principali della crescita allarmante dell'inquinamento atmosferico; gli effetti del traffico sono particolarmente deleteri, in quanto esso si concentra principalmente nelle grandi aree urbane, dove ormai vive una quota rilevante della popolazione mondiale.

Nel complesso i trasporti sono responsabili di una quota rilevante delle emissioni di alcune delle principali sostanze inquinanti di origine antropica:

- *ossido di carbonio*: il 90% di tutte le emissioni di CO ha origine dal settore dei trasporti, principalmente dalle autovetture a benzina;
- *ossidi di azoto*: circa il 50% di tali emissioni è dovuto al traffico veicolare, il rimanente al settore industriale ed energetico;
- *idrocarburi incombusti*: circa il 40% delle emissioni di questi inquinanti deriva dal settore dei trasporti; nelle aree urbane la percentuale può giungere al 50%; altre sorgenti importanti sono costituite dall'industria petrolifera e dalle evaporazioni di solventi organici nei processi industriali;
- *piombo*: la quota di questo inquinante attribuibile al traffico stradale dipende, nei vari Paesi, dal contenuto di piombo nella benzina e dall'importanza dell'industria metallurgica; in media è del 50%, e può giungere al 100% in alcune aree urbane;
- *benzene*: circa l'80% delle emissioni di questo inquinante è dovuto alle autovetture;
- *anidride carbonica*: si stima che i veicoli a motore a livello mondiale, emettano circa il 15% della CO₂ di origine antropica; nei Paesi industrializzati la proporzione può giungere al 40%; considerando l'uso complessivo di energia fossile nei trasporti, si giunge al 65%.

Uno schema riassuntivo del tipo di motori con cui sono equipaggiati i diversi veicoli è indicato in tabella 1, ove sono anche riportati i combustibili utilizzati e le principali emissioni inquinanti.

Tipo di motore	Combustibile	Principali emissioni	Tipo di veicolo
Ciclo Otto	benzina	CO, NO _x , Pb, idrocarburi	autovetture, autocarri, bus, motoscafi, motocicli
Due tempi	benzina	CO, NO _x , Pb, idrocarburi, particolato	motocicli, fuoribordo
Diesel	olio diesel	NO _x , particolato, SO _x , CO	autovetture, autocarri, bus, motrici ferroviarie, imbarcazioni, trattori
Turbine a gas (jet)	turbine oil	NO _x , particolato	aerei, imbarcazioni, motrici ferroviarie
Vapore	olio pesante, carbone	NO _x , SO _x , particolato	imbarcazioni

Tabella 1: Emissioni da fonti mobili.

Nelle aree urbane l'incidenza dei veicoli a motore sulla qualità dell'aria è maggiore che a scala regionale; al centro di un'area metropolitana il traffico può essere responsabile del

100% dei livelli dell'ossido di carbonio e del piombo, del 60% degli ossidi di azoto, del 10% degli ossidi di zolfo e del 50% del particolato

3. La regolamentazione delle emissioni.

Nell'intento di limitare l'inquinamento dovuto al traffico stradale, in tutti i Paesi più industrializzati sono state emanate norme che fissano i valori limite dei fattori di emissione. Le prime normative vennero emanate negli Stati Uniti, dapprima in California, dove il problema era più accentuato, e successivamente a livello federale, nel 1963; seguirono il Giappone (1966), il Canada e la maggior parte degli stati europei (1970-1972); in Italia la normativa per il contenimento delle emissioni è stata introdotta secondo le scadenze e le modalità previste in sede CEE; in altri Paesi europei, quali la Francia e la Germania, la normativa CEE è stata anticipata mediante provvedimenti locali. In particolar modo per l'Italia vale il DPCM 28/3/83 dal titolo: "Limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni e di esposizione relativi ad inquinamenti dell'aria nell'ambiente esterno." Tale DPCM ha individuato otto agenti inquinanti di cui ha fissato i limiti massimi di accettabilità. A questo ha fatto seguito il DPR del 24/5/88 n. 203, che ha introdotto i concetti di "valore limite" e di "valore guida". Attualmente, in sede CEE, è in vigore una normativa unificata (direttiva 91/441/CEE per le autovetture ed i veicoli commerciali leggeri, Direttiva 91/542/CEE per i veicoli pesanti). E' importante notare che i limiti posti dalla Direttiva 91/441/CEE sono riferiti a tutte le autovetture nuove di fabbrica, immesse sul mercato dal 1 gennaio 1993 (nuove immatricolazioni), e non ai soli nuovi modelli posti in produzione (nuove omologazioni), come in precedenza; pertanto la normativa risulta particolarmente condizionante ai fini del rinnovo del parco veicolare.

4. Un indicatore complessivo della qualità dell'aria: l'indice PSI.

Al fine di elaborare una metodologia per la determinazione delle concentrazioni di inquinanti in corrispondenza delle intersezioni semaforizzate si è reso necessario far riferimento ad un unico parametro in grado di riassumere, come un indicatore della qualità dell'aria, situazioni molto complesse.

L'indice PSI (Pollutant Standard Index) è un numero al quale viene correlato un giudizio di qualità dell'aria di facile comprensione, del tipo "buono, soddisfacente, pericoloso, ecc.". Questo indice può raggruppare in un'unica scala da 0 a 500 i dati sulle concentrazioni di 5

standard specifici (CO, O_x, NO₂, SO₂, PS, oltre al fattore sinergico PS x SO₂). Il PSI non è però un indice combinato che ingloba l'effetto di tutti e cinque i parametri, ma il suo valore finale è rappresentato dal valore massimo dei singoli indici PSI relativi a ciascun inquinante calcolato separatamente: l'indice è perciò calcolabile anche per uno solo dei parametri o solo per alcuni.

<i>Livello di rischio</i>	<i>CO</i> μg/m ³	<i>SO₂</i> μg/m ³	<i>PS</i> μg/m ³	<i>SO₂ x PS</i> μg ² /m ⁶	<i>NO₂</i> μg/m ³	<i>O_x</i> μg/m ³	<i>PSI</i>	<i>Rischio sanitario</i>	<i>Effetti sanitari generali</i>	<i>Precauzione</i>
<i>Tempo di campionamento (ore)</i>	8	24	24	-	1	1	1			
Standard secondario	5	80	75	-	-	80	50	buona		
Standard primario	10	365	260	-	100	160	100	moderata		
Preallarme	17	800	375	65000	1130	200	200	insalubre	Lieve aggravamento dei sintomi nei soggetti sensibili, e manifestazione di irritazioni nei soggetti sani.	Le persone con disfunzioni cardiache o respiratorie devono ridurre l'attività fisica, e le attività che implicino esposizione all'atmosfera esterna.
Allarme	34	1600	625	261000	2260	800	300	molto insalubre	Aggravamento significativo dei sintomi esistenti, riduzione della resistenza fisica nei portatori di disfunzioni cardiache o polmonari, larga diffusione di sintomi vari nei soggetti sani.	Le persone anziane o portatrici di insufficienze cardiache o polmonari devono restare nelle loro abitazioni e ridurre l'attività fisica.
Emergenza	46	2100	875	393000	3000	1000	400	pericolosa	Manifestazione prematura di alcune malattie, aggravamento dei sintomi e calo di resistenza fisica nei soggetti sani.	Le persone anziane e malate devono restare nelle loro abitazioni ed evitare attività fisica. La popolazione in genere deve evitare attività da svolgersi all'esterno.
Pericolo	56.7	2620	1000	49000	3750	1200	500	pericolosa	Decessi accelerati di malati ed anziani. Sintomi tangibili anche sulla popolazione sana.	La popolazione deve restare nelle abitazioni, con porte e finestre chiuse. E' necessario ridurre al minimo l'attività fisica ed evitare il movimento.

Tabella 2: Episodi pericolosi di inquinamento parametrati in funzione dell'indice PSI. Definizione degli stati di preallarme, allarme, emergenza e pericolo.

L'indice PSI (Pollutant Standard Index) è un numero al quale viene correlato un giudizio di qualità dell'aria di facile comprensione, del tipo "buono, soddisfacente, pericoloso, ecc."

Questo indice può raggruppare in un'unica scala da 0 a 500 i dati sulle concentrazioni di 5 standard specifici (CO, O_x, NO₂, SO₂, PS, oltre al fattore sinergico PS x SO₂). Il PSI non è però un indice combinato che ingloba l'effetto di tutti e cinque i parametri, ma il suo valore finale è rappresentato dal valore massimo dei singoli indici PSI relativi a ciascun inquinante calcolato separatamente: l'indice è perciò calcolabile anche per uno solo dei parametri o solo per alcuni.

La costruzione di questo indice è basata sull'equivalenza del livello di gravità degli eventi attesi per ciascun inquinante separatamente. Ovviamente uno stesso livello di gravità si raggiunge per concentrazioni differenti di ciascun inquinante; l'elaborazione dell'indice PSI consente di rendere confrontabili i rischi.

Per il calcolo del PSI viene impiegata la seguente formula, che esprime una funzione lineare con coefficienti non costanti:

$$PSI_i = \frac{b_{i+1} - b_i}{a_{i+1} - a_i} \cdot (x - a_i) + b_i \quad (1)$$

Se x è la concentrazione di inquinante, si cercano i valori dei coefficienti a_i nella colonna corrispondente dell'inquinante specifico per a_i < x < a_{i+1} della tabella 3.

L'indice PSI è stato molto usato negli USA ed è stato raccomandato dal Council of Environmental Quality per poter essere utilizzato mettendo a confronto dati nell'intera nazione.

i	b _i	CO	O _x	NO ₂	SO ₂	PS	SO ₂ x PS
		a _i	a _i	a _i	a _i	a _i	a _i
1	0	0.0	0	-	0	0	-
2	50	5.0	80	-	80	75	-
3	100	10.0	160	-	365	260	-
4	200	17.0	400	1130	800	375	65000
5	300	34.0	800	2260	1600	625	261000
6	400	46.0	1000	3000	2100	875	393000
7	500	56.7	1200	3750	2620	1000	490000

Tabella 3: Valori dei coefficienti a_i e b_i per il calcolo dell'indice PSI. Il coefficiente a_i è espresso per CO in mg/m³, per O_x, NO₂, SO₂ e PS in µg/m³, per SO₂ x PS in µg²/m⁶.

5. I modelli di emissione.

Per poter valutare l'effetto di un provvedimento sulle concentrazioni di un certo inquinante, è necessario innanzitutto conoscere il fattore d'emissione per il parco circolante

dell'inquinante in analisi. Si deve cioè conoscere la quantità di polluyente emessa in atmosfera da un generico veicolo del parco circolante. L'entità delle emissioni dipende da numerosi fattori:

- ☞ tipo ed uso del veicolo (peso a vuoto, entità del carico, efficienza aerodinamica);
- ☞ stato del motore (presenza di dispositivi per il contenimento delle emissioni, stato di manutenzione, funzionamento a caldo o a freddo);
- ☞ condizioni del moto (velocità ed accelerazione, marcia in piano o in pendenza);
- ☞ condizioni atmosferiche.

Un aspetto molto importante è costituito dalla evoluzione delle caratteristiche del parco veicolare: i veicoli prodotti in tempi più recenti presentano emissioni più contenute.

La variabilità del parco veicolare nel tempo richiede pertanto il progressivo aggiornamento dei modelli di emissione; questi debbono inoltre essere specificati in funzione della composizione locale del parco.

Anche la velocità di marcia è un fattore che esercita notevole peso sui livelli di emissione.

6. I modelli CORINAIR.

Una metodologia diffusa e importante per la determinazione delle emissioni da combustione, è quella CORINAIR (COoRdination - INformation - AIR), realizzata dall'Enea su mandato del ministero dell'Ambiente nell'ambito del progetto Corine (CO-oRdinated INformation of the Enviroment in the European Community), promosso dalla CEE. Il progetto CORINAIR è stato promosso e coordinato, a partire dal 1985, dalla Comunità Economica Europea al fine di creare un archivio di informazioni sullo stato dell'ambiente e sulle risorse della comunità e creare così un supporto alle strategie di salvaguardia dell'ambiente. Le attività del progetto CORINAIR nel nostro Paese sono state seguite dall'ENEA, che ha prodotto l'inventario delle emissioni relativo al 1985. Successivamente, nel 1991, si è proceduto, per il traffico stradale, ad un aggiornamento della metodologia di calcolo e dei fattori di emissione, ora riferiti al 1990. Nello studio del 1991 vengono considerate 4 categorie di veicoli (autovetture, veicoli commerciali leggeri, di peso totale inferiore a 3500 kg., veicoli commerciali pesanti, di peso totale superiore a 3500 kg., ciclomotori e motocicli), e tre condizioni operative (autostrade, strade extraurbane, strade urbane). Nell'ambito delle quattro categorie, i veicoli vengono ulteriormente suddivisi in classi (tabella 4).

PASSENGER CARS	
1 Gasoline < 1.4l PRE ECE ECE 15/00-01 ECE 15/02 ECE 15/03 ECE 15/04 Improved Conventional Open Loop Closed Loop	4 Diesel CC < 2.0l CC > 2.0l
2 Gasoline 1.4 - 2.0l PRE ECE ECE 15/00-01 ECE 15/02 ECE 15/03 ECE 15/04 Improved Conventional Open Loop Closed Loop	5 L P G 6 Two Stroke Gasoline Vehicles 7 LIGHT DUTY VEHICLES Gasoline Diesel
3 Gasoline > 2.0l PRE ECE ECE 15/00-01 ECE 15/02 ECE 15/03 ECE 15/04 Closed Loop	8 HEAVY DUTY VEHICLES Gasoline Veh. > 3.5 t Diesel Veh. 3.5 - 16 t Diesel Veh. > 16 t 9 MOTORCYCLES < 50 cm ³ > 50 cm ³ 2 stroke > 50 cm ³ 4 stroke
	10 OFF-ROAD VEHICLES Agriculture Forestry Industry Military

Tabella 4: Categorie di veicoli per i quali vengono proposti fattori di emissione distinti.

Gli inquinanti considerati sono raggruppati in 10 categorie (tabella 5). I rispettivi fattori di emissione sono espressi in grammi/km e risultano funzione della velocità media di deflusso oltre che della classe del veicolo.

CATEGORIA DI INQUINANTE	
NO _x (NO ed NO ₂)	espressi come equivalente in NO ₂
N ₂ O	
SO _x	espressi come equivalenti in SO ₂
VOC	espressi come equivalente in CH _{1.85}
CH ₄	
CO	
CO ₂	
NH ₃	
Particolato	
Pb	

Tabella 5: Categorie di inquinanti per i quali vengono definiti i fattori di emissione.

Per poter effettuare il calcolo delle emissioni inquinanti su base annua, che costituisce l'obiettivo del progetto CORINAIR, è necessario acquisire i dati inerenti alla composizione del parco veicolare, con riferimento alle categorie di veicoli indicate; per i veicoli di ciascuna classe occorre poi conoscere la percorrenza annua complessiva, disaggregata per tipo di strada e velocità media di spostamento. Tutti questi dati sono riportati nelle tabelle elaborate nell'ambito del progetto CORINAIR.

7. I modelli gaussiani.

I modelli gaussiani costituiscono uno strumento semplice e versatile per stimare la concentrazione degli inquinanti nell'atmosfera; il loro uso è tuttavia circoscritto a condizioni meteorologiche e topografiche ben definite. Nei modelli gaussiani si assume che l'inquinante venga trasportato dal vento nel verso in cui esso spira, e che la concentrazione dell'inquinante in un piano verticale, perpendicolare alla direzione del vento, possa essere espressa da una legge di tipo gaussiano.

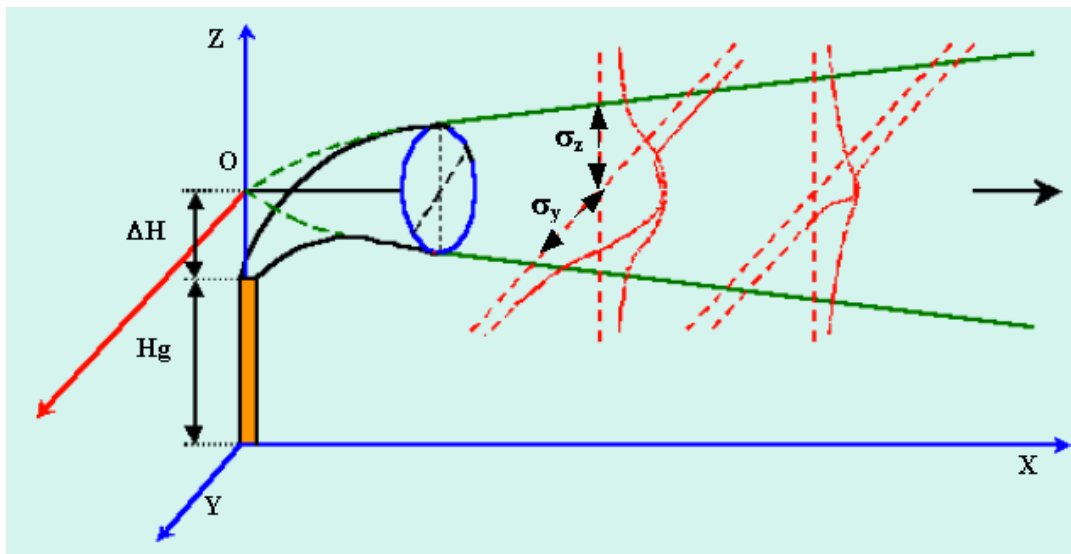


Figura 1: Distribuzione gaussiana delle concentrazioni di inquinante emesso da un camino lungo gli assi Y e Z trasversali al pennacchio, con le rispettive deviazioni standard σ_y e σ_z .

Nel caso di una sorgente puntiforme, viene introdotto un riferimento cartesiano, avente l'origine coincidente con la sorgente, l'asse X orizzontale e coincidente con la direzione del vento, l'asse Z verticale, l'asse Y orizzontale e perpendicolare al piano individuato dai primi due (figura 1). Nel piano verticale a distanza x dall'origine la distribuzione della concentrazione risulta pertanto espressa dalla relazione (2) :

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\left[\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \cdot e^{-\left[\frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]} \quad (2)$$

in cui è stato indicato con:

- **C(x,y,z)**: la concentrazione di inquinante nel punto di coordinate (x,y,z) (g/mc);
- **Q**: la quantità di inquinante emessa dalla sorgente nell'unità di tempo (g/sec);
- **u**: la velocità media del vento (m/sec);

- σ_y, σ_z : i parametri della dispersione (scarti quadratici medi della distribuzione della concentrazione) nelle direzioni y e z in funzione della distanza x e delle condizioni atmosferiche (m).

Nella sua formulazione standard, il modello gaussiano è sottoposto alle seguenti limitazioni:

- ✓ stazionarietà delle emissioni: si assume che le emissioni siano costanti e continue;
- ✓ stazionarietà ed omogeneità delle condizioni atmosferiche: si assume che non intervengano variazioni della direzione e della velocità media del vento, e della stabilità atmosferica, durante il trasporto dell'inquinante dalla sorgente al ricettore; questa ipotesi è ragionevole solo per brevi distanze ed in assenza di rapide variazioni delle condizioni meteorologiche;
- ✓ assenza di reazioni chimiche nell'atmosfera che interessino gli inquinanti, e di fenomeni di deposizione al suolo;
- ✓ estensione indefinita del dominio spaziale di dispersione degli inquinanti: si assume che la dispersione non sia alterata dalla presenza del suolo, di ostacoli, di stratificazioni termiche dell'atmosfera.

Per il calcolo delle concentrazioni degli inquinanti dovuto al traffico veicolare in ambito urbano, viene utilizzato il modello gaussiano standard, assumendo che le singole sorgenti puntiformi ed i ricettori si trovino tutti all'altezza del suolo; si utilizza pertanto l'espressione:

$$C = \frac{Q}{\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

I parametri meteorologici di input sono costituiti esclusivamente dalla velocità e dalla direzione del vento. Per i coefficienti di dispersione σ_y e σ_z si osserva che le espressioni valide per sorgenti statiche mal si prestano allorché le sorgenti sono costituite da veicoli in movimento; i coefficienti σ_y e σ_z vengono pertanto calcolati mediante le espressioni (4) e (5), stimate mediante misurazioni effettuate in prossimità di più strade:

$$\sigma_y = 1.85 \cdot \left\{ 1 + e^{\left[0.39 \cdot (\ln D)^3 - 4.76 \cdot (\ln D)^2 + 20.95 \cdot (\ln D) - 32.67 \right]} \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_y}{4.2} \quad (5)$$

I valori adottati risultano quindi dipendere esclusivamente dalla distanza D dall'asse stradale, e non dalle condizioni di stabilità atmosferica. Per il calcolo della concentrazione oraria massima si fa riferimento al traffico orario di punta, a condizioni di bassa velocità del vento, ed alla direzione del vento più sfavorevole, in relazione alle posizioni relative della strada (o delle strade) e del ricettore.

8. Il modulo TRAF-NETSIM di HCM/CINEMA.

La simulazione delle caratteristiche di circolazione in prossimità degli incroci semaforizzati e la conseguente valutazione dei livelli di emissione degli inquinanti richiede una procedura informatizzata che, in base alle condizioni di traffico, alle caratteristiche del parco veicolare ed al consumo di carburante consenta, appunto, di calcolare le emissioni di alcuni degli inquinanti più significativi sia in termini quantitativi che in relazione ai potenziali danni all'uomo e all'ambiente. Nell'ambito del presente studio è stato utilizzato il modello di simulazione TRAF-NETSIM contenuto all'interno del software HCM/CINEMA.

TRAF-NETSIM è un modello di simulazione del traffico urbano estremamente dettagliato, prodotto (circa 25 anni fa) dalla KLD Associates in accordo con la Federal Highway Administration (FHWA). In principio tale modello di simulazione era denominato semplicemente NETSIM. Questo programma è stato applicato ad un'ampia varietà di problemi d'area sia da tecnici che da ricercatori negli Stati Uniti, come pure in molti altri paesi ed è, forse, il modello di simulazione del traffico più diffuso. Le applicazioni di questo modello variano dalla valutazione del progetto del tempo semaforico per un'intersezione isolata, a problemi molto complessi, quale la valutazione del traffico nella periferia di alcuni quartieri di New York ad elevata densità di traffico. La versione iniziale di NETSIM fu realizzata nel 1971, e successivamente aggiornata nel 1973 e nel 1978. In seguito il modello fu integrato con il sistema di simulazione TRAF (anche questo un prodotto della KLD Associates) nel 1980. Dunque, la versione corrente del programma di simulazione è ora nota come modello TRAF-NETSIM. Dopo l'integrazione con TRAF e i successivi test, in pochi anni sono stati apportati diversi miglioramenti. Questi includono l'aggiunta di un controllo logico attuato, di una procedura di simulazione di manovre di svolta condizionali e di una logica di simulazione delle condizioni di deflusso in presenza di semaforo. Il modello TRAF-NETSIM è sostanzialmente una simulazione a tempo fisso

della dinamica di un ambiente di traffico urbano. Ogni veicolo nella corrente di traffico è rappresentato come un'entità distinta, che è “mossa” una volta ogni secondo, tenendo conto delle condizioni reali di traffico. Le traiettorie del veicolo sono calcolate in base alla logica del “veicolo che segue”, che è influenzato dai veicoli adiacenti, dai dispositivi di controllo del traffico, dall'attività pedonale, dalle operazioni di transito, dai veicoli parcheggiati e da altre condizioni che influenzano il comportamento del guidatore.

Le caratteristiche del processo di decisione rappresentato nel modello includono:

- 1) la reazione al segnale di giallo (per esempio, la decisione di entrare nell'intersezione durante il giallo o di fermarsi in corrispondenza della linea di stop);
- 2) la decisione, da parte del guidatore, di realizzare una svolta a sinistra opposta, scegliendo opportunamente un'”apertura” nella corrente di traffico in avvicinamento;
- 3) il tempo di reazione del guidatore e la risposta all'inizio di un segnale di verde. Per esempio, alcuni guidatori fermi durante il rosso, proveranno ad accelerare rapidamente non appena compare il verde, mentre altri guidatori saranno più lenti nella loro risposta;
- 4) la volontà di entrare in un'intersezione sapendo che in essa c'è una condizione di spillback (la condizione di spillback si ha quando, durante un ciclo semaforico, la coda di veicoli in corsia sovrassatura la stessa corsia, cioè la lunghezza della coda è maggiore della lunghezza della corsia);
- 5) la velocità di flusso libero con cui il guidatore desidera viaggiare, avendone l'opportunità. Se questa velocità non è raggiungibile nella corsia corrente, il guidatore può cercare di cambiare corsia, per raggiungere questa velocità in un'altra corsia.

9. Risultati forniti da TRAF-NETSIM.

Gli output di TRAF-NETSIM, definiti misure di efficienza (MoE), vengono sinteticamente enunciati di seguito.

Statistiche di Coda (figura 2).

- *Coda media più lunga per ciclo per corsia per un gruppo di corsie* – Il valore medio della massima coda per ogni ciclo, durante il periodo di picco.
- *Massima coda per corsia* – La coda più lunga per corsia, durante il periodo di picco, per ogni gruppo di corsie.

- *Percentuale massima del periodo di picco con spillback* – La maggiore percentuale di tempo in cui la coda sovrassatura una corsia. Questa misura è data per la corsia, nel gruppo di corsie, con la più lunga durata di spillback.
- *Percentuale di cicli con sovrassaturazione nella zona di svolta* – La percentuale di cicli, durante l’ora di picco, in cui uno o più veicoli non possono entrare nella zona di svolta, perché la zona è satura.
- *Percentuale di cicli in cui l’ingresso della zona di svolta è bloccato* – La percentuale di cicli, durante il periodo di picco, in cui uno o più veicoli non possono entrare nella zona di svolta, poiché la coda di quelli che non svoltano si estende oltre l’entrata della zona.
- *Quadro d’animazione che mostra la coda più lunga* – Il tempo (in minuti e secondi) in cui il display d’animazione raffigura la massima coda per una corsia. Questa misura è data per la corsia, in ogni gruppo di corsie, con la coda più lunga.

NETSIM Results for Case: GALERMO U.Usodimare /U.Galermo
 Viale A.Usodimare/Via San G.Galermo AM 8,00 - 9,00 Version 3.11

NETSIM Queue Statistics

App	Ln Grp	*Average Max. Q Per Lane (vehs)	*Max. Queue Per Lane (vehs)	*Max. Pct. Of Time That Q Overflows A Lane	Pct. Of Cycles With Turn Bay Overflow	Pct. Of Cycles Where Turner Can't Enter Bay Due To Queue Of Non-Turners	Animation Frame Showing Longest Queue
EB	L	2	3	0.8			10:16
	T	29	38	46.2			1:02
WB	T	38	38	18.7			10:55
	R	3	4	0.8			1:18
NB	LTR	15	28	2.3			12:19
SB	LR	26	38	33.2			6:06

*These performance measures are also shown on summary statistics screen

Hit any key or click mouse to continue

Figura 2: Schermata di TRAF-NETSIM relativa alle statistiche di coda.

Misure Ambientali (figura 3).

- ◆ *Carburante consumato* – Il numero di galloni (o litri) di carburante consumato, durante

il periodo di picco, da automobili, autocarri e autobus. Queste misure sono calcolate per l'attraversamento lungo ogni ramo, ed infine sommate per tutti i rami.

- ◆ *Consumo di carburante* – Il consumo medio di carburante, durante il periodo di picco, espresso in miglia per gallone (o chilometri per litro) per automobili, autocarri e autobus. Queste misure sono calcolate per l'attraversamento lungo ciascun ramo, e viene inoltre calcolata una media pesata (basata sui veicoli trip) per tutti i rami combinati.
- ◆ *Emissioni di inquinante* – Il livello di emissioni di inquinante, durante il periodo di picco, espresso in grammi per miglio (o grammi per chilometro) in un'ora per idrocarburi, monossido di carbonio e ossido d'azoto. Queste misure sono calcolate per tutti i rami combinati.

NETSIM Results for Case: GALERMO							U.Usodinare / U.Galermo	
Viale A.Usodinare/Via San G.Galermo							AM 8,00 - 9,00	
							Version 3.11	
NETSIM Environmental Statistics								
Fuel Consumption								
	Gallons			Miles Per Gallon				
	Autos	Trucks	Buses	Autos	Trucks	Buses		
EB	7.6	8.6	8.1	4.8	2.5	3.2		
WB	5.6	8.1	8.1	6.1	4.8	4.5		
NB	3.7	8.1	8.8	6.6	2.5	8.8		
SB	4.3	8.1	8.8	3.7	2.2	8.8		
All	21.2	8.9	8.2	5.2	2.7	3.9		
Auto Pollutant Emissions (Grams/Mile-Hour)							RTOR	
	HC	CO	NOX			Maneuvers Completed		
EB	689.1	17231.8	1922.5			8		
WB	517.2	13765.1	1579.9			8		
NB	335.7	9835.6	1893.5			8		
SB	341.6	5788.5	828.8			8		
All	478.9	11433.3	1356.2					

Hit any key or click mouse to continue

Figura 3: Schermata di TRAF-NETSIM relativa alle statistiche ambientali.

Misure Aggiuntive.

- ★ *Manovre RTOR* – Il numero di manovre di svolta a destra durante il rosso che si hanno su ogni ramo, durante il periodo di picco di quindici minuti.
- ★ *Velocità media* – La velocità media, in miglia orarie (o in chilometri orari), di viaggio in ogni gruppo di corsie.

In aggiunta alle misure d'efficienza (MoE), la simulazione rappresenterà graficamente le situazioni in cui i volumi specificati nel periodo di punta superano la capacità di un ramo, o i casi in cui qualche manovra di svolta nell'intersezione è sovrassatura. TRAF-NETSIM può anche creare file che descrivono tutte le manovre del veicolo, durante il periodo di punta di quindici minuti simulato. HCM/Cinema accede a questi file per realizzare una simulazione animata in 2-D (con possibilità di simulazione in 3-D) di tutte le manovre corrispondenti all'intersezione analizzata (figura 4).

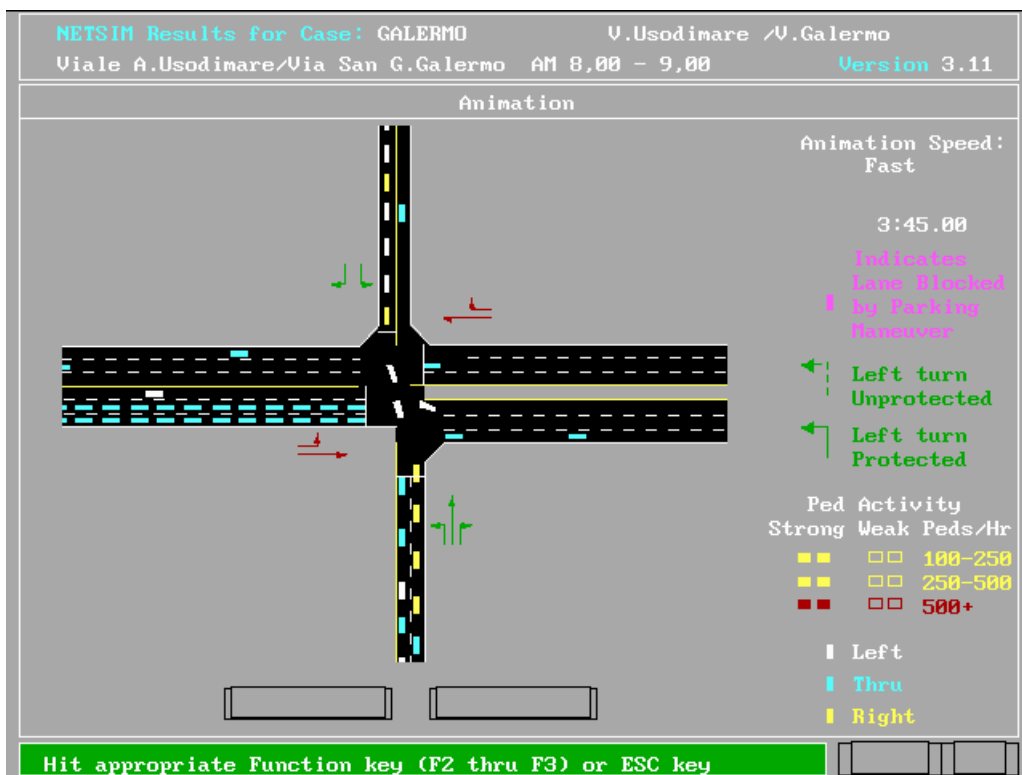


Figura 4: Frame dell'animazione di TRAF-NETSIM.

10. Calcolo dei coefficienti correttivi da applicare agli output di TRAF-NETSIM.

Le emissioni di inquinanti ricavati da TRAF-NETSIM sono riferite alle intersezioni delle circoscrizioni statunitensi, e si basano su valori di consumo di carburante e su condizioni del parco veicolare che risalgono al 1980.

Si è reso necessario, pertanto, per poter applicare il modello alla realtà del nostro paese, effettuare opportune correzioni ai risultati forniti dal modello medesimo.

La manipolazione degli output di HCM/Cinema, ha tenuto conto di tre fondamentali tipologie di fattori:

- ① i diversi livelli di emissione di inquinante, dovuti al miglioramento tecnologico dei veicoli circolanti;
- ② la diversa distribuzione del parco veicolare italiano rispetto a quello statunitense;
- ③ il diverso consumo di carburante in base ai diversi cicli di marcia (urbano, extraurbano, altro).

Di seguito sono riportate (figura 5) le distribuzioni del parco veicolare, con la distinzione tra veicoli pesanti e leggeri, dell'Italia e degli Stati Uniti.

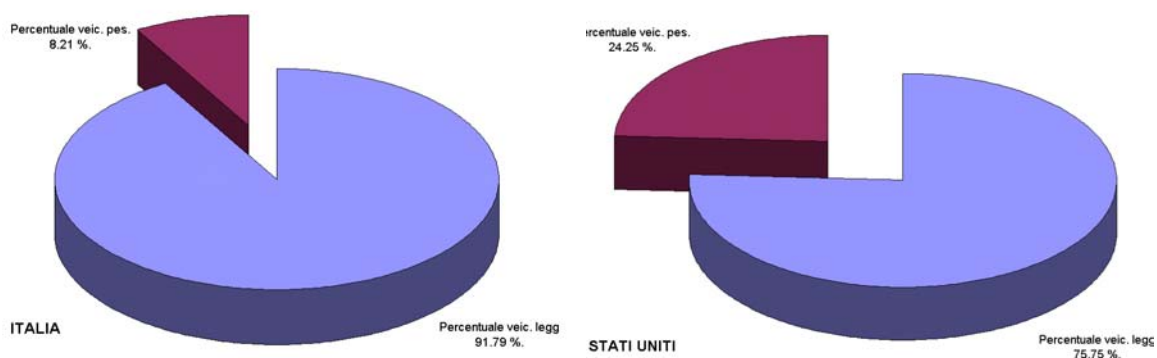


Figura 5: Distribuzione del parco veicolare in Italia e negli Stati Uniti.

Total National Emissions of Carbon Monoxide, 1940-95^a
(million short tons)

Source category	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1993	1994	1995	Percent of total, 1995
Highway vehicles	30.12	45.20	64.27	88.03	78.05	62.86	60.20	61.83	58.62	63.6%
Aircraft	0.00	0.93	1.76	0.51	0.74	0.97	1.02	1.06	1.05	1.1%
Railroads	4.08	3.08	0.33	0.07	0.10	0.12	0.12	0.12	0.13	0.1%
Vessels ^b	0.06	0.12	0.52	0.98	1.10	1.21	1.25	0.06	0.07	0.1%
Other off-highway	3.91	7.48	8.96	9.06	10.74	12.35	12.88	14.41	14.38	15.6%
Transportation total	38.17	56.81	69.87	98.64	90.73	77.5	75.47	77.48	74.26	80.6%
Stationary fuel combustion total	15.33	11.32	7.02	4.63	7.30	5.06	4.95	4.88	3.23	3.5%
Industrial processes total	7.28	11.64	10.28	9.84	6.95	5.23	5.28	5.42	5.67	6.2%
Waste disposal and recycling total	3.63	4.72	5.60	7.06	2.3	1.69	1.73	1.75	1.77	1.9%
Miscellaneous total	29.21	18.14	11.01	7.91	8.34	11.17	6.70	9.25	6.45	7.0%
Total of all sources	93.62	102.61	109.75	128.08	115.63	100.65	94.13	98.78	92.10	100.0%

Source:

U. S. Environmental Protection Agency, *National Air Pollutant Emission Trends, 1900-1995*, 1996, pp. A-6-A-9, and annual.
(Additional resources: <http://www.epa/oar/oaqps>)

Note:

Emission estimation methodology changes indicated by shaded areas. Transportation methodologies changed in 1970, while all others changed in 1990.

^aThe sums of subcategories may not equal total due to rounding.

^bRecreational marine vessels.

Tabella 6: Emissioni totali di monossido di carbonio, CO (1940-95). [Fonte O.R.N.L /1997]

Total National Emissions of Nitrogen Oxides, 1940-95^a
(million short tons)

Source category	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1993	1994	1995	Percent of total, 1995
Highway vehicles	1.33	2.14	3.98	7.39	8.62	7.49	7.51	7.67	7.61	34.9%
Railroads	0.66	0.99	0.77	0.50	0.73	0.93	0.95	0.95	0.99	4.5%
Other off-highway	0.33	0.55	0.67	1.13	1.69	1.91	2.04	2.15	2.00	9.2%
Transportation total	2.32	3.68	5.43	9.02	11.04	10.33	10.50	10.77	10.60	48.6%
Stationary fuel combustion total	3.73	5.16	7.37	10.06	11.32	11.48	11.70	11.63	10.08	46.3%
Industrial processes total	0.22	0.38	0.57	0.78	0.56	0.77	0.78	0.80	0.79	3.6%
Waste disposal and recycling total	0.11	0.22	0.33	0.44	0.11	0.08	0.08	0.09	0.09	0.4%
Miscellaneous total	0.99	0.67	0.44	0.33	0.25	0.38	0.22	0.37	0.23	1.1%
Total of all sources	7.37	10.09	14.14	20.63	23.28	23.04	23.30	23.66	21.78	100.0%

Source:

U. S. Environmental Protection Agency, *National Air Pollutant Emission Trends, 1900-1995*, 1996, pp. A-6-A-9, and annual.
(Additional resources: <http://www.epa/oar/oaqps>)

Note:

Emission estimation methodology changes indicated by shaded areas. Transportation methodologies changed in 1970, while all others changed in 1990.

^aThe sums of subcategories may not equal total due to rounding.

Tabella 7: Emissioni totali di ossidi di azoto, NO_x (1940-95). [Fonte O.R.N.L /1997]

Total National Emissions of Volatile Organic Compounds, 1940-95^a
(million short tons)

Source category	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1993	1994	1995	Percent of total, 1995
Highway vehicles	4.82	7.25	10.51	12.97	8.98	6.85	6.10	6.40	6.10	26.7%
Off-highway	0.78	1.21	1.22	1.54	1.87	2.12	2.21	2.26	2.24	9.8%
Transportation total	5.60	8.46	11.73	14.51	10.85	8.97	8.31	8.66	8.34	36.5%
Stationary fuel combustion total	1.98	1.44	0.88	0.72	1.05	0.92	0.90	0.89	0.71	3.1%
Industrial processes total	4.52	7.40	8.73	12.33	12.10	10.38	10.58	10.78	10.94	47.8%
Waste disposal and recycling total	0.99	1.10	1.55	1.98	0.76	2.26	2.27	2.27	2.41	10.5%
Miscellaneous total	4.08	2.53	1.57	1.10	1.13	1.07	0.52	0.69	0.45	2.0%
Total of all sources	17.16	20.94	24.46	30.65	25.89	23.60	22.58	23.28	22.87	100.0%

Source:

U. S. Environmental Protection Agency, *National Air Pollutant Emission Trends, 1900-1995*, 1996, pp. A-10-A-16, and annual.
(Additional resources: <http://www.epa.gov/oar/oaqps>)

Note:

Emission estimation methodology changes indicated by shaded areas. Transportation methodologies changed in 1970, while all others changed in 1990.

^aThe sum of subcategories may not equal total due to rounding. The EPA's definition of volatile organic compounds excludes methane, ethane, and certain other nonphotochemically reactive organic compounds.

Tabella 8: Emissioni totali di idrocarburi non combustibili, HC (1940-95). [Fonte O.R.N.L /1997]

I valori di emissioni di HC, CO e NO_x, in funzione del parco veicolare attualmente circolante negli Stati Uniti, sono stati forniti dalla ORNL, che ha dato anche le migliaia

totali percorse dai veicoli circolanti sulle strade (sia nel percorso urbano che in quello extraurbano) nello stesso anno; si sono, così, potute calcolare le emissioni di inquinanti per il 1995 nella realtà americana (tabelle 6, 7 e 8).

I livelli di emissioni in Italia, invece, sono stati dedotti dal progetto Corinair, ed in particolare sono state utilizzate le tabelle che riportano i valori delle emissioni degli inquinanti di interesse e il consumo di carburante per i tre percorsi (urbano, extraurbano ed altro) (tabelle 9 e 10).

	CO [g/km]	NO_x [g/km]	VOC [g/km]	CONSUMPTION [g/km]
URBAN	20.65	0.30	15.35	111.52
RURAL	7.50	1.02	7.20	66.00
HIGHWAY	8.70	0.72	5.90	56.93

Tabella 9: Emissioni di CO, NO_x, VOC e consumi di combustibile per veicoli a benzina, con motore a due tempi, di peso inferiore a 2.5 ton.

	CO [g/km]	NO_x [g/km]	VOC [g/km]	CONSUMPTION [g/km]
URBAN	30.00	3.00	3.60	120.0
RURAL	15.00	2.70	1.70	67.5
HIGHWAY	12.00	3.20	1.00	63.75

Tabella 10: Emissioni di CO, NO_x, VOC e consumi di combustibile per veicoli commerciali a benzina leggeri (peso inferiore 3.5 ton.)

Note le emissioni per i tre diversi cicli di marcia, si è passato al calcolo dei coefficienti correttivi, tramite il seguente iter procedurale:

1. si sono quantificate le emissioni complessive, per i tre tipi di inquinanti (in grammi al chilometro) per la realtà americana, dividendo le emissioni totali (grammi) per i chilometri globalmente percorsi dai veicoli statunitensi;
2. al fine di adattare alla realtà italiana i valori delle emissioni forniti dal progetto CORINAIR, si è proceduto in primo luogo all'effettuazione di una media pesata in funzione dei consumi di carburante relativi ai tre diversi cicli di marcia;
3. si è effettuata un'ulteriore media pesata dei valori di emissione dedotti al punto precedente, in funzione della distribuzione dei veicoli italiani nelle due categorie principali (veicoli leggeri e veicoli commerciali). In questo modo si sono ricavati i valori di emissione (in grammi al chilometro) adeguati a descrivere le condizioni tipiche della situazione viaria del nostro paese;

4. in ultimo, i coefficienti correttivi sono stati ricavati mediante il rapporto tra le emissioni totali di inquinante (gr/km) riferite al territorio italiano, con le emissioni totali (gr/km) relative alla realtà statunitense.

I coefficienti ottenuti mediante la procedura appena esposta costituiscono i fattori che devono essere moltiplicati per i valori di output di TRAF-NETSIM, al fine di dedurre livelli di emissione verosimili per le intersezioni italiane.

L'impiego dei modelli gaussiani consentirà, infine, la valutazione delle concentrazioni di inquinanti nelle aree interessate dal traffico veicolare le cui condizioni di moto sono condizionate dalle regolazioni semaforiche.

11. Conclusioni

la qualità dell'aria nelle aree urbane è costantemente pregiudicata dalle emissioni di inquinanti prodotte dal traffico veicolare. Le concentrazioni di sostanze inquinanti, oltre certi limiti, costituiscono un danno potenziale per l'ambiente e, soprattutto, per la salute dell'uomo.

In questo contesto, la condotta di guida imposta dalle regolazioni semaforiche induce a produzioni di inquinanti particolarmente perniciose (CO, HC e NO_x) e gravose anche dal punto di vista quantitativo.

Riuscire a prevedere le effettive concentrazioni di tali sostanze risulta, pertanto, un obiettivo prioritario al fine di predisporre tutti i possibili interventi atti a migliorare le caratteristiche qualitative dell'aria.

Con questo studio si è, pertanto, voluto prospettare l'impiego di modelli analitici e di procedure informatizzate adeguati a simulare le condizioni di viabilità in corrispondenza delle intersezioni semaforizzate.

In una memoria di prossima pubblicazione, verranno esposti i risultati conseguenti all'applicazione della metodologia proposta ad un gruppo di incroci regolati semaforicamente ed appartenenti ad una infrastruttura urbana (la circonvallazione nord della città di Catania).

12. Bibliografia.

[1] Angelino E., Tamponi M., Lanzani G., Rinelli S.: *“Strumenti modellistici di previsione dell'inquinamento”*, Le Strade, Anno XCVI, n. 1300, Febbraio 1994.

- [2] Bellasio R., Colucci A., Gualdi R., Merendi L., Tamponi M.: “*Strategie di intervento per ridurre l'inquinamento da traffico nelle aree urbane*”, Le Strade, Anno XCVI, n. 1303, Giugno 1994.
- [3] Cera L.: Fluidità e sicurezza, “*Progetto semaforico per incroci a raso*”, Ondaverde, Anno V, n. 24, 1993.
- [4] CNR: “*Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane*”, Bollettino Ufficiale n. 150, 15 Dicembre 1992.
- [5] Davis S. C. (1997): “*Transportation energy data book: edition 17*”, Center for Transportation Analysis Energy Division, Oak Ridge National Laboratory, Settembre 1997.
- [6] Deleidi E. (1997): “*Bruxelles contro l'auto. Perché alla gogna ?*”, Quattroruote, anno 42°, n. 504, Ottobre 1997.
- [7] Festa D. C. (1993): “*Metodi operativi per la V.I.A. delle infrastrutture di trasporto: modelli di settore per le infrastrutture stradali e ferroviarie*”, CNR PFT2, Dicembre 1993.
- [8] KLD Associates, Inc. and Polytechnic University: “*HCM/Cinema, The Full Picture on intersection capacity and level of service, User Guide*”, Copyright 1990, KLD Associates, Inc. All rights reserved.
- [9] Olivari M.: “*Una proposta metodologica per correlare qualità ambientale e livelli di servizio di strade urbane*”, Il trasporto pubblico nei sistemi urbani e metropolitani (Vol. 2) - Ed. Franco Angeli -1997.
- [10] Podestà C., Cemin A., Maja R., Pozzi M., Sada S. (1997): “*Modelli di stima delle emissioni inquinanti a livello areale, di rete e di singola intersezione*”, Convegno CNR PFT2, Taormina, Novembre 1997.
- [11] Rathi A. K., Santiago A. J.: “*Identical traffic Streams in the TRAF-NETSIM simulation program*”, Traffic Engineering + Control, Vol. 31, n. 6, Giugno 1990.
- [12] Rathi A. K., Santiago A. J.: “*The new NETSIM simulation program*”, Traffic Engineering + Control, Vol. 31, n. 5, Maggio 1990.
- [13] Transportation Research Board (Ottobre 1994): “*Highway Capacity Manual*”, Capitolo 9 “*Signalized Intersections*”.
- [14] Vismara R.: “*Ecologia applicata*”, (Inquinamento e salute umana - Criteri di protezione dell'aria, delle acque, del suolo - Valutazione di impatto ambientale - Esempi di calcolo) - Ed. Hoepli - 1992