

**ANALISI DELLE EMISSIONI INQUINANTI DA TRAFFICO URBANO TRAMITE  
STRUMENTI DI MICROSIMULAZIONE: UN CASO DI STUDIO**

Giuseppe GUIDO<sup>1</sup> e Antonello MISCIMARRA<sup>2</sup>

1 Dipartimento di Pianificazione Territoriale – Università degli Studi della Calabria, via P. Bucci cubo 46/B, 87030, Arcavacata di Rende (CS)

2 Dipartimento di Meccanica – Università degli Studi della Calabria, via P. Bucci cubo 45, 87030, Arcavacata di Rende (CS)

**SOMMARIO**

Gli inquinanti prodotti dai sistemi di trasporto costituiscono una rilevante quota delle emissioni nocive che si accumulano in atmosfera. È proprio questo il motivo per cui le aree urbane, caratterizzate da elevato flusso veicolare, sono soggette ad un elevato inquinamento con valori che superano periodicamente i limiti massimi. Considerando sia la normativa di riferimento sulle emissioni inquinanti da autoveicoli che i limiti imposti sulle concentrazioni delle principali sostanze inquinanti in atmosfera, nel presente lavoro si è affrontato uno studio sulle reali condizioni che si sviluppano in ambiente cittadino attraverso un'analisi delle componenti di traffico. I dati di riferimento, ottenuti tramite una serie di rilievi di traffico, sono stati utilizzati per la generazione della matrice degli spostamenti e, successivamente, impiegati per la simulazione, tramite modelli matematici di microsimulazione implementati su software specifico (Integration). Il lavoro, oltre ad essere utile nella comprensione delle dinamiche locali che regolano la diffusione degli inquinanti e di quelle a scala più ampia che coinvolgono i cambiamenti climatici dovuti alla emissione di gas serra, ha dimostrato che gli strumenti utilizzati per analizzare i complessi fenomeni correlati al traffico veicolare costituiscono ottimi supporti per la individuazione e la definizione delle strategie e delle priorità che i decisori e i pianificatori devono attuare per la salvaguardia dell'ambiente e della salute pubblica.

## 1 INTRODUZIONE

I sistemi di trasporto sono sistemi complessi aventi come obiettivo la fruizione di un servizio, quello della mobilità di entità materiali (cose e persone). Sono a loro volta composti da sottosistemi tra loro strettamente legati ed interagenti, e che possono essere sostanzialmente divisi in due categorie: il sottosistema delle infrastrutture fisiche e organizzative indispensabili alla fruizione del servizio, e quello degli utenti che lo utilizzano. Un terzo sottosistema, particolarmente importante ma spesso non considerato, o non considerato adeguatamente, nell'analisi dei sistemi di trasporto è quello che viene definito *ambiente esterno*. Esso ha una duplice funzione, essendo allo stesso tempo sovrastruttura e sottosistema interagente con gli altri; per tale motivo non è possibile prescindere dall'analisi degli effetti che il sistema di trasporto comporta su di esso.

Analizzare tale struttura articolata significa affrontare un problema altrettanto complesso, partendo dalla conoscenza dettagliata di tutti gli elementi e, soprattutto, dalla definizione di un adeguato modello di studio.

L'uso di un software di simulazione rientra proprio nell'ottica della possibilità di rappresentazione e studio di sistemi e situazioni difficilmente analizzabili altrimenti.

Sebbene più dispendioso rispetto all'analisi meramente matematica del sistema a causa della mole di informazioni necessaria, i modelli di simulazione, che comunque si rifanno a modelli matematici descrittivi delle caratteristiche del sistema oggetto di studio, riescono a fornire un grado di dettaglio elevatissimo. Inoltre consentono lo studio di scenari ipotizzabili attraverso la variazione di parametri caratteristici.

I dati di riferimento sono stati ottenuti da una serie di rilievi di traffico nell'area oggetto di studio. Si tratta di una zona commerciale caratterizzata dalla presenza di un grosso centro commerciale all'interno del comune di Rende (CS), selezionata per gli elevati volumi di traffico da cui si originano elevate emissioni. Tenendo presente che all'interno delle aree urbane sono presenti anche altre fonti inquinanti legate alle attività antropiche (riscaldamento domestico, presenza di attività artigianali e/o industriali), il quadro all'interno del nucleo urbano sembra essere piuttosto preoccupante, e costituiscono poco più che palliativi le iniziative intraprese negli ultimi anni.

I dati sono serviti per la creazione della matrice origine/destinazione, valutando la domanda (in base ai differenti sistemi di trasporto utilizzati) e l'offerta (la rete infrastrutturale selezionata) e sono stati, successivamente, impiegati per la simulazione, tramite modelli microsimulazione implementati su software specifico (*Integration*). La modellazione e la successiva simulazione del sistema permettono di effettuare una valutazione attenta delle possibili modifiche a cui il sistema è soggetto, o degli scenari ipotizzabili, in funzione del cambiamento di alcuni parametri caratteristici delle componenti principali (veicoli,

infrastruttura, ambiente). Il modello di microsimulazione, in particolare, tramite l'aggiornamento dei parametri del traffico veicolare, consente di riprodurre il movimento dei singoli veicoli e permette il tracciamento delle traiettorie spazio-temporali dall'origine dello spostamento alla destinazione.

L'analisi, condotta congiuntamente all'impiego di un modello per la stima della dispersione degli inquinanti nell'atmosfera (CALINE 4), ha consentito di valutare ad intervalli definiti di tempo gli effetti prodotti dal flusso di traffico definito dal modello e, pertanto, di stimare l'impatto ambientale che esso genera sull'area prescelta.

## 2 OBIETTIVI E DESCRIZIONE DELLO SCENARIO DI PARTENZA

Il presente lavoro è stato focalizzato sulla determinazione delle emissioni inquinanti da traffico urbano in una zona particolarmente congestionata dell'asse Rende-Cosenza, in cui la presenza dell'Università della Calabria influenza in modo considerevole la mobilità e la stessa qualità della circolazione. La presenza di un polo attrattore come il centro commerciale in posizione piuttosto baricentrica rispetto alle due zone comunali aggrava la situazione già particolarmente critica del flusso dovuto ai soli *spostamenti di attraversamento*, incrementando il flusso veicolare da e verso l'area analizzata. Lo scenario di partenza, quindi, è particolarmente delicato, rappresentato da una rete sovraccarica e un conseguente elevato tasso di inquinamento atmosferico.

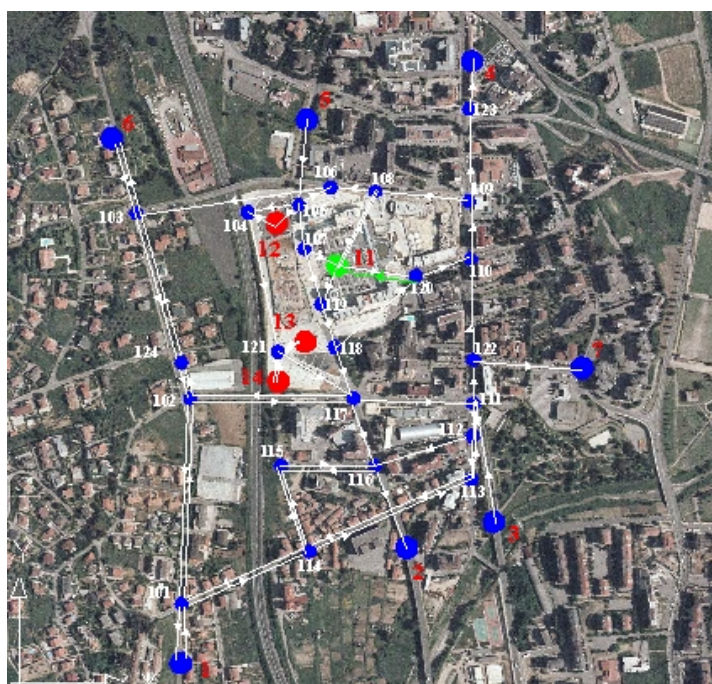


Figura 1 Schematizzazione della rete infrastrutturale

C'è da tenere presente che lo studio è stato affrontato analizzando esclusivamente il traffico urbano, senza tenere in considerazione il flusso veicolare che si rileva sulla vicina autostrada, composto in buona parte da mezzi pesanti con un alto grado di emissioni di inquinanti. Le concentrazioni prese in esame sono, quindi, da attribuirsi esclusivamente come *contributo locale*, mentre non viene considerato affatto il *contributo di area* che presuppone l'analisi di una rete estesa.

I dati rilevati sul flusso di traffico sono stati suddivisi in funzione delle diverse tipologie di veicoli. Tale suddivisione è stata conservata nella successiva fase di simulazione considerando i differenti valori di emissione in funzione della cilindrata, del peso, dell'attrito del veicolo e dei principali fattori che influiscono sul rendimento termico del motore e sui livelli di inquinanti emessi dal veicolo.

Per la valutazione delle emissioni sono stati considerati i limiti imposti dalla vigente normativa in merito ai valori massimi di inquinamento consentiti.

I valori riscontrati sono stati comparati per differenti ipotesi di scenario; è stata infatti proposta una serie di possibili modifiche (ad esempio di tracciato) alla rete esistente, valutando le effettive variazioni rispetto al caso iniziale.

### **3 LA SIMULAZIONE**

Ormai sono numerosi i programmi di microsimulazione (Festa et al., 2002) messi a punto e utilizzati soprattutto in ambito di ricerca o dagli enti pubblici e/o privati che hanno il compito della gestione del traffico veicolare. Nel panorama delle possibili soluzioni, il programma scelto per effettuare le simulazioni è *Integration* (Van Aerde, 1995). Si tratta di un programma di microsimulazione del traffico ideato negli anni '80 alla Queen's University di Kingston, in Canada ed integra perfettamente un modello di simulazione e un modello di assegnazione. Il flusso di traffico viene rappresentato da una serie di veicoli individuali, che rispettano singolarmente delle relazioni di deflusso macroscopiche definite per ogni ramo della rete.

*Integration* rileva i movimenti longitudinali e trasversali dei veicoli con intervalli temporali di 1/10 di secondo. Questo tipo di approccio consente una dettagliata descrizione di fenomeni altrimenti non rappresentabili. Il microsimulatore permette di rappresentare le principali caratteristiche del flusso di traffico in modo variabile nel tempo e con continuità, e non come sequenza di stati stazionari.

*Integration* rappresenta i flussi di traffico basandosi su assunzioni inerenti il flusso sin dal momento in cui un generico veicolo comincia il suo viaggio, cioè dal momento della generazione della domanda a partire dalle informazioni presenti sulla matrice O/D. La determinazione dei flussi di traffico è conseguita attraverso particolari strategie di controllo

del distanziamento dagli altri veicoli. Una volta posizionatosi il veicolo computa la sua nuova velocità a partire dalla sua nuova posizione e al nuovo distanziamento dal veicolo precedente, e così per i successivi istanti di tempo, fino alla destinazione. Questo permette di rappresentare e gestire in maniera corretta i fenomeni di propagazione delle code e i tempi di attesa alle intersezioni semaforiche.

Secondo la logica di assegnazione del traffico di Integration la selezione del ramo successivo in cui immettersi per completare il percorso è effettuata in base a varie informazioni, fornite al veicolo utilizzando delle matrici. Percorrendo il ramo, ogni veicolo cerca la matrice “rilevante” sulla base del ramo attraversato, in maniera tale da raggiungere la destinazione nel miglior modo possibile. Questo processo è ripetuto ogni volta che il veicolo percorre un arco del percorso fino al ramo il cui nodo finale coincide con la destinazione del viaggio. I movimenti di svolta risultano come scelte specifiche per ogni veicolo, piuttosto che da percentuali arbitrarie assegnate prima della simulazione.

Integration consente una modellizzazione abbastanza fedele alla realtà di ciò che succede in corrispondenza delle intersezioni semaforiche. In Integration un ramo di un intersezione semaforica viene considerato virtualmente uguale ad un ramo autostradale, se non fosse che le uscite dei veicoli al ramo vengano periodicamente interrotte e che le velocità libere e i tassi di saturazione assumano usualmente valori abbastanza bassi. L'interruzione del flusso di traffico avviene quando il semaforo è nella fase di rosso effettivo. I veicoli che si apprestano a raggiungere la fine del ramo e incontrano la luce rossa, seguendo la logica di car-following, interpretano il segnale luminoso rosso come un veicolo addizionale posizionato alla fine di ogni corsia del ramo. Questo veicolo virtuale crea una riduzione del distanziamento percepito dai veicoli determinando un rallentamento dei veicoli in arrivo. Si ottiene così l'arresto del primo veicolo che sopraggiunge in corrispondenza della linea di stop, mentre i veicoli che sopraggiungono formano una coda orizzontale, in cui il distanziamento minimo tra i veicoli è governato dalla densità limite assegnata al ramo interessato dal flusso.

Al comparire del segnale di verde il veicolo virtuale che si trova in corrispondenza della linea di stop viene rimosso e il primo veicolo in coda trova davanti a sé un distanziamento molto grande sul ramo successivo.

Per il corretto funzionamento del programma occorre fornire in input tutti i dati necessari per la modellizzazione del sistema. Essi vengono inseriti in Integration come dei files di testo o sotto forma di tabelle. Occorre creare dei file per il settaggio dei parametri globali della simulazione e per l'individuazione stessa, tramite informazioni su nome e directory di appartenenza, dei files stessi; si possono inoltre dare delle indicazioni essenziali per la costruzione della rete e per tutti i fenomeni modellizzabili dal programma: le coordinate, le caratteristiche e gli attributi dei nodi della rete; le strutture, le caratteristiche e le coordinate degli archi; i piani di semaforizzazione; la domanda O-D di traffico; le descrizioni degli

incidenti; le caratteristiche tecniche degli autoveicoli per il calcolo delle emissioni inquinanti; informazioni aggiuntive.

Nel lavoro l'attenzione è stata focalizzata nella modifica ed implementazione del file corrispondente al parco veicolare, che è stato aggiornato tenendo conto delle condizioni delle rete infrastrutturale e di quelle socio-economiche dell'area di studio.

I dati relativi ai veicoli tipo forniti per default dal programma sono, infatti, corrispondenti al parco statunitense. Non si è potuto intervenire sul tipo di carburante impiegato, e di conseguenza l'intero parco è stato considerato avente motore a benzina e marmitta catalitica, anche se buona parte degli autoveicoli (in particolare quelli di nuova immatricolazione) e gran parte degli automezzi pesanti dispongono di motore diesel. Questo ha come conseguenza l'impossibilità di valutare le emissioni di ossidi di zolfo che provengono principalmente da questo tipo di motore.

L'intervento sulla tipologia veicolare ha influito sul livello di emissioni inquinanti prodotto. Il modello impiegato da Integration, difatti, calcola la velocità dei veicoli ogni decimo di secondo e da questo effettua il computo del consumo del carburante per ogni veicolo, in base alla sua velocità corrente. Inoltre, sulla scorta delle informazioni ricevute riguardo il cambio di velocità, secondo per secondo, viene determinato il quantitativo di carburante addizionale consumato a causa delle accelerazioni e delle decelerazioni. Questo permette di effettuare una determinazione accurata dell'effettivo consumo di carburante per qualunque tipo di rete o condizione di traffico. I coefficienti di default, utilizzati nella stima del consumo di carburante in condizioni stazionarie o derivante da accelerazioni, sono definiti internamente al modello. Un ulteriore quantitativo di carburante addizionale è stimato nel programma in relazione alla temperatura del motore del veicolo quando non è ancora in temperatura, durante la prima parte del viaggio.

I modelli per il computo dell'emissione di inquinante vengono messi in relazione al modello di consumo di carburante, ed operano, in maniera analoga al precedente, su una base secondo per secondo. Essi stimano le emissioni di idrocarburi, monossido di carbonio e ossido di azoto, a intervalli di un secondo. Le caratteristiche che influenzano tali modelli sono sensibili alla velocità del veicolo, alla temperatura dell'ambiente circostante e al tempo necessario alle marmitte catalitiche dei veicoli per entrare in temperatura durante la prima parte del viaggio.

È stato dimostrato con delle applicazioni che le emissioni di questi tre componenti sono correlate al tempo di viaggio del veicolo, alla distanza, alla velocità e al consumo di carburante in modo non lineare:

$$e_{si}^k = e_{si}^k(V, a, t, C)$$

dove

$e_{si}$  = tasso unitario di emissione nello spazio;

$V$  = velocità istantanea;

$a$  = accelerazione istantanea;

*t = tempo di viaggio;*

*C = consumo di carburante.*

Il modello impiegato risulta, dunque, molto più dettagliato del modello MOBILE (EPA, 1993), che considera esclusivamente una dipendenza dalla velocità media, anche se non viene preso in esame l'età del veicolo e lo stato di manutenzione.

Dai dati elaborati durante la simulazione vengono estratti gli output, in veste grafica o in formato testo. Esiste la possibilità di produrre degli output con informazioni dettagliate, ottenute ad intervalli temporali l'una dall'altra, per quanto riguarda tutte le condizioni di traffico registrate durante la simulazione.

#### **4 I RISULTATI DELL'ANALISI E IL CONFRONTO FRA GLI SCENARI**

Per analizzare gli effetti prodotti dai flussi veicolari sulla mobilità e, in special modo, sull'ambiente sono stati simulati diversi scenari rappresentativi della situazione reale e, successivamente, ipotizzati alcuni interventi per risolvere evidenti criticità riscontrate durante la prima fase dello studio.

Dopo aver effettuato rilievi in più sezioni della rete oggetto di studio è stato possibile ricostruire la matrice O/D degli spostamenti per classe di veicolo; ma non potendo simulare che quattro diverse tipologie di veicoli contemporaneamente, sono state analizzate e simulate tre diverse configurazioni della composizione del parco veicolare, ritenendo il campione rappresentativo dei mezzi realmente in uso nell'area in esame (Tabella 1).

*Prima configurazione del flusso veicolare:* auto di piccola cilindrata (Fiat Punto 1.3 MJ) nella percentuale del 50% del totale del flusso di autoveicoli; auto di grande cilindrata (Mercedes Classe C 180) nella percentuale del 50% del totale del flusso di autoveicoli; autobus (OM 447 HLA); veicolo commerciale (Renault Kangoo 1.9 Dci).

*Seconda configurazione del flusso veicolare:* auto di piccola cilindrata (Fiat Punto 1.3 MJ) nella percentuale del 75% del totale del flusso di autoveicoli; auto di grande cilindrata (Mercedes Classe C 180) nella percentuale del 25% del totale del flusso di autoveicoli; autobus (OM 447 HLA); veicolo commerciale (Renault Kangoo 1.9 Dci).

*Terza configurazione del flusso veicolare:* auto di piccola cilindrata (Toyota Yaris 1.0) nella percentuale del 33,33% del totale del flusso di autoveicoli; auto di media cilindrata (Ford Focus 1.8 Tdci) nella percentuale del 33,33% del totale del flusso di autoveicoli; auto di grande cilindrata (BMW Serie3 320I) nella percentuale del 33,33% del totale del flusso di autoveicoli; autobus (OM 447 HLA).

*Tabella 1* Composizione dei flussi di traffico

Configurazione	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1	Fiat Punto 1.3 MJ (50%)	Mercedes Classe C 180 (50%)	Bus OM 447 HLA	Renault Kangoo 1.9 Dci
2	Fiat Punto 1.3 MJ (75%)	Mercedes Classe C 180 (25%)	Bus OM 447 HLA	Renault Kangoo 1.9 Dci
3	Ford Focus 1.8 Tdci (33,3%)	BMW Serie3 320I (33,3%)	Toyota Yaris 1.0 (33,3%)	Bus OM 447 HLA

Dei mezzi di cui sopra si riportano le caratteristiche principali fornite in input al software per la valutazione delle prestazioni (Tabella 2).

*Tabella 2* Caratteristiche dei veicoli

Marca	Modello	Cilindrata	Potenza (kW)	P <sub>tot</sub> (kg)	Lunghezza (m)	P <sub>ad</sub> (Kg)	P <sub>ad</sub> /P <sub>tot</sub>	n	m	C <sub>d</sub>	A	C <sub>r</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>
Fiat	Punto 1.3 MJ	1248	51	1380	3,87	910,8	0,66	0,8	0,7	0,45	2,46	1,5	0,0473	0,0021	6,4
Ford	Focus 1.8 Tdci	1753	85	1720	4,17	1135,2	0,66	0,8	0,7	0,5	2,38	1,5	0,0473	0,0021	6,4
Mercedes	Classe C 180	1998	95	1905	4,54	1257,3	0,66	0,8	0,7	0,5	2,54	1,5	0,0473	0,0021	6,4
BMW	Serie 3 320I Eletta	2171	125	1865	4,47	1230,9	0,66	0,8	0,7	0,5	2,45	1,5	0,0473	0,0021	6,4
Toyota	Yaris 1.0	998	50	1280	3,61	844,8	0,66	0,8	0,7	0,5	2,49	1,5	0,0473	0,0021	6,4
Renault	Kangoo 1.9 DCI	1870	62	2000	4,05	1320	0,66	0,8	0,7	0,6	3,12	1,5	0,0473	0,0021	6,4
Mercedes	OM 447 HLA	11967	148	20000	11,86	13200	0,66	0,8	0,7	0,7	7,32	1,5	0,0473	0,0456	6,8

dove:

Pad = peso aderente

Ptot = peso totale a pieno carico

Pad/Ptot = rapporto tra Peso aderente e Peso totale

n = rapporto di trasmissione

m = coefficiente di attrito

Cd =coefficiente di resistenza dell'aria

A = area frontale

Cr = coefficiente di rotolamento

c1 = coefficiente che tiene conto della densità dell'aria e della conversione della velocità da m/s a km/h

c2 = prima costante della resistenza al rotolamento

c3 = seconda costante della resistenza al rotolamento

I flussi veicolari, così composti, sono stati assegnati alla rete nella sua configurazione reale ed è stato possibile valutare una serie di indicatori di prestazione, quali il tempo totale speso, il consumo di carburante e le emissioni di HC, CO ed NOx.

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni effettuate tramite l'ausilio di Integration per le tre configurazioni dei flussi di traffico.

*Tabella 3* Indicatori di prestazione relativi alla simulazione dello scenario attuale

	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3
N° veicoli	6184	6213	6336
veic-km	5019	5039	5153
media veic-km	0,812	0,811	0,813
tempo totale speso (h)	402,13	537,89	527,01
tempo di perc. medio (min)	3,90	5,19	4,99
HC (g) Tot	1111	1165	1085
CO (g) Tot	9794	11879	11202
NOx (g) Tot	1267	1456	1274
Consumo carburante (l)	900	990	930
HC (g)/veic	0,180	0,188	0,171
CO (g)/veic	1,584	1,912	1,768
NOx (g)/veic	0,205	0,234	0,201
Consumo carburante/veic (l)	0,146	0,159	0,147
HC (g/veic*km)	0,222	0,232	0,210
CO (g/veic*km)	1,951	2,358	2,175
NOx (g/veic*km)	0,252	0,289	0,247

La grande concentrazione di flussi veicolari e la conseguente congestione in alcune sezioni della rete stradale producono fenomeni di stop and go, con inevitabili cicli di decelerazioni-accelerazioni per i veicoli stessi. L'incremento di questi fenomeni produce ingenti emissioni di inquinanti.

Una delle cause principali della congestione del traffico è individuabile nella presenza di una intersezione semaforica localizzata nei pressi degli accessi/egressi del polo commerciale dell'area oggetto di studio.

L'intersezione semaforica interessa tre correnti di traffico distribuite su tre bracci (archi) dell'intersezione stessa, il più carico dei quali risulta quello orientato in direzione Nord-Sud.

Per completezza di valutazione si riportano i risultati forniti dal modello di microsimulazione in merito ai valori di emissioni inquinanti prodotte dai veicoli transitanti sui tre archi di cui sopra (Tabella 4).

*Tabella 4* Indicatori di prestazione relativi alla simulazione dello scenario attuale per gli archi dell'intersezione semaforica

	Link 33	Link 39	Link 40
N° veicoli	911	51	208
Lunghezza (km)	0,086	0,140	0,258
HC (g) Tot	63,31	8,28	43,18
CO (g) Tot	450,52	51,92	287,26
NOx (g) Tot	63,93	5,42	36,26
HC (g/veic*km)	0,808	1,160	0,805
CO (g/veic*km)	5,745	7,272	5,353
NOx (g/veic*km)	0,816	0,759	0,676

Dopo avere effettuato l'analisi e la valutazione degli effetti prodotti dalla mobilità nel contesto studiato, corrispondente allo stato attuale, si è provveduto a valutare gli effetti prodotti da alcune modifiche apportate alla circolazione dei veicoli.

In particolare, è stato analizzato uno scenario di progetto in cui l'intersezione prossima ai varchi di accesso al centro commerciale non fosse regolamentata da impianto semaforico e fosse, inoltre, inibito l'attraversamento della corrente di flusso principale.

I risultati delle simulazioni dello scenario di progetto, effettuate per le stesse configurazioni dei flussi di traffico analizzate in precedenza, sono riportati di seguito.

*Tabella 5* Indicatori di prestazione relativi alla simulazione dello scenario di progetto

	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3
N° veicoli	6184	6236	6336
veic-km	5199	5229	5371
media veic-km	0,841	0,839	0,848
tempo totale speso (h)	384,03	352,24	377,54
tempo di perc.medio (min)	3,73	3,39	3,58
HC (g) Tot	1026	999	976
CO (g) Tot	9418	11408	11149
NOx (g) Tot	1247	1410	1284
Consumo carburante (l)	843	847	831
HC (g)/veic	0,166	0,160	0,154
CO (g)/veic	1,523	1,829	1,760
NOx (g)/veic	0,202	0,226	0,203
Consumo carburante/veic (l)	0,136	0,136	0,131
HC (g/veic*km)	0,197	0,191	0,182
CO (g/veic*km)	1,811	2,180	2,075
NOx (g/veic*km)	0,240	0,269	0,239

Da una prima analisi di confronto tra i risultati ottenuti per gli scenari studiati, si evince un netto miglioramento delle prestazioni della rete, ancor più evidente se rapportato alle differenze riscontrate negli indicatori relativi agli archi confluenti nell'intersezione oggetto delle modifiche (Tabella 6).

*Tabella 6* Indicatori di prestazione relativi alla simulazione dello scenario di progetto per gli archi dell'intersezione

	Link 33	Link 39	Link 40
N° veicoli	899	54	260
Lunghezza (km)	0,086	0,140	0,258
HC (g) Tot	28,705	2,817	17,968
CO (g) Tot	314,837	38,121	198,716
NOx (g) Tot	44,470	3,634	26,112
HC (g/veic*km)	0,371	0,373	0,268
CO (g/veic*km)	4,072	5,042	2,962
NOx (g/veic*km)	0,575	0,481	0,389

I risultati mettono in evidenza una considerevole riduzione di emissioni inquinanti per veicolo e per chilometro, a fronte di un incremento percentuale di veicoli sulla rete (archi 39 e 40).

La riduzione del numero di stop per veicolo e, quindi, una minor frequenza di cicli di decelerazioni-accelerazioni, oltre ad un miglior livello di servizio della rete, riscontrato soprattutto all'intersezione, producono effetti benefici sull'impatto ambientale.

L'analisi effettuata tramite l'applicazione del software di microsimulazione del traffico ha, pertanto, reso possibile la determinazione degli effetti prodotti sulla circolazione e sull'impatto ambientale dalle ipotesi di progetto, difficilmente valutabile con altre tecniche.

## 5 IMPIEGO DI MODELLI DI DISPERSIONE

L'analisi effettuata attraverso i modelli di microsimulazione ha portato alla determinazione delle quantità complessive di sostanze prodotte dal parco veicolare considerato. Tali valori assumono un reale significato solo riferendoli all'estensione dell'area di studio selezionata, cioè considerando i valori di concentrazione delle grandezze significative.

Le modalità secondo cui si disperdono le sostanze inquinanti e che ne determinano le concentrazioni sono dipendenti da una serie di fattori fisico/chimici che si verificano nella bassa atmosfera, e che sono sostanzialmente riconducibili alle condizioni meteorologiche, alla direzione e alla velocità del vento, alla geometria delle strade, alla presenza di edifici vicini (effetto canyon), alla conformazione orografica del terreno.

Per una stima della dispersione degli inquinanti nell'atmosfera si è scelto di adoperare un ulteriore software, il CALINE 4 (California Line Source Dispersion Model), sviluppato dal Dipartimento di Trasporti della California (CALTRANS, 1998), particolarmente versatile e

adatto alla valutazione delle concentrazioni di inquinanti atmosferici vicino alle carreggiate stradali.

Si basa sull'equazione di diffusione Gaussiana, sfruttando il concetto di “zona di mescolamento” per determinare i livelli di concentrazione delle sostanze in esame. In questo modo è possibile confrontare i dati ottenuti con i valori indicati dalla normativa vigente ed evidenziare eventuali zone dove i valori superano la soglia di attenzione.

Forniti in ingresso i valori di emissione ed i parametri meteorologici, e impostata la geometria del sito (Figura 2), il modello stima le concentrazioni di inquinanti atmosferici in prossimità di recettori che è possibile situare arbitrariamente, purché entro 500 metri dalla carreggiata stradale. È possibile tenere conto delle intersezioni, dei rilevati e delle trincee, dei ponti e dell'effetto canyon ed effettuare previsioni per diversi agenti inquinanti (monossido di carbonio, biossido di azoto e particelle sospese).

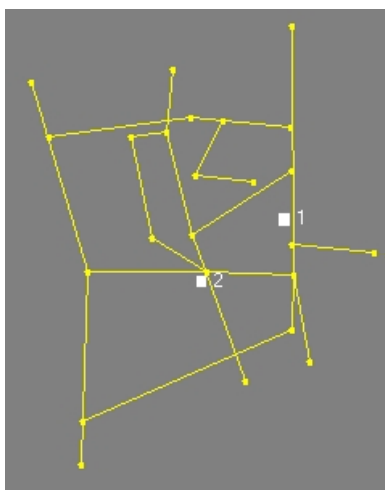


Figura 2 Modello di rete schematizzato in Caline4

I dati ottenuti per il solo scenario di progetto sono riportati nella Tabella 7. Con le lettere dell'alfabeto sono stati designati gli archi corrispondenti alla rete stradale impostata su CALINE. Sono stati inseriti, inoltre, due ricettori posti strategicamente lungo le arterie con flusso veicolare maggiore, in modo da valutare le peggiori condizioni che ci si può aspettare.

I valori nella riga indicata con *Pred-Conc* si riferiscono alla concentrazione stimata nei pressi dei ricettori Recept 1 e Recept 2, comprensiva della quota di inquinante già naturalmente presente nell'ambiente, mentre nelle righe denominate *Conc/Link* vengono inseriti i contributi supplementari dovuti al solo flusso veicolare, per ogni arco considerato, e sempre in corrispondenza dei due ricettori.

Tabella 7 Concentrazioni di inquinanti (CO) relativi alla simulazione dello scenario di progetto

		Recept 1	Recept 2
<i>Pred-Conc (PPM)</i>		5.3	8.1
<i>Conc/Link (PPM)</i>	A	0.0	<b>0.1</b>
	B	0.0	0.0
	C	0.0	0.0
	D	0.0	<b>4.5</b>
	E	0.0	<b>0.4</b>
	F	<b>0.9</b>	0.0
	G	0.0	0.0
	H	<b>1.3</b>	0.0
	I	0.0	0.0
	J	0.0	0.0
	K	0.0	0.0
	L	0.0	0.0
	M	0.0	0.0
	N	0.0	0.0
	O	0.0	0.0
	P	0.0	0.0
	Q	0.0	0.0
	R	0.0	0.0
	S	0.0	0.0
	T	0.0	0.0

## 6 CONCLUSIONI

Le strategie di controllo del traffico rappresentano uno strumento fondamentale per il perseguimento di un obiettivo che, anche all'indomani del Protocollo di Kyoto, risulta quanto mai indispensabile per la salvaguardia della qualità della vita: ridurre le emissioni di agenti inquinanti.

La combustione dei carburanti nel settore dei trasporti è annoverata dal Protocollo summenzionato tra le categorie delle fonti di emissione dei gas ad effetto serra; se ciò si combina al dato allarmante relativo alla media nazionale italiana del rapporto *popolazione/parco autovetture*, pari a circa 1,7 (ACI, Annuario Statistico 2003), e alla stima della percentuale di spostamenti effettuati con mezzo privato all'interno delle città, dal 46% di Roma al 70% di Terni (European Commission, DG Energy and Transport, 2002), ne risulta un quadro particolarmente preoccupante alla luce di quanto discusso sinora.

Congiuntamente alle limitazioni imposte all'emissione di inquinanti, compatibilmente al livello tecnologico raggiunto, e all'ammodernamento del parco veicolare circolante, conforme

alle nuove normative sui livelli di emissioni, sarebbe pertanto auspicabile adottare una opportuna politica di pianificazione e gestione della mobilità, che limiti gli effetti prodotti sull'inquinamento ambientale dalla circolazione veicolare.

Le tecniche e i modelli di microsimulazione, come quello utilizzato per lo studio presentato, rappresentano un validissimo contributo nella individuazione e nella definizione di strategie di intervento al fine di migliorare o, quanto meno, mitigare le ripercussioni negative del traffico sull'ambiente.

I futuri sviluppi del presente lavoro prevedono l'implementazione di un codice sorgente di un modello di microsimulazione per la valutazione degli effetti prodotti sulla qualità dell'aria dai veicoli non dotati di marmitta catalitica.

Gli autori, inoltre, si prefiggono l'obiettivo di implementare i modelli utilizzati realizzando un'interazione tra i modelli previsionali del livello di emissioni inquinanti (M. W. Gardner, 1999; M. C. Bell, 2000) e i modelli di stima in tempo reale dei parametri del traffico (Astarita, 2002).

## **Abstract**

The polluting substances coming from transport systems constitute an important quota of the damaging emissions that accumulate in the atmosphere.

The circulating vehicles are, nearly in the totality, driven by traction systems with thermal engines that, during the combustion of fuel, release a series of harmful substances, that can become particularly dangerous in high concentrations.

For this reason urban areas, characterized by elevated traffic flow rates and a settling mesh that does not allow sufficient infiltration of circulating air masses, are subject to air pollution with values that periodically exceed the maximum limits.

Considering both the reference standards on the polluting emissions from motor vehicles and the limits set on concentrations of the main polluting substances in the atmosphere, the present work has faced the study of real conditions developing in urban congested areas through an analysis of traffic components.

In order to get reference information for the study a series of traffic surveys have been first made in a well specified area of the city of Rende (CS), Italy, chosen as area of study. Such data have been used to create the origin/destination demand matrix and, subsequently, employed for the simulation, through mathematical models of microscopic simulation implemented on specific software (the Integration software).

This paper, besides being useful in the understanding of local dynamics that regulate the spread of the pollutants and of wider scale dynamics that involve the climatic changes due to greenhouse gas emissions, can be taken as an example for the definition and characterization of the strategies and the priorities to be used in town planning design, therefore representing an effective support for the Local Agencies.

## Bibliografia

Astarita V. et al. (2002), Motorway traffic parameters estimation from mobile phone counts, in Proceedings of the 9th Meeting of the EURO Working Group on Transportation-intermodality, Sustainability and Intelligent Transportation Systems, Bari: EURO Working Group organizing committee.

Bell M. C. et al. (2000), *Estimation and prediction of roadside pollution using SCOOT and ADMS (Urban) Model*, Proceedings of the Air and Waste Management Association 93rd Annual Conference and Exhibition, Salt Lake City, Utah.

CALTRANS (1998), *User's guide for CL4: a user-friendly interface for the Caline 4 Model for transportation project impact assessments*, Sacramento, CA.

EPA (1993), *User's Guide to MOBILE5A: Mobile Source Emissions Factor Model*, Ann Arbor, MI: U.S. Environmental Protection Agency.

Festa D. et al. (2002), *Analisi sperimentale comparativa di differenti modelli per la simulazione del deflusso autostradale*, in Metodi e Tecnologie dell'Ingegneria dei Trasporti – Seminario 2000, G.E. Cantarella and F. Russo, Milano: Angeli.

Gadner M. W. et al. (1999), *Neural network modelling and prediction of hourly Nox and NO2 concentrations in urban air in London*, in Atmospheric Environment, n. 33, pp. 709-719.

Van Aerde M. (1995), *Integration - User's Guide. Volume I, II*, Kingston: M. Van Aerde and Assoc.