



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato di Ricerca dell'Energia- Indirizzo Tecnica ed Economia dei Trasporti

Dipartimento di Energia, Ingegneria dell' Informazione e Modelli Matematici

Settore Scientifico Disciplinare – S.S.D. ICAR/05

## EMISSIONI INQUINANTI PRODOTTE DAL TRAFFICO VEICOLARE: MODELLIZZAZIONE E INTERVENTI DI BEST PRACTICES PER MIGLIORARE LA QUALITA' AMBIENTALE

IL DOTTORE  
**FRANCESCA GUADAGNANO**

IL COORDINATORE  
**Prof. Ing. ALDO ORIOLI**

IL TUTOR  
**Prof. Ing. SALVATORE AMOROSO**

CICLO XXV  
ANNO 2015

# INDICE GENERALE

INDICE GENERALE ..... pagina I

INTRODUZIONE ..... 1

## CAPITOLO 1

Inquinamento atmosferico: sostanze inquinanti e aspetti normativi

Premessa ..... 4

1.1 Direttive comunitarie e nazionali ..... 7

1.1.1 Inquinamento atmosferico ..... 7

1.1.2 Inquinamento acustico ..... 14

1.2 Gli inquinanti atmosferici ..... 17

1.2.1 Inquinanti primari e inquinanti secondari ..... 19

1.2.2 Smog fotochimico ..... 20

1.3 La regolamentazione italiana sulla qualità dell'aria ..... 23

## CAPITOLO 2

Il processo di emissione dei veicoli

Premessa ..... 27

2.1 Emissioni allo scarico ..... 28

2.2 Fattori che influenzano l'emissione ..... 30

2.2.1 Caratteristiche costruttive del veicolo ..... 31

2.2.1.1 Tipi di propulsione del veicolo ..... 31

2.2.1.2 Caratteristiche di potenza ..... 33

2.2.1.3 Dispositivi di controllo delle emissioni ..... 34

2.2.2 Stato della meccanica dei veicoli ..... 38

2.2.3 Dinamica del motore ..... 39

2.2.4	Condizioni termiche del motore .....	41
2.2.5	Normative europee sulle emissioni dei gas di scarico.....	42

### CAPITOLO 3

#### Approccio modellistico all'inquinamento da traffico

Premessa.....	45	
3.1	Modelli per lo studio dell'inquinamento urbano da traffico.....	46
3.2	Deflusso veicolare.....	49
3.2.1	Microsimulazione del traffico .....	52
3.3	Emissione degli inquinanti.....	54
3.3.1	Modelli statici di emissione.....	57
3.3.2	Modello Copert IV .....	60
3.4	Dispersione delle sostanze inquinanti in atmosfera.....	70
3.4.1	Le dinamiche atmosferiche.....	71
3.4.2	Modelli di dispersione .....	74
3.4.3	Modelli per situazioni particolari .....	76
3.4.3.1	Inquinamento in un canyon urbano .....	77
3.4.3.2	Modelli semplificati di dispersioni degli inquinanti .....	80

### CAPITOLO 4

#### Applicazione Copert IV: caso studio Palermo

Premessa.....	85	
4.1	Palermo tra traffico e inquinamento .....	85
4.1.1	Mobilità e trasporti .....	88
4.1.2	Sistema di rilevamento della qualità dell'aria .....	94
4.1.3	Interventi proposti per limitare le emissioni da traffico .....	99
4.1.4	Mobilità insostenibile e progetti di cambiamento .....	102

4.1.5	Mobilità a Palermo: la dimensione umana dell'essere smart .....	104
4.2	Il modello Copert e la stima delle emissioni inquinanti nella città di Palermo...	106
4.2.1	Applicazione del modello Copert IV al caso studio .....	106
4.2.2	Analisi dei dati del parco circolante .....	108
4.2.3	Ipotesi di evoluzione del parco circolante .....	113
4.2.4	Stima emissioni: confronto scenario attuale e futuro .....	115
CAPITOLO 5		
Inquinamento da traffico veicolare nei centri urbani: interventi attuati e loro valutazione		
	Premessa .....	141
5.1	Valutazione della sostenibilità urbana e del sistema dei trasporti .....	142
5.2	Strategie per la riduzione delle concentrazioni inquinanti.....	145
5.3	Politica comunitaria sulla mobilità sostenibile e sulla qualità dell'aria.....	148
5.4	Programmi e infrastrutture europee di mobilità per migliorare la qualità dell'aria nei centri urbani .....	150
5.4.1	Interventi amministrativi per la riduzione delle emissioni atmosferiche dovute ai mezzi di trasporto.....	150
5.4.2	Interventi che prevedono la promozione del trasporto pubblico .....	155
5.4.3	Interventi che prevedono piani per la modifica della modalità di spostamento e la promozione della mobilità ciclabile e pedonale.....	156
5.4.4	Inventario delle emissioni locali.....	158
5.4.5	Pianificazione dell'uso del territorio .....	159
5.5	Strategie per la riduzione dell'inquinamento atmosferico: politiche di mobilità in Italia.....	160
5.5.1	Valutazione degli interventi attuati.....	161
5.5.2	Efficacia ambientale delle politiche italiane.....	163
CONCLUSIONI.....		165
BIBLIOGRAFIA .....		V

## INTRODUZIONE

L'inquinamento atmosferico continua a essere un'emergenza e uno dei maggiori fattori di rischio ambientale per la salute umana. L'impiego nel campo della ricerca, in quello della tecnologia dei mezzi di trasporto, la razionalizzazione del modal split nel contesto urbano, l'inasprimento della normativa nell'accettazione di veicoli vetusti o scarsamente soggetti a manutenzione hanno fatto sì che le emissioni di molti inquinanti atmosferici siano diminuite in modo sostanziale negli ultimi anni, determinando una migliore qualità dell'aria ambiente. Nonostante questo, per la complessità del fenomeno inquinamento atmosferico che comporta l'ormai ben nota mancanza di relazione lineare tra emissioni e concentrazioni in aria, i livelli di alcuni inquinanti risultano sempre troppo elevati e i problemi legati alla qualità dell'aria persistono.

Una parte significativa della popolazione, soprattutto nelle grandi aree urbane, è esposta a livelli elevati di inquinanti, superiori ai limiti fissati dalla normativa in vigore (Direttive 2008/50/CE e 2004/107/CE, D.Lgs. 155/2010). Se si prendono poi in considerazione le indicazioni più cautelative dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), l'esposizione della popolazione sale a livelli ancora più preoccupanti. È stato stimato che il 90% della popolazione che vive in aree urbane europee è esposta a livelli di inquinanti atmosferici non sicuri. Numerosi sono gli studi epidemiologici che documentano scientificamente gli effetti sanitari, acuti e cronici, dell'inquinamento atmosferico, tali effetti vanno dai sintomi respiratori alla morbosità e mortalità per cause respiratorie, cardiologiche e tumorali.

Lo sviluppo demografico, l'espansione delle grandi conurbazioni e l'accentramento dei servizi e attività nei centri urbani hanno favorito l'incremento e la concentrazione veicolare, sia spazialmente che temporalmente. I problemi della circolazione e della mobilità rappresentano ai giorni nostri uno dei temi più sentiti dalla collettività. I tempi impiegati per gli spostamenti e le distanze di percorrenza tendono sempre più a dilatarsi, come conseguenza della sempre maggiore dispersione dei luoghi di lavoro, di residenza e di svago. Le conseguenze dell'incremento della mobilità sono misurabili direttamente sulle strade: aumentano gli incidenti, peggiorano costantemente le condizioni dell'ambiente in cui viviamo. Questo perché alla crescita delle esigenze della mobilità non ha risposto un equilibrato miglioramento del sistema di offerta, cioè delle infrastrutture, dei servizi e delle regolazioni per il trasporto pubblico e privato.

Questo squilibrio si è riversato in misura invasiva nelle nostre strade e nella nostra vita, creando situazioni di congestione del traffico conseguentemente l'accentuarsi del deterioramento della qualità dell'aria. Il conflitto paradossale tra lo sviluppo del sistema dei trasporti e la salvaguardia dell'ambiente, a partire dalle corrette e necessarie tutele poste a garanzia della salute pubblica, ha portato i dirigenti governativi comunitari a ridefinire i parametri di tollerabilità degli agenti inquinanti e a promuovere politiche orientate ad una mobilità sostenibile.

I sistemi di trasporto su gomma, più diffusi e distribuiti sulla popolazione in maniera capillare, sono causa di numerose pressioni sull'ambiente, tra cui le emissioni in atmosfera che risultano marcatamente dannose per l'ambiente e per la salute dell'uomo.

Per valutare come questo fattore di pressione agisce sullo stato dell'ambiente atmosferico è necessario utilizzare strumenti conoscitivi integrati, consolidati, confrontabili e affidabili in modo da consentire una caratterizzazione del territorio nel suo complesso.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro che si è posto l'obiettivo di approfondire le correlazioni esistenti tra il traffico veicolare e le concentrazioni inquinanti nocivi ad esso associato in ambito prettamente urbano utilizzando dei modelli per la stima di quest'ultimi per poi confrontarli con i dati rilevati della rete di monitoraggio presente nella città.

Il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico condotto per mezzo di centraline permette di conoscere in maniera molto precisa la concentrazione delle sostanze prese in considerazione e di effettuare confronti tra stazioni anche lontane tra loro.

Tale metodo, tuttavia, viene generalmente applicato per il rilevamento di un ristretto numero di sostanze (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMCOV, composti organici volatili non metanici, O<sub>3</sub>, polveri), rispetto alla molteplicità dei contaminanti immessi nell'atmosfera (composti aromatici, metalli pesanti, etc.).

Inoltre, per loro natura, le reti non sono in grado di fornire informazioni relative a tutte le aree in cui non sono disponibili i misuratori o di stimare l'approssimarsi dell'evento critico. In tale contesto si inserisce la problematica urgente di adottare una pianificazione dei trasporti nel solco di una più ampia pianificazione territoriale e urbanistica, volta ad implementare quei sistemi informatizzati di gestione e regolazione del traffico veicolare, al fine di incrementare i livelli di deflusso veicolare e innalzare la sicurezza e la qualità della vita dei soggetti coinvolti. Per un approccio più completo e sintetico della valutazione dello stato di degrado ambientale risulta particolarmente utile affiancare, alle reti suddette, strumenti di simulazione (modelli), che siano in grado di riprodurre l'emissione, il trasporto e la diffusione degli inquinanti in atmosfera. Pertanto nell'ambito di queste considerazioni di

carattere generale, lo studio di questa tesi è stata sviluppata al fine di approfondire e stimare, attraverso l'utilizzo di uno specifico software (COPERT IV), la parte relativa alle emissioni inquinanti prodotte dal traffico veicolare in ambito prettamente urbano.

Infine, nell'ultimo capitolo, si è investigato sul potenziale di un ampio spettro di misure di mobilità sostenibile al fine di enucleare un insieme di campi d'azione innovativi, e potenzialmente promettenti, per la ridefinizione di logiche di governo della mobilità a scala urbana maggiormente orientate a obiettivi di sostenibilità ambientale.

Attraverso un'approfondita lettura di numerose e differenti esperienze maturate in realtà italiane, europee ed extraeuropee, si è pervenuti alla realizzazione di una guida agli interventi di gestione del traffico e della mobilità che possa essere utilizzata per orientare preventivamente nella scelta delle alternative che l'esperienza, specie internazionale, mette a disposizione. Infatti, pur disponendo di numerose misure che consentono di ridurre la congestione e controllare il funzionamento dei sistemi di trasporto urbano, l'efficacia ed i costi dei diversi provvedimenti possono variare da caso a caso e produrre differenti risultati, oltre che incidere diversamente sui vari soggetti e sulle parti economiche e sociali. La complessità intrinseca dei sistemi, per non parlare delle condizioni sociali e politiche specifiche di ogni contesto, consente di trarre conclusioni valide solo per alcune specifiche circostanze e di ragionare esclusivamente per analogia, specie quando le problematiche non vengono affrontate radicalmente e alla nascita del fenomeno.

# CAPITOLO 1

## **Inquinamento atmosferico: sostanze inquinanti e aspetti normativi**

### **Premessa**

L'inquinamento atmosferico è nocivo per la nostra salute e per l'ambiente in cui viviamo. Esso può provocare non solo malattie cardiovascolari e respiratorie, ma anche il cancro, e costituisce la principale causa di morte prematura nell'Unione Europea legata all'ambiente. Alcune sostanze, come arsenico, cadmio, nichel e idrocarburi policiclici aromatici, sono agenti cancerogeni per l'uomo e non esiste una soglia identificabile di sotto alla quale queste sostanze non comportano un rischio. L'inquinamento atmosferico ha inoltre effetti negativi sulla qualità dell'acqua e del suolo, oltre a danneggiare gli ecosistemi per mezzo dell'eutrofizzazione (eccessivo inquinamento da azoto) e delle piogge acide. Da questo fenomeno sono pertanto interessati il settore agricolo, le foreste, i materiali e gli edifici. Benché le fonti di tale tipologia di inquinamento siano diverse, esso è causato principalmente dal settore industriale, da quello dei trasporti, della produzione energetica, come pure da quello agricolo. Sebbene negli ultimi decenni l'inquinamento atmosferico in Europa sia diminuito in termini generali, l'obiettivo dell'Unione nel lungo termine, vale a dire «livelli di qualità dell'aria che non comportino impatti negativi significativi per la salute umana e per l'ambiente», è tuttora a rischio. Soprattutto nelle aree urbane («punti caldi»), dove vive la maggior parte degli europei, le norme di qualità dell'aria sono spesso violate, il che può provocare gravi problemi per la salute.

L'inquinamento atmosferico è un fenomeno molto complesso determinato da molteplici fattori, tra cui le interazioni chimico-fisiche che avvengono tra sostanze in atmosfera e l'assetto meteo-climatico. In particolare nelle grandi aree urbane si raggiungono elevati livelli di concentrazione di alcuni inquinanti come il particolato atmosferico (PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>, a seconda che la dimensione delle polveri sia inferiore a 10 micrometri o a 2,5 micrometri), l'ozono (O<sub>3</sub>) e il biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) che, a causa della loro tossicità, determina un forte impatto sulla salute umana. Relativamente al PM<sub>10</sub>, i trasporti sono la prima sorgente di inquinamento con un contributo del 37% sul totale, di cui poco più dei 2/3 proveniente dal trasporto su gomma; seguono l'industria (27%), il settore civile (22%) e l'agricoltura (14%).



Anche per il  $PM_{2,5}$  i trasporti costituiscono la principale fonte di emissione con un contributo del 40% (poco meno dei 2/3 proviene dal trasporto stradale); seguono l'industria (23%), il settore civile (26%) e il settore relativo al trattamento e smaltimento dei rifiuti (11%). La principale fonte di emissione degli ossidi di azoto è rappresentata dai trasporti con circa il 70%, di cui quelli stradali costituiscono circa i 3/4; l'industria contribuisce per il 14%, la produzione di energia per il 10% e il settore civile con il 6%. Da quanto brevemente esposto, risulta evidente che il trasporto stradale è uno dei principali responsabili delle elevate concentrazioni atmosferiche di  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  e dei precursori dell'ozono (metano, ossidi di azoto, composti organici volatili, monossido di carbonio) nelle grandi città, dove il trasporto stradale contribuisce per più del 70% alle emissioni complessive di  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $NO_x$ .

Anche i livelli di inquinamento acustico sono in crescita nelle aree urbane, principalmente a causa dell'aumento del traffico e delle attività industriali e ricreative. Secondo le stime, quasi il 20% della popolazione dell'Unione europea è vittima di livelli di inquinamento acustico considerati inaccettabili. Tale forma di inquinamento può incidere sulla qualità della vita e può portare a livelli significativi di stress, disturbi del sonno e a ripercussioni negative per la salute, come problemi cardiovascolari.

Per il risanamento della qualità dell'aria si è fatto molto, soprattutto nel settore della mobilità; nonostante alcuni deboli ma confortanti segnali di miglioramento, le misure di risanamento realizzate finora non sono state efficaci a far rientrare i livelli degli inquinanti nell'aria ambiente nei limiti normativi e ciò non sembra facilmente realizzabile nell'immediato futuro.

Ciò che è auspicabile e urgente adottare, in aggiunta alle misure che intervengono sulle sorgenti locali e che da sole non bastano, sono misure integrate su scala nazionale in grado di agire sui settori maggiormente responsabili dell'inquinamento e di ridurre il fondo regionale soprattutto laddove, esso ha valori elevati a causa delle avverse condizioni di dispersione che dominano un'area vasta. Nel nostro Paese si tratta poi di integrare le scelte economiche e politiche con la salvaguardia della salute umana e dell'ambiente intero e di superare la frammentazione dovuta al decentramento legislativo e amministrativo. Ciò che serve, infine, è un'evoluzione della normativa comunitaria verso una reale integrazione fra le politiche sulla qualità dell'aria e sui gas serra, oltre ad un indispensabile cambiamento di stile di vita individuale.

## **1.1 Direttive comunitarie e nazionali**

La tutela dell'ambiente nel suo complesso e in particolare la corretta gestione della qualità dell'aria, che ne rappresenta uno degli aspetti principali, sono problematiche che sono sensibilmente cresciute di interesse in questi ultimi tempi e che hanno richiesto la predisposizione di adeguati strumenti di intervento in diversi settori, che vanno dalla normativa, alla strumentazione, alla modellistica.

Gli strumenti normativi e i provvedimenti in materia di qualità dell'aria, di inquinamento atmosferico e di quello acustico, sono complessi e articolati e sono strutturati su diversi livelli che vanno dalle direttive comunitarie, alle norme nazionali per arrivare agli strumenti di governo locale.

### **1.1.1 Inquinamento atmosferico**

Le correlazioni tra smog e impatto sulla salute della popolazione sono ormai scientificamente accertate e fortemente preoccupanti. La perdita di vite umane per la cattiva qualità dell'aria che respiriamo è superiore a quella dovuto agli incidenti stradali, rendendola quindi la principale causa ambientale di decessi prematuri.

L'ultimo rapporto commissionato dall'Agenzia Ambientale Europea (EEA) conferma che la soluzione al problema dell'inquinamento in tutta Europa è ben lontana dall'essere risolto; non sono state sufficienti le misure volte alla riduzione delle emissioni di inquinanti intraprese dagli stati membri nel corso degli ultimi anni. Sebbene si siano ridotte significativamente le concentrazioni di alcuni inquinanti da un decennio a questa parte, come il monossido di carbonio e gli ossidi di zolfo, restano ancora troppo elevate le concentrazioni che si registrano nel periodo invernale per il materiale particolato (il PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub> principalmente), e per l'Ozono troposferico (O<sub>3</sub>), caratteristico invece nei mesi estivi. Sempre nel rapporto si evidenzia come, una significativa percentuale della popolazione delle città (con punte fino al 96 %) è stata esposta a concentrazioni di PM<sub>2,5</sub> ben superiori ai limiti sanciti dall'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) e la percentuale di popolazione esposta a concentrazioni di ozono troposferico fuori legge, è salito fino a un picco del 98%. Queste sostanze continuano a provocare l'insorgere di numerose malattie respiratorie e cardiovascolari, riducendo significativamente le aspettative di vita, comportando inoltre delle spese sanitarie esorbitanti.

L'Unione Europea dispone di tre diversi meccanismi giuridici per affrontare l'inquinamento atmosferico: la definizione di norme generali di qualità dell'aria per quanto concerne la concentrazione degli inquinanti atmosferici nell'ambiente; la definizione di limiti

(nazionali) per le emissioni complessive di agenti inquinanti; l'elaborazione di una normativa specifica in base alla fonte, controllando, per esempio, le emissioni industriali o stabilendo norme in materia di emissioni dei veicoli, efficienza energetica o qualità dei carburanti. Integrano la normativa summenzionata strategie e misure volte a promuovere la tutela dell'ambiente e la relativa integrazione nel settore dei trasporti e in quello energetico.

Sulla base degli obiettivi della strategia tematica sull'inquinamento atmosferico del 2005, (vale a dire ridurre la concentrazione di particelle sottili, PM<sub>2.5</sub>, del 75% e quella di ozono troposferico, O<sub>3</sub>, del 60%, nonché ridurre del 55%, sempre entro il 2020 rispetto ai livelli del 2000, l'acidificazione e l'eutrofizzazione, che rappresentano una minaccia per l'ambiente), è stata adottata, nel giugno 2008, una revisione della direttiva relativa alla qualità dell'aria ambiente, la quale incorpora gran parte della legislazione in materia. Soltanto la quarta «direttiva derivata» (2004/107/CE) dalla precedente direttiva quadro sulla qualità dell'aria è attualmente ancora in vigore. Essa fissa valori obiettivo (meno rigidi di quelli limite) per arsenico, cadmio, nichel e idrocarburi policiclici aromatici. La nuova direttiva 2008/50/CE si prefigge di ridurre l'inquinamento atmosferico a livelli tali che limitino al minimo gli effetti nocivi per la salute umana o per l'ambiente. A tale fine essa istituisce misure volte a definire e stabilire obiettivi di qualità dell'aria ambiente (ossia limiti che non devono essere superati in alcun luogo dell'UE) in relazione ai principali inquinanti atmosferici (anidride solforosa, biossido di azoto, ossidi di azoto, materiale particolato, piombo, benzene, monossido di carbonio e ozono).

Gli Stati membri sono tenuti a definire zone e agglomerati per valutare e gestire la qualità dell'aria ambiente, monitorare le tendenze a lungo termine e garantire che le informazioni sulla qualità dell'aria ambiente siano messe a disposizione del pubblico. Le misure sono inoltre intese a mantenere la qualità dell'aria ambiente, laddove sia buona, mentre, laddove si superino i valori limite, è necessario adottare dei provvedimenti. La direttiva introduce per la prima volta un obiettivo di qualità dell'aria ambiente per il PM<sub>2.5</sub> e inoltre, fissa dei valori soglia relativi ai livelli di concentrazione inquinante.

Tra di essi il livello critico che rappresenta quel fissato valore sopra del quale possono insorgere effetti negativi diretti sugli ecosistemi naturali e la flora ad esclusione dell'uomo.

Il valore limite che rappresenta il massimo livello in termini di accettabilità delle concentrazioni e di esposizioni relative a inquinanti che deve essere raggiunto entro un termine stabilito e in seguito non deve essere superato.

La soglia di allarme che costituisce il livello delle concentrazioni tali da determinare uno stato di allarme, ovvero una situazione di inquinamento atmosferico che, qualora persista,

determina una potenziale condizione di superamento dei valori limite di qualità dell'aria e quindi, di rischio immediato per la popolazione.

Infine il valore obiettivo e l'obiettivo a lungo termine che rientra nei piani per la qualità dell'aria e fissano i valori delle concentrazioni di inquinante cui si deve tendere nel breve e nel lungo periodo al fine di garantire un efficace protezione della salute umana e dell'ambiente. Nell'allegato XI, "Valori limite per la protezione della salute umana", e nell'allegato XII, "Soglie di informazione e di allarme", si trova conferma di quanto esposto nelle Tabelle 1.1a,b e 1.2.

Tabella 1.1a – Valori limite e livelli critici (Fonte: Direttiva 2008/50/CE)

Periodo di Mediazione	Valore limite	Margine di tolleranza	Data entro la quale il valore limite deve essere raggiunto
<b>Biossido di zolfo</b>			
1 ora	350 µg/m <sup>3</sup> , da non superare più di 24 volte per anno civile		--- (1)
1 giorno	125 µg/m <sup>3</sup> , da non superare più di 3 volte per anno civile		--- (1)
<b>Biossido di azoto</b>			
1 ora	200 µg/m <sup>3</sup> , da non superare più di 18 volte per anno civile	Il 50% il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0% entro il 1° gennaio 2010	1° gennaio 2010
Anno civile	40 µg/m <sup>3</sup>	Il 50% il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0% entro il 1° gennaio 2010	1° gennaio 2010
<b>Benzene</b>			
Anno civile	5,0 µg/m <sup>3</sup>	5 µg/m <sup>3</sup> (100%) il 13 dicembre 2001, con una riduzione il 1° gennaio 2006 e successivamente, ogni 12 mesi di 1 µg/m <sup>3</sup> fino a raggiungere lo 0% entro il 1° gennaio 2010	1° gennaio 2010

Tabella 1.1b – Valori limite e livelli critici (Fonte: Direttiva 2008/50/CE)

<b>Monossido di carbonio</b>			
Media massima giornaliera calcolata su 8 ore (2)	10 mg/m <sup>3</sup>	60%	--- (1)
<b>Piombo</b>			
Anno civile	0,5 µg/m <sup>3</sup>	100%	--- (1) (3)
<b>PM<sub>10</sub></b>			
1 giorno	50 µg/m <sup>3</sup> , da non superare più di 35 volte per anno civile	Il 50% il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante	--- (1)
Anno civile	40 µg/m <sup>3</sup>	20%	--- (1)
<p>(1) Già in vigore dal 1° gennaio 2005.</p> <p>(2) La massima concentrazione media giornaliera su 8 ore sarà determinata esaminando le medie consecutive su 8 ore, calcolate in base ai dati orari e aggiornate ogni ora. Ogni media su 8 ore così calcolata sarà assegnata al giorno nel quale finisce; in pratica, la prima fascia di calcolo per ogni singolo giorno sarà quella compresa tra le 17:00 del giorno precedente e le ore 1:00 del giorno stesso; l'ultima fascia di calcolo per ogni giorno sarà quella compresa tra le ore 16.00 e le ore 24:00 del giorno stesso.</p> <p>(3) Già in vigore dal 1° gennaio 2005. Valore limite da soddisfare soltanto entro il 1° gennaio 2010 nelle immediate vicinanze delle specifiche fonti industriali localizzate in siti contaminati da decenni di attività industriali. In tali casi il valore limite fino al 1° gennaio 2010 sarà di 1,0 µg/m<sup>3</sup>. L'area in cui si applicano valori limite superiori non deve estendersi per più di 1000m da tali fonti specifiche.</p>			

Tabella 1.2 – Soglie di informazione e di allarme (Fonte: Direttiva 2008/50/CE)

<b>Soglie di allarme per inquinanti diversi dall'ozono</b>		
<b>Inquinante</b>	<b>Soglia di allarme (1)</b>	
Biossido di zolfo	500 µg/m <sup>3</sup>	
Biossido di azoto	400 µg/m <sup>3</sup>	
<p>(1) Le soglie devono essere misurate su tre ore consecutive, presso siti fissi di campionamento aventi un'area di rappresentatività di almeno 100 Km<sup>2</sup> oppure pari all'estensione dell'intera zona o dell'intero agglomerato se tale zona o agglomerato sono meno estesi</p>		
<b>Soglie di informazione e di allarme per l'ozono</b>		
<b>Finalità</b>	<b>Periodo di mediazione</b>	<b>Soglia</b>
Informazione	1 ora	180 µg/m <sup>3</sup>
Allarme	1 ora (1)	240 µg/m <sup>3</sup>
<p>(1) Per l'applicazione dell'articolo 10, comma 1, deve essere misurato o previsto un superamento per tre ore consecutive</p>		

Nell'allegato XIV denominato "Obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione, valore-obiettivo e valore limite per il PM<sub>2,5</sub>", si introduce il concetto di indicatore di esposizione media (IEM), espresso in µg/m<sup>3</sup> che definisce per anno il valore della concentrazione media ricavato sui 3 anni consecutivi precedenti l'anno in questione (Tabella 1.3).

Tabella 1.3 – Obbligo di concentrazione, valore obiettivo e valore limite PM<sub>2,5</sub>  
(Fonte: Direttiva 2008/50/CE)

<b>Obbligo di concentrazione all'esposizione</b>			
Obbligo di concentrazione all'esposizione	Anno entro il quale deve essere rispettato tale obbligo		
20 µg/m <sup>3</sup>	2015		
<b>Valore obiettivo</b>			
Periodo di mediazione	Valore obiettivo	Data entro il quale dovrebbe essere raggiunto il valore obiettivo	
Anno civile	25 µg/m <sup>3</sup>	1° gennaio 2010	
<b>Valore limite</b>			
Periodo di mediazione	Valore limite	Margine di tolleranza	Data entro il quale dovrebbe essere raggiunto il valore limite
<b>FASE 1</b>			
Anno civile	25 µg/m <sup>3</sup>	20% l'11 giugno 2008, con riduzione il 1° gennaio successivo e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0% entro il 1° gennaio 2015	1° gennaio 2015
<b>FASE 2 (1)</b>			
	20 µg/m <sup>3</sup>		1° gennaio 2020
(1) Fase 2- valore limite indicativo che la Commissione deve verificare nel 2013, alla luce di ulteriori informazioni in materia di conseguenze sulla salute e sull'ambiente, fattibilità tecnica ed esperienza del valore obiettivo negli Stati membri			

Alla fine del 2013, la Commissione ha proposto un nuovo pacchetto di provvedimenti per un'aria pulita, che presenta due obiettivi principali, vale a dire il rispetto della normativa vigente fino al 2020 e la riduzione degli impatti a lungo termine dell'inquinamento atmosferico. Il pacchetto comprende un nuovo programma «Aria pulita per l'Europa» che descrive la problematica nonché le misure strategiche necessarie per conseguire i nuovi obiettivi intermedi volti a ridurre l'impatto sulla salute e sull'ambiente fino al 2030.

Esso propone la revisione della direttiva 2001/81/CE la cosiddetta NEC (National Emission Ceiling che stabilisce a livello europeo i tetti alle emissioni nazionali), con l'aggiornamento dei limiti nazionali per il 2020 e il 2030 relativamente agli inquinanti attualmente disciplinati.

Il pacchetto comprende inoltre una proposta di nuova direttiva relativa alla limitazione delle emissioni nell'atmosfera di taluni inquinanti originati da impianti di combustione medi (in aggiunta ai grandi impianti di combustione che sono già disciplinati) e una proposta di ratifica della versione modificata del protocollo di Göteborg alla Convenzione della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UNECE) sull'inquinamento atmosferico a grande distanza per diminuire l'acidificazione, l'eutrofizzazione e l'ozono a livello del suolo. Nell'ambito delle Direttive 2008/50/CE e 2004/107/CE, che stabiliscono i limiti alle concentrazioni degli inquinanti in aria e obbligano gli Stati membri a predisporre piani per il risanamento della qualità dell'aria, si sta lavorando, invece, a un nuovo sistema di comunicazione delle informazioni sulla qualità dell'aria tra Europa e Paesi membri. Detto sistema, come definito nella Decisione 2011/850/UE, sarà un sistema unico, basato sull'uso esclusivo di tecnologie informatiche che dovrà garantire: interrelazione di tutte le componenti informative, verifica della qualità, completezza, consistenza e aggiornamento, condivisione e interoperabilità delle informazioni tra i vari livelli (europeo, nazionale, locale) e tempestività di informazione. Con questo nuovo sistema, l'eccessiva frammentazione e diversificazione degli attuali flussi informativi sulla qualità dell'aria sarà finalmente risolta. Per quanto riguarda la limitazione dell'inquinamento causato dal settore dei trasporti, sono state adottate numerose direttive che fissano norme di emissione per diverse categorie di veicoli, come ad esempio automobili, veicoli commerciali leggeri, autocarri, autobus e motocicli, nonché disciplinando la qualità del carburante e il relativo tenore di zolfo e piombo. La norma di emissione attualmente in vigore per le autovetture e i furgoni leggeri è Euro V. Essa fissa limiti di emissione per una serie di inquinanti atmosferici, in particolare gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) e il particolato (PM). Gli Stati membri sono tenuti a negare l'omologazione, l'immatricolazione, la vendita e l'introduzione di veicoli (e dei relativi

dispositivi di controllo dell'inquinamento di ricambio) che non rispettano i limiti in questione. Euro VI, in vigore dal 1° settembre 2014 per le omologazioni di nuovi modelli mentre diventerà obbligatoria dal 1° gennaio 2016 per tutte le vetture immatricolate.

Il regolamento (CE) n. 715/2007 fissa inoltre norme sulla conformità in servizio, la durata dei dispositivi di controllo dell'inquinamento, i sistemi diagnostici di bordo (OBD), la misurazione del consumo di carburante e disciplina l'accessibilità delle informazioni per la riparazione e la manutenzione del veicolo per gli operatori indipendenti.

Lo stesso vale per il regolamento (CE) n.595/2009, che fissa valori limite di emissione per i veicoli pesanti (autobus e camion), (Tabella 1.4).

Tabella 1.4 – Data di introduzione degli standard emissivi euro per i veicoli a motore.

<b>Categoria veicolo</b>	<b>Euro 1</b>	<b>Euro 2</b>	<b>Euro 3</b>	<b>Euro 4</b>	<b>Euro 5</b>	<b>Euro 6</b>
Autovetture	Luglio 1992	Gennaio 1996	Gennaio 2000	Gennaio 2005	Settembre 2009	Settembre 2014
Veicoli commerciali leggeri (N1- I)	Ottobre 1993	Gennaio 1996 (benzina), 1998 (diesel)	Gennaio 2000	Gennaio 2005	Settembre 2009	Settembre 2014 (diesel)
Veicoli commerciali leggeri (N1- II & III)			Gennaio 2001	Gennaio 2006		Settembre 2015 (diesel)
Autocarri e bus	1992	1995	1999	2005	2009	2014
Motocicli	2000	2004	2007			
Ciclomotori	2000	2004	2007			

Al fine di ridurre ulteriormente l'inquinamento provocato dalle emissioni degli autoveicoli, l'UE ha introdotto, inoltre, un divieto di commercializzazione della benzina contenente piombo, nonché l'obbligo di rendere disponibili carburanti senza zolfo all'interno dell'Unione. La direttiva 2009/33/CE relativa alla promozione di veicoli puliti e a basso consumo energetico nel trasporto su strada impone alle amministrazioni di tener conto dell'impatto energetico e dell'impatto ambientale nell'arco di tutta la vita, tra cui il consumo energetico e le emissioni di CO<sub>2</sub> e di talune sostanze inquinanti, al momento dell'acquisto di veicoli adibiti al trasporto su strada, al fine di promuovere e stimolare il mercato dei veicoli puliti e a basso consumo energetico.



Per quanto riguarda il trasporto marittimo, la direttiva 1999/32/CE disciplina le emissioni di zolfo derivanti dai trasporti marittimi attraverso la definizione di un tenore massimo di zolfo consentito nei combustibili utilizzati nel trasporto marittimo. La direttiva 2012/33/UE, infine, allinea gli standard dell'Unione alle disposizioni dell'Organizzazione marittima internazionale (IMO) e della Convenzione internazionale per la prevenzione dell'inquinamento causato da navi (MARPOL), oltre a introdurre una norma relativa al tenore dello 0,5% del combustibile entro il 2020, indipendentemente da un eventuale rinvio da parte dell'IMO.

### **1.1.2 Inquinamento acustico**

Da uno studio commissionato dal Ministero dell'Ambiente olandese, è stato messo in risalto che l'inquinamento acustico prodotto dal traffico causa danni al 44% della popolazione dell'Unione Europea. Nonostante la crescente consapevolezza degli effetti altamente dannosi che genera l'esposizione al rumore, paragonabili come gravità a quelli legati all'inquinamento atmosferico, stenta ancora a partire un costante e tempestivo controllo da parte delle autorità competenti. Ulteriori studi effettuati al riguardo, stanno dimostrando che l'inquinamento acustico non è solamente un disturbo ambientale ma rappresenta anche una minaccia per la salute pubblica. Secondo l'OMS gli effetti del rumore sulla salute rappresentano una preoccupazione crescente per i cittadini europei. Il rumore non provoca (o contribuisce) solamente fastidio e disturbi del sonno ma causa anche infarti, difficoltà di apprendimento e acufene. Dai dati disponibili riguardo all'esposizione media a lungo termine risulta che il 65 % degli europei che vivono in grandi zone urbane è esposto a livelli elevati di rumore e che più del 20 % è esposto a livelli di rumore notturno che hanno spesso effetti negativi per la salute. Si stima che le sorgenti del rumore maggiormente colpevoli di questo stato sono soprattutto i trasporti (automobili, autocarri e aerei) e l'attività edilizia. Nonostante la dimostrazione dei reali danni generati dall'esposizione al rumore, soprattutto quello notturno, i dati raccolti sulla popolazione esposta sono ancora troppo pochi per avere un quadro completo e significativo. Dal rapporto dell'Istat è emerso che nel 2013 il numero di campagne di monitoraggio effettuate nei comuni capoluogo di provincia per la misura del rumore è stato di 9,3 ogni 100 mila abitanti ed in più della metà di questi interventi (55,6%) si è riscontrato almeno un superamento dei limiti previsti dalla legge. Il tema dell'inquinamento acustico è oramai diventato parte integrante nei documenti che determinano le linee della politica ambientale dell'Unione Europea.

Se l'argomento era già stato inserito nel Quinto Programma d'Azione e ripreso nel Sesto Programma d'Azione per l'Ambiente, prevedendo di diminuire ulteriormente del 10% la popolazione esposta a rumore troppo elevato, il Settimo Programma d'Azione approvato a fine 2013 continua a ribadire la necessità di una "significativa riduzione dell'inquinamento acustico" in vista del conseguimento dei buoni propositi per il 2020.

Nel giugno del 2002 è stata adottata la direttiva 2002/49/CE il cui obiettivo principale era quello di uniformare le definizioni ed i criteri di valutazione sulla tematica del rumore ambientale. A livello nazionale la direttiva è stata recepita dal D.Lgs. 194 del 2005 che prevedeva la valutazione del grado di esposizione al rumore mediante mappature acustiche, una maggiore attenzione all'informazione del pubblico e l'identificazione e la conservazione delle "aree di quiete". Prima ancora di questi riferimenti legislativi, importanti misure erano previste sia nella legge 447 del 1995, dove si prevedeva l'obbligo per i comuni con più di 50.000 abitanti di presentare una relazione biennale sullo stato acustico del comune entro due anni dall'entrata in vigore della legge (da cui ormai sono passati più di 15 anni), sia dal DPCM 14/11/1997, che prevedeva la zonizzazione acustica del territorio comunale attraverso l'individuazione di porzioni omogenee di territorio sulla base della prevalente ed effettiva destinazione d'uso e, per ciascuna porzione individuata, ne stabiliva i valori limite di emissioni sonore su due riferimenti temporali, diurno e notturno (Tabella 1.5).

Tabella 1.5 – Classi di destinazione d'uso del territorio con i valori limite assoluti di immissione per l'ambiente esterno- Leq in dB (Fonte: DPCM 14/11/1997)

Classi di destinazione d'uso del territorio	Tempi di riferimento	
	Diurno (06:00-22:00)	Notturno (22:00-06:00)
<b>I</b> aree particolarmente protette	50	40
<b>II</b> aree prevalentemente residenziali	55	45
<b>III</b> aree di tipo misto	60	50
<b>IV</b> aree di intensa attività umana	65	55
<b>V</b> aree prevalentemente industriali	70	60
<b>VI</b> aree esclusivamente industriali	70	70

Dall'annuario 2013 emerge, però, che la classificazione acustica risulta approvata solo dal 50% dei comuni italiani. Nello specifico, i dati forniscono un quadro più aggiornato e tuttavia poco rassicurante: la zonizzazione acustica risulta approvata, a fine 2013, nel 9,5% dei comuni capoluogo di provincia e all'appello mancano alcune delle principali realtà

urbane tra le quali Cagliari, Palermo, Bari, Reggio Calabria e Trieste. È fermo al 2009 lo stato di avanzamento del numero dei comuni che hanno provveduto all'introduzione della Relazione biennale sullo stato acustico, come previsto dalla Legge Quadro sull'inquinamento acustico 447 del 1995: su 149 comuni con oltre 50 mila abitanti, solo 21 hanno redatto la relazione. Allo stesso modo resta costante dal 2010 il numero dei comuni in cui è stato approvato il piano di risanamento acustico che dovrebbe scattare in caso di superamento dei valori di attenzione o nell'individuazione di aree critiche: dai dati disponibili il piano risulta approvato, a fine 2013, in 71 comuni (su 3972 che hanno una classificazione acustica). La debole risposta delle amministrazioni comunali all'applicazione di tali strumenti legislativi è probabilmente dovuta all'assenza della normativa regionale in materia di inquinamento acustico fin dall'emanazione della Legge 447/95. I dati di Ispra confermano l'assenza di provvedimenti a livello regionale in Molise, Basilicata, Campania, Sicilia e Sardegna, oltre che nella provincia autonoma di Bolzano. Da sottolineare che ad oggi è ancora in corso una procedura d'infrazione, in fase di messa in mora, avviata nei confronti dell'Italia nell'aprile del 2013 perché inadempiente sulle norme comunitarie relative ai livelli d'inquinamento acustico. Secondo la Commissione, infatti, sono stati forniti dati incompleti sulla mappatura del territorio, i piani di azione per la riduzione dell'inquinamento da rumore e la comunicazione ai cittadini, previsti dalla normativa. Per quanto riguarda le disposizioni in materia di rumore da traffico stradale le direttive 70/157/CEE e 97/24/CE (che saranno sostituite nel 2016 con nuove regolamentazioni) stabiliscono i limiti relativi ai livelli ammissibili del rumore emesso dai veicoli a motore, dai ciclomotori e dai motocicli. Nell'aprile del 2014 si è adottata una nuova regolamentazione sul livello sonoro dei veicoli a motore che introduce un nuovo metodo di prova per la misurazione delle emissioni sonore, diminuisce i valori limite di rumore attualmente in vigore e racchiude disposizioni aggiuntive sulle emissioni sonore in sede di procedura di omologazione. Essa si applicherà a partire dall'aprile del 2016. A integrazione di ciò, la direttiva 2001/43/CE sancisce la verifica e l'imposizione di limiti sul livello di rumore causato dal rotolamento degli pneumatici e la sua graduale riduzione. Per il traffico aereo la direttiva 2002/30/CE (attualmente in fase di revisione) stabilisce norme e procedure per l'introduzione di restrizioni operative ai fini del contenimento del rumore negli aeroporti dell'Unione, sulla base «dell'approccio equilibrato» raccomandato dall'ICAO (rendere gli aerei meno rumorosi attraverso la definizione di norme relative alla rumorosità; gestire in maniera sostenibile il territorio circostante gli aeroporti; adeguare le procedure operative al fine di ridurre l'impatto acustico a terra e, se del caso, introdurre limitazioni operative).

## **1.2 Gli inquinanti atmosferici**

L'aria è una miscela eterogenea formata da gas e particelle di varia natura e dimensioni. La sua composizione si modifica nello spazio e nel tempo per cause naturali e non, cosicché risulta arduo definirne le caratteristiche di qualità.

L'inquinamento atmosferico è quel fenomeno per il quale le particelle estranee alla composizione naturale dell'atmosfera e nocive per il benessere o la salute umana sono presenti nell'atmosfera con diversi livelli di concentrazione.

L'inquinamento atmosferico può essere sia di origine "naturale", per i fenomeni collegati ad attività vulcaniche, incendi boschivi, attività geotermiche, etc., che "artificiale", attribuibile ad attività antropiche; questa seconda forma di inquinamento, tranne in casi eccezionali, è prevalente e maggiormente presente laddove maggiore è la concentrazione di residenze ed attività umane.

Le attività antropiche principali responsabili dell'inquinamento dell'aria sono le industrie, i trasporti, le attività domestiche e gli impianti per la produzione di energia (centrali termoelettriche). La misura dell'inquinamento atmosferico avviene generalmente in funzione della concentrazione nell'atmosfera di sostanze inquinanti (ad esempio in ppm o g/mc); i livelli di concentrazione dipendono dal quantitativo di emissione di agenti inquinanti dalle varie sorgenti e dai successivi processi di dispersione in atmosfera delle sostanze inquinanti, funzione delle condizioni meteorologiche (frequenza delle piogge, venti, temperature, etc.). L'impossibilità di individuare le proprietà di un ambiente incontaminato di riferimento induce ad introdurre il concetto di inquinamento atmosferico stabilendo uno standard convenzionale per la qualità dell'aria. Si ritiene quindi inquinata l'aria la cui composizione eccede limiti stabiliti per legge allo scopo di evitare effetti nocivi sull'uomo, sugli animali, sulla vegetazione, sui materiali o sugli ecosistemi in generale, e si definiscono sostanze inquinanti le sostanze responsabili dell'inquinamento atmosferico.

I fenomeni di inquinamento sono il risultato di una complessa competizione tra fattori che portano ad accumulo degli inquinanti ed altri che invece determinano la loro rimozione e la loro diluizione in atmosfera.

L'entità e le modalità di emissione (sorgenti puntiformi, diffuse, altezza di emissione, etc.), i tempi di persistenza degli inquinanti, il grado di mescolamento dell'aria, sono alcuni dei principali fattori che producono variazioni spazio temporali della composizione dell'aria.

I principali meccanismi di rimozione possono essere di tipo fisico (lavaggi dovuti alle piogge, adsorbimenti su solidi o nel terreno, assorbimento nei diversi sistemi idrici), di tipo

biologico (reazioni prodotte dalla respirazione delle piante e dei batteri presenti nei terreni), e di tipo chimico (reazioni chimiche semplici, catalitiche o fotochimiche).

Non sempre l'evoluzione chimica degli inquinanti va nel senso di favorire la riduzione dell'inquinamento, talvolta i prodotti delle trasformazioni sono più nocivi di quelli originali. In base al livello di nocività ed alla durata del fenomeno inquinante, si distinguono due tipologie di inquinamento:

- acuto, se la concentrazione di sostanze inquinanti è elevata per un breve periodo di tempo;
- cronico, se la concentrazione di sostanze inquinanti è modesta, ma persiste per lunghi periodi di tempo.

Le due tipologie hanno effetti diversi e provocano danni diversi alla salute umana. Gli inquinanti atmosferici possono essere classificati in funzione del loro stato fisico che può essere gassoso, liquido o solido. Le sostanze allo stato liquido possono presentarsi sotto forma sia di vapori che di particelle liquide (goccioline), quello allo stato solido unicamente nella forma di particelle solide. I vapori formano soluzioni in area che in pratica si comportano allo stesso modo dei gas seguendo con buona approssimazione le leggi dei gas ideali.

Le sostanze, liquide o solide, presenti nella forma di particelle formano invece sospensioni in area che in generale prendono il nome di sospensioni di particelle o particolato. Per quanto riguarda, invece, le sostanze inquinanti prodotti dal funzionamento dei sistemi di trasporto, oggetto del presente lavoro, possiamo raggrupparle in composti organici (contenenti carbonio) e non organici.

Per la particolare importanza che rivestono nelle dinamiche di inquinamento dell'aria, questi ultimi saranno a loro volta classificati in fotochimici (reagenti in atmosfera a causa della radiazione) e non fotochimici.

Gli inquinanti identificati come composti organici sono il monossido di carbonio (CO), l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), gli idrocarburi (HC), in particolare quelli non metanici (NMHC) e quelli policiclici aromatici (IPA), i composti organici nella forma di particolato (PTS cioè PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>). I composti non organici fotochimici sono gli ossidi azoto (NO<sub>x</sub>), l'ozono (O<sub>3</sub>), ed altri inquinanti fotochimici. I composti non organici non fotochimici sono gli ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>), il piombo (Pb) e i suoi composti.

In particolare i veicoli dotati di motore a benzina sono un'importante sorgente di emissioni di idrocarburi e ossidi di azoto, e la causa principale degli alti livelli di emissione di monossido di carbonio nelle aree urbane. I veicoli a motore diesel sono invece importanti sorgenti di emissione di particolato, idrocarburi e ossidi di azoto.

### **1.2.1 Inquinanti primari e inquinanti secondari**

Inquinante è qualsiasi sostanza immessa direttamente o indirettamente dall'uomo nell'aria ambiente, che può avere effetti dannosi sulla salute umana o sull'ambiente nel suo complesso. Una distinzione molto utile delle sostanze inquinanti dell'aria è quella fatta in funzione della loro genesi. Gli inquinanti immessi direttamente dall'uomo nell'aria ambiente sono denominati inquinanti primari.

I principali inquinanti primari sono quelli emessi dai processi di combustione di qualunque natura, ovvero gli idrocarburi incombusti, il monossido di carbonio, gli ossidi di azoto (principalmente sotto forma di monossido) ed il materiale particellare. Nel caso in cui i combustibili contengano zolfo, si ha inoltre anche emissione di anidride solforosa.

A seguito dell'emissione in atmosfera, gli inquinanti primari sono soggetti a processi di diffusione, trasporto e deposizione, nonché a processi di trasformazione chimico-fisica che possono portare alla formazione degli inquinanti secondari, nuove specie chimiche che spesso risultano più tossiche e di più vasto raggio d'azione dei composti originari.

La dispersione degli inquinanti in atmosfera, determinata dai fenomeni di diffusione turbolenta e di trasporto delle masse d'aria, come pure la loro rimozione, determinata dai processi di deposizione, sono strettamente dipendenti dal comportamento dinamico dei bassi strati dell'atmosfera.

Ne consegue che per lo studio del comportamento degli inquinanti primari è necessario sia conoscere il profilo qualitativo, quantitativo e temporale delle emissioni, sia avere informazioni sui processi meteorologici che regolano il comportamento dinamico della bassa troposfera (classi di stabilità, direzione ed intensità del vento).

Gli inquinanti primari possono essere di tipo gassoso o particellare. Tra i gas si segnalano in particolare:

- composti dello zolfo ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ );
- composti dell'azoto ( $\text{NO}$ ,  $\text{NH}_3$ );
- composti del carbonio ( $\text{CO}$ , COV composti organici volatili: idrocarburi non metallici e IPA idrocarburi policiclici aromatici, tra cui il benzene e benzo (a) pirene);
- composti alogenati ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HBr}$ , CFC).

Il particolato si classifica in ragione del diametro delle particelle: si considerano grossolane quelle con diametro maggiore di 2.5 micron e fini quelli di diametro minore di 2.5 micron. Si distinguono, inoltre, come inalabili le particelle con diametro minore di 10 micron ( $\text{PM}_{10}$ ).

I principali inquinanti secondari di tipo gassoso sono:

- $\text{NO}_2$  formato da  $\text{NO}$  primario;
- $\text{O}_3$  formato per via fotochimica.

Entrambi i gas intervengono nei complessi meccanismi di reazione che costituiscono il cosiddetto “smog fotochimico”. Il particolato secondario può derivare da reazioni chimiche e chimico-fisiche che coinvolgono inquinanti gassosi sia primari che secondari. I più noti sono:

- la trasformazione di  $\text{SO}_2$  in solfati;
- la trasformazione di  $\text{NO}_2$  in nitrati;
- la trasformazione di composti organici in particelle organiche.

Naturalmente gli inquinanti atmosferici, sia primari che secondari, si caratterizzano per la loro grande mobilità indotta dal trasporto convettivo (avvettivo) e dispersivo.

A tale riguardo il particolato inalabile si comporta come un gas, mentre quello di diametro superiore segue traiettorie balistiche dominate dalla forza di gravità.

### 1.2.2 Smog fotochimico

Fra i processi di formazione degli inquinanti secondari, particolare importanza è assunta dalla serie di reazioni che avvengono fra gli ossidi di azoto e gli idrocarburi in presenza di luce solare. Questa catena di reazioni porta all'ossidazione del monossido di azoto ( $\text{NO}$ ) a biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ), alla produzione di ozono ( $\text{O}_3$ ) ed all'ossidazione degli idrocarburi, vi è formazione di aldeidi, perossidi, di acidi nitriloperacetici (PAN), acido nitrico, nitrati e nitroderivati in fase particellare, e centinaia di altre specie chimiche minori. L'insieme dei prodotti di queste reazioni viene definito smog fotochimico, che rappresenta una delle forme di inquinamento più dannose per l'ecosistema. L'uso del termine smog è dovuto alla forte riduzione della visibilità che si determina nel corso degli episodi di inquinamento fotochimico, dovuta alla formazione di un grande numero di particelle di notevoli dimensioni. Il termine “smog fotochimico”, quindi, indica un insieme di processi che coinvolgono ozono, ossidi di azoto e composti organici volatili e presenza di radiazione solare necessaria per l'innesco delle reazioni. I primi casi di smog fotochimico vennero segnalati negli anni 40 a Los Angeles, ma è solo negli ultimi tempi che l'attenzione rivolta ai problemi di inquinamento secondario è andata aumentando essendosi resa sempre più manifesta la loro importanza da un punto di vista sanitario e la loro larga diffusione territoriale.

Lo smog fotochimico si manifesta con una leggera foschia di colore giallo-marrone che può provocare irritazione agli occhi e disturbi respiratori. Altri effetti sull'ambiente

riguardano possibili danni alla vegetazione (riduzione della produttività delle colture) ed alle cose (rapido deterioramento delle superfici e dei materiali).

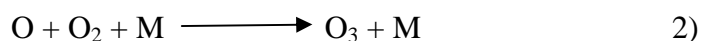
La formazione degli inquinanti secondari che compongono lo smog fotochimico è complessa perché la loro evoluzione temporale e la loro distribuzione spaziale dipendono dalle masse d'aria che contengono gli inquinanti precursori e che sono sede di processi di trasformazione. Gli episodi critici possono perciò non essere circoscritti alle zone e ai tempi prossimi alle emissioni dei precursori, ma interessare aree e periodi molto ampi.

Lo smog fotochimico è generalmente importante d'estate, quando, a causa del ruolo assunto dalla radiazione solare nel sistema di reazioni chimiche di base, più frequentemente si supera i limiti di legge per l'ozono, principale tracciante del processo.

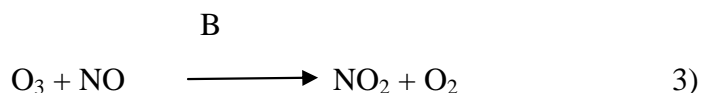
La produzione di ozono in troposfera ha inizio dalla fotolisi del biossido di azoto in monossido di azoto e ossigeno atomico:



Seguita dalla combinazione di quest'ultimo con ossigeno atmosferico:



L'ozono e il monossido di azoto così prodotti si combinano rapidamente per riformare biossido di azoto:



In un'atmosfera non inquinata le reazioni (1-3) costituiscono il ciclo giornaliero di base dell'ozono: durante le ore diurne la fotolisi dell'NO<sub>2</sub> corrisponde alla produzione di O<sub>3</sub> e NO, mentre, non appena la radiazione solare diminuisce nel tardo pomeriggio, si riforma l'NO<sub>2</sub>. Lo stato pseudo-stazionario che viene raggiunto dalle tre specie è espresso dalla relazione:

$$\frac{\text{A}}{\text{B}} = \frac{[\text{NO}][\text{O}_3]}{[\text{NO}_2]} \quad 4)$$



In atmosfere inquinate il ciclo di reazioni (1-3) non è in grado di giustificare le elevate quantità di ozono che effettivamente si misurano.

La fotolisi dell' $\text{NO}_2$  è comunque l'unico meccanismo noto per la produzione di ozono; una crescita netta di quest'ultimo può quindi avvenire solo se  $\text{NO}_2$  è formato in eccesso rispetto al ciclo (1-3). D'altra parte l' $\text{NO}_2$  è un inquinante secondario, gli ossidi di azoto emessi durante i processi di combustione sono, infatti, per il 95% costituiti da NO. L'eccesso di  $\text{NO}_2$  è dunque originato da una serie di reazioni a catena che coinvolgono radicali liberi, soprattutto il radicale ossidrilico (OH), idroperossido ( $\text{OH}_2$ ) e alchilperossido ( $\text{RO}_2$ ), che sono responsabili della conversione di NO in  $\text{NO}_2$  senza il consumo di ozono e dunque in violazione dell'equilibrio (4).

Questi radicali, a loro volta, hanno origine dalla scissione di idrocarburi, rilasciati in atmosfera come solventi, carburanti incombusti o da altre sorgenti inquinanti. I meccanismi delle reazioni coinvolte nel fenomeno dello smog fotochimico sono molto complessi e risulta molto difficile individuare l'evoluzione delle numerose sostanze che entrano in gioco.

I fenomeni di maggior rilievo nel sistema sono la conversione di NO in  $\text{NO}_2$ , la formazione di una varietà di composti contenenti azoto, come l'acido nitrico e i nitrati perossiacilici (tra cui il PAN, cioè il perossiacetilnitrato) e l'accumulo di  $\text{O}_3$ .  $\text{NO}_2$  funge sia da iniziatore che da terminatore della catena di reazioni che porta alla conversione di NO in  $\text{NO}_2$  e alla sintesi di  $\text{O}_3$ . La terminazione della catena di reazioni produce acido nitrico e nitrati organici. Negli ultimi tempi, un altro indicatore di smog fotochimico, più specifico dell'ozono, è stato individuato nel PAN.

Il perossiacetilnitrato, infatti, possiede il vantaggio, rispetto all'ozono, di non essere prodotto in quantità significative da sorgenti naturali. Il PAN proviene dalla reazione tra biossido d'azoto e l'acetilperossido, a sua volta derivato dalla reazione dell'acetaldeide con il radicale (OH).

La pericolosità ambientale del PAN è associata alla sua persistenza: esso tende ad accumularsi nelle zone più alte e fredde della troposfera da dove diffonde verso le zone sottostanti più calde, dissociandosi termicamente con produzione di radicali e  $\text{NO}_2$ . Tale comportamento è dovuto al fatto che la costante di dissociazione del PAN dipende fortemente dalla temperatura e che i processi di rimozione del PAN, alternativi alla decomposizione termica, sono molto lenti. Pertanto il PAN costituisce una riserva stabile negli strati più freddi della media e alta troposfera sia di  $\text{NO}_x$ , sia di radicali iniziatori di reazioni secondarie.

### **1.3 La regolamentazione italiana della qualità dell'aria**

Si parla di inquinamento atmosferico quando vi è un'alterazione dello stato di qualità dell'aria conseguente all'immissione nella stessa di sostanze di qualsiasi natura, agenti inquinanti, in misura e condizioni tali da alterarne la salubrità e da costituire pregiudizio diretto o indiretto per la salute dei cittadini e dell'ambiente o danno a beni pubblici e/o privati. L'individuazione di idonei strumenti e metodologie d'analisi, la misurazione delle concentrazioni degli agenti inquinanti effettuata attraverso la rete di monitoraggio individuata sul territorio di competenza, il confronto con i valori limite previsti dalla legge, sono le attività previste dalla normativa al fine di monitorare lo stato della qualità dell'aria e, in presenza di fenomeni di inquinamento, prevedere le azioni di risanamento attraverso la definizione di piani e programmi.

La norma quadro in materia di controllo dell'inquinamento atmosferico è rappresentata dal Decreto Legislativo n. 155/2010 (recepimento direttiva 2008/50/CE) che ha abrogato il Decreto Legislativo n. 351/99 e i rispettivi decreti attuativi DM 60/02, il Decreto Legislativo n.183/2004 e il DM 261/2002. Il Decreto individua l'elenco degli inquinanti per i quali è obbligatorio il monitoraggio (NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Benzene, Benzo (a) pirene, Piombo, Arsenico, Cadmio, Nichel, Mercurio, precursori dell'ozono) e stabilisce le modalità della trasmissione e i contenuti delle informazioni, sullo stato della qualità dell'aria, da inviare al Ministero dell'Ambiente.

Il provvedimento individua nelle Regioni le autorità competenti per effettuare la valutazione della qualità dell'aria e per la redazione dei Piani di Risanamento della qualità dell'aria nelle aree nelle quali sono stati superati i valori limite (previsti dalla 2008/50/CE). Ai sensi dell'art. 10 del decreto le Regioni devono predisporre anche i Piani di Azione per la riduzione del rischio di superamento dei valori limite, valori obiettivo e soglie di allarme. Sono stabilite, inoltre, le modalità per la realizzazione o l'adeguamento delle reti di monitoraggio della qualità dell'aria. In base al confronto tra i dati raccolti e gli standard di legge, si deve effettuare la valutazione della qualità dell'aria e pianificare gli interventi e le azioni finalizzate al rispetto dei livelli stabiliti dalla normativa per raggiungere gli obiettivi di risanamento e mantenimento della qualità dell'aria. Generalmente quasi tutti gli inquinanti vengono rilevati da analizzatori in continuo mediante monitoraggio automatico; in alcuni casi (materiale particolato, benzo (a) pirene e metalli) si utilizzano tecniche di campionamento manuale e successiva determinazione in laboratorio dei parametri di interesse.

Il decreto 155/2010, definisce la valutazione della qualità dell'aria come: "l'utilizzo dei metodi previsti dal decreto per misurare, calcolare, prevedere o stimare i livelli di un inquinante nell'aria ambiente". Il controllo della qualità dell'aria si effettua quindi attraverso l'integrazione di diverse tecniche di rilevazione e valutazione, quali:

- le misure di concentrazione degli inquinanti gassosi e del particolato, unitamente a misure di deposizione e speciazione (glossario aria) chimica dell'aerosol, forniscono informazioni relative allo stato di alterazione delle condizioni ambientali;
- l'elaborazione dei dati di qualità dell'aria, l'applicazione di algoritmi stocastici e deterministici permettono la costruzione della distribuzione territoriale dei livelli di concentrazione e deposizione e la valutazione del diverso contributo delle singole sorgenti emmissive.

Ai fini della valutazione della qualità dell'aria possono essere utilizzate le seguenti tecniche:

- a) **Misurazioni in siti fissi:** metodologia che prevede la determinazione dei livelli di concentrazione degli inquinanti atmosferici mediante rilevamento in centraline automatiche dislocate in punti fissi del territorio. Il monitoraggio degli inquinanti viene realizzato mediante l'impiego di strumentazione automatica o manuale contenuta nelle centraline. Il campionamento dell'aria ambiente avviene con frequenza oraria o giornaliera e ciascuno strumento determina la concentrazione dell'inquinante in base al caratteristico principio chimico-fisico di funzionamento. I dati prodotti da ciascuno strumento sono raccolti e archiviati da un computer (datalogger) presente in ciascuna centralina; il datalogger trasmette i dati ai centri operativi provinciali dove viene eseguita l'operazione di verifica dei dati (validazione) e l'immissione degli stessi nella tabella della qualità dell'aria presente nel sito internet.
- b) **Metodi di misura indicativi:** metodologie per la stima dei livelli di concentrazione degli inquinanti atmosferici mediante campagne di misura con laboratori mobili. I metodi di misura indicativi realizzano misure che sono generalmente meno accurate di quelle realizzate nei siti fissi. Sono comunque utili ai fini della valutazione della qualità dell'aria perché permettono di stimare i livelli di concentrazione degli inquinanti nelle aree non coperte dal rete fissa.
- c) **Modelli di valutazione di emissione e dispersione di inquinanti atmosferici.**

Per quanto riguarda la misurazione in siti fissi, il monitoraggio della qualità dell'aria, finalizzato a garantire un adeguato livello di protezione della salute umana e degli ecosistemi, si effettua attraverso una rete di misura. Essa consiste in un sistema di stazioni di misurazione fisse (cabine di monitoraggio), il cui numero deve garantire una sufficiente copertura dei dati su tutto il territorio. Le cabine di monitoraggio sono classificate in base al tipo di zona in urbana, suburbana e rurale, ed in base al tipo di stazione: da traffico, industriale e di fondo (background). I siti fissi di campionamento urbani sono quelli inseriti in aree prevalentemente edificate; i siti fissi di campionamento suburbani sono quelli inseriti in aree sia edificate che non urbanizzate. I siti fissi di campionamento rurali sono quelli inseriti in tutte le aree diverse da quelle precedenti; il sito fisso si definisce rurale remoto se è localizzato ad una distanza maggiore di 50 km dalle fonti di emissione. Qualora i dati ottenuti con stazioni fisse non siano sufficienti, la Regione, o gli enti delegati da essa, indicano delle campagne di monitoraggio, al fine di integrare tali dati con quelli dei laboratori mobili. Al fine di garantire l'omogeneità e l'affidabilità delle misurazioni, delle tecniche di valutazione e dei risultati ottenuti su tutto il territorio, tale rete dovrebbe avere un gestore unico.

Sulla base dell'interpretazione dei dati ottenuti dalle misurazioni, vengono individuate le zone sul territorio regionale che presentano situazioni simili in termini di qualità dell'aria, e, per esse, si individuano i necessari piani e programmi di azione, risanamento e/o mantenimento. L'allegato XV e l'Appendice IV al Decreto Legislativo 155/2010 forniscono i criteri per l'elaborazione di detti piani e programmi, sviluppati sulla base di una adeguata conoscenza dei seguenti elementi:

- stato della qualità dell'aria;
- sorgenti di emissioni;
- ambito territoriale nel quale il piano si inserisce, con particolare riferimento ad aspetti come l'orografia, le condizioni meteo-climatiche, l'uso del suolo, la distribuzione demografica anche con riguardo alle fasce più sensibili della popolazione, gli insediamenti produttivi, il sistema infrastrutturale, la presenza di aree particolarmente sensibili all'inquinamento atmosferico, caratterizzate da ecosistemi vulnerabili, specie animali e vegetali protette, beni culturali ed ambientali;
- quadro delle norme e dei provvedimenti vigenti a livello europeo, nazionale, regionale, provinciale e comunale aventi rilievo in materia di inquinamento atmosferico.

In definitiva il decreto n. 155, si propone, principalmente, di individuare obiettivi di qualità dell'aria ambiente volti a evitare, prevenire o ridurre effetti nocivi per la salute umana e per l'ambiente nel suo complesso.

A tal fine:

- stabilisce valori limite e soglie critiche di concentrazione nell'aria di una serie di inquinanti: biossido di zolfo, biossido di azoto, benzene, monossido di carbonio, piombo, particolato (PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>), ozono, arsenico, cadmio, nichel e benzo (a) pirene;
- prevede una zonizzazione, da parte delle regioni e delle province autonome (sulla base dei criteri fissati dal medesimo decreto), di tutto il territorio nazionale ai fini della valutazione della qualità dell'aria ambiente;
- disciplina l'attività di valutazione della qualità dell'aria, che viene sostanzialmente demandata alle regioni o alle province autonome o, su delega, alle ARPA (agenzie regionali per la protezione dell'ambiente), e la conformazione della rete delle stazioni di misurazione della qualità dell'aria;
- disciplina la conformazione della rete delle stazioni di misurazione della qualità dell'aria;
- disciplina le attività di pianificazione necessarie a garantire il rispetto dei valori limite e il perseguimento dei valori obiettivo di qualità dell'aria.

Lo stesso decreto contiene una serie di norme finalizzate a garantire un'adeguata informazione al pubblico. Di recente sono stati emanati il DM Ambiente 29 novembre 2012 che, in attuazione del Decreto Legislativo n.155/2010, individua le stazioni speciali di misurazione della qualità dell'aria e il Decreto Legislativo n.250/2012 che modifica ed integra il Decreto Legislativo n.155/2010 definendo anche il metodo di riferimento per la misurazione dei COV (composti organici volatili). Le modifiche nascono dall'esigenza di superare alcune problematiche emerse nel corso della prima applicazione delle norme, entrate in vigore nel 2010, senza alterare la disciplina sostanziale ma assicurando un migliore raccordo fra le Regioni e Province autonome e il Ministero dell'ambiente.

## CAPITOLO 2

### Il processo di emissione dei veicoli

#### Premessa

Le attività dei motori a combustione utilizzati dai veicoli terrestri, navi e aerei determinano le emissioni atmosferiche da sorgenti mobili. La quota più rilevante è associata al traffico autoveicolare terrestre che produce di norma tre distinte tipologie di emissioni: le emissioni allo scarico, le evaporative e quelle derivanti dal consumo di materiali (pneumatici e freni). Le prime, quantitativamente più rilevanti, sono una diretta conseguenza del processo di combustione e, come tali, risultano dipendenti, in maniera molto complessa e di difficile valutazione pratica, da una serie di fattori legati al tipo di veicolo, al ciclo di funzionamento ed alla configurazione del motore, al suo regime di utilizzo e stato di usura ed infine al carburante utilizzato. Le presenze più consistenti (macroinquinanti) e limitati dalle normative sono:

- idrocarburi incombusti o parzialmente ossidati (HC), costituiti da quella parte del combustibile che non è bruciata o si è decomposta solo in parte;
- ossido di carbonio (CO) dovuto alla presenza di zone di combustione in difetto di ossigeno;
- ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) derivanti da reazioni tra l'azoto e l'ossigeno dell'aria, reazioni che a temperatura ambiente sono del tutto trascurabili ma che divengono importanti alle alte temperature dovute alla combustione;
- particolato (Particulate Matter, PM), il cui principale costituente è la fuliggine, materiale ad altissimo contenuto di carbonio; sulle particelle di fuliggine vengono adsorbiti idrocarburi pesanti, tra cui gli IPA, e sostanze inorganiche, tra le quali i solfati provenienti dallo zolfo del combustibile.

I motori a combustione interna, soprattutto nel caso dei motori diesel e a iniezione diretta di benzina nei quali i tempi disponibili per la miscelazione tra l'aria e il combustibile, non riescono a miscelare perfettamente l'aria al combustibile prima della combustione; ciò dà luogo alla formazione di fuliggine, il principale costituente del particolato. La formazione della fuliggine (Figura 2.1) è dovuta a complesse reazioni di condensazione tra frammenti di molecole idrocarburiche.



Figura 2.1– Emissioni inquinanti dei veicoli (Fonte: Green style)

Il biossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ) costituisce il principale prodotto di reazione, non nocivo come impatto diretto sulla salute, ma costituente importantissimo dei cosiddetti gas serra. Le emissioni evaporative si giustificano con la volatilità del combustibile e risultano così costituite unicamente dalla frazione leggera degli idrocarburi presenti nel carburante. Esse si verificano sia durante la marcia che nelle soste a motore spento e mostrano, oltre ad un'ovvia correlazione con il tipo di combustibile e con le condizioni ambientali esterne, dipendenze piuttosto complesse anche con la configurazione del motore.

## 2.1 Emissioni allo scarico

Come accennato nella premessa, i principali inquinanti presenti allo scarico dei motori a combustione interna sono il monossido di carbonio (CO), composti organici volatili (COV), ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ , miscela di NO e  $\text{NO}_2$ ) e, particolarmente per i motori diesel, anidride solforosa ( $\text{SO}_2$ ) e materiale particolato, quest'ultimo di granulometria inferiore a 10 nm ( $\text{PM}_{10}$ ), costituito in prevalenza da particelle carboniose e da idrocarburi pesanti adsorbiti. L'emissione di CO, COV ed  $\text{NO}_x$  è conseguenza del processo di combustione e delle condizioni in cui esso si sviluppa. L'equilibrio termodinamico delle numerose reazioni coinvolte nell'ossidazione stechiometrica con aria del carburante prevede che, nelle condizioni di temperatura e pressione allo scarico del motore, i gas siano costituiti unicamente da  $\text{CO}_2$  ed  $\text{H}_2\text{O}$  (prodotti dalla combustione), e da  $\text{N}_2$  ed altri componenti inerti contenuti nell'aria comburente. Tuttavia, lo studio della combustione all'interno dei cilindri di un motore mette in evidenza come, nelle distinte fasi che ne caratterizzano il ciclo di funzionamento (aspirazione, compressione, accensione ed espansione, scarico), si verifichino variazioni locali di temperatura molto intense, con velocità tali da non garantire tempi di

permanenza sufficienti al raggiungimento dell'equilibrio. Anche se possibile dal punto di vista termodinamico, la completezza della combustione non viene in pratica mai raggiunta all'interno del motore per motivi di ordine cinetico: la composizione delle miscele gassose prodotte risulta quindi dal "congelamento" degli equilibri chimici a temperature superiori a quelle di scarico.

All'incompletezza delle reazioni attivate dal processo di combustione, dovuta al brusco raffreddamento dei gas durante l'espansione e lo scarico della miscela dai cilindri, sono da imputarsi le emissioni di CO e di idrocarburi, tipici prodotti di ossidazioni solo parziali.

Per gli idrocarburi incombusti, la cui ossidazione procede piuttosto rapidamente entro ampi intervalli di temperatura, secondo meccanismi di reazione a catena che coinvolgono atomi e radicali liberi estremamente attivi, l'ipotesi del blocco cinetico non è tuttavia sufficiente a spiegarne da sola l'emissione. L'arresto della combustione da cui essi traggono la loro origine è prevalentemente da attribuirsi agli intensi gradienti di temperatura che si verificano in zone di spessore limitato lungo le pareti del cilindro (zona di "quenching") o all'interno di micro fessure presenti sulla parete stessa, in corrispondenza delle quali si verificano brusche riduzioni locali della temperatura.

Un ulteriore fattore legato alle modalità di combustione nel motore che esercita una notevole influenza sulle emissioni è costituito dal rapporto A/F fra l'aria ed il carburante alimentato nei cilindri. In condizioni stechiometriche, tale rapporto vale, in termini di peso e per i carburanti di più comune utilizzo (benzina e gasolio), tra 14,5 e 15: valori inferiori danno luogo ad un eccesso di carburante rispetto all'aria (miscele ricche) mentre valori superiori indicano un eccesso d'aria rispetto a quella richiesta dalla stechiometria della combustione (miscele povere). La carenza di ossigeno che si verifica nelle miscele ricche favorisce la presenza di CO ed idrocarburi, prodotti di incompleta combustione, mentre riduce quella degli NO<sub>x</sub>, la cui formazione è strettamente dipendente dalla disponibilità dell'ossigeno stesso. Per miscele prossime ai rapporti stechiometrici, le emissioni di CO ed idrocarburi si riducono sensibilmente mentre gli NO<sub>x</sub> raggiungono le massime concentrazioni, in virtù della presenza di O<sub>2</sub> e delle alte temperature caratteristiche della combustione in tali condizioni. Per miscele povere, l'ampia disponibilità di O<sub>2</sub> minimizza le emissioni di CO e quelle di idrocarburi che, tuttavia, presentano un successivo incremento per miscele estremamente povere, in seguito alle difficoltà di combustione per la massiccia presenza di aria; le concentrazioni di NO<sub>x</sub> subiscono invece una costante riduzione, in virtù della progressiva diminuzione di temperatura con l'impoverimento della miscela, legata all'effetto diluente dell'aria in eccesso.



Contrariamente al caso dei composti sin qui considerati, la presenza o meno di SO<sub>2</sub> e particolato nelle emissioni dei motori risulta fortemente dipendente dal tipo di carburante utilizzato. L'SO<sub>2</sub> deriva totalmente dall'ossidazione dello zolfo contenuto nel carburante, mentre il materiale particolato è legato alle difficoltà di combustione dei carburanti contenenti frazioni idrocarburiche pesanti: ambedue i composti sono pertanto caratteristici dei gas di scarico dei motori alimentati a gasolio, e risultano praticamente assenti in quelli a benzina. L'entità e le caratteristiche qualitative delle emissioni dagli autoveicoli risultano pertanto determinate dalle modalità di combustione e dal tipo di carburante, diverso a secondo del tipo di motore utilizzato: benzina nei motori ad accensione comandata (ciclo otto) o gasolio in quelli ad accensione spontanea (ciclo diesel). I due tipi di motore presentano anche condizioni di combustione assai diverse, che risultano inoltre variabili con il regime di funzionamento del motore stesso, con la sua età e con il suo stato di manutenzione.

## 2.2 Fattori che influenzano l'emissione

La difficoltà di spiegare analiticamente i processi fisico-chimici che governano la produzione degli inquinanti in seno al fluido evolvente che viene combusto nel motore consiglia di assumere come variabili indipendenti dei modelli alcuni parametri relativi alle caratteristiche e alle condizioni di funzionamento dei veicoli nel loro complesso.

Tali parametri sono molteplici e reciprocamente correlati; è pertanto conveniente raggrupparli a seconda della loro natura. In un primo gruppo si possono individuare i parametri rappresentativi delle caratteristiche costruttive del veicolo, distinte in:

- caratteristiche generali del veicolo (peso a vuoto, efficienza aerodinamica, ecc);
- caratteristiche dell'apparato di propulsione.

Sono quest'ultime a esercitare il ruolo più importante nella determinazione del tipo e dell'entità delle emissioni delle sostanze inquinanti.

I principali parametri che descrivono l'apparato di propulsione sono il tipo di motore (ad accensione comandata o ad accensione spontanea), il tipo di combustibile utilizzato, le caratteristiche del fluido evolvente, il tipo di dispositivo di controllo delle emissioni, le caratteristiche di cilindrata e potenza.

Una seconda categoria di parametri comprende quelli che influenzano lo stato della meccanica del veicolo, come ad esempio lo stato di usura, lo stato di manutenzione, le condizioni di regolazione.

Anche in questo caso lo stato della meccanica dell'apparato di propulsione è di gran lunga più importante, nell'influenzare le emissioni dello stato delle altre componenti del veicolo.

In un terzo gruppo possono essere individuati i parametri che rappresentano le condizioni operative del veicolo nelle condizioni reali di traffico. Essi riguardano essenzialmente le caratteristiche di funzionamento dell'apparato di propulsione. Queste ultime possono essere a loro volta descritte da due categorie di variabili, fra loro dipendenti: quelle legate alla dinamica del motore, le più importanti delle quali sono la velocità di rotazione del motore e l'entità del carico a esso fornito; e quelle che descrivono lo stato termodinamico del fluido evolvente all'interno del cilindro, stato il quale a sua volta determina le caratteristiche della combustione (temperatura del motore, umidità e densità dell'aria, etc.).

Le variabili che descrivono la dinamica di funzionamento dell'apparato di propulsione sono peraltro legate ai parametri cinematici del moto del veicolo nel suo complesso (velocità, accelerazione, etc.).

Le caratteristiche costruttive, di stato della meccanica e operative del veicolo sono influenzate a loro volta dalle condizioni dell'ambiente esterno, dalle condizioni di tipo storico (uso storico del veicolo), riguardanti cioè la vita passata del veicolo, sia da quelle operative ovvero attuali. Sono importanti da ricordare anche i vincoli di produzione, ovvero le condizioni tecnologiche, decisionali e legislative in essere al momento della produzione del veicolo e quindi ne influenzano le caratteristiche costruttive. Le caratteristiche dell'ambiente esterno, che condizionano le caratteristiche operative del veicolo, possono essere raggruppate in diversi sottoinsiemi: lo stato dell'aria esterna, (temperatura ambiente, pressione atmosferica e umidità relativa dell'aria), le caratteristiche della via (pendenza longitudinale, sinuosità, caratteristiche della pavimentazione.), le condizioni di traffico (caratteristiche di deflusso), il tipo di uso attuale del veicolo (massa trasportata, lunghezza degli spostamenti, comportamento del guidatore).

### **2.2.1 Caratteristiche costruttive del veicolo**

Come accennato, l'influenza delle caratteristiche costruttive, e in particolare del loro apparato di propulsione, sull'entità delle emissioni inquinanti è di primaria importanza. I parametri rappresentativi delle caratteristiche dell'apparato di propulsione sono molteplici, ma essi possono essere raggruppati in tre diversi sottoinsiemi.

#### **2.2.1.1 Tipo di propulsione del veicolo**

In un primo luogo possono essere considerati tutti i parametri legati al tipo di propulsione del veicolo, che nella maggior parte dei casi può essere classificato in motore ad

accensione comandata o ad accensione spontanea. Dal tipo di propulsione dipendono, eccezion fatta per alcuni casi particolari, il tipo di combustibile utilizzato (benzina o diesel rispettivamente) e le proprietà del fluido evolvente. Nei motori ad accensione comandata l'innesco della combustione avviene tramite una scintilla, prodotta dalla candela durante la fase di compressione della miscela nel cilindro. La combustione, nelle diverse condizioni di carico del motore, avviene praticamente sempre in fase omogenea: la benzina viene, infatti, miscelata con l'aria comburente nel carburatore, ove evapora prima di essere immessa nei cilindri. Le condizioni di combustione del motore, e quindi le emissioni di CO, COV, ed NO<sub>x</sub>, sono influenzate da una serie di parametri costruttivi e di esercizio, correlati tra di loro in maniera molto complessa e con effetti spesso divergenti sui singoli inquinanti. Caratteristica essenziale dei motori ad accensione comandata è quella di utilizzare rapporti aria/combustibile leggermente ricchi o stechiometrici, con conseguenti elevate emissioni di CO e COV. Oltre che dalle variabili motoristiche, le emissioni presentano una dipendenza anche da talune caratteristiche del combustibile, in particolare dal contenuto di idrocarburi aromatici, per ciò che riguarda l'emissione di benzene, e dal contenuto di composti ossigenati, per ciò che riguarda l'emissione di aldeidi e altri composti carbossilici. Sia gli aromatici che gli ossigenati hanno funzioni antidetonanti in sostituzione dei derivati alchilici del piombo. Nei motori ad accensione spontanea (diesel), le reazioni di combustione si autoinnescano quando la miscela raggiunge le condizioni di temperatura e pressione che ne determinano l'accensione. L'iniezione del combustibile avviene qualche istante prima del punto morto superiore per cui, per gran parte della fase di compressione, nei cilindri è presente solo aria: la conseguente assenza dei rischi legati all'insorgere di fenomeni di detonazione consente di utilizzare rapporti di compressione più spinti, e quindi di ottenere di conseguenza rendimenti più elevati rispetto ai motori a ciclo Otto. Operando in tal modo, la combustione avviene in fase eterogenea: il combustibile non viene infatti evaporato e miscelato con l'aria prima dell'alimentazione e le reazioni di combustione si innescano in fase liquida. A tale eterogeneità, ed alle conseguenti difficoltà maggiori nell'adottare condizioni ottimali di combustione, sono imputabili in particolare le emissioni di materiale particolato, caratteristiche di questo tipo di motore, e di idrocarburi incombusti.

Una delle caratteristiche più importanti del motore diesel è costituita dal suo funzionamento nell'intervallo di rapporti aria/combustibile estremamente poveri. Le conseguenti emissioni di CO sono, pertanto, molto contenute, soprattutto al minimo ed ai carichi parziali.

Il rapporto aria/combustibile influenza anche le emissioni di COV che, come già illustrato, presentano un minimo in condizioni prossime allo stechiometrico (carichi massimi) e

crescono con l'impovertimento della miscela. Gli intermedi di ossidazione allo scarico sono anche fortemente influenzati, come già per i motori ad accensione comandata, dalla presenza di condizioni locali che limitano il processo di ossidazione (effetti parete, brusche riduzioni di temperatura), e risultano quindi dipendenti dalla configurazione della camera di combustione e del sistema di iniezione. L'ottimizzazione della turbolenza all'interno dei cilindri e l'adozione di sistemi di iniezione completamente nuovi (indiretta a precamera, diretta con iniezione a pompa o common rail), rappresentano elementi molto qualificanti per il controllo di tutti gli inquinanti ed in particolare per le polveri, nell'ultima generazione di motori diesel. Anche per i motori a diesel le emissioni risultano influenzate da alcune caratteristiche del combustibile. La presenza di SO<sub>2</sub> allo scarico è, in particolare, totalmente imputabile al contenuto di zolfo del carburante, e cresce linearmente con esso. Parte dello zolfo contribuisce, sia pure in misura modesta, anche alla formazione del particolato, tramite l'ossidazione in SO<sub>3</sub> e la successiva idrolisi in acido solforico e solfati. L'incremento della densità del combustibile o della sua temperatura di distillazione comportano, in genere, aumenti nelle emissioni di particolato, in virtù di una maggiore presenza delle frazioni idrocarburiche pesanti che bruciano con più difficoltà.

Uno studio sperimentale ha mostrato che il rapporto tra le emissioni rilevate su campioni di veicoli a benzina e quelle rilevate su campioni di veicoli diesel risulta, per ciascun inquinante salvo per gli NO<sub>x</sub> e gli IPA, praticamente costante. In particolare le emissioni dai veicoli diesel sono, rispetto a quelle dei veicoli a benzina, circa 30 volte più basse per il CO e circa 16 volte per gli HC. Le emissioni di CO<sub>2</sub> risultano del 14% minori per i veicoli a benzina con partenza a caldo (ma solo del 4% per quelli con partenza a freddo), le emissioni di IPA sono per veicoli a benzina maggiori del 21% a caldo e del 20% a freddo, il consumo del 9% a caldo e del 52% a freddo. Le emissioni di NO<sub>x</sub> mostrano invece un andamento generalmente crescente con velocità media per i veicoli a benzina, decrescenti per quelli diesel.

### **2.2.1.2 Caratteristiche di potenza**

Un secondo gruppo di parametri costruttivi del veicolo è composto da tutte le variabili connesse alle caratteristiche di potenza dell'apparato di propulsione.

Fra queste la cilindrata, oltre a essere un parametro distintivo per la normativa più recente della Comunità Europea, è anche un parametro ben correlato alla massa e alla potenza dei veicoli in commercio.

Uno studio sperimentale ha mostrato una certa correlazione tra la cilindrata e le emissioni di  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}_2$  per i veicoli a benzina, a parità di velocità media del moto. Tali emissioni aumentano, infatti, con l'aumentare della cilindrata per tutte le velocità medie studiate. Le emissioni di CO dei veicoli diesel aumentano invece con la cilindrata solo per velocità inferiori a circa 50 Km/h. Anche le emissioni di IPA sono più alte quando la cilindrata è maggiore.

La potenza massica di un veicolo, invece, è un parametro generalmente correlato con l'accelerazione massima. E' stata dimostrata una dipendenza delle emissioni di IPA dalla potenza massica, infatti, tali emissioni sono una funzione decrescente della potenza massica, in maniera più accentuata nei veicoli a benzina che in quelli diesel. L'emissione di particolato dai veicoli diesel, è anch'essa ben correlata alla potenza massica del veicolo.

### **2.2.1.3 Dispositivi di controllo delle emissioni**

Un terzo gruppo di parametri costruttivi è costituito da tutte le variabili legate al tipo di dispositivi di controllo delle emissioni impiegati dal veicolo, fra i quali si includono anche quegli accorgimenti motoristici che implicano la riduzione delle emissioni dal motore. La tipologia di questi ultimi dispositivi e la loro efficacia nella riduzione delle emissioni sono frequentemente legate alla disponibilità tecnologica e alle norme legislative di omologazione in vigore nell'anno della loro produzione. Per questa ragione l'anno di produzione o gli estremi delle normative corrispondenti, sono spesso adoperate come parametro distintivo della tipologia veicolare.

Le possibilità di controllare le emissioni risiedono in larga misura nelle fasi di formazione delle emissioni stessa e si sviluppano essenzialmente su 3 grandi direttrici:

- interventi primari su modifiche motoristiche più o meno avanzate fino all'uso di propulsori completamente diversi dai convenzionali (motori ibridi ed elettrici, motori elettrici in linea con pile a combustibile);
- interventi secondari che puntano a migliorare i sistemi di trattamento dei gas di combustione (marmitte catalitiche) e delle perdite evaporative (trappole di adsorbimento) ed a predisporre di nuovi (trappole per il materiale particolato dei diesel);
- modifiche dei carburanti fino all'impiego di prodotti del tutto diversi da quelli convenzionali (idrogeno).

Gli interventi primari si possono includere in alcune grandi linee di tendenza che recentemente convergono, oltre che verso la riduzione delle emissioni, verso l'effettiva riduzione dei consumi a parità di prestazioni. La riduzione dei consumi è una richiesta perentoria dei problemi di effetto serra, che dovrà avere la dovuta attenzione non avuta in passato. Lo sviluppo di sistemi di iniezione diretta del carburante, l'estensione di schemi di combustione compatibili con il riciclo dei gas di scarico (EGR) e il controllo elettronico delle valvole possono essere considerati i percorsi principali che consentiranno di raggiungere gli obiettivi indicati dall'Unione Europea per i nuovi motori. Sullo sfondo delle soluzioni motoristiche rimane ancora, con aspettative ridimensionate rispetto a quanto prospettato in passato, l'impiego di motori elettrici e soprattutto ibridi con batterie ricaricabili (Figura 2.2). Questi ultimi possono contare di qualche realizzazione sul piano industriale. L'impiego attuale, ma anche in prospettiva a breve e medio termine, sembra confinato a nicchie tipicamente rappresentate da alcuni centri urbani ed altre zone circoscritte, sia per i costi le prestazioni ancora non competitivi. Il rilancio del motore elettrico, appare ormai affidato all'alimentazione con pile a combustibili alimentate con idrogeno.



Figura 2.2– Vetture ibride con motori a benzina ed elettrico (Fonte: Green style)

Alla seconda direttrice appartengono soluzioni già abbondantemente sperimentate, quali le marmitte catalitiche (Figura 2.3), ma ancora suscettibili di sostanziali miglioramenti.

Le marmitte catalitiche attualmente in uso sono strutture monolitiche a nido d'ape di ceramica o metallo, rivestite da sostanze attive, tipicamente rodio e platino. Il dispositivo è indicato anche con il termine a tre vie perché realizza contestualmente l'ossidazione di CO e idrocarburi (preferibilmente sul platino) e la riduzione degli ossidi di azoto (in prevalenza sul rodio). Si tratta quindi di reazioni di riduzione degli ossidi di azoto  $\text{NO}_x$  ad azoto molecolare, che utilizzano come riducenti le altre due forme inquinanti (CO ed idrocarburi), a loro volta ossidate a  $\text{CO}_2$  e acqua.

Un cattivo controllo del processo può portare a reazioni indesiderate che, ad esempio, riducono poco l'NO. Aspetti ancora suscettibili di sostanziosi miglioramenti sono in primo luogo il problema del funzionamento a freddo, il deterioramento e l'impiego di materiali meno costosi e meno tossici. Il fatto che il processo catalitico richiede una temperatura minima per attivarsi (300-350 °C), esclude il funzionamento della marmitta nei primi minuti dopo una partenza a freddo. L'effetto è particolarmente negativo in aree urbane, dove i percorsi sono brevi e le partenze a freddo concentrate in alcune ore della giornata. Per quanto riguarda le emissioni evaporative gli strumenti di controllo si basano, su trappole con sostanze adsorbenti, rigenerate automaticamente da flussi di aria calda e avviate successivamente alla combustione nel motore. Un'altra possibilità di attenuare le perdite risiede nella riduzione della volatilità del carburante, normalmente espressa in termini di RVP (Reid Vapor Pressure). Come già accennato in precedenza le emissioni dei motori a ciclo diesel, risultano problematiche per quanto riguarda le elevate concentrazioni di ossidi di azoto NO<sub>x</sub> e di particolato PM, mentre le emissioni di idrocarburi incombusti HC, monossido e biossido di carbonio risultano di gran lunga inferiori rispetto a quelle dei motori a ciclo otto. Il particolato dei diesel è costituito prevalentemente da carbonio elementare, da una frazione organica solubile in solventi (SOF), adsorbita sulla parte carboniosa e da microgocce di idrocarburi condensati, acqua e solfati. La composizione dipende fortemente dalle condizioni operative del motore. Nella SOF si individuano le specie più pericolose per la salute, tipicamente IPA (idrocarburi policiclici aromatici) e nitro-IPA. Il controllo di questa emissione a valle degli interventi motoristici si realizza allo stato attuale con l'impiego di trappole filtranti (Figura 2.3), rigenerate periodicamente per combustione catalitica dei residui. Si tratta di filtri in grado di bloccare con grande efficienza le particelle. Si osservano efficienze di rimozione del particolato dell'ordine dell'80-90%.

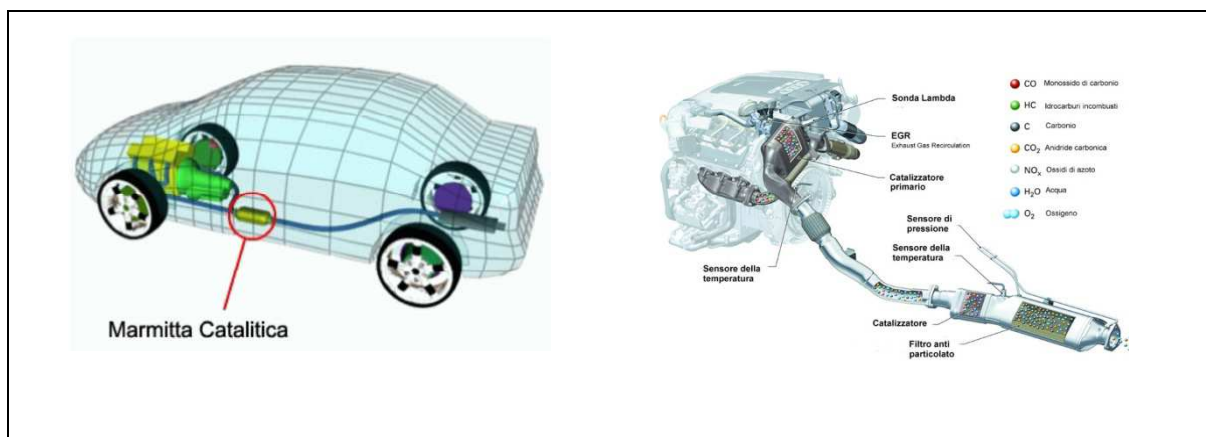


Figura 2.3– Marmitta catalitica e Filtro antiparticolato diesel DPF (Fonte: Green style)

Alla terza direttrice appartiene la possibilità di impiegare nell'autotrazione carburanti formulati a partire da materie prime non petrolifere (da processi diversi da quelli convenzionali di raffineria) che ha ricevuto sempre grande attenzione e che è cresciuta ancor più negli ultimi decenni allo scopo di estendere e diversificare la disponibilità di carburante. Tale diversificazione è intesa sia in senso globale, per assicurare lo sviluppo futuro a fronte della prospettiva di un graduale esaurimento dei giacimenti di petrolio, sia per diminuire la dipendenza dal petrolio stesso da parte dei paesi che non vi hanno un facile accesso, dato che, come è ben noto, esso è concentrato in aree abbastanza ben delimitate del pianeta. Queste motivazioni restano importanti ma, con il crescere della sensibilità alle tematiche ambientali, è diventato parimenti importante che questi carburanti alternativi siano non solo il più possibile intercambiabili dal punto di vista energetico con quelli convenzionali, ma che abbiano il vantaggio di essere, in qualche modo, più 'puliti'. Tra i carburanti alternativi di ultima generazione ricordiamo il GPL che è una miscela di propano e butano in diverse proporzioni. Anche se non può dirsi un vero carburante alternativo, poiché almeno in larga parte è un prodotto della lavorazione del petrolio, può dar luogo a emissioni più basse di quelle della benzina (perlomeno rispetto ai veicoli a benzina di generazione non recentissima). È interessante come carburante per autotrazione perché può essere stoccato allo stato liquido (quindi con una densità energetica paragonabile a quella della benzina) e perché vaporizza più rapidamente della benzina. Esso ha pure un elevato numero d'ottano, che permetterebbe l'uso di motori ad alto rapporto di compressione con un aumento di rendimento rispetto alla benzina, ma tale vantaggio è per lo più virtuale, in quanto la rete di distribuzione, anche nei paesi in cui il GPL è più diffuso, è limitata e, per assicurare il rifornimento in ogni caso, i costruttori di autoveicoli non costruiscono motori funzionanti con il solo GPL. Sia che l'impianto a GPL venga applicato a posteriori a un veicolo progettato per essere alimentato a benzina, sia che il veicolo sia progettato ad hoc, il motore deve poter funzionare anche a benzina. Inoltre, il veicolo deve sempre essere dotato di due serbatoi, per la benzina e per il GPL, con riduzione dello spazio e del carico utile. Il GPL viene considerato con interesse anche perché consente una riduzione delle emissioni e del rumore dei veicoli pesanti a motore diesel di vecchia generazione ma ancora lontani dal termine della loro vita utile. Negli ultimi decenni il gas naturale per autotrazione ha assunto una importanza crescente come misura per ridurre le emissioni tossiche degli autoveicoli, costituite da precursori di ozono, particolato (PM) e altri composti tossici come il benzene, il toluene, l'1,3-butadiene, la formaldeide e l'acetaldeide. Il gas naturale è una delle fonti energetiche più abbondanti.



Esso è costituito soprattutto da metano ed è sia un ottimo combustibile per applicazioni stazionarie (generazione di calore/energia per usi industriali e domestici), sia un ottimo carburante per i veicoli, in particolare per i motori ad accensione comandata. Il principale svantaggio intrinseco del gas naturale è la sua bassa densità energetica che, a parità di percorrenza, implica l'uso di serbatoi di stoccaggio a bordo molto più voluminosi rispetto ai carburanti liquidi. Inoltre, a causa della loro diffusione relativamente bassa, i veicoli a gas naturale compresso non sempre godono di dispositivi di trattamento dei gas di scarico altrettanto efficienti e sofisticati dei veicoli alimentati a benzina o a gasolio. Infine tra i carburanti puliti è doveroso menzionare l'idrogeno. L'enorme interesse suscitato dall'idrogeno è dovuto al fatto che la sua combustione genera virtualmente solo vapore d'acqua, e quindi nei fumi di scarico non sono presenti sostanze tossiche né generatrici di effetto serra. Il suo impatto ambientale locale è quindi praticamente nullo. Come carburante per autotrazione, l'idrogeno è stato da tempo sperimentato con successo nei motori a combustione interna ad accensione comandata ed è considerato il carburante di elezione per le celle a combustibile (FC, Fuel Cell) a membrana protonica. Tale tipologia di FC è quella che, per le sue caratteristiche (bassa temperatura di funzionamento, alta densità energetica) appare oggi la più adatta per le applicazioni nell'autotrazione. I principali ostacoli sono relativi ai problemi di sicurezza (in caso di perdite l'idrogeno diffonde molto rapidamente nell'aria, formando una miscela facilmente esplosiva) e alla densità di energia: il contenuto energetico per unità di volume dell'idrogeno liquido, la forma più densa di stoccaggio dell'idrogeno, è 3,5 volte inferiore a quello della benzina, il che comporta serbatoi piuttosto grandi e una autonomia ridotta.

### **2.2.2 Stato della meccanica dei veicoli**

Rilievi sperimentali hanno mostrato come l'entità delle emissioni inquinanti di un veicolo a motore siano fortemente influenzate dallo stato della meccanica del veicolo in generale e del suo apparato di propulsione in particolare. Lo stato della meccanica dipende a sua volta dalla storia di funzionamento del veicolo durante la sua vita utile, che si traduce in due diversi parametri dagli effetti contrastanti: l'uso a cui il veicolo è stato sottoposto e gli interventi di manutenzione effettuati. L'uso cui il veicolo è stato sottoposto è esprimibile in termini di chilometri percorsi, anche se spesso è utile specificarlo in funzione degli anni di vita, supponendo che ad ogni anno corrisponda un certo numero medio di chilometri percorsi.

L'entità dell'uso di un veicolo influenza lo stato di invecchiamento a causa di fattori esclusivamente meccanici, consistenti nel deterioramento delle parti meccaniche, determinando generalmente un aumento dell'entità delle emissioni.

Le attività di manutenzione effettuate sul veicolo contrastano invece il processo di invecchiamento delle parti meccaniche, e quindi tendono a ridurre l'entità media delle emissioni inquinanti. Per i veicoli non catalizzati gli interventi di manutenzione consentono, in gran parte dei casi, di ottenere significative riduzioni nelle emissioni di CO, più contenute nel caso di COV, mentre non sembrano in grado di modificare apprezzabilmente gli NO<sub>x</sub>, che comunque sono poco influenzati dal grado di manutenzione. Per i veicoli catalizzati il cattivo funzionamento della marmitta influenza significativamente l'emissione di tutti gli inquinanti.

La letteratura tecnica non è prodiga di studi sulla correlazione tra emissioni inquinanti e stato della meccanica dei veicoli stradali. In aggiunta, i relativi dati sperimentali sono di difficile interpretazione sia a causa dell'interazione degli effetti contrastanti dell'usura e degli interventi manutentivi, sia dalla dipendenza di questi ultimi da un gran numero di fattori di non facile schematizzazione.

### **2.2.3 Dinamica del motore**

Le variabili legate alla dinamica del funzionamento del motore che influenzano maggiormente le emissioni inquinanti sono la velocità di rotazione del motore (generalmente espressa in numero di giri per minuto) e la quantità di combustibile immessa per ciclo (carico di combustibile). Dal punto di vista del veicolo nel suo complesso la dipendenza delle emissioni dalle condizioni operative del motore può anche essere esaminata in termini di relazione tra quantità della sostanze emesse e le principali variabili del moto, ovvero la velocità e l'accelerazione del veicolo.

Gli stati d'accelerazione sono ad esempio potenzialmente favorevoli ad una maggiore emissione in quanto coincidono con un aumento sia del carico combustibile che del numero di giri del motore. Nella stessa maniera si può rilevare che, poiché il prodotto tra la velocità  $v$  e accelerazione  $a$  rappresenta un'energia per unità di massa, l'energia persa dal veicolo durante una accelerazione è direttamente correlata al valore di tale prodotto. Maggiore è l'energia fornita dall'apparato di propulsione, maggiore è anche il valore di  $v \times a$ ; e minore è in generale anche l'efficienza della combustione nei cilindri, tanto più quanto il motore è prossimo alle condizioni limiti di funzionamento. All'aumentare del prodotto  $v \times a$  quindi, risultano maggiori le emissioni di CO e di idrocarburi.

La dipendenza delle emissioni inquinanti dall'accelerazione è stata recentemente rilevata, da un laboratorio francese, comparando le emissioni rilevate a motore caldo su cicli di guida a velocità variabile con quelle rilevate su cicli a velocità stabilizzata (costante), per analoghi valori della velocità media. Le emissioni rilevate a velocità costante sono risultati, per tutti gli inquinanti, minori di quelle rilevate a velocità variabile, con differenze più accentuate nel caso di veicoli a benzina e velocità più basse. L'aliquota di emissione attribuibile all'accelerazione risulta notevole. Per ciò che concerne la relazione tra emissioni e velocità media del moto si hanno relazioni differenti per le diverse sostanze inquinanti. Per il monossido di carbonio e gli idrocarburi incombusti si ha in generale una diminuzione delle emissioni a partire dalla velocità nulla fino a un certo valore della velocità: al di là di questo le emissioni cominciano ad aumentare. Per gli ossidi di azoto si ha invece che le emissioni variano poco con la velocità media; in alcuni casi presentando un valore massimo intorno al valore minimo delle emissioni di CO e di HC, in altri continuando ad aumentare con la velocità.

#### **2.2.4 Condizioni termiche del motore**

Le emissioni inquinanti di un veicolo sono influenzate dalla temperatura del sistema di propulsione quando questa è inferiore a quella del suo funzionamento a regime termico. Tale evenienza si verifica durante la fase di riscaldamento del motore, ovvero, nel caso in cui la sua temperatura iniziale sia inferiore a quella di funzionamento di regime, dal momento in cui esso viene messo in funzione fino a quando non raggiunge il regime termico. Una volta raggiunto quest'ultimo, la temperatura si mantiene pressoché costante, intorno a un valore notevolmente maggiore di quello della temperatura esterna, durante tutto il successivo funzionamento del motore. A causa delle difficoltà pratiche di misurazione della temperatura interna dei cilindri, la definizione della temperatura di funzionamento a regime termico di un motore a combustione interna viene generalmente specificata attraverso un valore di riferimento assunto dal liquido di raffreddamento. Tale valore è convenzionalmente fissato in 70 °C per l'acqua oppure di 80 °C per l'olio. Si definisce pertanto fase di funzionamento a caldo (o fase di funzionamento a regime termico, o fase termica stabilizzata) di un motore a combustione interna quella fase in cui il motore funziona a regime termico, in quanto la temperatura dell'acqua di raffreddamento ha raggiunto i 70°C (o dell'olio di 80°C). A queste condizioni ci si riferisce generalmente quando vengono determinate le emissioni inquinanti senza far riferimento alla temperatura del motore.

Analogamente si definisce fase di funzionamento a freddo (o fase di funzionamento in transitorio termico) di un motore a combustione interna quella fase in cui il motore funziona in transitorio termico in quanto la temperatura dell'acqua di raffreddamento è inferiore a 70 °C (o quella dell'olio a 80 °C). In queste condizioni le emissioni inquinanti e il consumo di combustibile sono maggiori di quelli medi della fase a regime, e ciò è dovuto a diverse cause. La causa principale consiste nella bassa qualità della combustione conseguente alla bassa temperatura: il combustibile non vaporizza nella maniera migliore e sono pronunciati nel cilindro i fenomeni di combustione parziale o mancata. Un'altra causa dell'aumento delle emissioni durante il funzionamento a freddo è l'arricchimento della miscela determinato dalla diminuzione del rapporto aria/combustibile per consentire la messa in moto a motore freddo. Infine, maggiori emissioni e consumi sono determinati, nei veicoli dotati di catalizzatore, dal cattivo funzionamento dei convertitori catalitici con temperature dei gas di scarico troppo basse. Secondo alcune misure sperimentali condotte negli USA su automobili a benzina, il rapporto tra le emissioni medie misurate nelle due fasi di transitorio dopo una partenza a freddo (cold transient) e funzionamento a caldo (hot stabilized) è pari a circa 3 per gli HC incombusti e il CO, 1,5 per gli ossidi di azoto. Il consumo di combustibile non varia invece in maniera apprezzabile (meno del 20%). Nella fase di transitorio dopo la partenza a motore caldo (hot transient) si registrano inoltre immissioni di CO e HC più basse e di NO<sub>x</sub>, più alte rispetto alla fase hot stabilized: questo fenomeno è giustificato dal fatto che la velocità media della fase hot stabilized è minore. In un più recente studio sperimentale sono stati determinati i rapporti medi fra le emissioni a freddo e a caldo su diversi cicli di guida. Il test statistico di Student, applicato alla differenza tra le emissioni a freddo e quelle a caldo, si è rilevato molto significativo eccetto che per gli NO<sub>x</sub>. I risultati mostrano che i veicoli a benzina sono più sensibili alla temperatura del motore di quelli diesel. Le sovraemissioni a freddo sono di entità importante per tutti gli inquinanti, in particolare per gli HC e gli IPA, con l'eccezione degli NO<sub>x</sub>. Per gli IPA le emissioni a freddo mostrano inoltre una certa dipendenza dall'età e dalla cilindrata del veicolo. La determinazione delle emissioni inquinanti in funzione della temperatura del motore presenta notevoli difficoltà teoriche. L'approccio generalmente usato per determinare l'influenza della temperatura del motore sulle emissioni e sui consumi consiste nel determinare sperimentalmente un fattore di emissione a freddo, oppure un rapporto tra le emissioni medie a caldo e a freddo per ogni inquinante. Tali quantità sono evidentemente funzioni della temperatura esterna dell'aria. Inoltre, la lunghezza e le caratteristiche dello spostamento che viene effettuato da un veicolo influenzano notevolmente le sovraemissioni a freddo.

### 2.2.5 Normative europee sulle emissioni dei gas di scarico

La legislazione Europea sulle emissioni dei veicoli stradali è stata sviluppata a partire dagli anni '70, introducendo una serie di regolamenti e direttive riguardanti le procedure normalizzate, le strumentazioni da impiegare e i limiti delle emissioni da rispettare.

La sua struttura risulta essere molto articolata, andando a regolare diversi aspetti, soprattutto per quanto riguarda gli autoveicoli leggeri (autovetture e veicoli commerciali).

Tali regolamenti europei sul controllo dell'emissione dei gas di scarico indicano la quantità massima di inquinanti che il motore di un veicolo può emettere durante il suo funzionamento. In particolare, stabiliscono la quantità, in grammi per chilometro, di inquinanti che possono essere emessi (monossido di carbonio (CO), idrocarburi (HC), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) e, per i veicoli diesel, il particolato). Essi, più note con le sigle di Euro 0, Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4, Euro 5, Euro 6, variano a seconda del tipo di veicolo: mezzi pesanti, automobili e motocicli. Le prescrizioni concernenti i gas di scarico per i veicoli a motore sono uno degli strumenti più importanti per ridurre le emissioni di inquinanti del traffico e vengono progressivamente inasprite.

In Tabella 2.1 riportiamo un quadro completo relativo ai limiti di emissione allo scarico per autovetture previsti dalle normative UE con l'indicazione delle date relative alle immatricolazioni.

Tabella 2.1 – Standard alle emissioni per autoveicoli (g/Km)  
(Fonte: Direttiva Comunitaria 70/220 del 1971 )

Tipo	Data	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+ NO <sub>x</sub>	PM
<b>Diesel</b>							
Euro 1	Luglio 1992	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)
Euro 2	Gennaio 1996	1.0	-	-	-	0.7	0.08
Euro 3	Gennaio 2000	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05
Euro 4	Gennaio 2005	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025
Euro 5	Settembre 2009	0.50	-	-	0.180	0.230	0.005
Euro 6	Settembre 2014	0.50	-	-	0.080	0.170	0.005
<b>Benzina</b>							
Euro 1	Luglio 1992	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	-
Euro 2	Gennaio 1996	2.2	-	-	-	0.5	-
Euro 3	Gennaio 2000	2.3	0.20	-	0.15	-	-
Euro 4	Gennaio 2005	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Euro 5	Settembre 2009	1.0	0.10	0.068	0.060	-	0.005*
Euro 6	Settembre 2014	1.0	0.10	0.068	0.060	-	0.005*
* si applica solo ai veicoli con iniezione diretta.							

Per gli autofurgoni (veicoli commerciali leggeri con peso totale ammesso inferiore a 3,5 t) valgono fondamentalmente le medesime prescrizioni che per le automobili. Per gli autofurgoni grandi con peso totale ammesso superiore a 2,5 tonnellate esistono tuttavia agevolazioni sui gas di scarico (valori limite più elevati).

Per i veicoli pesanti (autocarri e autobus con peso superiore a 3,5 t), dal 2013 sono entrati in vigore prescrizioni molto severe che prevedono un valore limite di NO<sub>x</sub> basso (0,4 g/kWh) e introducono un valore limite relativo al numero di particelle. Questi valori limite severi possono essere rispettati soltanto con un sistema di post-trattamento dei gas di scarico attraverso filtri antiparticolato e impianti DeNO<sub>x</sub>.

Autocarri e autobus devono essere esaminati periodicamente dagli Uffici cantonali della circolazione. Inoltre, sono previsti controlli decentralizzati sui gas di scarico. I motoveicoli sono soggetti a prescrizioni sui gas di scarico molto meno severe rispetto alle automobili. Per questa ragione, numerosi motoveicoli leggeri e pesanti producono ancora quantità di inquinanti ben superiori rispetto alle automobili.

La Commissione dell'Unione europea ha proposto una tabella di marcia per una futura riduzione graduale dei valori limite per i gas di scarico. Dal 2021 circa, i motoveicoli leggeri e pesanti saranno soggetti alle medesime prescrizioni che per le automobili.

## CAPITOLO 3

### Approccio modellistico all'inquinamento da traffico

#### Premessa

Il ruolo del sistema dei trasporti sta assumendo un'importanza crescente nelle società moderne, e di conseguenza sono sempre più evidenti e rilevanti i problemi connessi con la sua gestione. La mobilità ha notevoli ripercussioni sul piano socio-economico di ogni paese: in particolare l'ottimizzazione della gestione e della efficienza del trasporto, e la riduzione del suo impatto sull'ambiente circostante, sono tematiche di primo piano del dibattito politico. In Italia si è osservata la crescita continua del numero di veicoli circolanti, cui però non è corrisposta una sufficiente crescita delle infrastrutture urbane. Se a ciò si aggiunge una diffusa inadeguatezza del servizio del trasporto pubblico, pur in via di miglioramento in molte aree, si comprende facilmente come nelle città italiane il problema sia particolarmente sentito. Purtroppo l'Italia si contraddistingue, nell'ambito dell'Unione Europea, per un parco circolante piuttosto vetusto che presenta una notevole presenza di auto con età media superiore a 10 anni ed in stato manutentivo scadente. Come ovvio, questo tipo di veicoli è caratterizzato da maggiori emissioni e consumi, oltre che da minore sicurezza. La situazione italiana è ulteriormente aggravata dalla stessa conformazione dei centri urbani, che risente della loro evoluzione storica: le strade, in genere di piccole dimensioni, sono spesso intasate dal traffico e sono percorse a velocità basse con frequenti stop and go che provocano un maggior rilascio di inquinanti rispetto a condizioni di traffico scorrevole. Inoltre nelle città si presenta sempre più pressante il problema della sosta dei veicoli e spesso l'automobilista deve compiere una lunga ricerca per trovare uno spazio libero adibito al parcheggio, provocando un notevole incremento dei consumi e delle emissioni che si aggiungono a quelle dovute al traffico vero e proprio. Diventa quindi urgente fornire ai manager ambientali degli strumenti che possano supportare le decisioni e che, in particolare, consentano di valutare gli effetti, a breve e medio termine, delle disposizioni normative sull'effettivo stato della qualità dell'aria. Per questo motivo, si è reso necessario utilizzare una struttura modellistica che a partire dalla richiesta di mobilità potesse permettere di valutare l'impatto delle emissioni da traffico sulla qualità dell'aria urbana.

### 3.1 Modelli per lo studio dell'inquinamento urbano da traffico

Il complesso problema dell'inquinamento atmosferico causato dal traffico veicolare può essere affrontato per mezzo di una serie di modelli che, a partire dai dati caratterizzanti le sorgenti inquinanti considerate, presenti nell'area di indagine, e lo stato meteorologico del periodo di studio, simulino l'andamento della concentrazione degli inquinanti.

Nel caso specifico dell'inquinamento indotto da sorgenti veicolari si può articolare lo studio in tre passi per mezzo di una suite modellistica del tipo mostrato in Figura 3.1.

Lo schema a blocchi riporta la tipologia generale di modelli e i dati da impiegare. La scelta degli specifici modelli da utilizzare è legata alla scala temporale e spaziale in cui si vuole operare, al tipo di risultati che si desidera ottenere e a considerazioni pratiche di reperibilità e conoscenza dell'utilizzo dei modelli stessi.

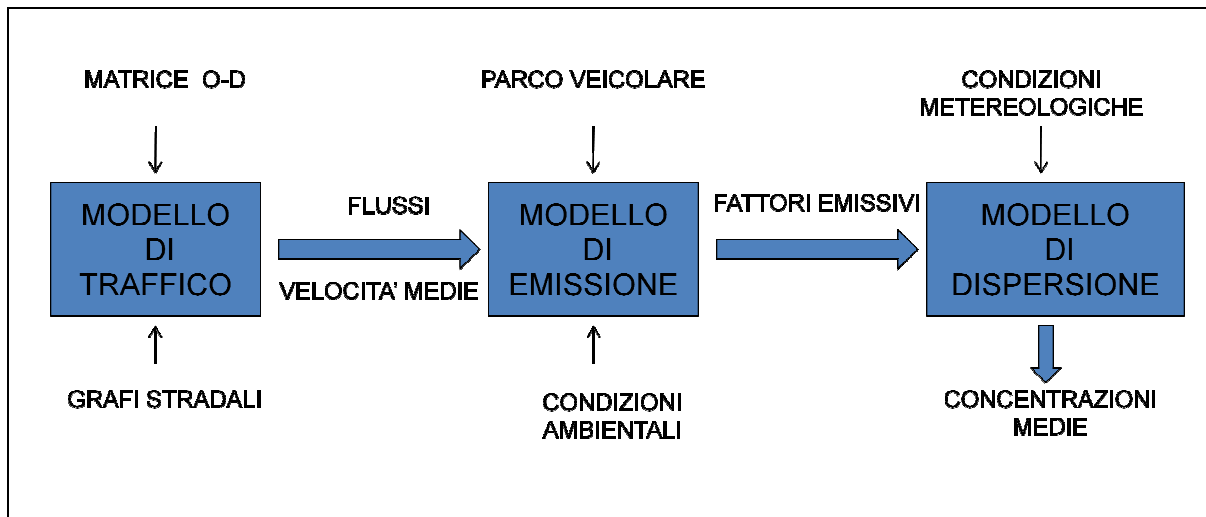


Figura 3.1 – Schema a blocchi di una tipica suite modellistica per lo studio dell'inquinamento urbano da traffico (Fonte: Euromobility)

I modelli di traffico hanno come obiettivo quello di ottenere la distribuzione e la caratterizzazione del traffico sulla rete stradale oggetto di studio (o sulla rete logistica, in generale) a partire dai dati sulla richiesta ed offerta di mobilità. Nel caso specifico della simulazione del traffico veicolare all'interno di una rete urbana, i dati in uscita sono costituiti dal flusso veicolare [veicoli/h] e la velocità media [km/h], definiti per ogni arco stradale.

Tali modelli si basano sull'uso di una o più matrici OD (origine-destinazione) di spostamento, elaborate da specifici programmi. Il modello ripartisce quindi i flussi veicolari all'interno della rete stradale, a partire da nodi di origine verso i poli attrattivi di destinazione dei percorsi.



In particolare, possono essere definite due tipi di matrici OD e di flussi, in base alla modalità di trasporto che si intende pianificare, distinguendo tra privato e pubblico.

Il procedimento completo che permette di giungere al risultato si articola in tre passi: valutazione della generazione del traffico, elaborazione della sua distribuzione e ripartizione degli spostamenti all'interno della rete studiata.

Per quanto riguarda i modelli emissivi, nel 1985 all'interno del progetto CORINAIR, (Coordination Information Air, realizzazione degli inventari regionali e provinciali) è stato elaborato COPERT (Computer Programme for estimating Emissions from Road Transport), un programma che stima le emissioni inquinanti da sorgenti mobili, diventato il modello standard europeo per le emissioni stradali. Non mancano naturalmente altre attività di ricerca che hanno portato ad altri modelli emissivi elaborati a livello delle singole nazioni. Questi altri modelli si basano su considerazioni e ipotesi diverse tra loro e da quelle del modello COPERT, rendendo i rispettivi risultati difficilmente confrontabili.

Gli Stati Uniti, d'altro canto, hanno adottato un loro specifico modello, diverso ancora dai precedenti, denominato MOBILE, che tiene conto della specificità dei combustibili e del parco circolante USA. I modelli finora realizzati nei paesi dell'Unione Europea sono suddivisibili in tre grandi categorie, che si distinguono principalmente per le differenti ipotesi adottate per il loro sviluppo. L'approccio modellistico europeo che ha l'origine più lontana nel tempo si basa sulla constatazione che le emissioni medie di un veicolo durante la marcia su un dato percorso sono funzione della velocità media. In particolare le concentrazioni raggiungono i massimi valori in corrispondenza di cicli a bassa velocità caratterizzati da frequenti arresti e partenze. Questo tipo di modelli si basa su relazioni funzionali che legano velocità media e quantitativo di sostanza emessa per chilometro, ricavate interpolando molti dati sperimentali forniti da prove di emissione ripetute su un banco a rulli o banco motori. Il modello più diffuso, appartenente a questo filone, è proprio il COPERT, nel quale le curve di emissione sono basate sull'ipotesi che il veicolo percorra un ciclo di guida standard, come definito nelle direttive EURO. Questo gruppo di modelli è però suscettibile di alcune critiche: in particolare il ciclo di guida descritto dalle norme EURO non è un ciclo rappresentativo delle reali condizioni di guida su strada, che possono variare notevolmente pur a parità di velocità media. Quindi un metodo di calcolo che tenga conto solo di tale parametro può essere considerato limitato e soggetto a notevoli incertezze. Per una più realistica valutazione dei coefficienti emissivi i modelli più recenti introducono almeno un ulteriore parametro, da affiancare alla velocità media: in genere viene considerato l'andamento dell'accelerazione nel tempo, ovvero il prodotto velocità \* accelerazione.

I modelli emissivi di questo tipo forniscono come risultati i valori istantanei delle emissioni e non i valori mediati su un percorso, come accade per i modelli descritti in precedenza, inoltre generalmente sono basati su misurazioni effettuate con riferimento a cicli di guida più realistici, costruiti a partire da dati raccolti durante cicli di guida condotti su strada.

Un ultimo gruppo di modelli, invece, assume come elemento di distinzione tra i vari cicli di guida un parametro difficilmente quantificabile: la condizione del traffico.

L'obiettivo principale è quello di fornire il valore medio delle emissioni veicolari su un dato percorso. A ciascuna situazione definita viene attribuito un gruppo di fattori di emissione, specifico a seconda del tipo inquinante e di veicolo presi in considerazione.

Qualunque sia il modello emissivo da applicare, esso necessita in ingresso delle seguenti informazioni:

- condizioni climatiche e periodo della simulazione;
- inquinanti e sorgenti oggetto di studio;
- descrizione delle sorgenti;
- informazioni caratterizzanti le modalità di emissione.

Parallelamente in uscita si otterrà la quantificazione delle emissioni e dei consumi di combustibile in forma aggregata o in modo specifico per ciascuna categoria veicolare e per ciascun arco stradale.

Infine per quanto riguarda lo studio della diffusione atmosferica delle sostanze liberate da fonti sia naturali sia antropiche si avvale dell'applicazione di modelli che possono essere o delle vere e proprie riproduzioni in scala del fenomeno indagato (modelli fisici) o algoritmi che descrivono matematicamente gli aspetti fisici e chimici che caratterizzano il processo (modelli teorici). I modelli teorici si distinguono a loro volta in statistici e in deterministici.

I modelli deterministici si basano su equazioni che descrivono il moto della sostanza in atmosfera: essi riproducono il destino delle sostanze emesse in atmosfera e forniscono una relazione fra sorgenti emissive e concentrazioni stimate. In base ai risultati forniti, si può procedere ulteriormente con la stima dei danni da essi arrecati all'ecosistema.

Inoltre i modelli deterministici consentono di valutare degli scenari di controllo e riduzione delle emissioni dal punto di vista dei reali benefici ottenuti.

I modelli deterministici si raggruppano in tre grandi classi, in cui poi sono stati sviluppati vari filoni modellistici:

- modelli euleriani: essi descrivono l'andamento delle concentrazioni degli inquinanti assumendo una griglia spaziale di riferimento fissa. Utilizzano il sistema di

equazioni differenziali derivanti dalla teoria della diffusione. La loro applicazione permette in particolare lo studio dei fenomeni di trasferimento di massa e di calore all'interno dell'atmosfera;

- modelli lagrangiani: assumono a priori andamenti di tipo probabilistico delle grandezze fisiche e descrivono la traiettoria delle masse inquinanti in atmosfera che si muovono in atmosfera;
- modelli gaussiani: sono i modelli analitici più semplice da applicare e da comprendere. In essi si presume che la concentrazione in aria dell'inquinante emesso da una sorgente puntiforme e continua abbia un andamento gaussiano con una larghezza dipendente dalle condizioni di turbolenza dello strato limite planetario. Con opportune modifiche possono essere applicati al caso di sorgenti lineari, aerali o volumetriche e sono oggetto di studio e affinamento ormai trentennale.

I modelli stocastici prevedono le concentrazioni a partire non dalle relazioni di causa-effetto, ma analizzando, con tecniche statistiche di varia complessità, la struttura del processo spazio-temporale sottostante ai dati misurati in una rete di monitoraggio (di qualità dell'aria o meteorologica) nel passato.

Nei prossimi paragrafi si descriveranno in maniera più dettagliata i principi su cui si basano i tre tipi di modelli utilizzati per lo studio dell'inquinamento da traffico.

### **3.2 Deflusso veicolare**

La simulazione del deflusso veicolare ha inizio durante gli anni '50 con lo scopo di rappresentare in maniera realistica i fenomeni connessi al traffico veicolare, di prevederne l'evoluzione e quindi di fornire un ausilio alla gestione dei trasporti.

Le prime ricerche si basavano sull'assunzione che il moto dell'insieme dei veicoli presenti su un tronco stradale potesse essere rappresentato assimilandolo al moto di un fluido continuo mono-dimensionale. Questa assunzione permise di definire alcune variabili di stato, funzioni del tempo e dello spazio, quali il flusso, la densità e la velocità veicolare. La rete stradale viene considerata come una rete di canalizzazioni percorsa dai flussi di traffico. Le caratteristiche dei tronchi della rete (capacità, velocità medie, ecc.) e la domanda di mobilità (volume di traffico, origine/destinazione dei veicoli, ecc.) determinano il modo con cui la rete viene percorsa da tali flussi. L'evoluzione nel tempo delle variabili di stato vengono modellizzate attraverso un'equazione differenziale che include sia la conservazione della massa che la relazione sperimentale stazionaria tra flusso e densità.

Questo tipo di modelli, detti **macroscopici**, possono essere classificati in base alla loro rappresentazione dello spazio, assumendo che il tempo sia rappresentato in maniera continua. I modelli a spazio continuo si basano su variabili definite in ogni punto dello spazio; soluzioni analitiche di questi modelli sono state fornite per schemi molto semplici mentre situazioni più complesse richiedono una soluzione numerica attraverso una discretizzazione spazio/temporale. I modelli a spazio discreto sono invece più prossimi ai modelli statici: le variabili di base che influenzano la prestazione del ramo (densità e velocità) sono definite a livello dell'intero ramo; la loro soluzione richiede solitamente una discretizzazione temporale.

La ricerca ha successivamente portato alla definizione di modelli, detti **mesoscopici**, in cui viene simulato il moto del singolo veicolo (oppure pacchetti di veicoli). In questi modelli, il flusso di traffico è discreto mentre il moto dei veicoli dipende da leggi aggregate che descrivono la relazioni tra le variabili del deflusso (es. la velocità media in funzione della densità) o da funzioni probabilistiche (es. i cosiddetti modelli gas-cinetici che descrivono le dinamiche delle distribuzioni di velocità). Una quantità significativa di lavori sono stati anche realizzati per aumentare la qualità e l'accuratezza dei modelli di simulazione del deflusso veicolare.

Molti di questi lavori si sono concentrati sui modelli **microscopici** che nascono dalla necessità di rappresentare l'interazione tra i singoli veicoli. Il moto dei veicoli si ottiene come risultato di scelte disaggregate individuali e delle interazioni con gli altri mezzi presenti sulla rete. La scelta del percorso, le decisioni di accelerare o di cambiare corsia, il comportamento alle intersezioni di ogni singolo veicolo vengono esplicitamente modellizzate. Ogni veicolo inoltre possiede le proprie caratteristiche relative, ad esempio, alle prestazioni dei mezzi (es. l'accelerazione massima o la velocità) o alle caratteristiche dei guidatori (es. il tempo di reazione o la velocità desiderata).

I modelli microscopici solitamente considerano la coppia veicolo/guidatore come un unico elemento e non separano quindi il processo decisionale del guidatore dal controllo del veicolo. La ragione principale alla base questa scelta è dovuta al fatto che questi modelli sono stati messi a punto e vengono tuttora utilizzati principalmente con lo scopo di analizzare i sistemi di traffico. Di solito il comportamento dei flussi di traffico viene riprodotto come risultato dell'interazione tra i guidatori, in maniera tale da ottenere una rappresentazione realistica delle dinamiche del deflusso veicolare. Anche se i modelli sono disaggregati, in quanto riproducono il moto dei singoli veicoli, sono spesso utilizzati per analisi aggregate (flussi, lunghezze di coda, tempi di percorrenza, ecc.).

I campi di applicazione degli approcci appena descritti possono cambiare sensibilmente. I modelli macroscopici e mesoscopici sono utilizzati per simulare il sistema con lo scopo di progettare e testare le misure di controllo. Anche se ciò dipende dalle dimensioni della rete e dalle capacità di calcolo, di solito i tempi di computazione di questi modelli sono sensibilmente inferiori al tempo reale. Ciò li rende quindi adatti anche per applicazioni in tempo reale. Al contrario, quando si utilizzano dei modelli microscopici, i tempi di calcolo aumentano con l'avvicinarsi della congestione della rete (cioè col numero di veicoli che devono essere elaborati), il che di solito restringe il loro uso ad applicazioni off-line.

La scelta del modello da utilizzare dipende naturalmente dal livello di dettaglio richiesto dall'applicazione. L'utilizzo di un modello microscopico si rende necessario, ad esempio, quando è richiesta una rappresentazione dettagliata del comportamento degli individui. Bisogna comunque notare che la corrispondenza tra livello di dettaglio e livello di accuratezza non può essere garantita; essa è infatti fonte di dibattito in letteratura.

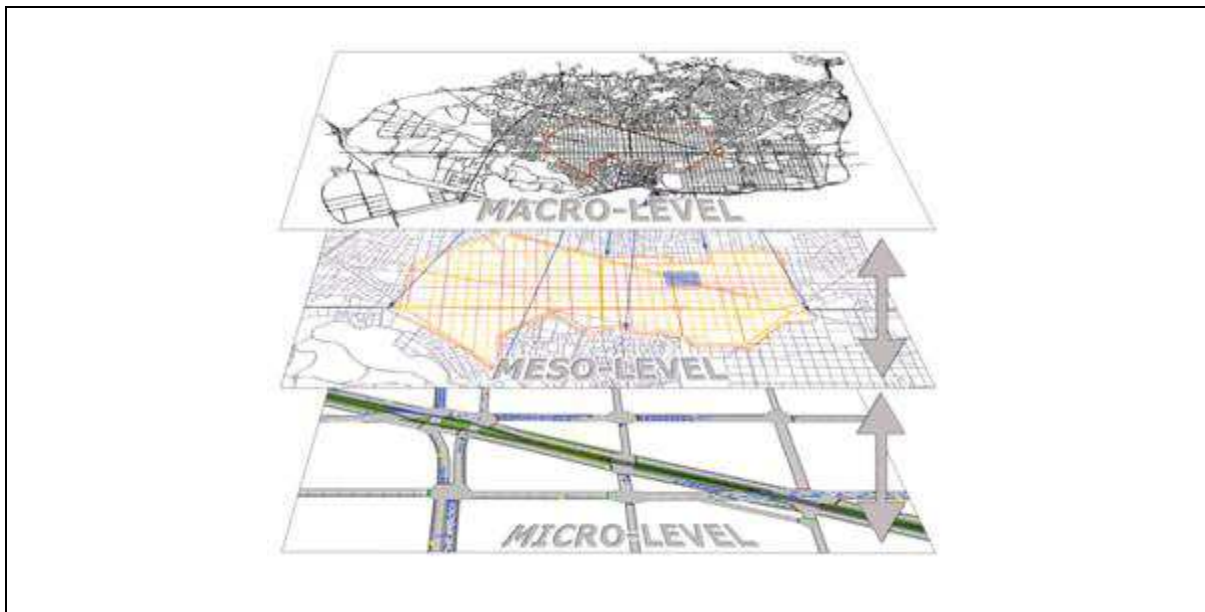


Figura 3.2 – Livelli di macro, meso e micro simulazione del traffico  
(Fonte: Euromobility).

### 3.2.1 Microsimulazione del traffico

La microsimulazione del traffico è uno degli strumenti di valutazione degli effetti di scelte progettuali; fornisce tutti gli elementi per una dettagliata analisi e consente di visualizzare in maniera realistica il movimento dei singoli veicoli e l'evoluzione del traffico sulla rete stradale. Il vantaggio di questa metodologia di studio è la possibilità di conoscere anticipatamente le variazioni dei flussi di traffico già in fase di progetto, e quindi di validare/invalidare le diverse scelte progettuali (sia di tipo costruttivo che di tipo organizzativo). Utilizzare questo strumento riduce notevolmente il rischio di scelte progettuali/organizzative che si potrebbero rivelare errate una volta messe in atto. L'approccio è di tipo micro poiché, durante tutto l'intervallo di analisi, il comportamento di ogni singolo veicolo viene simulato sulla base di algoritmi decisionali di tipo comportamentale che stabiliscono di volta in volta il cambio di corsia, regolano la distanza dal veicolo che precede, l'immissione nelle corsie di accelerazione e decelerazione, i sorpassi, ecc.

Ad ogni veicolo sono associate caratteristiche dimensionali e comportamentali; le prime riguardano lunghezza, larghezza, velocità massima, accelerazione, ecc. dei veicoli mentre le seconde sono relative alla guida dei conducenti (rispetto dei limiti di velocità, aggressività, ecc). Rispetto ai classici modelli di assegnazione, che sono basati su formulazioni matematiche nelle quali il traffico degli autoveicoli è trattato astrattamente come un fluido che si incanala nei possibili percorsi, i modelli di microsimulazione del traffico simulano il comportamento di ogni veicolo con le sue specifiche caratteristiche di guida. La microsimulazione utilizza un tipo di approccio psico-fisiologico, basato sullo studio dei fattori del comportamento umano.

Tale approccio si basa sul modello di percezione psicofisica di Wiedemann da cui seguono le logiche di car-following (ogni veicolo si muove lungo una strada seguendo il veicolo che lo precede e perciò la sua dinamica è funzione solo di quel veicolo) e di lane changing (possibilità di effettuare cambi di corsia). Di fatto particolari algoritmi impongono il comportamento uomo-vettura determinandone il movimento longitudinale e trasversale. Il modello dei flussi di traffico utilizzato è un modello microscopico, stocastico e discreto che considera le unità conducente/veicolo come singoli elementi. La simulazione dei flussi di traffico attraverso la rete avviene tenendo conto del movimento delle singole unità conducente -veicolo. Ogni veicolo inoltre possiede le proprie caratteristiche relative alle gestazioni dei mezzi (es. l'accelerazione massima o la velocità) o alle caratteristiche dei guidatori (es. il tempo di reazione o la velocità desiderata).

La coppia veicolo/guidatore viene considerata come un unico elemento e non viene quindi separato il processo decisionale dal controllo del veicolo. Ogni conducente viene assegnato, con i parametri che descrivono il suo comportamento, ad uno specifico veicolo. Il comportamento del conducente si trova quindi in accordo con le prestazioni tecniche del veicolo. Lo studio delle problematiche connesse al deflusso veicolare è oggetto di ricerca sin dalla metà dello scorso secolo. Lo sviluppo del sistema dei trasporti stradali ha infatti da sempre messo in evidenza il problema del mantenimento e miglioramento delle condizioni di sicurezza di guida. Un vasto filone di ricerca si è quindi concentrato sulla modellizzazione del deflusso veicolare, con lo scopo di creare strumenti che permettessero di gestire e di progettare adeguatamente il sistema dei trasporti.

Tra gli approcci modellistici sviluppati nel corso degli anni quello della simulazione microscopica del deflusso veicolare riveste un ruolo particolarmente importante. Tale approccio permette di descrivere il moto dei singoli veicoli e di simulare il traffico nel suo complesso mediante la loro interazione. Questo tipo di modelli di simulazione (Figura 3.3) viene utilizzato sia come strumento per realizzare analisi di traffico che per rappresentare, ad esempio all'interno di un simulatore di guida, l'evoluzione di veicoli virtuali e la loro interazione col veicolo pilotato. La corretta rappresentazione delle dinamiche di evoluzione dei veicoli e di conseguenza del traffico è tuttavia una problematica complessa. In particolare la simulazione del moto longitudinale dei veicoli è un aspetto cruciale dei modelli microscopici. Sono stati seguiti molti approcci per sviluppare gli strumenti di microsimulazione. Nel settore dell'ingegneria sono state messe a punto strutture che riproducono alcuni comportamenti propri della coppia veicolo/guidatore e che cercano di rispecchiare le proprietà globali (macroscopiche) del deflusso veicolare. Nel campo dei fattori umani sono stati invece modellizzati alcuni dei processi decisionali propri del soggetto umano (guidatore) come, ad esempio, la percezione del moto dei veicoli.

Uno dei dibattiti principali riguardo ai modelli microscopici di deflusso veicolare concerne il livello di astrazione col quale devono rappresentare il fenomeno reale in relazione allo scopo per cui devono essere utilizzati. Al di là di ciò, è possibile definire alcuni comportamenti di base che dovrebbero essere correttamente rappresentati per far sì che il modello sia sufficientemente coerente con la realtà.

Il comportamento reale dei guidatori è molto eterogeneo e dipende non solo dall'ambito di guida (es. urbano o extra-urbano) e dalla quantità di veicoli presenti (es. traffico scarso o congestionato) ma anche dalle caratteristiche dei soggetti umani. La disomogeneità di comportamento dei guidatori è inoltre alla base dei fenomeni di instabilità del deflusso

veicolare verificabili nel sistema reale per valori della portata prossimi alla congestione dell'infrastruttura.

I modelli presenti in letteratura non sono sempre in grado di simulare adeguatamente tutti gli aspetti relativi al comportamento del singolo guidatore e del traffico nel suo complesso (esempi di analisi di validità dei modelli non sono infatti frequenti). Un aspetto spesso trascurato, a causa delle difficoltà connesse alla raccolta ed elaborazione dei dati, concerne ad esempio la calibrazione e validazione dei modelli microscopici, ovvero la verifica della loro capacità di riprodurre le traiettorie reali dei veicoli.



Figura 3.3 – Microsimulazione del traffico(Fonte: Euromobility).

### 3.3 Emissione degli inquinanti

La simulazione del processo dell'emissione di sostanze inquinanti da parte dei veicoli stradali ed in particolare dei veicoli con motori a combustione interna, i quali rappresentano il sistema propulsivo di gran lunga più diffuso nel trasporto stradale, costituisce uno dei passi fondamentali per la valutazione degli effetti che conseguono al processo di inquinamento dell'aria atmosferica. La descrizione analitica del fenomeno dell'emissione si baserà su variabili relativi alle caratteristiche e alle condizioni operative medie dei veicoli nel loro complesso. I modelli di emissione consistono nella formulazione matematica delle relazioni esistenti tra le emissioni inquinanti dei veicoli a motore e le variabili da cui tali emissioni sono influenzate (caratteristiche costruttive, stato della meccanica e condizioni di funzionamento dei veicoli, condizioni dell'ambiente esterno). Un primo problema da risolvere nello sviluppo di un modello di emissione consiste nella determinazione delle variabili indipendenti significative.



Come risulta da studi sperimentali proposti in letteratura, le variabili che maggiormente influenzano l'entità delle emissioni riguardano le caratteristiche costruttive dei veicoli.

La loro influenza sulla entità delle emissioni è tale da consigliare lo sviluppo di modelli di emissione diversi per diverse tipologie veicolari. La dipendenza delle emissioni dalle caratteristiche di funzionamento del motore riveste anch'essa grande importanza. Tale dipendenza può essere analizzata dal punto di vista teorico se si ipotizza che tutti gli altri parametri che influenzano il processo si mantengono costanti. In tal modo può essere determinata la relazione tra le emissioni e la dinamica del motore in condizioni di regime quantificando separatamente l'influenza degli altri fattori. Le variabili che descrivono la dinamica di funzionamento della propulsione sono peraltro legate ai parametri cinetici del veicolo nel suo complesso.

Lo stato termodinamico del fluido evolvente influenza anch'esso l'entità delle emissioni in maniera significativa. In particolare, identificato lo stato termodinamico di riferimento dei gas contenuti nel cilindro corrispondente al regime termico (motore caldo), si ammette che condizioni differenti (motore freddo) provochino un aumento delle emissioni inquinanti.

La variabile rispetto alla quale la variazione di emissione è più sensibile è quindi la temperatura del fluido evolvente. Lo stato della meccanica influenza l'entità delle emissioni provocando maggiori quantità di inquinanti emessi al crescere dell'usura dei sottosistemi del veicolo e al diminuire della frequenza degli interventi di corretta manutenzione e regolazione. Fra i parametri che descrivono le condizioni dell'ambiente esterno, è necessario individuare quelli di cui è utile tener conto in maniera esplicita nei modelli. Essi sono in prima approssimazione, la temperatura dell'aria esterna (che influenza la temperatura dei gas contenuti nel motore) e la pendenza longitudinale della via (la quale influenza la dinamica di funzionamento del motore).

Data la complessità che consegue dall'influenza contemporanea delle variabili indipendenti elencate, i modelli di emissione sono innanzitutto sviluppati in maniera indipendente per ciascun tipo di inquinante e per ciascuna categoria veicolare di caratteristiche costruttive date. Essi sono inoltre costruiti come somma di diversi sottomodelli ognuno dei quali descrive la relazione tra le emissioni e un gruppo significativo di parametri.

La dipendenza delle emissioni dalla dinamica di funzionamento del motore in determinate condizioni di regime termico, di stato della meccanica e ambientale, costituisce il modello di base: le emissioni che in tal caso vengono calcolate saranno quindi indicate come emissioni di base.

Le variabili indipendenti del modello di base sono quindi soltanto quelle relative alla dinamica di funzionamento dell'apparato di propulsione. Le variazioni indotte da condizioni non di regime vengono computate come funzioni correttive del modello di base.

Alle emissioni di base si aggiungono quindi le aliquote di emissioni dovute ai transitori termici del motore (emissioni a freddo), alla pendenza della via e allo stato non di regime della meccanica. Lo sviluppo dei modelli può essere condotto sia con un approccio dinamico, volto alla simulazione delle caratteristiche istantanee del fenomeno, sia secondo un approccio statico che permette invece soltanto il calcolo dei valori medi delle emissioni nell'intervallo temporale al quale si riferisce l'analisi (fattori di emissione). E' evidente che nel primo caso anche le variabili indipendenti devono essere descritte in maniera istantanea, mentre nel secondo è sufficiente riferirsi ai loro valori medi.

L'approccio dinamico conduce alla formulazione dei modelli dinamici di emissione. Essi consentono il calcolo delle emissioni istantanee di una determinata sostanza inquinante sulla base dell'andamento in funzione del tempo delle variabili indipendenti scelte. I modelli costruiti secondo questo approccio permettono di descrivere il fenomeno nel dettaglio, ma necessitano di una quantità notevole di informazioni sul comportamento istantaneo delle variabili esplicative. Essi trovano quindi campi ottimali di applicazione nella simulazione di configurazioni di complessità limitata, dove sia possibile esplicitare informazioni di dettaglio sulle variabili indipendenti, dall'altro in tutti quei problemi in cui la dipendenza del fenomeno dal tempo non possa essere trascurata. Esempi sono l'analisi delle emissioni dei singoli veicoli, di singoli tronchi stradali, di intersezioni stradali.

L'approccio statico alla simulazione conduce a quelli che verranno indicati come modelli statici di emissione. Essi sono volti alla determinazione delle emissioni medie in un certo intervallo di tempo in funzione dei valori medi assunti dalle variabili indipendenti nell'intervallo considerato. Sono quindi adatti al calcolo delle emissioni in condizioni stazionarie di funzionamento del sistema di trasporto. Esempi di campi di applicazione dei modelli statici sono l'analisi delle emissioni dovute a veicoli in condizioni di moto uniforme e di moto non uniforme ma caratterizzato dal valore della velocità media, come è il caso di traffico in condizioni di flusso ininterrotto (tronchi stradali extraurbani, direttrici di traffico, ecc.), oppure l'analisi delle reti di trasporto in condizioni di equilibrio.

In quest'ultimo caso il ricorso a modelli di tipo statico è giustificato anche dal fatto che per i sistemi stradali di notevole dimensioni non è sempre possibile ottenere, in tutti i punti della rete, informazioni di dettaglio sulla velocità e sulle accelerazioni istantanee dei veicoli circolanti.

Risulta invece più semplice conoscere le velocità medie e i flussi sugli archi della rete, sia per mezzo di stime dirette che con l'uso di modelli di simulazione quantitativa del funzionamento del sistema di trasporto.

L'andamento delle variabili che descrivono il moto dei veicoli è determinato da algoritmi di calcolo indipendenti che, sulla base dell'entità dei flussi di traffico e della geometria del sistema viario determinano le caratteristiche quantitative del moto (modulo di deflusso). Nel caso più generale un modello di emissione fa quindi parte di un sistema di modelli comprendente un modulo di interazione domanda-offerta di trasporto (ripartizione modale, assegnazione dei flussi di traffico), un modulo di deflusso e infine il vero e proprio modello di emissione. Questo fornisce le quantità totali di inquinante emesse da un generico flusso di veicoli nell'unità di spazio percorso o nell'unità di tempo, denominate fattore lineare di emissione e fattore temporale di emissione rispettivamente.

### **3.3.1 Modelli statici di emissione**

La descrizione dinamica del fenomeno delle emissioni, essendo finalizzata alla stima istantanea della quantità di sostanze inquinanti emesse nell'atmosfera, non è adatta ad essere utilizzata in un processo di simulazione di tipo stazionario. Si rende pertanto necessario un approccio di tipo statico alla simulazione delle emissioni attraverso modelli che permettano il calcolo delle emissioni medie (fattori di emissione) nell'intervallo di tempo di riferimento. Queste ultime possono essere espresse, rispetto a tale intervallo, nella forma di emissioni totali o di emissioni per unità di lunghezza percorsa. Il principale problema che deve essere risolto per operare questo tipo di approccio è l'individuazione delle variabili indipendenti di tipo statico da utilizzare nei modelli matematici per il calcolo delle emissioni, che può essere operato a partire dai risultati ottenuti nell'analisi dei modelli dinamici. Il passaggio delle variabili indipendenti di tipo dinamico a quelle di tipo statico riguarda solo quei gruppi di parametri che nell'approccio dinamico erano considerati dipendenti dal tempo. Essi sono le caratteristiche cinematiche del moto, che determinano le emissioni di base, e le condizioni termiche del fluido evolvente.

Il calcolo delle emissioni statiche di base si fonda sulla dimostrazione che, sebbene l'influenza sui profili istantanei di emissione delle proprietà puntuali dei cicli di guida sia notevole, i fattori totali di emissione sono invece esprimibili, con una certa approssimazione, in funzione dell'unico parametro rappresentato dalla velocità media del moto. La notevole correlazione che esiste tra l'entità delle emissioni globali e la velocità media dei veicoli è senza dubbio una proprietà importante del fenomeno dell'emissione.

Essa permette infatti di esprimere con buona approssimazione, una volta fissate le caratteristiche del parco circolante e le condizioni al contorno, un legame funzionale tra l'entità delle emissioni inquinanti e le variabili che descrivono il comportamento medio del flusso di traffico.

I modelli statici esprimono le emissioni medie relative a un certo intervallo di tempo di riferimento in funzione dei valori medi delle variabili indipendenti esplicative. Queste ultime sono analoghe a quelle relative ai modelli di tipo dinamico, ma si riferiscono alle caratteristiche medie del fenomeno anziché a quelle istantanee.

Le aliquote di emissione che vengono generalmente computate in un modello statico comprendo le emissioni di base, le emissioni dovute al transitorio termico corrispondente agli spostamenti con partenza a freddo, gli incrementi di emissione dovuti ai cambiamenti della livelletta o a altre variazioni della resistenza al moto, quelli dovuti allo stato della meccanica e le emissioni evaporative. Le emissioni medie  $\delta E$  vengono espresse, per ogni veicolo considerato, in massa per unità di lunghezza percorsa ( $g \times \text{veic}^{-1} \times \text{Km}^{-1}$ ). L'algoritmo di calcolo delle emissioni possiede caratteristiche diverse a seconda dell'inquinante considerato e dalla tipologia veicolare. Fissati questi due parametri, le emissioni di base vengono computate in funzione delle caratteristiche del moto le quali vengono rappresentate dalla velocità media dello spostamento. Ciò equivale, come detto, ad accettare l'ipotesi che la velocità media del moto sia sufficientemente rappresentativa delle caratteristiche di dettaglio dei cicli di guida rispetto al fenomeno globale delle emissioni. Per ogni sostanza inquinante  $i$  di riferimento e ogni gruppo veicolare  $g$  considerato, le emissioni di base sono funzione della sola velocità media dello spostamento e sono eventualmente espresse in maniera diversa per fasce di velocità. Esse sono indicate come segue:

$$\delta E_{base}^{i,g}(v_m)$$

Le aliquote di emissione dovute alle variabili che compaiono nel modello di base sono poi computate come funzioni correttive. L'incremento di emissione dovuto al funzionamento in transitorio termico può essere espresso in funzione della velocità media e di un certo numero di altre variabili  $x_1, \dots, x_n$  fra cui la frazione di spostamento mediamente percorsa con motore freddo, la temperatura ambiente e la lunghezza media degli spostamenti; questo incremento si indica con:

$$\delta E_T^{i,g}(v_m, x_1, \dots, x_n)$$

Fra le cause dell'esistenza delle emissioni aggiuntive rispetto a quelle di base vanno annoverate le variazioni della resistenza esterna al moto dovute alla pendenza longitudinale positiva  $p$  della via.

Le sovraemissioni corrispondenti possono essere espresse in funzione della pendenza stessa e indicate con:

$$\delta E_p^{i,g}(p)$$

L'esistenza di uno stato della meccanica non di regime per il veicolo considerato, determina un'aliquota aggiuntiva di emissioni indicata con:

$$\delta E_M^{i,g}$$

Un ultimo contributo di cui si può tenere conto è rappresentato, solo per gli idrocarburi volatili, dalle emissioni evaporative. Esse sono in genere considerate funzione di altre variabili  $y_1, \dots, y_n$  fra cui la temperatura ambiente media, le variazioni termiche, la volatilità del combustibile. Si indicano queste emissioni vengono con:

$$\delta E_{ev}^{HC,g}(y_1, \dots, y_n)$$

Le emissioni totali per unità di lunghezza di inquinante  $i$  dovuto a un flusso di traffico composto da  $N$  veicoli ripartiti in  $ng$  gruppi di diverse caratteristiche costruttive secondo le percentuali  $C_g$  sono quindi uguali a:

$$E^i(v_m, x_1, \dots, x_n) = N \sum_{g=1}^0 C_g (\delta E_{base}^{i,g}(v_m) + \delta E_T^{i,g}(v_m, x_1, \dots, x_n) + \delta E_p^{i,g}(p) + \delta E_{ev}^{HC,g}(v_m, x_1, \dots, x_n))$$

Si ricorda che le emissioni evaporative sono diverse da zero solo se la sostanza inquinante è costituita da idrocarburi volatili.

L'emissione per unità di lunghezza dovuta ad un veicolo con caratteristiche costruttive medie pesate fra tutti i gruppi appartenenti al parco veicolare, detto fattore di emissione composito, è infine dato da:

$$\delta E_{ev}^{HC,g}(y_1, \dots, y_n) = \delta E_{ev}^{HC,g}(y_1, \dots, y_n) / N$$

I modelli di tipo statico non consentono la stima puntuale delle variazioni dei tassi di emissione durante un generico spostamento; in compenso necessitano di informazioni sulle caratteristiche evaporative del traffico che si limitano alle caratteristiche ed allo stato medio dei veicoli, ai parametri medi del moto ed alla lunghezza degli spostamenti considerati. I modelli di tipo statico proposti dalla letteratura specifica che rivestono un certo interesse, sono in particolare i modelli statunitensi MOBILE e FREQ ed il modello COPERT che verrà ampiamente trattato nel prossimo paragrafo, visto il suo utilizzo nella parte sperimentale della presente tesi.

### 3.3.2 Modello Copert IV

Come abbiamo accennato nella premessa, la consistente domanda di mobilità di persone e merci su strada rende rilevante il problema dell'inquinamento da trasporti stradali soprattutto in considerazione dell'impatto sulle aree urbane, relativamente ad inquinanti quali il monossido di carbonio, i composti organici volatili (in particolare benzene), gli ossidi di azoto ed il particolato; inoltre il contributo alle emissioni di gas serra risulta particolarmente gravoso per le emissioni di anidride carbonica.

Pur essendo in atto una graduale sostituzione dei vecchi veicoli in favore degli ultimi modelli dotati delle più recenti tecnologie di abbattimento delle emissioni, la crescita del parco circolante, delle relative percorrenze e quindi dei consumi, hanno come conseguenza una produzione di emissioni che contribuisce in modo consistente al totale delle emissioni nazionali. I modelli per l'elaborazione di scenari e inventari delle emissioni atmosferiche più utilizzati in UE si basano sull'emission factor approach, secondo il quale le emissioni di un dato inquinante relative ad un certo settore sono il prodotto delle singole attività che generano emissioni e dei rispettivi emission factors.

Un fattore di emissione dà una rappresentazione quantitativa delle caratteristiche emissive di un dato inquinante, in un certo anno per una data sorgente.

Tali modelli si basano su relazioni del tipo:

$$\frac{t \text{ inquinante emesso}}{\text{anno}} = n \text{ veicoli} \times \frac{km \text{ percorsi}}{\text{anno}} \times \text{Fattore Emissione in } \frac{g}{km} \text{ a veicolo} \times \frac{1}{1000000}$$

Il modello di calcolo frequentemente utilizzato in Europa per la stima delle emissioni di inquinanti atmosferici dovuti ai trasporti stradali, è denominato COPERT. La metodologia COPERT è stata introdotta dall'EEA (European Environment Agency, Agenzia Europea per l'Ambiente) per la redazione dei rapporti sullo stato dell'ambiente e dai National Reference Center per la realizzazione degli inventari nazionali delle emissioni. Tale metodologia, per la stima delle emissioni da traffico stradale, è basata sul calcolo dei fattori di emissione dei principali inquinanti, a partire dalla conoscenza delle seguenti variabili:

- tipologia di veicolo (tipo di carburante, anno di produzione, cilindrata per veicoli leggeri o motocicli e peso per veicoli di trasporto merci);
- velocità media;
- lunghezza del tratto percorso;
- presenza o meno del ciclo di preriscaldamento (vista l'esistenza dei tre contributi emissivi: a freddo o in transitorio termico, a caldo o a regime termico ed evaporativo);
- tipo di strada percorsa (urbana, extraurbana, autostrada);
- temperatura ambiente.

Le sostanze inquinanti esaminate sono 10: gli ossidi di azoto  $\text{NO}_x$ , l'ossido di diazoto  $\text{N}_2\text{O}$ , gli ossidi di zolfo  $\text{SO}_x$ , il metano  $\text{CH}_4$ , gli idrocarburi volatili non metallici, il monossido di carbonio  $\text{CO}$ , l'anidride carbonica  $\text{CO}_2$ , l'ammoniaca  $\text{NH}_3$ , il particolato e i composti del piombo. Generalmente, per sostanze come  $\text{CO}$ ,  $\text{COV}$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{PM}$  (solo per veicoli diesel) e per il consumo di combustibile (in g/km), si ottiene una stima piuttosto accurata dei fattori di emissione. Invece per  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , metalli pesanti e benzene le stime sono piuttosto grossolane, basate, in particolare, sulla quantità di carburante consumata.

Si tratta di un modello disaggregato, in quanto consente di ottenere i valori delle emissioni per ogni categoria veicolare.

Le emissioni a regime termico sono espresse, per ogni inquinante  $i$  e gruppo di veicoli  $g$ , attraverso un fattore lineare di emissione espresso in  $g \times \text{veic}^{-1} \times \text{Km}^{-1}$ :

$$\delta E_{base}^{i,g}(v_m)$$

Da questa espressione si può ricavare il fattore di emissione medio pesato per gruppo veicolare attraverso la percentuale  $C_g$  di veicoli del gruppo  $g$  del parco quale si riferisce l'analisi:

$$\delta E_{base}^i = \sum_g C_g \times \delta E_{base}^{i,g}(v_m)$$

Le emissioni totali, in grammi, si calcolano moltiplicando il fattore di emissione medio per il numero di veicoli-km (VKM):

$$E_{tot}^i = \delta E_{base}^i(v_m) \cdot VKM$$

A queste emissioni di base, si aggiunge l'aliquota di emissioni dovuta al funzionamento in transitorio termico dei veicoli. Essa viene espressa attraverso il rapporto medio  $\varepsilon^{t,\gamma}$  tra le emissioni a freddo e quelle a caldo, la frazione  $\beta_{\tau\rho}$  di lunghezza mediamente percorsa con motore freddo (funzione di altre variabili  $y_1, \dots, y_n$  fra cui la temperatura ambientale, la lunghezza media degli spostamenti, etc.) e le emissioni di base:

$$\delta E_T^{i,g}(v_m, \varepsilon^{t,\gamma}, y_1, \dots, y_n) = \beta_{\tau\rho}(y_1, \dots, y_n) \times \delta E_{base}^{i,g}(v_m) \times (\varepsilon^{t,\gamma} - 1)$$

I fattori di emissione proposti dal CORINAIR sono il prodotto della sintesi di tutte le esperienze disponibili a livello europeo, ovvero circa 3000 test per inquinante, effettuati su circa 1000 veicoli. COPERT IV si applica ad autovetture passeggeri (PCs), veicoli commerciali leggeri (LDVs), veicoli commerciali pesanti (HDVs), bus (Buses), motocicli e ciclomotori (Motorcycles e Mopeds), suddivisi secondo 266 diverse categorie per classi di cilindrata, o portata, tipo di alimentazione, normativa di riferimento.



Consente la stima di tutti gli inquinanti regolamentati dalla normativa europea (CO, NO<sub>x</sub>, VOC, NMCOV, PM e CO<sub>2</sub>). Inoltre permette il calcolo delle emissioni anche di alcuni inquinanti non regolamentati come CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, metalli pesanti, idrocarburi policiclici aromatici (IPA), inquinanti organici persistenti (POP) e, infine, è in grado di fornire le emissioni di NMCOV distinte nelle singole specie.

In Figura 3.4 viene rappresentato il raggruppamento degli inquinanti in esame in base alla metodologia applicata per la loro determinazione.

1° GRUPPO	2° GRUPPO
<b>Inquinanti per i quali esiste una metodologia dettagliata sulla base dei fattori di emissione specifici</b>	<b>Inquinanti stimati in base al consumo di carburante</b>
Monossido di Carbonio (CO)	Biossido di carbonio (CO <sub>2</sub> )
Ossido di Azoto (NO <sub>x</sub> : NO and NO <sub>2</sub> )	Diossido di zolfo (SO <sub>2</sub> )
Composti organici volatili (VOCs)	Piombo (Pb)
Metano (CH <sub>4</sub> )	Cadmio (Cd)
Composti organici volatili non metanici (NMCOVs)	Cromo (Cr)
Ossido di Azoto (N <sub>2</sub> O)	Rame (Cu)
Ammoniaca (NH <sub>3</sub> )	Nickel (Ni)
Particolato (PM)	Selenio (Se)
	Zinco (Zn)

3° GRUPPO	4° GRUPPO
<b>Inquinanti per i quali viene applicata una metodologia semplificata a causa della mancanza di dati dettagliati</b>	<b>Inquinanti che derivano da frazioni delle emissioni totali dei composti organici volatili non metanici</b>
Idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e inquinanti organici persistenti (POPs)	Alcani (C <sub>n</sub> C <sub>2n+2</sub> )
	Alcheni (C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> )
Policloro-dibenzo-p-diossine (PCDDs) e dibenzofurano-policlorurato (PCDFs)	Alchini (C <sub>n</sub> H <sub>2n-2</sub> )
	Aldeide (C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> O)
	Ketoni (C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> O)
	Cicloalcani (C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> )
	Composti aromatici

Figura3.4 – Raggruppamento inquinanti calcolati con il Copert IV

La metodologia di calcolo del COPERT si basa sui seguenti parametri:

- Parco circolante suddiviso per:
  - tipologia di veicolo (numero di PCs, LDVs, HDVs, etc.);
  - tipo di combustibile utilizzato (benzina, gasolio, GPL, etc.);
  - classe di anzianità, in relazione alle normative europee di introduzione di dispositivi per la riduzione delle emissioni (Euro I, II, III, etc.);
  - classe di cilindrata (per le autovetture) o classe di peso (per i veicoli commerciali);
- Consumi e caratteristiche dei combustibili;
- Condizione di guida:
  - percorrenze medie annue e velocità medie (distinte in base al ciclo di guida ovvero alla tipologia di percorso effettuato, urbano, extraurbano, autostradale).
- Fattori di emissione;
- Pendenza della strada;
- Condizioni climatiche:
  - temperatura massima;
  - temperatura minima;
- Carico trasportato nel caso dei veicoli commerciali.

A parte i fattori di emissione, presenti nel codice di calcolo del programma, gli altri dati devono essere introdotti dall'utente durante la creazione del database di input.

A ciascuna classe veicolare e per ogni inquinante il modello COPERT IV associa delle funzioni di stima delle emissioni e dei consumi dipendenti dalla velocità. Tali funzioni rappresentano delle curve medie di emissione e di consumo di carburante; esse vengono ricavate da misure di emissioni per diverse tipologie e marche di veicoli e si riferiscono a prove effettuate in numerosi Paesi Europei, su una varietà di cicli di guida urbani ed extraurbani, inclusi quelli previsti dalle normative europee. Le quantità complessive di sostanze emesse in atmosfera dai mezzi di trasporto su strada dipendono sia dalle emissioni specifiche dei singoli veicoli (fattori di emissione), che dalla numerosità delle diverse flotte (veicoli a benzina, diesel, GPL, veicoli catalizzati e non, etc.) e dalle relative percorrenze. Il programma COPERT IV stima le emissioni di una data categoria veicolare, a partire dalla curva di emissione "speed dependent", in seguito alla scelta di un valore di velocità media, considerato rappresentativo del relativo ciclo di guida (urbano, extraurbano, autostradale). Il fattore di emissione di un inquinante, per una particolare categoria veicolare e per un particolare tipo di percorso o ciclo di guida, viene calcolato rapportando il corrispon-

dente dato di emissione nazionale (stimato con il COPERT IV ed espresso in tonnellate/anno) al prodotto del numero di veicoli appartenenti a quella categoria per le relative percorrenze medie annue (esprese in km/anno).

$$FE_{ijk} = \frac{E_{ijk}}{(P_j \times Perc_{jk})}$$

$FE_{ijk}$  = fattore di emissione dell'inquinante i, per la categoria veicolare j sul percorso k (espresso in grammi per veicolo e per chilometro);

$E_{ijk}$  = emissione totale dell'inquinante i, per la categoria veicolare j sul percorso k (espressa in tonnellate/anno);

$P_j$  = numero di veicoli appartenenti alla categoria veicolare j;

$Perc_{jk}$  = percorrenza media annua del veicolo appartenente alla categoria j, effettuata sul percorso k (espressa in km/anno).

Gli  $FE_{ijk}$  così stimati sono dei valori "medi" ricavati dalla calibratura complessiva del modello. In precedenza, però, si era detto che tali fattori sono già presenti nel codice di calcolo del programma e altri sono invece i dati che l'utente deve inserire per la creazione del database. Quindi, può essere conveniente esprimere i fattori di emissione EF forniti dal COPERT IV, per ciascuna sostanza inquinante e per ciascuna modalità di trasporto m, con la seguente equazione generalizzata :

$$EF_{\lambda jk}^m = a_{\lambda jk}^m + b_{\lambda jk}^m v^{c_{ijk}^m} + d_{\lambda jk}^m v^2 \text{ in } g/kg$$

dove l'indice  $\lambda$  si riferisce all'età del veicolo, l'indice j al combustibile utilizzato e l'indice k alla cilindrata del motore; i parametri a, b e c sono caratteristici di ciascuna categoria di emissione. Ciascun fattore di emissione  $EF_{\lambda jk}^m$  definisce completamente l'i-esima classe veicolare di emissione, per la quale si possono calcolare le emissioni totali di un determinato inquinante:

$$E_i = EF_i \times N_i \times p_i$$

$p_i$  = lunghezza dello spostamento medio annuale (km) di ciascun veicolo della classe veicolare di emissione i;

$N_i$  = numero di veicoli che circolano annualmente appartenenti alla assegnata classe  $i$ .

Le emissioni da veicoli su strada si possono esprimere come la somma di tre tipologie di contributi

$$E = E_{hot} + E_{cold} + E_{evap}$$

**E<sub>hot</sub>** = emissioni “a caldo” (hot emissions), prodotte durante il funzionamento del motore alla temperatura di esercizio (circa 90°C), cioè quando il motore è stabilizzato termicamente.

**E<sub>cold</sub>** = emissioni “a freddo” (cold over-emissions), prodotte nella fase di riscaldamento del motore. Comprendono quelle generate durante la partenza a temperatura ambiente e gli effetti del preriscaldamento. Convenzionalmente, sono le emissioni che si verificano quando la temperatura dell’acqua di raffreddamento è inferiore a 70°C. Alla somma delle emissioni a caldo e di quelle a freddo viene abitualmente dato il nome di emissioni allo scarico (exhaust emissions).

**E<sub>evap</sub>** = emissioni evaporative costituite dai soli NMCOV (composti organici volatili non metanici), dovute all’evaporazione del combustibile. Si possono indicare anche come non exhaust emissions.

Le emissioni a caldo sono stimate per tutte le tipologie di veicoli, le emissioni a freddo per i veicoli leggeri, quelle evaporative sono rilevanti solo per i veicoli a benzina. Nella stima nazionale delle emissioni inquinanti da trasporto stradale, alle emissioni allo scarico e alle emissioni evaporative, si affiancano le emissioni da usura di gomme e freni dei veicoli. L’attenzione viene rivolta al particolato primario, derivante direttamente dai fenomeni di usura, più che al fenomeno della risospensione del materiale precedentemente depositato. Il materiale che viene prodotto dagli effetti di usura e attrito tra le superfici è soggetto a fenomeni di evaporazione alle alte temperature sviluppate dal contatto. Va tenuto presente che non tutto il materiale usurato diventa particolato atmosferico. L’emissione di particolato derivante dall’usura degli pneumatici è fortemente legata alla composizione degli stessi, a base generalmente di gomme sintetiche e naturali, additivi metallici (l’ossido di zinco viene utilizzato come agente vulcanizzante) ed organici. Il carico ed il numero di assi del veicolo, i meccanismi di trazione e sterzo, le caratteristiche della superficie stradale percorsa, influiscono inoltre sulle emissioni. Il tasso di usura degli pneumatici è determinato dalla composizione, dalla posizione, dalle condizioni e dall’età, dal comportamento e dalle

condizioni di guida (diversi studi dimostrano che alla guida in ambito urbano è associato il tasso di usura più elevato per unità di percorrenza), dal sistema di trazione del veicolo (nei veicoli a trazione anteriore si usurano più velocemente gli pneumatici anteriori; il contrario accade nei veicoli a trazione posteriore), dalle condizioni stradali, dalle condizioni atmosferiche. Influiscono sul tasso di usura anche sistemi di sterzo non allineati e una pressione non corretta degli pneumatici. Riguardo all'emissione di particolato derivante dall'usura dei freni si distingue tra freni a disco e freni a tamburo caratterizzati da differenti sistemi di configurazione. Sulle emissioni influiscono anche le differenti composizioni dei materiali che costituiscono le componenti delle guarnizioni. La posizione dei freni nel veicolo influisce inoltre sul tasso di usura più di quanto la posizione delle gomme influisca sul proprio. I meccanismi di azionamento dei freni (elettrico, idraulico, pneumatico, meccanico) hanno infine una diversa influenza sul tasso di usura.

L'emissione di particolato da abrasione della superficie stradale, legata alla composizione dei materiali costituenti, risulta affetta da elevata incertezza in quanto molto variabile sia da Paese a Paese, sia all'interno di uno stesso Paese. L'abrasione stradale risulta inoltre determinata anche dalla velocità dei veicoli e dalla pressione degli pneumatici. L'usura di questi ultimi e del manto stradale sono infatti strettamente legate, ma mancano al momento dati sperimentali sui fattori di emissione che tengano conto delle diverse combinazioni tra pneumatici e superfici stradali. Le condizioni climatiche possono inoltre influire in modo determinante: nelle zone a clima freddo, ad esempio, in cui vengono utilizzati frequentemente gli pneumatici chiodati, l'usura della strada e le concentrazioni di materiale particolato imputabili alla risospensione sono molto maggiori; i trattamenti antighiaccio basati sullo spargimento di sabbia e sale hanno inoltre un impatto molto importante; infine anche la temperatura atmosferica ed il livello di umidità influiscono sull'usura della strada. Dato che diverse situazioni di guida comportano differenti condizioni di funzionamento del motore (quindi differenti tipologie di emissione), il modello COPERT IV considera tre differenti condizioni di guida che avvengono su percorsi urbani, rurali e autostradali.

L'equazione precedente può essere perciò riscritta nel seguente modo:

$$E = E_{urban} + E_{rural} + E_{highway}$$

con  $E_{urban}$ ,  $E_{rural}$  e  $E_{highway}$  emissione di inquinanti nelle rispettive condizioni di guida.

Di seguito, si indicano in maniera dettagliata le relazioni che consentono di determinare le tre tipologie di contributi emissivi.

**1) Calcolo delle hot emissions:**

La marcia prolungata si realizza una volta trascorso il tempo di riscaldamento del motore e del catalizzatore. Esistono numerosi fattori che influenzano questo contributo: la distanza percorsa dal veicolo, la velocità (legata al tipo di strada), l'età del veicolo, il tipo di motore ed il peso. L'equazione su cui si basa il calcolo è:

$$E_{hot} = n_j \times m_{j,k} \times e_{hot;i,j,k}$$

$n$  (veicoli)= numero di veicoli della classe  $j$ -esima;

$j, k$  m (Km/veicolo)= distanza media percorsa da ogni veicolo di categoria  $j$  su strada di classe  $K$ ;

$e_{hot;i,j,k}$  (g/Km)= fattore di emissione per l'inquinante  $i$ , rilevato per la categoria di veicoli  $j$ , sulla strada di classe  $K$ .

**2) Calcolo delle cold emissions:**

Le emissioni di CH e CO sono più elevate poiché il catalizzatore deve ancora raggiungere la temperatura operativa. Inoltre, a freddo, la benzina non si miscchia correttamente con l'aria. Per questo motivo parte del carburante incombusto viene emesso ad alte concentrazioni. L'equazione su cui si basa il calcolo è:

$$E_{cold} = \beta_{i,j} \times n_j \times m_j \times e_{hot;i,j} \times \left( \frac{e_{cold;i,j}}{e_{hot;i,j}} - 1 \right)$$

$\beta_{ij}$  = frazione di Km percorsi con il motore o il catalizzatore freddo;

$n_j$  = numero di veicoli della classe  $j$ -esima;

$m_j$  = totale Km annui percorsi dal veicolo  $j$ ;

$e_{cold;i,j} / e_{hot;i,j}$  = rapporto tra le emissioni a caldo e quelle a freddo per l'inquinante  $i$ , rilevato per la categoria di veicoli  $j$ .

**3) Calcolo delle evaporative emissions:**

Possono essere ricondotte a tre fonti principali:

a) Diurnal emissions: vapori emessi durante la giornata e persi attraverso il tappo del serbatoio in seguito al riscaldamento del carburante. Sono il risultato dell'espansione del vapore

all'interno del serbatoio della benzina dovuto all'incremento di temperatura durante le ore diurne.

b) Hot soak emissions: vapori emessi dopo un arresto a caldo. Il calore dal motore e dal sistema di convoglio degli esausti va ad aumentare la temperatura del combustibile, che non scorre più all'interno del sistema e che evapora.

c) Running emissions: vapori emessi durante la marcia che si generano nel serbatoio durante il funzionamento. Tale contributo è significativo nei periodi in cui la temperatura ambiente è più elevata.

La principale espressione per la stima delle emissioni evaporative è la seguente:

$$E_{vap} = 365 \times n_j \times (e_d + S_c + S_{fi}) + R$$

$n_j$  = numero di veicoli della classe j-esima;

$e_d$  = fattore di emissione delle perdite diurne;

$S_c$  = fattore di emissione a caldo e a freddo per i veicoli dotati di carburatore;

$S_{fi}$  = fattore di emissione a caldo e a freddo per i veicoli a benzina dotati di iniezione elettronica;

$R$  = perdite durante il moto.

Risulta di grande importanza l'applicazione di correzioni, finalizzata ad ottenere degli output sempre più coerenti con la realtà. Le emission corrections tengono conto degli effetti sugli scarichi dei seguenti parametri:

- migliori combustibili: la simulazione dell'effetto sulle emissioni avviene per mezzo di un fattore di correzione funzione del tipo di combustibile e del tipo di veicolo;
- età del veicolo: si associa un certo fattore di degradazione, in funzione della vita media dei veicoli, agli emission factors;
- manutenzioni e ispezioni intensificate: il modello ne tiene conto correggendo il fattore di degradazione;
- effetto della pendenza della strada sui veicoli pesanti: le correzioni applicate dipendono dalla massa veicolare, dalla velocità media, dal gradiente stradale e dal tipo di inquinante;
- carico degli heavy vehicles: l'influenza del carico sull'emissione viene simulata considerando un carico aggiuntivo del 50%.

### 3.4 Dispersione delle sostanze inquinanti in atmosfera

I più importanti fenomeni che determinano la dispersione sono il trasporto delle sostanze nell'aria, la loro partecipazione ai processi di reazione chimica e infine la loro deposizione al suolo o, più in generale, la loro rimozione. Il fenomeno del trasporto è puramente fisico e consiste nel movimento delle particelle inquinanti causato dai moti dell'aria normalmente esistenti nell'atmosfera. Le sostanze inquinanti, una volta emesse nell'aria, vanno, a causa di questi moti, ad occupare volumi sempre più vasti facendo sì che, in linea generale, la loro presenza, massima in corrispondenza della sorgente, decresca progressivamente allontanandosi da questa. Al fenomeno fisico del trasporto si aggiunge quello causato dalle reazioni chimiche. Esse possono avvenire, nelle condizioni fisiche e termodinamiche tipiche dell'atmosfera, sia fra gli stessi componenti della sostanza considerata che fra questi e altre specie chimiche presenti nell'aria. Il risultato può essere una modifica della composizione dell'aria con aumento o diminuzione della specie inquinante. Il fenomeno della deposizione al suolo di una sostanza presente in atmosfera può avere diverse cause.

Fra queste sono rilevanti l'azione della gravità e l'azione delle piogge che dilavano la sostanza verso il basso. Il risultato dell'azione contemporanea dei fenomeni accennati dà luogo alla presenza, in un certo punto dello spazio e in un certo istante di tempo, di una determinata quantità della generica sostanza inquinante che altera la naturale composizione dell'aria atmosferica. La misura di queste quantità viene normalmente effettuata in termini di concentrazione, ovvero specificando l'entità dell'inquinante presente in una porzione unitaria di aria. Questo parametro è strettamente legato agli effetti che l'inquinante produce su quelle componenti dell'ecosistema che ne vengono a contatto. La variabile dimensionali più frequentemente usate per esprimere le concentrazioni inquinanti è il rapporto massa/volume (rapporto fra la massa inquinante presente in una certa porzione di atmosfera e il volume della porzione stessa). Mentre il primo parametro è usato in riferimento sia agli inquinanti presenti in aria sottoforma di particelle solide che a quelli gassosi, il secondo viene adoperato esclusivamente per questi ultimi. Le unità di misura generalmente usate per esprimere i rapporti massa/volume sono i grammi per metro cubo oppure, per sostanze le cui concentrazioni in aria sono tipicamente più basse di questa scala, i milligrammi, microgrammi o nanogrammi per metro. I rapporti volume/volume sono generalmente espressi in parti di inquinante per milioni di parti di aria (parti per milione, ppm). Per il modo in cui la concentrazione è stata definita, la sua misura dipende dalle condizioni termodinamiche dell'atmosfera.



Per uniformare la scala di misura è pertanto necessario rapportare le misure a condizioni di riferimento, che generalmente sono definite da una temperatura di 25°C e una pressione di 1 atm. Come accennato in precedenza, il valore della concentrazione di una determinata sostanza nell'atmosfera dipende sia dal punto dello spazio che dall'istante di tempo in cui essa viene misurata. I fenomeni che danno luogo all'esistenza delle concentrazioni sono tuttavia estremamente rapidi, così che le variazioni nel tempo delle concentrazioni inquinanti sono di tale entità da rendere estremamente difficoltosa la misura istantanea e problematica l'interpretazione del significato fisico di quest'ultima.

Per ovviare a queste difficoltà, la misura delle concentrazioni viene in pratica espressa come media temporale su intervalli di tempo sufficientemente lunghi da permettere di specificare una tale media. Indicando con  $T = [t_1, t_2]$  l'intervallo di tempo di riferimento e con  $c(t)$  il valore istantaneo della concentrazione all'istante di tempo  $t$ , il valore medio concentrazione  $c$  al quale si riferisce è dato da:

$$\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} c(t) dt$$

L'intervallo  $T$  è detto tempo di media della misura ed è generalmente maggiore o uguale ad 1 h; valori delle concentrazioni corrispondenti a tempi di media minori sono di significato fisico incerto a causa della variabilità dei fenomeni in gioco e di minor interesse pratico poiché gli effetti delle sostanze inquinanti sull'ambiente si manifestano solo in seguito ad una loro apprezzabile persistenza. Poiché tutti i valori di misura delle concentrazioni sono in pratica mediati su un tempo  $T$ , esso deve essere sempre specificato per chiarire il senso della misura, che dal valore di  $T$  dipende in maniera sensibile.

### **3.4.1 Le dinamiche atmosferiche**

Pressoché la totalità dei fenomeni di inquinamento atmosferico avviene nella porzione più bassa dell'atmosfera chiamata "Planetary Boundary Layer" (Strato Limite Planetario), o PBL (Figura 3.4). Il PBL comprende la parte di troposfera nella quale la struttura del campo anemologico risente dell'influenza della superficie terrestre e si estende fino a oltre 1 Km di altezza. I più importanti fattori meteorologici che interessano i fenomeni di inquinamento atmosferico sono:

- il vento orizzontale (velocità e direzione), generato dalla componente geostrofica e modificato dal contributo delle forze d'attrito del terreno e da effet-

ti meteorologici locali, come brezze marine, di monte e di valle, circolazioni urbani-rurali, ecc.;

- la stabilità atmosferica, che è un indicatore della turbolenza atmosferica alla quale si devono i rimescolamenti dell'aria e quindi il processo di diluizione degli inquinanti;
- la quota sul livello del mare;
- le inversioni termiche che determinano l'altezza del PBL;
- i movimenti atmosferici verticali dovuti a sistemi baroclini od orografici.

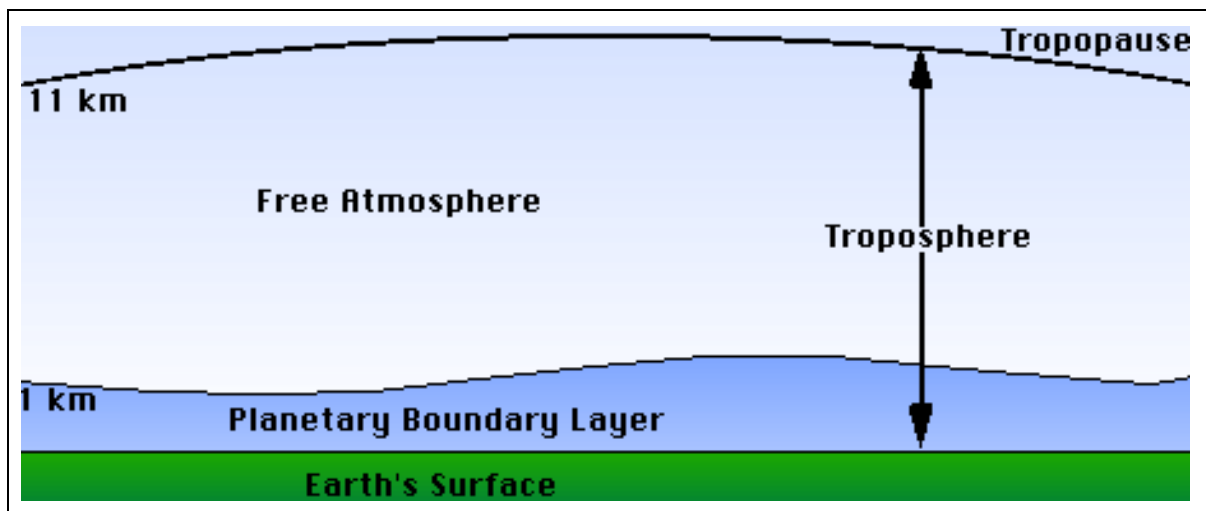


Figura3.4 – Planetary Boundary Layer (Fonte: Apat)

L'importante ruolo assunto dalla stabilità atmosferica nella dispersione degli inquinanti induce alcuni cenni su questo concetto. Nella troposfera la temperatura normalmente decresce all'aumentare dell'altitudine. Il profilo di temperatura di riferimento per valutare il comportamento delle masse d'aria è quello osservato per una particella d'aria che si innalza espandendosi adiabaticamente. Quando il profilo reale coincide con quello di riferimento, una particella d'aria, a qualsiasi altezza venga portata, si trova in equilibrio indifferente, cioè non ha alcuna tendenza né a salire né a scendere (atmosfera neutra). Quando la temperatura decresce con l'altezza più velocemente del profilo di riferimento, le particelle d'aria ad ogni quota si trovano in una condizione instabile perché se vengono spostate sia verso il basso che verso l'alto continuano il loro movimento nella medesima direzione allontanandosi dalla posizione di partenza. Se, invece, la temperatura decresce con l'altezza più lentamente del profilo adiabatico, o addirittura aumenta (situazione detta di "inversione termica"), le particelle d'aria sono inibite sia nei movimenti verso l'alto che verso il basso e

la situazione è detta stabile. Condizioni neutre sono dunque caratterizzate dalla presenza di un gradiente di temperatura adiabatico e si verificano tipicamente durante le transizioni notte-giorno, in presenza di copertura nuvolosa, o con forte vento.

Condizioni instabili si verificano quando il trasporto di calore dal suolo verso l'alto è notevole, come accade nelle giornate assolate. Le condizioni stabili, che si verificano tipicamente nelle limpide notti continentali con vento debole, sono le più favorevoli ad un ristagno ed accumulo degli inquinanti. I più gravi episodi di inquinamento si verificano in condizioni di inversione termica; in questi casi, infatti, gli inquinanti emessi al di sotto della quota dell'inversione (a meno di possedere un'energia meccanica sufficiente a forare l'inversione), non riescono ad innalzarsi poiché risalendo si trovano ad essere comunque più freddi e dunque più pesanti dell'aria circostante. Concetto connesso a quello di stabilità atmosferica, e di diretto interesse nella previsione degli inquinanti atmosferici, è la diffusione turbolenta. Il rapido ed irregolare movimento di macroscopiche porzioni di fluido che caratterizza questo fenomeno avviene a scale molto più grandi di quelle coinvolte nella diffusione molecolare, e perciò il contributo di quest'ultima nella dispersione di inquinanti è trascurabile. Il livello di turbolenza nel Planetary Boundary Layer cresce al crescere della velocità del vento, della rugosità della superficie terrestre e dell'instabilità atmosferica.

La turbolenza, infatti, è indotta sia da componenti meccaniche che da componenti termiche (forze di galleggiamento dovute alla differenza tra la forza gravitazionale e la spinta di Archimede). Quindi possiamo affermare che la determinazione del tipo di clima fornisce importanti indicazioni sul tipo di inquinamento a cui può essere soggetta un'area geografica. A tale fine è necessario studiare il campo delle temperature, il campo anemologico, la turbolenza atmosferica, nonché la frequenza delle precipitazioni e delle nebbie.

Infine un ulteriore fattore legato alla dispersione delle sostanze inquinanti è rappresentato dalle caratteristiche geometriche della via, in particolare la larghezza della strada e l'altezza degli edifici prospicienti su essa. Questi due parametri hanno un'influenza notevole sulle concentrazioni di inquinanti nell'aria. Strade larghe con edifici di modesta altezza difatti favoriscono il processo di dispersione; al contrario strade strette con edifici molto alti ostacolano la dispersione e in queste strade è facilitato l'accumulo degli inquinanti. Quindi assume particolare rilievo il rapporto altezza degli edifici/larghezza della strada. Più è alto questo rapporto maggiormente ostacolata sarà la dispersione delle sostanze inquinanti, in particolare si parla di strada "canyon" quando l'altezza degli edifici è almeno pari alla larghezza della strada.

### 3.4.2 Modelli di dispersione

I modelli di simulazione della dispersione degli inquinanti in aria sono ormai diventati uno strumento di estrema utilità per l'analisi dello stato della qualità dell'aria e per la stima preventiva dell'impatto su un territorio di sorgenti potenzialmente inquinanti.

Le norme prevedono che gli standard di qualità dell'aria non vengano superati in alcun punto del territorio. Tuttavia, se si ipotizza che l'unico mezzo conoscitivo sia la misura diretta delle concentrazioni, in pratica il controllo della qualità dell'aria può essere effettuato solo in un numero finito di punti coincidenti con le postazioni di misura delle varie reti di rilevamento presenti sul territorio nazionale. Tale numero, estremamente esiguo, non consente certo di ottenere una fotografia, anche se approssimata, della distribuzione spazio-temporale della concentrazione dei vari inquinanti di interesse. Per poter fare un passo in avanti è necessario l'impiego di modelli matematici di simulazione della dispersione degli inquinanti in atmosfera. In generale un modello matematico è uno strumento matematico/informatico che cerca di ricostruire il più fedelmente possibile lo stato della concentrazione dei vari inquinanti in un dominio di calcolo spazio-temporale di interesse.

Di per sé non ha limitazioni nel fornire indicazioni in ogni punto del territorio, tuttavia il problema è quanto la previsione del modello sia realistica. E' evidente che il modello, in quanto tale, sarà sempre una approssimazione della realtà e quindi le sue previsioni saranno sempre in disaccordo con quanto misurato. Questo disaccordo può essere quantificato in termini statistici e tali indicatori statistici possono essere utili per confrontare le performances di modelli differenti applicati alla medesima realtà. Va comunque rilevato che praticamente ogni modello presenta un maggiore o minore grado di calibrabilità (tuning) che gli consente in qualche modo di adattarsi alle misure.

Da ciò deriva una possibile strategia di impiego dei modelli:

- si applichi ad una data realtà il modello che si intende esaminare senza alcun tipo di tuning;
- si confrontino i risultati ottenuti con le misure effettuate da una rete di rilevamento presente nel territorio o con i risultati di opportune campagne sperimentali;
- si effettui la taratura del modello in modo tale che le discrepanze tra modello e misure per il dominio spazio temporale considerato scenda al di sotto di un livello prestabilito.

A questo punto il modello può considerarsi tarato per quella realtà e può essere realistico vedere le sue previsioni come una rappresentazione abbastanza realistica della realtà stessa. Una sostanza (inquinante o meno), una volta immessa nell'atmosfera, per effetto dei numerosi fenomeni quali il trasporto dovuto all'azione del vento, la dispersione per effetto dei moti turbolenti dei bassi strati dell'atmosfera, la deposizione ecc., si distribuisce nell'ambiente circostante, diluendosi in un volume di aria di dimensioni più o meno grandi in funzione delle particolari condizioni atmosferiche presenti. Ciò significa, in altri termini, che se una sostanza viene immessa nell'atmosfera in un determinato punto del territorio (sorgente) ad un dato istante e con determinate modalità di emissioni, è possibile ritrovarla in altri punti del territorio dopo un tempo più o meno lungo, con un diverso valore di concentrazione in funzione della diluizione che ha subito lungo il suo tragitto. La valutazione dei valori assunti dalla concentrazione in tutti i punti dello spazio ed in ogni istante o, in altri termini, la previsione dell'evoluzione nel tempo del campo di concentrazione  $C(x,y,z;t)$  di una determinata sostanza costituisce l'obiettivo dei modelli di simulazione della dispersione degli inquinanti in atmosfera.

Per valutare, con un adeguato grado di approssimazione, tale campo di concentrazione è necessario prendere in considerazione e schematizzare un considerevole numero di fenomeni specifici che hanno luogo durante il trasporto della sostanza in atmosfera. Detti fenomeni specifici, che si prestano ad essere modellizzati con maggiore o minore grado di difficoltà, sono di diversa natura:

- fisici (trasporto, diffusione, innalzamento del pennacchio, ecc.),
- chimico-atomici (reazioni chimiche di trasformazione, decadimento radioattivo, ecc.)
- fisico-chimici (deposizione, ecc.).

Con queste premesse è facile intuire come le attività di ricerca e sviluppo in questo settore non siano state orientate verso la progettazione di un modello in grado di soddisfare le differenti esigenze di accuratezza e completezza, ma siano state bensì articolate in diversi filoni che hanno condotto alla realizzazione di altrettante classi e/o categorie di modelli. Questo stato di fatto comporta in molti casi un attento vaglio dei modelli suggeriti dalla letteratura, prima dell'adozione di uno di essi per soddisfare una specifica esigenza.

### 3.4.3 Modelli per situazioni particolari

Nel controllo dell'inquinamento atmosferico si presenta spesso la necessità di impiegare modelli per studiare delle situazioni particolari non immediatamente riconducibili al quadro di riferimento utilizzato nello sviluppo e nella presentazione delle differenti famiglie di modelli di simulazione della dispersione degli inquinanti in aria. Tra le tante situazioni particolari che si possono incontrare, sono state scelte le seguenti per la loro intrinseca importanza:

- l'inquinamento che si registra entro gli agglomerati urbani, dovuto prevalentemente al traffico degli autoveicoli ed in particolare l'inquinamento che si registra all'interno dei canyon urbani che costituiscono la struttura architettonica più frequente per le città di medie e grandi dimensioni. Lo studio di questo tipo di inquinamento può sicuramente essere di aiuto nella pianificazione e ottimizzazione delle strutture viarie cittadine ed anche nell'eventuale pianificazione edilizia di un'area urbana;
- l'inquinamento che ha luogo in mare aperto e nelle zone costiere. Questo tipo di inquinamento ha un'importanza particolare, dato che nel mare aperto spesso operano le piattaforme petrolifere che potenzialmente possono produrre un rilevante inquinamento, soprattutto in caso di incidente. Questa è solo una delle cause di inquinamento in tali zone. Infatti è frequente che nelle zone costiere vengano localizzate delle centrali termoelettriche che richiedono grossi quantitativi di acqua per i circuiti di raffreddamento. Le emissioni dalle ciminiere delle centrali a volte possono determinare un livello di inquinamento del tutto incompatibile con gli altri usi del territorio, come per esempio l'uso turistico;
- l'inquinamento che ha luogo nei luoghi caratterizzati da un'orografia rilevante. La continua espansione industriale ha fatto sì che molti impianti industriali fossero localizzati in zone orograficamente complesse. In queste situazioni sono state registrati spesso livelli di inquinamento apparentemente non spiegabili dalla sola analisi delle emissioni.

Tutte queste situazioni potrebbero essere studiate con modelli di simulazione della dispersione degli inquinanti di elevata complessità, come i modelli euleriani e lagrangiani a particelle, tuttavia spesso è necessario l'uso di modelli molto più semplici per poter rispondere, almeno in prima approssimazione, alle esigenze derivanti da politiche di pianificazione.

### 3.4.3.1 Inquinamento in un canyon urbano

Da un'attenta analisi sulle caratteristiche micrometeorologiche di un ambiente altamente urbanizzato e si è constatato che, con frequenza, soprattutto nelle parti centrali degli agglomerati urbani, sono presenti i canyon urbani la cui struttura tipica è rappresentata in Figura 3.5. L'importanza del canyon urbano dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico sta nel fatto che, in un modo o in un altro, tale struttura costituisce una sorta di trappola per gli inquinanti emessi al loro interno, derivanti quasi esclusivamente dal traffico autoveicolare che percorre le strade cittadine.

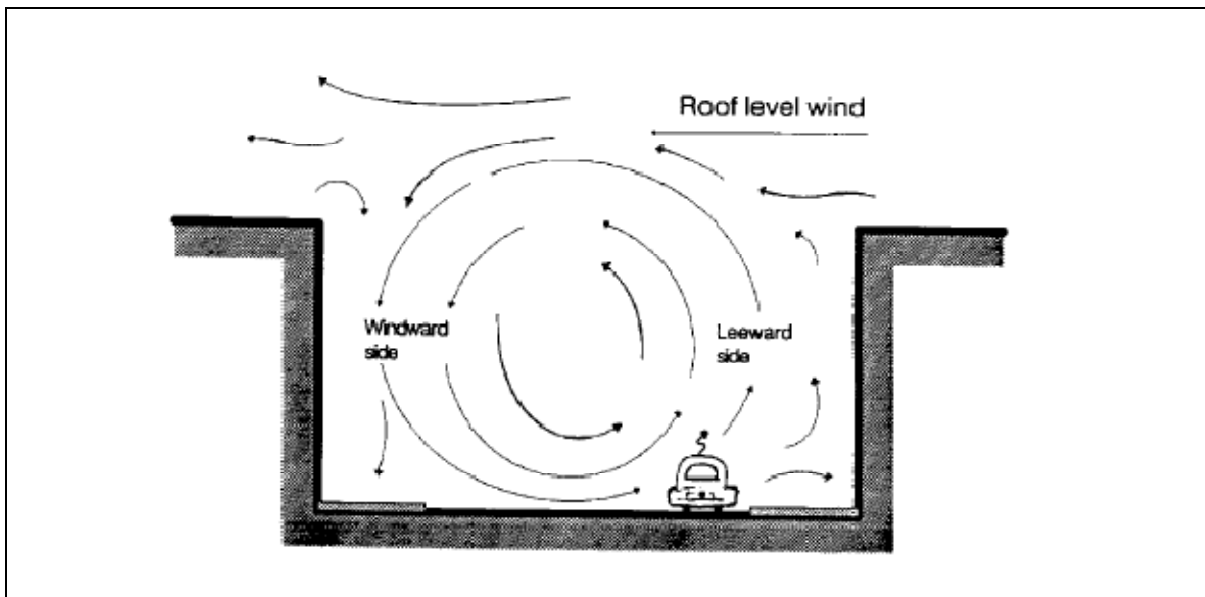


Figura 3.5 – Geometria di un canyon urbano (Fonte: Apat)

La particolarità geometrica di un canyon urbano determina la presenza di una zona di atmosfera entro la canyon urbana caratterizzata da proprietà spesso distinte da quelle dell'aria sovrastante e di conseguenza particolari condizioni per la dispersione degli inquinanti emessi. Per studiarne le problematiche connesse, è opportuno far riferimento ad un modello che isoli un solo canyon e lo caratterizzi geometricamente come indicato in Figura 3.6 da cui si nota come una tale struttura (una strada percorsa da traffico autoveicolare fiancheggiata ai due lati da file ininterrotte di edifici) sia caratterizzata da tre parametri principali: l'altezza media  $H$  degli edifici lungo il canyon e la dimensione trasversale  $W$  e longitudinale  $L$  del canyon.

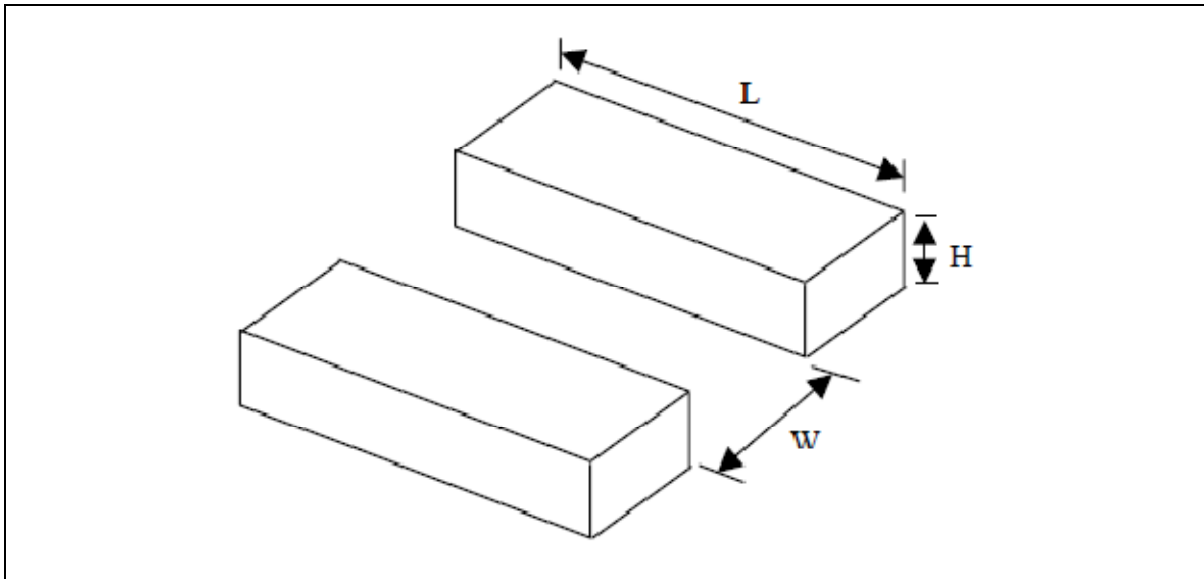


Figura 3.6 – Schematizzazione di un canyon urbano (Fonte: Apat)

Tali parametri caratteristici si compongono per definire due indicatori fondamentali: il fattore di forma del canyon ( $W/H$ ) ed il fattore di forma degli edifici ( $L/H$ ). Un canyon si dice regolare quando  $W/H$  è circa pari a 1. Quando il fattore di forma del canyon raggiunge e supera il valore 2 si parla di un canyon profondo (deep canyon). Se si considera il fattore di forma degli edifici, si dice che si è in presenza di un canyon corto quando  $L/H \approx 3$ , medio quando  $L/H \approx 5$  e lungo quando  $L/H \approx 7$ . Un canyon come quello di Figura 3.5 è un canyon simmetrico, in cui le due file di edifici che lo fiancheggiano hanno la medesima altezza. Considerando per ora un canyon simmetrico, è opportuno definire un lato sottovento (leeward) ed un lato sopravvento (winward). Va notato che spesso i canyon che si incontrano in una realtà urbana sono di tipo asimmetrico. In questo caso si ha un canyon step-up quando la fila di edifici sul lato leeward è più alta di quella sul lato winward ed un canyon step-down quando ad essere più elevata è la fila di edifici sul lato winward.

Il campo di moto dell'aria all'interno del canyon è determinato:

- dalle caratteristiche geometriche del canyon (i fattori di forma),
- dal valore della velocità media del vento al di sopra degli edifici,
- dalla direzione di provenienza del vento al di sopra degli edifici,
- dal bilancio energetico che si viene a creare all'interno del canyon.

L'angolo tra la direzione del vento nell'aria libera sovrastante e l'asse del canyon condiziona la circolazione locale che presumibilmente si viene ad instaurare al suo interno. Sono possibili diverse situazioni.



### **Vento perpendicolare al canyon.**

Si parla di vento perpendicolare al canyon quando tra l'asse dello stesso e la direzione del vento si ha un angolo non inferiore a  $30^\circ$ . Questa situazione è stata molto studiata (DePaul, Sheih, Nakamura e Oke, 1988). In particolare, quando la velocità del vento è superiore a  $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , si possono avere tre differenti regimi di moto a seconda del fattore di forma del canyon:

- **isolated roughness flow:** quando il canyon è largo ( $W/H > 2.5$ ) o, che è lo stesso, gli edifici del tessuto urbano risultano sufficientemente spaziosi, essi agiscono essenzialmente come elementi isolati di rugosità, dato che l'aria si muove ad una sufficiente distanza sottovento prima di incontrare il prossimo ostacolo;
- **wake interference flow:** quando il canyon risulta meno largo ( $1.538 \leq W/H < 2.5$ ) il flusso d'aria, distorto dalla prima fila di edifici incontrati, ha una distanza sottovento insufficiente per riaggiustarsi prima di incontrare la successiva fila di edifici ed il risultato è la risultante dell'interferenza delle due scie presenti;
- **skimming flow:** ( $W/H \leq 1.538$ ) in caso di fattore di forma superiore a 1 il flusso d'aria esterno al canyon sfiora la sommità del canyon senza entrarci direttamente, determinando entro il canyon un mot d'aria quasi indipendente dall'esterno. Quando si è in skimming flow, è possibile che siano presenti uno o più vortici a seconda del fattore di forma del canyon. In particolare si ha la presenza di un solo vortice quando  $W/H$  risulta superiore a 0.63. Quando  $W/H$  risulta inferiore a tale valore e superiore a 0.33 il vortice originario sposta la propria base inferiore dal suolo e nello spazio che così si libera viene ad instaurarsi un vortice secondario che ruota nel verso opposto al vortice principale. Mentre il vortice principale è mantenuto attivo dal flusso d'aria sovrastante il canyon, il vortice secondario è mantenuto attivo dal movimento del vortice principale. Se però  $W/H$  risulta inferiore a 0.33 nel canyon si vengono ad instaurare tre vortici sovrapposti ognuno rotante in senso inverso rispetto a quello direttamente sopra.

### **Vento parallelo al canyon.**

Un vento parallelo all'asse del canyon genera un flusso d'aria diretto in tale direzione e confinato nel canyon stesso. Tale flusso sarà perturbato in corrispondenza dei bordi laterali per l'attrito che le parati oppongono al moto delle masse d'aria. Se ci si limita a considerare tale flusso in corrispondenza del centro del canyon, Yamartino e Wiegand (1986) hanno

ipotizzato un suo profilo verticale di tipo logaritmico del tipo:

$$V(z) = v_r \times \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{z_r + z_0}{z_0}\right)$$

dove  $z_0$  è la rugosità superficiale a quota stradale e  $v_r$  è la velocità parallela al canyon misurata ad una quota di riferimento  $z_r$ .

### Vento obliquo

Quando il vento è obliquo rispetto all'asse del canyon (cioè quando l'angolo tra la direzione del canyon e quella del vento è superiore a  $30^\circ$ ), Nakamura e Oke (1988) hanno mostrato che lungo il canyon si sviluppa un vortice a spirale che altro non è se non la composizione del moto generato da:

- un vento perpendicolare al canyon con velocità  $U=A \cdot \cos(\theta)$  (di tipo vorticoso);
- un vento  $V=A \cdot \sin(\theta)$  che genera un moto coassiale con il canyon.

Con  $A$  si indica il modulo della velocità del vento sopra il canyon e con  $\theta$  l'angolo tra l'asse del canyon e la direzione del vento.

#### 3.4.3.2 Modelli semplificati di dispersione degli inquinanti

Nelle simulazioni più spinte della dispersione degli inquinanti in un canyon urbano vengono impiegati normalmente modelli complessi di tipo che:

- inevitabilmente ricostruiscono sia la fluidodinamica caratteristica del canyon sia la distribuzione degli inquinanti;
- limitano l'indagine ad un dominio bidimensionale (il piano trasversale al canyon) ipotizzando di fatto un canyon di lunghezza infinita.

Simulazioni di questo genere sono altamente realistiche e hanno fornito risultati decisamente comparabili con le misure disponibili a scala reale. La loro potenza può essere ulteriormente aumentata abbandonando la limitazione della geometria bidimensionale e realizzando simulazioni tridimensionali. Ciò che contraddistingue questi modelli è la notevole realistica delle simulazioni che realizzano, ma anche la loro notevole complessità e la necessità di rilevanti risorse di calcolo che limitano il loro uso all'analisi di un numero limitato di scenari significativi. Essi quindi non sono strumenti operativi che possano essere impiegati nelle normali operazioni di controllo della qualità dell'aria.

Per questo sono stati studiati e messi a punto modelli di maggiore semplicità e di minori richieste di calcolo che, però, fossero in grado di fornire ricostruzioni attendibili della di-

stribuzione dell'inquinamento entro un canyon urbano. Riportiamo di seguito due dei principali modelli di questa famiglia più utilizzati nella pratica corrente.

**1) Modello Street:**

Uno dei primi modelli semplificati ad essere sviluppato ed impiegato nella pratica corrente del controllo dello stato della qualità dell'aria fu il modello STREET (Johnson e al., 1973), modello che è stato derivato empiricamente dalle misure di inquinamento rilevate nelle strade di San José e di St. Louis. Esso assume che all'inquinamento dovuto alle emissioni dal traffico automobilistico locale (contributo stradale  $C_s$ ) si venga a sommare all'inquinamento presente nell'aria che scorre sopra la città a livello dei tetti (contributo di background  $C_b$ ):

$$C = C_s + C_b$$

Il contributo stradale è direttamente proporzionale alla emissione locale degli autoveicoli  $Q$  (tasso di emissione di una sorgente lineare,  $g \cdot m \cdot s^{-1}$ ) ed inversamente proporzionale alla velocità del vento  $U$  misurata alla quota dei tetti.

Se l'angolo tra la direzione del vento e l'asse del canyon è superiore a  $30^\circ$  e se nel canyon sono presenti  $N$  linee di traffico parallele, sono state derivate due relazioni per il calcolo della concentrazione:

per il lato Leeward:

$$C_s = \frac{K}{U + u_s} \times \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{\{(x_i^2 + z^2)^{1/2} + h_0\}}$$

per il lato di Windward:

$$C_b = \frac{K}{U + u_s} \times \frac{H - z}{H} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{W}$$

$K$  è una costante empirica;

$u_s$  è una velocità di scala che tiene conto del movimento dell'aria indotto meccanicamente dal traffico auto veicolare ( $u_s = 0,5 \text{ ms}^{-1}$ );

$h_0$  è una quota caratteristica che tiene conto del rimescolamento iniziale di inquinante operato dal movimento degli autoveicoli ( $h_0=2$  m);

$x_i$  e  $z$  sono rispettivamente la distanza orizzontale e verticale del punto ricettore dalla  $i$ -esima linea stradale del canyon;

$Q_i$  è il tasso di emissione lineare della linea di traffico  $i$ -esima;

$H$  e  $W$  sono la dimensione verticale e trasversale del canyon.

Queste relazioni partono dalla constatazione che, con un vento sopra i tetti circa perpendicolare all'asse del canyon, si viene sviluppando una circolazione elicoidale entro il canyon stesso per la quale gli inquinanti emessi dalle linee di traffico vengono trasportati verso il lato leeward mentre il lato windward è soprattutto esposto al background ed all'inquinamento derivante dal ricircolo interno indotto dal vortice. Il modello predice, quindi, maggiore concentrazione al lato leeward che al lato windward.

Quando l'angolo tra asse del canyon e la direzione del vento risulta inferiore a  $30^\circ$ , in teoria questo modello non dovrebbe essere utilizzato, anche se pragmaticamente vengono usate entrambe le relazioni e si pone  $C_s$  pari al relativo valor medio. Il modello è estremamente semplice e non può essere impiegato, a rigore, quando la velocità del vento è molto bassa: in effetti in tale situazione il vortice non è presente in maniera stabile e la distribuzione di inquinante è pressoché uniforme.

## 2) Modello di Hotchkiss e Harlow:

Un altro modello analitico è quello sviluppato da Hotchkiss e Harlow (1973) e consiste nell'individuare una soluzione approssimata dell'equazione euleriana del trasporto e della dispersione dell'inquinante in condizioni stazionarie:

$$-U \frac{\partial C}{\partial x} - W \frac{\partial C}{\partial z} + v_t \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = 0$$

Una volta integrata questa equazione con le opportune condizioni iniziali e al contorno, si ottiene la relazione seguente per la concentrazione nella sezione del canyon:

$$C_s = S \left[ \frac{1}{u_w} - \frac{y}{v_t} \right] - \frac{S u_n y}{4K v_t^2 (1 - \beta)} \times [e^{Ky} (1 - Ky) - \beta e^{-Ky} (1 + Ky)] \times \cos(Kx)$$

dove,  $Q$  è il tasso di emissione lineare locale,  $S = Q/W$ ,  $u_n$  è la componente del vento perpendicolare all'asse del canyon e  $u_w$  è la velocità di ventilazione. Il cuore del modello è rappresentato dal coefficiente di diffusività turbolenta  $v_t$  che può essere espresso in funzione della velocità del vento sopra i tetti ( $U$ ) e della velocità,  $u_s$  derivante dal moto degli autoveicoli, nel modo seguente:

$$v_t = L \times \sqrt{(\alpha_1 u_t)^2 + u_s^2}$$

dove,  $L$  è un'appropriata lunghezza di scala,  $\alpha_1$  è una costante pari a 0.1 e che è stata posta uguale alla larghezza  $W$  del canyon.

Per quanto riguarda la velocità di ventilazione che determina la concentrazione alla sommità del canyon, Hotchkiss e Harlow (1973) hanno proposto la relazione seguente:

$$u_w = (v_t u_t / W)^{1/2}$$

mentre in Berkowicz e al. (1997) si propone:

$$u_w = \sqrt{(\alpha_2 u_t)^2 + (\alpha u_s)^2}$$

Nonostante la maggiore fisicità del modello (più apparente che reale), i risultati ottenuti in situazioni reali non sono molto differenti da quelli ottenuti dal modello Street. Entrambi sono in grado di riprodurre in modo corretto le caratteristiche generali del fenomeno, anche se quantitativamente spesso differiscono non poco dalle misure reali. D'altro canto ciò era prevedibile visto che si è cercato di condensare in modelli algebrici semplicissimi l'enorme complessità fluidodinamica del canyon urbano.

## CAPITOLO 4

### Applicazione Copert IV: caso studio Palermo

#### Premessa

Il seguente capitolo è stato dedicato alla stima, attraverso l'utilizzo del software Copert IV, della parte relativa alle emissioni inquinanti prodotte dal traffico veicolare in ambito prettamente urbano. In particolare, è stata approfondita la parte relativa alla simulazione del processo dell'emissione di sostanze inquinanti da parte dei veicoli stradali con motori a combustione interna circolanti nella città di Palermo. Dall'applicazione del processo di simulazione si è ottenuto il valore medio delle emissioni per ciascuna categoria veicolare presa in considerazione. Dopo una presentazione sintetica della città di Palermo, della sua mobilità e del suo livello di inquinamento atmosferico, verranno descritte le metodologie utilizzate per la stima delle emissioni da traffico, i dati utilizzati relativamente ai flussi di traffico e al parco circolante e i risultati ottenuti dall'applicazione del modello di simulazione Copert IV.

#### 4.1 Palermo tra traffico e inquinamento

Si respira mal'aria a Palermo, con preoccupanti e insoliti livelli di benzene. Le punte di polveri sottili registrate destano più che una preoccupazione. Nulla di buono anche per quanto riguarda l'inquinamento acustico, infatti, i decibel sono fuori controllo con soglie di rumore oltre i limiti ed il Comune non ha ancora dotato la città del piano di zonizzazione acustica, obbligatorio per legge da ormai quindici anni. Si espongono così i cittadini palermitani a rischi concreti per la loro salute che potrebbero essere ridotti se solo s'investisse di più sul trasporto pubblico e su nuove forme di mobilità, piuttosto che proseguire con tagli ai già carenti servizi offerti a residenti e pendolari.

Tutto ciò è il risultato di una campagna di monitoraggio itinerante realizzata con il patrocinio del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Mare nella città di Palermo nel periodo tra il 14 e 16 febbraio 2014.

Tale monitoraggio è stato effettuato con l'utilizzo di un Laboratorio Mobile, per 72 ore consecutive, posizionato in piazza Verdi, all'angolo di via Maqueda e in Corso Calatafini. Oltre ai valori del PM<sub>10</sub>, sono state raccolte informazioni sulle concentrazioni nell'aria di benzene, biossido di azoto, monossido di carbonio, biossido di zolfo e ozono.

Nel corso dei tre giorni di monitoraggio sono registrati valori notevoli di benzene con una media giornaliera rispettivamente di 7 µg/m<sup>3</sup>, 8,4 µg/m<sup>3</sup> e 4,3 µg/m<sup>3</sup>; i primi due risultano perciò più elevati rispetto al limite di 5 µg/m<sup>3</sup> previsto come media annuale dal Decreto legislativo 155/2010. Tale risultato, anche se si riferisce a due medie giornaliere, può plausibilmente trovare spiegazione sia nella presenza del porto commerciale sia nel parco macchine obsoleto cui è dotata la città. Tutti gli altri inquinanti, durante i tre giorni di monitoraggio, non hanno superato i limiti previsti dalla normativa. Le condizioni meteo di forte instabilità atmosferica hanno sicuramente influito abbassando la concentrazione delle polveri sottili che hanno fatto registrare, nella prima giornata, minimi orari anche di 1 µg/m<sup>3</sup>. Con l'instaurarsi di condizioni meteo stabili, le concentrazioni di PM<sub>10</sub> sono aumentate fino a raggiungere dei picchi di 119 µg/m<sup>3</sup>, in corrispondenza di un alto afflusso veicolare. Da segnalare anche i valori del PM<sub>2,5</sub> che registrano una media giornaliera di 26 µg/m<sup>3</sup>. Anche se il valore limite di legge di 25 µg/m<sup>3</sup> si riferisce ad una media annuale e non giornaliera, il dato può comunque indicare una tendenza critica (Tabella 4.1).

Tabella 4.1 – Rilievo Laboratorio mobile qualità dell'aria, angolo via Maqueda, nelle giornate del 14, 15 e 16 febbraio 2014 (Fonte: Legambiente)

Inquinanti monitorati	10/02	15/02	16/02	Limiti di legge
Pm <sub>10</sub> <sup>(1)</sup>	12	36	21	Limite giornaliero:50 Superamenti annui consentiti: 35
Pm <sub>2,5</sub> <sup>(1)</sup>	/	26	15	Limite medio annuo consentito: 25
Benzene <sup>(2)</sup>	7	8,4	4,3	Limite annuo consentito: 5
Biossido di Zolfo <sup>(1)</sup>	2,6	8,6	6,6	Limite sulle 24 ore: 125
Biossido di Azoto <sup>(2)</sup>	72	101	75	Limite orario 200
Monossido di carbonio <sup>(3)</sup>	0,7	1,8	1,5	Limite giornaliero su otto ore: 10
Ozono <sup>(2)</sup>	36	37	40	Limite di attenzione: 180 Livello di allarme: 240

(1) microgrammi su metro cubo (µ/m<sup>3</sup>) – media su 24h , (2) microgrammi su metro cubo (µ/m<sup>3</sup>), (3) milligrammi su metro cubo (mg/m<sup>3</sup>). La normativa: i limiti di legge degli inquinanti sono fissati dal DL n. 155 del 13/08/2010 e s.m.l.

È un dato di fatto che molti degli inquinanti presenti nell'aria siano una diretta conseguenza delle emissioni prodotte dal traffico automobilistico, per di più se i mezzi circolanti sono molto vecchi così come accade a Palermo.

Infatti il capoluogo siciliano è tra i peggiori in Italia su questo fronte, sia per l'alto tasso di motorizzazione privata, sia per la qualità del parco auto. Il 56,6% delle auto circolanti, secondo un'elaborazione di Legambiente su dati Aci, ha un'età superiore agli otto anni, rispetto alla media italiana del 49,7%. Numeri che non si discostano dalle altre realtà siciliane. Nell'isola, l'età media di un'auto è di 9 anni; più di vent'anni, invece, il 33,5% dei bus circolanti e il 70,9 per cento degli autocarri (superiori a 3,5t). E' indispensabile adottare misure più concrete, strutturali ed efficaci come l'incremento del trasporto pubblico locale e del servizio ferroviario per il trasporto pendolare, l'estensione delle zone 30 e delle aree pedonali, favorire l'incremento degli spostamenti in bicicletta lungo le strade cittadine. Non sono solo i polmoni dei palermitani ad avere la peggio. I rilevamenti del laboratorio mobile, infatti, testimoniano una situazione di forte criticità anche per quanto riguarda l'inquinamento acustico.

Anche in questo caso causato principalmente dal traffico automobilistico. Durante i periodi diurni i valori dell'inquinamento acustico si mantengono al di sopra del limite ammesso per la zona in esame, sfiorando di oltre 5 dB(A). Nel periodo notturno, lo sfioramento dei limiti di legge è arrivato fino ai 10 dB(A). Questo innalzamento della rumorosità ambientale notturna è dovuta all'alta presenza di ciclomotori e persone, essendo la zona rilevata il ritrovo dei giovani per la movida serale. In Corso Calatafimi, invece, la situazione è molto critica sia di giorno che soprattutto di notte quando lo sfioramento dai limiti è di oltre 15 dB(A) (Tabella 4.2).

Tabella 4.2 – Rilievo Laboratorio mobile inquinamento acustico, angolo via Maqueda e Corso Calatafimi, nelle giornate del 14, 15 e 16 febbraio 2014 (Fonte:Legambiente)

<b>Piazza Verdi via Maqueda</b>	<b>14/02</b>	<b>15/02</b>	<b>16/02</b>
Livello equivalente continuo diurno (6-22) <b>dB (A)</b>	71,3	70,1	67
Livello equivalente notturno (22-6) <b>dB (A)</b>	64,8	70,3	71,7
Il Comune di Palermo non ha un piano di zonizzazione acustica. È stato preso come riferimento la classe IV – aree di intensa attività umana con limiti acustici di immissione in Leq pari a 65 dB(A) in fascia diurna e 55 dB(A) in fascia notturna			
<b>Via Calatafimi</b>	<b>Dalle ore 12 del 14 alle ore 12 del 15/02</b>		
Livello equivalente continuo diurno (6-22) <b>dB (A)</b>	72,4		
Livello equivalente continuo notturno (22-06) <b>dB (A)</b>	71,7		
classe IV – aree di intensa attività umana con limiti acustici di immissione in Leq pari a 65 dB(A) in fascia diurna e 55 dB(A) in fascia notturna			



Contravvenendo a quanto da anni impone la legge, il Comune di Palermo non si è mai dotato di un piano di zonizzazione acustica. Una situazione che si riscontra in tutta l'isola, visto che appena 4 comuni sui 390 siciliani ha approvato questa classificazione, in pratica l'1 per cento.

#### 4.1.1 Mobilità e trasporti

La città di Palermo, centro maggiore dell'omonima provincia per la presenza di poli attrattori quali scuole, Università, servizi ed uffici pubblici, strutture culturali, ricreative e sportive, strutture ospedaliere, polarità commerciali, ecc., si estende su 158,88 kmq. e conta 659.433 abitanti.

Il Comune di Palermo si inserisce in un'area urbana metropolitana che comprende 26 comuni, oltre il capoluogo, con una popolazione complessiva di 1.065.595 abitanti. Tali elementi, correlati con le caratteristiche peculiari dei singoli centri urbani in ordine alle attività preminenti, sono alla base di una domanda di mobilità il cui trend appare in continua crescita (Figura 4.1).

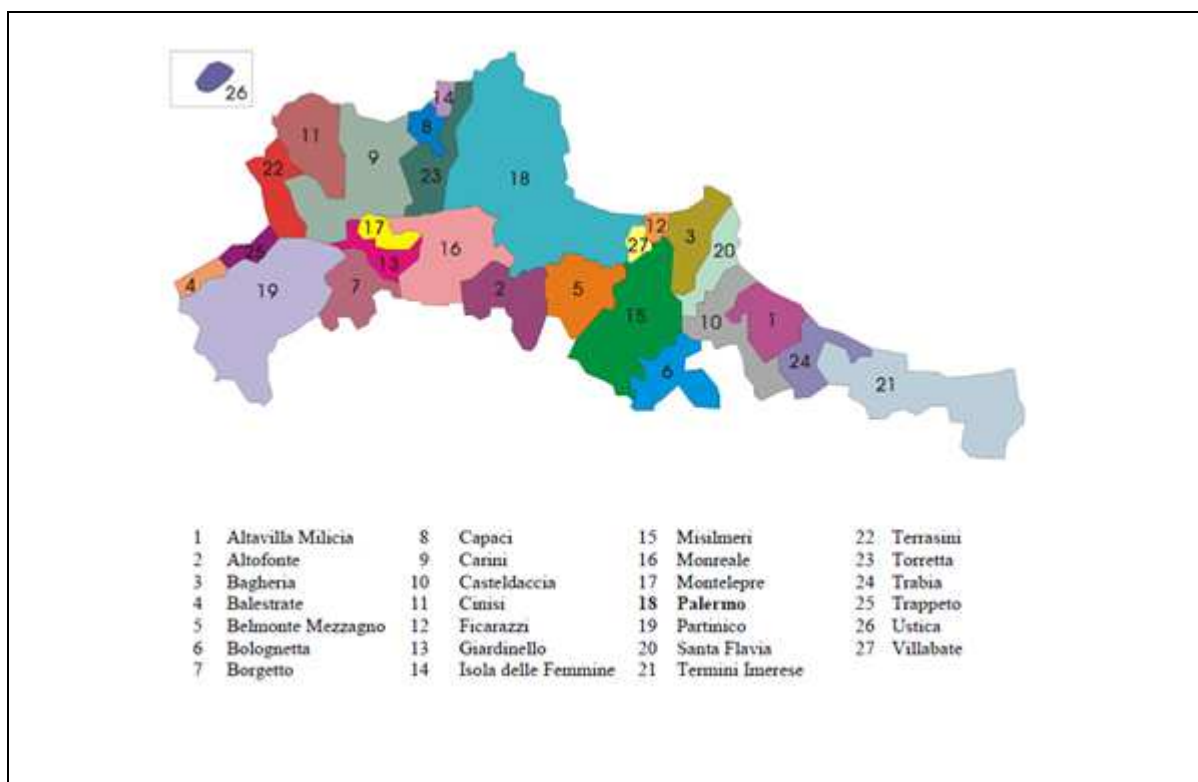


Figura 4.1 – Palermo e la sua area metropolitana (Fonte: Rapporto Ambientale PGTU 2010)

Il peso della città di Palermo è rappresentato da una popolazione che costituisce il 63,52% del totale dei residenti nell'area metropolitana, mentre nei comuni gravitanti risiede il

rimanente 36,48%. Negli ultimi anni la popolazione residente nell'area urbana metropolitana è cresciuta di 2.076 abitanti. Più in particolare, la popolazione del capoluogo è diminuita di 27.118 abitanti (-3,95%), mentre la popolazione degli altri comuni è cresciuta complessivamente di 40.843 abitanti (+12,09%).

Tali valori evidenziano una realtà dalla quale emerge che Palermo perde percentualmente popolazione a vantaggio dei comuni gravitanti.

Queste variazioni interne della popolazione sono correlabili alla crescita dei rapporti tra il capoluogo e i comuni limitrofi, nonché ad alcune peculiarità che caratterizzano i piccoli centri rispetto alle grandi città, quali la disponibilità di abitazioni a costi più vantaggiosi e l'esistenza di modelli, equilibri e situazioni sociali, economiche ed ambientali che determinano una qualità della vita non più riscontrabile nei grandi aggregati urbani.

Lo scenario della mobilità che caratterizza la città di Palermo e la sua area metropolitana è costituito da elementi non dissimili da altri grandi centri abitati; in particolare ci si riferisce:

- alla forte componente di mobilità interna all'area urbana, che costituisce la maggioranza (80%) del totale degli spostamenti che interessano l'intero sistema urbano dei trasporti;
- al pendolarismo, fenomeno che è stato accentuato progressivamente dall'aumento della popolazione che risiede nei comuni limitrofi, dato questo in controtendenza rispetto alla sostanziale staticità del trend di Palermo. Il ruolo e le funzioni di capoluogo di provincia e di regione generano inoltre un'ulteriore aliquota di domanda di mobilità per la presenza nella città di uffici di interesse provinciale e regionale, la cui presenza è fortemente accentrata rispetto al contesto territoriale regionale, ma al contempo risulta oltremodo dispersa nell'ambito urbano.

Tali realtà, unitamente alla forte attrattività che la città offre in termini di servizi, attività commerciali e terziarie di livello quantitativo e qualitativo certamente superiore all'offerta presente nei comuni vicini, contribuiscono ad innalzare i livelli della pendolarità determinati dagli addetti che non risiedono nel capoluogo, oltre a produrre una significativa aliquota della domanda di mobilità generata dall'utenza interessata.

Oltre alle funzioni direzionali e dei principali servizi esistenti nella città di Palermo, lungo la costa dell'area metropolitana è presente un sistema di attività industriali in via di espansione, localizzate in tre aree industriali abbastanza consolidate, poste agli estremi ed al centro del territorio dell'area metropolitana (Carini, Brancaccio e Termini Imerese), situazione questa che determina un ulteriore incremento dei livelli di mobilità, generati dagli spostamenti casa-lavoro e dagli spostamenti conseguenti all'erogazione di servizi connessi

di rilevante entità e dal trasporto merci, che, in maniera alquanto disorganica e polverizzata, è causa di non trascurabile aggravio per i livelli di congestione della rete stradale principale.

Nel campo del trasporto delle merci, non può essere trascurato il tema complesso della domanda di mobilità generata dalla presenza del porto, specie in considerazione del continuo aumento d'interesse al riguardo del trasporto passeggeri/merci via mare, ("autostrade del mare") e dei riflessi che questo determina nel traffico cittadino, per il convergere, specie in taluni itinerari principali, di un numero significativo di mezzi pesanti.

La zona costiera è inoltre caratterizzata dalla presenza delle principali aree turistiche e a vocazione turistica dell'intera area metropolitana.

Il patrimonio abitativo dell'area, oltre a contare sulle disponibilità degli aggregati urbani, si caratterizza per una considerevole presenza di residenze stagionali, effettivamente utilizzate in limitati periodi dell'anno. Tale situazione determina un incremento degli spostamenti e dei fenomeni di pendolarismo soprattutto nel periodo estivo.

Palermo e la sua "area vasta" si connotano per il ridotto numero di connessioni che permettono il collegamento tra i vari centri urbani ed il capoluogo; di tutto rilievo appare la ripartizione tipologica dei tali collegamenti che risulta assolutamente sbilanciata in favore di un'offerta del trasporto di tipo stradale, alla quale si contrappone solo un'unica linea ferroviaria (Messina/Palermo/Trapani) che serve, oltre Palermo, 15 dei 26 comuni ubicati lungo la fascia costiera dell'area metropolitana.

Il consistente numero di veicoli del trasporto pubblico extraurbano, che giornalmente insistono sull'area urbana di Palermo, contribuisce tra l'altro ad aumentare l'addensamento dei mezzi motorizzati che percorrono le arterie cittadine, ed in particolare l'area del Centro Storico, evidenziando uno scarso livello d'integrazione con le altre modalità di trasporto per l'assenza di efficienti terminali che favoriscano l'interscambio modale e di un sistema tariffario integrato.

La struttura viaria principale (rete portante della viabilità) di Palermo può essere descritta distinguendo i due sistemi in cui si articola: il sistema della viabilità di accesso alla città ed il sistema della viabilità urbana.

Il sistema della viabilità che consente l'accesso alla città è costituito dalle autostrade, dalla cosiddetta "circonvallazione" e dalle strade statali e provinciali che con assetto radiale collegano il capoluogo con il suo hinterland (Figura 4.2) :

- l'autostrada A19 (Palermo-Catania), che serve le relazioni con le aree industriali di Termini I., Bagheria e Brancaccio, nonché le relazioni con Messina e il continente, attraverso



Il sistema della viabilità urbana è incentrato sul reticolo di strade a maglia ortogonale dell'area centrale (delimitata dal fiume Oreto a sud, dal viale Resurrezione a nord, dal mare ad est e dal tracciato della circonvallazione ad ovest).

In particolare, l'area centrale di Palermo risulta caratterizzata dalla presenza di due importanti assi ortogonali (Figura 4.3):

- via Vittorio Emanuele-corso Calatafimi, che costituisce la direttrice est-ovest su cui è sorto il nucleo originario della città, poi proseguita in epoca successiva fino a Monreale (SS 186);
- via Maqueda, lungo il cui asse seicentesco sono state ordite le successive espansioni a sud lungo via Oreto ed a nord lungo l'itinerario via Ruggero Settimo - via della Libertà.

I suddetti assi dividono in quattro settori il Centro Storico, caratterizzato al suo interno da una viabilità poco permeabile con sezione molto ridotta e disomogenea (Figura 4.4).

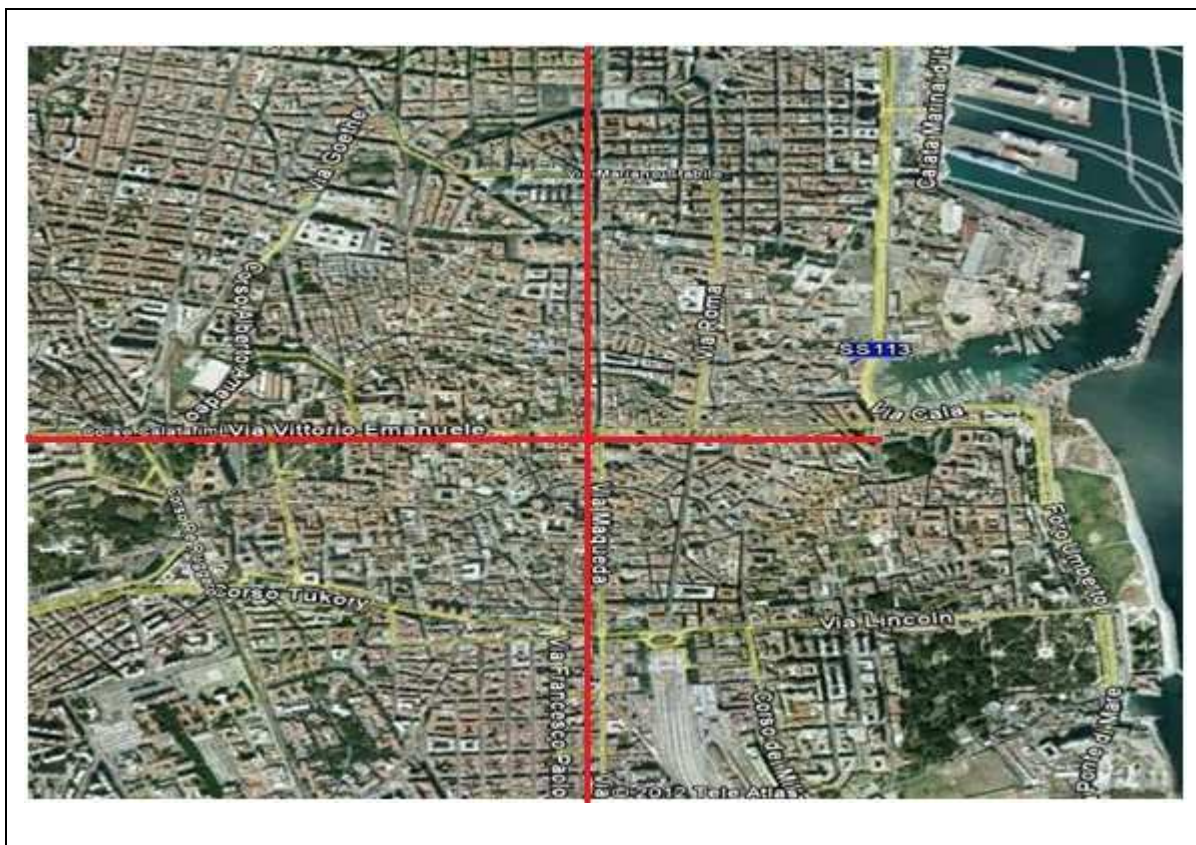


Figura 4.3 – Sistema di viabilità urbana: reticolo di strada a maglia ortogonale dell'area centrale (Fonte: Rapporto Ambientale PGTU 2010)

La campagna di analisi condotte sul parco veicolare circolante del Comune di Palermo, effettuata ai fine della redazione del pgtu, ha evidenziato un incremento globale dei veicoli pari al 22,36 %, cui corrisponde un incremento delle autovetture pari al 4,72 %.

Dal complesso delle elaborazioni eseguite e dai dati acquisiti, emerge un quadro macroscopico della mobilità di Palermo che può essere riassunto con alcuni indicatori riportati nella Tabella 4.3.

Tabella 4.3 – Dati di mobilità relativi al PGTU (Fonte: Rapporto ambientale PGTU 2010)

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flusso di auto nell'ora di punta (07,30-08,30)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• spostamenti interni al territorio comunale</li> <li>• spostamenti di scambio e di attraversamento</li> </ul> </li> </ul>	<p>69.104</p> <p>56.910</p> <p>12.194</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Coefficiente medio di occupazione delle auto (persone/auto)</b></li> </ul>	1,3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flusso di persone su auto nell'ora di punta (07,30-08,30)</b></li> </ul>	74.000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flusso di passeggeri su mezzo pubblico su gomma interni al territorio comunale nell'ora di punta (07,30-08,30)</b></li> </ul>	19.230
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ripartizione modale degli spostamenti<sup>(*)</sup> interni al territorio comunale nell'ora di punta (07,30-08,30)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>auto privata</b></li> <li>• <b>mezzo pubblico</b></li> </ul> </li> </ul>	<p>80%</p> <p>20%</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flusso giornaliero di auto</b></li> </ul>	898.352
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flusso giornaliero di persone su auto</b></li> </ul>	1.167.857
<p><i>(*) solo auto private e mezzo pubblico urbano</i></p>	

È risultato che ogni giorno, il sistema urbano di Palermo è interessato da un flusso di autovetture pari a 898.352 (di cui 69.104 nell'ora di punta 07.30-08.30). Dei 69.104 spostamenti effettuati durante l'ora di punta, 56.910 effettuano spostamenti interni alla città e rappresentano, dunque, la mobilità interna dei residenti; i restanti 12.194 sono relativi agli spostamenti di scambio e di attraversamento del centro urbano. Il trasporto pubblico urbano su gomma è risultato interessato da un volume di domanda di circa 19.230 durante l'arco dell'ora di punta mattutina 07.30-08.30 e nell'ambito degli spostamenti interni al territorio comunale.

Il numero medio di passeggeri a bordo delle auto (coefficiente di occupazione) è risultato pari a 1,3. L'analisi dei dati sopra riportati ha permesso di stimare il coefficiente di ripartizione modale degli spostamenti interni (auto-TPL) al territorio comunale durante l'ora di punta 07.30-08.30. In particolare si è osservato che l'80% degli spostamenti auto-TPL avviene con il mezzo proprio mentre soltanto il 20% utilizza il mezzo pubblico su gomma. Tale analisi connota una crescente disponibilità e quindi uso del mezzo privato e ciò certamente ha contribuito, oltre che a potenziare i fenomeni di congestione veicolare e di inquinamenti ambientali, a mettere in crisi la concezione stessa della città, con un progressivo consumo degli spazi urbani, ceduti all'automobile e sottratti agli altri usi più prettamente pedonali

#### 4.1.2 Sistema di rilevamento della qualità dell'aria

La prima e prevedibile risposta all'acuirsi del fenomeno dell'inquinamento atmosferico (o comunque della sua percezione da parte dell'opinione pubblica) è stata un'accresciuta spinta all'installazione di nuove reti di monitoraggio o al potenziamento delle esistenti (nel senso di estensione del numero di postazioni). In pratica, di fronte all'allarme ambientale che iniziava a manifestarsi, si è ritenuto che la prima azione da fare fosse conoscere l'entità e l'estensione del problema e lo strumento scelto per tale indagine è stata la misura.

Tuttavia tali reti controllano un numero definito e limitato di punti nel territorio e non è sempre garantito che essi rappresentino effettivamente la realtà di un territorio, soprattutto quando questo è una città di grandi dimensioni o una zona ad orografia complessa.

Frequentemente, infatti, la localizzazione delle poche e costose centraline ha dovuto necessariamente seguire criteri di tipo sanitario (le si mette dove abita più gente), in pratica privilegiando cioè il monitoraggio della dose di inquinante assorbita dalla popolazione, cosa non sempre coincidente con la lettera e lo spirito della normativa vigente.

Il criterio degli Standard di Qualità dell'Aria richiede un ulteriore passo di valorizzazione dei dati rilevati dalle reti di monitoraggio: le postazioni di misura dovranno essere considerati anche come punti di "campionamento" di un fenomeno fisico complesso che si vuole studiare e iniziare a controllare nella sua globalità. L'inventario delle sorgenti inquinanti, l'impiego di modelli matematici di simulazione della diffusione degli inquinanti e la conoscenza precisa della meteorologia locale diventano strumenti essenziali a questo scopo. La stessa localizzazione iniziale delle postazioni della rete di monitoraggio potrebbe essere rimessa in discussione in un processo di feedback alimentato dal confronto tra dati misurati ed elaborazioni modellistiche che punta a massimizzare il contenuto informativo della strumentazione installata sul territorio.

Nell'ambito delle correlazioni tra dati di traffico e gli agenti inquinanti si è fatto ricorso ai dati forniti dalla rete di stazione di rilevamento fisse installate nel territorio palermitano dall'AMIA. Tale rete di monitoraggio della qualità dell'aria, istituita nel 1991 ed entrata in funzione nell'agosto del 1966, è costituita da:

- 18 punti di monitoraggio di cui 10 stazioni di monitoraggio (Figura 4.4) ed 8 mini centraline montate su pali che utilizzano dei microsensori per il rilevamento continuo degli inquinanti e del livello di inquinamento acustico;
- 89 apparecchiature di rilevamento di parametri chimici e fisici dell'aria;
- un centro di raccolta elaborazioni ed archiviazione;
- due punti di diffusione delle informazioni al pubblico.

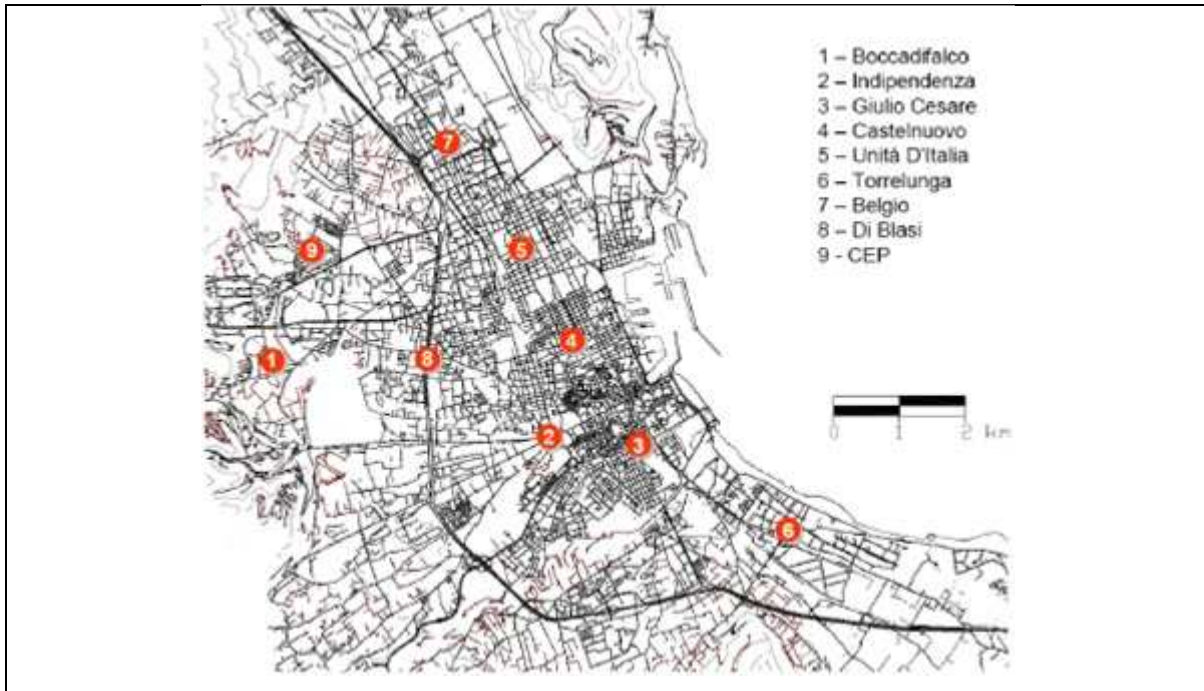


Figura 4.4 – Ubicazione delle stazioni della rete di rilevamento di qualità dell'aria  
(Fonte: R.A.P. s.p.a)

Tutte le cabine sono collegate tramite modem e linea telefonica commutata ISDN al centro di supervisione sito nella sede AMIA. Il centro consente la supervisione ed il controllo in tempo reale di tutte le apparecchiature di rilevamento dei parametri chimici e fisici installati nelle cabine nonché dello stato delle cabine stesse (alimentazione elettrica, intrusioni, temperatura interna, etc.). Il centro, in assenza dell'operatore, è programmato per acquisire periodicamente da ciascuna cabina tutti i dati relativi al funzionamento della cabina stessa e degli strumenti ed i valori di inquinamento rilevati, nonché per ricevere le eventuali segnalazioni di anomalia (allarmi) trasmesse automaticamente.

Tutti i dati, allarmi, etc. sono memorizzati in linea per oltre due anni su un data base e possono essere visualizzati in forma grafica e/o tabellare secondo vari criteri di ricerca o di sintesi statistica. La rete di monitoraggio è dotata di un laboratorio chimico per la gestione di alcune delle apparecchiature presenti nelle cabine (analizzatori automatici per il rilevamento dell'acidità e conducibilità delle piogge, sistemi di campionamento polveri, analizzatori di benzene, toluene e xileni, etc.) e per l'esecuzione delle analisi di quei parametri ambientali che richiedono tecniche di misure non automatiche (determinazione gravimetrica delle polveri, metalli pesanti, etc.).



I dati rilevati dalle diverse centraline vengono pubblicati sul sito dell'Amia (oggi R.A.P. s.p.a Risorse Ambiente Palermo – Settore Monitoraggio dell'Aria) sotto forma di bollettini giornalieri e mensili. Riportiamo di seguito un esempio di bollettino riepilogativo relativo al mese di Ottobre 2014 (Figure 4.5 a, b e c).

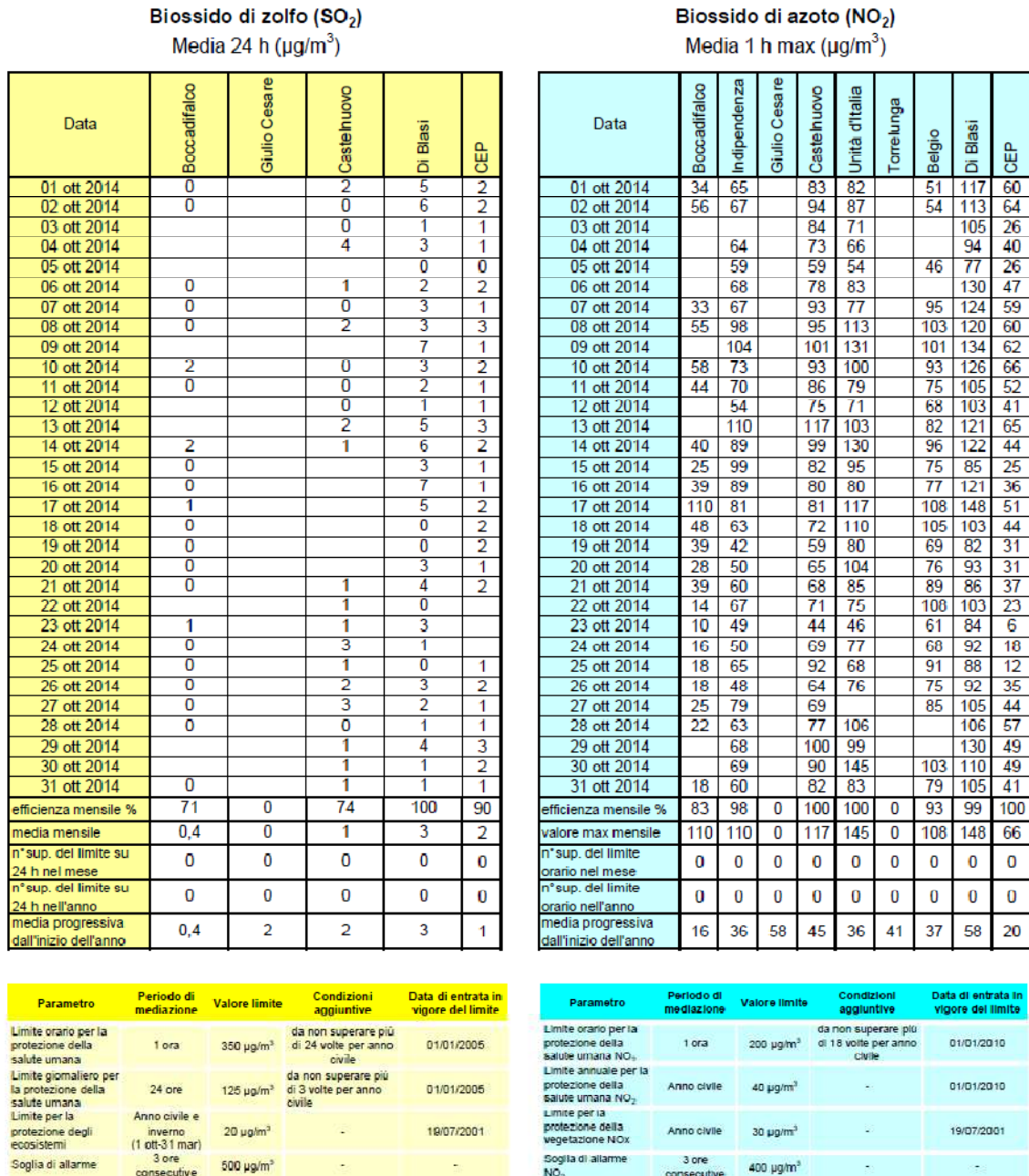


Figura 4.5a – Dati qualità dell'aria della città di Palermo relativi agli inquinanti SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> (Bollettino mese ottobre 2014, elaborazione su Fonte: R.A.P s.p.a)

**Monossido di carbonio (CO)**  
Media 8 h max (mg/m<sup>3</sup>)

Data	Boccardifalco	Indipendenza	Giulio Cesare	Castelnuovo	Unità d'Italia	Torrelunga	Belgio	Di Biasi	CEP
01 ott 2014	0,1	0,4		0,6	1,5		1,2	1,4	1,2
02 ott 2014	0,2	0,8		0,9	1,8		1,2	1,7	1
03 ott 2014				0,9	0,9		0,8	1,4	0,3
04 ott 2014		0,3		0,7	0,6		0,7	1,1	0,4
05 ott 2014		0,2		0,7	0,6		0,5	1,1	0,4
06 ott 2014		0,7		0,9	1			1,2	0,4
07 ott 2014	0,1	0,6		0,7	1,6		1,2	1,5	0,5
08 ott 2014	0,1	1,1		0,8	1,8		1,4	1,9	1,2
09 ott 2014		0,8		0,9	1,7		1,4	2,2	1,4
10 ott 2014	0,1	1		1	1,1		1,4	2	1,2
11 ott 2014	0,1	0,6		1,1	0,9		1,2	1,7	0,5
12 ott 2014		0,4		0,7	0,4		0,8	1,3	0,4
13 ott 2014		1,7		1,3	1,5		1,4	2,5	1,3
14 ott 2014	0,2	1,6		1,5	1,5		1,6		
15 ott 2014	0,1	1,4		0,9	0,9		0,8	0,9	
16 ott 2014	0,1	1,2		0,7	0,5		0,9	1,7	0,5
17 ott 2014	0,3	2		0,8	1,4		1,3	2,4	0,9
18 ott 2014	0,1	2		0,6	1,1		1,3	1,5	0,5
19 ott 2014	0,1	0,3		0,4	0,4		0,8	1	0,4
20 ott 2014	0,1	0,4		0,4	0,8		1	1,4	0,8
21 ott 2014	0,1	0,8		0,7	1,1		1,2	1,4	1
22 ott 2014	0,1	0,5		0,6	0,7		0,9	1,1	0,4
23 ott 2014	0,1	0,8		0,2	0,2		0,6	0,6	
24 ott 2014	0,1	0,6		0,5	1,1		0,8	0,8	0,1
25 ott 2014	0,1	0,8		0,6	1		0,8	1	0,1
26 ott 2014	0,1	1,4		0,6	0,3		1,1	0,8	0,1
27 ott 2014	0,1	1,1		0,5	1,8		1,1	1,3	0,3
28 ott 2014	0,1	0,7		0,7	1,4		1,2	1,1	0,6
29 ott 2014		2,3		1,7	1,8		1,7	2,1	1,2
30 ott 2014		2,1		1,5	1,6		1,7	1,7	1,2
31 ott 2014	0,1	0,7		0,9	1,4		1,1	1	0,2
efficienza mensile %	84	98	0	100	100	0	98	99	96
valore max mensile	0,3	2,3	0,0	1,7	1,8		1,7	2,5	1,4
n° sup. del limite su 8 h nell'anno	0	0	0	0	0	0	0	0	0
valore max dall'inizio dell'anno	0,5	2,5	2,6	2,6	2,8	1,8	3,2	2,6	2,2

**Polveri sottili (PM10)**  
Media 24 h (µg/m<sup>3</sup>)

Data	Boccardifalco	Indipendenza	Giulio Cesare	Castelnuovo	Unità d'Italia	Torrelunga	Belgio	Di Biasi	CEP
01 ott 2014	6	23		28	30		34	45	
02 ott 2014	10	33		40	37		45	60	
03 ott 2014				30	25			27	43
04 ott 2014		24		31	29			37	43
05 ott 2014		21		24	23			26	32
06 ott 2014				23	22				32
07 ott 2014	5	20		28	26		31	47	
08 ott 2014	7	28		37	32		37	49	
09 ott 2014		31		45	39		53	60	
10 ott 2014	12	35		50	41		50	59	
11 ott 2014	14	41		59	47		55	63	
12 ott 2014		40		52	40		44	55	
13 ott 2014		63		77	60		68	89	
14 ott 2014	27	61		91	68		98		
15 ott 2014	30	37		82	70		82		
16 ott 2014	26	41		51	45		55	60	
17 ott 2014	30	57		70			64	71	
18 ott 2014	36	72		95			112		
19 ott 2014	27	38		57			69		
20 ott 2014	23	32		44			46		
21 ott 2014	21	23		30			31	36	
22 ott 2014	21	38		45	36		51	48	
23 ott 2014	20	23		24	24		27	29	
24 ott 2014	14	18		20	19			26	
25 ott 2014	12	23		24	18			32	
26 ott 2014	10	19		21	19		31	27	
27 ott 2014	11	20		25	23		24	35	
28 ott 2014	11	20		25	27		31	40	
29 ott 2014		23		32	31		38		
30 ott 2014	8	21		26	26		31		
31 ott 2014	9	19		25	22		23		
efficienza mensile %	74	94	0	100	84	0	90	74	0
media mensile	17	33	0	42	34	0	47	47	0
n° sup. del limite 24 h nel mese	0	4	0	9	3	0	10	8	0
n° sup. del limite 24 h nell'anno	6	17	31	41	29	0	28	50	0
n° sup. limite 24 h nell'anno al netto di eventi eccezionali	0	10	24	35	20	0	21	39	0
media progressiva dall'inizio dell'anno	15	29	37	35	32	0	34	42	25

Parametro	Periodo di mediazione	Valore limite	Condizioni aggiuntive	Data di entrata in vigore del limite
Limite per la protezione della salute umana	media massima giornaliera su 8 ore	10 mg/m <sup>3</sup>	-	01/01/2005

Parametro	Periodo di mediazione	Valore limite	Condizioni aggiuntive	Data di entrata in vigore del limite
Limite giornaliero per la protezione della salute umana	24 ore	50 µg/m <sup>3</sup>	da non superare più di 35 volte per anno civile	01/01/2005
Limite annuale per la protezione della salute umana	Anno civile	40 µg/m <sup>3</sup>	-	01/01/2005


 qualità dell'aria scadente

Figura 4.5b – Dati qualità dell'aria della città di Palermo relativi agli inquinanti CO e PM<sub>10</sub> (Bollettino mese ottobre 2014, elaborazione su Fonte: R.A.P s.p.a)

**Ozono (O<sub>3</sub>)**  
Medie 1 h max e media 8 h max (µg/m<sup>3</sup>)

Data	Boccadifalco		Castelnuovo	
	media 1 h max	media 8 h max	media 1 h max	media 8 h max
01 ott 2014	83	80	55	45
02 ott 2014	87	75	41	31
03 ott 2014			32	25
04 ott 2014			31	19
05 ott 2014			34	27
06 ott 2014			44	36
07 ott 2014	92	83	51	44
08 ott 2014	92	81	44	37
09 ott 2014			36	25
10 ott 2014	93	70	35	22
11 ott 2014	113	94	39	28
12 ott 2014			53	39
13 ott 2014			22	8
14 ott 2014	69	66	12	7
15 ott 2014	77	74	29	22
16 ott 2014	81	74	42	35
17 ott 2014	77	56	28	19
18 ott 2014	86	73	40	30
19 ott 2014	75	68	33	17
20 ott 2014	71	66	26	16
21 ott 2014	83	77	43	35
22 ott 2014	83	80	61	51
23 ott 2014	86	83	59	58
24 ott 2014	73	76	49	48
25 ott 2014	85	83	53	43
26 ott 2014	83	79	49	43
27 ott 2014	88	80	49	35
28 ott 2014	87	78	53	40
29 ott 2014		80	55	39
30 ott 2014			55	48
31 ott 2014	89	82	52	39
efficienza mensile %	83		100	
valore max mensile	113	94	61	58
n° sup. del limite orario nel mese	0	-	0	-
n° sup. del limite orario nell'anno	0	-	0	-
n° sup. del limite su 8 h nel mese	-	0	-	0
n° sup. del limite su 8 h nell'anno	-	1	-	0
media progressiva dall'inizio dell'anno	73	-	32	-

Parametro	Periodo di mediazione	Valore limite	Condizioni aggiuntive	Data di entrata in vigore del limite
Valore bersaglio per la protezione della salute umana	media massima giornaliera su 8 ore	120 µg/m <sup>3</sup>	da non superare per più di 25 giorni per anno civile come media su 3 anni	2010
Soglia di informazione	media 1 ora	180 µg/m <sup>3</sup>	-	-
Soglia di allarme	media 1 ora	240 µg/m <sup>3</sup>	-	-
Limite per la protezione dei beni materiali	1 anno	40 µg/m <sup>3</sup>	-	-

**Benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)**  
Media 24 h (µg/m<sup>3</sup>)

Data	Boccadifalco	Castelnuovo	Di Blasi
01 ott 2014	1	2	3
02 ott 2014	1	3	3
03 ott 2014		2	2
04 ott 2014		2	3
05 ott 2014		1	2
06 ott 2014		3	2
07 ott 2014		2	3
08 ott 2014			3
09 ott 2014			4
10 ott 2014	1		4
11 ott 2014	1		3
12 ott 2014			2
13 ott 2014			4
14 ott 2014	1		3
15 ott 2014	1		2
16 ott 2014	1		3
17 ott 2014	2		4
18 ott 2014	1		3
19 ott 2014	1		2
20 ott 2014	1		3
21 ott 2014	1		3
22 ott 2014	0		2
23 ott 2014	0		1
24 ott 2014	1		2
25 ott 2014	1		2
26 ott 2014	1		2
27 ott 2014	1		3
28 ott 2014	1		4
29 ott 2014			4
30 ott 2014			4
31 ott 2014	1		4
efficienza mensile %	65	23	100
media mensile	1	2	3
media mobile annua	1	2	3

Parametro	Periodo di mediazione	Valore limite	Condizioni aggiuntive	Data di entrata in vigore del limite
Limite annuale per la protezione della salute umana	Anno civile	5 µg/m <sup>3</sup>	-	01/01/2010

Figura 4.5c – Dati qualità dell’aria della città di Palermo relativi agli inquinanti O<sub>3</sub> e C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (Bollettino mese ottobre 2014, elaborazione su Fonte: R.A.P s.p.a)

Dall’analisi effettuata sulla base degli oltre 10 anni di rilevamenti continui della rete fissa di monitoraggio del Comune di Palermo, si può concludere che:

- l’ossido di carbonio da alcuni anni non costituisce più un inquinante critico per la città di Palermo. Negli ultimi anni non sono mai stati registrati superamenti del valore limite e i valori massimi di concentrazione rilevati raggiungono la metà circa del valore limite solo in poche occasioni all’anno e sotto particolari condizioni meteo (inversione termica);

- il biossido di zolfo, per quasi tutta la città di Palermo non ha mai rappresentato un problema. Solo negli ultimi anni e solo per le aree prospicienti la zona portuale sono stati superati, sotto particolari condizioni atmosferiche, i valori limite orario e giornaliero;
- il biossido di azoto risulta tra gli inquinanti più critici per il territorio, con valori superiori al limite della media annuale nella zona centrale dell'agglomerato urbano e qualche superamento del valore limite orario abbondantemente entro il limite massimo previsto;
- il  $PM_{10}$  risulta essere un inquinante particolarmente critico per la città di Palermo sia per il numero di superamenti del valore limite giornaliero di protezione della salute umana che per il valore limite annuale. Il problema riguarda l'intera area urbana ed è maggiormente accentuato in prossimità delle aree interessate da intenso traffico veicolare o frequenti ingorghi o rallentamenti;
- il benzene, fino al 2010, non ha costituito un inquinante critico in quanto i valori rilevati rientravano entro il limite maggiorato del margine di tolleranza. Con l'azzeramento del margine di tolleranza, in buona parte della città non è stato più rispettato tale limite e il benzene si è aggiunto agli altri inquinanti critici esistenti.

Quindi si ritiene opportuno, anzi indispensabile, per incidere in modo apprezzabile sulle concentrazioni degli inquinanti, attuare degli interventi mirati alla riduzione complessiva delle emissioni sull'intero territorio comunale e alla proporzionale diminuzione del volume di traffico giornaliero.

#### **4.1.3 Interventi proposti per limitare le emissioni da traffico**

Riportiamo, di seguito, alcuni dei più rilevanti interventi proposti, ma ancora in fase di attuazione, dal Piano Generale del Traffico Urbano (PGTU) di Palermo, approvato nel novembre 2012 per limitare le emissioni da traffico.

##### **1) Aree pedonali e piste ciclabili**

Il P.G.T.U. prevede una nuova localizzazione di aree pedonali in ciascuno dei 4 Mandamenti del Centro Storico. Saranno quindi estese le aree già preesistenti e ne saranno create nuove, operando scelte atte a valorizzare i contesti urbani e monumentali di maggior pregio ed interesse. Per

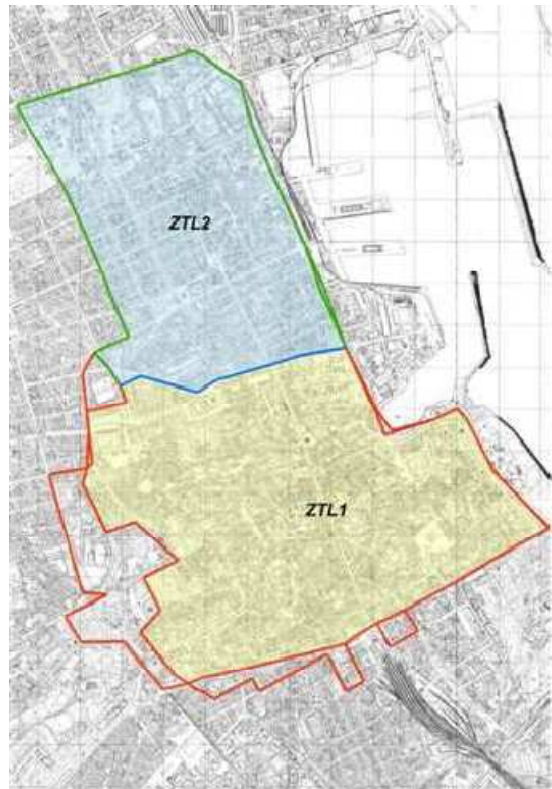


quanto riguarda le piste ciclabili, vengono confermate integralmente gli orientamenti e le

scelte dello strumento urbanistico vigente in relazione alla mobilità ciclabile, ribadendo la volontà di dotarsi di una rete di piste ciclabili.

## 2) **Zone a Traffico Limitato (ZTL)**

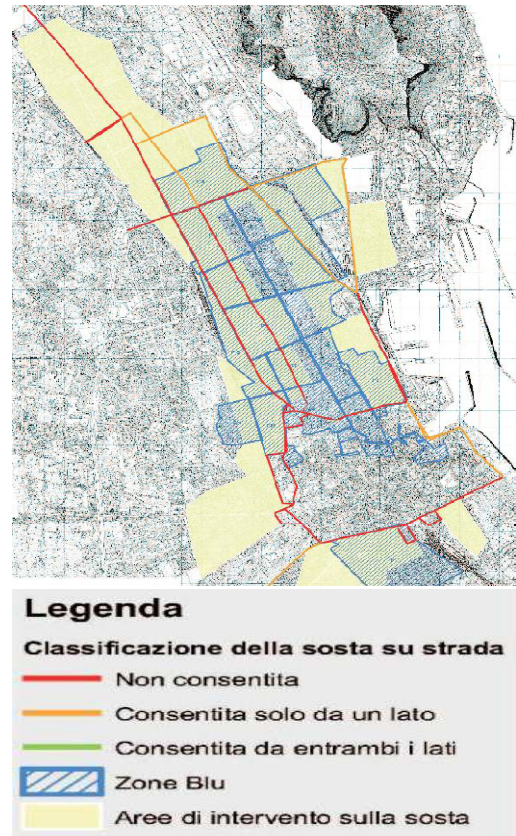
Il PGTU prevede una ZTL nella zona centrale della città, il cui sviluppo potrà avvenire in due fasi: la prima prevede l'attuazione delle limitazioni solo nel Centro Storico (ztl 1), la seconda estende il provvedimento fino all'asse Notarbartolo-Duca della Verdura (ztl 2). Le limitazioni riguarderanno i veicoli meno eco-compatibili ed è prevista l'introduzione della tariffazione, al fine di attivare un efficiente sistema di controllo telematico della ZTL. Non è ancora stato stabilito quanto costeranno i pass, ma di certo si sa che l'ingresso sarà consentito solo ai



veicoli a due ruote a partire da Euro 2 e alle auto Euro 3 o superiori, mentre sarà categoricamente negato ai veicoli appartenenti alle classi Euro 0, Euro 1 ed Euro 2 (oltre il 35% dell'intero parco auto cittadino). La chiusura di una vasta zona al traffico veicolare, però, se non attentamente studiata e progettata, rischia di peggiorare l'efficienza del sistema in quanto riduce le risorse di spazio disponibile sia per la circolazione sia per la sosta, genera una nuova mappa degli spostamenti, con probabili effetti collaterali indesiderati, con il rischio di spostare la congestione e l'inquinamento dalla zona chiusa al traffico alle aree ad essa confinanti, spesso già sature e richiede per il controllo degli accessi l'impegno notevole delle forze di vigilanza urbana, sottraendo energie alle mansioni di controllo della sosta. Occorre anche, finché non sarà potenziata la dotazione di sistemi di trasporto rapido di massa, pensare a soluzioni fondate su servizi sostitutivi che possano assicurare un livello accettabile di accessibilità all'area regolata e di distribuzione dell'utenza al suo interno. Tra queste soluzioni presentano funzioni importanti le linee-navetta esercitate con minibus (anche per la possibilità di utilizzare efficientemente mezzi a ridotta emissione), in grado di servire i parcheggi di scambio per distribuirne l'utenza nelle aree a traffico limitato, ed i taxibus, in grado di svolgere in modo ottimale le funzioni distributive ad un buon livello di comfort e di capillarità.

### 3) Interventi sulla sosta

Il PGTU intende riorganizzare la sosta in funzione degli obiettivi generali di gestione del traffico e della domanda, allontanando la sosta dalle strade di scorrimento e di interquartiere, essendo queste vocate ad assolvere la funzione di assi portanti degli spostamenti veicolari. Lungo determinati tratti delle strade interquartiere potranno attuarsi provvedimenti sperimentali che consentano la sosta. Provvedimenti di allontanamento della sosta potranno attuarsi lungo l'itinerario perimetrale alla ZTL centrale, con: l'emanazione di divieti di sosta; la massimizzazione della dotazione di sosta nelle strade limitrofe (esterne alla ZTL), da attrezzare a strade-parcheeggio. In generale, allontanando dalle strade della maglia primaria la sosta, questa dovrà essere massimizzata e razionalizzata dove il traffico è più lento, interessando adiacenti contesti urbani a carattere residenziale (viabilità locale/isole ambientali).



### 4) Interventi sul trasporto pubblico

Le principali proposte sono state :

- piano delle corsie riservate ai mezzi pubblici;
- sistema telematico di controllo dei transiti nelle corsie riservate;
- sistema di telecontrollo della flotta;
- istituzione di “Linee Express” per il collegamento tra parcheggi periferici di interscambio ed il centro città. In pratica parliamo di particolari linee che, confermando il tragitto, non facciano tutte le fermate, ma solamente quelle principali, ad esempio in corrispondenza di incroci con altre linee o di siti caratterizzati da un’alta frequentazione di utenti. Il tutto accompagnato dall’istituzione di nuove corsie preferenziali, protette;
- valorizzazione dei parcheggi d’interscambio e conseguente diminuzione dell’attraversamento del centro urbano da parte delle linee di trasporto extraurbano su gomma. A tal proposito, tutti pullman provenienti dai comuni limitrofi si

attesteranno presso i parcheggi di interscambio, previo interventi infrastrutturali per migliorarne gli ingressi.

Viene pertanto attuato il principio dell'intermodalità, attraverso la combinazione di diversi mezzi di trasporto, e favorendo una mobilità più sostenibile;

- nuova integrazione tariffaria con biglietto unico Ferrovie-Amat.

#### **4.1.4 Mobilità insostenibile e progetti di cambiamento**

Dopo aver ricostruito un quadro dettagliato della situazione infrastrutturale attuale e potenziale dell'area metropolitana di Palermo, dei flussi che la attraversano, delle problematiche ambientali e dei relativi interventi, proposti dal PGTU, al fine di migliorare i livelli di qualità dell'aria, con il seguente paragrafo vogliamo fornire alcune informazioni circa gli orientamenti culturali che influenzano le pratiche e le routine di mobilità nel territorio cittadino e nel suo hinterland. La situazione della mobilità a Palermo è complessa e difficile. Sebbene le dinamiche di urban sprawl che hanno interessato la città negli ultimi anni abbiano portato parte della popolazione cittadina a spostarsi verso i comuni limitrofi, gli effetti di diminuzione della popolazione sono solo apparenti. Palermo rimane il polo di attrazione degli spostamenti per motivi di lavoro.

Oltre all'aumento degli abitanti dei comuni della cintura metropolitana, il numero piuttosto elevato di spostamenti in auto è riconducibile anche alle disfunzioni del sistema dei mezzi pubblici per cui solo una parte ridotta dei pendolari si sposta in treno o in autobus. Questo insieme di fattori ha determinato un notevole aumento dei flussi quotidiani di traffico su gomma in entrata e in uscita dalla città, con conseguenze negative sulla generale situazione della mobilità urbana.

Come già visto nel precedente paragrafo, a fronte di un panorama così complesso sono stati predisposti diversi interventi (alcuni portati a termine, altri ancora in corso di realizzazione) per migliorare la situazione della mobilità e in generale la qualità della vita dei cittadini. Tra questi innanzitutto gli interventi infrastrutturali che prevedono il raddoppio del passante ferroviario Palermo - Punta Raisi, il completamento dell'anello metro-ferroviario e la costruzione della tramvia per collegare il centro con le periferie. Inoltre, in città sono stati già attivati sistemi di car sharing e taxi sharing e grazie ad un finanziamento del Ministero dell'Ambiente è prevista l'installazione di un sistema di bike sharing oltre che l'ampliamento del parco macchine e dei parcheggi riservati del car sharing. Infine, sono in corso di realizzazione tre progetti volti ad incentivare la mobilità Smart.

Nell'identificare i principali problemi legati alla mobilità, la responsabilità per la generale situazione di disagio è di frequente attribuita dall'una all'altra parte in causa. In generale, l'amministrazione viene percepita come inadempiente rispetto agli interventi giudicati necessari da cittadini ed esperti. Le ragioni del traffico in città vengono nella maggior parte dei casi attribuite all'incapacità del Comune di garantire l'applicazione di sanzioni a chi non rispetta le regole. Comuni sono i discorsi di questo tipo: “le macchine in doppia fila bloccano il traffico in strada con conseguenze negative anche sulla circolazione degli autobus”, oppure “le piste ciclabili occupate da auto parcheggiate in modo errato scoraggiano i cittadini ad usare mezzi di trasporto più sostenibili come le bici”.

Dal punto di vista degli amministratori sono invece i cittadini a ostacolare la possibilità di realizzare degli interventi capaci di migliorare la situazione della mobilità in città. Il caso più eclatante a questo proposito riguarda le difficoltà riscontrate nel disincentivare o almeno regolamentare l'uso dell'auto privata. L'istituzione e attuazione di zone a traffico limitato, di parcheggi a pagamento, di limitazioni della velocità sono state infatti fortemente contestate nel corso degli ultimi anni, perché ritenute dai cittadini limitanti rispetto alla propria libertà di movimento. Allo stato attuale, amministrazione da una parte e cittadini dall'altra sembrano ancora divisi da interessi contrastanti e di difficile composizione.

Le abitudini di spostamento sono ancora fortemente incentrate sull'uso dell'automobile, secondo una tradizione di significati socialmente condivisi che affonda le proprie radici negli anni dello boom economico e che risulta essere piuttosto trasversale rispetto alle classi d'età e alle classi sociali. Le dinamiche di cambiamento in quest'ambito risultano piuttosto problematiche e consentono un'apertura a pratiche di mobilità alternativa molto graduale seppure comunque presente. Emerge la centralità dell'automobile come mezzo irrinunciabile nella vita quotidiana; a questo si aggiunge l'identificazione del mezzo privato con la possibilità dell'autonomia, della libertà di movimento e della certezza (o almeno la presunzione di tale certezza) di potere raggiungere la propria destinazione in tempi brevi, senza rischiare ritardi o imprevisti dovuti al malfunzionamento dei mezzi pubblici.

Nonostante tra le fasce giovanili si registri una maggiore attitudine al cambiamento delle proprie abitudini di mobilità, la diffidenza sembra rimanere un atteggiamento prevalente non solo verso il servizio pubblico ma in generale anche verso gli altri cittadini.

Un altro problema sottolineato di frequente e riguardante il tema della mobilità in città è rappresentato dall'assenza d'intermodalità. Il sistema di trasporto attuale sembra infatti caratterizzato da un panorama variegato di mezzi che però non sono tra loro in connessione. Per raggiungere punti diversi della città, in particolare dal centro alla periferia e viceversa,



L'utilizzo di più di un mezzo è spesso una condizione necessaria che però non trova riscontro in adeguate politiche di promozione dell'intermodalità. Laddove invece esistono condizioni minime per permettere un certo grado d'intermodalità, queste sono spesso ignorate. Un caso significativo a questo proposito è quello dei parcheggi d'interscambio. Negli ultimi anni ne sono stati costruiti almeno tre in corrispondenza di punti ritenuti strategici per l'accesso alla città, ma con scarsi risultati in termini d'impatto e utilizzo. Nella maggior parte dei casi sono rimasti vuoti o addirittura utilizzati con funzione diversa da quella prevista, ad esempio come campi da gioco dai ragazzi dei quartieri circostanti. Le ragioni di ciò sono da ritrovarsi ancora una volta nella scarsa fiducia nutrita nei confronti della sicurezza e affidabilità dei mezzi pubblici. Una volta arrivato alle porte della città "l'automobilista non trova valide ragioni per abbandonare l'auto e proseguire con un autobus la cui regolarità e tempi di percorrenza sono incerti". La promozione dell'intermodalità rimane comunque una condizione fondamentale affinché il sistema della mobilità cittadina possa migliorare nel tempo. La capacità delle infrastrutture in via di realizzazione d'incidere positivamente in questa direzione è ritenuta strettamente legata alla possibilità di un loro uso congiunto. Mezzi trasporto più efficienti insieme alla possibilità di un loro uso integrato potrebbero contribuire a disincentivare in modo significativo l'abitudine a spostarsi in auto.

#### **4.1.5 Mobilità a Palermo: la dimensione umana dell'essere smart**

L'incedere troppo lento dei processi di infrastrutturazione dei sistemi di trasporto, le tare urbanistiche derivanti da una crescita disordinata e mal pianificata, le resistenze culturali all'abbandono del mezzo privato come strategia prevalente di mobilità, nonché i problemi organizzativi e difetti di comunicazione nel lancio di nuovi servizi, sono indicati come alcuni degli elementi che ostacolano il cambiamento di Palermo e dei comportamenti dei suoi city users rispetto alla questione della mobilità.

Da questo punto di vista la città appare ai più non solo "non-ancora-smart" ma anche troppo caotica, inefficiente e disorganizzata per allinearsi agli ambiziosi obiettivi individuati da interventi quali l'Iniziativa europea "Smart Cities & Communities".

Le azioni dispiegate in altre città europee per la gestione integrata dei settori dell'energia, del trasporto e dell'ICT e per erogare servizi più efficienti ai cittadini sembrano totalmente fuori dalla portata di Palermo che, come altre città mediterranee, mostra ancora grandi difficoltà nel gestire servizi altrove considerati di base e per nulla problematici (quali ad esempio la gestione dei rifiuti e delle acque reflue).

La complessità della situazione palermitana, tipica di molte città mediterranee, permette tuttavia di cogliere alcuni spunti di riflessione utili nella prospettiva di arricchire e integrare un concetto di smart city che, se declinato in chiave esclusivamente tecnologica, rischia di sollevare più questioni problematiche di quanto non contribuisca a risolverne.

Tale termine è stato introdotto come un qualificatore di vivibilità per ambienti urbani in cui infrastrutture di comunicazione integranti le più avanzate tecnologie cablate e senza filo si combinano ad apparati terminali, servizi e applicazioni di avanguardia, allo scopo di semplificare la vita dei cittadini e delle imprese, nelle abitazioni, negli uffici e nei luoghi pubblici. Sebbene l'accelerazione impressa ai processi di innovazione urbana basati sull'uso massiccio di tecnologie ICT prefigurati e promossi dalle politiche europee degli ultimi anni (smart grids, reti di sensori, ecc.) possa svolgere un ruolo rilevante nel miglioramento della fruibilità e vivibilità delle città del futuro, essa rischia tuttavia di produrre anche scenari di accentramento e ipercontrollo tecnologico, unidirezionalità top-down delle dinamiche di pianificazione urbana, fragilità e sovraesposizione ad attacchi hardware e software. E appare sempre più evidente come tale approccio tecnico (quello delle città smart nel senso di iper-infrastrutturate dal punto di vista tecnologico) comporti il rischio di considerare sostanzialmente irrilevante la dimensione umana e della cittadinanza.

Gli apprendimenti derivanti dalla ricerca sul campo spingono a enfatizzare la lettura antropologica (e sociale e politica) dei processi di innovazione tecnica e sociale e a sottolineare che probabilmente non vi sono vie semplici e lineari alla smart city, specie nel Mezzogiorno d'Italia. Cruciale da questo punto di vista il coinvolgimento dei cittadini e di altre tipologie di portatori di interesse (ad es. le piccole e medie imprese) nei processi di sviluppo urbano e innovazione sociale.

Tuttavia l'indagine mostra che se si concepiscono le città come laboratori urbani, come ecosistemi generatori di innovazioni sociali, come living lab in cui sperimentare e co-disegnare soluzioni tecniche non solo efficienti ma socialmente sostenibili e inclusive, è anche possibile affrontare, senza eluderla, la complessità di dimensioni valoriali radicate, di vincoli organizzativi, di esigenze e interessi in reciproco contrasto. Questa prospettiva sottolinea l'importanza della dimensione psicosociale e culturale nei processi di trasformazione (urbana) e il ruolo non neutrale della tecnologia.

In conclusione, l'analisi in corso sulle resistenze ai cambiamenti in tema di mobilità, delle dimensioni valoriali soggiacenti alle scelte degli utenti, degli stili di vita e di lavoro preesistenti, così come l'ascolto e la mappatura delle pratiche innovative (ad es. micro-sistemi di carpooling autorganizzati e social network applicati alla mobilità) emergenti dal territorio,

evidenziano la scarsa praticabilità (e probabilmente desiderabilità) di modelli di sostenibilità ed efficienza centrati unicamente su progetti infrastrutturali realizzabili su larga scala, smart grids e reti di sensori e permettono di immaginare un'idea di smart city nella quale i nuovi modelli di sostenibilità e i servizi a essi correlati siano oggetto di un processo (tecnico e culturale) di co-design che coinvolga anche i cittadini e gli utenti dei servizi per la individuazione di soluzioni praticabili anche su piccola scala, decentrate, basate su architetture aperte.

## **4.2 Il modello Copert IV e la stima delle emissioni inquinanti nella città di Palermo**

La parte sperimentale oggetto del presente lavoro di ricerca è stata l'applicazione del modello Copert IV per il calcolo dell'entità delle emissioni inquinanti prodotti nella città di Palermo nell'anno 2014 e per la verifica dell'influenza del cambiamento del parco circolante sull'entità delle emissioni stesse. La stima verrà condotta con riferimento a due scenari: scenario attuale (parco veicolare attualmente circolante) e scenario futuro (rinnovo parco circolante). Dal confronto dei valori di emissione ottenuti dai due scenari verrà illustrata, inizialmente, l'influenza del cambiamento del parco circolante sulle emissioni inquinanti, e in seguito, verrà analizzata e confrontata l'entità delle variazioni delle emissioni prodotte dal rinnovo del parco veicolare (scenario futuro) con quelle prodotte dal parco veicolare attualmente circolante (scenario attuale). Per la stima delle emissioni degli autoveicoli nello scenario futuro è stato necessario considerare adeguate ipotesi di rinnovo del parco circolante. È questo un approfondimento indispensabile, in quanto il rinnovo del parco circolante porta alla circolazione di veicoli ad emissioni sempre più ridotte. Lo sviluppo della tecnologia motoristica e l'adozione di carburanti riformulati consente, infatti, ai nuovi veicoli immessi sul mercato di rispettare limiti di legge alle emissioni sempre più restrittivi. Si è previsto quindi che i veicoli più anziani (conventional, Euro I, Euro II e Euro IV) siano progressivamente sostituiti da veicoli rispondenti ai requisiti dei veicoli Euro V e VI per quanto riguarda autovetture, veicoli commerciali leggeri e pesanti, Euro III per quanto riguarda ciclomotori e motocicli.

### **4.2.1 Applicazione del modello Copert IV al caso studio**

Il modello di emissione utilizzato permette di calcolare i fattori di emissione che esprimono la quantità di inquinante emesso in funzione della velocità media di un ciclo di guida e sono ricavati da misure sperimentali su veicoli rappresentativi delle diverse tecnologie



91/441 che ne ha imposto l'immissione sul mercato), da quelli di seconda generazione (EURO II) entrati sul mercato nel 1997, da quelli di terza (EURO 3), entrati sul mercato nel 2001, fino a quelli di sesta generazione (EURO 4,5,6), attualmente in vendita. In questo modo si tiene conto dell'evoluzione delle tecnologie motoristiche verso sistemi di controllo delle emissioni sempre più efficienti.

Le altre informazioni necessarie per la stima delle emissioni sono quindi:

- flussi di traffico circolanti sulla rete stradale, suddivisi in settori di tipologie veicolari;
- composizione del parco circolante;
- velocità media.

#### 4.2.2 Analisi dei dati del parco circolante

Nella valutazione delle emissioni da traffico veicolare è risultato di fondamentale importanza considerare, oltre al numero di veicoli circolanti nella rete stradale, la tipologia dei veicoli stessi, ossia la distribuzione percentuale dei veicoli nei diversi settori (autoveicoli, veicoli leggeri e veicoli pesanti), e nelle categorie previste dalla metodologia COPERT per la stima delle emissioni da traffico. Lo schema metodologico generale per l'identificazione delle tipologie veicolari transitanti sull'arco stradale è riportato in Figura 4.6.

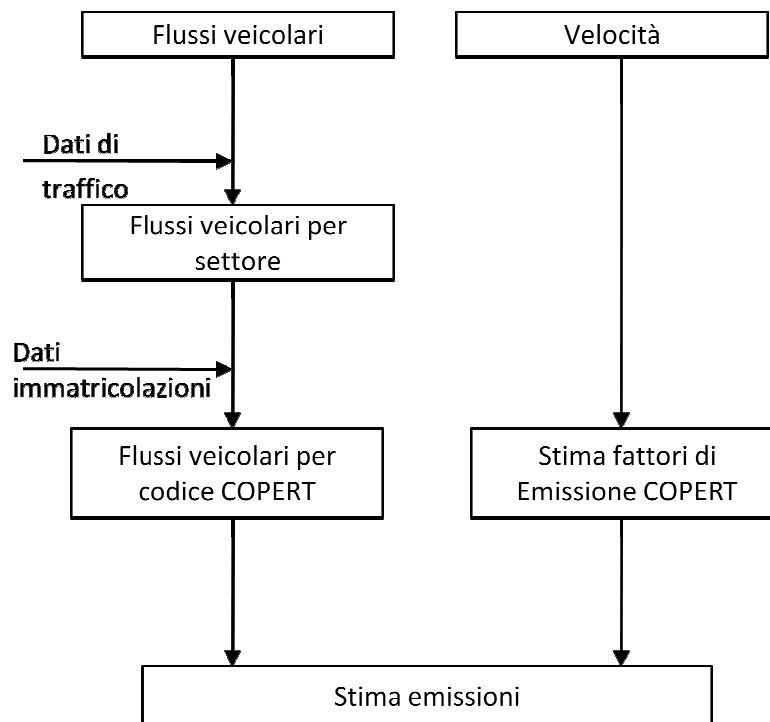


Figura 4.6 – Schema metodologico (Fonte: Copert IV user manual)

Dopo aver individuato i flussi veicolari per ogni tipologia o settore, si è effettuata una valutazione del parco circolante immatricolato a Palermo, al fine di valutare la presenza dei veicoli in classi di maggior dettaglio.

Nel metodo COPERT per la stima delle emissioni in atmosfera i veicoli sono infatti classificati in base a caratteristiche che risultano fondamentali nella determinazione dei fattori di emissione. I veicoli sono suddivisi in 266 categorie dipendenti dalla tipologia (cilindrata o peso), dall'anno di immatricolazione e dal tipo di carburante utilizzato dai veicoli (benzina verde e gasolio). In primo luogo si distinguono delle macroclassi in base alla tipologia e all'uso del mezzo; successivamente queste vengono ripartite in base al combustibile utilizzato, al peso (per i veicoli commerciali) o alla cilindrata (per le autovetture) ed infine in base all'entrata in vigore della normativa europea di regolamentazione delle emissioni per i veicoli immessi sul mercato a partire da una certa data.

Ai fini della presente valutazione per il parco circolante a Palermo sono stati considerati gli ultimi dati disponibili sulla tipologia di parco circolante, ossia i dati disponibili sul sito dell'Automobile Club Italiano, relativi al numero di veicoli immatricolati a Palermo, relativamente nell'anno 2014 suddivisi per categoria Copert.

Tali dati sono classificati per:

- settore (autoveicoli, veicoli commerciali leggeri, veicoli commerciali pesanti e motocicli);
- alimentazione (diesel, benzina e GPL);
- per cilindrata: autovetture a benzina suddivise in tre classi (inferiore a 1400cc, compresa tra 1400 e 2000cc e superiore a 2000cc), autovetture diesel e GPL suddivise in due classi (minori e maggiori di 2000cc), ciclomotori con cilindrata inferiore a 50cc e motocicli suddivisi in tre classi (tra 50 e 50cc, tra 250 e 750cc e superiori a 750cc);
- per portata: mezzi commerciali suddivisi in leggeri e pesanti. Sono definiti leggeri quelli con peso a pieno carico inferiore a 3,5t, corrispondenti in media a quelli con portata massima di 1,5t, e pesanti quelli nelle classi di peso a pieno carico maggiori di 3,5t (tra 3,5 e 7,5t, tra 7,5 e 16, tra 16 e 32t e superiori a 32t) a cui si aggiungono autobus e pullman di linea.

Tutte queste categorie, sono state ulteriormente suddivise per classi di immatricolazione e categorie legislative EURO (Tabelle 4.4 a, b e c).

Tabella 4.4a – Composizione parco veicolare circolante a Palermo suddiviso in base alle categorie Copert (Scenario attuale, elaborazione su Fonte: Copert IV)

SECTOR	SUBSECTOR	TECHNOLOGY
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	Conventional
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	PC Euro 1 - 91/441/EEC
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	PC Euro 3 - 98/69/EC Stage2000
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	Conventional
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 1 - 91/441/EEC
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 3 - 98/69/EC Stage2000
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	Conventional
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PC Euro 1 - 91/441/EEC
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PC Euro 3 - 98/69/EC Stage2000
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel <1,4 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Diesel <1,4 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel <1,4 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	Conventional
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	PC Euro 1 - 91/441/EEC
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	PC Euro 3 - 98/69/EC Stage2000
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	Conventional
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	PC Euro 1 - 91/441/EEC
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	PC Euro 3 - 98/69/EC Stage2000
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	LPG	Conventional
Passenger Cars	LPG	PC Euro 1 - 91/441/EEC
Passenger Cars	LPG	PC Euro 2 - 94/12/EEC
Passenger Cars	LPG	PC Euro 3 - 98/69/EC Stage2000
Passenger Cars	LPG	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	LPG	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	LPG	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	CNG	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	CNG	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	CNG	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Hybrid Gasoline <1,4 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Hybrid Gasoline >2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	Conventional
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	LD Euro 1 - 93/59/EEC

Tabella 4.4b – Composizione parco veicolare circolante a Palermo suddiviso in base alle categorie Copert (Scenario attuale, elaborazione su Fonte: Copert IV)

SECTOR	SUBSECTOR	TECHNOLOGY
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	LD Euro 2 - 96/69/EEC
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	LD Euro 3 - 98/69/EC Stage2000
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	LD Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	LD Euro 5 - 2008 Standards
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	LD Euro 6
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	Conventional
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	LD Euro 1 - 93/59/EEC
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	LD Euro 2 - 96/69/EEC
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	LD Euro 3 - 98/69/EC Stage2000
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	LD Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	LD Euro 5 - 2008 Standards
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	LD Euro 6
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	Conventional
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	HD Euro III - 2000 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	Conventional
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	HD Euro III - 2000 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	Conventional
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	HD Euro III - 2000 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	Conventional
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	HD Euro III - 2000 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	Conventional
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	HD Euro III - 2000 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	Conventional
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	HD Euro III - 2000 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	HD Euro V - 2008 Standards



Tabella 4.4c – Composizione parco veicolare circolante a Palermo suddiviso in base alle categorie Copert (Scenario attuale, elaborazione su Fonte: Copert IV)

SECTOR	SUBSECTOR	TECHNOLOGY
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 28 - 32 t	Conventional
Heavy Duty Trucks	Rigid 28 - 32 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Heavy Duty Trucks	Rigid 28 - 32 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Heavy Duty Trucks	Rigid 28 - 32 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 28 - 32 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid >32 t	Conventional
Heavy Duty Trucks	Rigid >32 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Heavy Duty Trucks	Rigid >32 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Heavy Duty Trucks	Rigid >32 t	HD Euro III - 2000 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid >32 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid >32 t	HD Euro V - 2008 Standards
Buses	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Conventional
Buses	Urban Buses Standard 15 - 18 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Buses	Urban Buses Standard 15 - 18 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Buses	Urban Buses Standard 15 - 18 t	HD Euro III - 2000 Standards
Buses	Urban Buses Standard 15 - 18 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Buses	Urban Buses Standard 15 - 18 t	HD Euro V - 2008 Standards
Buses	Coaches Standard <=18 t	Conventional
Buses	Coaches Standard <=18 t	HD Euro I - 91/542/EEC Stage I
Buses	Coaches Standard <=18 t	HD Euro II - 91/542/EEC Stage II
Buses	Coaches Standard <=18 t	HD Euro III - 2000 Standards
Buses	Coaches Standard <=18 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Buses	Coaches Standard <=18 t	HD Euro V - 2008 Standards
Motorcycles	2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	Conventional
Motorcycles	2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro I
Motorcycles	2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro II
Motorcycles	2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro III
Motorcycles	4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	Conventional
Motorcycles	4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro I
Motorcycles	4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro II
Motorcycles	4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro III
Motorcycles	4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	Conventional
Motorcycles	4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro I
Motorcycles	4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro II
Motorcycles	4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro III
Motorcycles	4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	Conventional
Motorcycles	4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro I
Motorcycles	4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro II
Motorcycles	4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro III

Per quanto riguarda le percorrenze medie annue inserite nel modello e distinte per ciascuna tipologia di veicoli, rappresentano il risultato di una analisi incrociata sviluppata in base a diverse fonti, tra le quali si citano: il Conto Nazionale dei Trasporti (Ministero dei Trasporti), le pubblicazioni dell'ACI, dell'Unione Petrolifera e della CONFETRA (Confederazione generale italiana del Traffico e dei Trasporti). Tali fonti forniscono, sia pure in modo non esaustivo e continuativo, dati di percorrenze medie per classi di veicoli, aggregati variamente. Per le velocità medie non sono state individuate specifiche fonti informative

nazionali; tuttavia, analizzando diversi casi di studio e articoli di stampa specializzata, sono state confermate le velocità medie suggerite dal modello. Per le temperature medie mensili minime e massime in °C sono state utilizzate quelle registrate dalla stazione meteorologica di Palermo Punta Raisi, stazione di riferimento per il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare e per l'Organizzazione Mondiale della Meteorologia, relativa all'area costiera a ovest della città di Palermo. Un parametro importante per il calcolo delle emissioni per evaporazione di carburante, è costituito dalla sua pressione di vapore (RVP - Reid Vapour Pressure) a 37,8 °C ossia a 100 °F. Tale parametro è un indice della tendenza al passaggio del carburante dallo stato liquido allo stato gassoso ed i suoi valori sono forniti direttamente dal COPERT e variano a seconda della nazione per la quale si decide di applicare il modello. Infine per i valori dei consumi annui di benzina, diesel e GPL si fa riferimento al Bilancio Energetico Nazionale, redatto dal Ministero dell'Industria.

#### **4.2.3 Ipotesi di evoluzione del parco circolante (Scenario futuro)**

La stima del rinnovo del parco circolante è molto complessa in quanto negli ultimi anni il rinnovo del parco veicoli ha subito una fortissima accelerazione, dovuta alla presenza di incentivi all'acquisto di rilevante entità. Inoltre, rispetto alla distribuzione dei veicoli immatricolati, è necessario considerare l'effetto delle diverse percorrenze dei veicoli che sono diverse per le tipologie veicolari e per l'età dei veicoli (i veicoli nuovi tendono ad essere più utilizzati) e che sono in grado di influire sull'effettiva composizione dei veicoli circolanti sulle strade. Sulla base di studi disponibili in letteratura si può infatti ritenere che gli autoveicoli di generazione più recente raggiungono percorrenze maggiori rispetto agli autoveicoli più vecchi di uguale cilindrata. Si dovrebbe rappresentare, nel caso dello scenario futuro, il diverso grado di utilizzo dei veicoli attribuendo ai veicoli più anziani una riduzione percentuale della loro numerosità, che rappresenta la minore probabilità che il veicolo circoli sull'area di studio considerata, rispetto ai veicoli di più nuova generazione. Risulta necessario, quindi, valutare in modo realistico la probabilità della presenza delle diverse tipologie veicolari sull'area di studio, il numero di veicoli immatricolato per ogni categoria COPERT pesato in relazione alle percorrenze tipiche delle diverse categorie veicolari. Quindi vista l'aleatorietà del fenomeno, la valutazione del rinnovo tecnologico e di conseguenza il parco circolante nello scenario futuro si è basata semplicemente sull'ipotesi della continuazione del trend di rinnovo del parco fino alla completa sostituzione dei veicoli Euro I, II, III, IV con quelli di ultima generazione euro V e VI (Tabella 4.5).

Tabella 4.5 – Composizione parco veicolare circolante a Palermo suddiviso in base alle categorie EuroV e IV (Scenario futuro, elaborazione su Fonte: Copert IV)

SECTOR	SUBSECTOR	TECHNOLOGY
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline 0,8 - 1,4 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel <1,4 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel <1,4 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel 1,4 - 2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	Diesel >2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	LPG	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	LPG	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	CNG	PC Euro 5 - EC 715/2007
Passenger Cars	CNG	PC Euro 6 - EC 715/2007
Passenger Cars	Hybrid Gasoline <1,4 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Passenger Cars	Hybrid Gasoline >2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	LD Euro 5 - 2008 Standards
Light Commercial Vehicles	Gasoline <3,5t	LD Euro 6
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	LD Euro 5 - 2008 Standards
Light Commercial Vehicles	Diesel <3,5 t	LD Euro 6
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid <=7,5 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 7,5 - 12 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 12 - 14 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 14 - 20 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 20 - 26 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 26 - 28 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid 28 - 32 t	HD Euro V - 2008 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid 28 - 32 t	HD Euro VI
Heavy Duty Trucks	Rigid >32 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Heavy Duty Trucks	Rigid >32 t	HD Euro V - 2008 Standards
Buses	Coaches Standard <=18 t	HD Euro IV - 2005 Standards
Buses	Coaches Standard <=18 t	HD Euro V - 2008 Standards
Motorcycles	2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro III
Motorcycles	4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro III
Motorcycles	4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro III
Motorcycles	4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	Mot - Euro III

#### 4.2.4 Stima emissioni: confronto scenario attuale e futuro

Applicando la metodologia illustrata nei sottoparagrafi precedenti, utilizzando quindi per ogni scenario i rispettivi dati di tipologie veicolari circolanti e i corrispondenti fattori di emissione, sono state ottenute le quote di emissioni annuali di ogni categoria di veicoli immatricolati nel territorio palermitano per gli inquinanti CO, N<sub>2</sub>O, COV, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NMCOV, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, benzene e metalli pesanti.

Le emissioni sono state stimate per i due scenari precedentemente presentati: scenario attuale e scenario futuro. Nelle figure che seguiranno saranno mostrate, per i due scenari considerati, le emissioni del parco veicolare circolante di alcuni degli inquinanti regolamentati dalla normativa europea (CO, NO<sub>x</sub>, PM, NMCOV e COV).

### **SIMULAZIONE SCENARIO ATTUALE**

Si riportano di seguito le tabelle e i relativi grafici delle stime delle emissioni inquinanti per ogni sottocategoria di veicoli distinguendo il contributo delle emissioni in funzione della tipologia di percorso (urbano, extraurbano/rurale e autostradale).

Verranno riportati, inoltre, i grafici relativi alle stime delle emissioni da traffico distinguendo il contributo delle emissioni a caldo, a freddo ed evaporative. In questi ultimi grafici, oltre alle emissioni suddette, vengono rappresentati anche i contributi emissivi dovuti al fattore A/C (% di veicoli dotati di impianto di climatizzazione), al fattore Lube-Oil (Olio lubrificante per motori) ed al fattore SRC (riduzione selettiva catalitica).

La riduzione selettiva catalitica (SRC) è un processo chimico per l'abbattimento degli NO<sub>x</sub> dei gas di scarico. I dispositivi SCR sono comunemente applicati ai motori a diesel ai fini del contenimento delle emissioni allo scarico degli NO<sub>x</sub>, in ottemperanza delle prescrizioni delle direttive anti-inquinamento. In questo contesto di ricerca tali contributi non sono stati approfonditi e quindi, anche se riportati nelle tabelle, il loro contributo risulta nullo.

1) Emissioni di CO

11/01/2015  
21.47.20

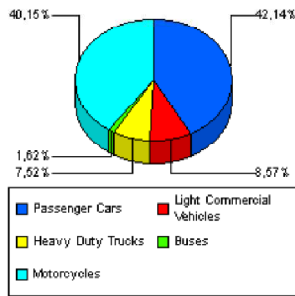
Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

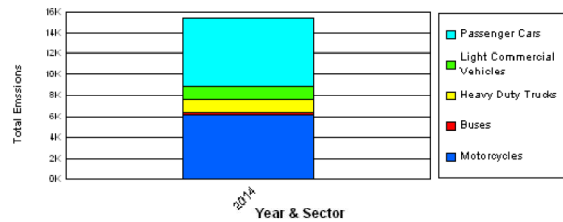
**CO**

POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
CO	2014		9.884,39	3.164,78	2.372,64	15.421,81
		<b>Passenger Cars</b>	<b>4.403,27</b>	<b>1.287,99</b>	<b>807,06</b>	<b>6.498,32</b>
		Gasoline 0.8 - 1.4 l	2.974,59	857,79	453,88	4.286,26
		Gasoline 1.4 - 2.0 l	358,36	106,22	67,90	532,49
		Gasoline >2.0 l	23,72	7,54	3,62	34,87
		Diesel <1.4 l	59,89	19,55	3,62	83,06
		Diesel 1.4 - 2.0 l	145,98	52,66	8,18	206,83
		Diesel >2.0 l	44,31	17,38	3,13	64,81
		LPG	761,18	215,28	258,49	1.234,95
		CNG	35,20	11,56	8,23	54,99
		Hybrid Gasoline <1.4 l	0,00	0,00	0,00	0,01
		Hybrid Gasoline 1.4 - 2.0 l	0,04	0,02	0,00	0,06
		Hybrid Gasoline >2.0 l	0,00	0,00	0,00	0,00
		<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>824,11</b>	<b>203,05</b>	<b>294,60</b>	<b>1.321,76</b>
		Gasoline <3,5t	540,16	43,74	50,06	633,96
		Diesel <3,5 t	283,95	159,31	244,54	687,80
		<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>528,70</b>	<b>353,05</b>	<b>278,50</b>	<b>1.160,24</b>
		Rigid <=7,5 t	139,45	94,46	73,81	307,72
		Rigid 7.5 - 12 t	100,50	66,34	51,67	218,51
		Rigid 12 - 14 t	23,73	15,87	12,33	51,92
		Rigid 14 - 20 t	82,80	54,30	42,05	179,15
		Rigid 20 - 26 t	116,04	77,71	62,76	256,51
		Rigid 26 - 28 t	0,19	0,12	0,10	0,41
		Rigid 28 - 32 t	62,54	41,92	33,78	138,24
		Rigid >32 t	3,45	2,33	2,00	7,78
		<b>Buses</b>	<b>196,92</b>	<b>29,41</b>	<b>24,03</b>	<b>250,37</b>
		Urban Buses Standard 15 - 18 t	191,11	0,00	0,00	191,11
		Coaches Standard <=18 t	5,82	29,41	24,03	59,26
		<b>Motorcycles</b>	<b>3.931,38</b>	<b>1.291,28</b>	<b>968,46</b>	<b>6.191,13</b>
		2-stroke >50 cm³	810,18	268,79	201,59	1.280,57
		4-stroke <250 cm³	1.726,90	599,78	449,83	2.776,51
		4-stroke 250 - 750 cm³	1.001,49	304,75	228,56	1.534,79
		4-stroke >750 cm³	392,81	117,96	88,47	599,25

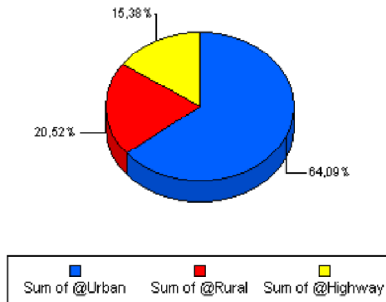
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode

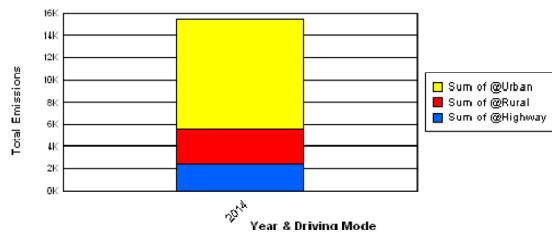


Figura 4.7 – Grafici emissioni CO distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

<b>CO</b>						
CO						
SECTOR	HOT [t]	COLD [t]	A/C [t]	LUBE-OIL [t]	SCR [t]	TOTAL [t]
	<b>12.689,13</b>	<b>2.732,68</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>15.421,81</b>
<b>Passenger Cars</b>	<b>4.095,98</b>	<b>2.402,34</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>6.498,32</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l	2.626,29	1.659,97	0,00	0,00	0,00	4.286,26
Gasoline 1,4 - 2,0 l	324,52	207,96	0,00	0,00	0,00	532,49
Gasoline >2,0 l	21,63	13,24	0,00	0,00	0,00	34,87
Diesel <1,4 l	72,70	10,35	0,00	0,00	0,00	83,06
Diesel 1,4 - 2,0 l	181,59	25,24	0,00	0,00	0,00	206,83
Diesel >2,0 l	57,15	7,66	0,00	0,00	0,00	64,81
LPG	783,65	451,30	0,00	0,00	0,00	1.234,95
CNG	28,38	26,61	0,00	0,00	0,00	54,99
Hybrid Gasoline <1,4 l	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>991,42</b>	<b>330,34</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1.321,76</b>
Gasoline <3,5 t	362,71	271,25	0,00	0,00	0,00	633,96
Diesel <3,5 t	628,71	59,09	0,00	0,00	0,00	687,80
<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>1.160,24</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1.160,24</b>
Rigid <=7,5 t	307,72	0,00	0,00	0,00	0,00	307,72
Rigid 7,5 - 12 t	218,51	0,00	0,00	0,00	0,00	218,51
Rigid 12 - 14 t	51,92	0,00	0,00	0,00	0,00	51,92
Rigid 14 - 20 t	179,15	0,00	0,00	0,00	0,00	179,15
Rigid 20 - 26 t	256,51	0,00	0,00	0,00	0,00	256,51
Rigid 26 - 28 t	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41
Rigid 28 - 32 t	138,24	0,00	0,00	0,00	0,00	138,24
Rigid >32 t	7,78	0,00	0,00	0,00	0,00	7,78
<b>Buses</b>	<b>250,37</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>250,37</b>
Urban Buses Standard 15 - 18	191,11	0,00	0,00	0,00	0,00	191,11
Coaches Standard <=18 t	59,26	0,00	0,00	0,00	0,00	59,26
<b>Motorcycles</b>	<b>6.191,13</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>6.191,13</b>
2-stroke >50 cm³	1.280,57	0,00	0,00	0,00	0,00	1.280,57
4-stroke <=250 cm³	2.776,51	0,00	0,00	0,00	0,00	2.776,51
4-stroke 250 - 750 cm³	1.534,79	0,00	0,00	0,00	0,00	1.534,79
4-stroke >750 cm³	599,26	0,00	0,00	0,00	0,00	599,26

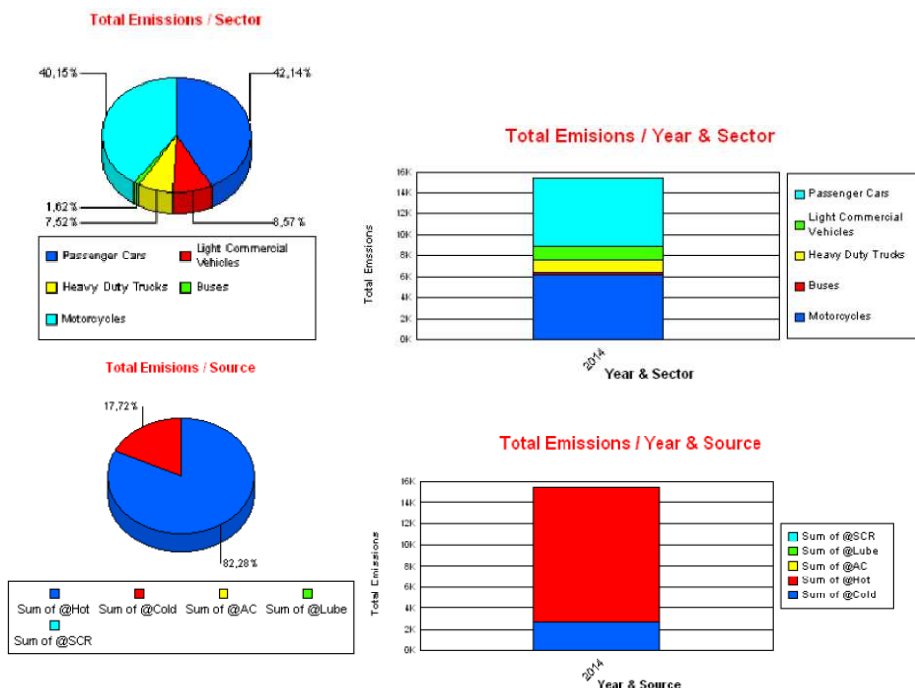


Figura 4.8 – Grafici emissioni CO distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

2) Emissioni di NO<sub>x</sub>

11/01/2015  
21.47.20

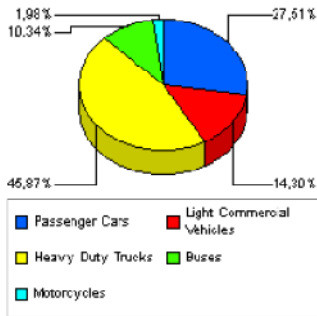
Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

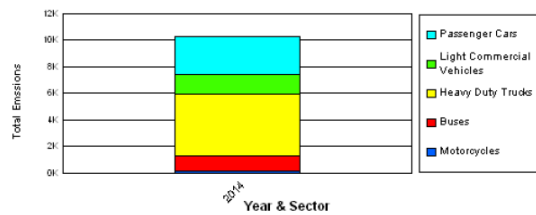
**NOX**

POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
<b>NOX</b>	<b>2014</b>		<b>4.860,26</b>	<b>3.112,48</b>	<b>2.291,61</b>	<b>10.264,35</b>
		<b>Passenger Cars</b>	<b>1.407,26</b>	<b>1.013,91</b>	<b>402,24</b>	<b>2.823,41</b>
		Gasoline 0,8 - 1,4 l	275,28	223,43	87,52	586,23
		Gasoline 1,4 - 2,0 l	46,45	36,31	14,72	97,48
		Gasoline >2,0 l	3,03	1,38	0,69	5,10
		Diesel <1,4 l	287,21	182,08	77,95	547,24
		Diesel 1,4 - 2,0 l	522,32	364,15	144,45	1.030,92
		Diesel >2,0 l	113,89	80,50	31,76	226,15
		LPG	153,85	124,50	44,88	323,24
		CNG	5,22	1,55	0,27	7,04
		Hybrid Gasoline <1,4 l	0,00	0,00	0,00	0,00
		Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,00	0,01	0,00	0,02
		Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00
		<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>635,26</b>	<b>393,66</b>	<b>439,09</b>	<b>1.468,02</b>
		Gasoline <3,5 t	26,89	12,21	5,33	44,42
		Diesel <3,5 t	608,37	381,46	433,76	1.423,59
		<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>1.912,34</b>	<b>1.517,32</b>	<b>1.279,10</b>	<b>4.708,77</b>
		Rigid <=7,5 t	366,38	336,96	327,32	1.030,67
		Rigid 7,5 - 12 t	358,86	303,36	268,80	931,01
		Rigid 12 - 14 t	84,05	67,22	57,19	208,45
		Rigid 14 - 20 t	312,31	234,38	186,70	733,38
		Rigid 20 - 26 t	513,01	375,75	291,37	1.180,14
		Rigid 26 - 28 t	0,84	0,63	0,49	1,96
		Rigid 28 - 32 t	260,51	186,94	138,04	585,49
		Rigid >32 t	16,39	12,09	9,20	37,67
		<b>Buses</b>	<b>779,56</b>	<b>143,55</b>	<b>138,16</b>	<b>1.061,27</b>
		Urban Buses Standard 15 - 18 t	755,82	0,00	0,00	755,82
		Coaches Standard <=18 t	23,74	143,55	138,16	305,44
		<b>Motorcycles</b>	<b>125,83</b>	<b>44,04</b>	<b>33,03</b>	<b>202,90</b>
		2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	3,48	1,13	0,84	5,45
		4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	90,14	31,09	23,32	144,54
		4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	25,34	9,22	6,92	41,48
		4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	6,88	2,60	1,95	11,43

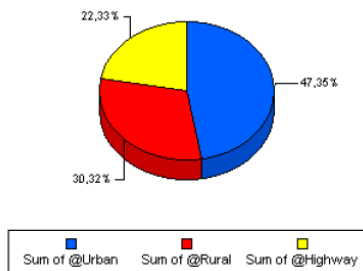
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode



Figura 4.9 – Grafici emissioni NO<sub>x</sub> distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

Applicazione Copert IV: caso studio Palermo

11/01/2015  
21.48.32

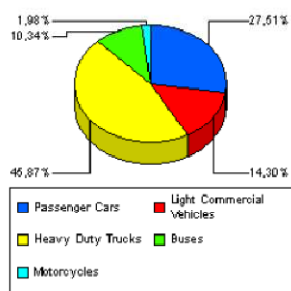
Emission Results - Source oriented

COPERT 4 version 10.0

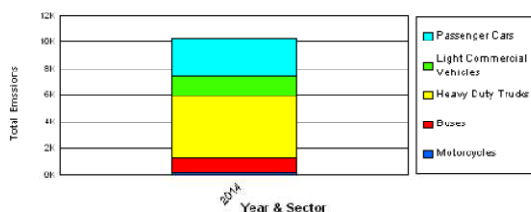
**NOX**

						2014
SECTOR	HOT [t]	COLD [t]	A/C [t]	LUBE-OIL [t]	SCR [t]	TOTAL [t]
	10.069,50	194,85	0,00	0,00	0,00	10.264,35
<b>Passenger Cars</b>	<b>2.669,48</b>	<b>153,92</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2.823,41</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l	514,19	72,04	0,00	0,00	0,00	586,23
Gasoline 1,4 - 2,0 l	84,48	13,00	0,00	0,00	0,00	97,48
Gasoline >2,0 l	3,88	1,22	0,00	0,00	0,00	5,10
Diesel <1,4 l	536,26	10,98	0,00	0,00	0,00	547,24
Diesel 1,4 - 2,0 l	1.010,95	19,97	0,00	0,00	0,00	1.030,92
Diesel >2,0 l	221,79	4,35	0,00	0,00	0,00	226,15
LPG	293,24	29,99	0,00	0,00	0,00	323,24
CNG	4,68	2,36	0,00	0,00	0,00	7,04
Hybrid Gasoline <1,4 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>1.427,09</b>	<b>40,93</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1.468,02</b>
Gasoline <3,5t	32,45	11,98	0,00	0,00	0,00	44,42
Diesel <3,5 t	1.394,64	28,95	0,00	0,00	0,00	1.423,59
<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>4.708,77</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>4.708,77</b>
Rigid <=7,5 t	1.030,67	0,00	0,00	0,00	0,00	1.030,67
Rigid 7,5 - 12 t	931,01	0,00	0,00	0,00	0,00	931,01
Rigid 12 - 14 t	208,45	0,00	0,00	0,00	0,00	208,45
Rigid 14 - 20 t	733,38	0,00	0,00	0,00	0,00	733,38
Rigid 20 - 26 t	1.180,14	0,00	0,00	0,00	0,00	1.180,14
Rigid 26 - 28 t	1,96	0,00	0,00	0,00	0,00	1,96
Rigid 28 - 32 t	585,49	0,00	0,00	0,00	0,00	585,49
Rigid >32 t	37,67	0,00	0,00	0,00	0,00	37,67
<b>Buses</b>	<b>1.061,27</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1.061,27</b>
Urban Buses Standard 15 - 18	755,82	0,00	0,00	0,00	0,00	755,82
Coaches Standard <=18 t	305,44	0,00	0,00	0,00	0,00	305,44
<b>Motorcycles</b>	<b>202,90</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>202,90</b>
2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00	5,45
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	144,54	0,00	0,00	0,00	0,00	144,54
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	41,48	0,00	0,00	0,00	0,00	41,48
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	11,43	0,00	0,00	0,00	0,00	11,43

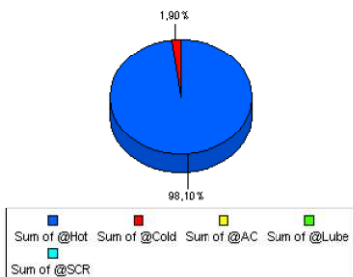
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Source



Total Emissions / Year & Source

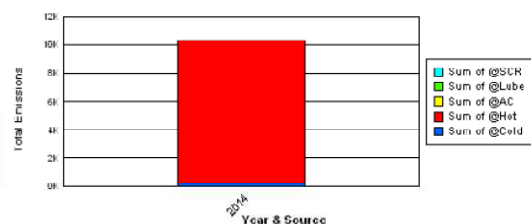


Figura 4.10 – Grafici emissioni NO<sub>x</sub> distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)



### 3) Emissioni di PM

11/01/2015  
21.17.20

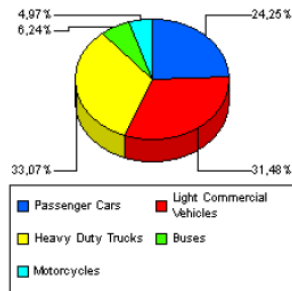
Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

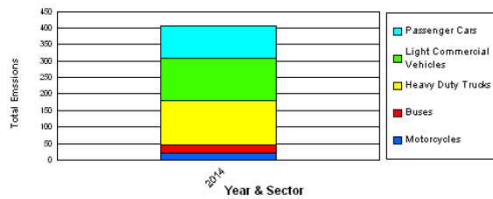
**PM  
(exhaust)**

POLLUTANTI	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	KURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
<b>PM (exhaust)</b>	<b>2014</b>		<b>192,54</b>	<b>114,11</b>	<b>100,17</b>	<b>406,82</b>
<b>Passenger Cars</b>			<b>53,08</b>	<b>32,45</b>	<b>13,10</b>	<b>98,63</b>
Gasoline 0.8 - 1.4 l			1,70	1,00	0,39	3,09
Gasoline 1.4 - 2.0 l			0,29	0,17	0,06	0,52
Gasoline >2,0 l			0,03	0,01	0,01	0,05
Diesel <1,4 l			13,80	8,72	2,98	25,49
Diesel 1,4 - 2,0 l			27,67	17,09	7,31	52,07
Diesel >2,0 l			8,69	4,93	2,13	15,75
LPG			0,84	0,50	0,21	1,54
CNG			0,06	0,04	0,02	0,12
Hybrid Gasoline <1,4 l			0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l			0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline >2,0 l			0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>			<b>46,33</b>	<b>32,99</b>	<b>48,75</b>	<b>128,06</b>
Gasoline <3,5t			0,16	0,09	0,03	0,28
Diesel <3,5 t			46,17	32,90	48,72	127,78
<b>Heavy Duty Trucks</b>			<b>61,43</b>	<b>40,84</b>	<b>32,25</b>	<b>134,52</b>
Rigid <=7,5 t			18,04	12,47	9,77	40,29
Rigid 7,5 - 12 t			11,76	7,70	5,97	25,43
Rigid 12 - 14 t			2,75	1,80	1,44	5,99
Rigid 14 - 20 t			8,69	5,58	4,36	18,62
Rigid 20 - 26 t			14,85	9,67	7,70	32,22
Rigid 26 - 28 t			0,03	0,02	0,02	0,07
Rigid 28 - 32 t			4,85	3,29	2,73	10,87
Rigid >32 t			0,46	0,31	0,26	1,02
<b>Buses</b>			<b>18,55</b>	<b>3,78</b>	<b>3,04</b>	<b>25,37</b>
Urban Buses Standard 15 - 18 t			17,86	0,00	0,00	17,86
Coaches Standard <=18 t			0,70	3,78	3,04	7,51
<b>Motorcycles</b>			<b>13,15</b>	<b>4,05</b>	<b>3,04</b>	<b>20,24</b>
2-stroke >50 cm³			7,16	2,20	1,65	11,02
4-stroke <250 cm³			3,20	0,99	0,74	4,93
4-stroke 250 - 750 cm³			2,01	0,62	0,46	3,09
4-stroke >750 cm³			0,78	0,24	0,18	1,20

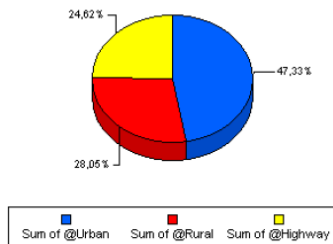
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode

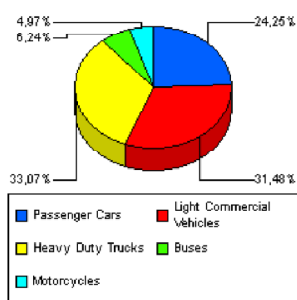


Figura 4.11 – Grafici emissioni PM (exhaust) distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

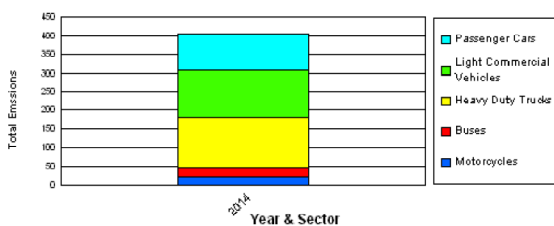
**PM  
(exhaust)**

						2014
SECTOR	HOT [t]	COLD [t]	A/C [t]	LUBE-OIL [t]	SCR [t]	TOTAL [t]
	<b>390,03</b>	<b>16,79</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>406,82</b>
<b>Passenger Cars</b>	<b>90,68</b>	<b>7,95</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>98,63</b>
Gasoline 0.8 - 1,4 l	3,09	0,00	0,00	0,00	0,00	3,09
Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52
Gasoline >2,0 l	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
Diesel <1,4 l	23,31	2,19	0,00	0,00	0,00	25,49
Diesel 1,4 - 2,0 l	47,68	4,39	0,00	0,00	0,00	52,07
Diesel >2,0 l	14,37	1,38	0,00	0,00	0,00	15,75
LPG	1,54	0,00	0,00	0,00	0,00	1,54
CNG	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
Hybrid Gasoline <1,4 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>119,22</b>	<b>8,84</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>128,06</b>
Gasoline <3,5t	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28
Diesel <3,5 t	118,94	8,84	0,00	0,00	0,00	127,78
<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>134,52</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>134,52</b>
Rigid <=7,5 t	40,29	0,00	0,00	0,00	0,00	40,29
Rigid 7,5 - 12 t	25,43	0,00	0,00	0,00	0,00	25,43
Rigid 12 - 14 t	5,99	0,00	0,00	0,00	0,00	5,99
Rigid 14 - 20 t	18,62	0,00	0,00	0,00	0,00	18,62
Rigid 20 - 26 t	32,22	0,00	0,00	0,00	0,00	32,22
Rigid 26 - 28 t	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
Rigid 28 - 32 t	10,87	0,00	0,00	0,00	0,00	10,87
Rigid >32 t	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02
<b>Buses</b>	<b>25,37</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>25,37</b>
Urban Buses Standard 15 - 18	17,86	0,00	0,00	0,00	0,00	17,86
Coaches Standard <=18 t	7,51	0,00	0,00	0,00	0,00	7,51
<b>Motorcycles</b>	<b>20,24</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>20,24</b>
2-stroke >50 cm³	11,02	0,00	0,00	0,00	0,00	11,02
4-stroke <250 cm³	4,93	0,00	0,00	0,00	0,00	4,93
4-stroke 250 - 750 cm³	3,09	0,00	0,00	0,00	0,00	3,09
4-stroke >750 cm³	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20

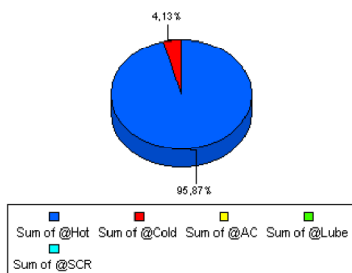
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Source



Total Emissions / Year & Source

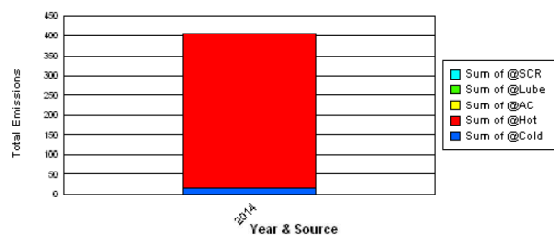


Figura 4.12 – Grafici emissioni PM (exhaust) distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

### 4) Emissioni di COV

11/01/2015  
21.47.20

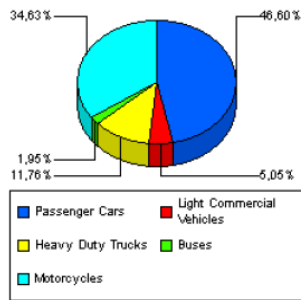
Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

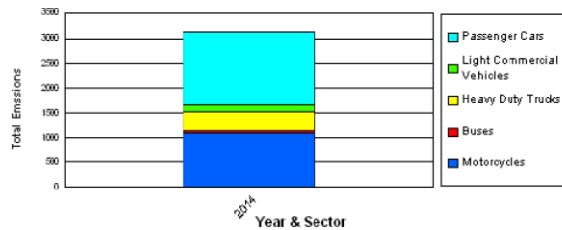
**VOC**

POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
VOC	2014		2.226,74	552,75	355,61	3.135,10
<b>Passenger Cars</b>			<b>1.141,36</b>	<b>211,36</b>	<b>108,33</b>	<b>1.461,05</b>
		Gasoline 0,8 - 1,4 l	803,75	136,67	82,70	1.023,11
		Gasoline 1,4 - 2,0 l	112,27	16,06	10,82	139,15
		Gasoline >2,0 l	5,54	0,84	0,41	6,79
		Diesel <1,4 l	8,34	2,92	0,76	12,02
		Diesel 1,4 - 2,0 l	22,66	8,89	2,03	33,58
		Diesel >2,0 l	11,86	4,57	0,92	17,34
		LPG	170,22	38,95	9,61	218,78
		CNG	6,61	2,44	1,08	10,13
		Hybrid Gasoline <1,4 l	0,01	0,00	0,00	0,01
		Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,10	0,01	0,01	0,12
		Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>Light Commercial Vehicles</b>			<b>94,87</b>	<b>35,59</b>	<b>27,93</b>	<b>158,38</b>
		Gasoline <3,5 t	37,56	4,40	1,59	43,55
		Diesel <3,5 t	57,30	31,19	26,34	114,83
<b>Heavy Duty Trucks</b>			<b>194,60</b>	<b>107,78</b>	<b>66,34</b>	<b>368,72</b>
		Rigid <=7,5 t	76,59	41,55	24,21	142,34
		Rigid 7,5 - 12 t	36,16	19,83	12,29	68,28
		Rigid 12 - 14 t	8,59	4,85	3,11	16,55
		Rigid 14 - 20 t	27,31	15,59	10,09	52,99
		Rigid 20 - 26 t	33,34	18,66	11,91	63,90
		Rigid 26 - 28 t	0,06	0,04	0,02	0,12
		Rigid 28 - 32 t	11,57	6,72	4,37	22,66
		Rigid >32 t	0,98	0,55	0,35	1,88
<b>Buses</b>			<b>47,73</b>	<b>8,06</b>	<b>5,37</b>	<b>61,16</b>
		Urban Buses Standard 15 - 18 t	46,02	0,00	0,00	46,02
		Coaches Standard <=18 t	1,71	8,06	5,37	15,15
<b>Motorcycles</b>			<b>748,19</b>	<b>189,96</b>	<b>147,64</b>	<b>1.085,78</b>
		2-stroke >50 cm³	249,30	70,83	53,84	373,97
		4-stroke <250 cm³	223,85	55,54	43,56	322,95
		4-stroke 250 - 750 cm³	211,70	49,38	38,96	300,04
		4-stroke >750 cm³	63,34	14,21	11,28	88,83

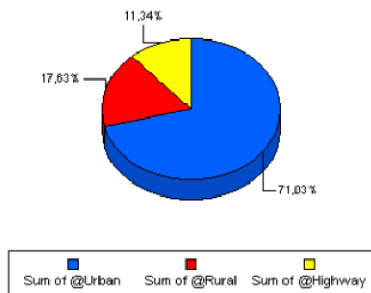
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode

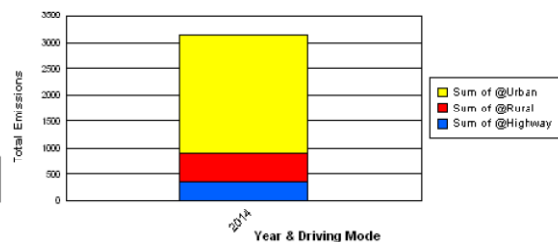


Figura 4.13 – Grafici emissioni COV distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

**VOC**

POLLUTANT YEAR	SECTOR	HOT [t]	COLD START [t]	EVAPORATION [t]	TOTAL [t]
VOC	2014	1.888,27	362,47	884,35	3.135,10
<b>Passenger Cars</b>		<b>467,42</b>	<b>325,03</b>	<b>668,60</b>	<b>1.461,05</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l		259,12	181,54	582,45	1.023,11
Gasoline 1,4 - 2,0 l		24,88	30,52	83,75	139,15
Gasoline >2,0 l		1,83	2,70	2,26	6,79
Diesel <1,4 l		10,16	1,87	0,00	12,02
Diesel 1,4 - 2,0 l		28,51	5,07	0,00	33,58
Diesel >2,0 l		14,69	2,65	0,00	17,34
LPG		122,42	96,36	0,00	218,78
CNG		5,81	4,32	0,00	10,13
Hybrid Gasoline <1,4 l		0,00	0,00	0,01	0,01
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l		0,00	0,00	0,12	0,12
Hybrid Gasoline >2,0 l		0,00	0,00	0,01	0,01
<b>Light Commercial Vehicles</b>		<b>112,15</b>	<b>37,44</b>	<b>8,80</b>	<b>158,38</b>
Gasoline <3,5t		12,56	22,20	8,80	43,55
Diesel >3,5 t		99,59	15,24	0,00	114,83
<b>Heavy Duty Trucks</b>		<b>368,72</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>368,72</b>
Rigid <=7,5 t		142,34	0,00	0,00	142,34
Rigid 7,5 - 12 t		68,28	0,00	0,00	68,28
Rigid 12 - 14 t		16,55	0,00	0,00	16,55
Rigid 14 - 20 t		52,99	0,00	0,00	52,99
Rigid 20 - 26 t		63,90	0,00	0,00	63,90
Rigid 26 - 28 t		0,12	0,00	0,00	0,12
Rigid 28 - 32 t		22,66	0,00	0,00	22,66
Rigid >32 t		1,88	0,00	0,00	1,88
<b>Buses</b>		<b>61,16</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>61,16</b>
Urban Buses Standard 15 - 18 t		46,02	0,00	0,00	46,02
Coaches Standard <=18 t		15,15	0,00	0,00	15,15
<b>Motorcycles</b>		<b>878,82</b>	<b>0,00</b>	<b>206,96</b>	<b>1.085,78</b>
2-stroke >50 cm³		345,51	0,00	28,46	373,97
4-stroke <250 cm³		246,85	0,00	76,09	322,95
4-stroke 250 - 750 cm³		222,74	0,00	77,30	300,04
4-stroke >750 cm³		63,72	0,00	25,11	88,83

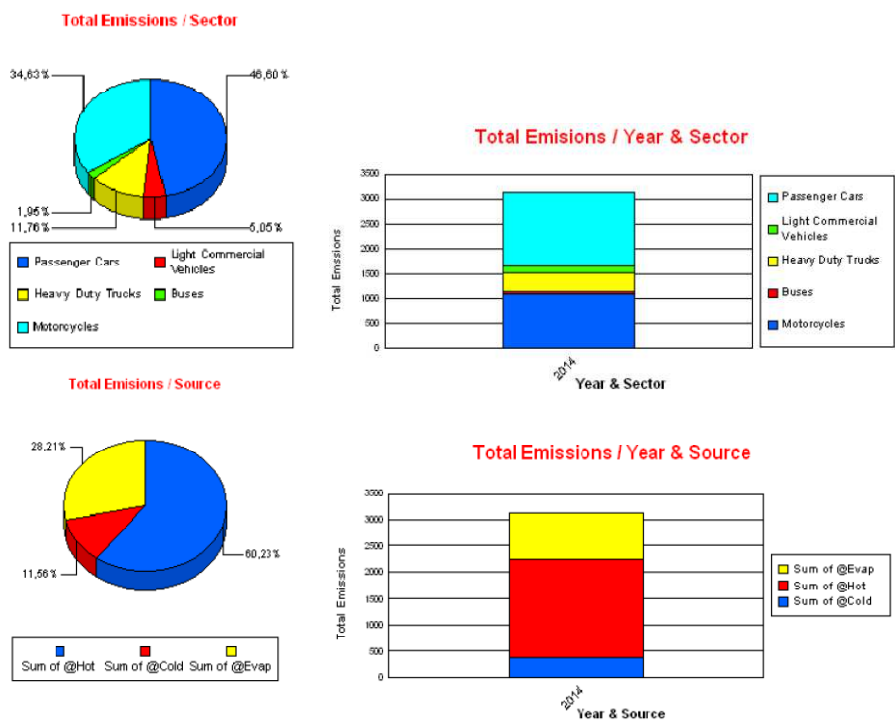


Figura 4.14 – Grafici emissioni COV distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

5) Emissioni di NMCOV

11/01/2015  
21.47.20

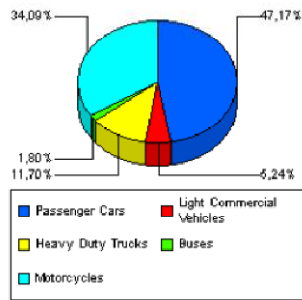
Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

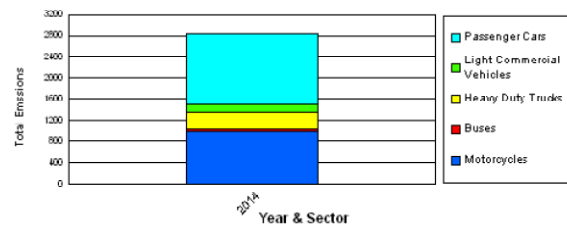
**NMCOV**

POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
NMCOV	2014		2.016,04	499,26	329,11	2.844,41
		<b>Passenger Cars</b>	<b>1.049,11</b>	<b>189,53</b>	<b>103,21</b>	<b>1.341,84</b>
		Gasoline 0,8 - 1,4 l	752,71	122,77	79,60	955,08
		Gasoline 1,4 - 2,0 l	103,88	13,46	10,27	127,61
		Gasoline >2,0 l	5,08	0,74	0,38	6,20
		Diesel <1,4 l	7,87	2,92	0,76	11,55
		Diesel 1,4 - 2,0 l	20,47	8,37	1,92	30,76
		Diesel >2,0 l	11,02	4,26	0,85	16,14
		LPG	145,25	35,83	9,01	190,09
		CNG	2,71	1,15	0,41	4,27
		Hybrid Gasoline <1,4 l	0,01	0,00	0,00	0,01
		Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,10	0,01	0,01	0,12
		Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,01
		<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>88,58</b>	<b>33,38</b>	<b>26,96</b>	<b>148,93</b>
		Gasoline <3,5 t	34,83	3,77	1,41	40,00
		Diesel <3,5 t	53,75	29,62	25,56	108,93
		<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>171,77</b>	<b>99,29</b>	<b>61,72</b>	<b>332,78</b>
		Rigid <=7,5 t	70,35	39,80	23,15	133,30
		Rigid 7,5 - 12 t	32,53	18,84	11,70	63,06
		Rigid 12 - 14 t	7,86	4,66	2,99	15,50
		Rigid 14 - 20 t	23,21	13,72	9,11	46,03
		Rigid 20 - 26 t	27,31	15,85	10,33	53,49
		Rigid 26 - 28 t	0,05	0,03	0,02	0,10
		Rigid 28 - 32 t	9,65	5,93	4,12	19,70
		Rigid >32 t	0,82	0,47	0,31	1,59
		<b>Buses</b>	<b>39,91</b>	<b>6,96</b>	<b>4,30</b>	<b>51,17</b>
		Urban Buses Standard 15 - 18 t	38,46	0,00	0,00	38,46
		Coaches Standard <=18 t	1,44	6,96	4,30	12,70
		<b>Motorcycles</b>	<b>666,67</b>	<b>170,10</b>	<b>132,92</b>	<b>969,69</b>
		2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	242,85	68,76	52,36	363,97
		4-stroke <750 cm <sup>3</sup>	184,09	46,41	37,05	267,55
		4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	182,44	42,30	33,88	258,62
		4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	57,29	12,63	9,63	79,56

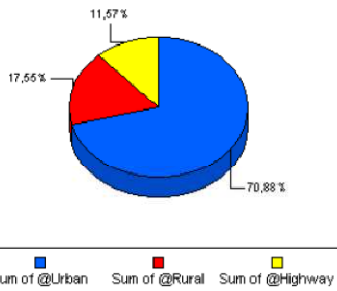
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode

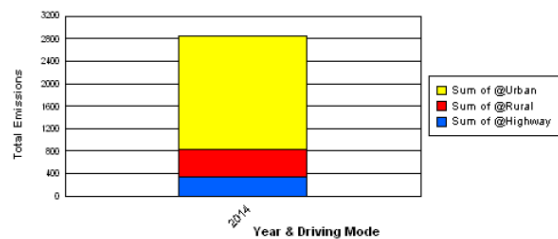


Figura 4.15 – Grafici emissioni NMCOV distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

**NMVO**

POLLUTANT YEAR	SECTOR	HOT [t]	COLD START [t]	EVAPORATION [t]	TOTAL [t]
NMVO	2014	1.677,88	282,18	884,35	2.844,41
<b>Passenger Cars</b>		<b>423,73</b>	<b>249,52</b>	<b>668,60</b>	<b>1.341,84</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l		232,83	139,80	582,45	955,08
Gasoline 1,4 - 2,0 l		19,98	23,88	83,75	127,61
Gasoline >2,0 l		1,63	2,31	2,26	6,20
Diesel <1,4 l		9,95	1,60	0,00	11,55
Diesel 1,4 - 2,0 l		26,90	3,86	0,00	30,76
Diesel >2,0 l		13,94	2,20	0,00	16,14
LPG		115,87	74,22	0,00	190,09
CNG		2,63	1,64	0,00	4,27
Hybrid Gasoline <1,4 l		0,00	0,00	0,01	0,01
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l		0,00	0,00	0,12	0,12
Hybrid Gasoline >2,0 l		0,00	0,00	0,01	0,01
<b>Light Commercial Vehicles</b>		<b>107,47</b>	<b>32,66</b>	<b>8,80</b>	<b>148,93</b>
Gasoline <3,5 t		11,31	19,90	8,80	40,00
Diesel <3,5 t		96,17	12,76	0,00	108,93
<b>Heavy Duty Trucks</b>		<b>332,78</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>332,78</b>
Rigid <=7,5 t		133,30	0,00	0,00	133,30
Rigid 7,5 - 12 t		63,06	0,00	0,00	63,06
Rigid 12 - 14 t		15,50	0,00	0,00	15,50
Rigid 14 - 20 t		46,03	0,00	0,00	46,03
Rigid 20 - 26 t		53,49	0,00	0,00	53,49
Rigid 26 - 28 t		0,10	0,00	0,00	0,10
Rigid 28 - 32 t		19,70	0,00	0,00	19,70
Rigid >32 t		1,59	0,00	0,00	1,59
<b>Buses</b>		<b>51,17</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>51,17</b>
Urban Buses Standard 15 - 18 t		38,46	0,00	0,00	38,46
Coaches Standard <=18 t		12,70	0,00	0,00	12,70
<b>Motorcycles</b>		<b>762,73</b>	<b>0,00</b>	<b>206,96</b>	<b>969,69</b>
2-stroke >50 cm <sup>3</sup>		335,51	0,00	28,46	363,97
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>		191,45	0,00	76,09	267,55
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>		181,32	0,00	77,30	258,62
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>		54,45	0,00	25,11	79,56

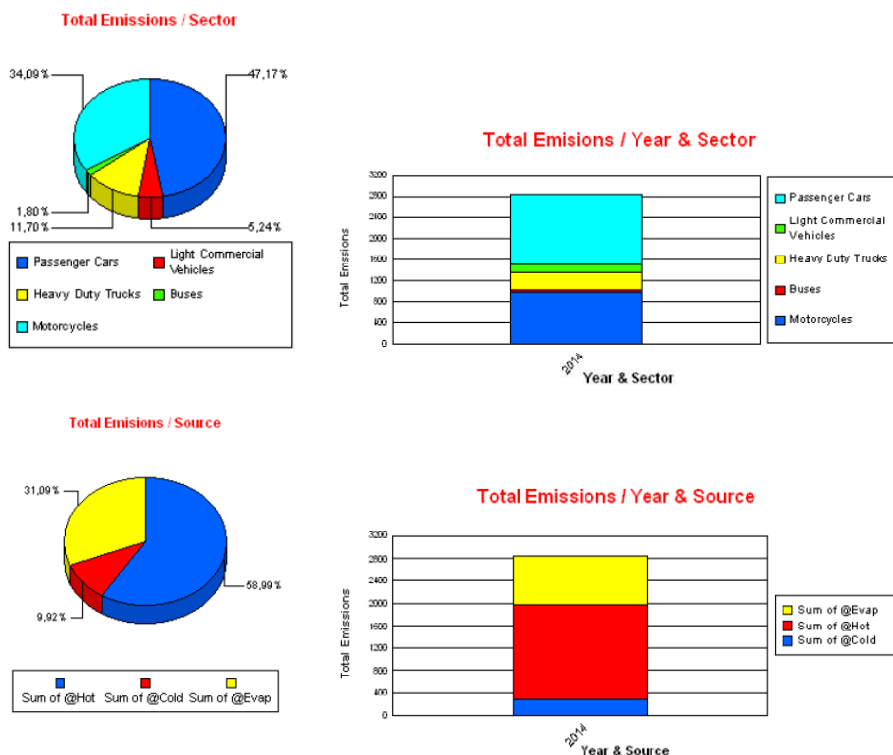


Figura 4.16 – Grafici emissioni NMCOV distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

**Dall'analisi dei risultati della Simulazione Scenario Attuale possiamo affermare che:**

1. I veicoli a gasolio, confrontati con quelli a benzina, emettono una minore quantità di COV (composti organici volatili), CO (Ossido di carbonio) e SO<sub>2</sub>. Sempre rispetto a equivalenti vetture a benzina, inoltre, i motori diesel emettono maggiori quantità di NO<sub>x</sub> (Ossidi di azoto) e PM.
2. Le autovetture (soprattutto quelle alimentate a benzina) ed i motocicli, contribuiscono in larga misura alle emissioni di monossido di carbonio, scarso è invece il contributo dei veicoli commerciali (leggeri e pesanti) e autobus, alle emissioni di CO (Figura 4.17).

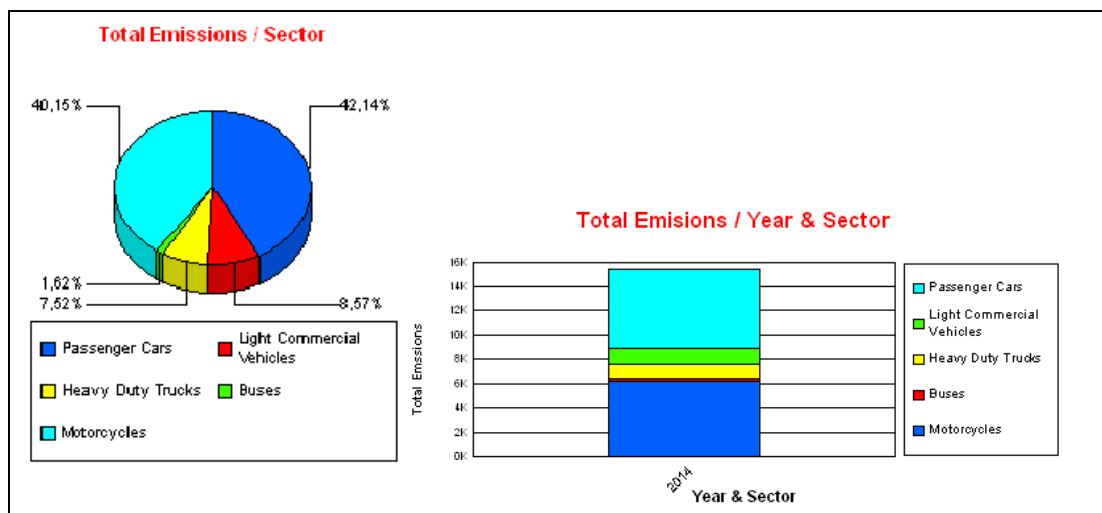


Figura 4.17 – Emissioni di CO totali suddivise per le diverse categorie veicolari

3. Il maggiore contributo per gli NO<sub>x</sub> è rappresentato dalle emissioni autoveicolari e di mezzi pesanti. Infatti, esiste una forte influenza dei motori diesel sulle emissioni di NO<sub>x</sub>; una buona fetta è attribuibile ai veicoli commerciali pesanti (solo motori diesel). Le auto alimentate con GPL presentano un impatto limitato riguardo alle emissioni di ossidi di azoto le cui percentuali eguagliano pressoché quelle degli autobus. Scarsissima infine l'immissione in atmosfera di ossidi di azoto da parte dei motocicli (Figura 4.18).

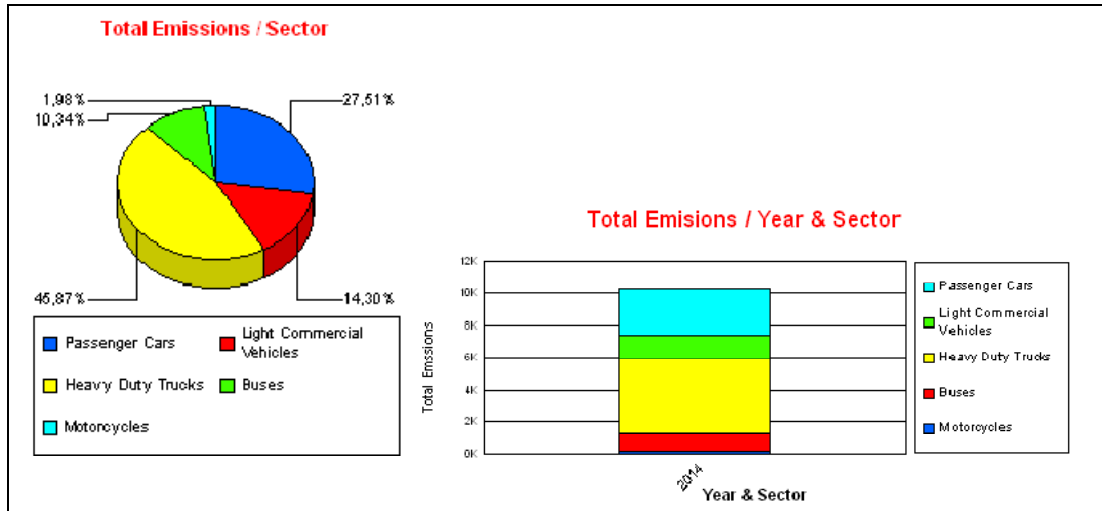


Figura 4.18 – Emissioni di NO<sub>x</sub> totali suddivise per le diverse categorie veicolari

4. Le percentuali relative ai COV e NMCOV, risultano simili a quelle calcolate per le emissioni di monossido di carbonio. Anche in questo caso, infatti, le autovetture e i motocicli sono i principali responsabili dell'inquinamento di COV e NMCOV proveniente da traffico veicolare, in particolare quelle alimentate a benzina. I veicoli commerciali incidono poco sulle emissioni di NMCOV e ridotti risultano gli apporti da parte degli autobus (Figura 4.19).

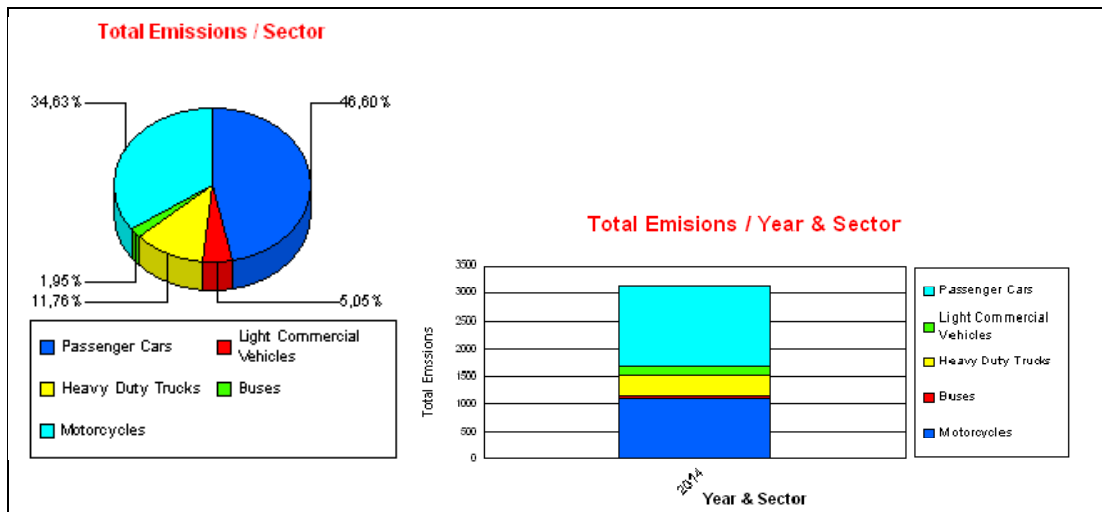


Figura 4.19 – Emissioni totali di COV totali suddivise per le diverse categorie veicolari

5. I fattori di emissione di particolato evidenziano il peso delle diverse categorie veicolari rispetto all'emissione annua complessiva, assegnando, sia per le Polveri Totali (PM) che per le due frazioni fini (PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>) una maggiore responsabilità a carico delle autovetture, seguiti dai veicoli commerciali pesanti e bus, dai veicoli



commerciali leggeri e dai ciclomotori. Il forte peso della categoria autovetture è data dall'elevata numerosità di tale tipologia nel parco veicolare considerato, rispetto ai veicoli commerciali leggeri e pesanti e ai mezzi di trasporto pubblico. Si ricorda, infatti, che i veicoli commerciali (soprattutto pesanti) presentano fattori di emissione per le polveri fino a 3 volte maggiori di quelli degli autoveicoli ma la loro consistenza nel parco veicolare è molto ridotta rispetto alle autovetture.

Le polveri generate dal traffico riguardano sia il contributo delle emissioni prodotte dalla combustione veicolare (polveri exhaust), che quello delle emissioni prodotte dall'usura dei freni, degli pneumatici e del manto stradale (polveri non-exhaust). Il software stima soltanto la prima tipologia di polveri le quali sono principalmente collegate al parco veicoli a gasolio essendo trascurabile l'apporto delle polveri exhaust da parte dei veicoli a benzina. In genere i veicoli con motore diesel emettono una quantità maggiore di particolato fine rispetto ai veicoli con motore a benzina, per la maggiore viscosità del carburante che non permette un'ottimale miscelazione con l'ossigeno e favorisce quindi la formazione di prodotti incombusti intermedi allo stato liquido o solido. Una quota consistente di polveri sottili viene inoltre prodotta dall'usura di gomme, freni, cambio e dall'abrasione dell'asfalto (Figura 4.20).

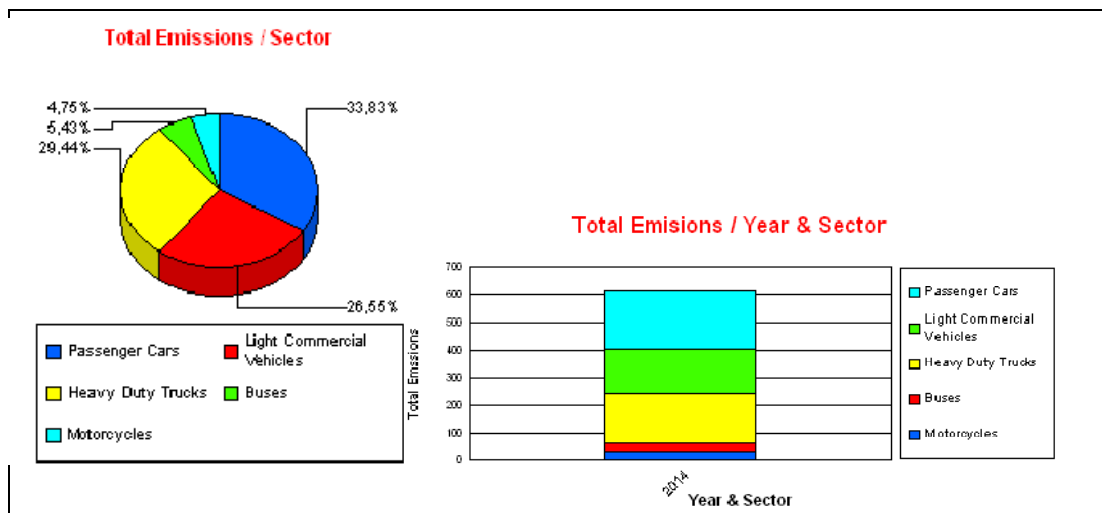


Figura 4.20 – Emissioni totali di PM totali suddivise per le diverse categorie veicolari

## SIMULAZIONE SCENARIO FUTURO

### 1) Emissioni di CO

11/01/2015  
21.42.25

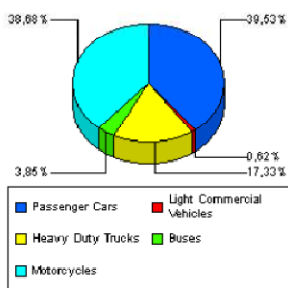
Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

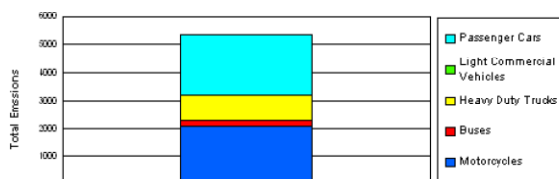
CO

POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
CO	2014		3.264,93	1.232,46	844,70	5.342,08
		<b>Passenger Cars</b>	<b>1.401,40</b>	<b>459,91</b>	<b>250,32</b>	<b>2.111,63</b>
		Gasoline 0,8 - 1,4 l	744,55	208,16	110,68	1.063,39
		Gasoline 1,4 - 2,0 l	82,02	25,70	13,66	121,38
		Gasoline >2,0 l	5,57	2,23	1,19	8,99
		Diesel <1,4 l	41,83	25,30	7,18	74,31
		Diesel 1,4 - 2,0 l	75,51	45,66	12,98	134,15
		Diesel >2,0 l	16,13	9,74	2,78	28,66
		LPG	397,84	130,65	92,97	621,47
		CNG	37,92	12,45	8,86	59,23
		Hybrid Gasoline <1,4 l	0,00	0,00	0,00	0,01
		Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,04	0,02	0,00	0,06
		Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00
		<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>14,69</b>	<b>10,19</b>	<b>8,04</b>	<b>32,92</b>
		Gasoline <3,5 t	14,35	10,04	7,99	32,38
		Diesel <3,5 t	0,34	0,15	0,05	0,54
		<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>399,40</b>	<b>291,22</b>	<b>235,06</b>	<b>925,68</b>
		Rigid <=7,5 t	76,67	61,82	57,93	196,41
		Rigid 7,5 - 12 t	68,28	51,35	42,23	161,86
		Rigid 12 - 14 t	15,15	11,12	8,70	34,97
		Rigid 14 - 20 t	66,94	46,59	35,41	148,94
		Rigid 20 - 26 t	105,81	73,86	55,57	235,24
		Rigid 26 - 28 t	0,14	0,09	0,07	0,30
		Rigid 28 - 32 t	64,31	44,95	34,07	143,33
		Rigid >32 t	2,10	1,45	1,08	4,63
		<b>Buses</b>	<b>162,69</b>	<b>25,76</b>	<b>17,25</b>	<b>205,70</b>
		Urban Buses Standard 15 - 18 t	156,78	0,00	0,00	156,78
		Coaches Standard <=18 t	5,91	25,76	17,25	48,92
		<b>Motorcycles</b>	<b>1.286,74</b>	<b>445,38</b>	<b>334,03</b>	<b>2.066,15</b>
		2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	227,67	75,52	56,64	359,83
		4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	759,70	274,18	205,64	1.239,53
		4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	233,25	74,54	55,91	363,70
		4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	66,12	21,13	15,85	103,10

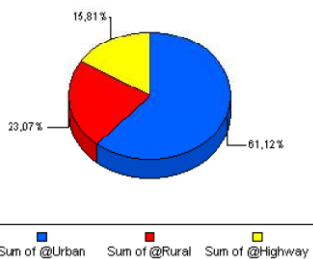
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode



Figura 4.21 – Grafici emissioni CO distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

Capitolo 4

11/01/2015  
21.43.50

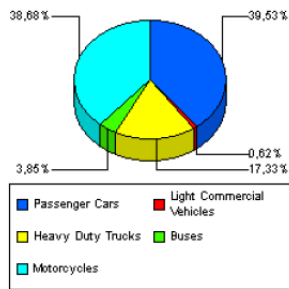
Emission Results - Source oriented

COPERT 4 version 10.0

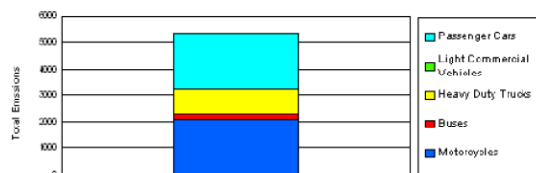
**CO**

						2014
SECTOR	HOT [t]	COLD [t]	A/C [t]	LUBE-OIL [t]	SCR [t]	TOTAL [t]
	<b>4.377,10</b>	<b>964,98</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5.342,08</b>
<b>Passenger Cars</b>	<b>1.148,84</b>	<b>962,80</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2.111,63</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l	514,33	549,06	0,00	0,00	0,00	1.063,39
Gasoline 1,4 - 2,0 l	63,56	57,82	0,00	0,00	0,00	121,38
Gasoline >2,0 l	5,52	3,47	0,00	0,00	0,00	8,99
Diesel <1,4 l	67,08	7,23	0,00	0,00	0,00	74,31
Diesel 1,4 - 2,0 l	121,09	13,06	0,00	0,00	0,00	134,15
Diesel >2,0 l	25,87	2,79	0,00	0,00	0,00	28,66
LPG	320,76	300,70	0,00	0,00	0,00	621,47
CNG	30,57	28,66	0,00	0,00	0,00	59,23
Hybrid Gasoline <1,4 l	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>30,73</b>	<b>2,19</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>32,92</b>
Gasoline <3,5 t	30,26	2,12	0,00	0,00	0,00	32,38
Diesel <3,5 t	0,47	0,07	0,00	0,00	0,00	0,54
<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>925,68</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>925,68</b>
Rigid <=7,5 t	196,41	0,00	0,00	0,00	0,00	196,41
Rigid 7,5 - 12 t	161,86	0,00	0,00	0,00	0,00	161,86
Rigid 12 - 14 t	34,97	0,00	0,00	0,00	0,00	34,97
Rigid 14 - 20 t	148,94	0,00	0,00	0,00	0,00	148,94
Rigid 20 - 26 t	235,24	0,00	0,00	0,00	0,00	235,24
Rigid 26 - 28 t	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Rigid 28 - 32 t	143,33	0,00	0,00	0,00	0,00	143,33
Rigid >32 t	4,63	0,00	0,00	0,00	0,00	4,63
<b>Buses</b>	<b>205,70</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>205,70</b>
Urban Buses Standard 15 - 18	156,78	0,00	0,00	0,00	0,00	156,78
Coaches Standard <=18 t	48,92	0,00	0,00	0,00	0,00	48,92
<b>Motorcycles</b>	<b>2.066,15</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2.066,15</b>
2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	359,83	0,00	0,00	0,00	0,00	359,83
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	1.239,53	0,00	0,00	0,00	0,00	1.239,53
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	363,70	0,00	0,00	0,00	0,00	363,70
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	103,10	0,00	0,00	0,00	0,00	103,10

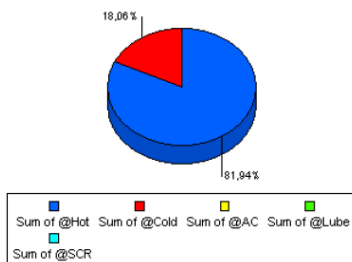
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Source



Total Emissions / Year & Source



Figura 4.22 – Grafici emissioni CO distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

## 2) Emissioni di NOx

11/01/2015  
21.42.25

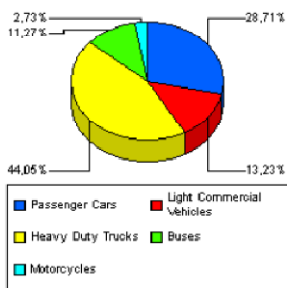
Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

NOX

POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
NOX	2014		3.268,16	1.574,35	902,53	5.745,04
<b>Passenger Cars</b>			<b>902,74</b>	<b>552,93</b>	<b>194,00</b>	<b>1.649,68</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l			72,39	18,59	3,73	94,71
Gasoline 1,4 - 2,0 l			8,88	2,31	0,46	11,65
Gasoline >2,0 l			0,66	0,20	0,04	0,90
Diesel <1,4 l			239,90	162,41	58,88	461,19
Diesel 1,4 - 2,0 l			430,92	291,68	105,74	828,35
Diesel >2,0 l			91,16	61,69	22,37	175,21
LPG			53,70	14,64	2,54	70,89
CNG			5,12	1,40	0,24	6,76
Hybrid Gasoline <1,4 l			0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l			0,00	0,01	0,00	0,02
Hybrid Gasoline >2,0 l			0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>			<b>247,21</b>	<b>221,55</b>	<b>291,54</b>	<b>760,31</b>
Gasoline <3,5 t			0,72	0,43	0,11	1,26
Diesel <3,5 t			246,50	221,12	291,43	759,05
<b>Heavy Duty Trucks</b>			<b>1.510,53</b>	<b>680,37</b>	<b>339,64</b>	<b>2.530,53</b>
Rigid <=7,5 t			284,18	125,79	58,70	468,67
Rigid 7,5 - 12 t			261,27	111,55	45,70	418,52
Rigid 12 - 14 t			56,06	23,90	10,05	90,01
Rigid 14 - 20 t			275,52	136,18	76,29	487,99
Rigid 20 - 26 t			400,20	185,26	100,01	685,47
Rigid 26 - 28 t			0,52	0,24	0,13	0,88
Rigid 28 - 32 t			225,61	94,38	47,40	367,39
Rigid >32 t			7,19	3,07	1,37	11,62
<b>Buses</b>			<b>509,99</b>	<b>85,58</b>	<b>51,91</b>	<b>647,47</b>
Urban Buses Standard 15 - 18 t			490,00	0,00	0,00	490,00
Coaches Standard <=18 t			19,99	85,58	51,91	157,48
<b>Motorcycles</b>			<b>97,70</b>	<b>33,92</b>	<b>25,44</b>	<b>157,05</b>
2-stroke >>0 cm <sup>3</sup>			1,31	0,44	0,33	2,07
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>			83,54	28,59	21,44	133,56
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>			9,30	3,49	2,62	15,41
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>			3,55	1,40	1,05	6,00

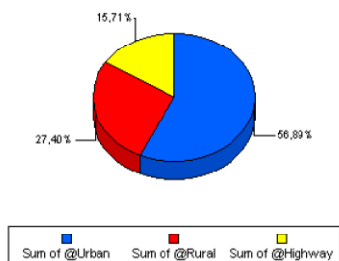
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode



Figura 4.23 – Grafici emissioni NO<sub>x</sub> distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

Capitolo 4

11/01/2015  
21.43.50

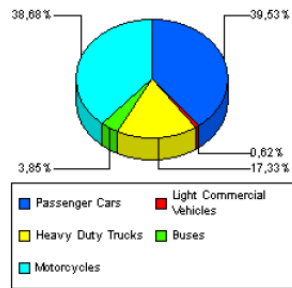
Emission Results - Source oriented

COPERT 4 version 10.0

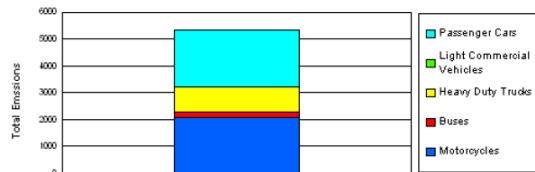
**CO**

CO						2014
SECTOR	HOT [t]	COLD [t]	A/C [t]	LUBE-OIL [t]	SCR [t]	TOTAL [t]
	4.377,10	964,98	0,00	0,00	0,00	5.342,08
<b>Passenger Cars</b>	<b>1.148,84</b>	<b>962,80</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2.111,63</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l	514,33	549,06	0,00	0,00	0,00	1.063,39
Gasoline 1,4 - 2,0 l	63,56	57,82	0,00	0,00	0,00	121,38
Gasoline >2,0 l	5,52	3,47	0,00	0,00	0,00	8,99
Diesel <1,4 l	67,08	7,23	0,00	0,00	0,00	74,31
Diesel 1,4 - 2,0 l	121,09	13,06	0,00	0,00	0,00	134,15
Diesel >2,0 l	25,87	2,79	0,00	0,00	0,00	28,66
LPG	320,76	300,70	0,00	0,00	0,00	621,47
CNG	30,57	28,66	0,00	0,00	0,00	59,23
Hybrid Gasoline <1,4 l	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>30,73</b>	<b>2,19</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>32,92</b>
Gasoline <3,5 t	30,26	2,12	0,00	0,00	0,00	32,38
Diesel <3,5 t	0,47	0,07	0,00	0,00	0,00	0,54
<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>925,68</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>925,68</b>
Rigid <=7,5 t	196,41	0,00	0,00	0,00	0,00	196,41
Rigid 7,5 - 12 t	161,86	0,00	0,00	0,00	0,00	161,86
Rigid 12 - 14 t	34,97	0,00	0,00	0,00	0,00	34,97
Rigid 14 - 20 t	148,94	0,00	0,00	0,00	0,00	148,94
Rigid 20 - 26 t	235,24	0,00	0,00	0,00	0,00	235,24
Rigid 26 - 28 t	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Rigid 28 - 32 t	143,33	0,00	0,00	0,00	0,00	143,33
Rigid >32 t	4,63	0,00	0,00	0,00	0,00	4,63
<b>Buses</b>	<b>205,70</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>205,70</b>
Urban Buses Standard 15 - 18	156,78	0,00	0,00	0,00	0,00	156,78
Coaches Standard <=18 t	48,92	0,00	0,00	0,00	0,00	48,92
<b>Motorcycles</b>	<b>2.066,15</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2.066,15</b>
2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	359,83	0,00	0,00	0,00	0,00	359,83
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	1.239,53	0,00	0,00	0,00	0,00	1.239,53
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	363,70	0,00	0,00	0,00	0,00	363,70
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	103,10	0,00	0,00	0,00	0,00	103,10

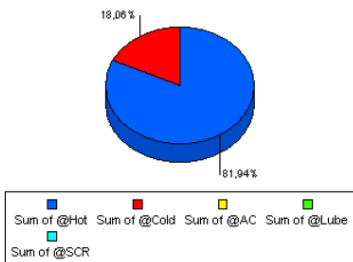
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Source



Total Emissions / Year & Source

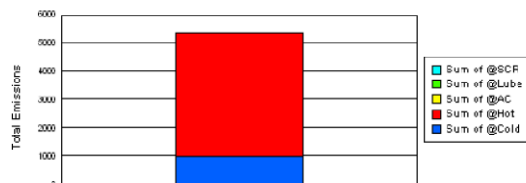


Figura 4.24 – Grafici emissioni NO<sub>x</sub> distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

### 3) Emissioni di PM

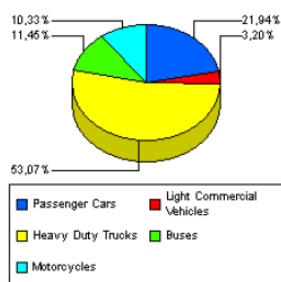
11/01/2015  
21.42.25

#### Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

		<b>PM (exhaust)</b>				
POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
PM (exhaust)	2014		29,13	16,02	10,53	55,68
<b>Passenger Cars</b>			<b>6,82</b>	<b>4,15</b>	<b>1,25</b>	<b>12,22</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l			1,36	1,10	0,36	2,82
Gasoline 1,4 - 2,0 l			0,17	0,14	0,04	0,35
Gasoline >2,0 l			0,01	0,01	0,00	0,03
Diesel <1,4 l			1,41	0,76	0,19	2,36
Diesel 1,4 - 2,0 l			2,54	1,37	0,35	4,26
Diesel >2,0 l			0,54	0,29	0,07	0,91
LPG			0,71	0,44	0,21	1,36
CNG			0,07	0,04	0,02	0,13
Hybrid Gasoline <1,4 l			0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l			0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline >2,0 l			0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>			<b>0,87</b>	<b>0,48</b>	<b>0,43</b>	<b>1,78</b>
Gasoline <3,5 t			0,03	0,04	0,03	0,10
Diesel <3,5 t			0,84	0,44	0,40	1,69
<b>Heavy Duty Trucks</b>			<b>13,06</b>	<b>9,30</b>	<b>7,19</b>	<b>29,55</b>
Rigid <=7,5 t			2,66	2,02	1,74	6,42
Rigid 7,5 - 12 t			2,27	1,66	1,26	5,19
Rigid 12 - 14 t			0,46	0,35	0,27	1,08
Rigid 14 - 20 t			2,09	1,48	1,13	4,70
Rigid 20 - 26 t			3,46	2,32	1,72	7,49
Rigid 26 - 28 t			0,00	0,00	0,00	0,01
Rigid 28 - 32 t			2,05	1,43	1,05	4,52
Rigid >32 t			0,07	0,04	0,03	0,15
<b>Buses</b>			<b>4,64</b>	<b>0,95</b>	<b>0,78</b>	<b>6,38</b>
Urban Buses Standard 15 - 18 t			4,48	0,00	0,00	4,48
Coaches Standard <=18 t			0,17	0,95	0,78	1,90
<b>Motorcycles</b>			<b>3,74</b>	<b>1,15</b>	<b>0,86</b>	<b>5,75</b>
2-stroke >50 cm <sup>3</sup>			0,61	0,19	0,14	0,93
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>			1,72	0,53	0,40	2,65
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>			1,10	0,34	0,25	1,69
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>			0,31	0,10	0,07	0,48

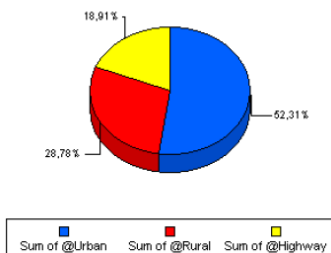
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode

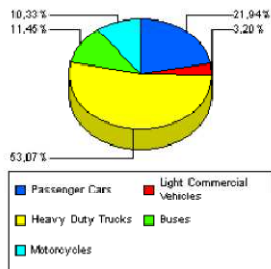


Figura 4.25 – Grafici emissioni PM(exhaust)distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

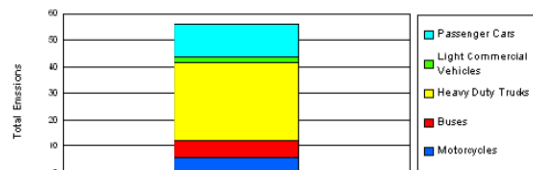
**PM  
(exhaust)**

PM (exhaust)						2014
SECTOR	HOT [t]	COLD [t]	A/C [t]	LUBE OIL [t]	SCR [t]	TOTAL [t]
	<b>54,81</b>	<b>0,87</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>55,68</b>
<b>Passenger Cars</b>	<b>11,50</b>	<b>0,71</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>12,22</b>
Gasoline 0.8 - 1,4 l	2,82	0,00	0,00	0,00	0,00	2,82
Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35
Gasoline >2,0 l	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
Diesel <1,4 l	2,14	0,22	0,00	0,00	0,00	2,36
Diesel 1,4 - 2,0 l	3,86	0,40	0,00	0,00	0,00	4,26
Diesel >2,0 l	0,82	0,09	0,00	0,00	0,00	0,91
LPG	1,36	0,00	0,00	0,00	0,00	1,36
CNG	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
Hybrid Gasoline <1,4 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Light Commercial Vehicles</b>	<b>1,62</b>	<b>0,16</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,78</b>
Gasoline <3,5 t	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
Diesel <3,5 t	1,52	0,16	0,00	0,00	0,00	1,69
<b>Heavy Duty Trucks</b>	<b>29,55</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>29,55</b>
Rigid <=7,5 t	6,42	0,00	0,00	0,00	0,00	6,42
Rigid 7,5 - 12 t	5,19	0,00	0,00	0,00	0,00	5,19
Rigid 12 - 14 t	1,08	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08
Rigid 14 - 20 t	4,70	0,00	0,00	0,00	0,00	4,70
Rigid 20 - 26 t	7,49	0,00	0,00	0,00	0,00	7,49
Rigid 26 - 28 t	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Rigid 28 - 32 t	4,52	0,00	0,00	0,00	0,00	4,52
Rigid >32 t	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
<b>Buses</b>	<b>6,38</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>6,38</b>
Urban Buses Standard 15 - 18	4,48	0,00	0,00	0,00	0,00	4,48
Coaches Standard <=18 t	1,90	0,00	0,00	0,00	0,00	1,90
<b>Motorcycles</b>	<b>5,75</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,75</b>
2-stroke >50 cm³	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93
4-stroke <250 cm³	2,65	0,00	0,00	0,00	0,00	2,65
4-stroke 250 - 750 cm³	1,69	0,00	0,00	0,00	0,00	1,69
4-stroke >750 cm³	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48

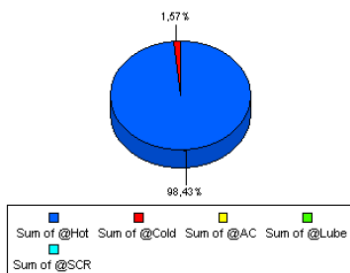
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Source



Total Emissions / Year & Source

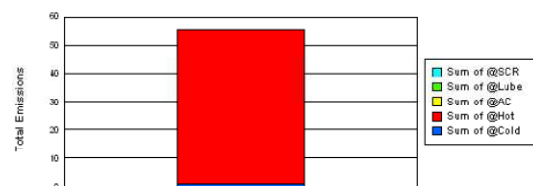


Figura 4.26 – Grafici emissioni PM (exhausta) distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

#### 4) Emissioni di COV

11/01/2015  
21.42.25

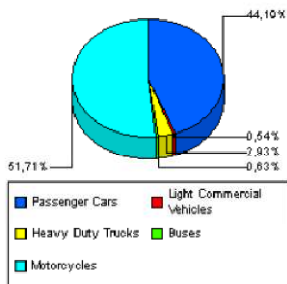
Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

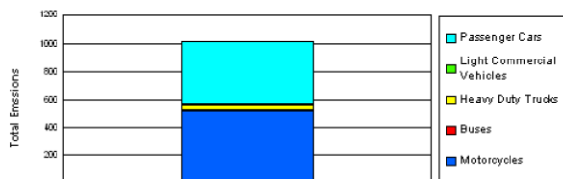
**VOC**

POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
VOC	2014		769,02	140,82	105,24	1.015,08
<b>Passenger Cars</b>			<b>373,56</b>	<b>45,71</b>	<b>29,33</b>	<b>448,60</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l			242,76	23,54	20,76	287,06
Gasoline 1,4 - 2,0 l			27,52	2,38	2,03	31,93
Gasoline >2,0 l			1,90	0,18	0,15	2,24
Diesel <1,4 l			7,25	3,18	0,68	11,12
Diesel 1,4 - 2,0 l			13,12	5,76	1,24	20,12
Diesel >2,0 l			2,81	1,24	0,27	4,32
LPG			70,97	6,79	3,01	80,78
CNG			7,12	2,63	1,17	10,91
Hybrid Gasoline <1,4 l			0,01	0,00	0,00	0,01
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l			0,10	0,01	0,01	0,12
Hybrid Gasoline >2,0 l			0,00	0,00	0,00	0,01
<b>Light Commercial Vehicles</b>			<b>4,19</b>	<b>0,69</b>	<b>0,62</b>	<b>5,49</b>
Gasoline <3,5 t			4,04	0,61	0,56	5,20
Diesel <3,5 t			0,15	0,08	0,06	0,29
<b>Heavy Duty Trucks</b>			<b>14,42</b>	<b>8,95</b>	<b>6,32</b>	<b>29,69</b>
Rigid <=7,5 t			2,83	1,86	1,30	5,99
Rigid 7,5 - 12 t			2,52	1,54	1,14	5,21
Rigid 12 - 14 t			0,51	0,33	0,24	1,07
Rigid 14 - 20 t			2,45	1,51	1,05	5,01
Rigid 20 - 26 t			3,83	2,28	1,61	7,72
Rigid 26 - 28 t			0,00	0,00	0,00	0,01
Rigid 28 - 32 t			2,20	1,38	0,95	4,53
Rigid >32 t			0,07	0,04	0,03	0,15
<b>Buses</b>			<b>4,71</b>	<b>0,98</b>	<b>0,74</b>	<b>6,44</b>
Urban Buses Standard 15 - 18 t			4,52	0,00	0,00	4,52
Coaches Standard <=18 t			0,19	0,98	0,74	1,91
<b>Motorcycles</b>			<b>372,13</b>	<b>84,49</b>	<b>68,23</b>	<b>524,86</b>
2-stroke >50 cm <sup>3</sup>			59,14	14,53	11,54	85,20
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>			151,61	35,66	28,60	215,87
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>			130,84	28,39	23,11	182,34
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>			30,55	5,91	4,99	41,45

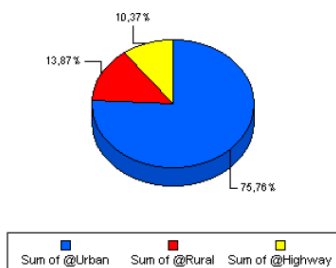
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Driving Mode



Total Emissions / Year & Driving Mode

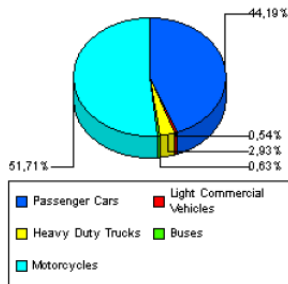


Figura 4.27 – Grafici emissioni COV distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

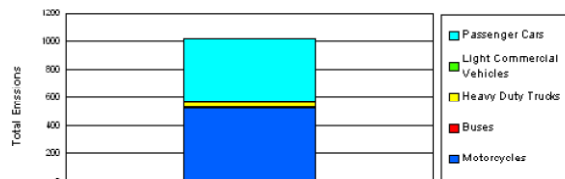


		<b>VOC</b>			
POLLUTANT YEAR	SECTOR	HOT [t]	COLD START [t]	EVAPORATION [t]	TOTAL [t]
VOC	2014	433,93	173,67	407,48	1.015,08
<b>Passenger Cars</b>		<b>66,89</b>	<b>173,56</b>	<b>208,15</b>	<b>448,60</b>
	Gasoline 0,8 - 1,4 l	12,41	85,93	188,72	287,06
	Gasoline 1,4 - 2,0 l	1,54	12,42	17,97	31,93
	Gasoline >2,0 l	0,13	0,78	1,33	2,24
	Diesel <1,4 l	9,50	1,62	0,00	11,12
	Diesel 1,4 - 2,0 l	17,18	2,94	0,00	20,12
	Diesel >2,0 l	3,69	0,63	0,00	4,32
	LPG	16,18	64,60	0,00	80,78
	CNG	6,26	4,65	0,00	10,91
	Hybrid Gasoline <1,4 l	0,00	0,00	0,01	0,01
	Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l	0,00	0,00	0,12	0,12
	Hybrid Gasoline >2,0 l	0,00	0,00	0,01	0,01
<b>Light Commercial Vehicles</b>		<b>0,66</b>	<b>0,11</b>	<b>4,72</b>	<b>5,49</b>
	Gasoline <3,5t	0,41	0,07	4,72	5,20
	Diesel <3,5 t	0,25	0,04	0,00	0,29
<b>Heavy Duty Trucks</b>		<b>29,69</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>29,69</b>
	Rigid <=7,5 t	5,99	0,00	0,00	5,99
	Rigid 7,5 - 12 t	5,21	0,00	0,00	5,21
	Rigid 12 - 14 t	1,07	0,00	0,00	1,07
	Rigid 14 - 20 t	5,01	0,00	0,00	5,01
	Rigid 20 - 26 t	7,72	0,00	0,00	7,72
	Rigid 26 - 28 t	0,01	0,00	0,00	0,01
	Rigid 28 - 32 t	4,53	0,00	0,00	4,53
	Rigid >32 t	0,15	0,00	0,00	0,15
<b>Buses</b>		<b>6,44</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>6,44</b>
	Urban Buses Standard 15 - 18 t	4,52	0,00	0,00	4,52
	Coaches Standard <=18 t	1,91	0,00	0,00	1,91
<b>Motorcycles</b>		<b>330,25</b>	<b>0,00</b>	<b>194,60</b>	<b>524,86</b>
	2-stroke >50 cm <sup>3</sup>	59,53	0,00	25,67	85,20
	4-stroke <250 cm <sup>3</sup>	141,86	0,00	74,01	215,87
	4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>	109,80	0,00	72,54	182,34
	4-stroke >750 cm <sup>3</sup>	19,06	0,00	22,39	41,45

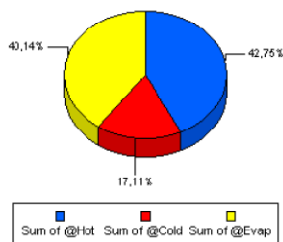
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Source



Total Emissions / Year & Source



Figura 4.28 – Grafici emissioni COV distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

### 5) Emissioni di NMCOV

11/01/2015  
21.42.25

Emission Results - Driving Mode oriented

COPERT 4 version 10.0

**NMVOG**

POLLUTANT	YEAR	SECTOR	URBAN [t]	RURAL [t]	HIGHWAY [t]	TOTAL [t]
NMVOG	2014		649,29	127,74	97,52	874,55
<b>Passenger Cars</b>			<b>309,77</b>	<b>40,77</b>	<b>27,03</b>	<b>377,57</b>
Gasoline 0,8 - 1,4 l			214,12	21,34	19,38	254,83
Gasoline 1,4 - 2,0 l			23,97	2,10	1,86	27,94
Gasoline >2,0 l			1,59	0,16	0,14	1,89
Diesel <1,4 l			6,72	3,18	0,68	10,59
Diesel 1,4 - 2,0 l			12,16	5,76	1,24	19,16
Diesel >2,0 l			2,61	1,24	0,27	4,11
LPG			45,56	5,74	3,01	54,32
CNG			2,92	1,24	0,44	4,60
Hybrid Gasoline <1,4 l			0,01	0,00	0,00	0,01
Hybrid Gasoline 1,4 - 2,0 l			0,10	0,01	0,01	0,12
Hybrid Gasoline >2,0 l			0,00	0,00	0,00	0,01
<b>Light Commercial Vehicles</b>			<b>2,70</b>	<b>0,63</b>	<b>0,62</b>	<b>3,95</b>
Gasoline <3,5 t			3,11	0,55	0,56	4,23
Diesel <3,5 t			-0,42	0,08	0,06	-0,28
<b>Heavy Duty Trucks</b>			<b>13,09</b>	<b>7,78</b>	<b>5,57</b>	<b>26,44</b>
Rigid <=7,5 t			2,49	1,64	1,16	5,29
Rigid 7,5 - 12 t			2,33	1,42	1,07	4,82
Rigid 12 - 14 t			0,47	0,30	0,22	0,99
Rigid 14 - 20 t			2,20	1,24	0,88	4,32
Rigid 20 - 26 t			3,51	1,94	1,38	6,82
Rigid 26 - 28 t			0,00	0,00	0,00	0,01
Rigid 28 - 32 t			2,02	1,20	0,84	4,06
Rigid >32 t			0,07	0,04	0,03	0,13
<b>Buses</b>			<b>4,22</b>	<b>0,93</b>	<b>0,69</b>	<b>5,84</b>
Urban Buses Standard 15 - 18 t			4,05	0,00	0,00	4,05
Coaches Standard <=18 t			0,17	0,93	0,69	1,80
<b>Motorcycles</b>			<b>319,51</b>	<b>77,63</b>	<b>63,61</b>	<b>460,74</b>
2-stroke >50 cm <sup>3</sup>			58,53	14,32	11,40	84,25
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>			123,34	32,27	26,37	181,98
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>			110,20	25,56	21,29	157,04
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>			27,44	5,49	4,56	37,48

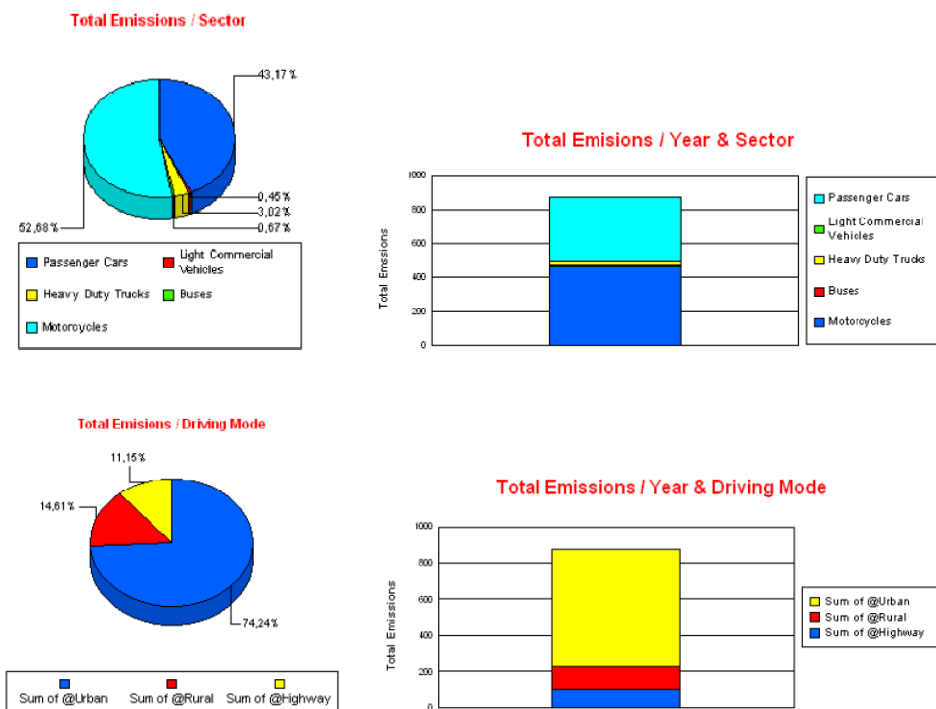


Figura 4.29 – Grafici emissioni NMCOV distinti per categorie veicolari e per modalità (urbani, extraurbani e autostradali)

Capitolo 4

11/01/2015  
21.44.53

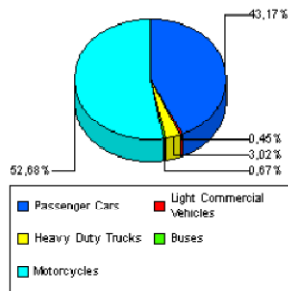
Emission Results - Source oriented

COPERT 4 version 10.0

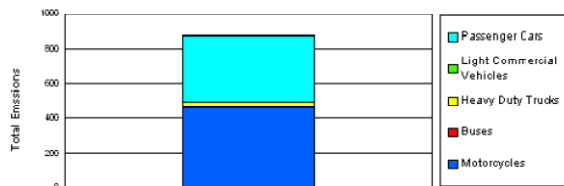
**NMVO**

POLLUTANT YEAR	SECTOR	HOT [t]	COLD START [t]	EVAPORATION [t]	TOTAL [t]
NMVO	2014	354,75	112,32	407,48	874,55
<b>Passenger Cars</b>		<b>55,91</b>	<b>113,51</b>	<b>208,15</b>	<b>377,57</b>
Gasoline 0.8 - 1.4 l		7,76	58,36	188,72	254,83
Gasoline 1.4 - 2.0 l		0,96	9,01	17,97	27,94
Gasoline >2.0 l		0,08	0,48	1,33	1,89
Diesel <1.4 l		9,27	1,32	0,00	10,59
Diesel 1.4 - 2.0 l		16,76	2,39	0,00	19,16
Diesel >2.0 l		3,60	0,51	0,00	4,11
LPG		14,65	39,67	0,00	54,32
CNG		2,83	1,76	0,00	4,60
Hybrid Gasoline <1.4 l		0,00	0,00	0,01	0,01
Hybrid Gasoline 1.4 - 2.0 l		0,00	0,00	0,12	0,12
Hybrid Gasoline >2.0 l		0,00	0,00	0,01	0,01
<b>Light Commercial Vehicles</b>		<b>0,42</b>	<b>-1,19</b>	<b>4,72</b>	<b>3,95</b>
Gasoline <3,5 t		0,33	-0,83	4,72	4,23
Diesel <3,5 t		0,09	-0,36	0,00	-0,28
<b>Heavy Duty Trucks</b>		<b>26,44</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>26,44</b>
Rigid <=7,5 t		5,29	0,00	0,00	5,29
Rigid 7,5 - 12 t		4,82	0,00	0,00	4,82
Rigid 12 - 14 t		0,99	0,00	0,00	0,99
Rigid 14 - 20 t		4,32	0,00	0,00	4,32
Rigid 20 - 26 t		6,82	0,00	0,00	6,82
Rigid 26 - 28 t		0,01	0,00	0,00	0,01
Rigid 28 - 32 t		4,06	0,00	0,00	4,06
Rigid >=32 t		0,13	0,00	0,00	0,13
<b>Buses</b>		<b>5,84</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,84</b>
Urban Buses Standard 15 - 18 t		4,05	0,00	0,00	4,05
Coaches Standard <=18 t		1,80	0,00	0,00	1,80
<b>Motorcycles</b>		<b>266,14</b>	<b>0,00</b>	<b>194,60</b>	<b>460,74</b>
2-stroke >50 cm <sup>3</sup>		58,58	0,00	25,67	84,25
4-stroke <250 cm <sup>3</sup>		107,97	0,00	74,01	181,98
4-stroke 250 - 750 cm <sup>3</sup>		84,50	0,00	72,54	157,04
4-stroke >750 cm <sup>3</sup>		15,10	0,00	22,39	37,48

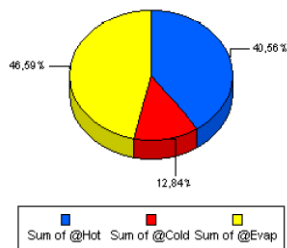
Total Emissions / Sector



Total Emissions / Year & Sector



Total Emissions / Source



Total Emissions / Year & Source



Figura 4.30 – Grafici emissioni NMCOV distinti per categorie veicolari e per fonte (avviamento a caldo, a freddo ed evaporazione)

### Analisi dei risultati della Simulazione Scenario Futuro

Dal confronto tra lo scenario attuale e lo scenario futuro, che tiene conto dell'evoluzione fisiologica del parco circolante che si avrebbe con l'ingresso naturale delle normative Euro5 ed Euro6, si nota che le emissioni relative allo scenario futuro presentano notevoli variazioni in negativo rispetto allo scenario attuale. In particolare, rispetto allo scenario attuale quello futuro presenta decrementi delle emissioni totali di NO<sub>x</sub> pari al 44%, di CO al 65%, di PM al 75% e di COV al 68% (Figura 4.31).

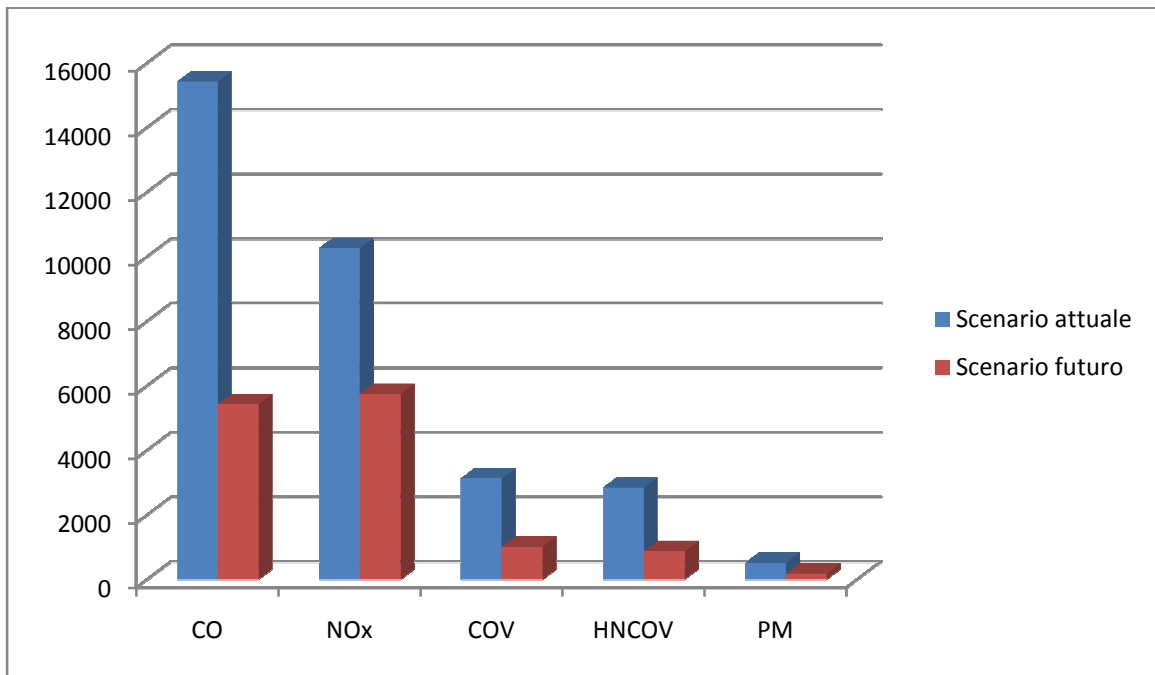


Figura 4.31 – Emissioni delle principali sostanze inquinanti relative allo Scenario Attuale e Futuro

Quindi dall'analisi dei risultati relativi alla stima delle emissioni in atmosfera, si rilevano variazioni decisamente elevate tra lo scenario attuale e lo scenario futuro: pertanto è stato ampiamente dimostrato (attraverso l'utilizzo di questo software) il fatto che l'impatto conseguente alla proposta di rinnovo del parco circolante con la sostituzione dei veicoli più anziani (conventional, Euro I, Euro II e Euro IV) con veicoli rispondenti ai requisiti dei veicoli Euro V e VI, determina sostanziali riduzioni (40-60 %) in termini di emissioni in atmosfera.

## CAPITOLO 5

### **Inquinamento da traffico veicolare nei centri urbani: interventi attuati e loro valutazione**

#### **Premessa**

Le problematiche legate alla mobilità e al traffico in ambito urbano sono ormai da considerarsi centrali e prioritarie in qualsiasi politica di miglioramento della qualità della vita. Gli effetti negativi, dovuti ad un'inefficiente organizzazione del sistema dei trasporti e ad uno sviluppo distorto della mobilità, evidenziano uno scenario che assume connotati sempre più critici: congestione, inquinamento atmosferico ed acustico, consumo energetico, incidentalità, occupazione eccessiva di suolo pubblico da parte delle autovetture, distribuzione diseguale dell'aumento dei costi e dei benefici, uso non corretto del suolo, uso indiscriminato dell'autovettura privata sono i problemi che avvolgono le nostre città in una spirale che sembra inarrestabile. Mentre le stime di previsione confermano la continua crescita della mobilità nel settore dei trasporti, molte delle soluzioni realizzate non appaiono del tutto efficaci. Le difficoltà nell'individuare ed attuare gli interventi, comuni a molte città di tutto il mondo, nel panorama italiano sono ulteriormente aggravate dalla mancanza di presupposti normativi e di una cultura dei trasporti. Su questi aspetti in particolare, si ritiene che debba essere sviluppata l'azione delle amministrazioni pubbliche che, attraverso la regolamentazione normativa degli strumenti di pianificazione del territorio, deve impostare un'efficace politica di prevenzione degli effetti inquinanti.

Il presente capitolo si propone, attraverso un'approfondita lettura di numerose e differenti esperienze maturate in realtà italiane, europee ed extraeuropee, di realizzare una guida agli interventi di gestione del traffico e della mobilità che possa essere utilizzata per orientare preventivamente nella scelta delle alternative che l'esperienza, specie internazionale, mette a disposizione. Infatti, pur disponendo di numerose misure che consentono di ridurre la congestione e controllare il funzionamento dei sistemi di trasporto urbano, l'efficacia ed i costi dei diversi provvedimenti possono variare da caso a caso e produrre differenti risultati, oltre che incidere diversamente sui vari soggetti e sulle parti economiche e sociali. La complessità intrinseca dei sistemi, per non parlare delle condizioni sociali e politiche specifiche di ogni contesto, non consente conclusioni valide per tutte le circostanze né di ragio-

nare esclusivamente per analogia, specie quando le problematiche non vengono affrontate radicalmente e alla nascita del fenomeno.

## 5.1 Valutazione della sostenibilità urbana e del sistema dei trasporti

I sempre più frequenti fenomeni di congestione e le criticità esistenti per il rispetto degli standard europei e nazionali di qualità dell'atmosfera delle aree urbane, hanno portato gran parte delle amministrazioni locali a riesaminare i propri sistemi di mobility management e a tentare soluzioni alternative. Per ciascuna delle varie tipologie di policy le esperienze locali adottate sono innumerevoli: dal potenziamento qualitativo e quantitativo del trasporto pubblico alle misure restrittive del trasporto privato motorizzato (ZTL, aree pedonali, soste a pagamento); dalla promozione della mobilità ciclo-pedonale ai sistemi più innovativi di condivisione dell'auto (car-sharing, car-pooling). Se, però, da un lato l'interesse della comunità scientifica e degli amministratori locali è fortemente focalizzato sulla implementazione e diffusione di "best practices" di mobilità sostenibile, dall'altro resta ancora molto da fare sul fronte degli accountability studies, ovvero gli studi di valutazione dell'effettiva efficacia delle diverse strategie di intervento, soprattutto per quanto riguarda gli impatti benefici sulla qualità dell'aria e sulla salute dei cittadini. Trattasi, infatti, di un settore ancora problematico, in quanto la stima degli effetti, diretti e indiretti, risulta complicata a causa del sovrapporsi di interventi adottati su scala locale ed interventi di carattere più generale. Ulteriori ostacoli per lo studio degli effetti sulla qualità dell'aria in ambiente urbano sono lo scarso utilizzo di strumentazioni innovative e tecnologicamente avanzate che consentano un monitoraggio degli inquinanti ad alta risoluzione spaziale e temporale e la difficoltà nella definizione di indicatori ambientali e sanitari specifici. Gli sforzi della comunità scientifica internazionale sono rivolti alla definizione di indicatori di esposizione e di salute della popolazione adeguati per la valutazione delle strategie di intervento. Attraverso una ricognizione delle principali metodologie di valutazione adottate in vari contesti, è possibile individuare fondamentalmente tre tipologie di approcci valutativi, spesso utilizzati in parallelo:

**1- Valutazione della sostenibilità urbana e del sistema dei trasporti:** tale approccio valutativo è utile come strumento di medio-lungo periodo per valutare l'efficacia di strategie integrate di riduzione dell'inquinamento atmosferico, più che l'efficacia di singoli provvedimenti;

Il concetto di sostenibilità, così come gli strumenti per la misurazione e la valutazione dei progressi verso di essa, risultano centrali nella valutazione dell'efficacia delle strategie di intervento adottate dalle Amministrazioni locali sul sistema dei trasporti urbani.

L'identificazione e l'utilizzo degli indicatori come strumento a supporto delle politiche di sviluppo sostenibile sono ormai ampiamente riconosciuti ed oggetto di iniziative di ricerca da parte dei principali organismi internazionali ed europei che si occupano dell'argomento. In questi ultimi anni sono state sviluppate numerose esperienze pilota e linee guida sulle caratteristiche e criteri di costruzione dei sistemi di indicatori.

## **2- Valutazione dell'efficacia delle strategie di intervento in termini di conseguimento dei risultati attesi: indicatori di performance.**

L'efficacia di strategie e azioni di intervento, nelle pluralità di ambiti applicativi, viene generalmente valutata secondo un approccio basato sul confronto tra i risultati conseguiti e gli obiettivi stabiliti, pianificando eventualmente la necessità di adottare azioni correttive. Esistono innumerevoli esempi di implementazione di tale metodologia per la verifica dell'adeguatezza delle strategie adottate; in linea di massima tutte seguono il seguente schema concettuale:

- caratterizzazione della situazione prima dell'adozione della strategia e valutazione della sua evoluzione in assenza di interventi (baseline scenario e valutazione ex-ante);
- definizione degli obiettivi specifici (obiettivi quantificati);
- identificazione dei potenziali impatti, positivi e negativi, delle azioni previste;
- definizione del set di indicatori da utilizzare per il conseguimento degli obiettivi e per il monitoraggio degli impatti;
- raccolta dei dati, elaborazione degli indicatori e confronto con la situazione iniziale.

## **3-Valutazione di efficacia delle strategie di intervento in termini di miglioramento della qualità dell'aria.**

Le strategie e le azioni di intervento sulla mobilità e sul sistema dei trasporti urbani mirano ad avere, direttamente o indirettamente, effetti positivi sulla qualità dell'aria urbana. La valutazione dell'efficacia e della adeguatezza di tali misure di intervento può essere condotta seguendo sostanzialmente due approcci:

- analisi dei dati rilevati mediante stazioni di monitoraggio;
- applicazioni di metodi di stima.

Il primo approccio viene prevalentemente utilizzato per la valutazione degli effetti diretti in termini di qualità dell'aria, in seguito a provvedimenti di gestione, controllo e regolamentazione del traffico urbano (valutazione ex-post). Si basa sostanzialmente sul confronto tra i livelli di concentrazione degli inquinanti monitorati in determinate postazioni prima e dopo l'implementazione delle misure di intervento, oggetto della valutazione stessa. Nel caso in cui vengano implementate strategie di intervento integrate, così come viene raccomandato dai principi e linee guida riconosciute a livello internazionale, il limite principale di questa metodologia di valutazione risiede proprio nel fatto di non consentire la differenziazione e l'apprezzamento dell'efficacia delle specifiche azioni della strategia. Pertanto si tratta di una metodologia molto valida nel caso in cui si vogliano valutare gli impatti ambientali di specifici provvedimenti, quali ad esempio blocchi del traffico, restrizioni alla circolazione o introduzione di Zone a Traffico Limitato, ma è opportuno che venga affiancata ad altri metodi di valutazione nel caso di politiche di mobilità più complesse.

Il secondo approccio prevede l'applicazione, essenzialmente in fase di progettazione della strategia di intervento (valutazione ex-ante), di modelli per la stima delle emissioni e delle concentrazioni in atmosfera derivanti dal traffico; tali metodi consentono di simulare i livelli di emissione in diversi scenari di traffico e di modellare i processi di diffusione degli inquinanti in atmosfera. Come visto ampiamente nel capitolo 3, il modello Copert IV costituisce un valido strumento per una sorveglianza efficace delle politiche dei trasporti e ambientale, sia per scopi di pianificazione che di ricerca. Il modello, grazie ad una opportuna suddivisione dei veicoli in particolari categorie di emissione e ad una ulteriore suddivisione di tali categorie in un certo numero di classi emissive "legislative", è in grado di fornire i fattori di emissione per un elevato numero di sostanze inquinanti. Esiste, infine, un'ampia gamma di modelli di diffusione degli inquinanti che sono stati sviluppati negli ultimi di anni al fine di simulare il trasporto e le diffusione delle sostanze nocive in atmosfera. Data la complessità del fenomeno e dei numerosi fattori in gioco e aldilà delle specificità tecniche e funzionali, si tratta di modelli complessi che richiedono una cospicua quantità di dati di input, quali i dati meteorologici (temperatura, pressione, velocità e direzione dei venti, stabilità atmosferica), i dati topografici (presenza di edifici e di canyon urbani, presenza di aree verdi) e i dati di caratterizzazione strutturale degli assi stradali.



## **5.2 Strategie per la riduzione delle concentrazioni inquinanti**

Al fine di ridurre significativamente le emissioni inquinanti nell'aria dovute al traffico veicolare si deve continuamente monitorare la qualità dell'aria e studiare l'espedito migliore e più restrittivo al fine di raggiungere l'obiettivo di riduzione degli inquinanti e rispettare, quindi, le direttive europee riguardanti la qualità dell'aria in ambito urbano.

Gli interventi "classici" per contenere i problemi di mobilità e per la razionalizzazione della circolazione stradale nelle aree urbane sono in larga parte di tipo strutturale e costruttivo, dunque costosi e lunghi nei tempi di attuazione. Molto però si potrebbe fare per aumentare l'efficienza delle strutture esistenti. Il mezzo privato, infatti, oggi predominante, è forse lo strumento più flessibile per il singolo, ma è tutt'altro che efficiente dal punto di vista globale dei consumi energetici e delle emissioni inquinanti. In molti casi, limitare l'uso del mezzo privato favorirebbe lo stesso utente, ma ciò è di fatto impedito dall'inerzia sociale, inoltre i costi sociali del traffico sono sopportati solo in piccola parte da chi direttamente li genera. Le politiche dei trasporti e le strategie di gestione e controllo del traffico tradizionalmente erano spesso mirate a ridurre la congestione della rete, aumentando la capacità della rete e migliorando la velocità di viaggio. Tali misure potrebbero non necessariamente condurre a riduzioni dell'inquinamento prodotto dal traffico stradale in ambiente urbano. È stato dimostrato, infatti, che nelle medesime condizioni di traffico, l'emissione inquinante del veicolo varia con la velocità con diversa dipendenza a seconda dei diversi inquinanti. Così ad esempio i fattori di emissione del CO, CO<sub>2</sub>, e HC (g/km) diminuiscono all'aumentare della velocità media, mentre l'emissione di NO<sub>x</sub> diminuisce con la velocità media fino ad un certo valore di velocità e poi a partire da questo punto inizia ad aumentare. Questo comporta che, minimizzando l'emissione di un particolare inquinante non necessariamente implica minimizzare l'emissione di un altro.

Una delle classificazioni con cui possono essere suddivise tali interventi è quella relativa al tempo di azione/efficacia:

- **interventi a breve termine,**
- **interventi a medio termine,**
- **interventi a lungo termine.**

Per interventi a breve termine si intendono quelle strategie i cui tempi di applicazione e gli effetti si manifestano nel giro di mesi.

Tra queste si possono ricordare:

- lo sviluppo di sistemi d'informazione allo scopo di dare notizie circa lo stato di congestione dei rami in modo tale che gli utenti possano scegliere le vie meno congestionate, evitando di appesantire ulteriormente la situazione nei rami congestionati, e così da avere una riduzione nei tempi di spostamento con effetto benefico sulle emissioni;
- la riallocazione e redistribuzione del deflusso veicolare verso arterie con maggiore capacità ambientali, cioè dopo aver individuato i rami maggiormente congestionati tentare di deviare il traffico verso arterie che favoriscono il deflusso veicolare e il processo di dispersione degli inquinanti;
- l'aumento di corsie preferenziali e percorsi in sede protetta per mezzi pubblici su tutte le vie di accesso alle città: l'obiettivo deve essere quello di trasformare in corsia preferenziale almeno il 75% della rete di trasporto pubblico cittadino;
- interventi di tipo politico/fiscale con diversificazione delle tariffe dei parcheggi a pagamento aumentando i ticket per le aree più assediate dal traffico;
- la realizzazione di assi blu, ovvero di strade dove vietare la sosta e la fermata lungo le arterie di maggiore traffico al fine di fluidificare la circolazione;
- l'istituzione di zone a traffico limitato che abbraccino i centri storici e comunque le aree più inquinante, aree in cui l'accesso è consentito solo ai veicoli che rispettano particolari standard di emissione.

Per interventi a medio termine si intendono quelle strategie i cui tempi di applicazione e gli effetti si manifestano al massimo in qualche anno. Tra queste si ricordano:

- il Road Pricing che consiste nella tariffazione dell'uso di alcune strade o zone della città. I veicoli che passano per opportuni punti di controllo vengono riconosciuti tramite un sistema elettronico e si impone loro un pedaggio. Queste politiche cercano di gestire la domanda di traffico in modo particolare durante i periodi di picco. In generale tali misure di contenimento della gestione della rete riducono i livelli di inquinamento nell'area urbana;
- il Park Pricing consistente in una tariffazione della sosta di tipo flessibile. Le tariffe di parcheggio sono infatti regolate e diversificate per aree cittadine e/o per fasce orarie, al fine di modificare i comportamenti dell'utenza secondo le esigenze di controllo della circolazione;

- il Park and Ride che non è altro che un parcheggio di interscambio che consente di abbandonare il veicolo privato ai margini delle aree congestionate, per trasferirsi sulla rete dei trasporti pubblici. Dal punto di vista dell'efficacia della strategia, occorre studiare il problema della più opportuna localizzazione dei parcheggi rispetto alle linee forti dal trasporto pubblico.

Per interventi a lungo termine si intendono, invece, quelle strategie i cui tempi di applicazione e il verificarsi degli effetti hanno tempi più lunghi. Si distinguono:

- le nuove tecnologie per la propulsione dei veicoli stradali come i motori trasformati per funzionare ad idrogeno o i veicoli con motori elettrici alimentati da pile a combustibile che bruciano idrogeno e i motori ibridi che funzionano essenzialmente ad elettricità, ma sono anche equipaggiati con un piccolo motore diesel o a benzina che serve per ricaricare la batteria e può essere utilizzato in caso di problemi con l'alimentazione elettrica, senza dimenticare i nuovi combustibili come il metano e il GPL;
- il teleworking e/o il teleshopping con l'obiettivo di ridurre il flusso veicolare mediante la sostituzione dello spostamento fisico (presumibilmente con il mezzo privato) con quello virtuale (internet e sistemi telematici). In particolare con il teleworking è possibile lavorare da casa, evitando quindi di dover andare in ufficio e quindi si riduce la domanda prevalentemente nell'ora di punta, mentre con il teleshopping è possibile effettuare acquisti direttamente da casa, riducendo non solo il numero di spostamenti, ma anche la necessità di parcheggiare;
- lo sviluppo di "brown field site" cioè una razionale gestione urbanistica del territorio comunale in modo tale da ridurre gli spostamenti e quindi la domanda; ad esempio la riqualificazione di aree situate a ridosso di zone destinate ad uffici in modo tale da incentivare i lavoratori al trasferimento in tali zone evitando così l'uso del mezzo privato per recarsi su posto di lavoro;
- il Car-sharing che consiste nel mettere a disposizione dell'utenza dei veicoli che verranno usati solo per il tempo di cui si ha bisogno (compresi i tempi molto brevi, un'ora ad esempio); dopo che un utente ha utilizzato il veicolo, questo viene rimesso a disposizione di altri utenti nelle aree di parcheggio appositamente create, l'utente dovrà pagare una tariffa proporzionata alla durata di utilizzo e ai chilometri percorsi, in questo modo dal punto di vista ambientale si è provato che una vettura car-sharing può sostituire fino a 10 veicoli privati;

- il Car-pooling che consiste nella condivisione di un mezzo privato tra più utenti che percorrono lo stesso tragitto, creare quindi equipaggi attraverso una centrale operativa, dotata di software, con l'obiettivo di ridurre il numero di vetture circolanti e di conseguenza ottenere vantaggi ambientali;
- il potenziamento del trasporto collettivo ed in particolare quello di natura ferroviaria con trazione elettrica.

### **5.3 Politica comunitaria sulla mobilità sostenibile e sulla qualità dell'aria**

Il settore dei trasporti rappresenta circa il 5% del prodotto interno lordo, impiega il 7% della forza lavoro, il 40% degli investimenti dei Paesi membri ed il 30% del consumo energetico europeo. I dati economici ed ambientali rendono conto del ruolo di primaria importanza che la politica dei trasporti riveste nell'UE. In Europa il trasporto di persone e di merci è più che raddoppiato negli ultimi trent'anni registrando una crescita costante, che è andata a scapito dell'efficienza dei trasporti, generando congestione, inquinamento e consumo di carburante. Le politiche europee, che hanno considerato i trasporti sotto la doppia luce di un fattore di integrazione e sviluppo economico e di una fonte di problematiche ambientali, possono essere suddivise schematicamente, in tre fasi:

- dall'entrata in vigore del trattato di Roma nel 1958, le politiche hanno concentrato l'attenzione sulla creazione di un mercato unico dei trasporti, facilitando la libera circolazione di persone e beni, eliminando i fattori di distorsione della concorrenza e, a partire dal trattato di Maastricht del 1992, puntando alla creazione di reti adeguate infrastrutturali europee;
- In una seconda fase, cominciata all'inizio degli anni 2000 con il Consiglio Europeo di Göteborg, è stata posta l'attenzione anche agli aspetti di sostenibilità ambientale, alle tematiche del risparmio energetico e della riduzione delle emissioni di gas serra.
- In una terza fase, iniziata sostanzialmente intorno alla metà degli anni 2000, si è aggiunta una specifica attenzione all'aspetto della compatibilità ambientale dei trasporti nell'ambiente urbano.

Le attuali linee di sviluppo della politica dei trasporti sono state definite nella strategia Europa 2020, definita nel 2010. Questa per superare la crisi e creare le condizioni per un'economia più competitiva con un più alto tasso di occupazione, mira tra l'altro ad una crescita

sostenibile, grazie alla scelta di un'economia a basse emissioni di CO<sub>2</sub> e alla competitività dell'industria. Riguardo a cambiamenti climatici/energia, la UE si pone i seguenti obiettivi da raggiungere entro il 2020:

- riduzione delle emissioni di gas serra del 20% (o persino del 30%, se le condizioni lo permettono) rispetto al 1990;
- raggiungimento del 20% del fabbisogno di energia ricavato da fonti rinnovabili;
- aumento del 20% dell'efficienza energetica.

In questo ambito un elemento rilevante è costituito dallo sfruttamento delle potenzialità di riduzione delle emissioni nel settore dei trasporti, che in molti stati è uno dei più rilevanti settori di emissioni di gas serra. Nello specifico, il miglioramento della qualità dell'aria viene considerato un elemento per migliorare la qualità della vita e prevenire i danni economici conseguenti ai danni alla salute ed alla produzione agricola e forestale causato dall'inquinamento atmosferico. Questa impostazione è stata sviluppata nel successivo Libro bianco "Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti. Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile", adottato dalla Commissione Europea nel marzo 2011. Il Libro bianco dei trasporti 2050 inserisce i problemi ambientali ed energetici tra le sfide che deve affrontare la politica europea dei trasporti, individuando i seguenti elementi per ridurre la dipendenza dal petrolio del settore dei trasporti, senza tuttavia comprometterne l'efficienza e la mobilità:

- maggiore efficienza energetica dell'attuale parco veicoli in tutte le tipologie di trasporto;
- sviluppo e impiego di nuovi carburanti e sistemi di propulsione sostenibili;
- ottimizzazione dell'efficacia delle catene logistiche multimodali, per garantirne una maggiore efficienza energetica (ad esempio, migliori collegamenti ferroviario/trasporto marittimo per il trasporto merci a lunga distanza);
- utilizzo di sistemi innovativi di gestione del traffico e di misure di mercato quali l'abolizione degli ostacoli esistenti al trasporto marittimo a corto raggio.

Per la valutazione della sostenibilità dei mezzi di trasporto si deve fare riferimento non solo all'utilizzazione del mezzo, ma anche della sua "impronta" completa, dalla nascita del veicolo stesso all'infrastruttura che esso richiede fino allo smaltimento. Data la dipendenza dei trasporti dal petrolio, si dovrà dare sempre maggiore importanza alle energie alternative e rinnovabili. Aspetti quale il comportamento di guida, sostenuto da un'adeguata formazio-

ne iniziale e successiva, e lo sviluppo di piani di mobilità con maggiore spazio a autobus, tram ecc. possono dare già oggi importanti risparmi energetici. Una attenzione specifica deve essere posta agli interventi città, poiché, aumentando il numero degli abitanti dei grandi agglomerati, aumenta anche il volume di traffico e quindi l'inquinamento acustico e atmosferico. Per affrontare ciò occorre che le città elaborino piani di mobilità sostenibile che dovranno perciò, fra l'altro, contemplare un potenziamento delle infrastrutture per pedoni e ciclisti e portare al raddoppio degli utenti dei mezzi di trasporto pubblici.

#### **5.4 Programmi e infrastrutture europee di mobilità per migliorare la qualità dell'aria nei centri urbani**

Riportiamo di seguito una descrizione degli interventi attuati/attuabili a livello locale per diminuire l'inquinamento atmosferico da traffico nelle città, presentando una valutazione dei benefici che si possono ottenere dai cambiamenti nella modalità di spostamento, in base a quanto risulta dagli studi pubblicati su riviste internazionali e dai rapporti di Agenzie locali, nazionali ed internazionali. Gli interventi comprendono due macroaree quelli relativi alle limitazioni delle emissioni e quelli relativi alle azioni sugli inquinanti già emessi. Nei primi tre sottoparagrafi verranno descritti gli effetti degli interventi che mirano a limitare le emissioni, mentre negli ultimi due si valuterà il ruolo degli strumenti normativi, in particolare di tipo urbanistico, che possono essere adottati dalle pubbliche amministrazioni per migliorare la qualità dell'aria.

##### **5.4.1 Interventi amministrativi per la riduzione delle emissioni atmosferiche dovute ai mezzi di trasporto**

Le misure fiscali prevedono tasse o agevolazioni, mentre i regolamenti possono riguardare le caratteristiche di veicoli e carburanti o la regolazione dell'accesso a specifiche aree. Per esempio, possono essere predisposte aree a traffico limitato (gratuite o a pagamento) ed aree pedonali.

##### **a) Interventi di breve durata**

In genere hanno avuto buoni risultati sul traffico e sui livelli di inquinamento atmosferico gli interventi energici, ma di breve durata (in genere qualche settimana), effettuati in occasioni particolari, quali per esempio, i Giochi Olimpici di Atlanta e di Pechino.

La breve durata ha consentito l'adozione di misure drastiche di regolazione del traffico con un effetto rilevante sul numero di mezzi a motore circolanti e sulle conseguenti emissioni.

Ad Atlanta, gli interventi per ridurre il traffico veicolare sono stati considerati un successo infatti hanno prodotto un raddoppio degli utilizzatori dei mezzi pubblici ed una riduzione dei transiti nelle ore di punta. Le concentrazioni di O<sub>3</sub> ed NO<sub>2</sub> sono risultate essere circa il 20-30% inferiori durante i Giochi Olimpici rispetto alle settimane precedenti e successive. A Pechino, durante il periodo di attuazione della zona a traffico limitato, le concentrazioni medie giornaliere dei principali inquinanti (CO, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) sono diminuite in modo significativo rispetto al periodo antecedente.

## **b) Interventi di lunga durata/permanenti**

- I. Aree urbane con tassa di ingresso (*road pricing*);
- II. Limitazione della velocità dei veicoli;
- III. Introduzione di veicoli con carburante alternativo alla benzina o al diesel;
- IV. Introduzione di zone “a traffico limitato” e “a bassa emissione”.

### **I. Aree urbane con tassa di ingresso (*road pricing*)**

Le aree urbane con accesso a pagamento, per la riduzione della congestione veicolare e dell'inquinamento atmosferico, sono state sperimentate in numerose città in Europa, Usa, Asia e Australia, anche se molte esperienze sono state interrotte per le proteste dei cittadini contro la tassazione. In Europa le restrizioni del traffico basate sulla tassazione dell'accesso sono state introdotte a Londra, a Stoccolma ed in altre città del nord Europa. Il “congestion charging scheme” (CCS) di Londra (Figura 5.1) rappresenta un esempio di politica a lungo termine di tariffazione della congestione del traffico. Si tratta di un ticket giornaliero, che consente di guidare in centro dalle 7 alle 18.30. Da subito il sistema è servito a decongestionare il traffico e a incoraggiare l'uso dei mezzi pubblici. La tassa si applica su circa 20 Km<sup>2</sup> nel centro di Londra: non esistono barriere o postazioni per pagare il pedaggio, ma tutte le auto che circolano nella zona sono riprese da telecamere che registrano le targhe e stabiliscono se la tassa è stata pagata. Al tempo stesso, è stata attuata una serie di altre modifiche che riguardano la gestione del traffico e del parco autobus (rinnovamento del parco, installazione di filtri antiparticolato per gli autobus diesel, nuove corsie preferenziali, aumento della frequenza dei bus e modifiche al sistema dei semafori). La conclusione dell'analisi più aggiornata del “congestion charging scheme” di Londra sembra indicare effetti di modesta entità sui livelli di inquinamento e assenza di modifiche nella composizione del particolato. A Stoccolma è stato introdotto un sistema di accesso a tariffazione denominato “Stockholm Trial” che ha previsto anche un potenziamento del

trasporto pubblico (16 nuove linee, aumento del 7% dei bus circolanti) e un ampliamento dei parcheggi sia nella città sia nelle vicinanze (aumento della capacità del 29%). L'intervento di accesso a tariffa riguarda l'area centrale della città, con una tariffa nei giorni lavorativi variabile in relazione alle ore di maggiore congestione. La restrizione di accesso ha portato ad una riduzione del 22% del numero di transiti di veicoli e si è verificato un aumento del traffico dei bus, generalmente con alimentazione diesel. Le restrizioni del traffico hanno portato ad una diminuzione dei livelli delle emissioni di NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> e CO (-8,5%, -13% e -14%, rispettivamente) nel centro della città. Le concentrazioni atmosferiche di NO<sub>x</sub> hanno presentato una riduzione più marcata di quella attesa in base al trend generale, dovuta agli effetti delle restrizioni all'accesso. Le concentrazioni di PM<sub>10</sub> hanno invece presentato una minor variabilità per l'interferenza delle condizioni climatiche. Nel complesso è da segnalare che le aree urbane interessate da tali processi di limitazione del traffico hanno rappresentato una percentuale limitata dell'intero territorio metropolitano, per cui difficilmente potevano raggiungere effetti sistemici rilevanti. Per quanto riguarda l'Italia, un intervento la cui applicazione ha avuto risultati positivi, è il progetto Ecopass di Milano che ha adottato uno schema di restrizioni del traffico e di tassazioni simile a quello londinese. L'intervento, iniziato nel 2008, ha coinvolto il 4,5% (8,2 km<sup>2</sup>) del territorio e imponeva un pedaggio d'ingresso a conducenti di alcune categorie di automezzi privati per poter accedere alla zona a traffico limitato (ZTL "Cerchia dei Bastioni"). Le sue modalità di applicazione rimasero pressoché immutate fino al 31 dicembre 2011, venendo quindi sostituite dal 16 gennaio 2012 da quelle del sistema attuale detto Area C (Figura 5.1), avente diversa tariffazione e nuovi divieti di ingresso.

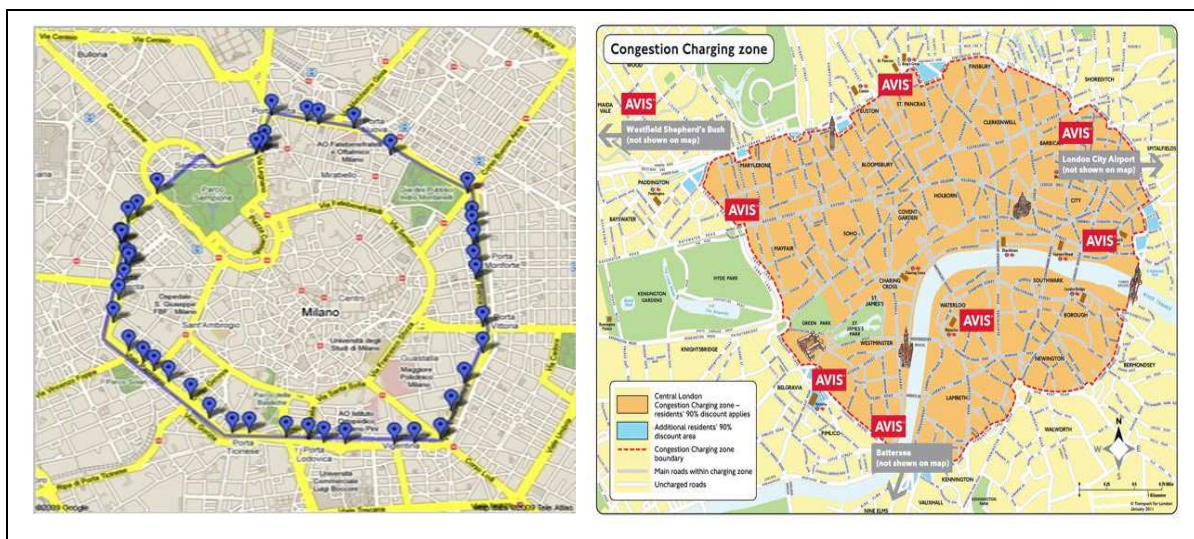


Figura 5.1– Area C di Milano e Congestion charging di Londra (Fonte: Greenstyle)



I risultati conseguiti dall' Area C in questi due anni di applicazione hanno confermato la sua efficacia nel ridurre il traffico: nei 230 giorni di applicazione, il calo è stato infatti del 30,1%, con una media di 41.000 ingressi in meno ogni giorno rispetto allo stesso periodo del 2011. Ed è anche grazie ad Area C che Milano in pochi anni è scesa di ben 13 posizioni nella classifica sulla congestione del TomTom Traffic Index, diventando la migliore in Europa dal punto di vista della riduzione del traffico. Dal punto di vista ambientale, nell'Area C, le emissioni di Black Carbon, il carbonio elementare contenuto nel PM<sub>10</sub> totale da traffico, hanno presentato un calo del 34% tra il 2010 e il 2013.

## **II. Limitazione della velocità dei veicoli**

La riduzione delle emissioni può anche essere attuata limitando la velocità dei veicoli. In un recente studio svolto in Olanda è stato calcolato che abbassando la velocità di percorrenza di alcune autostrade che attraversano i centri urbani a 80 km/h si ottiene una diminuzione delle emissioni del 5-30% per gli NO<sub>x</sub> e del 5-25% per il PM<sub>10</sub>. L'effetto è dovuto ad un flusso più fluido che riduce la guida "stop and go" ed è più marcato in relazione al livello di congestione prima dell'intervento ed alla presenza di mezzi pesanti circolanti.

## **III. Introduzione di veicoli con carburante alternativo alla benzina o al diesel**

L'introduzione di veicoli con carburante alternativo alla benzina o al diesel è un altro parametro che è stato valutato con vari sistemi di modellistica in recenti studi effettuati per stimare l'impatto della sostituzione di veicoli. Gli interventi sul parco veicolare pubblico riguardano una grande varietà di misure rivolte principalmente ai veicoli comunali e i veicoli del trasporto pubblico, da realizzarsi mediante diverse soluzioni tecniche e ambientali a seconda degli obiettivi specifici (biofuel, veicoli elettrici, EURO IV e V, veicoli ibridi). Rispetto al settore pubblico, le misure relative ai veicoli privati hanno presentato maggiori difficoltà a causa dell'influenza di specifici settori e relativi interessi, oltre all'esigenza di prendere in considerazione diversi aspetti del problema. Al fine di rendere meno inquinante il parco macchine sono stati adottati diversi strumenti: campagne di sensibilizzazione della popolazione, assistenza ed incentivazione finanziaria, assistenza tecnica e supporto, campagne rivolte a specifici gruppi target (tassisti, aziende). In uno studio effettuato a Madrid e a Barcellona è stato stimato che la sostituzione del 10% delle vecchie auto a benzina o diesel avrebbe un effetto positivo sulle emissioni.

#### IV. “Zona a traffico limitato” e “Zona a bassa emissione”

Le Zone a Bassa Emissione (LEZs) sono aree in cui i veicoli più inquinanti sono soggetti a specifiche disposizioni e non solo può essere loro vietato il transito all’interno dell’area ma anche assoggettarle a sanzioni qualora accedano alla zona LEZ e le loro emissioni siano oltre il livello stabilito. Oltre 70 città in 8 paesi d’Europa hanno attivato, o si stanno apprestando a farlo, le “Zone a Bassa Emissione” o “Zone Ambientali” per migliorare la qualità dell’aria. La Low Emission Zone della grande Londra (Figura 5.2) si estende su una superficie di 1580 chilometri quadrati in cui abitano circa 7,5 milioni di persone. Al suo interno tutti i mezzi pesanti, immatricolati sia in Gran Bretagna che all'estero, sono tenuti ad adeguarsi a determinati standard di emissione.

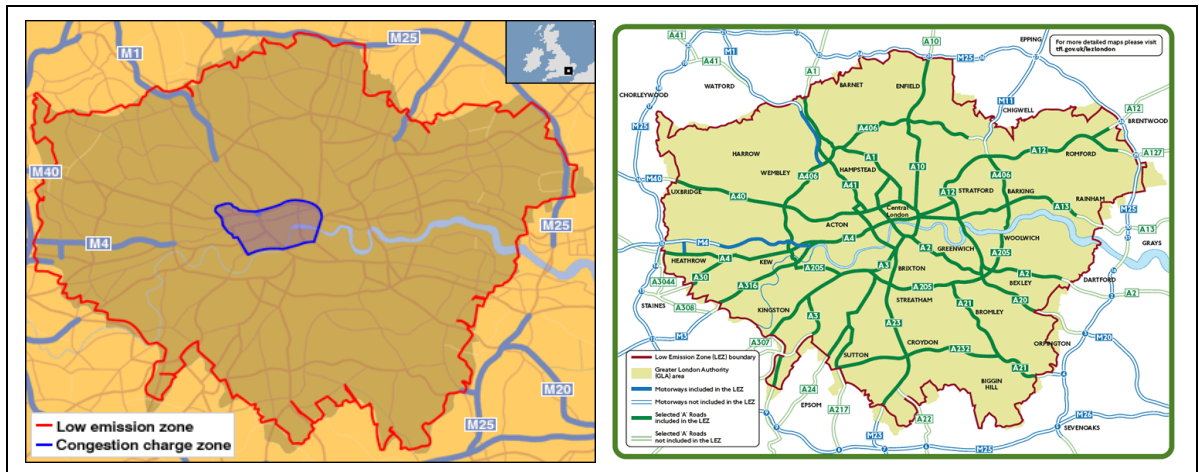


Figura 5.2– Low emission zone Londra (Fonte: Greenstyle)

Berlino con la sua Low Emission Zone di 88 kmq (Figura 5.3) ha abbattuto le polveri del 50% e gli Nox del 20%.

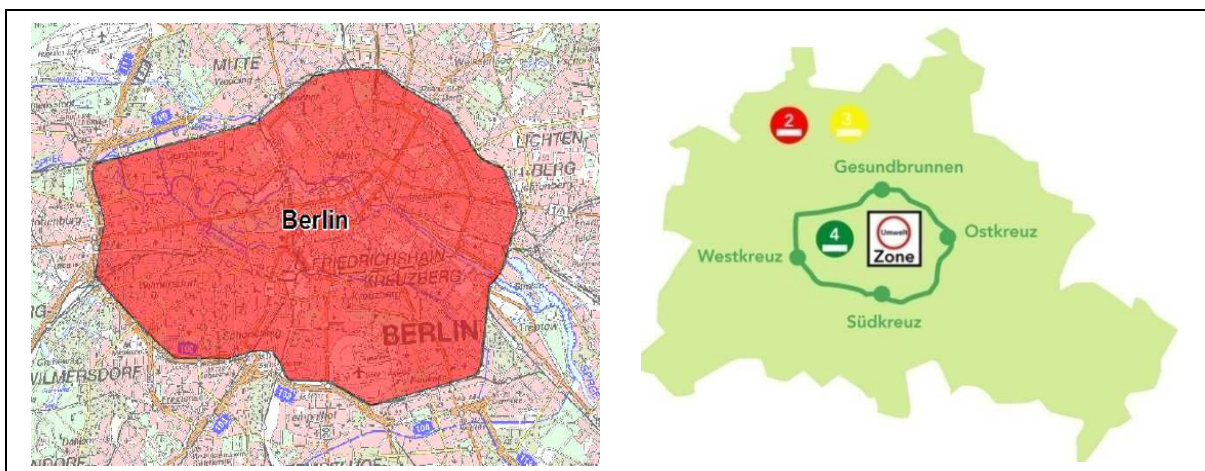


Figura 5.3– Low emission zone Berlino (Fonte: Greenstyle)

A Roma dal 2001 sono state predisposte due aree con limitazione del traffico. La più centrale o centro storico è una “Zona a traffico limitato” con controllo telematico dei varchi di ingresso e l’accesso è consentito solo alle auto dei residenti, ai veicoli commerciali ed ai mezzi di trasporto pubblico; una più ampia zona concentrica limitata dall’anello ferroviario centrale è una “Zona a bassa emissione” con accesso vietato ai veicoli più inquinanti (Figura 5.4). A livello cittadino, si è rilevato una riduzione del numero di veicoli (-3,8%) ed un ringiovanimento del parco veicolare. Nelle due aree di intervento si è registrata un’ulteriore riduzione delle emissioni da auto del 33% per il PM<sub>10</sub> e del 58% per l’NO<sub>2</sub>. Le riduzioni delle concentrazioni atmosferiche di NO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub> sono state modeste a livello dell’intera città, ma più elevate nell’area di intervento.

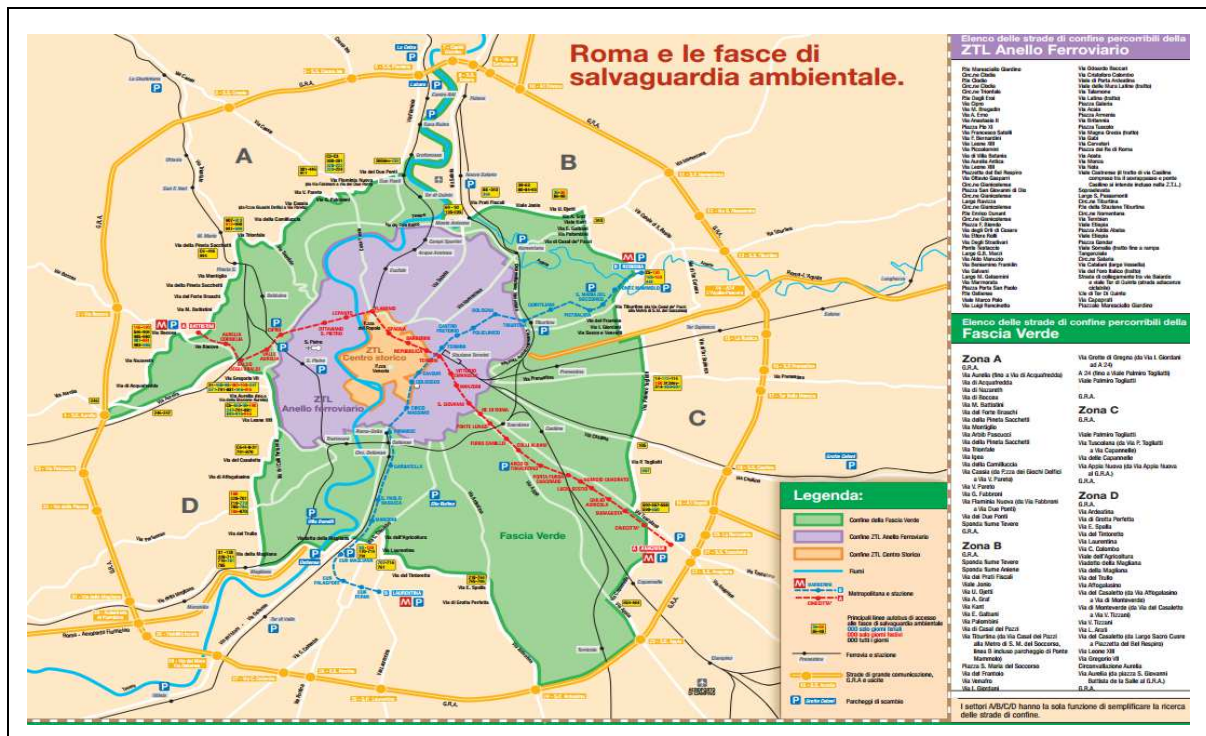


Figura 5.4– Zona a traffico limitato e Zona a bassa emissione Roma (Fonte: Greenstyle)

### 5.4.2 Interventi che prevedono la promozione dei servizi di trasporto pubblico

La disponibilità di un sistema di mezzi pubblici moderni, in particolare elettrici su rotaia, riveste un ruolo centrale nella riduzione del traffico veicolare. I mezzi pubblici di tipo urbano o extraurbano offrono una serie di benefici di tipo economico, ambientale e sociale. Una recente valutazione, ha stimato che gli spostamenti effettuati con autobus sono tre volte meno dispendiosi in termini di consumo di carburante rispetto a quelli effettuati dalle automobili, e producono un inquinamento da CO e CO<sub>2</sub> circa 20 volte inferiore a quello pro-

dotto dalle auto. Lo studio pone attenzione anche al problema della riduzione delle emissioni dei bus, generalmente con motore diesel. Queste sono influenzate dalle caratteristiche della flotta dei bus e dalle condizioni operative, quale per esempio la velocità di transito. Viene suggerito di utilizzare i nuovi bus a bassa emissione in relazione alle caratteristiche del traffico e di emissione delle strade e di porre attenzione alle emissioni dei veicoli nei punti di sosta, quali fermate e punti di scambio intermodale, in particolare, quando questi rappresentano luoghi ad elevato tasso di inquinamento. Alcuni elementi centrali per lo sviluppo del sistema pubblico dei trasporti, sono rappresentati dall':

- inserimento del trasporto pubblico in una politica integrata dei trasporti, con l'integrazione tra le varie modalità di mezzi pubblici, la facilitazione dei passeggeri nello scambio intermodale, la facilitazione delle modalità di pagamento del biglietto e l'uso di un sistema integrato di biglietti/tariffazione che copra le diverse tipologie di trasporto presenti in un'area;
- integrazione con il trasporto privato (per esempio parcheggi scambiatori) per evitare l'accesso alle aree centrali delle città.

#### **5.4.3 Interventi che prevedono piani per la modifica delle modalità di spostamento e la promozione della mobilità attiva ciclabile e pedonale**

L'espressione "piano di spostamento" (travel plan) si riferisce ai programmi che promuovono un cambiamento nel modo di spostarsi e che mirano a ridurre l'occupazione dell'automobile con un singolo passeggero attraverso l'aumento dell'offerta delle alternative, la promozione della mobilità a piedi, in bicicletta e l'uso del trasporto pubblico, mediante una serie di interventi che prevedono cambiamenti comportamentali e strutturali. I piani di spostamento puntano alla riduzione del traffico automobilistico e quindi ad un calo dell'inquinamento atmosferico ed acustico prevedendo la messa a punto di varie strategie che possono essere così riassunte: l'implementazione di politiche organizzative che facilitano la mobilità attiva (ad esempio costruzione di rastrelliere per biciclette, la presenza di spogliatoi, armadietti e docce nei luoghi di lavoro) o che limitano l'uso dell'auto (divieto di parcheggio); la messa a disposizione e coordinamento di mezzi di trasporto più sostenibili (parcheggi scambiatori con autobus, fornitura di scuolabus a prezzi modici, incentivi per il carpooling ed il carsharing); l'attuazione di misure ingegneristiche (attraversamenti pedonali controllati, piste ciclabili); la promozione del trasporto alternativo (iniziative che prevedono l'andare a piedi a scuola, alternative all'uso dell'automobile); la formazione sulla sicurezza in strada. Negli ultimi decenni molte nazioni hanno esplicitamente sostenuto l'uso

della bicicletta per migliorare la salute e ridurre l'inquinamento atmosferico, le emissioni di carbonio, la congestione, il rumore ed altri effetti dannosi dovuti all'uso dell'automobile. Le politiche di trasporto e la pianificazione territoriale atte a promuovere la mobilità pedonale e in bicicletta come alternativa all'uso dei veicoli privati a motore possono contribuire al conseguimento di questi obiettivi, ottenendo così ulteriori benefici, come la riduzione della congestione veicolare. D'altro canto, sono già state espresse preoccupazioni circa la possibilità di aumentare i rischi di infortuni e l'esposizione all'inquinamento atmosferico dei pedoni e dei ciclisti. Le evidenze degli studi pubblicati mostrano però che i benefici sanitari legati all'uso della bicicletta superano i rischi sanitari derivanti da incidenti stradali. Inoltre molti studi hanno evidenziato che con l'aumento dei ciclisti si riduce il rischio di incidenti (principio del safety in numbers), in quanto la crescita del numero dei ciclisti aumenta la percezione della loro presenza da parte degli automobilisti e la probabilità che un automobilista modifichi il proprio atteggiamento di guida essendo contemporaneamente un ciclista. Alcune politiche o interventi che promuovono la mobilità attiva non necessariamente hanno come obiettivo la promozione degli spostamenti a piedi e/o in bicicletta, ma scoraggiano gli spostamenti in auto e quindi in maniera indiretta promuovono l'uso di modalità alternative di mobilità. Tra gli esempi si possono menzionare la tassazione stradale e il parcheggio a pagamento ed il miglioramento del trasporto pubblico che ha di per sé una componente "attiva". A Londra, per esempio, si è assistito ad un raddoppio dei livelli di uso della bicicletta in seguito all'introduzione della congestion charging e contemporaneamente ad investimenti significativi in infrastrutture ciclistiche nonostante il clima e la topografia. In città come Berlino, Parigi, Barcellona la quota di spostamenti in bicicletta è più che raddoppiata attraverso l'attuazione di programmi di promozione della mobilità attiva che hanno previsto la costruzione di strutture per le biciclette ed un sistema di bike sharing. In generale, molte città in tutto il mondo hanno attuato e realizzato una vasta gamma di infrastrutture, programmi e politiche per incoraggiare lo spostamento in bicicletta. L'attenzione è stata posta alla realizzazione di piste ciclabili e delle infrastrutture per il parcheggio delle biciclette ed all'integrazione con altri mezzi di trasporto pubblici. Il bike sharing per esempio ha avuto un grande successo in molte città anche se l'impatto di questo programma è comunque difficile da valutare. Secondo alcuni studi la percentuale di spostamenti in bicicletta è aumentata dallo 0,75% all'1,76% a Barcellona e dall'1,0% al 2,5% a Parigi; a Lione, le biciclette sono aumentate del 75% dopo l'attuazione del programma Vélo'v mentre uno studio dell'OYBike di Londra ha dimostrato che il 40% degli utenti ha modificato le proprie abitudini dopo l'introduzione del servizio (Figura 5.5).



Figura 5.5– Velo’v a Lione e OYBike a Londra (Fonte: Greenstyle)

L’interpretazione di questi risultati è tuttavia resa complessa dai miglioramenti delle strutture per la mobilità ciclabile realizzati contemporaneamente all’attuazione del programma di bike sharing. Per quanto riguarda gli interventi legislativi, è da segnalare che le norme sulla mobilità possono influenzare l’uso della bicicletta. Per esempio, è stato dimostrato che le leggi che prevedono l’uso del casco, introdotte per aumentare la sicurezza dei ciclisti, possono ridurre l’uso della bicicletta. Una puntualizzazione, infine, merita il notevole successo riscontrato dal car sharing, infatti, il numero degli utenti e la flotta dei veicoli in Europa è destinata nei prossimi anni a crescere in modo significativo. La Germania risulta il Paese in cui il car sharing è maggiormente diffuso, con oltre 37 città servite, una crescita del 37% dal 2012 a oggi, quasi 800mila utenti e oltre 13mila veicoli sul territorio. Tra le capitali europee, Berlino (2.300 vetture e 207.000 utenti) può vantare il primato assoluto dell’auto condivisa, seguita da Londra (2.250 veicoli e 120mila utenti) e Parigi (2.000 veicoli e 105mila utenti); ancora in fase di start up Roma (120 veicoli e 2.500 utenti) e Madrid (8.000 utenti e 130 veicoli), dove, però, nei primi mesi del 2014 hanno preso avvio nuove iniziative destinate a imprimere una forte accelerazione. A livello nazionale il primato spetta a Milano che a fine 2013 poteva contare su una flotta di oltre 1.500 vetture e oltre 90mila utenti.

#### 5.4.4 Inventario delle emissioni locali

L’inventario delle emissioni raccoglie i dati delle emissioni in aria dei gas serra, delle sostanze acidificanti ed eutrofizzanti, dei precursori dell’ozono troposferico, del benzene, del particolato, dei metalli pesanti, degli idrocarburi policiclici aromatici, delle diossine e dei furani. Nella Comunità Europea le emissioni provenienti dalle attività antropiche e biogeniche vengono stimate secondo la metodologia CORINAIR e trasmesse tramite i Ministeri

dell'Ambiente nazionali e alla Commissione Europea. Visto che l'inquinamento atmosferico nelle città oltre ad essere uno dei principali problemi ambientali urbani si ripercuote sulla salute dei cittadini, la quantificazione e la localizzazione delle emissioni locali sono diventate un elemento importante nella comprensione del problema e per individuare soluzioni concrete nei centri abitati al fine di sviluppare piani di gestione di qualità dell'aria efficaci. Attraverso questi inventari è possibile identificare i diversi impatti causati dall'esposizione, la domanda di energia, le misure raccomandate per ridurre i livelli di inquinamento atmosferico attraverso lo sviluppo di modelli che forniscono scenari di emissione reali ed alternativi, contribuendo alla valutazione dell'efficacia delle strategie di controllo delle emissioni. I vantaggi che si possono ottenere sono sia a livello locale (politiche idonee per il controllo dell'inquinamento atmosferico attuate da parte degli enti locali e regionali) sia a livello globale (riduzione delle emissioni e del riscaldamento globale).

#### **5.4.5 Pianificazione dell'uso del territorio (Land use planning)**

Il termine "land use planning" si riferisce ad una branca delle politiche pubbliche, che coinvolge varie discipline, con lo scopo di regolare l'uso del territorio in maniera efficiente ed etica. Il land use planning viene definito come la "scientifica, estetica ed ordinata disposizione del territorio, delle risorse, delle infrastrutture e dei servizi con lo scopo di assicurare l'efficienza fisica, economica e sociale, la salute ed il benessere delle comunità urbane e rurali". Le amministrazioni locali dovrebbero quindi tener conto del rapporto fra pianificazione urbana, promozione della salute e rispetto dell'ambiente sia nella progettazione di nuovi insediamenti sia nel recupero di porzioni di città e di infrastrutture dismesse. Per quanto riguarda gli ambienti urbani, sono stati individuati due approcci urbanistici che hanno diversi effetti sulla salute. Un "disegno urbano interconnesso" o a funzione mista (abitativa, commerciale e lavorativa), caratteristico dei centri storici delle città europee, facilita i percorsi pedonali diretti o con mezzi ecologici (bici) per le varie destinazioni e riduce la necessità dell'uso dell'automobile. Questo disegno urbano è stato definito anche "salutogenico" in quanto facilita lo svolgimento della attività fisica e riduce il rischio di sviluppo di obesità e patologie croniche. All'opposto, un "disegno urbano disconnesso", in cui le aree residenziali e commerciali e gli uffici delle istituzioni sono lontane e nettamente separate, richiede l'uso dei mezzi di trasporto (il più delle volte privati) e scoraggia la mobilità pedonale; per questo motivo questo tipo di disegno è stato anche definito "obesogenico". Un esempio interessante di pianificazione dell'uso del territorio è rappresentato dai quartieri residenziali liberi da auto (car-free districts).

Il principio ispiratore è lo sviluppo di aree urbane in cui l'auto personale non è necessaria ed il traffico automobilistico è limitato. Questo approccio può essere utilizzato per quartieri di nuova realizzazione, per il recupero di aree dismesse e per la riconversione di aree abitate esistenti. Una delle caratteristiche di tali aree è la ridotta dotazione di zone di parcheggio, scarsi anche nelle aree limitrofe, ed il loro costo elevato. I vantaggi per i residenti sono rappresentati da:

- liberazione del terreno e suo uso per altri scopi, in particolare per la progettazione di aree verdi;
- miglioramento locale della qualità dell'aria e minor rumore;
- possibilità per i bambini di giocare all'aperto in maggior sicurezza.

La ridotta necessità di utilizzare l'auto privata implica il miglioramento dei sistemi di mobilità alternativa, quali la presenza di servizi di trasporto pubblico efficienti, la vicinanza a stazioni della metropolitana, agevolazioni tariffarie per l'uso dei mezzi pubblici, presenza di car sharing. La pianificazione dei trasporti incide sull'uso e sullo sviluppo del territorio e, viceversa, l'uso del territorio influenza i cittadini ad usare un certo mezzo di trasporto. Nell'ambito delle politiche di uso del territorio, una puntualizzazione merita il problema dei parcheggi in ambito urbano. La possibilità di parcheggiare la vettura rappresenta un elemento centrale per l'uso dell'auto e la presenza di parcheggi viene considerata come un elemento di attrazione dei veicoli. Questo ha portato alla tendenza a ridurre la possibilità di parcheggio nelle aree più congestionate. Ad esempio, il governo inglese ha raccomandato di ridurre la previsione di parcheggi nelle aree abitative e nei luoghi di lavoro. Ad Amsterdam è stata attuata una politica di progressiva riduzione del parcheggi nel centro della città del 3% per anno. Sono state proposte tariffe crescenti nelle aree centrali e l'eliminazione di parcheggi liberi lungo i marciapiedi, perché la loro presenza incrementa la circolazione a bassa velocità per la ricerca di un posteggio libero.

### **5.5 Strategie per la riduzione dell'inquinamento atmosferico: politiche di mobilità in Italia**

L'ambiente urbano è particolarmente importante per la salute della popolazione a causa delle numerose attività antropiche inquinanti. Per questo motivo le Amministrazioni Locali sono spesso chiamate ad intervenire al fine di rendere l'ambiente più salubre o comunque per limitare i danni dovuti alle emissioni di inquinanti. In tale contesto, l'attuazione di politiche di pianificazione per limitare le concentrazioni di inquinanti emessi dai mezzi di



trasporti è di fondamentale importanza visto che il settore dei trasporti è responsabile attualmente di un quarto delle emissioni di CO<sub>2</sub> dell'UE, il 40% dei quali sono causati dal trasporto urbano. La sfida è quella di cercare mezzi di trasporto meno inquinanti, di limitare gli spostamenti quando possibile e di organizzare i trasporti pubblici in modo efficiente. Alcune di queste sfide sono state raccolte da alcune città europee (come ampiamente visto nel precedente paragrafo), mentre molte città italiane sono ancora poco orientate ad attuare questo tipo di politiche dovendo spesso “lottare” contro le abitudini consolidate che prevedono un largo utilizzo dei mezzi a motore privati. Le Amministrazioni Locali sono quindi chiamate non solo a modificare e ad intervenire sulle infrastrutture e sulle reti di trasporto pubblico, ma anche a diffondere abitudini “sostenibili” tra i propri cittadini.

### **5.5.1 Valutazione degli interventi attuati**

Da indagini e studi effettuati sulle differenti politiche di mobilità adottate negli ultimi anni nelle città italiane, emergono punti di forza e debolezze nell'affrontare il tema della mobilità sostenibile. Sul piano degli adempimenti normativi e programmatori previsti dalla attuale legislazione, si osserva l'adozione e revisione del Piano Urbano del Traffico (PUT) in tutte le città, e la frequente adozione di altri strumenti quali il bilancio ambientale. Manca una reale riflessione sulla efficacia di tali strumenti nell'affrontare il tema della mobilità sostenibile. Una valutazione dei Piani Regionali di Risanamento della Qualità dell'Aria, altro strumento adottato a livello locale (anche se sovra comunale) da utilizzare per elaborare piani di rientro entro i limiti di legge di inquinanti atmosferici in caso di superamento, ha però evidenziato che tali piani hanno avuto generalmente una portata d'azione limitata. Per quanto riguarda il tasso di motorizzazione, le città italiane sono caratterizzate da un elevato tasso (auto ogni 100 abitanti), con una tendenza ad una modesta riduzione nell'ultimo biennio per quanto riguarda auto e moto, anche se con differenze consistenti tra le varie città, generalmente più evidente in molte città del Sud. Le più motorizzate sono L'Aquila con 78,9 e Potenza con 73,4 auto ogni 100 abitanti, seguite da Catania con 72,5 e Latina con 72,1. Le modifiche della consistenza del parco circolante sono state accompagnate da un suo rinnovamento con una riduzione dei veicoli rispondenti agli standard emissivi più vecchi, anche in questo caso con marcate differenze tra le varie città. Sul piano delle misure volte ad incoraggiare l'uso di modalità di spostamento alternative al mezzo privato è da segnalare in primo luogo, il ridotto sviluppo di metropolitane e sistemi tranviari ed il ritardo nell'ammodernamento delle reti esistenti di trasporti ferroviari suburbani. Tali ritardi sono particolarmente evidenti al confronto con quanto avviene in molte città

europee di varia ampiezza demografica, dove il trasporto su rotaia riveste un ruolo centrale nella mobilità in ambito urbano. Per quanto riguarda gli altri aspetti che hanno a che vedere con la mobilità urbana, è da segnalare una situazione estremamente disomogenea tra le varie città italiane. L'offerta di trasporto pubblico, misurata come chilometri percorsi annualmente dalle vetture per abitante, varia da un massimo di Milano, seguita da Cagliari, Roma e Torino, ad un minimo di Palermo. Per quanto riguarda la domanda di trasporto pubblico, misurata come numero passeggeri trasportati per abitante per anno, i dati Istat sanciscono che, dopo un triennio di relativa stabilità, la tendenza negativa del calo del numero dei passeggeri iniziata nel 2012 (con -7,7%) è proseguita anche nel 2013 (-4,3%). Si tratta di un fenomeno che riguarda maggiormente i capoluoghi del Mezzogiorno (-11,1%) rispetto al Centro (-1,4%) e al Nord (-5,3%). L'estensione delle ZTL è elevata solo in due città, Firenze e Bologna, mentre è di entità molto ridotta, o è assente, nelle altre città. Anche l'estensione delle aree pedonali, a parte il valore eccezionalmente elevato di Venezia legato alle caratteristiche strutturali della città, è estremamente variabile, con le percentuali più elevate a Torino e Firenze. La disponibilità di piste ciclabili, valutata in relazione al numero di abitanti, è più ampia a Bologna, Venezia, Firenze e Torino. A tale proposito è però da segnalare che l'estensione non permette di esprimere una valutazione su importanti fattori che ne influenzano la fruibilità, quali lo stato di manutenzione, il grado di interconnessione tra le piste, il livello di protezione nelle intersezioni pericolose con la rete viaria, etc. Il servizio di car sharing è presente solo in 23 città (soprattutto al nord), quello di bike sharing (presente in 188 città), anche se ha avuto un notevole incremento negli ultimi anni i relativi progetti al momento sono ben lontani dall'essere definiti positivi. Al riguardo, a partire dai buchi di bilancio e dalla scarsa cultura ciclistica di buona parte della popolazione, c'è la sensazione che si potrebbe fare molto di più, anche per fronteggiare i costi ed evitare che il servizio finisca in perdita. In definitiva i servizi di bike e car sharing esistono ma risultano ininfluenti, troppo poco sviluppati in proporzione al numero di abitanti che ne potrebbero beneficiare. La presenza di verde pubblico presenta valori elevati in quattro città (Palermo, Ancona, Roma e Napoli), molto basso a Venezia, Bari e Trieste, sostanzialmente assente a Taranto ed intermedio nelle altre città. Queste disomogeneità sono solo in parte spiegabili con le peculiarità locali e, in larga parte, fanno pensare ad una diversa attenzione "storica" alle problematiche ambientali e ad un'estemporaneità delle scelte effettuate dalle varie Amministrazioni. In sintesi, pur in presenza di molte iniziative settoriali sembra essere mancata una strategia nazionale che, pur rispettosa delle peculiarità e del livello di autonomia locali, abbia fornito linee di indirizzo per affrontare in maniera

adeguata e coordinata il tema della mobilità sostenibile e dell'inquinamento atmosferico da traffico veicolare. Il ritardo rispetto a molte città europee di varia ampiezza demografica nello sviluppo del TPL su rotaia, la modalità di trasporto pubblico più efficiente per volumi di passeggeri trasportati e per capacità di rispondere alle esigenze di mobilità dei cittadini, è presumibilmente una delle più importanti spiegazioni che rendono conto dei più elevati livelli di inquinamento atmosferico di molte città italiane rispetto a quella di molte analoghe città europee. Questo breve quadro rende conto dell'importanza e dell'urgenza dell'adozione nelle città italiane, anche a livello locale, di politiche efficaci mirate alla riduzione dell'inquinamento da traffico ed alla promozione di sistemi di mobilità sostenibile, basati sulle informazioni derivabili dalla documentazione scientifica e dalle esperienze effettuate a livello internazionale, in particolare in quelle città europee che hanno affrontato in maniera adeguata tali problematiche.

### **5.5.2 Efficacia ambientale delle politiche italiane**

Procedendo in modo piuttosto schematico, è possibile sviluppare alcune riflessioni relative al potenziale delle politiche-base riferito ai contesti delle città medie italiane. La questione della sostenibilità finisce per incrociare il tipico circolo vizioso che lega, in modo articolare le diverse città italiane:

- la scarsa qualità dei servizi di trasporto erogati (non solo in termini di orari e velocità, ma anche di leggibilità e integrazione delle reti, comfort dei mezzi, ecc);
- l'inadeguatezza delle strutture tariffarie, largamente insufficienti a sostenere i costi del servizio e anche poco adeguate alle esigenze di fidelizzazione della clientela in un'ottica di concorrenza al modo motorizzato privato;
- la bassa produttività delle aziende, che finiscono spesso per assumere logiche imprenditoriali strettamente legate a un livello di sussidio elevato. In tal senso, la ricerca di una maggiore sostenibilità ambientale non dovrebbe prescindere da alcune riflessioni relative alla necessità di ottenere una maggiore sostenibilità economica dei servizi, da ricercarsi in primo luogo ristabilendo corrette logiche imprenditoriali e condizioni di contendibilità dei singoli segmenti d'offerta (logica di concorrenza "per il mercato").

Le politiche di ottimizzazione del traffico privato, adottate nelle città italiane, hanno presentato risultati abbastanza alterni, il che rispecchia la loro caratteristica di armi potenti, in quanto aggrediscono in modo diretto la quota più consistente della domanda di mobilità,

ma a doppio taglio, in quanto possono produrre effetti sia positivi che negativi dal punto di vista ambientale. Ne consegue l'importanza, in questo settore, non solo degli interventi "in positivo", ma anche di quelli "in negativo", volti a ridefinire i costi d'utilizzo dell'auto disincentivandone l'utilizzo su specifici segmenti di domanda. A questo proposito, occorre tenere presente che, per esempio, la realizzazione di nuova offerta stradale, anche quando genera benefici ambientali di breve termine (ad esempio riducendo i livelli di congestione di nodi critici, o rettificando gli itinerari veicolari), tende comunque a rimodulare i costi di trasporto secondo modalità tali da generare, a medio-lungo termine, nuova domanda di mobilità su spostamenti dispersi e relativamente lunghi, strettamente legata all'uso dell'auto. Per quanto riguarda invece il tentativo di definire delle politiche integrate, che sappiano amplificare i benefici e ridimensionare i costi delle singole logiche di intervento, ha restituito risultati ampiamente differenziati, che rispecchiano la difficoltà di definire i corretti "dosaggi" in rapporto agli obiettivi di sostenibilità. In alcuni casi, la giustapposizione di interventi finalizzati, da un lato, a potenziare il sistema di trasporto pubblico e, dall'altro, a sostenere comunque la domanda di trasporto privato, ha condotto a definire degli scenari nei quali i costi di intervento si sommano, mentre i benefici ambientali tendono a ridimensionarsi in ragione della contraddittorietà dei segnali di costo lanciati agli automobilisti: è quanto si è verificato nella città di Brescia, laddove l'incremento dell'offerta di sosta in centro tende a indebolire il potenziale beneficio associato alla realizzazione della metropolitana. Resta evidente la necessità di sviluppare schemi internamente coerenti (sempre difficili da definire a priori) che sappiano, da un lato, garantire una migliore integrazione e complementarità fra trasporto pubblico e mobilità non motorizzata e, dall'altro, introducano strumenti anche economici per il governo della domanda di mobilità a scala urbana e regionale: primo fra tutti il road pricing.

## CONCLUSIONI

La valutazione della qualità dell'aria è una parte importante di un complesso processo che ha come obiettivo la tutela della salute umana e dell'ambiente in generale, dagli effetti avversi determinati dall'esposizione a sostanze inquinanti sotto forma di composti aerodispersi. Gli effetti sulla salute sono documentati da un'ampia letteratura scientifica e oggetto di attenzione della comunità internazionale. Tra i vari fattori di pressione in atmosfera, sicuramente le emissioni da trasporto stradale rappresentano una delle maggiori sorgenti di inquinamento dell'aria. Per valutare come questo fattore di pressione agisce sullo stato dell'ambiente atmosferico è necessario utilizzare strumenti conoscitivi integrati, consolidati, confrontabili e affidabili in modo da consentire una caratterizzazione del territorio nel suo complesso. Tali strumenti vanno dalle misurazioni delle concentrazioni di inquinanti in siti fissi, alle misure indicative (laboratori mobili e tecniche di campionamento diffusivo), a metodi empirici (tecniche di stima obiettiva) fino a metodi deterministici (modelli di emissione e dispersione atmosferica) più o meno complessi in funzione dell'obiettivo di studio. Infatti, le attività di monitoraggio atmosferico non si esauriscono con il controllo dei parametri meteorologici e di qualità dell'aria, ma focalizzano l'attenzione sugli eventi di accumulo degli inquinanti e sulle interazioni tra meteorologia e dispersione. Tale approccio richiede uno studio analitico dei fenomeni causa-effetto e l'integrazione di dati, metodi e strumenti. Per una valutazione più dettagliata dello stato dell'ambiente risulta particolarmente utile affiancare alle reti di monitoraggio sia strumenti statistici, che modelli di simulazione, in grado di riprodurre l'emissione, la micrometeorologia, il trasporto e la diffusione degli inquinanti in atmosfera. D'altronde la rete di monitoraggio, sebbene risulti articolata e tecnologicamente avanzata, fornisce informazioni di tipo puntuale, anche se continue nel tempo. Al fine di estendere i dati puntuali all'intero ambito territoriale di analisi è necessario ricorrere all'utilizzo di strumenti e tecniche geostatistiche. Anche la normativa vigente prevede che i sistemi di valutazione della qualità dell'aria integrino misurazioni in punti fissi con tecniche modellistiche e che, allo scopo di ottenere indicazioni complementari e supplementari, il rilievo dei parametri sia effettuato tramite l'esecuzione di campagne di misura con metodi e mezzi diversi da quelli indicati come ufficiali.

Dall'analisi svolta nel presente lavoro, approcci interessanti sembrano riguardare l'utilizzo di modelli di emissioni, opportunamente integrati successivamente con modelli di dispersione, in grado di fornire una stima delle concentrazioni di inquinanti in luoghi e tempi

differenti da quelli cui si riferiscono le misure al fine di consentire un'analisi accurata ed esaustiva degli effetti sulla salute della popolazione derivanti da un'esposizione a breve, medio e lungo termine.

Il presente lavoro ha pertanto rappresentato un successivo passo nella migliore rappresentazione e previsione degli inquinanti attraverso l'utilizzo del modello di simulazione Copert IV, software utilizzato in ambito scientifico e professionale, capace di calcolare direttamente e con buona accuratezza le emissioni veicolari.

Inoltre, questa metodologia rende possibile la realizzazione di un ampio spettro di simulazioni di scenari di mobilità, atte a valutare le strategie più efficaci ai fini del contenimento dell'inquinamento atmosferico.

L'applicazione del modello di simulazione Copert IV alla città di Palermo, ha consentito di individuare, attraverso la realizzazione di due simulazioni (scenario attuale: parco veicolare attualmente circolante e scenario futuro: rinnovo parco circolante), l'influenza del rinnovo del parco veicolare attualmente circolante, sulle emissioni inquinanti e l'entità delle variazioni delle emissioni stesse.

In particolare dal confronto dei due scenari si è riscontrato un notevole abbassamento delle emissioni dei principali inquinanti prodotte nello scenario futuro, riduzioni sicuramente dovuto all' ammodernamento del parco veicolare ottenuto con la completa sostituzione dei veicoli obsoleti con veicoli Euro 5 e Euro 6, in grado di apportare notevoli abbattimenti delle emissioni di inquinanti.

Alla luce di queste considerazioni, una valida strategia per ridurre nel breve periodo le emissioni di polveri sottili nelle grandi aree metropolitane si dovrebbe basare, per intanto, sull'accelerazione dei seguenti processi:

- rinnovo del parco veicoli commerciali e degli autobus di linea da ritenere ormai obsoleto;
- rinnovo del parco delle autovetture;
- interventi di fluidificazione del traffico finalizzati a ridurre i tempi di veicolo fermo con regime di motore al minimo e le fasi di accelerazione (stop & go);
- coordinamento ed omogeneità delle misure di limitazione del traffico.

Gli interventi così proposti, rispetto alla situazione attuale, permetterebbero di abbassare notevolmente le emissioni dei principali inquinanti (CO, NO<sub>x</sub>, PM, HC, etc.), contribuendo in tal modo, ad ottenere una mobilità definibile "sostenibile" non solo dal punto di vista trasportistico ma anche ambientale.

## BIBLIOGRAFIA

Agenzia Nazionale per la Prevenzione e l'Ambiente, (2001), "I modelli nella valutazione della qualità dell'aria".

Agenzia Nazionale per la Prevenzione e l'Ambiente, "Le emissioni in atmosfera da trasporto stradale", Serie Stato dell'ambiente, n. 12, 2000.

Bell M.C., Galatioto F., 2006, "Exploring the processes governing roadside pollutant concentrations in an urban street canyon", proceeding "XIV° Pan-american conference", Las Palmas de Gran Canaria.

Bell MC, Blythe P., Sharif B., Neasham J., Suresh V., Galatioto F., Hill G., et al ., 2009, Field deployment of the MESSAGE System for environmental monitoring, Traffic Engineering & Control (TEC), December 2009, Vol. 50 n° 11.

Contaldi M., De Lauretis R., Picini P. (2000): "Analisi e validazione di metodologie per il calcolo delle emissioni inquinanti dei trasporti", Rapporto Tecnico ANPA, Giugno 2000.

Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 Maggio 2008 relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa.

Eccleston B.H., Hurn R.W. (1974), Ambient temperature and trip length. Influence on Automobile fuel economy and emissions, SAE Paper n. 780613.

Eggleston H.S., Glaudioso D., Gorrissen N., Joumard R., Rijkeboer R.C., Sameres Z., Zierock K.H., (1991), CORINAIR Working Group on Emissions Factors For Calculating 1990. Emissions for Road Traffic – Vol. 1: Metodolgy and Emissions Factors-Final Report, dicembre 1991, L.A.T.-EnviCon-CEE.

Ellis G.W., Camp W.T., Treadway A. (1978), The determination of vehicular cold and hot operating fractions for estimating highway emissions, settembre 1978, US Department of Transportation, Washington D.C.

European Conference of Ministers of Transport, 1997. CO2 Emissions from Transport. ECMT, Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris. European Environment Agency, 1998. Europe's Environment. The Second Assessment. EEA, Copenhagen.

Faiz, A., Weaver, C. S. and Walsh, M., 1996. Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions. World Bank, Washington, DC.

Feng, L. (1992) Regional Diffusion Model for Estimating Long-Term Average Concentrations of Atmospheric Pollutants, *Atmospheric Environment* 26, 2733-2735.

Galatioto, F., 2007, I Sistemi di trasporto Intelligenti (ITS) come strumento per la gestione, il monitoraggio e la programmazione della circolazione veicolare urbana pubblica e privata. Ph.D. Thesis, Transport Engineering Department.

Galatioto, F., Zito, P., Migliore M. 2007. Traffic parameters estimation to predict road side pollutant concentrations using neural networks. *Environmental Modeling & Assessment* 13 (February).

Gualtieri, Tartaglia (1997), a street canyon model for estimation NOx concentration due to road traffic: measurement and modelling in environmental pollution (editor San Josè, C.A. Brebbia), computational mechanics publication Southampton (UK) and Boston (USA).

Horowitz H. L. (1982), Air quality analysis for urban transportation planning, MIT press, Cambridge Massachusetts.

Horowitz H.J., Tobin R.L. (1979), The influence of urban trip characteristics on vehicle warm-up-implication for urban automobile fuel consumption, SAE Paper n. 790656

J. Kukkonen, E. Valkonen, J. Walden, T. Koskentalo, P. Aarnio, A. Karppinen, R. Berkowicz, K. R. Raimo Kartastenpaka, A measurement campaign in a street canyon in Helsinki and comparison of results with predictions of the OSPM model, *Atmospheric Environment*, 35, 231-234 (2001).



Johnson W.B., F.L. Ludwig, W.F. Dabbert, R.J. Allen (1973): An urban diffusion simulation model for carbon monoxide – JAPCA, 23, 490-498.

Jost et al. (1992), emission and fuel consumption modelling based on continuous measurement, DRIVE project, del n°12, maggio 1992.

Joumard et al. (1992), model of exhaust and noise emission and fuel consumption of traffic in urban areas-manual, DRIVE Project, del n°11, INRETS, France.

La Gennusa, Nicoletti, Rizzo, Scaccianoce, “mobilità sostenibile in ambito urbano, proposta di un modello per la valutazione di scenari alternativi”, D.R.E.A.M., università di Palermo.

M. Agostinacchio, S. Olita, (2003), “Sull’applicabilità di un modello diffusivo per la previsione delle concentrazioni di inquinanti da traffico veicolare in ambito urbano”, Atti del XIII Convegno Nazionale S.I.I.V. (Società Italiana Infrastrutture Viarie) – Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Padova 30-31 Ottobre 2003.

M. Mahmood, B. van Arem and TRAIL Research School, 2008, A Simulation framework for modeling the impacts of an integrated road-vehicle system on local air quality, Centre for Transport Studies, University of Twente, the Netherlands

Manifesto dell’ISSI sulla mobilità urbana sostenibile, in città liberi dall’auto (Roma, 20 marzo 2002).

Modelli e metodi per l’analisi e il controllo delle reti di trasporti, Ennio Cascetta, Economia Ambientale e dei Trasporti 1a edizione 1993.

Nuzzolo et al. (1993), Simulazione dell’inquinamento da traffico nelle aree urbane.

Ostrom et al. (1991), FREQ10, modification: emission factors, gasoline consumption and growth factor, giugno 1991, institute of transportation studies university of California, Berkeley.

P. Lenschow, H. J. Abraham (2001), “some ideas about the sources of PM10” department of urban development, Berlin, German.

P.G. Boulter and I.S. McCrae, 2007, The links between micro-scale traffic, emission and air pollution models, Transport Research Laboratory (TRL), published project report PPR 269.

R.M. Heck, R.J. Farrauto, Catalytic air pollution, John Wiley & Sons, New York, 1995.

Tartaglia M. (1995), la simulazione dinamica delle emissioni inquinanti da traffico, quaderni dell'istituto di trasporti n°48, marzo 1995, Università di Bologna, Bologna.

Tartaglia M., "L'inquinamento dell'aria da traffico stradale", editoriale BIOS S.A.S., 1999.

Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software, Jeffery A. Lindley, P.E. (2004).

Williamson S. J. (1993), fundamentals of air pollution, Addison-Wesley, reading mass.

Zito, P., Chen, H., Bell, M.C., 2008. Predicting real-time roadside CO and NO2 concentration using neural networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System 9 (3), 514-522.

ACI (2003): [http://www.aci.it/sezione\\_istituzionale/studi-e-ricerche.html](http://www.aci.it/sezione_istituzionale/studi-e-ricerche.html)

CONTO NAZIONALE TRASPORTI: [www.infrastrutturetrasporti.it](http://www.infrastrutturetrasporti.it)

COPERT IV USER'S MANUAL (2008): <http://lat.eng.auth.gr/copert/files/tech01.pdf>.

NORMATIVA ARIA: [http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Temi/Aria/Normativa\\_Aria/](http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Temi/Aria/Normativa_Aria/).

UNIONE PETROLIFERA: [www.unione petrolifera.it](http://www.unione petrolifera.it)