

ARPA Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente



***Progetto PUMI
Il Particolato Fine nell'Atmosfera
Urbana Milanese***

RELAZIONE SINTETICA FINALE

Marzo 2003

**Attività svolte dalle Unità Operative coinvolte nel Progetto PUMI come previsto
dalla Deliberazione della Giunta del Comune di Milano n°3528/2000 del
22.12.2000 Prot. Gen. 6892.021/2000**

La presente **Relazione Sintetica Finale** del Progetto PUMI “*Il particolato fine nell’atmosfera urbana milanese*” è stata redatta dal Coordinatore Scientifico del Progetto **Dr. Vorne Gianelle**, ARPA Lombardia Dipartimento Provinciale di Milano.

Essa rappresenta sintesi della **Relazione Finale** del Progetto (dicembre 2002) della quale sono autori:

Ing. Francesco Avella – Stazione Sperimentale per i Combustibili

Dr. Ezio Bolzacchini – DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca

Dr. Michela Ceriani – IFGA, Università degli Studi di Milano

Dr. Davide Faedo - Stazione Sperimentale per i Combustibili

Dr. Paola Fermo – DCIMA, Università degli Studi di Milano

Dr. Vorne Gianelle – ARPA Lombardia

Dr. Stefania Gilardoni - DCIMA, Università degli Studi di Milano

Prof. Michele Giugliano – DIIAR, Politecnico di Milano

Dr. Mita Lapi – Fondazione Lombardia per l’Ambiente

Ing. Giovanni Lonati – DIIAR, Politecnico di Milano

Prof.ssa Maria Grazia Marazzan – IFGA, Università degli Studi di Milano

Dr. Grazia Perrone – DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca

Dr. Luca Pozzoli – DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca

Prof. Bruno Rindone - DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca

Dr. Gianluigi Valli – IFGA, Università degli Studi di Milano

Dr. Roberta Vecchi – IFGA, Università degli Studi di Milano

Hanno inoltre contribuito alle attività a campo e di laboratorio, di elaborazione dati o di segreteria tecnico-scientifica:

Dr. Laura Barbieri – Fondazione Lombardia per l’Ambiente
P.I. Roberto Baroni - ARPA Lombardia
Sig. Cesare Bernini - Stazione Sperimentale per i Combustibili
Sig.ra Marina Betti - ARPA Lombardia
Dr. Luca Bianchi – ARPA Lombardia
Dr. Paola Butelli - DIIAR, Politecnico di Milano
Dr. Donatella Carpi - DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca
Dr. Roberto Casati - DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca
Sig. Francesco Castelli - Fondazione Lombardia per l’Ambiente
Sig. Claudio Cattoni - Stazione Sperimentale per i Combustibili
Dr. Simone Citterio - DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca
Dr. Maria Chiesa – Fondazione Lombardia per l’Ambiente
Dr. Michele D’Angelo - DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca
Dr. Carlo Ferrari – ARPA Lombardia
Dr. Massimo Ferrario - Fondazione Lombardia per l’Ambiente
Dr. Elisa Galimberti - - ARPA Lombardia
P.I. Enrico Gelmi - DIIAR, Politecnico di Milano
Ing. Gloria Mognaschi – ARPA Lombardia
Dr. Giovanna Liverani - DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca
Dr. Elena Liverta - DISAT, Università degli Studi di Milano-Bicocca
Sig. Luca Pagani - ARPA Lombardia
Ing. Dip. Stefano Pinotti – ARPA Lombardia
Dr. Laura Romele - DIIAR, Politecnico di Milano
P.I. Giorgio Siliprandi – ARPA Lombardia
Ing. Ruggero Tardivo - DIIAR, Politecnico di Milano

Si ringrazia per il prezioso contributo alle discussioni periodiche del Progetto PUMI:

Prof. Antonio Ballarin Denti - Fondazione Lombardia per l’Ambiente
Avv. Achille Cutrera - Fondazione Lombardia per l’Ambiente
Dr. Angelo Giudici – SPASI, Regione Lombardia
Dr. Simone Orsi – Comune di Milano
Dr. Roberto Zangari – per l’UO Programmazione, Regione Lombardia

Introduzione

Il PM10 è attualmente, insieme all'ozono, l'inquinante dell'aria di maggior interesse per la città di Milano e per tutta la Regione Lombardia; non solo non vengono rispettati per questo inquinante i limiti nazionali sulle concentrazioni medie annuali, ma frequenti sono nell'arco dell'anno i periodi di inquinamento elevato tali da costringere l'Amministrazione Pubblica ad attuare anche provvedimenti d'emergenza.

Il PM10 è costituito da un insieme di particelle aventi caratteristiche chimiche e fisiche (composizione, dimensioni, forme, comportamento aerodinamico, ecc.) tra loro molto diverse. Queste differenze sono principalmente correlate con le caratteristiche proprie delle diverse fonti di inquinamento, oltre che alle trasformazioni dinamiche che le particelle possono subire in atmosfera. Inoltre gli effetti sanitari del PM10 dipendono non solo dai livelli di esposizione a questo inquinante, ma anche dalla "qualità" delle particelle di polvere che lo costituiscono.

Nella presente relazione si riportano sinteticamente i principali risultati ottenuti dal progetto PUMI (Particolato Urbano Milanese), finanziato dal Comune di Milano, dalla Regione Lombardia, dalla Fondazione Lombardia per l'Ambiente (FLA) e dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia (ARPA), con **l'obiettivo generale di acquisire conoscenze sulle caratteristiche chimiche e fisiche del PM10 disperso nell'area urbana milanese, e sulla qualità e quantità di polveri emesse dalla diverse sorgenti, come elementi fondamentali per valutare il contributo delle diverse fonti all'inquinamento da particolato e per la successiva elaborazione del modello decisionale.**

L'obiettivo generale è stato suddiviso in 4 obiettivi specifici:

1. Determinazione della composizione chimica del PM10 e del PM2.5 in Milano città, sia per valutare il contributo delle diverse sorgenti, che per avere le informazioni necessarie per una successiva e più corretta valutazione dell'impatto sanitario, rispetto a quanto è possibile stimare con la sola concentrazione di massa del PM10.
2. Caratterizzazione delle emissioni delle principali sorgenti di inquinamento da PM10 e PM2.5 per la città di Milano (in particolare impianti di riscaldamento e traffico autoveicolare);
3. Descrizione fenomenologica del particolato fine come base conoscitiva per l'organizzazione degli interventi, da ottenersi attraverso l'analisi statistica delle serie storiche disponibili.

4. Creazione di un sito web, con due livelli di accesso: un primo livello di accesso pubblico, con l'illustrazione del progetto, i finanziatori, le Unità Operative che vi hanno partecipato e i risultati finali; un secondo livello di accesso riservato alle Unità Operative per rendere più efficace lo scambio di dati.

Nel progetto si è considerata quindi non solo la caratterizzazione del PM10, ma anche del PM2.5. Infatti in un prossimo futuro l'Unione Europea, rispettando gli impegni dichiarati nella Direttiva 30/99, emanerà direttive sui valori limite sul PM2.5, ovvero la frazione del PM10 composta da particelle di dimensioni sufficientemente piccole da superare le vie aeree superiori ed intermedie del sistema respiratorio umano (frazione respirabile – dimensione < 2.5 µm).

L'esecuzione del progetto è stata affidata alle 6 Unità Operative (UO) indicate in tabella 1.1

Tabella 1.1: le Unità Operative partecipanti al progetto

Unità Operativa	Istituzione	Sigla
UO 1	Università degli Studi di Milano - Bicocca. Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio	DISAT
UO 2	Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia	ARPA
UO 3	Stazione Sperimentale per i Combustibili	SSC
UO 4	Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento Sezione Ambientale	DIAR
UO 5	Università degli Studi di Milano Istituto di Fisica Generale Applicata	IFGA
UO 6	Fondazione Lombardia per l'Ambiente	FLA

Le attività da svolgere sono state suddivise in 5 programmi di lavoro (PLG), affidate alle diverse UO, come indicato in tabella 1.2

All'avvio del progetto sono stati inoltre individuati come Coordinatore Scientifico del Progetto il Dott. Vorne Gianelle dell'ARPA Lombardia - Dipartimento Sub-Provinciale Città di Milano e Melegnano e come Segretario Tecnico-Scientifico del Progetto la Dott.ssa Mita Lapi della Fondazione Lombardia per l'Ambiente.

Tabella 1.2: i Programmi di Lavoro del progetto e le UO referenti

PLG 1	Determinazione dei Fattori di Emissione e Raccolta del Particolato dalle Sorgenti di Combustione	
Unità Operativa responsabile	UO 3	SSC
Unità Operative coinvolte	UO 2	ARPA
	UO 3	SSC
PLG 2	Raccolta del Particolato Atmosferico Urbano (PM10 e PM2.5)	
Unità Operativa responsabile	UO 2	ARPA
Unità Operative coinvolte	UO 4	DIIAR
	UO 2	ARPA
	UO 5	IFGA
PLG 3	Caratterizzazione Chimico-Fisica del Particolato Atmosferico e Definizione di Composti Marker per le Sorgenti	
Unità Operative responsabile	UO 1	DISAT
Unità Operative coinvolte	UO 2	ARPA
	UO 1	DISAT
	UO 5	IFGA
PLG 4	Valutazione del Ruolo delle Fonti con Tecniche Statistiche e Indicatori per il Modello Decisionale	
Unità Operativa responsabile	UO 4	DIIAR
Unità Operative coinvolte	UO 2	ARPA
	UO 4	DIIAR
PLG 5	Sistema Informativo Interattivo, Web	
Unità Operativa responsabile	UO 1	DISAT
Unità Operative coinvolte	UO 1	DISAT
	UO 6	FLA

Nei capitoli successivi si illustrano i principali risultati di ciascun programma di lavoro.

Attività e risultati del PLG1

Determinazione dei fattori di emissione e raccolta del particolato dalle sorgenti di combustione

Nel corso del 2002, la Regione Lombardia, attraverso l'I.Re.R., ha finanziato una ricerca sull'”Individuazione dei fattori di emissione e dei sistemi di abbattimento del PM10 dagli impianti energetici e dai veicoli”

Al fine di ottimizzare le risorse disponibili ed evitare sovrapposizioni, si è concordato con i finanziatori del progetto (Comune di Milano, Regione Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente, ARPA Lombardia) di concentrare gli sforzi all'interno del progetto “PUMI” sulla caratterizzazione delle emissioni di alcuni autoveicoli rappresentativi del parco veicoli lombardo.

La Regione Lombardia ha dato la disponibilità dei risultati ottenuti dal lavoro dell'I.Re.R., al fine di pervenire ad un complessivo ed integrato quadro di conoscenze sui fattori di emissione di particolato fine per le sorgenti di combustione.

Grazie a questo accordo, è stato possibile ampliare da due a sei le autovetture (tre autovetture ed un furgone con motori diesel, due autovetture con motori a benzina) e da due a quattro i combustibili da sottoporre alle prove.

Le caratteristiche dei veicoli provati sono indicate in tabella 2.1.

Tabella 2.1: Caratteristiche degli autoveicoli di prova

Autoveicolo	A	B	C	D	E	F
Modello	Fiat Punto TD	A.R. 156 1.9 JTD	A.R. 147 1.9 JTD	Fiat Ducato 14	Fiat Stilo 1.6	Fiat Tipo 1.4
Livello di omologazione	Diesel Euro I	Diesel Euro II	Diesel Euro III	Diesel Euro II	Benzina Euro III	Benzina Euro I
Targa	AF 412 KW	BE 639 HK	AF 412 KW	BE 376 HL	CC 245 ZK	MI 9R6552
Chilometraggio	131.000 km	72.500 km	3.700 km	104.000 km	1000 km	151.000 km
Motore	4 cilindri in linea IID, TC	4 cilindri in linea ID, TC	4 cilindri in linea ID, TC	4 cilindri in linea IID, ASP	4 cilindri in linea ID	4 cilindri in linea
Cilindrata	1698 cc	1899 cc	1910 cc	2800 cc	1596 cc	1372 cc
Alimentazione	gasolio	gasolio	gasolio	gasolio	benzina	benzina
Dispositivi antinquinamento	nessuno	catalizzatore ossidante	catalizzatore ossidante	catalizzatore ossidante	TWC	nessuno
Potenza max	52 kW @ 4500 giri/min	85 kW @ 4000 giri/min	85 kW @ 4000 giri/min	63 kW @ 3800 giri/min	76 kW @ 5750giri/min	56 kW @ 6000 giri/min
Coppia max	134 Nm @ 2500 giri/min	275 Nm @ 2000 giri/min	275 Nm @ 2000 giri/min	179 Nm @ 2000 giri/min	145 Nm @ 4000 giri/min	106 Nm @ 2900 giri/min

I veicoli sono stati selezionati tra i modelli più diffusi in Lombardia, con differente tecnologia motoristica: modello A: primi anni '90, modello B: fine anni '90, modello C: omologato nel 2001; modello D: fine anni '90, veicolo commerciale di medie dimensioni; modello E: recente, con tecnologia motoristica avanzata e convertitore catalitico trifunzionale (TWC); modello F: con sistema di alimentazione a carburatore e privo del TWC.

In tabella 1.2 si riportano le principali caratteristiche dei combustibili diesel utilizzati per le prove.

Tabella 1.2: Principali caratteristiche dei combustibili diesel di prova

Parametro	u.m.	Metodo	G1	G2	G3
Densità @ 15 °C	kg/m ³	UNI EN ISO 12185	832,9	824,3	821,4
Viscosità @ 40°C	mm ² /s	UNI EN ISO 3104	3,030	2,608	2,079
Contenuto di zolfo	% m/m	EN ISO 14596	0,0240	0,0040	0,0014
Idrocarburi monoaromatici	% m/m	EN 12916	19,6	17,4	16,5
Idrocarburi diaromatici	% m/m	EN 12916	3,7	2,3	4,4
Idrocarburi triaromatici	% m/m	EN 12916	0,4	0,3	0,3
Idrocarburi poliaromatici	% m/m	EN 12916	4,1	2,6	4,7
Idrocarburi aromatici totali	% m/m	EN 12916	23,7	20,0	21,2
Punto di infiammabilità	°C	UNI EN 22719	62,0	62,5	69,0
Contenuto di acqua	% m/m	ISO 12937	0,009	0,006	0,007
Distillazione		ISO 3405			
<i>Pi (Punto iniziale)</i>	°C		174,6	167,7	183,7
<i>T10 (il 10% in vol. evapora a)</i>	°C		221,6	197,7	208,1
<i>T50 (il 50% in vol. evapora a)</i>	°C		277,2	265,8	244,2
<i>T90 (il 90% in vol. evapora a)</i>	°C		343,2	338,4	291,0
<i>T95 (il 95% in vol. evapora a)</i>	°C		361,8	357,1	303,9
<i>Tf (Temperatura finale)</i>	°C		370,2	363,9	313,3
<i>Recuperato</i>	% vol		97,6	97,6	98,0
<i>Residuo</i>	% vol		1,2	1,4	1,2
<i>Perdite</i>	% vol		1,2	1,0	0,8
<i>E250 °C (evaporato a 250 °C)</i>	% vol		28,0	40,2	56,2
<i>E350 °C (evaporato a 350 °C)</i>	% vol		92,1	92,4	-
<i>Il 95% recuperato a</i>	°C		361,8	357,1	303,9
Indice di Cetano	-	EN ISO 4264	56,2	55,6	52,6
Numero di Cetano	-	ISO 5165	53,2	52,9	53,2

Il combustibile G1 è un gasolio di tipo convenzionale, il G2 ha un tenore di zolfo di 50 mg/kg, il G3 ha un tenore di zolfo di 10 mg/kg. è stato accertato che il gasolio tipo G3 influenza sensibilmente le emissioni inquinanti nei gas di combustione (cfr. es. progetto europeo EPEFE).

In tabella 2.3 si riportano le principali caratteristiche della benzina di prova utilizzata: si tratta di una benzina senza piombo commerciale.

Tabella 2.3 Principali caratteristiche della benzina di prova

Parametro	u.m.	Metodo	B
Densità @ 15 °C	kg/m ³	UNI EN ISO 12185	741,7
Tensione di vapore	kPa	PR EN 13016-1	67,6
Contenuto di zolfo	% m/m	EN ISO 14596	0,0049
Idrocarburi paraffinici	% m/m	ASTM D1319A	61,0
Idrocarburi olefinici	% m/m	ASTM D1319A	5,4
Idrocarburi aromatici	% m/m	ASTM D1319A	32,3
MTBE	% m/m	UNI EN 13132	1,4
<i>Contenuto di benzene</i>	% m/m	UNI EN 12177	0,89
<i>Contenuto di ossigeno</i>	% m/m	UNI EN 13132	0,25
<i>Distillazione</i>		ISO 3405	
<i>Pi (Punto iniziale)</i>	°C		33,5
<i>T10 (il 10% in vol. evapora a)</i>	°C		51,3
<i>T50 (il 50% in vol. evapora a)</i>	°C		93,5
<i>T90 (il 90% in vol. evapora a)</i>	°C		152,9
<i>T95 (il 95% in vol. evapora a)</i>	°C		163,8
<i>Tf (Temperatura finale)</i>	°C		194,4
<i>Recuperato</i>	% vol		98,7
<i>Residuo</i>	% vol		1,2
<i>Perdite</i>	% vol		0,1
<i>E70 °C (evaporato a 70 °C)</i>	% vol		31,2
<i>E100 °C (evaporato a 100 °C)</i>	% vol		54,5
<i>E150 °C (evaporato a 150 °C)</i>	% vol		88,4
Numero di Ottano Research	-	ISO 5164	95,2

Le prove sono state effettuate sul banco dinamometrico “a rulli” della Stazione Sperimentale dei Combustibili, tarato per la simulazione degli attriti; sono stati adottati sia i cicli di guida previsti dalle norme dell’U.E., così da avere dati confrontabili con quelli prodotti da altri enti in Europa, sia un ciclo appositamente elaborato per la simulazione del traffico milanese.

Le principali caratteristiche dei cicli di guida sono riportate in tabella 2.4 e in figura 1.1; il quadro generale delle prove è riportato in tabella 2.5, mentre in figura 2.2 si mostra lo schema generale del sistema di campionamento e analisi delle emissioni degli autoveicoli.

Sono state quindi quantificate le emissioni degli inquinanti regolamentati (CO, THC, NO_x), del PM10, e di alcuni altri importanti inquinanti (composti carbonilici in fase gassosa, fenoli, nitro-

fenoli, IPA e nitro-IPA in fase gassosa e nel particolato, metalli e composti ionici nel particolato) per ogni ciclo di guida. Il particolato emesso dagli autoveicoli è stato caratterizzato anche dal punto di vista dimensionale e morfologico. Oltre alle analisi con strumentazione automatica, sono stati raccolti e analizzati in laboratorio oltre 500 campioni.

Tabella 2.4: principali caratteristiche di cicli di guida

Ciclo di guida		TI	UDC (ECE)	EUDC
Durata	s	1276	780	400
Velocità media	km/h	11,4	19,0	62,6
Velocità massima	km/h	46,0	50,0	120,0
Lunghezza di percorso	km	4,040	4,052	6,955
tempo a regime minimo	%	39,2	30,8	10,0

Figura 2.1: i cicli di guida delle prove

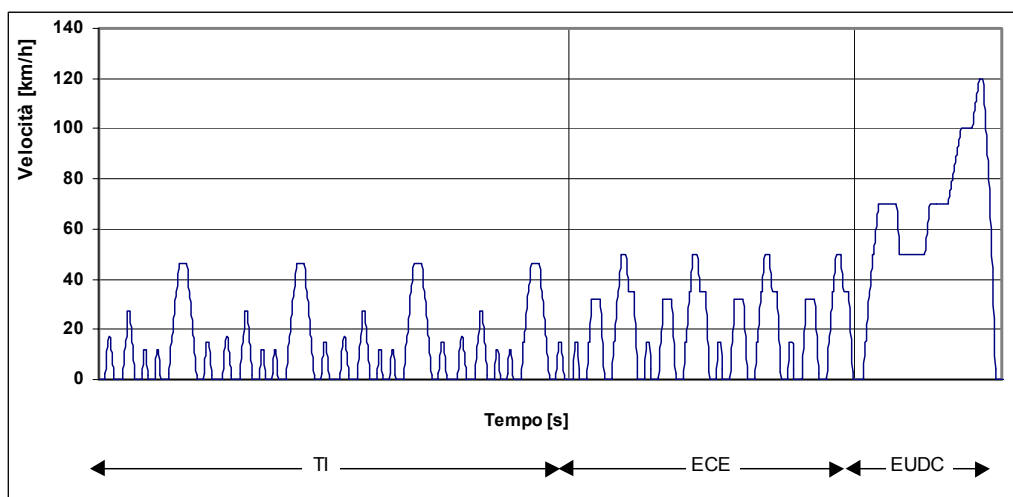
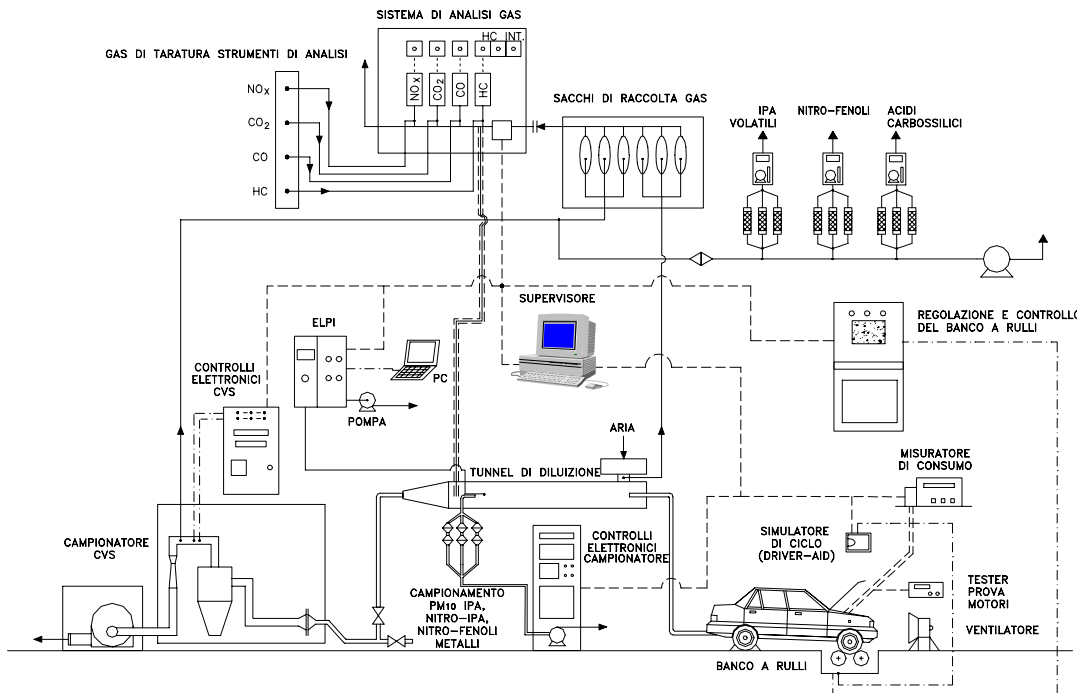


Tabella 2.5: quadro generale del programma sperimentale di prove

<i>AUTOVEICOLO</i>	<i>COMBUSTIBILE DI PROVA</i>			
	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>	<i>B</i>
<i>A</i>	SI	SI	NO	NO
<i>B</i>	SI	SI	SI	NO
<i>C</i>	SI	SI	NO	NO
<i>D</i>	SI	SI	SI	NO
<i>E</i>	NO	NO	NO	SI
<i>F</i>	NO	NO	NO	SI

Figura 2.2: schema generale del sistema di campionamento e di analisi delle emissioni



La gran mole di dati prodotti è giacente nel sito web del progetto (cfr. Attività e risultati del PLG5) Si mostrano di seguito i principali risultati sulle emissioni del PM10 (tabelle 2.6 e figura 2.3 per i veicoli diesel, tabella 2.7 e figura 2.4 per le autovetture a benzina)

Figura: 2.3: emissioni di PM10 dai veicoli diesel provati per ogni ciclo di guida

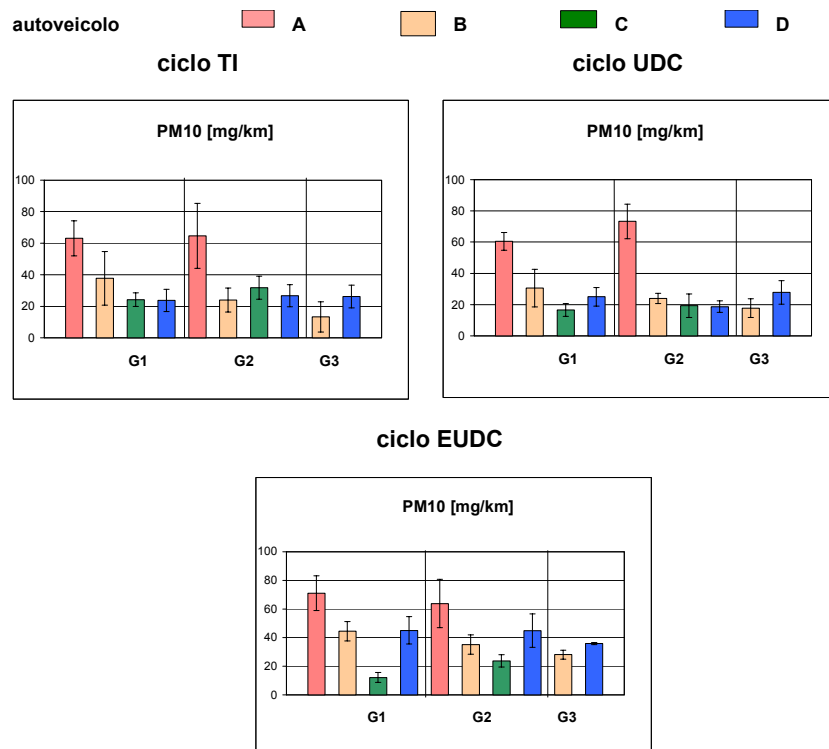


Tabella 2.6 Emissioni medie di PM10 (espressa in massa e in numero) nei tre cicli di guida degli autoveicoli diesel alimentati con il gasolio convenzionale e con i combustibili a basso tenore di zolfo

GASOLIO COMMERCIALE						
VEICOLO	PM₁₀ in massa			PM₁₀ in numero		
	TI	UDC	EUDC	TI	UDC	EUDC
	<i>mg/km</i>			<i>N/km</i>		
A	63,2	60,5	71,1	4,37E+17	1,98E+17	7,42E+16
B	37,7	30,6	44,4	4,40E+16	3,30E+16	1,96E+16
C	24,2	16,5	12,2	5,86E+16	2,99E+16	1,76E+16
D	23,8	25,0	45,1	1,48E+17	7,08E+16	7,62E+16

GASOLIO ULSD 50 mg/kg S						
VEICOLO	PM₁₀ in massa			PM₁₀ in numero		
	TI	UDC	EUDC	TI	UDC	EUDC
	<i>mg/km</i>			<i>N/km</i>		
A	64,7	73,3	63,8	3,43E+17	1,69E+17	6,49E+16
B	24,0	24,0	35,2	5,87E+16	3,81E+16	2,41E+16
C	31,8	19,3	23,8	6,35E+16	3,37E+16	1,93E+16
D	26,7	18,7	44,9	1,69E+17	7,85E+16	6,53E+16

GASOLIO ULSD 10 mg/kg S						
VEICOLO	PM₁₀ in massa			PM₁₀ in numero		
	TI	UDC	EUDC	TI	UDC	EUDC
	<i>mg/km</i>			<i>N/km</i>		
B	13,2	17,7	28,2	4,01E+16	2,30E+16	1,71E+16
D	26,2	27,8	35,9	1,66E+17	7,82E+16	6,62E+16

Figura 2.4: emissioni di PM10 dai veicoli a benzina provati per ogni ciclo di guida

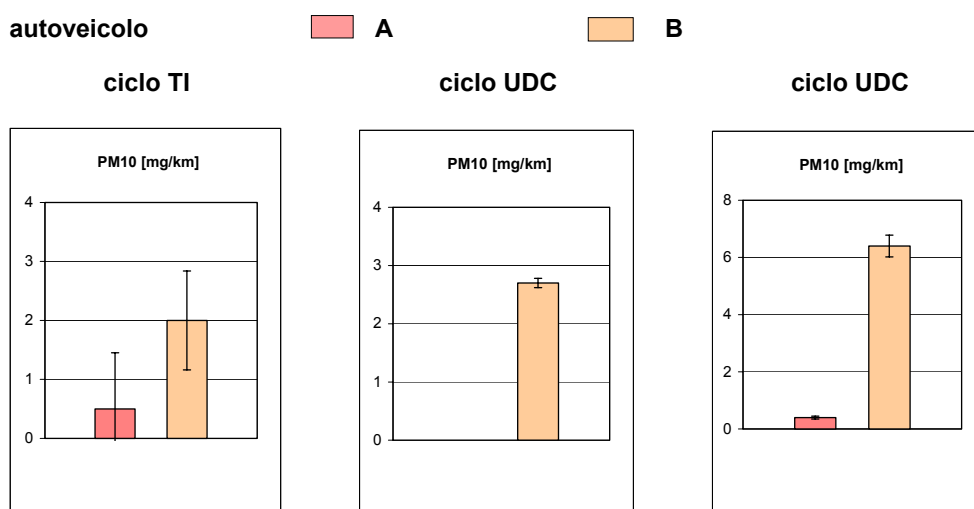


Tabella 2.7: Emissioni medie del PM₁₀ delle autovetture a benzina nei tre cicli di guida

VEICOLO	PM ₁₀ in massa			PM ₁₀ in numero		
	TI	UDC	EUDC	TI	UDC	EUDC
	mg/km			N/km		
E	0,5	< 0,1	0,4	2,40E+12	1,04E+12	1,04E+12
F	2,0	2,7	6,4	2,00E+13	3,28E+13	2,63E+14

L'emissione di PM10 è risultata più elevata per l'autoveicolo A, in qualunque situazione di guida (cicli TI, UDC ed EUDC), indipendentemente dal tipo di combustibile impiegato. L'emissione del PM10 degli autoveicoli B, C e D, di generazione più recente, costruiti con tecnologia motoristica più avanzata e dotati tutti di convertitore catalitico ossidante, è risultata meno del 50% di quella determinata nei gas di scarico del veicolo A.

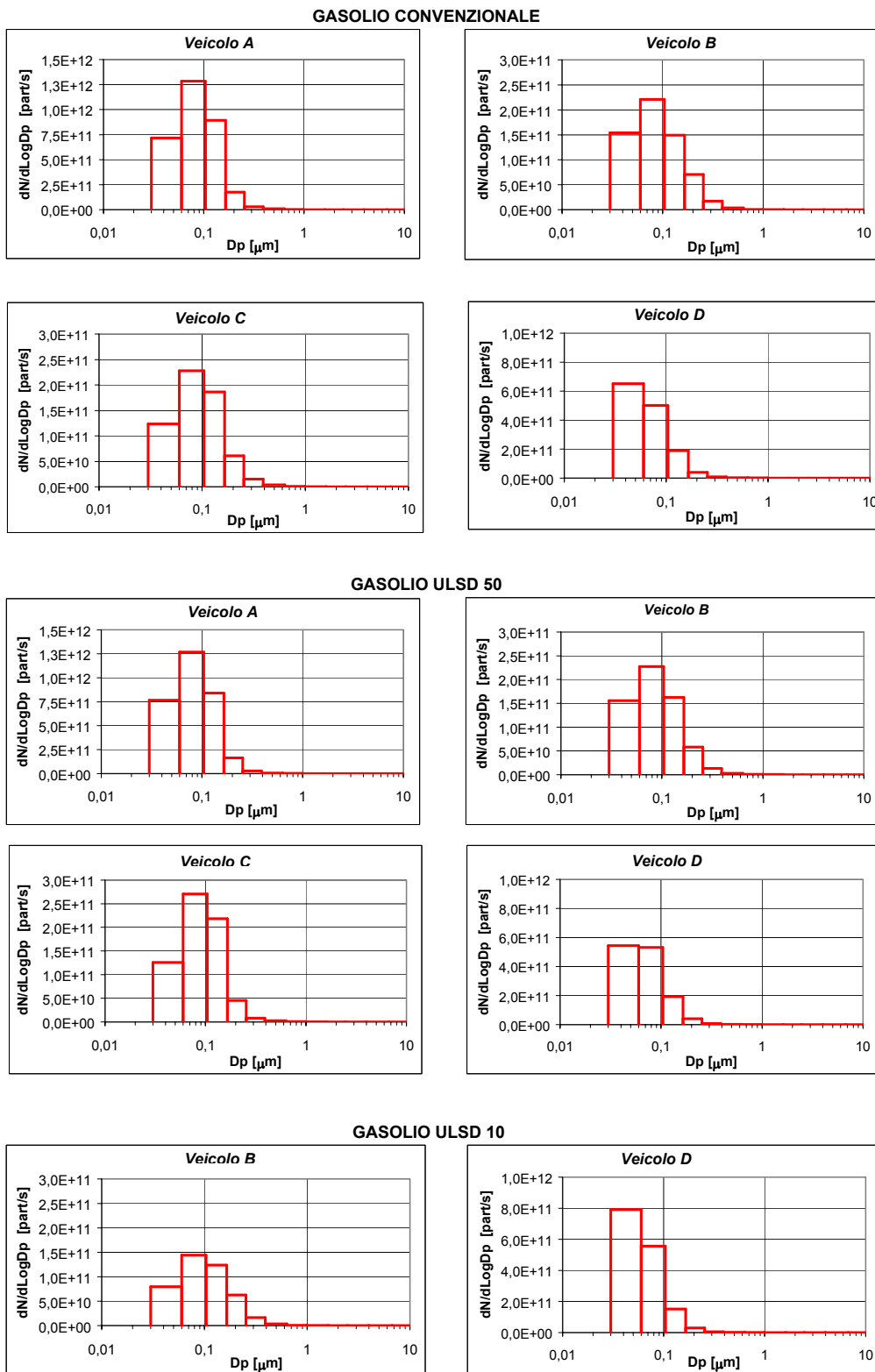
I risultati ottenuti non hanno consentito di stabilire una correlazione netta tra il tenore di zolfo del combustibile e l'emissione di PM10.

Inoltre, per tutti gli autoveicoli diesel, non è osservata una variazione significativa dell'emissione in massa del PM10 cambiando le condizioni di guida (cicli TI, UDC ed EUDC).

La distribuzione dimensionale delle particelle emesse dai veicoli diesel non sono risultate significativamente differenti in relazione al tipo di gasolio o al ciclo di guida.

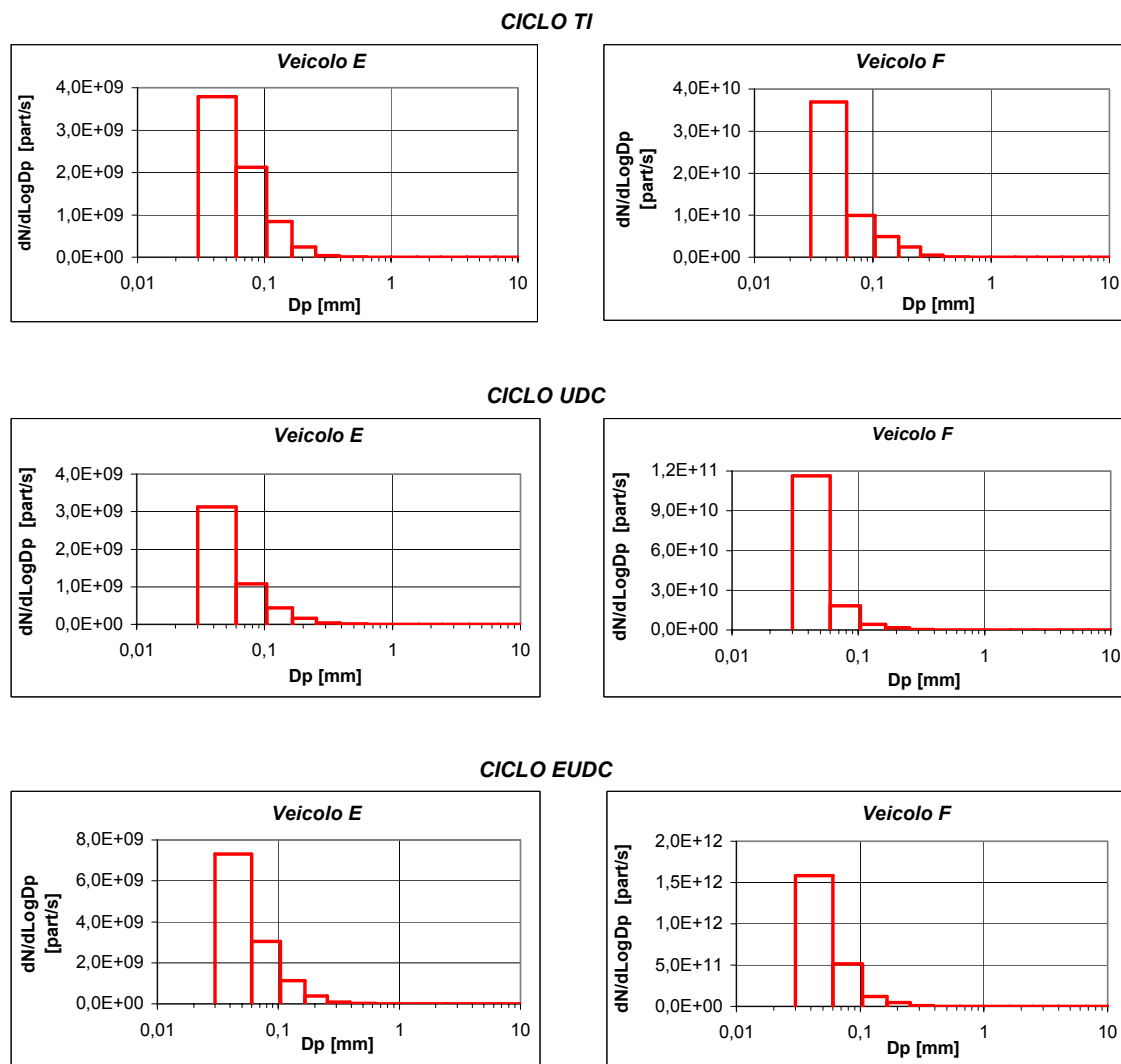
Le particelle emesse hanno dimensioni finissime, sempre inferiori a 1 µm, con moda vicino a 0.1 µm per tutti i veicoli diesel, indipendentemente dalle altre condizioni di prova (cfr. come esempio figura 2.5).

Figura 2.5: Distribuzione dimensionale per il ciclo TI del particolato emesso dai veicoli diesel provati



Per quanto riguarda i veicoli a benzina è risultato che il modello E (Euro III) ha emissioni di PM10 decisamente inferiori rispetto al modello F (Euro I), sia in numero di particelle che in massa. Dal confronto delle figure 2.5 e 2.6 risulta che le dimensioni delle particelle emesse dai veicoli a benzina sono un po' più fini rispetto a quelle emesse dai veicoli diesel.

Figura 2.6: Distribuzione dimensionale del particolato emesso dalle due autovetture a benzina



L'analisi dei dati prodotti porta alle seguenti sintetiche osservazioni:

1. Il livello tecnologico degli autoveicoli, sia diesel che a benzina, è il fattore più importante che influenza l'emissione del PM10: gli autoveicoli di più vecchia generazione (Euro I) risultano, infatti, i maggiori emettitori di particolato.
2. Il tenore di zolfo nel combustibile diesel non ha determinato significative variazioni dell'emissione di PM10.

3. Le condizioni di guida dell'autoveicolo (velocità/carico) influenzano sensibilmente l'emissione del PM10, tranne che per l'autovettura a benzina di nuovo modello. Con tutti gli autoveicoli provati, l'emissione più intensa di PM10 è risultata associata maggiormente alle fasi di accelerazione piuttosto che a quelle di velocità costante e di regime minimo del motore (sosta del veicolo).
4. I veicoli diesel hanno emissioni di PM10 da 10 a 100 volte superiori a quelle dei veicoli a benzina, in relazione al livello tecnologico delle vetture considerate.
5. Considerate le dimensioni delle particelle emesse, nella prospettiva delle prossime Direttive Europee sulla normazione delle immissioni di PM2.5, le osservazioni effettuate sulle emissioni di PM10 dagli autoveicoli, possono essere riferite integralmente anche al PM2.5.

Attività e risultati dei PLG2 e PLG3

Raccolta e Caratterizzazione Chimico-Fisica del Particolato Atmosferico (PM10 e PM2.5); Definizione di Composti Marker per le Sorgenti.

La raccolta del PM10 è stata effettuata in due siti della Città di Milano in Via Messina, all'interno della Caserma dei Vigili del fuoco e in Via Celoria, presso il campus dell'Università degli Studi; entrambi i siti non risentono direttamente delle sorgenti locali e possono quindi essere considerati rappresentativi dell'inquinamento di fondo urbano. In Via Messina sono stati inoltre installati campionatori per il PM2.5 e per il PM1, campionatori "alto volume" per la raccolta di grandi quantità di PM10, analizzatori in continuo della distribuzione dimensionale del particolato; nel sito è presente anche una stazione della rete di monitoraggio in continuo della qualità dell'aria. Il sito di Via Messina rappresenta quindi il "super sito" della città di Milano.

Oltre alla determinazione della concentrazione di massa di PM10 e PM2.5 mediante metodo gravimetrico (metodo di riferimento per l'UE), sui campioni di particolato raccolti (PM10 e PM2.5) in entrambi i siti sono state effettuate analisi per la determinazione della concentrazione dei seguenti elementi: Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, e Pb. Su campioni raccolti in Via Messina sono state effettuate analisi anche per la determinazione della concentrazione di IPA e nitro-IPA (fenantrene - PH -, antracene - AN-, pirene - PYR -, benzo[a]antracene - BAA -, CHRcrisene - CHR -, benzo[e]pirene - BEP-, benzo[b]fluorantene - BBF -, benzo[k]fluorantene - BKF -, benzo[a]pirene - BAP -, dibenzo[a,h]antracene - DBA -, benzo[g,h,i]perilene - BGP -, fluorantene - FLT -, indeno[1,2,3-c,d]pirene - INP, 1-nitro-Pirene - 1NPYR -, 6-nitro-cirsene - 6NCRI -) di cationi e anioni (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) e il carbonio totale.

La gran mole di dati prodotti è giacente nel sito web del progetto (cfr. Attività e risultati del PLG5). Di seguito si riportano sinteticamente i principali risultati.

La concentrazione di massa e il rapporto PM2.5/PM10

In tabella 3.1. si riportano le concentrazioni medie annuali (2 Dicembre 2001 e il 2 Dicembre 2002) del PM10 e del PM2.5 misurate con il metodo di riferimento gravimetrico e i rapporti medi annuale e per i semestri "freddo" e "caldo" calcolati dalle concentrazioni medie giornaliere di PM2.5 e di PM10. I dati indicano che in media il 63% del PM10 raccolto è costituito da particelle fini, senza variazioni significative tra periodo primaverile-estivo ed autunnale- invernale.

Tabella 3.1: concentrazioni medie annuali e rapporti medi tra PM2.5 e PM10

	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5/PM10 media annuale	PM2.5/PM10 Prim-est	PM2.5/PM10 Aut-Inv
Valore medio	42	67	0.634	0.621	0.647
Deviazione standard	30	42	0.170	0.157	0.183

Il valore limite annuale di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM10 è largamente superato.

Gli elementi

I dati sui 16 elementi rilevati (Al, Si, Ca, Cl, K, Ti, Fe, Cu, Cr, Mn, Ni, Zn, S, V, Pb e Br) sono stati analizzati attraverso metodi chemiometrici (analisi delle componenti principali - PCA).

Con la PCA nel PM10 si individuano quattro gruppi di elementi a cui si possono associare diverse fonti. Il gruppo da Al, Si, Ca, K e Ti può essere facilmente interpretato come la componente di origine terrigena; il Pb e il Br, in passato associati alle emissioni degli autoveicoli, ora sono emessi da altre sorgenti; Ni, Zn, Cr, Mn, Cu e Fe sono caratteristici dell'industria metallurgica e di altri impianti industriali; lo zolfo come elemento a se stante poiché, oltre che dipendente dalle combustioni, è coinvolto nei processi chimici e fotochimici in fase eterogenea (cfr. paragrafo ioni inorganici). Con la stessa analisi sul PM2.5, il gruppo degli elementi terrigeni è molto meno identificabile; ciò dipende dal fatto che le particelle a forte componente terrigena sono in genere grossolane e quindi nelle particelle di diametro minore a $2.5 \mu\text{m}$ la loro componente non è rilevante. Nella tabella 3.1 si riportano le concentrazioni medie relative degli elementi nel PM10 e nel PM2.5.

Tabella 3.1: concentrazioni elementali medie relative nel PM10 e nel PM2.5

		Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Pb	elementi di origine terrigena (Al, Si, K, Ca, Ti)
PM2,5	media % in peso	0,12	0,41	7,52	0,23	0,50	0,74	0,06	0,05	0,01	0,04	0,47	0,01	0,05	0,38	0,03	0,19	1,0
	dev.st	0,08	0,40	3,34	0,18	0,44	1,01	0,06	0,02	0,01	0,02	0,31	0,01	0,07	0,25	0,02	0,13	1,1
PM10	media % in peso	0,69	2,79	3,89	0,36	0,74	3,35	0,13	0,02	0,02	0,07	3,23	0,01	0,08	0,37	0,03	0,17	7,6
	dev.st	0,30	1,36	2,29	0,38	0,35	1,59	0,06	0,01	0,01	0,02	1,13	0,01	0,04	0,26	0,02	0,17	3,4

Dall'analisi della tabella risulta evidente che, oltre al minor contributo al PM2.5 rispetto al PM10 degli elementi terrigeni (es. Al, Si, Ca, Ti), gli elementi in tracce più strettamente legati ai processi di combustione quali V, Cr, Ni, Cu, Zn, Br e Pb non hanno un contributo significativamente differente nella composizione del PM2.5 e del PM10.

La Direttiva Europea 99/30/CE, recepita dalla normativa italiana (DM 60 del 2.04.02), prevede un limite sulla concentrazione media annuale del piombo pari a $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a partire dal 2005. Tale limite in Milano è ampiamente rispettato, essendo le concentrazioni medie annuali degli ultimi 2 anni inferiore a $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Gli Ioni inorganici

Lo ione ammonio (NH_4^+), i nitrati (NO_3^-) e i solfati (SO_4^{2-}) sono gli ioni inorganici percentualmente preponderanti nel particolato atmosferico, per il 33% e il 46% della massa totale rispettivamente di PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$.

Tabella 3.2: contributi degli ioni inorganici alla massa del PM_{10} e del $\text{PM}_{2,5}$

ione	PM_{10} (% in peso)	$\text{PM}_{2,5}$ (% in peso)
NH_4^+	6 ± 4	11 ± 3
NO_3^-	14 ± 8	16 ± 9
SO_4^{2-}	13 ± 5	19 ± 7

Gli ioni sodio, potassio, magnesio e nitriti sono presenti in % molto basse (< 1,5 % della massa totale di PM).

Se si considerano i rapporti di massa tra le concentrazioni di $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10} , risulta che gli ioni solfati sono presenti quasi esclusivamente nella frazione fine (media =90%, dev.st = ±7% n=24), così come anche lo ione ammonio, anche se con una maggiore variabilità del dato medio (media = 88%, dev.st =16% n=12). Lo ione nitrato è invece presente anche nella frazione grossolana, in particolare durante i mesi estivi (media = 68%, dev.st =15% n =24).

Il rapporto % in peso degli ioni nitrati nel $\text{PM}_{2,5}$ va da un valore medio del 25% nei mesi invernali ad un valore medio del 7% per i mesi estivi: questo si spiega con l'elevata volatilità del nitrato d'ammonio quando si hanno alte temperature estive.

Lo ione solfato presenta un rapporto % in peso maggiore durante i mesi estivi (media =23%, in Giugno, Luglio, Agosto) che in inverno (media=12% in Gennaio, Febbraio, Marzo) e questo può essere spiegato con la maggiore attività fotochimica nei mesi estivi che porta alla formazione di ioni solfati di origine secondaria.

Per lo ione ammonio, non si individua un trend stagionale (n° dati disponibili inferiore) del rapporto in peso nel $\text{PM}_{2,5}$, con un valore medio dell' 11%.

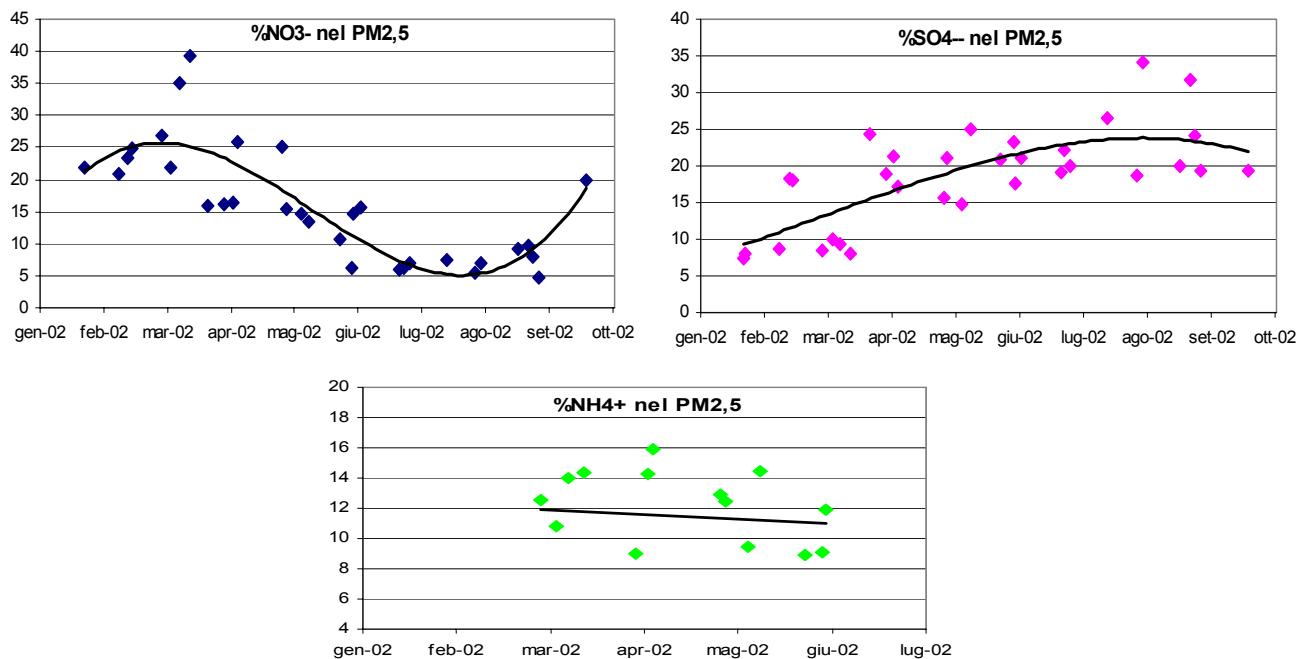


Figura 3.1: variazioni stagionali del rapporto in peso per gli ioni nitrati, solfati ed ammonio nel PM_{2,5}

La frazione carboniosa

La componente carboniosa del particolato urbano viene normalmente suddivisa in due componenti:

- black carbon (BC) o carbonio elementare (EC) che costituisce un inquinante primario
- carbonio organico (OC) che rappresenta una misura della componente organica presente nel particolato includendo numerosi composti organici di cui attualmente è conosciuta solo una parte

Il carbonio totale (TC) che è rappresentato dalla somma di EC e OC.

Lo stato dell'arte per queste determinazioni pone numerose domande sulla tecnica analitica utilizzata. Per questo è stata studiata una nuova metodica mediante analisi termogravimetrica combinata con uno spettrofotometro infrarosso (TGA/FT-IR).

Dai dati analizzati si ottiene per il PM₁₀ un TC variabile tra 54 e 29 % mentre per il PM_{2.5} il TC rimane relativamente costante variando tra un 45 e 40%.

Gli Acidi carbossilici nel particolato atmosferico

Gli acidi carbossilici sono un prodotto della reattività fotochimica degli idrocarburi; essi in atmosfera si trovano quasi esclusivamente nella fase particolata, ad eccezione degli acidi

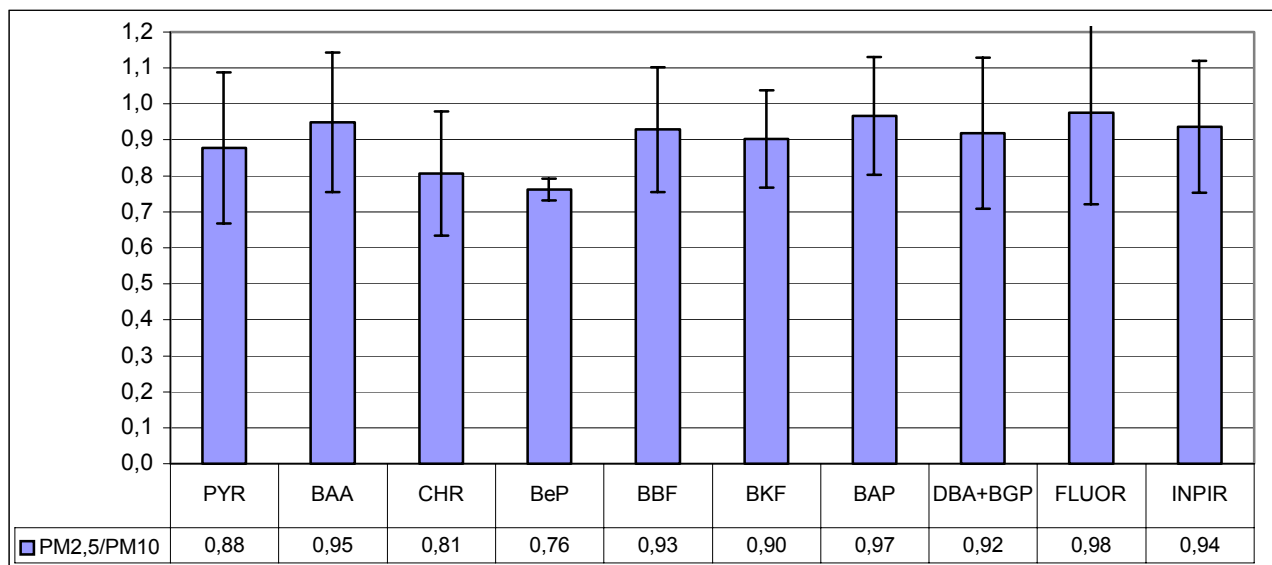
monocarbossilici (MCA) da C1 a C6 che si trovano ripartiti sia nella fase particolata che in quella liquida dell'atmosfera.

Gli acidi dicarbossilici da C2 a C5 (acido ossalico, malonico, succinico e glutarico) costituiscono una frazione importante del particolato atmosferico: le prime analisi effettuate sul particolato atmosferico di Milano confermano come l'acido ossalico sia un componente importante del PM_{2,5}, costituendo circa 1/3 della massa totale.

Gli Idrocarburi policiclici aromatici.

Gli IPA sono tra i primi inquinanti atmosferici ad essere stati identificati come sospetti cancerogeni. I risultati ottenuti confermano che gli IPA sono distribuiti soprattutto nel PM 2.5: il rapporto tra la concentrazione di IPA nel PM 2.5 e la concentrazione di IPA nel PM10 è circa 0.8-0.9 per i diversi IPA analizzati.

Figura 3.2: rapporto medio tra le concentrazioni degli IPA nel PM2.5 e PM10



Il DM 25.11.94 stabilisce un limite per la concentrazione media annuale del benzo[a]pirene pari a 1 ng/m³; la concentrazione media annuale del benzo[a]pirene è risultata 1.4 ng/m³.

Tutti gli IPA hanno mostrato un andamento con una fortissima stagionalità; ad esempio la concentrazione media mensile del benzo[a]pirene nel gennaio 2002 è risultata 6.83 ng/m³, mentre in giugno, luglio e agosto non ha superato 0,1 ng/m³.

Nonostante la classe degli IPA sia ininfluyente nel determinare percentualmente la massa totale di particolato (0.06% in gennaio, 0.002% nei mesi estivi), ha un ruolo determinante per la sua

tossicità. Il fatto che questo rapporto vari notevolmente tra mesi invernali ed estivi suggerisce che la composizione del particolato cambia tra stagione e stagione.

Anche le concentrazioni di nitro-IPA variano nell'arco dell'anno: ad esempio, si sono misurate concentrazioni medie giornaliere di 1-nitro-pirene nel PM_{2.5} da circa 0.09 ng/m³ in gennaio a 0.010 ÷ 0.005 ng/m³ nei mesi estivi.

La caratterizzazione chimica complessiva del PM₁₀ e del PM_{2.5}

In figura 3.3 si mostra la caratterizzazione chimica complessiva del particolato atmosferico, sia del PM₁₀ che del PM_{2.5} per la città di Milano. La frazione indicata come “altro”, che corrisponde a circa il 10% sia nel PM_{2.5} che nel PM₁₀, è attualmente indeterminata: essa può essere attribuita, ad esempio, all'ossigeno componente o gli ossidi di alcuni elementi (es. ossidi di ferro), già considerati nella frazione "elementi in tracce", o presente quale componente dei reticoli cristallini nella frazione "polveri minerali".

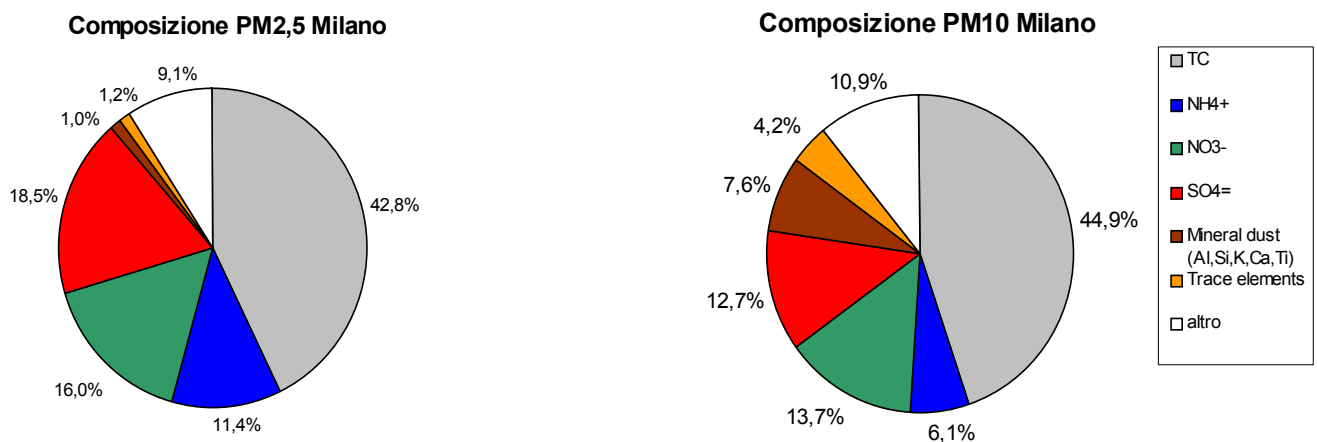


Figura 3.3: composizione media del particolato PM₁₀ e PM_{2.5} per Milano

Questo risultato rappresenta uno degli obiettivi del progetto PUMI.

Definizione dei marker di sorgente

Le correlazioni tra traffico e i singoli IPA nel PM_{2.5} sono state messe in evidenza con due campagne di monitoraggio intensivo (dicembre 2001 e maggio 2002) in cui ogni filtro è stato campionato per 4 ore nel super-sito di via Messina.

Nelle figure 3.4 e 3.5 si riportano gli andamenti degli IPA totali e i volumi di traffico totale e

pesante. L'esperienza del dicembre suggerisce che gli IPA nel particolato derivino soprattutto dalle emissioni di motori diesel (traffico pesante). Nell'esperienza di maggio tale relazione non è più così evidente, probabilmente per l'influenza di altri fattori che subentrano (es. maggiore variabilità delle condizioni meteorologiche, quali velocità del vento, radiazione solare, temperatura, ma anche la chimica di questi composti).

Figura 3.4 : andamento degli IPA e dei volumi di traffico nella campagna intensiva del dicembre 2001

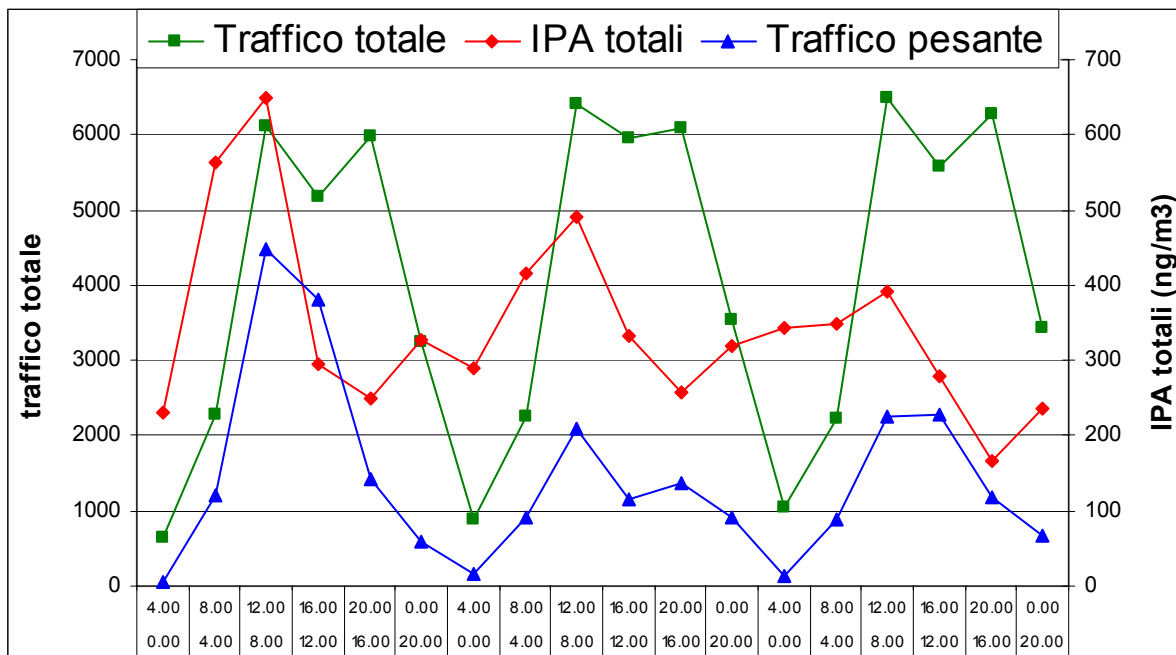
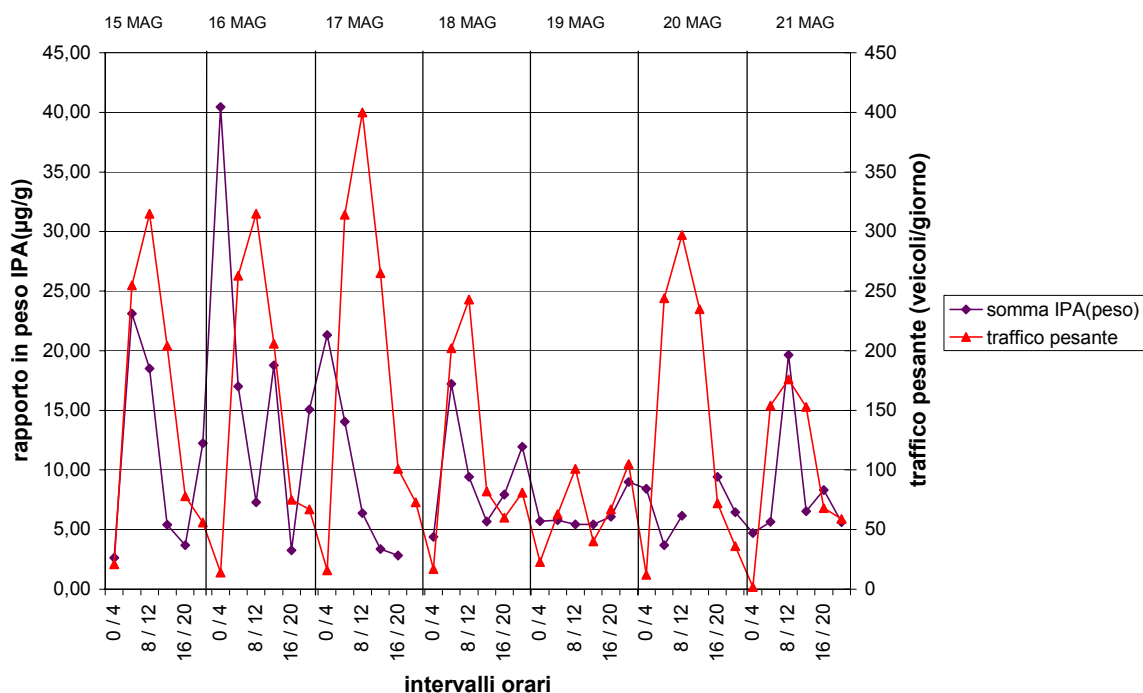


Figura 3.5 : andamento degli IPA e dei volumi di traffico nella campagna intensiva del maggio 2002



Da dati di letteratura risulta che l'emissione di IPA da inceneritori è poco importante; un campionamento (in collaborazione con il Dipartimento di Varese dell'ARPA e un ente gestore di un impianto inceneritore) effettuato al camino di un impianto di termodistruzione ha confermato questo dato. La quantità di IPA nel particolato, espressa in $\mu\text{g/g}$, è risultata inferiore di due ordini di grandezza rispetto a quella misurata a Milano in estate

Tabella 3.3: confronto tra le concentrazioni relative di alcuni IPA alle emissioni di un inceneritore di rifiuti dotato di sistemi di abbattimento e lavaggio dei fumi e quelle alle immissioni di un giorno estivo in Milano

	PYR	BAA	CHR	BBF	BKF	BAP	BGP
Inceneritore ($\mu\text{g/g}$)	0.019	0.021	0.029	0.024	0.019	0.026	0.064
Milano 2 agosto 2001($\mu\text{g/g}$)	5.32	1.53	2.48	4.74	1.50	1.58	4.67

Dai dati precedenti, la coppia di elementi piombo e bromo nel particolato non può più essere considerata, come in passato, un marker per la sorgente traffico, mentre l'insieme degli IPA appare candidarsi come marker per Milano del traffico pesante, purché si tenga opportunamente conto della meteorologia e della chimica di questa classe di composti.

Stima del contributo del traffico al particolato

Per arrivare alla stima del contributo del traffico all'inquinamento da particolato nell'ambito del progetto è stata realizzata una campagna di misura del PM10 e del PM2.5, con le relative analisi di speciazione in un sito caratterizzato quasi esclusivamente dalle emissioni del traffico milanese all'interno del tunnel di Milano Viale Brianza.

Un buon marker del traffico è il benzene: viene emesso quasi esclusivamente da autoveicoli, è presente in concentrazioni rilevabili e ha un tempo di vita atmosferico di circa 12 giorni.

Per stabilire l'importanza del traffico come fonte di particolato sono stati considerati i due rapporti:

$$\frac{FD_{PM10}}{FD_{Benzene}}$$

$$\frac{FD_{PM2.5}}{FD_{Benzene}}$$

che rappresentano rispettivamente il rapporto tra il fattore di diluizione FD del PM₁₀ e del benzene e il rapporto tra il fattore di diluizione del PM_{2.5} e del benzene. I tre fattori di diluizione sono stati calcolati facendo il rapporto tra la concentrazione nel tunnel e la concentrazione fuori dal tunnel, nel

sito di via Messina per PM₁₀ e PM_{2.5} e presso la centralina di via Juvara per il benzene.

Se il rapporto tra il fattore di diluizione del particolato e il fattore di diluizione del benzene è pari a uno, allora il particolato viene emesso solo da autoveicoli, mentre se il rapporto è minore di uno il particolato ha altre fonti.

I risultati (da agosto 2001 all'inizio di gennaio 2002) si possono riassumere nella tabella 3.4, dove si può notare come nel periodo estivo (caratterizzato da forte fotochimica) e in quello invernale (caratterizzato dalla presenza del riscaldamento) si abbia una riduzione/abbassamento del rapporto tra i fattori di diluizione, mentre tale rapporto ha il valore medio più elevato nel mese di ottobre, in cui non c'è né fotochimica né riscaldamento e quindi è atteso che il traffico sia la fonte principale di particolato.

Tabella 3.4: rapporti tra i fattori di diluizione del particolato e del benzene

	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
FD_{PM10}/FD_{Benzene}	0.50 ± 0.10	0.65 ± 0.12	0.80 ± 0.26	0.50 ± 0.13	0.94 ± 0.57
FD_{PM2.5}/FD_{Benzene}	0.56 ± 0.09	0.69 ± 0.12	0.85 ± 0.04	0.52 ± 0.14	0.57 ± 0.12

La media dei rapporti dei fattori di diluizione sopra calcolati è 0.61 ± 0.17 per il PM₁₀, e 0.64 ± 0.11 per il PM_{2.5}.

Il dato del dicembre per il PM₁₀ non può essere considerato ai fini della valutazione del contributo del traffico, poiché lo spargimento di sale sul manto stradale secco sotto il tunnel ha notevolmente alterato la concentrazione di PM₁₀ nel tunnel per oltre 15 giorni (senza influire significativamente sulla corrispondente concentrazione di PM_{2.5} per le dimensioni dei cristalli di sale). Sono quindi venute meno in dicembre parte delle ipotesi della sperimentazione per il PM₁₀.

Un altro approccio per la stima del contributo del traffico all'inquinamento è stato quello della tecnica statistica denominata APCFA (Absolute Principal Component Factor Analysis) applicata alle serie temporali complete dei dati di concentrazione degli elementi misurati in via Celoria nel 2001 (escludendo come outliers i campioni relativi ai giorni di Föhn).

La ricostruzione della massa di particolato campionato è stata effettuata a partire dalla matrice dei "pesi" (factor loadings), calcolata tramite l'applicazione della PCFA sui dati di concentrazione. È risultato che un numero limitato di fattori (4) è sufficiente per spiegare il 91% della varianza totale. Nel primo fattore la presenza con pesi elevati di Al, Si, Ca, Ti e Fe - elementi tipicamente cristallini - individua una generica sorgente "suolo"; nel secondo fattore i pesi elevati di Pb, Br, Cu, Fe e Zn identificano la sorgente "traffico". La terza componente è dominata dallo zolfo ed è spiegata per la maggior parte dalla correlazione fra S e PM₁₀; lo zolfo misurato nel particolato atmosferico di

Milano è da ascrivere principalmente a solfati secondari. Va considerato inoltre che nell'area urbana di Milano il contributo ai solfati dovuto al riscaldamento (domestico e terziario) dovrebbe essere minoritario, in quanto la metanizzazione della città è molto cresciuta negli ultimi anni. Nel quarto fattore i contributi dominanti sono quelli di Mn e Zn che indicano una generica sorgente "industria".

La tabella 3.5 mostra i risultati della APCFA: la tabella riporta il contributo medio di ogni elemento in ogni sorgente nella serie di campioni considerati. Va osservato che i vettori dei contributi medi delle sorgenti possono essere considerati come profili delle sorgenti. La precisione stimata per la tecnica APCFA è dell'ordine del 10-20 %.

Tabella 3.5: Applicazione della APCFA ai dati di PM10 (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Sorgente	Suolo	Traffico	Secondari	Industria	Somma ^a	Media ^b	Somma/media
PM10	9,154	17,149	34,338	4,806	65,448	63,198	1,04
Al	0,550	0,054	0,107	0,031	0,742	0,745	1,00
Si	1,815	0,336	0,402	0,101	2,654	2,685	0,99
S	0,343	0,171	1,834	0,017	2,365	2,478	0,95
K	0,137	0,122	0,207	0,041	0,507	0,482	1,05
Ca	0,792	0,177	0,155	0,083	1,208	1,250	0,97
Ti	0,028	0,010	0,012	0,002	0,052	0,051	1,03
Mn	0,013	0,009	0,005	0,006	0,032	0,031	1,05
Fe	0,501	0,428	0,225	0,064	1,217	1,219	1,00
Cu	0,012	0,019	0,010	0,002	0,044	0,043	1,02
Zn	0,038	0,048	0,025	0,033	0,143	0,153	0,93
Br	0,002	0,011	0,003	0,001	0,017	0,019	0,94
Pb	0,017	0,037	0,014	0,008	0,076	0,077	1,00

^aSomma: concentrazioni stimate mediante APCA

^bMedia: concentrazioni medie misurate

La concentrazione media di PM10 risulta sovrastimata del 4% e spiegata per il 14.5% dalla sorgente "suolo", per il 27.1% dal "traffico", per il 54.3% dalla sorgente "composti secondari" e per il 7.6% dal fattore "industria".

La sorgente più importante è quella denominata "composti secondari" a cui contribuiscono i solfati secondari, i composti secondari del carbonio organico e i composti dell'azoto che sono prodotti principalmente dai precursori gassosi NO_x e VOC. In letteratura questi ultimi sono stati stimati

essere emessi dal traffico rispettivamente per il 76% e per il 49%. Da ciò si evince che globalmente a Milano la sorgente dominante di particolato è il traffico se si considerano sia le sue emissioni dirette che quelle indirette. Tale sorgente rende conto di un 60-70% della massa del PM10.

I risultati ottenuti coi due diversi approcci (Fattori di Diluizione e APCFA) sono tra loro risultati coerenti.

Questo risultato rappresenta un altro obiettivo del progetto PUMI.

Attività e risultati dei PLG4

Valutazione del ruolo delle fonti con tecniche statistiche

Un altro obiettivo del progetto PUMI riguarda la **descrizione fenomenologica del particolato fine come base conoscitiva per l'organizzazione degli interventi**, da ottenersi attraverso l'analisi statistica delle serie storiche disponibili.

Le analisi statistiche effettuate hanno consentito di confermare l'efficacia degli interventi, mirati al miglioramento della qualità dell'aria e realizzati nel corso degli anni, anche sulla "qualità" del particolato. In particolare, grazie al miglioramento della qualità dei combustibili per la produzione di energia e per il riscaldamento degli edifici, al miglioramento dei sistemi di abbattimento dei fumi negli impianti industriali e all'introduzione della "benzina verde" si è rilevato un abbattimento delle concentrazioni di zolfo, vanadio, cromo, manganese, nichel e rame di un fattore tra 2 e 3, dal 1990 al 2001, un abbattimento dello zinco per un fattore 5 e un abbattimento del piombo e del bromo rispettivamente di un fattore 9 e 8 (cf.r Tabella 4.1).

Tabella 4.1: Concentrazioni (in ng/m³) di massa e degli elementi per il PM10 misurato a Milano negli anni 1990/1991 e nel 2001.

	PM10	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Pb
1990/1991	89000	6100	460	740	1320	75	40	30	80	1850	20	70	640	140	670
2001	63000	2430	742	477	1238	50	9	14	31	1204	8	42	151	18	76

Sul sito del progetto sono riportati tutti i parametri della statistica descrittiva delle serie storiche delle concentrazioni bi-orarie di PM10 rilevate in continuo dalle postazioni della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria.

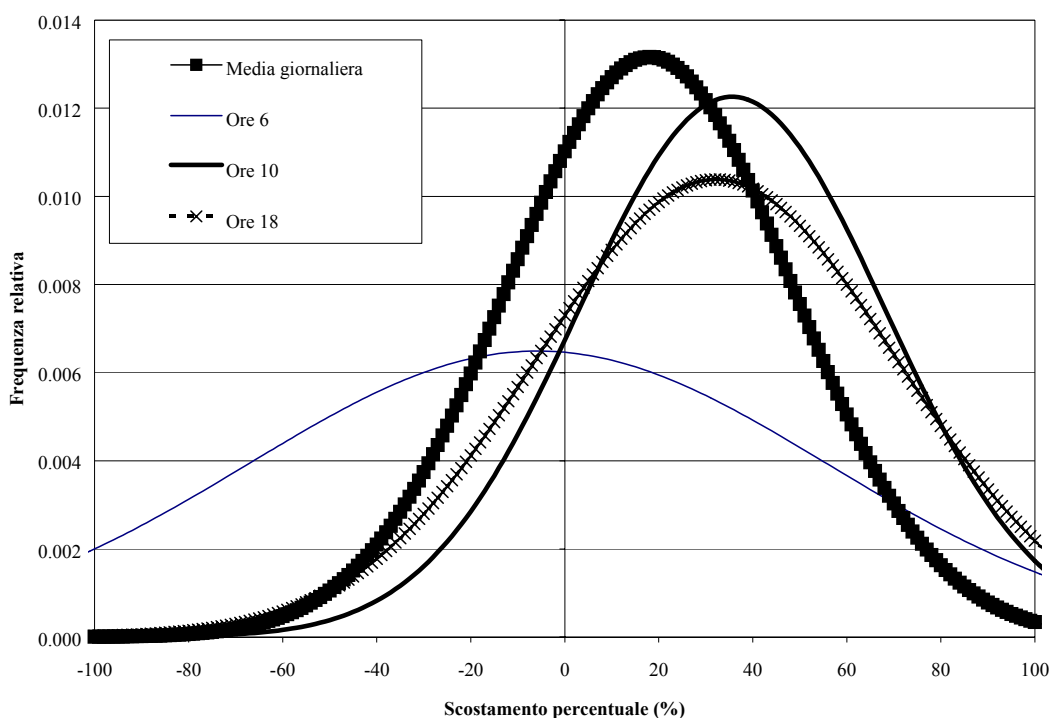
Elaborando tutti i dati orari di PM10 disponibili dal 1998 ad oggi sono state calcolate le riduzioni della concentrazione di PM10, per ogni ora del giorno, e per ogni postazione di misura del PM10 presente in Lombardia, prodotta da una diminuzione del traffico equivalente a quella che si determina tipicamente da un giorno feriale a un giorno festivo.

Tale elaborazione porta a determinare una distribuzione di frequenza di riduzione, piuttosto che il valore medio della riduzione, in quanto la riduzione delle concentrazioni di PM10, a parità di riduzione delle emissioni, è dipendente fortemente dalle condizioni meteorologiche che, naturalmente, variano di giorno in giorno.

Un esempio è riportato in figura 4.1.

Queste informazioni, associate alle previsioni meteorologiche, consentono di stimare la riduzione della concentrazione di PM10 più probabile ottenibile attraverso una riduzione del traffico con un intervento del tipo circolazione a targhe alterne.

Figura 4.1: Distribuzioni degli scostamenti percentuali osservati nella stazione di MI-Juvara per la media giornaliera ed i valori orari delle ore 6, 10 e 18; periodo invernale.



Rimanendo all'esempio di figura 4.1, poiché la riduzione del traffico totale giornaliero nel centro di Milano, passando da un giorno feriale a un giorno festivo è valutata in circa il 40% (dati del rilevatore automatico di Milano Via Senato), tenendo conto dei risultati del PLG2 e PLG3 sul contributo del traffico al PM10 nei mesi invernali, nell'ipotesi di linearità tra immissioni ed emissioni di PM10 particolato, si stima una riduzione delle concentrazioni di PM10 pari a circa il 20%. Tale risultato è coerente con la riduzione percentuale più frequente calcolata sulla base delle elaborazioni delle serie storiche. Essendo la distribuzione di frequenza in figura simmetrica, il valore più frequente corrisponde anche al valore medio.

L'ipotesi di linearità non è certo valida quando si tenta di stimare la riduzione dell'inquinamento da PM10 corrispondente ad una riduzione nota della sorgente traffico per un determinato giorno. In tal caso è necessario conoscere almeno le previsioni meteorologiche del giorno interessato dall'intervento e quindi individuare sulla distribuzione il corrispondente scostamento percentuale.

Con il raggiungimento di tutti gli obiettivi precedenti si sono ottenuti gli elementi necessari per l'elaborazione del modello decisionale.

Attività e risultati dei PLG5

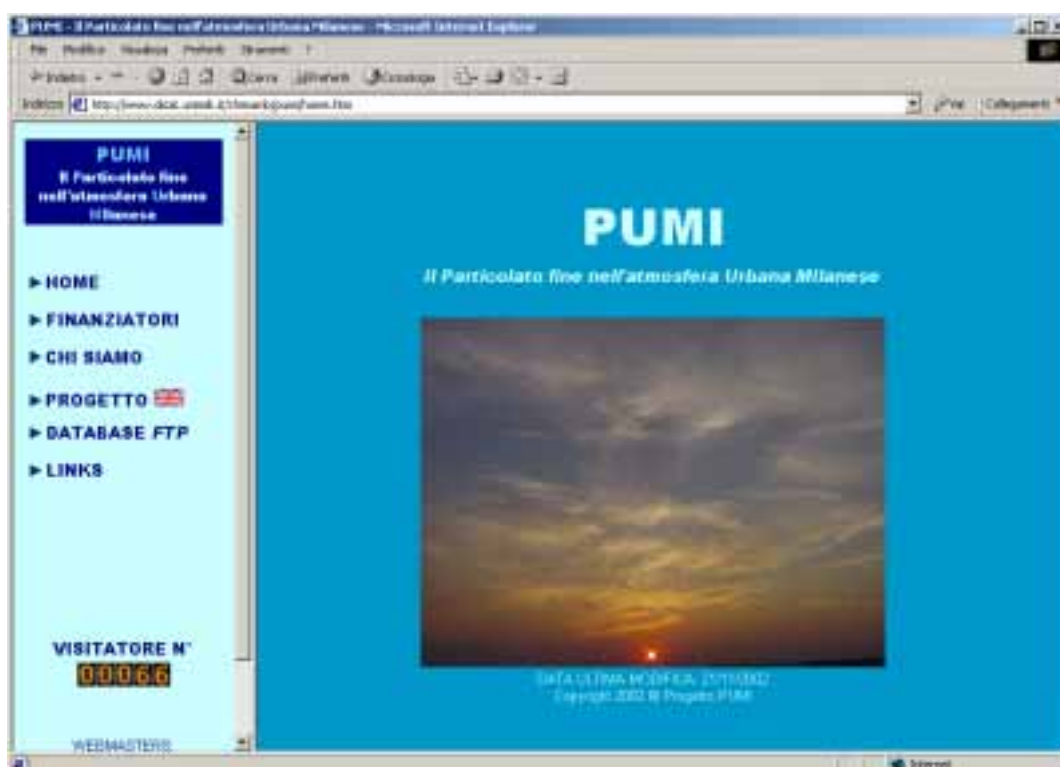
Sistema Informativo Interattivo, Web

Ultimo obiettivo del progetto PUMI è stata la creazione di un sito web, con due livelli di accesso: un primo livello di accesso pubblico; un secondo livello di accesso è riservato alle Unità Operative per rendere più efficace lo scambio di dati per i successivi ulteriori approfondimenti che si intendono attuare sui dati prodotti.

Il sito è stato realizzato ed è accessibile all'indirizzo:

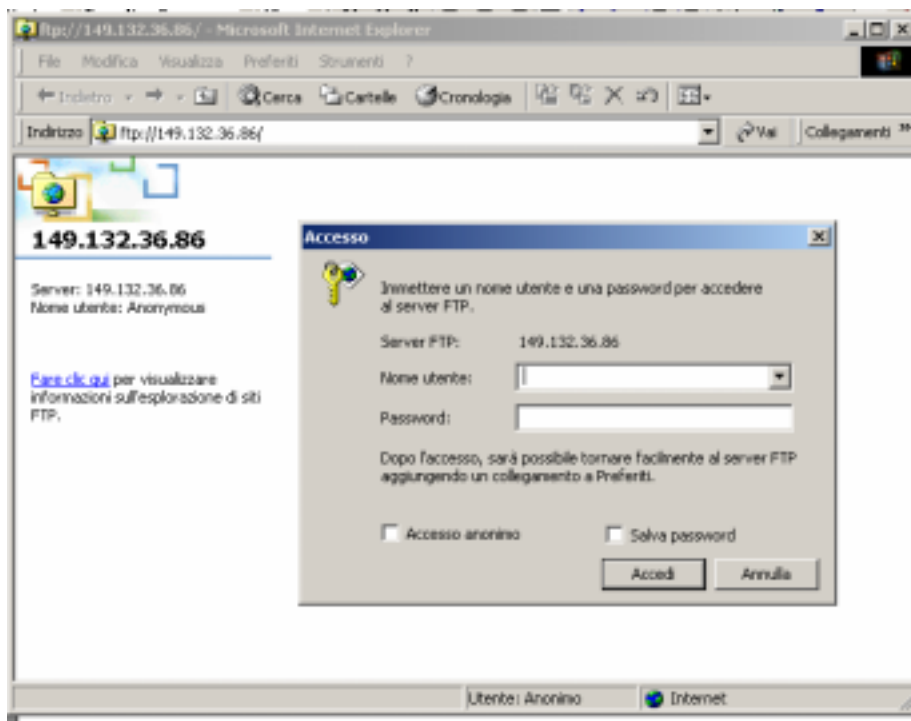
<http://www.disat.unimib.it/chimamb/pumi/home.htm>

Il sito si trova sul server dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca e il suo aggiornamento sarà in carico alle Unità Operative UO1 (DISAT) e UO2 (ARPA). Attualmente è composto da cinque pagine che costituiscono il livello di accesso pubblico, con l'illustrazione del progetto, i finanziatori, le unità operative con nomi e contatti di tutti i partecipanti e una pagina di links utili. Di seguito viene mostrata la Homepage del sito.



Una sesta pagina, *DATABASE FTP*, permette l'accesso al secondo livello, riservato alle Unità Operative partecipanti, previsto per l'interscambio dei dati sperimentali. Tutti i dati prodotti dalle diverse Unità Operative sono raccolti su un server disponibile presso il DISAT (Università degli

Studi di Milano-Bicocca) e appositamente configurato per la gestione e lo scambio di dati. In questa zona del sito si accede solo tramite login con nome utente e password, che sono state assegnate ad ogni UO dal coordinatore scientifico del progetto (Dr. Vorne Gianelle).



Una volta all'interno del sito FTP ogni UO dispone di una propria cartella per l'inserimento dei dati raccolti durante il progetto e le successive elaborazioni. Sono inoltre presenti due cartelle comuni accessibili a tutte le UO per lo scambio dei dati, dei risultati e per la raccolta di tutti i documenti e articoli relativi al progetto.

Come garanzia di protezione dei dati, il server è dotato di un sistema *FIREWALL*, che permette di visualizzare e bloccare ogni eventuale tentativo di intrusione nel sistema da parte di persone non autorizzate, inoltre il DATABASE è conservato su un sistema di due dischi fissi da 80 Gb configurati in mirroring, il che permette di avere un backup continuo di tutti i dati.

Conclusioni

Il progetto PUMI aveva come obiettivo generale l'acquisizione di conoscenze sulle caratteristiche chimiche e fisiche del PM10 disperso nell'area urbana milanese, e sulla qualità e quantità di polveri emesse dalle diverse sorgenti, come elementi fondamentali per valutare il contributo delle diverse fonti all'inquinamento da particolato e per la successiva elaborazione del modello decisionale.

Si ritiene che l'obiettivo sia stato raggiunto: sono state determinate le caratteristiche chimiche e fisiche di composizione del particolato urbano milanese, sia del PM10 che del PM2.5, attraverso indagini analitiche estese nell'arco di oltre un anno. Ciò era necessario poiché, come noto, le condizioni meteorologiche, variabili da stagione a stagione, da giorno a giorno, sono un elemento fondamentale non solo nel determinare i livelli di concentrazione dei vari inquinanti, fino a determinare gli episodi di inquinamento acuto, ma anche per scatenare o limitare processi chimici e fotochimici che cambiano la qualità del particolato.

Sono stati ottenuti i fattori di emissione di alcuni autoveicoli tra i più rappresentativi del parco veicoli circolante in Lombardia, non solo secondo i cicli di guida indicati dall'Unione Europea, ma anche per un ciclo di guida appositamente studiato per simulare il traffico urbano milanese.

Sono stati individuati alcuni marker come traccianti di alcune specifiche sorgenti di particolato (risospensione dal suolo, inquinamento secondario, "traffico pesante", ecc.).

I dati raccolti hanno consentito di stimare, con misure analitiche sul campo, il contributo del traffico all'inquinamento da PM10 e PM2.5. Le stime ottenute sono confermate da diverse e indipendenti elaborazioni statistiche delle serie storiche disponibili.

Sono quindi stati raccolti gli elementi fondamentali per l'elaborazione del modello decisionale.

La mole di dati attualmente depositati sul sito del progetto, frutto dei sinergismi che la collaborazione tra le diverse Unità Operative ha prodotto, può ancora fornire ulteriori conoscenze sulla caratterizzazione del particolato fine, sui meccanismi di formazione, sui fenomeni della sua diffusione, al fine di supportare gli enti preposti nella scelta e nella valutazione degli interventi di risanamento.

Tuttavia, la grande quantità di dati e informazioni già prodotta, dovrà essere integrata con ulteriori indagini sui fattori di emissione estese ad un maggior numero di veicoli, e in particolare a quelli "pesanti"; dovranno essere approfondite le conoscenze anche su altre fonti di inquinamento da particolato, anche attraverso il raccordo con altri progetti realizzati sul tema dell'inquinamento da

polveri. Dovrà essere inoltre approfondito il problema delle polveri ultrafini (PM1) per la loro grande valenza sanitaria.

La complessità e la quantità di lavoro svolto per la realizzazione del progetto ha richiesto ai ricercatori delle Unità Operative uno sforzo per la risoluzione di diversi problemi quali, ad esempio, la messa a punto di diversa strumentazione per il campionamento, anche di tipo non standard, la scelta dei materiali più adatti per le analisi condotte da laboratori diversi, anche non appartenenti alla stessa Unità Operativa, la messa a punto di metodiche analitiche sensibili e contemporaneamente rapide, e infine, la definizione di protocolli operativi comuni.

I protocolli operativi e le metodiche analitiche sviluppate sono quindi da considerarsi anch'esse un prodotto del PUMI.

L'inquinamento da PM10, e più in generale da particolato fine, è un problema non specifico di Milano, ma riguarda tutto il territorio regionale. La distribuzione delle fonti di inquinamento in Lombardia non è uniforme per numero e tipologia; in alcune aree prevale la sorgente traffico, in altre sono importanti le emissioni delle industrie pesanti (es. acciaierie), in altre prevalgono le industrie del legno, ecc.

Si ritiene che l'esempio del progetto PUMI possa costituire il modello di riferimento per l'estensione dell'indagine alle altre zone critiche della Lombardia .