

Relazione tecnica sulla campagna di monitoraggio del particolato fine mediante un Optical Particle Counter Pero, 4 ÷ 10 maggio 2006

Introduzione

Nel periodo dal 6 aprile al 10 maggio 2006 è stata svolta nel comune di Pero una campagna di monitoraggio della qualità dell'aria con l'obiettivo di verificare il contributo delle emissioni da traffico in generale, e più in particolare del traffico autostradale, all'inquinamento atmosferico da gas e polveri fini nell'area di Pero. A tal fine sono stati considerati tre punti del territorio comunale (cfr. fig. 1): nel sito 1, denominato "Autostrada", e nel sito 2, denominato "Autogrill", sono stati posizionati due laboratori mobili per la misura del biossido di zolfo (SO₂), degli ossidi d'azoto (NO, NO₂), del monossido di carbonio (CO), dell'ozono (O₃) e del particolato sospeso (PM10 e sua



caratterizzazione chimica).

Il sito 3, denominato "Cabina", corrisponde alla stazione fissa di monitoraggio facente parte della rete di rilevamento della qualità dell'aria di ARPA Lombardia, ove sono stati considerati il CO, l'NO, l'NO₂ e il PM10.

Per i risultati di tali indagini si rimanda alla corrispondente relazione.

Figura 1: foto aerea dei siti della campagna: 1) "Autostrada" – Via Cesare Battisti; 2) "Autogrill" – Via Girolamo Savonarola; 3) "Cabina" – Via Sempione

Un ulteriore approfondimento è stato effettuato nel periodo dal 4 al 10 maggio 2006 installando un sistema ottico per il conteggio delle particelle (Optical Particle Counter - OPC) sopra il tetto del laboratorio mobile nel sito denominato "Autostrada", per avere informazioni sulla distribuzione dimensionale del particolato aerodisperso.

Le caratteristiche essenziali del sito di misura

Il laboratorio mobile è stato collocato al bordo della sede autostradale, in uno spazio di terreno incolto e privo di ostacoli che limitino la libera circolazione dell'aria (cfr. fig. 2).



Figura 2: il sito denominato "Autostrada" ove è stato posizionato il laboratorio mobile e il sistema OPC

Il comune di Pero, posto a nord-nord-ovest del comune di Milano, è compreso nell' "Area Critica Unica Milano-Como-Sempione", definita con le D.G.R. 6501 del 19.10.01 e 13856 del 29.07.03 per l'attuazione di provvedimenti ai fini del miglioramento della qualità dell'aria.

L'area a nord-ovest del comune di Milano è un territorio ad alta densità di urbanizzazione, fortemente industrializzato e con numerosissime attività sia artigianali che commerciali. L'autostrada rappresenta una importante fonte di inquinamento da particolato sia per le emissioni dagli scarichi dei motori che per le particelle di polvere risospese dal suolo. Il laboratorio mobile è stato posizionato sul lato sud della sede autostradale, ma così vicino da subire le emissioni dei veicoli in transito per ogni direzione del vento ad eccezione, al più, in caso di vento teso da sud.

Descrizione sintetica del sistema OPC

Il principio di funzionamento del sistema OPC consiste nel condurre il flusso d'aria campione in una opportuna camera di misura; un fascio laser investe l'aria campione ed un rilevatore posto a 90° rispetto alla direzione del fascio laser rileva la luce diffusa dalle particelle; ogni impulso rilevato corrisponde al passaggio di una particella, l'altezza dell'impulso è correlata con la sua dimensione. L'OPC utilizzato in questa campagna (Grimm mod. 107) è in grado di contare le particelle con dimensioni superiori a 0.25 µm e classificarle in 31 classi dimensionali. Il costruttore dichiara che la geometria della testa di prelievo (inlet) non effettua alcuna selezione dimensionale sul particolato in ingresso nella camera di misura. Dal numero delle particelle per ogni classe dimensionale, facendo ipotesi per esempio sulla densità media delle particelle, si può calcolare la concentrazione di massa del PM10 del PM2.5 e del PM1 contemporaneamente. Al fine di evitare il conteggio delle eventuali goccioline d'acqua aerodisperse, lo strumento utilizzato è dotato di un sistema di essiccazione non fondato sul riscaldamento dell'aria campione, ma sulla sua diluizione con aria secca e pulita.

I sistemi OPC possono considerarsi sistemi sufficientemente precisi ed accurati per la determinazione della concentrazione numerica delle particelle in funzione delle loro dimensioni; tuttavia molta cautela deve essere posta nei risultati sulla concentrazione di massa perché questa è derivata da un calcolo per il quale le ipotesi di partenza (in particolare il valor medio della densità delle particelle) non sono sempre verificate e verificabili.

Essendo di piccole dimensioni (h. 50 cm x l. 40 cm x p. 20 cm circa) e dotato di un cabinet autonomo per la protezione dello strumento contro gli agenti atmosferici, è stato possibile installare l'OPC sul tetto del laboratorio mobile senza disturbare il monitoraggio degli altri inquinanti.

La caratterizzazione meteorologica del periodo della campagna

Come noto, l'andamento delle concentrazioni di particolato nell'aria è regolato anche dalle condizioni meteorologiche; pertanto, prima di passare all'analisi dei risultati sulle concentrazioni numeriche e di massa rilevate, si presenta l'andamento dei principali parametri meteorologici rilevati o dai sensori di cui è dotato l'OPC (temperatura e umidità relativa dell'aria, pressione atmosferica) o dai sensori installati nella vicina postazioni di Milano Parco Nord per velocità e direzione del vento e precipitazioni, radiazione solare globale e radiazione netta. Dai dati rilevati state calcolate le classi di stabilità di Pasquill, ovvero ogni ora della campagna di misura è stata classificata in categorie in relazione alle capacità dispersive dell'atmosfera: le classi A, B e C corrispondono a situazioni favorevoli alla dispersione degli inquinanti, la classe D è considerata neutra, le classi E, F e G corrispondono invece a situazioni favorevoli all'accumulo degli inquinanti emessi al suolo.

Nelle figure 3.1÷3.29¹ si riportano gli andamenti dei valori medi orari, dei valori medi giornalieri, dei minimi e dei massimi e i giorni tipo dei parametri meteorologici rilevati.

¹ Nelle figure della serie 3, così come per tutte le altre nella presente relazione, le barre di errore rappresentano la deviazione standard della media del valore associato.

I primi quattro giorni della settimana di monitoraggio sono stati caratterizzati da un campo di alta pressione attenuatosi successivamente. La ventilazione è stata discreta, con velocità maggiori di giorno per la maggiore disponibilità di energia termica. Le direzioni del vento prevalenti sono risultate E, SE e SO; considerata la vicinanza del laboratorio mobile all'autostrada, non essendosi verificati episodi di vento teso da sud, ciò non influisce significativamente sull'obiettivo di questa breve campagna di approfondimento sul contributo dell'autostrada all'inquinamento da polveri. Non si è registrata alcuna associazione significativa tra la direzione e la velocità del vento. Giorni con cielo quasi sereno e bassa umidità si sono alternati a giorni coperti o molto nuvolosi; di notte le nubi non sono mai mancate; tuttavia scarse sono state le precipitazioni. La temperatura dell'aria è oscillata tra i valori tipici della stagione (minime notturne tra 7 e 12°C, massime diurne tra 16 e 22°C).

La distribuzione delle classi di stabilità di Pasquill mostra condizioni termodinamiche instabili nelle ore diurne ma stabili in quella notturne.

In conclusione, il breve periodo della campagna è stato caratterizzato da condizioni meteorologiche generalmente favorevoli alla dispersione degli inquinanti.

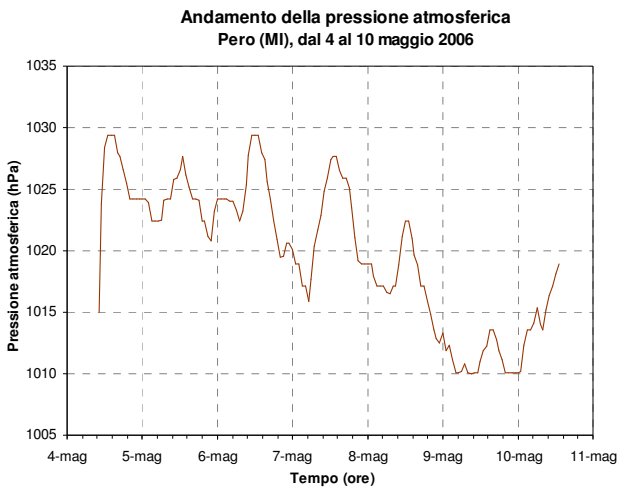


Figura 3.1: andamento dei valori medi orari della pressione atmosferica

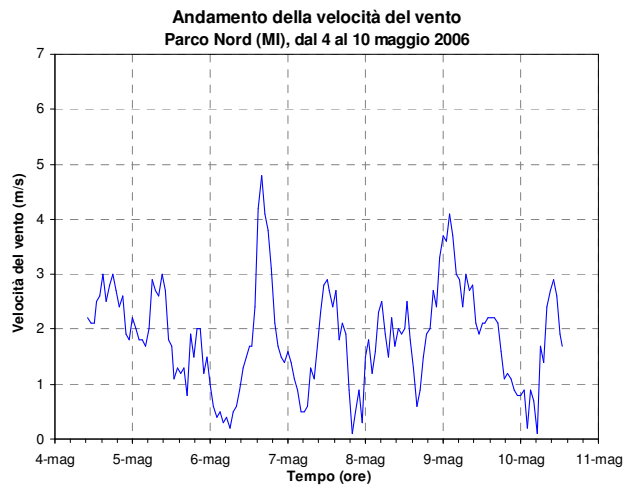


Figura 3.4: andamento dei valori medi orari della velocità del vento

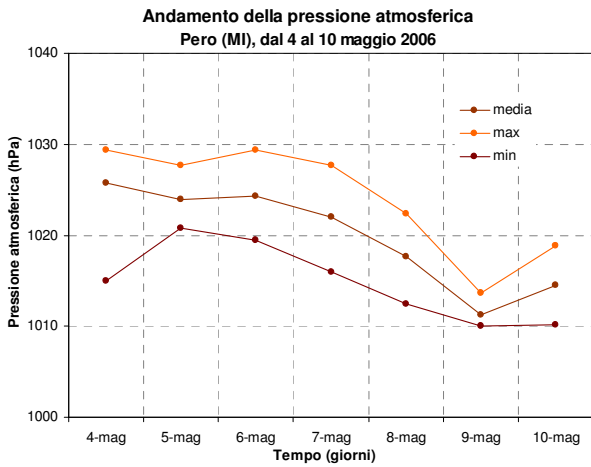


Figura 3.2: andamento dei valori medi giornalieri, dei massimi e dei minimi della pressione atmosferica

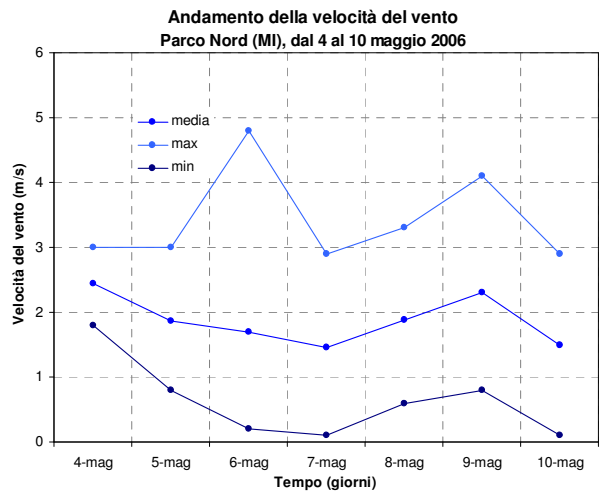


Figura 3.5: andamento dei valori medi giornalieri, dei massimi e dei minimi della velocità del vento

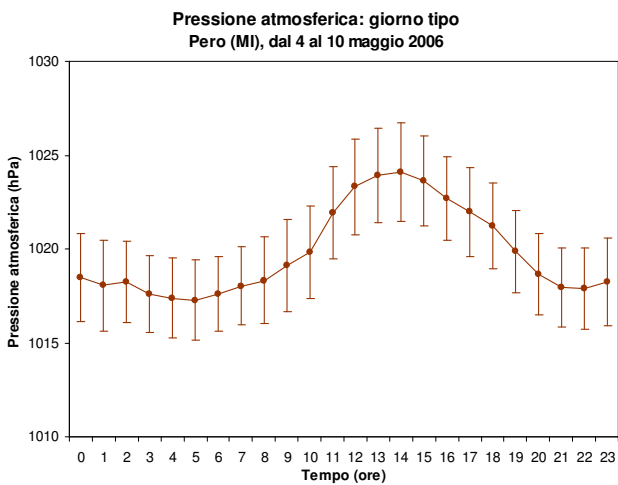


Figura 3.3: giorno tipo della pressione atmosferica

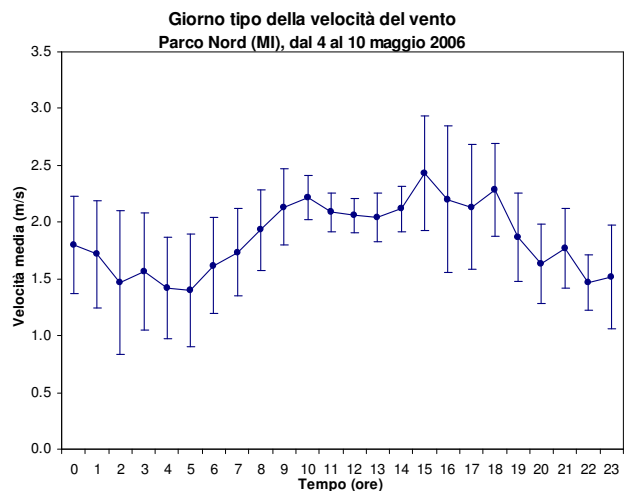


Figura 3.6: giorno tipo della velocità del vento

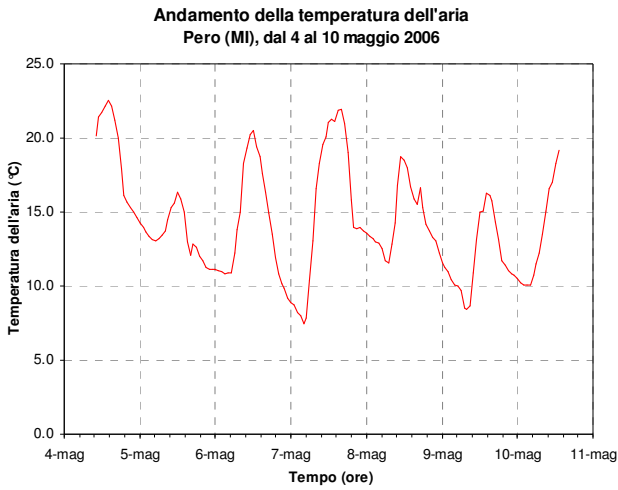


Figura 3.7: andamento dei valori medi orari della temperatura dell'aria

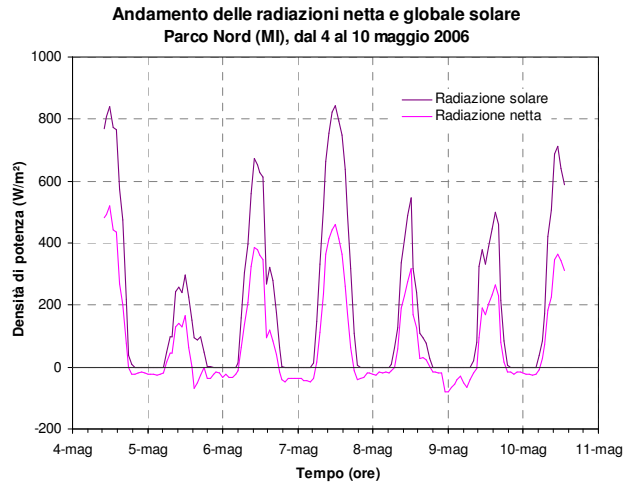


Figura 3.10: andamento dei valori medi orari della radiazione netta e della radiazione solare globale

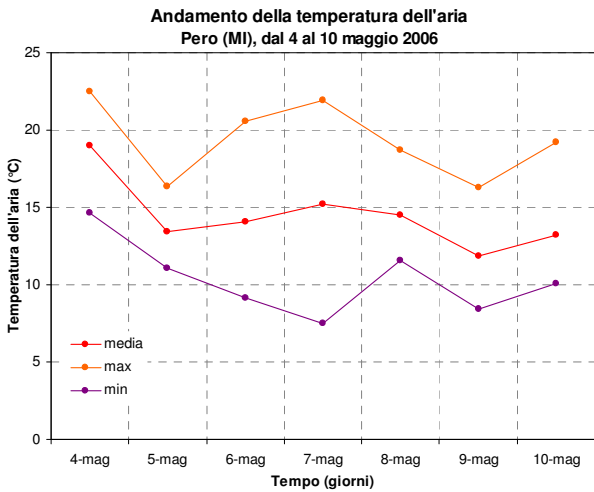


Figura 3.8: andamento dei valori medi giornalieri, dei massimi e dei minimi della temperatura dell'aria

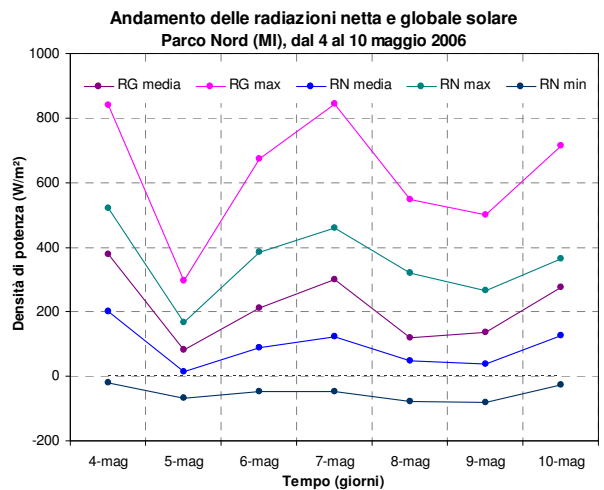


Figura 3.11: andamento dei valori giornalieri, dei massimi e dei minimi della radiazione netta e della radiazione solare globale

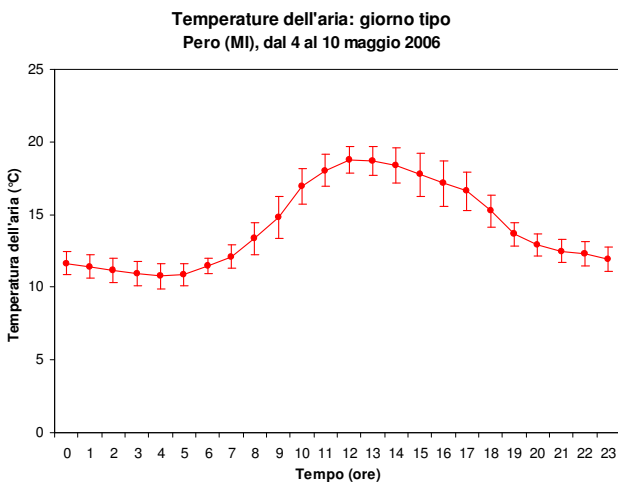


Figura 3.9: giorno tipo della temperatura dell'aria

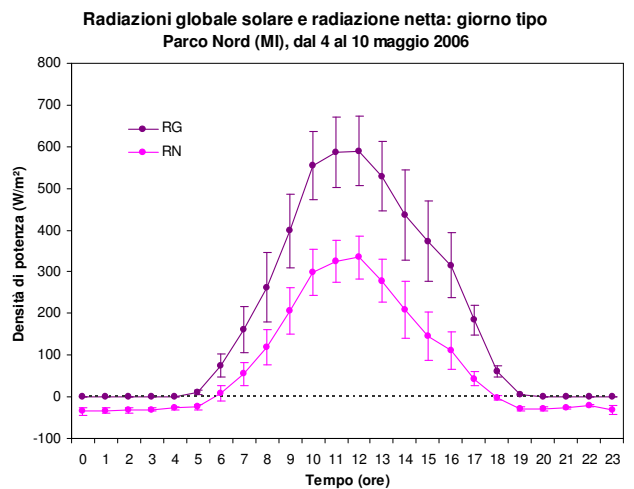


Figura 3.12: giorno tipo della radiazione netta e della radiazione solare globale

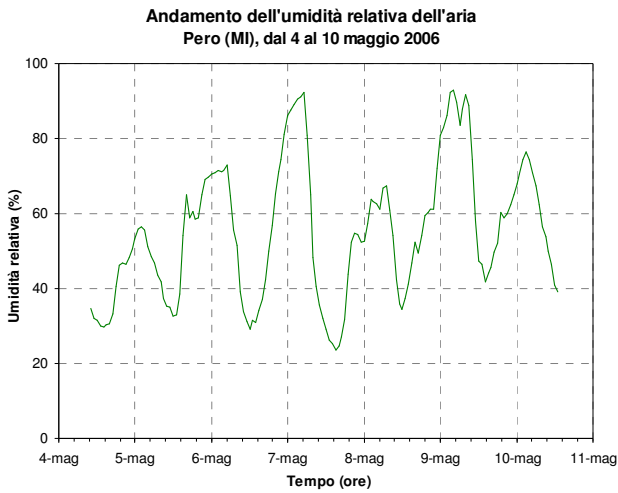


Figura 3.13: andamento dei valori medi orari dell'umidità relativa dell'aria

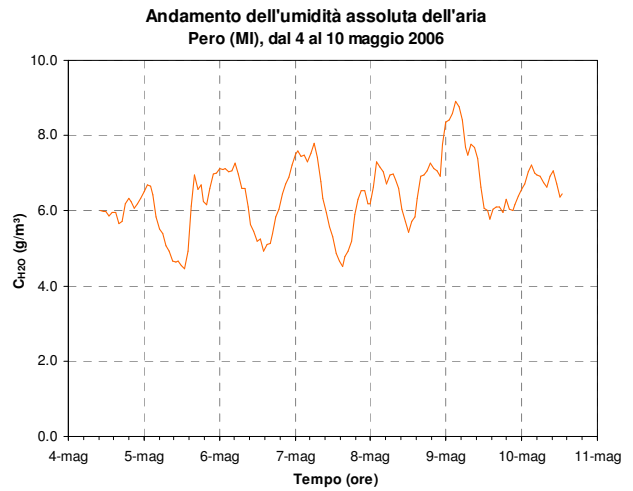


Figura 3.16: andamento dei valori medi orari dell'umidità assoluta dell'aria

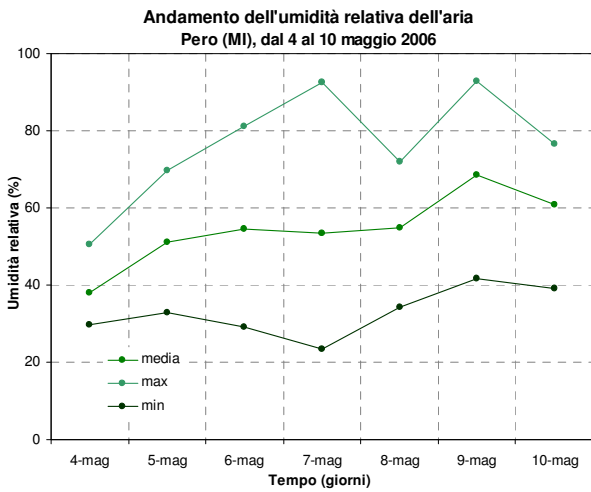


Figura 3.14: andamento dei valori medi giornalieri, dei massimi e dei minimi dell'umidità relativa dell'aria

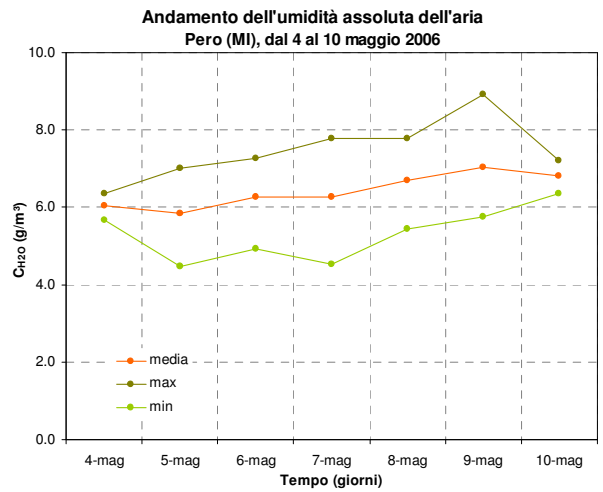


Figura 3.17: andamento dei valori medi giornalieri, dei massimi e dei minimi dell'umidità assoluta dell'aria

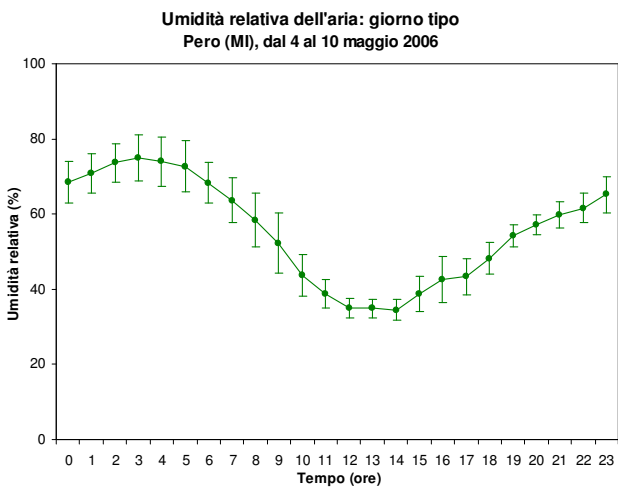


Figura 3.15: giorno tipo dell'umidità relativa dell'aria

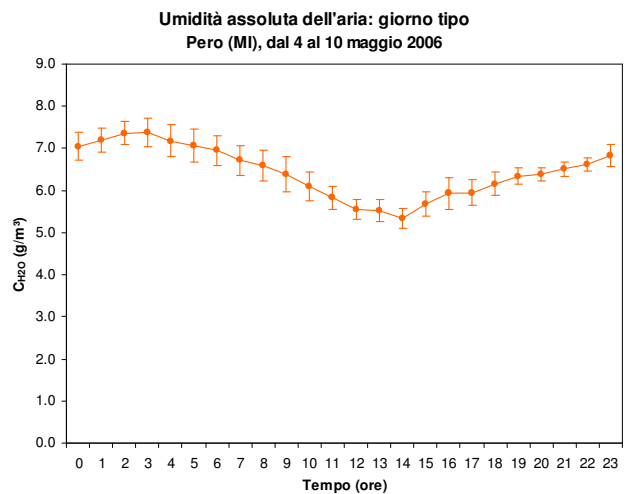


Figura 3.18: giorno tipo dell'umidità assoluta dell'aria

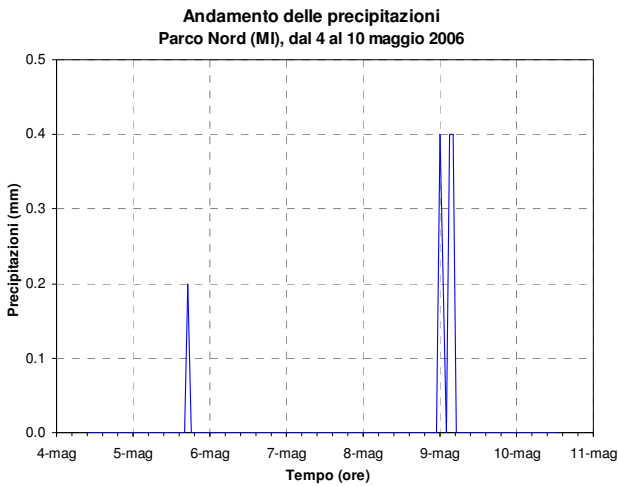


Figura 3.19: andamento dei valori orari delle precipitazioni atmosferiche

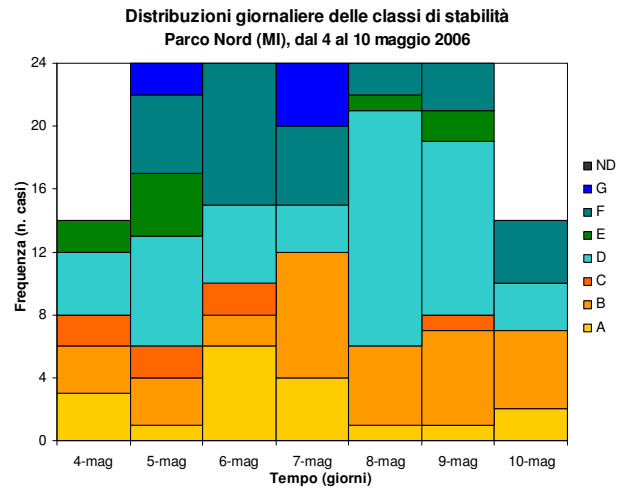


Figura 3.22: distribuzioni di frequenza giornaliera delle classi di stabilità di Pasquill (ND: non determinabile)

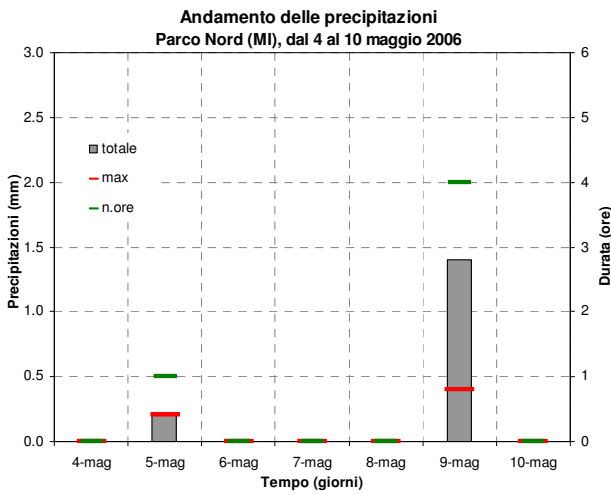


Figura 3.20: andamento dei valori totali giornalieri, dei massimi e della durata delle precipitazioni atmosferiche

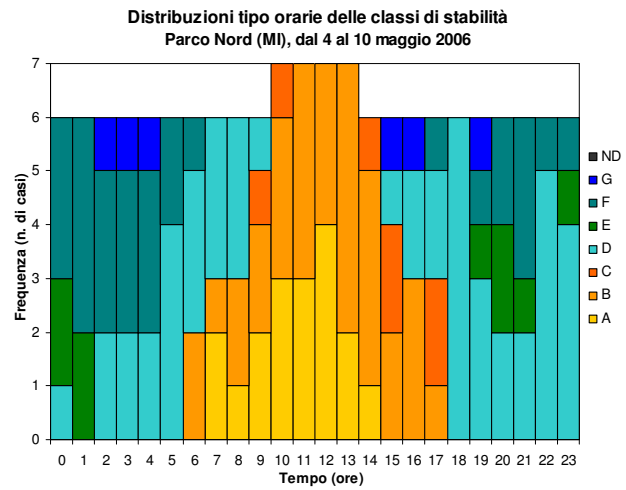


Figura 3.23: distribuzioni di frequenza giornaliera delle classi di stabilità di Pasquill

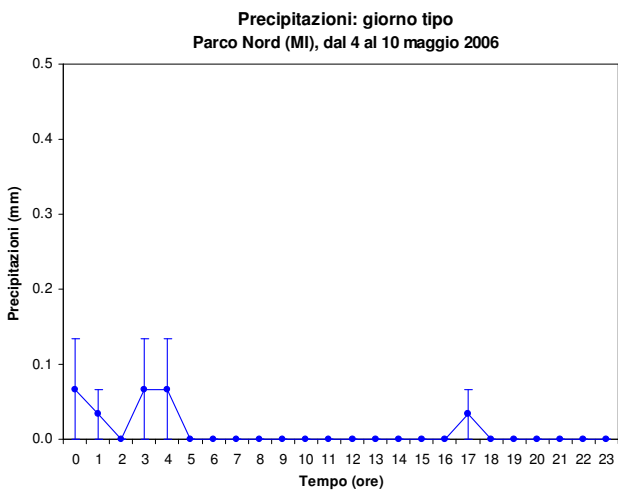


Figura 3.21: giorno tipo delle precipitazioni atmosferiche

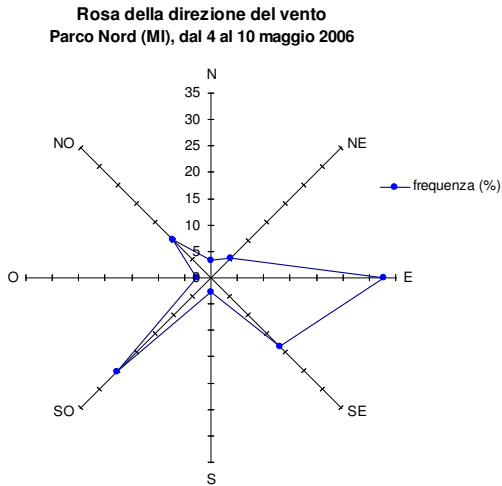


Figura 3.24: rosa della direzione del vento

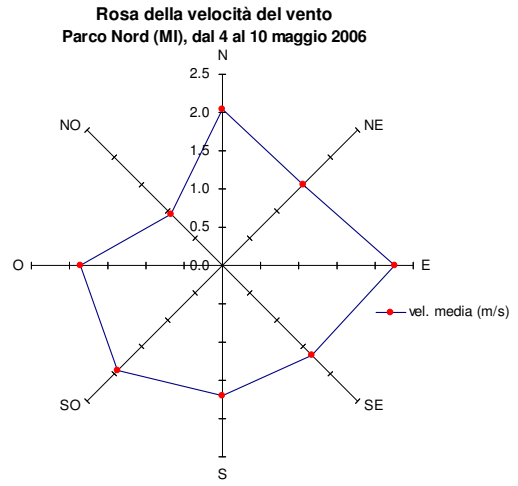


Figura 3.27: rosa della velocità del vento

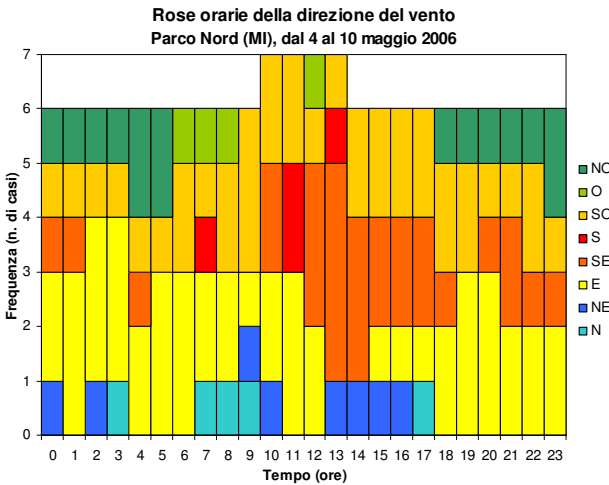


Figura 3.25: rosa oraria della direzione del vento

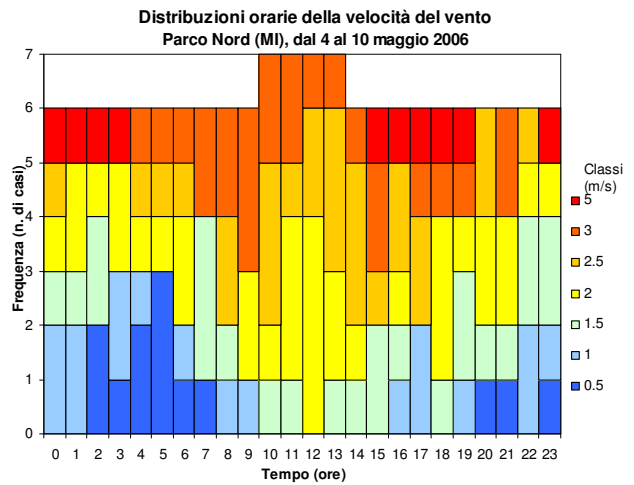


Figura 3.28: distribuzioni di frequenza orarie della velocità del vento

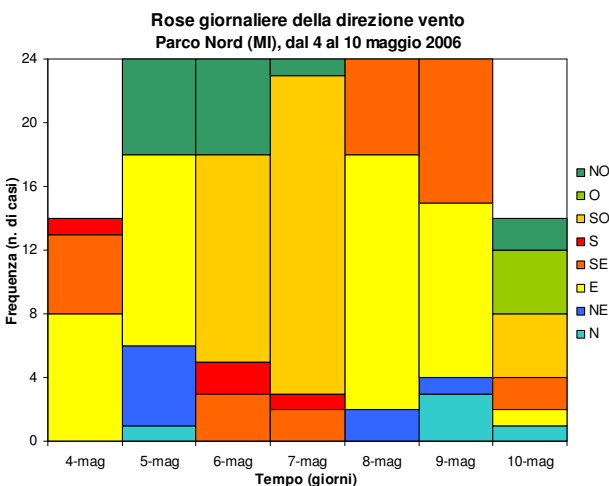


Figura 3.26: rose giornaliera della direzione del vento

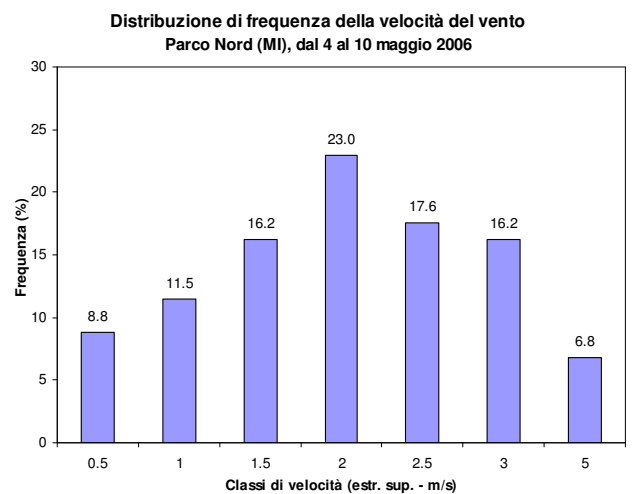


Figura 3.29: distribuzione di frequenza della velocità del vento

Discussione dei risultati dell'OPC sulle concentrazioni numeriche

Il dato elementare misurato dal sistema OPC è la concentrazione numerica media del minuto per 31 classi dimensionali (cfr. nota²). Il data-base della campagna per l'OPC è quindi costituito da oltre 275.000 dati. Dal data-base dei valori puntuali del minuto sono stati eliminati gli "out-lier" ovvero quei dati singolari per i quali non si ha documentazione per considerarli non validi, ma che dall'esplorazione del data-base risultano non rientrare nelle proprietà statistiche medie. Si sono considerati come "out-lier" i dati appartenenti al 2-percentile superiore della distribuzione della derivata della serie temporale di ciascuna classe dimensionale.

Il data-base dell'OPC considerato per le valutazioni ambientali è stato quindi ridotto alle concentrazioni medie orarie ovvero a 4588 dati.

Dalle concentrazioni medie orarie dell'OPC sono state elaborate le distribuzioni dimensionali e volumetriche medie del periodo e le distribuzioni dimensionali e volumetriche tipo.

Esistono diversi modi di rappresentare le distribuzioni dimensionali; la funzione di interesse è la funzione densità di frequenza $f(d)$, per la quale il numero di particelle per unità di volume con dimensione compresa tra d e $d+dd$ è dato da: $dN = f(d) \cdot dd$. Poiché il numero di particelle aerodisperse per unità di volume d'aria varia di diversi ordini di grandezza, spesso dN viene meglio rappresentato da: $dN = F(d) \cdot d \log(d)$. Essendo l'OPC uno strumento fisico il dato rilevato non può essere la funzione $f(d)$ o la funzione $F(d)$ del continuo, ma:

$$\Delta N = \int_a^b f(d) dd \quad \text{o} \quad \Delta N = \int_a^b F(d) d \log(d), \quad \text{dove } a \text{ e } b \text{ sono rispettivamente gli estremi inferiore e superiore di ciascuna classe dimensionale.}$$

Si deve tener conto inoltre che basandosi l'OPC sulla diffusione della luce laser da parte di ogni singola particella rilevata, la dimensione delle particelle misurata corrisponde al cosiddetto "diametro di light scattering (d_{LS})" che dipende non solo dalla dimensione geometrica della particella, ma anche dalla sua forma e soprattutto dalle sue proprietà ottiche in generale e dal suo indice di rifrazione in particolare. Più spesso i sistemi tradizionali di campionamento e/o classificazione delle particelle selezionano il particolato sulla base del diametro aerodinamico delle particelle (d_{ae} - cfr. nota³). Non sempre il d_{ae} è confrontabile con il d_{LS} .

È possibile ricavare una espressione approssimata della $f(d)$ o della $F(d)$ dividendo ΔN misurato rispettivamente per l'ampiezza della classe o per il logaritmo dell'ampiezza della classe.

La distribuzione volumetrica delle particelle, nell'ipotesi di densità costante delle stesse, rappresenta un surrogato della distribuzione di massa del particolato aerodisperso in funzione della dimensione delle particelle.

Per i motivi suddetti nelle figure 4.1÷4.6 le distribuzioni dimensionali e volumetriche sono rappresentate graficamente nei diversi modi.

²Le classi dimensionali rilevate dal OPC in dotazione: 0.25÷0.28 µm, 0.28÷0.30 µm, 0.30÷0.35 µm, 0.35÷0.40 µm, 0.40÷0.45 µm, 0.45÷0.50 µm, 0.50÷0.58 µm, 0.58÷0.65 µm, 0.65÷0.75 µm, 7.5÷8.5 µm, 8.5÷10.0 µm, 10.0÷12.5 µm, 12.5÷15.0 µm, 15.0÷17.5 µm, 17.5÷20.0 µm, 20.0÷25.0 µm, 25.0÷30.0 µm, 30÷32 µm, >32 µm.

³ Si definisce d_{ae} di una particella il diametro di geometrico di una particella sferica di densità unitaria avente lo stesso comportamento aerodinamico (ovvero stessa velocità di sedimentazione) della particella considerata.

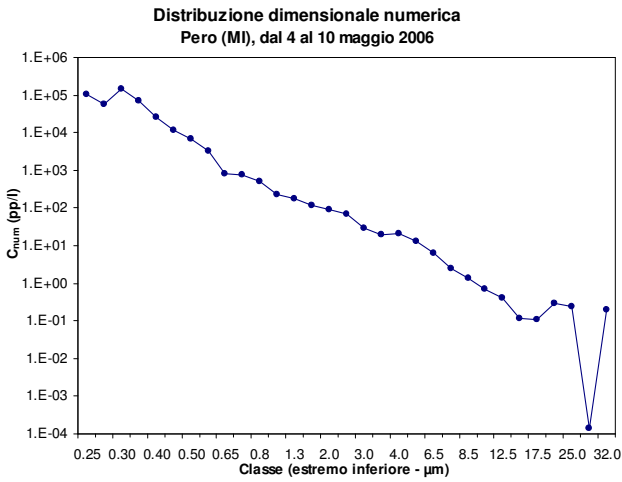


Figura 4.1 distribuzione dimensionale numerica discreta media del periodo

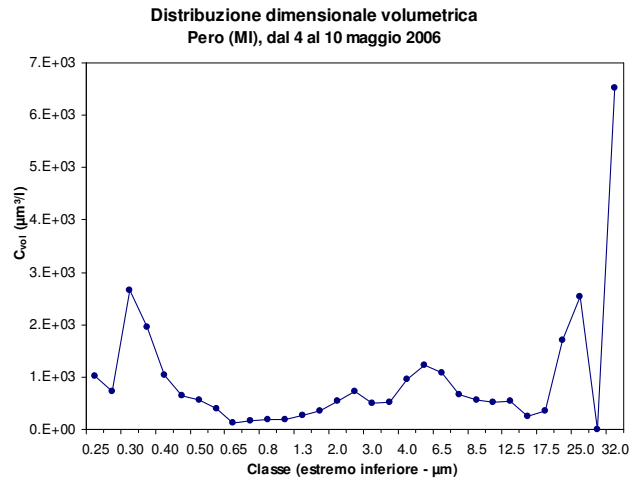


Figura 4.4: distribuzione dimensionale volumetrica discreta media del periodo

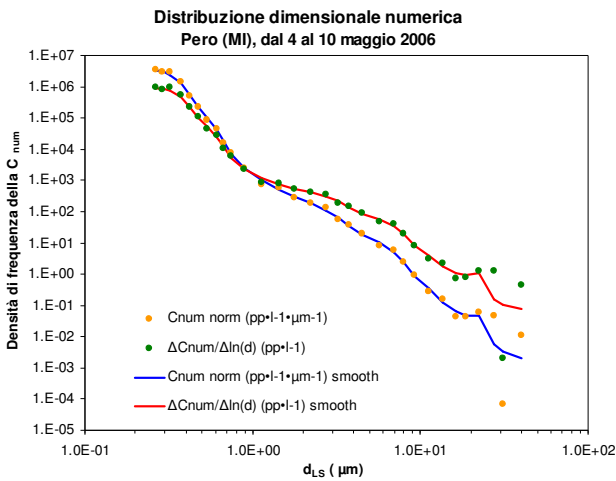


Figura 4.2: distribuzioni dimensionali numeriche continue medie del periodo

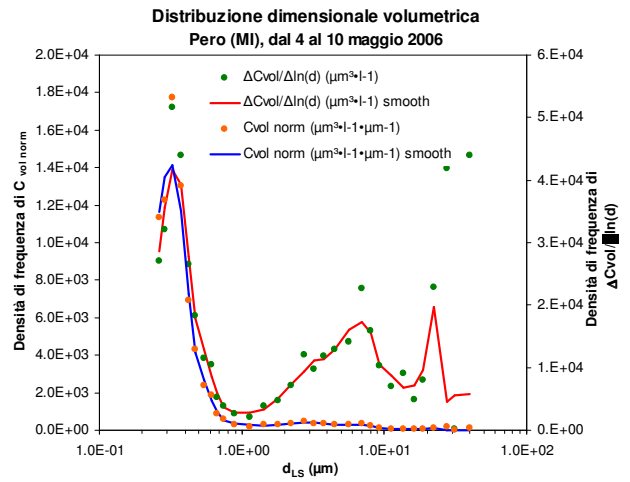


Figura 4.5: distribuzioni dimensionali volumetriche continue medie del periodo

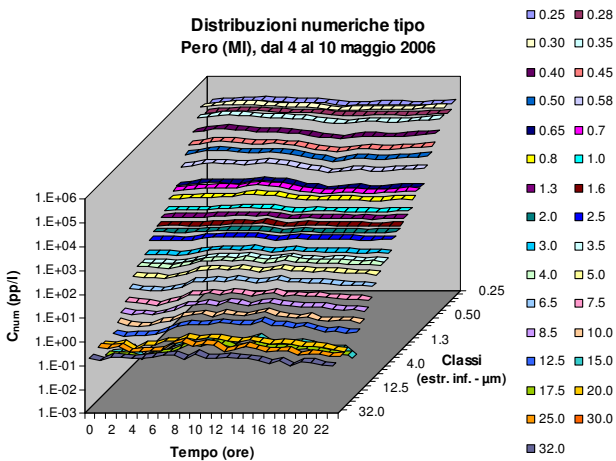


Figura 4.3: distribuzioni dimensionali numeriche discrete orarie tipo

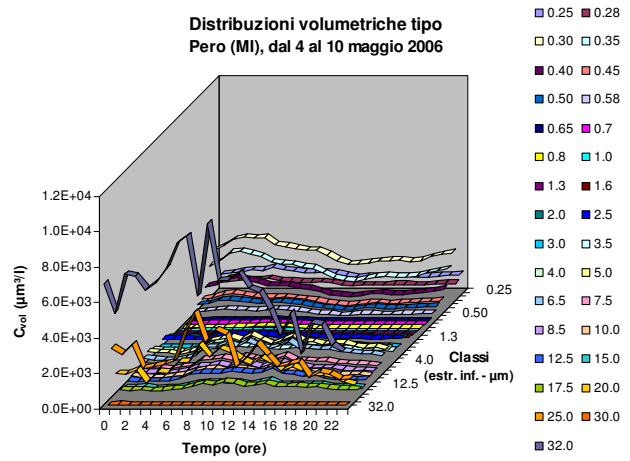


Figura 4.6: distribuzioni dimensionali volumetriche discrete orarie tipo

L'analisi delle distribuzioni dimensionali mostra un andamento tri-modale con un primo minimo attorno ad 1 μm ed un secondo minimo attorno a 15 μm ; tale distribuzione è tipica delle aree urbano ed indica l'esistenza di più modi principali per la produzione delle particelle aerodisperse. Le particelle con dimensioni superiori a 1 μm sono prodotte per lo più per processi meccanici di tipo primario e possono essere sospese o risospese per movimento dell'aria sia su scala locale (es. risospensione da parte degli autoveicoli) che su ampia scala (es. risospensione e trasporto per azione del vento). Le particelle di dimensioni inferiori sono prodotte sia per combustione (processo di tipo primario) che processi chimico-fisici quali ad esempio le reazioni chimiche e fotochimiche che portano alla formazione di nuove particelle generalmente ultrafini (dimensioni inferiori a 100 nm), la coagulazione di particelle ultrafini, la condensazione di materiale semivolatile sulla superficie delle particelle fini o ultrafini già esistenti, ecc. (processi di tipo secondario).

Poiché l'inlet del sistema OPC utilizzato non effettua alcuna selezione, è possibile determinare la distribuzione dimensionale del PM10 moltiplicando la distribuzione dimensionale misurata per l'efficienza di campionamento caratteristica di un selettore per PM10 riportata, per esempio, nella norma europea EN12341.

In figura 5.1 si riportano le distribuzioni dimensionali continue numeriche e volumetriche del particolato sospeso e del PM10. Poiché l'efficienza del selettore del PM10 si annulla per $d_{ae} > 16 \mu\text{m}$, le distribuzioni dimensionali del PM10 diventano bi-modali anziché tri-modali.

In figura 5.2 si mostra la distribuzione dimensionale volumetrica del PM10 rilevata in Pero – “Autostrada” insieme a quelle misurate in Arese (dal 24.02.06 al 06.03.06) e in Milano Parco Sempione (dal 12.05.06 al 09.06.06)⁴. Poiché si riferiscono a periodi dell'anno diversi, ed essendo interessati all'andamento della funzione densità di frequenza piuttosto che ai suoi valori assoluti, le funzioni in figura sono state normalizzate ciascuna al proprio massimo.

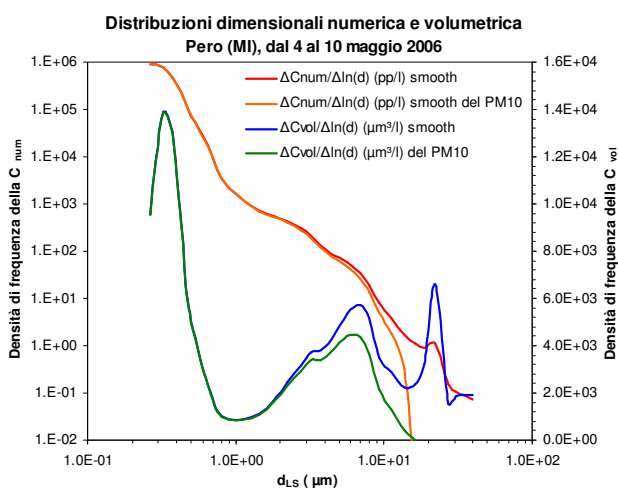


Figura 5.1: distribuzioni dimensionali numerica e volumetrica del particolato sospeso e del PM10

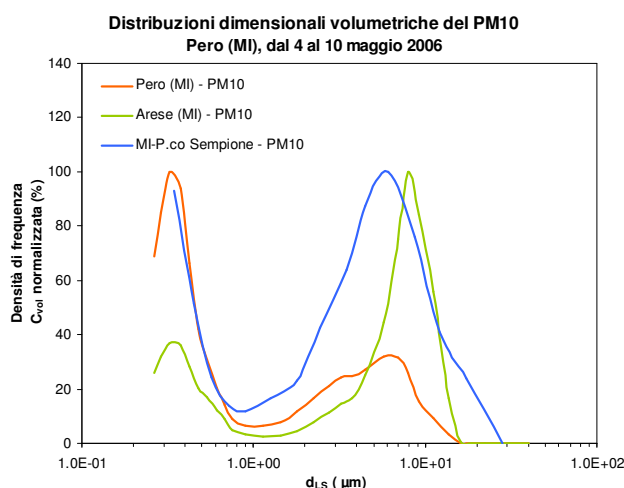


Figura 5.2: distribuzioni dimensionali volumetriche del PM10 in Pero-“Autostrada” e in altre località

⁴ La campagna in Milano Parco Sempione è stata svolta nell'ambito del progetto PARFIL; i dati riportati sono stati ottenuti con strumentazione del Politecnico di Milano ed elaborazioni dell'autore della presente relazione.

La distribuzione rilevata a Milano Parco Sempione può essere considerata tipica del fondo urbano milanese. Quella misurata in Arese è relativa ad una situazione ove la risospensione di polvere dal suolo rappresenta il contributo prevalente alle concentrazioni di PM10; infatti la campagna in Arese fu svolta nel periodo successivo ad alcune nevicate, che costrinsero l'amministrazione comunale a spargere sul fondo stradale notevoli quantità di sabbia per limitare i disagi conseguenti alla neve.

Il confronto tra le tre distribuzioni mostra che in Pero-“Autostrada“ il contributo relativo della risospensione di polvere dal suolo è modesto, inferiore anche a quanto rilevano nel sito di fondo urbano; è invece prevalente il contributo della particelle sub-micrometriche. Si ritiene di attribuire questo fatto alle emissioni primarie allo scarico degli autoveicoli in transito sull'autostrada; per quanto riguarda la risospensione si deve osservare che essendo la sede autostradale continuamente “spazzata” dagli automezzi, ciò che poteva essere risollevato è già stato in gran parte disperso. Infatti anche nel sito di Arese, dopo diversi giorni dallo spargimento della sabbia al suolo, le concentrazioni di PM10 sono ritornate equivalenti al quelle rilevate nelle altre località monitorate dell'area urbana milanese⁵.

In termini quantitativi, dalle funzioni di densità di frequenza delle concentrazioni numeriche di Pero e Milano Parco Sempione si calcola che l'incremento delle particelle sub-micrometriche (nell'intervallo $0.30 \div 0.65 \mu\text{m}$) in Pero dovuto all'autostrada sia di un fattore 3.2; poiché si tratta di particelle fini e il volume, ovvero la massa, delle particelle incrementa con la terza potenza della d_{ae} , il corrispondente incremento sulla concentrazione di massa non è lineare.

Per stimare quantitativamente il contributo del particolato sub-micrometrico e del PM2.5 alla concentrazione di massa del PM10 è stata calcolata la funzione densità di frequenza relativa cumulata (cfr. fig. 6).

Dal calcolo si stima che le frazione PM1 e PM2.5 costituiscono rispettivamente il 68.0% e il 74.4% della massa del PM10.

Per verificare quantitativamente ed oggettivamente se esiste un comportamento comune tra le serie delle concentrazioni numeriche medie orarie delle 31 classi dimensionali, sull'insieme di queste si è applicata l'analisi a cluster. Tale tecnica statistica raggruppa le 31 classi dimensionali in un numero più limitato di classi detti cluster, aventi un andamento temporale simile. Considerando che le concentrazioni numeriche tra le diverse classi dimensionali differiscono per diversi ordini di grandezza, l'analisi a cluster è stata condotta sulle serie autoscalate a media nulla e deviazione standard unitaria affinché negli eventuali cluster individuate le serie originali di appartenenza abbiano lo stesso “peso statistico”; si è adottato come indice di similarità tra le serie temporali il coefficiente di Pearson.

Il risultato dell'analisi a cluster è riportato nel dendrogramma di figura 7.

Considerando come fortemente correlate le serie con coefficiente di Pearson superiore a 0.80, dal dendrogramma si individuano i 6 cluster indicati in tabella 1.

⁵ (rif. M.Lazzarini, G.Tebaldi, V.Gianelle, S.Angius, “Analisi degli andamenti e delle possibili cause delle concentrazioni di PM10 osservate ad Arese nell'inverno 2005-2006”- ARPA Lombardia, 2006 e V.Gianelle, “Relazione tecnica sulla campagna di interconfronto tra il sistemi automatici TEOM e OPC per la misura del PM10 in Arese Via Matteotti” – ARPA Lombardia, 2006)

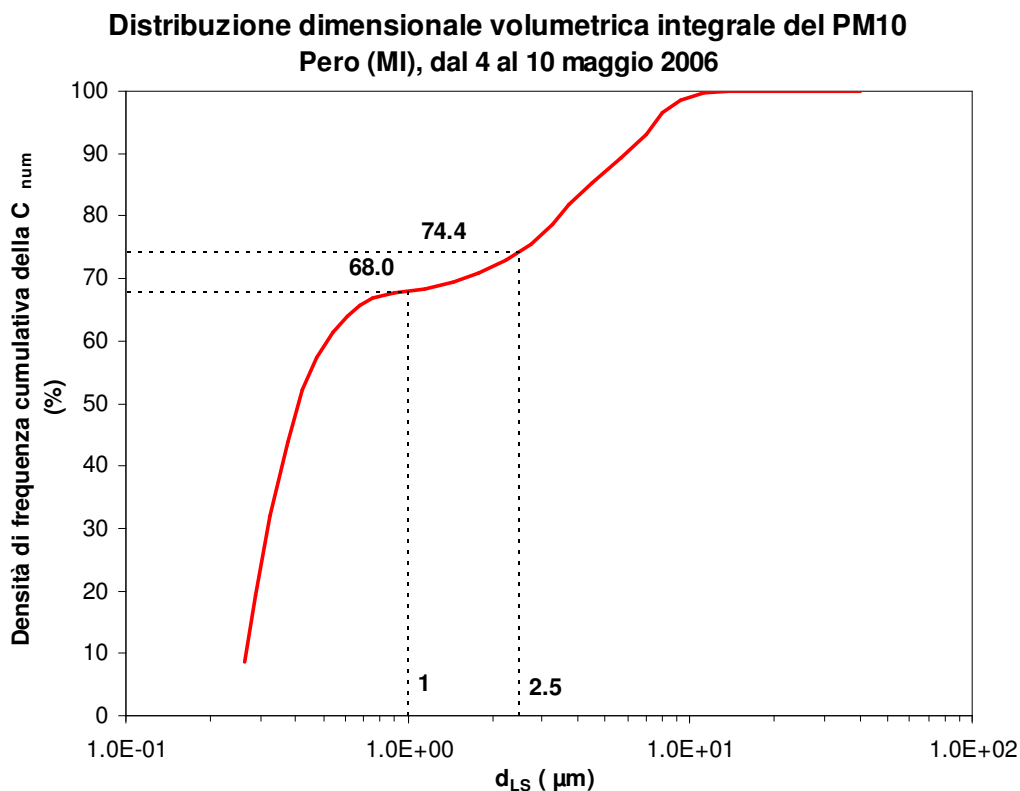


Figura 6: distribuzione dimensionale volumetrica integrale relativa del PM10 in Però-“Autostrada”

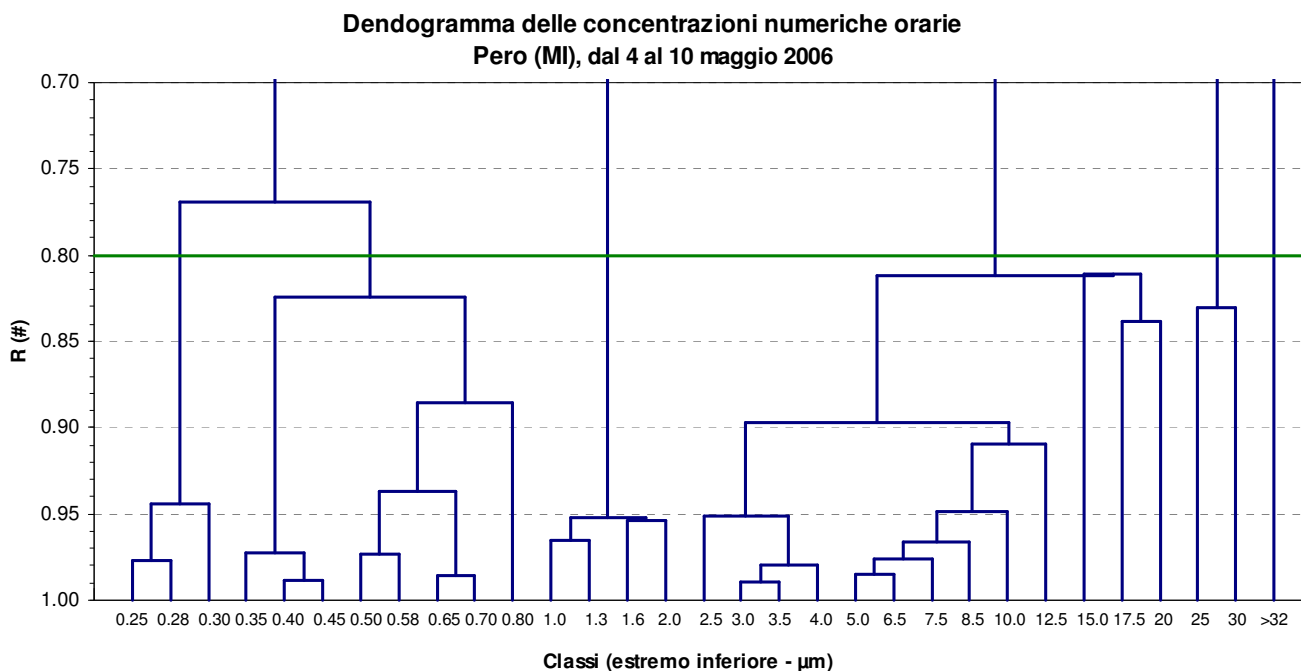


Figura 7: dendrogramma delle concentrazioni numeriche come risultato dall'analisi a cluster

Nelle elaborazioni successive quindi non saranno considerate tutte le 31 classi, ma i 6 cluster individuati, senza avere perdite significative di informazione.

Cluster n.	Intervallo dimensionale delle particelle	Numero di classi nel cluster	Indice di Pearson minimo
1	0.25÷0.35 µm	3	0.943
2	0.35÷1.0 µm	8	0.824
3	1.0÷2.5 µm	4	0.952
4	2.5÷25 µm	13	0.812
5	25÷32 µm	2	0.830
6	>32 µm	1	---

Tabella 1: cluster individuati con l'analisi a cluster

Nelle figure 8.1÷8.18 si riportano gli andamenti delle concentrazioni medie orarie e medie giornaliere e i giorni tipo dei cluster.

Risulta evidente dalle figure che ogni cluster ha un proprio comportamento;

Le distribuzioni dimensionali numeriche orarie tipo mettono in evidenza il differente comportamento tipo in relazione alla loro dimensione: le particelle sub-micrometriche, in relazione alle loro dimensioni sono in grado di “galleggiare” nell’aria per tempi molto lunghi, risentono principalmente delle condizioni di rimescolamento e atmosferico; considerando che nel periodo della campagna di notte si è avuta prevalenza delle classi di Pasquill di tipo neutro o stabile (cfr. fig. 3.23) e minore ventilazione rispetto alle ore diurne (cfr. fig. 3.6), le concentrazioni delle particelle sub-micrometriche risultano mediamente superiori nelle ore notturne rispetto alle ore diurne.

Le particelle super-micrometriche hanno invece un andamento tipico con un picco al mattino e concentrazioni diurne generalmente superiori a quelle notturne: le particelle più grosse sono emesse prevalentemente per risospensione da parte degli autoveicoli e quindi maggiormente nelle ore diurne; le loro dimensioni sono tali da consentirne una relativamente rapida deposizione e quindi una riduzione delle concentrazioni nelle ore notturne, quando la sorgente è meno attiva.

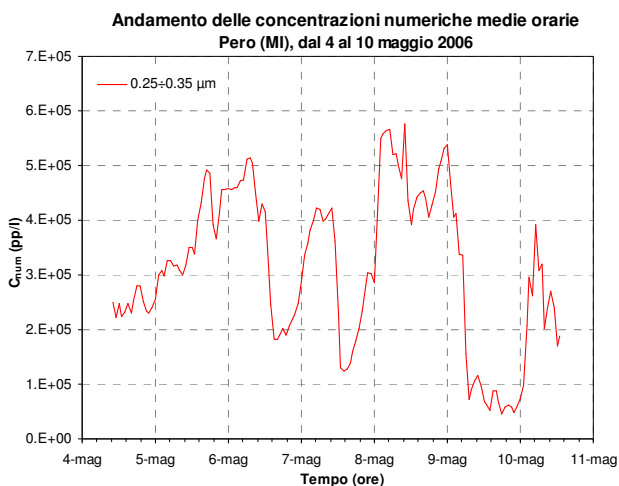


Figura 8.1: andamento delle concentrazioni numeriche medie orarie del cluster 0.25÷0.35 µm

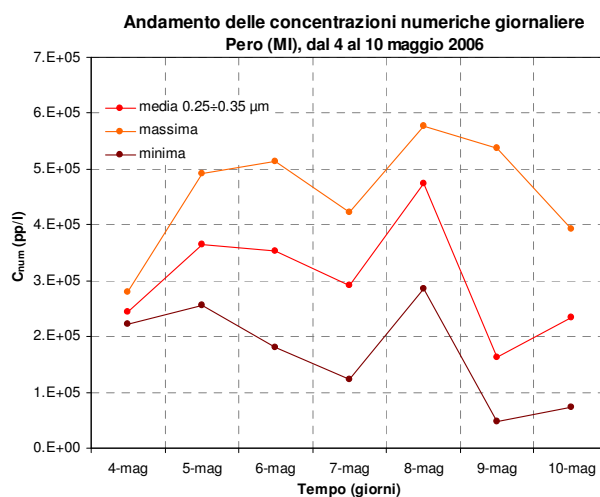


Figura 8.2: andamento delle concentrazioni numeriche medie giornaliere del cluster 0.25÷0.35 µm

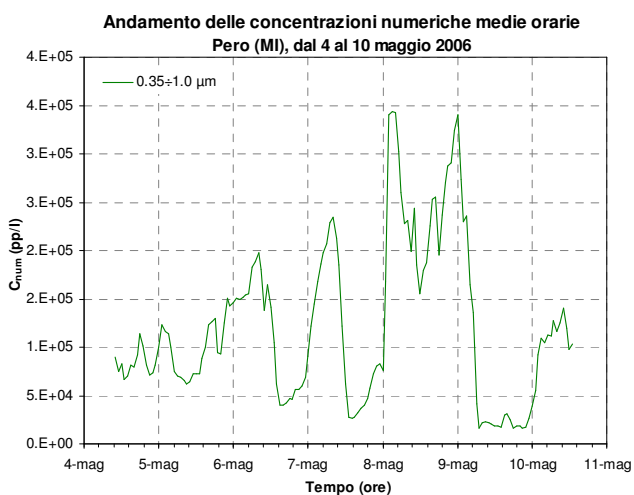


Figura 8.3: andamento delle concentrazioni numeriche medie orarie del cluster 0.35÷1.0 µm

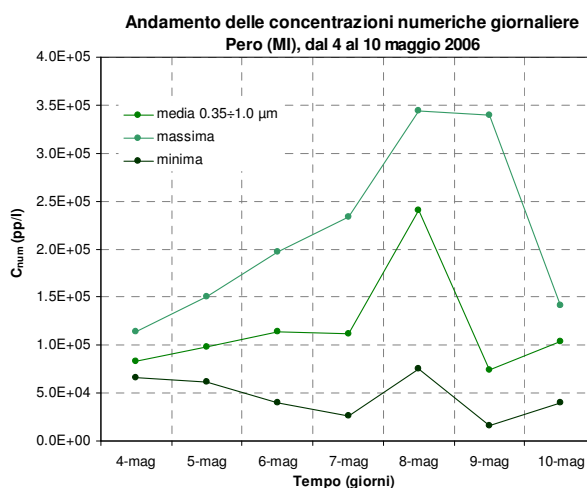


Figura 8.4: andamento delle concentrazioni numeriche medie giornaliere del cluster 0.35÷1.0 µm

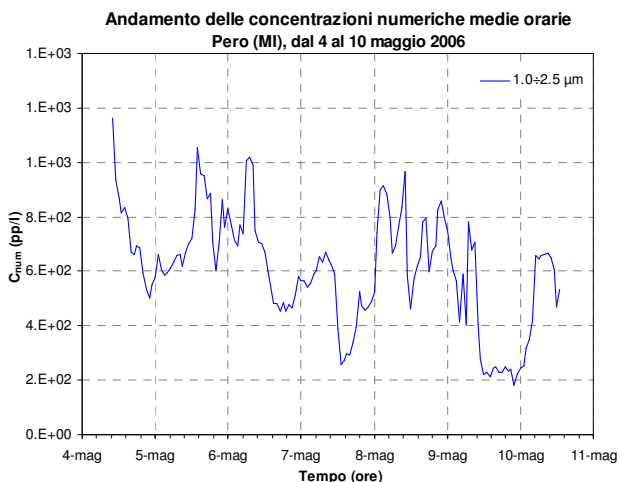


Figura 8.5: andamento delle concentrazioni numeriche medie orarie del cluster 1.0÷2.5 µm

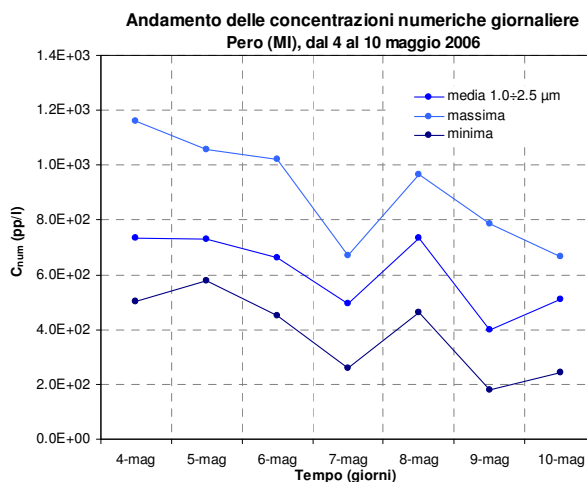


Figura 8.6: andamento delle concentrazioni numeriche medie giornaliere del cluster 1.0÷2.5 µm

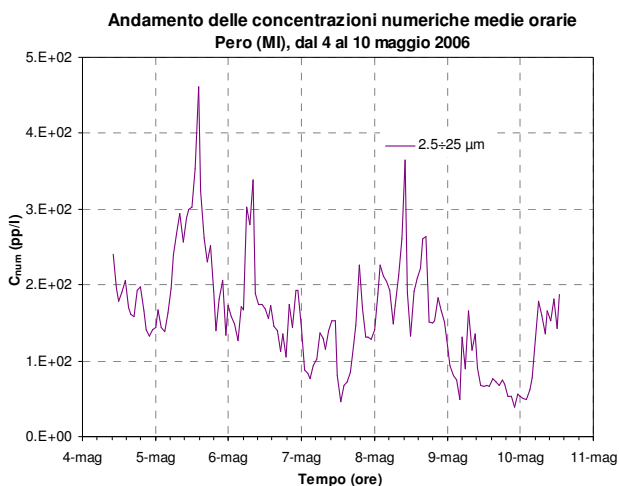


Figura 8.7: andamento delle concentrazioni numeriche medie orarie del cluster 2.5÷25 µm

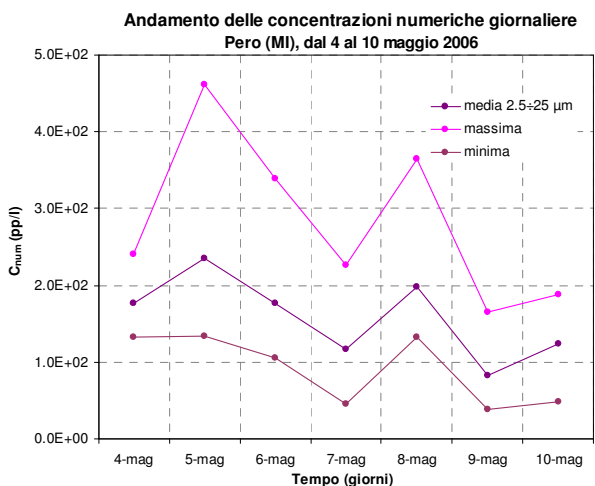


Figura 8.8: andamento delle concentrazioni numeriche medie giornaliere del cluster 2.5÷25 µm

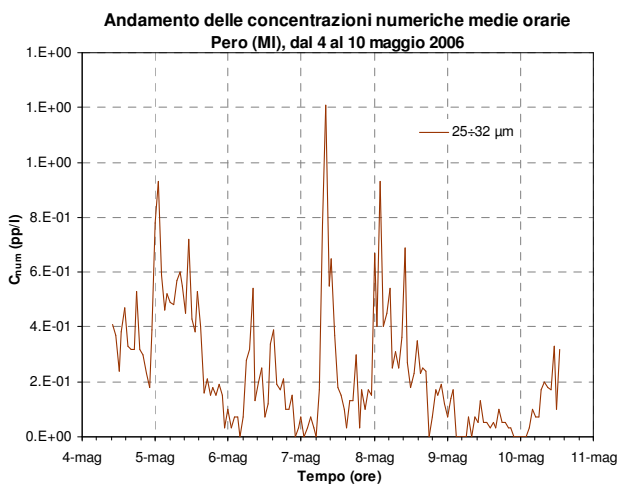


Figura 8.9: andamento delle concentrazioni numeriche medie orarie del cluster 25÷32 µm

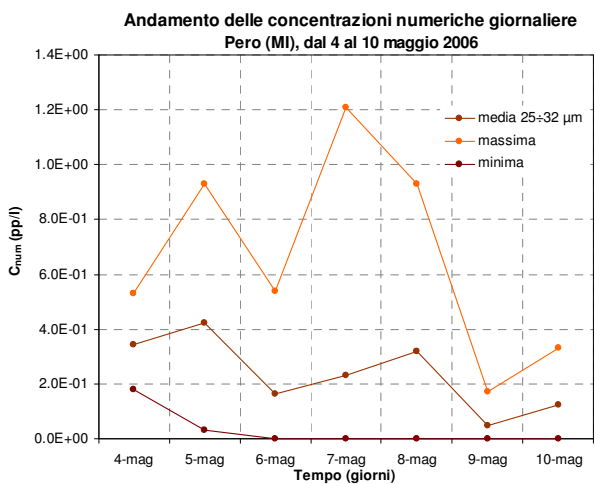


Figura 8.10: andamento delle concentrazioni numeriche medie giornaliere del cluster 25÷32 µm

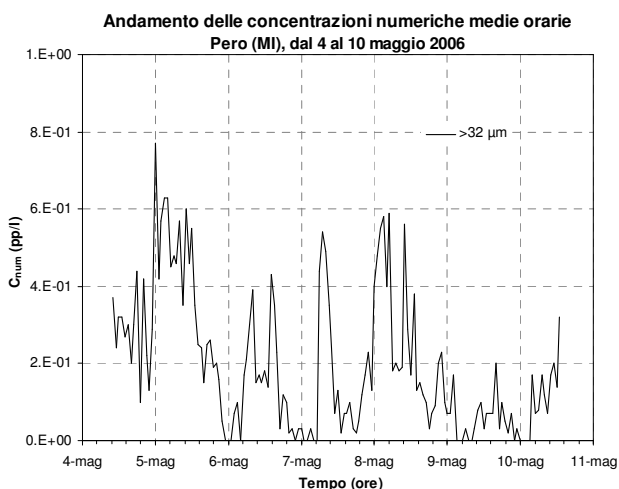


Figura 8.11: andamento delle concentrazioni numeriche medie orarie del cluster >32 µm

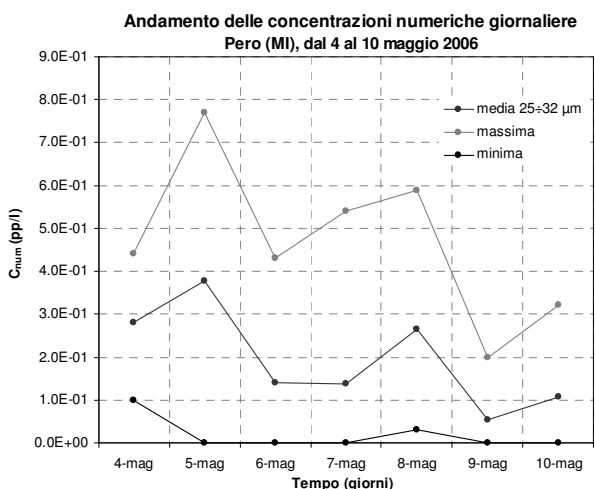


Figura 8.12: andamento delle concentrazioni numeriche medie giornaliere del cluster >32 µm

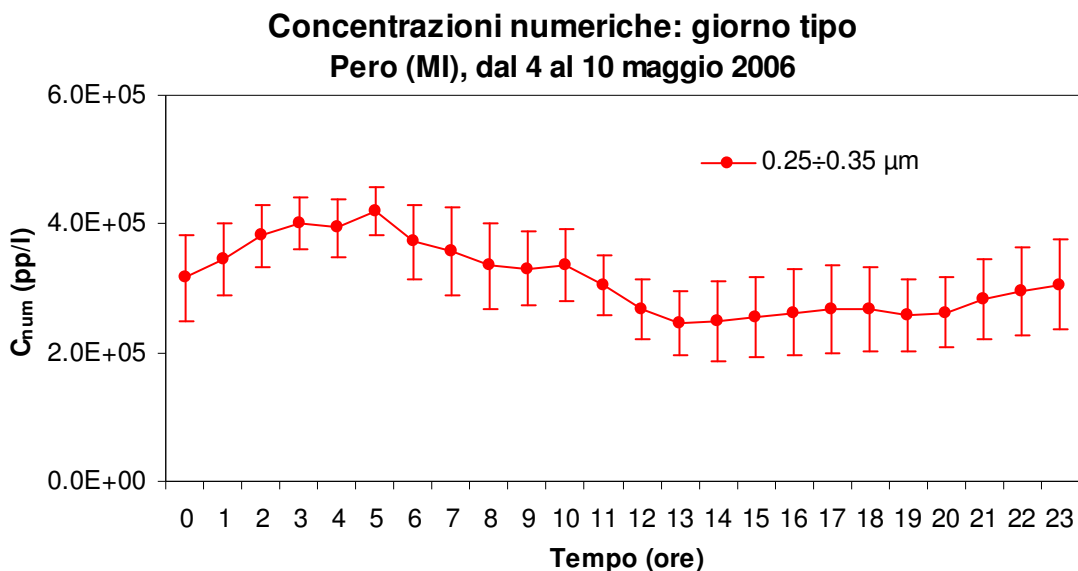


Figura 8.13: giorno tipo delle concentrazioni numeriche del cluster 0.25÷0.35 µm

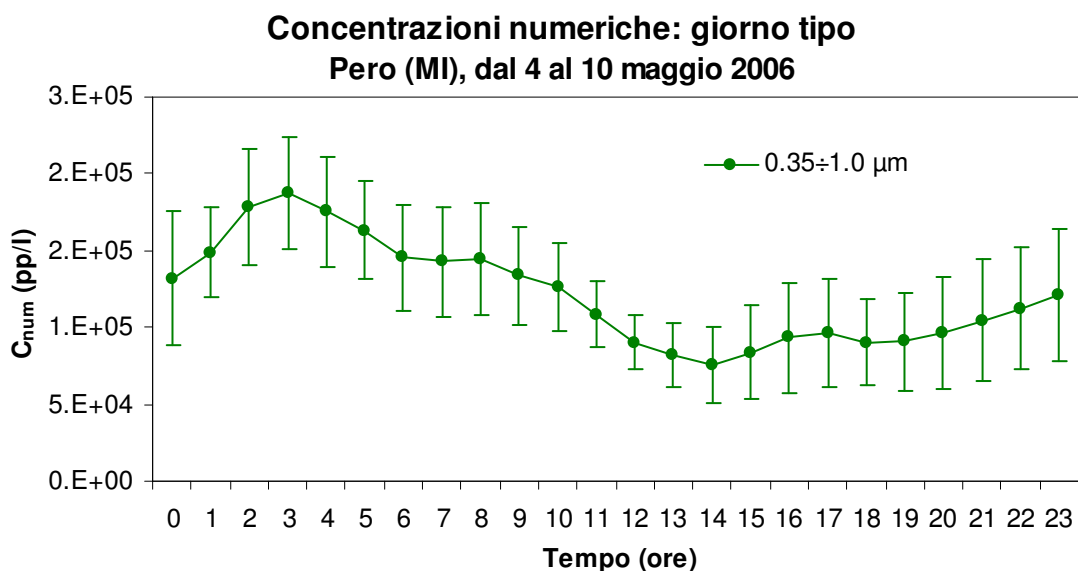


Figura 8.14: giorno tipo delle concentrazioni numeriche del cluster 0.35÷1.0 µm

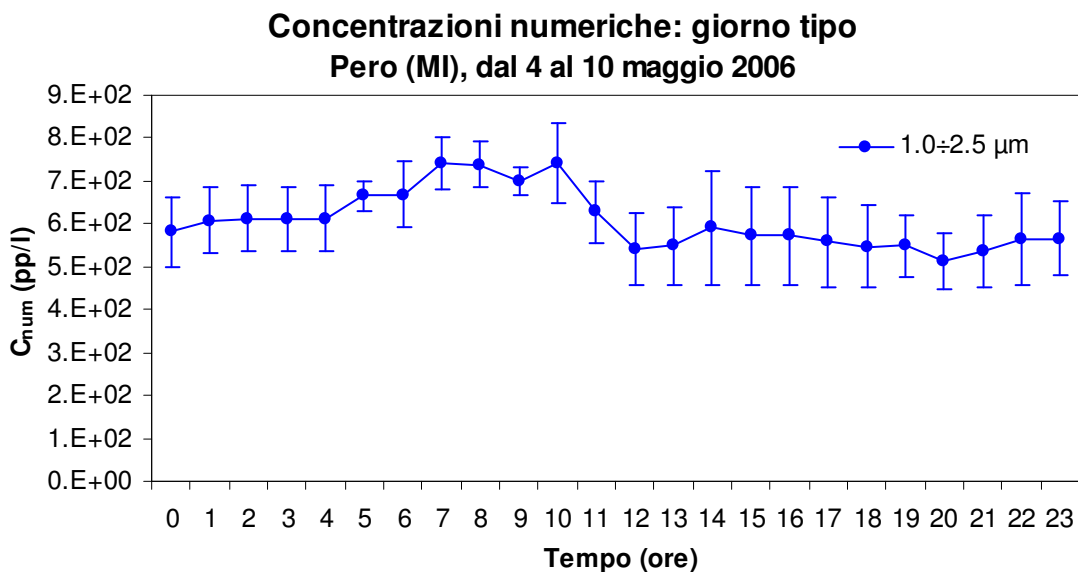


Figura 8.15: giorno tipo delle concentrazioni numeriche del cluster 1.0÷2.5 µm

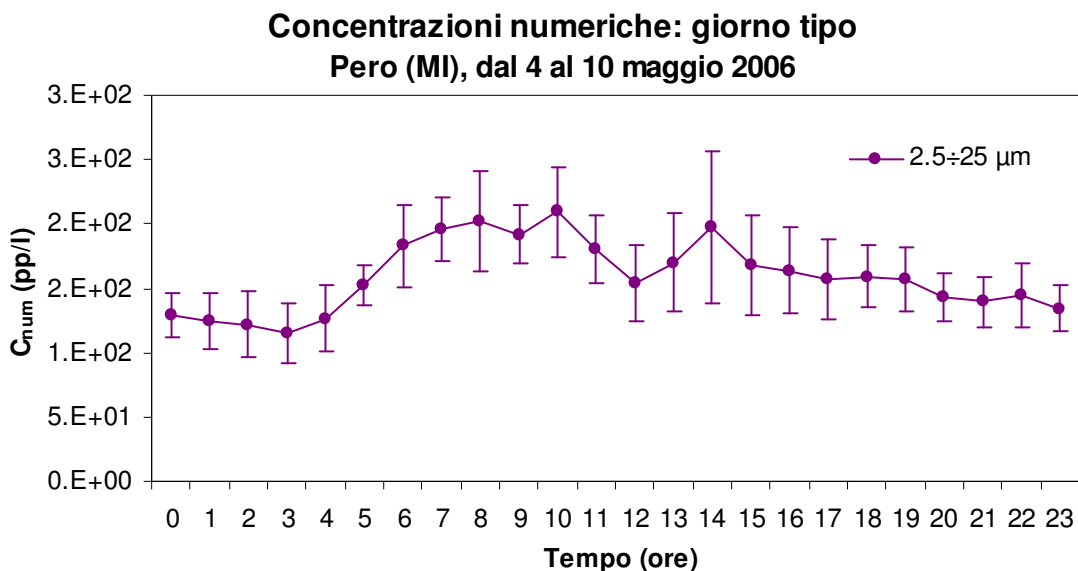


Figura 8.16: giorno tipo delle concentrazioni numeriche del cluster 2.5÷25 µm

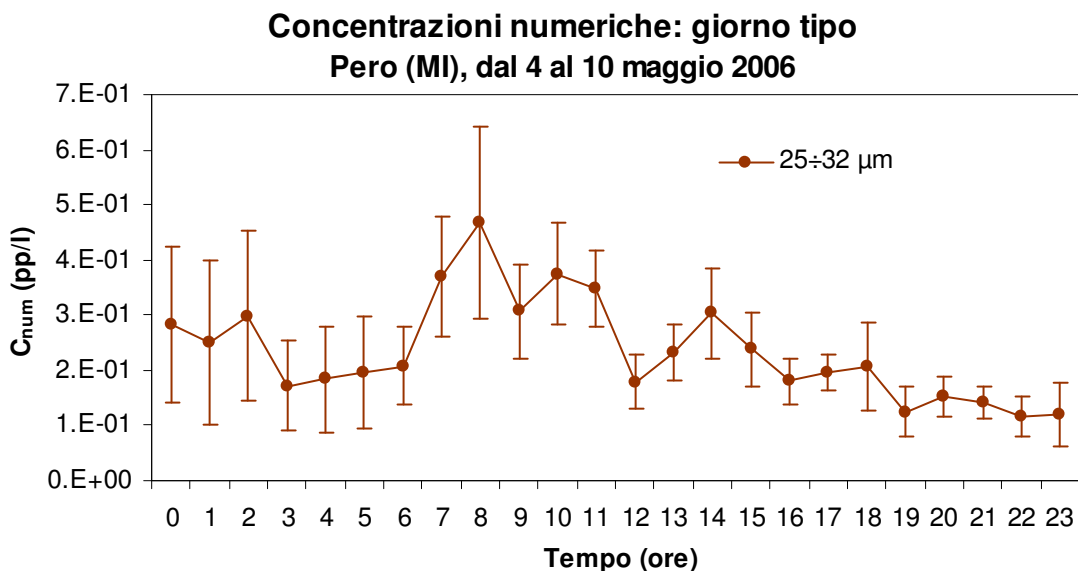


Figura 8.17: giorno tipo delle concentrazioni numeriche del cluster 25÷32 µm

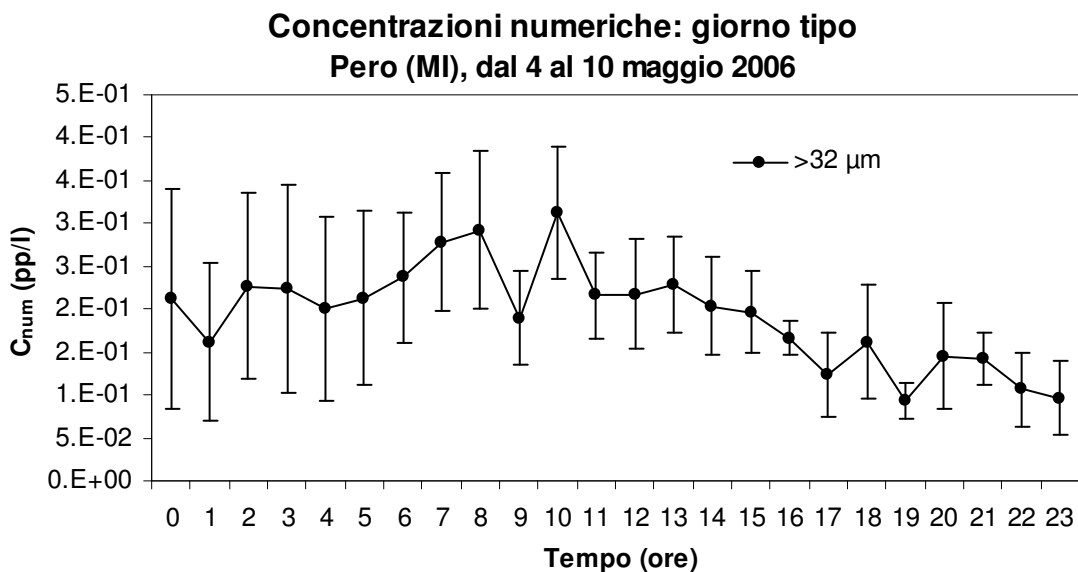


Figura 8.18: giorno tipo delle concentrazioni numeriche del cluster 0.35÷1.0 µm

Per valutare eventuali fenomeni di trasporto di particolato, sono state costruite le rose di inquinamento, ovvero per ogni cluster sono state calcolate le concentrazioni medie associate ad ogni direzione del vento. I risultati sono riportati in tabella 2; in figura 9 si riportano le rose che, per ragioni di rappresentazione grafica, sono state normalizzate alla concentrazione massima di ciascun cluster.

Settori (dir.)	Cluster					
	0.25÷0.35 µm	0.35÷1 µm	1÷2.5 µm	2.5÷25 µm	25÷32 µm	>32 µm
N	211360	59445	676	142	0.08	0.06
NE	353950	99544	770	255	0.39	0.28
E	350119	153917	627	169	0.32	0.29
SE	235284	95521	514	137	0.16	0.15
S	324660	113977	729	174	0.27	0.18
SO	285378	108608	550	145	0.23	0.16
O	250068	113407	609	154	0.14	0.13
NO	420173	129535	707	159	0.10	0.10

Tabella 2: rose di inquinamento; le concentrazioni numeriche sono espresse in particelle/litro

Rosa d'inquinamento
Pero (MI), dal 4 al 10 maggio 2006
C_{num} per settore normalizzate al massimo di ciascun cluster

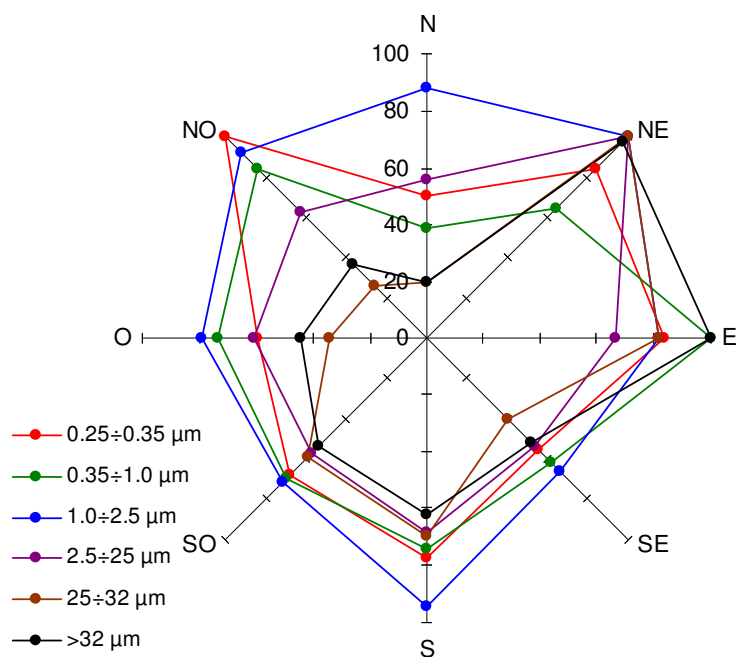


Figura 9: rose di inquinamento per i cluster individuati

Dalle rose risulta una relativa isotropia delle concentrazioni per le particelle con dimensioni inferiori a 2.5 µm; le differenze tra le concentrazioni per questa classe dimensionale sono da attribuirsi essenzialmente alla variabilità statistica dovuta al breve periodo della campagna. Considerando la vicinanza del punto di misura alla sede autostradale, la mobilità e le proprietà di diffusione delle particelle sub-micrometriche e le velocità del vento nel periodo della campagna,

non è possibile evidenziare una associazione tra le concentrazioni numeriche e direzioni del vento dai settori settentrionali corrispondenti alla situazione di punto di misura sotto vento alla sorgente.

Inversamente, per le particelle di dimensioni maggiori, ovvero per particelle con minori capacità diffusive, le concentrazioni numeriche risultano tendenzialmente maggiori quando il sito è sottovento alla sorgente.

Per valutare gli effetti degli altri parametri meteorologici quali la velocità del vento e le categorie di stabilità di Pasquill, si sono calcolate le concentrazioni numeriche medie per ogni classe dimensionale dei parametri meteorologici. I risultati sono mostrati nelle figure 10 e 11.

Per verificare la suddivisione in classi scelta per la velocità del vento, ovvero per assicurarsi di avere un numero statisticamente significativo di eventi, è stata preventivamente costruita la distribuzione della velocità del vento (cfr. fig. 3.29). Il numero di casi per ogni classe del vento è risultato sufficiente per le successive elaborazioni.

La concentrazione numerica delle particelle tende a diminuire con l'aumento della velocità del vento per tutti i cluster con dimensioni inferiori a 25 μm , ovvero per tutte le particelle appartenenti al PM10. La concentrazione delle particelle giganti ($d_{ae} > 25 \mu\text{m}$) invece aumenta con l'aumento della velocità del vento. Ciò si spiega considerando che il vento determina un ricambio dell'aria ed una conseguente diluizione delle particelle aerodisperse. Tuttavia velocità del vento maggiori favoriscono anche la risospensione naturale delle particelle giganti.

Per quanto riguarda la relazione con la stabilità atmosferica si osserva la situazione tipica degli ambienti urbani: la concentrazione delle particelle sub-micrometriche è più elevata in corrispondenza delle classi di Pasquill stabili anche se queste ultime si verificano prevalentemente di notte (E, F e G), mentre è tendenzialmente più bassa in corrispondenza delle classi più instabili (A, B e C) più frequenti nelle ore diurne (cfr. fig. 3.23); le emissioni avvengono di giorno, ma le particelle più fini sono in grado di galleggiare nell'aria per diverse ore; nelle ore notturne l'altezza dello strato di atmosfera rimescolata si riduce significativamente; si riduce quindi il volume a disposizione per la diluizione delle particelle e la loro concentrazione, di conseguenza, aumenta.

Al contrario accade alle particelle giganti poiché le emissioni di queste avvengono prevalentemente di giorno e il tempo di sedimentazione è così rapido da ricadere al suolo prima che giunga la notte.

I dati raccolti in questa breve campagna, considerata la complessità dei fenomeni coinvolti, non sono sufficienti per consentire elaborazioni statisticamente significative con gli altri parametri meteorologici rilevati.

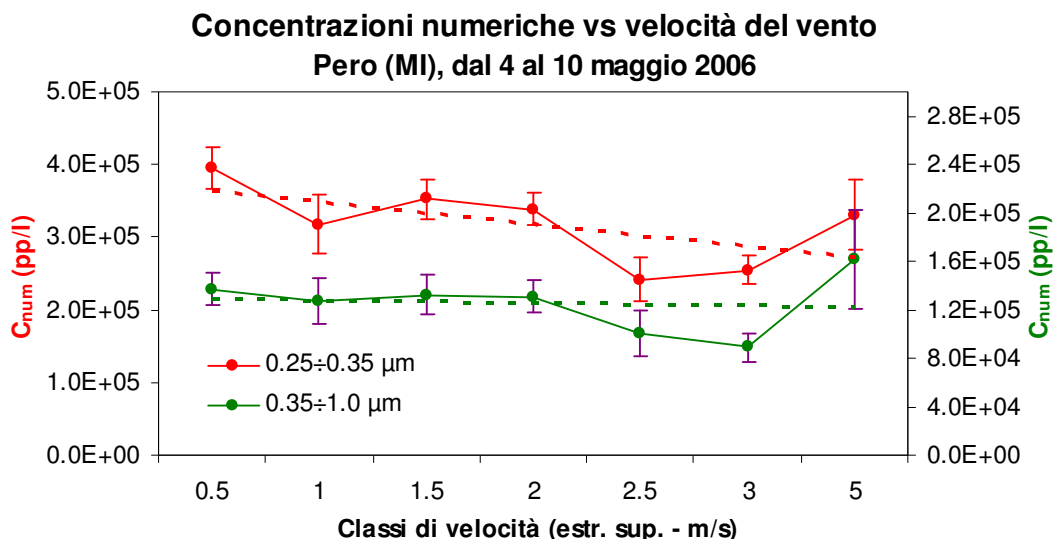


Figura 10.1: andamento delle concentrazioni numeriche per i cluster 0.25÷0.35 μm e 0.35÷1.0 μm in funzione della velocità del vento

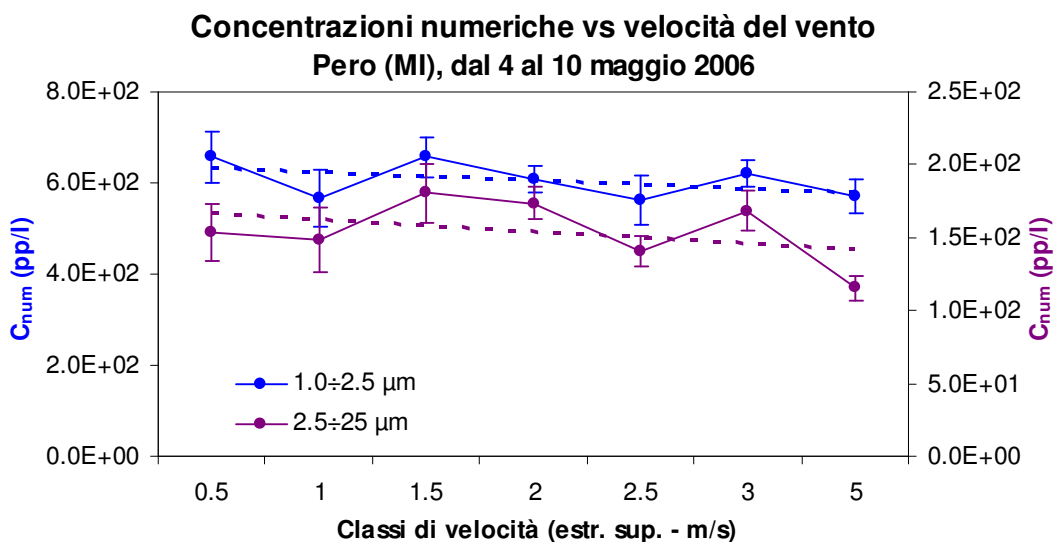


Figura 10.2: andamento delle concentrazioni numeriche per i cluster 1.0÷2.5 μm e 2.5÷25 μm in funzione della velocità del vento

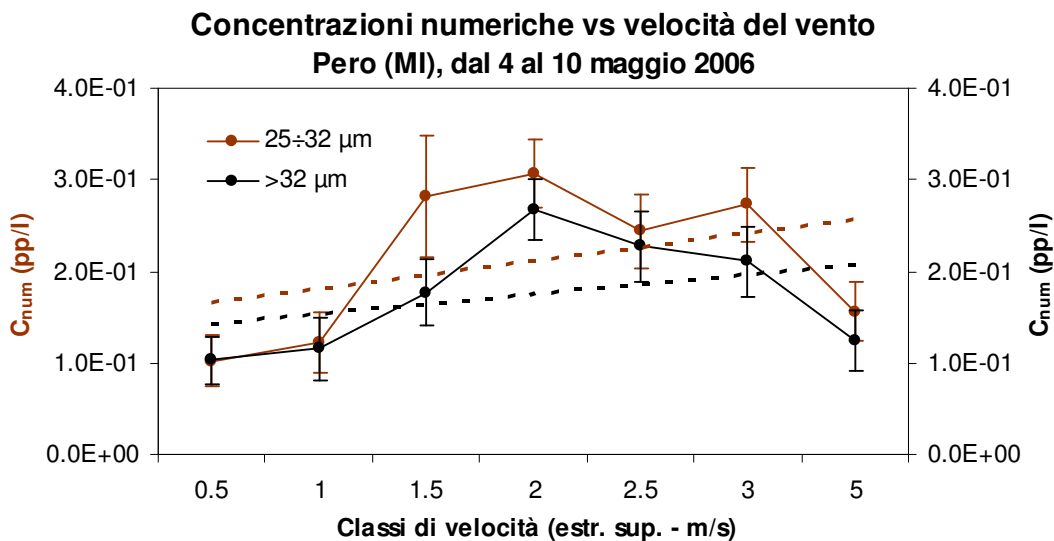


Figura 10.3 andamento delle concentrazioni numeriche per i cluster 25÷32 μm e >32 μm in funzione della velocità del vento

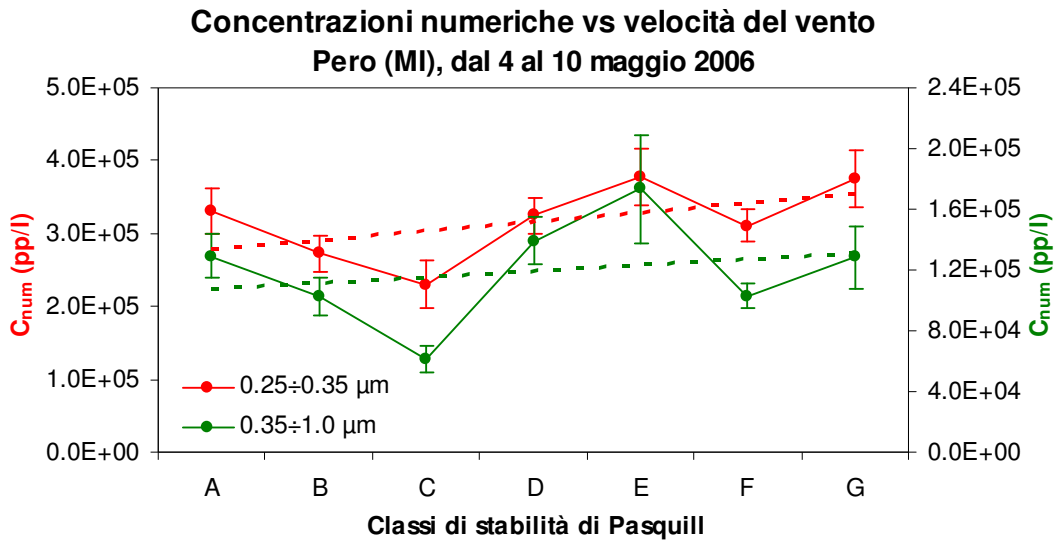


Figura 11.1: andamento delle concentrazioni numeriche per i cluster 0.25÷0.35 µm e 0.35÷1.0 µm in funzione delle classi di stabilità

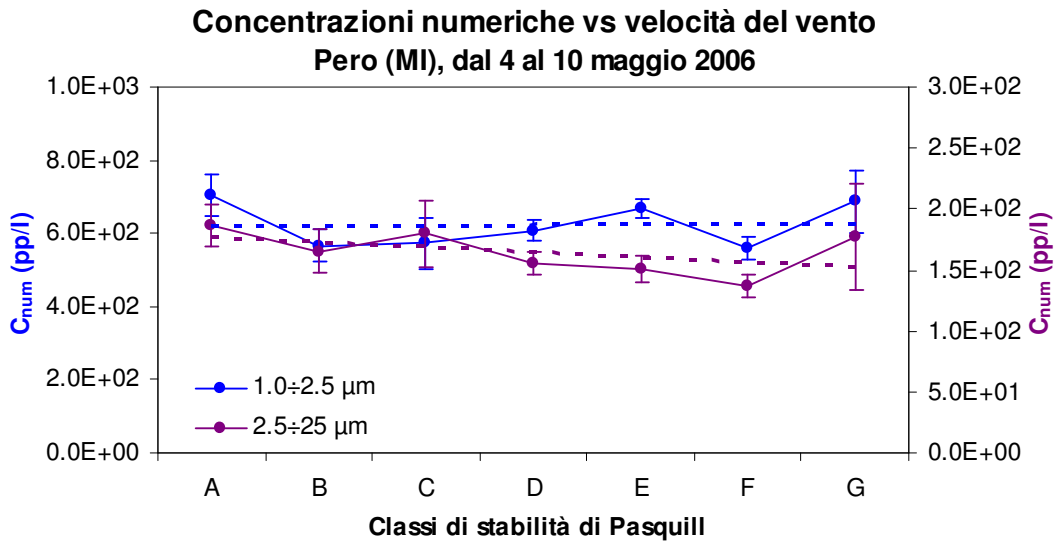


Figura 11.2: andamento delle concentrazioni numeriche per i cluster 1.0÷2.5 µm e 2.5÷25 µm in funzione delle classi di stabilità

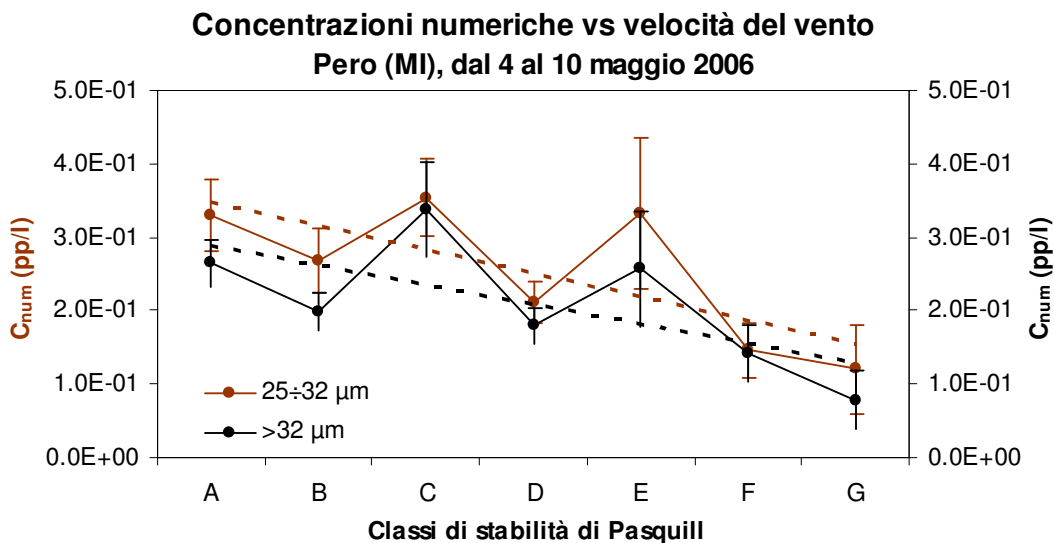


Figura 11.3: andamento delle concentrazioni numeriche per il cluster 25÷32 µm e >32 µm in funzione delle classi di stabilità

Discussione dei risultati dell'OPC sulle concentrazioni di massa

Dalle distribuzioni dimensionali volumetriche, attraverso un opportuno valore per la densità media delle particelle, tenendo conto delle curve di efficienza che definiscono le diverse frazioni del particolato aerodisperso, tenendo conto inoltre che le mode della distribuzione di massa possono essere approssimate da funzioni log-normali, è possibile calcolare la concentrazione di massa delle frazioni PM10, PM2.5 e PM1 del particolato aerodisperso. Tali calcoli sono già integrati nell'OPC utilizzato.

In figura 12.1 si riportano gli andamenti delle concentrazioni di massa medie orarie del PM10, del PM2.5, del PM1 e della frazione "Coarse" (PM10-PM2.5) rilevate dall'OPC, mentre in figura 12.2 si mostrano gli andamenti delle concentrazioni medie giornaliere delle grandezze precedenti insieme a quelle del PM10 rilevato dai sistemi gravimetrici⁶ nei 3 siti coinvolti nella campagna di Pero 2006.

Nelle figure 12.3 e 12.4 si illustrano i giorni tipo de il PM10, il PM2.5, il PM1 e la frazione "Coarse" misurate con l'OPC.

Nelle figure 13 si riportano gli andamenti dei rapporti medi orari e medi giornalieri PM1/PM2.5, PM1/PM10 e PM2.5/PM10 e dei corrispondenti giorni tipo.

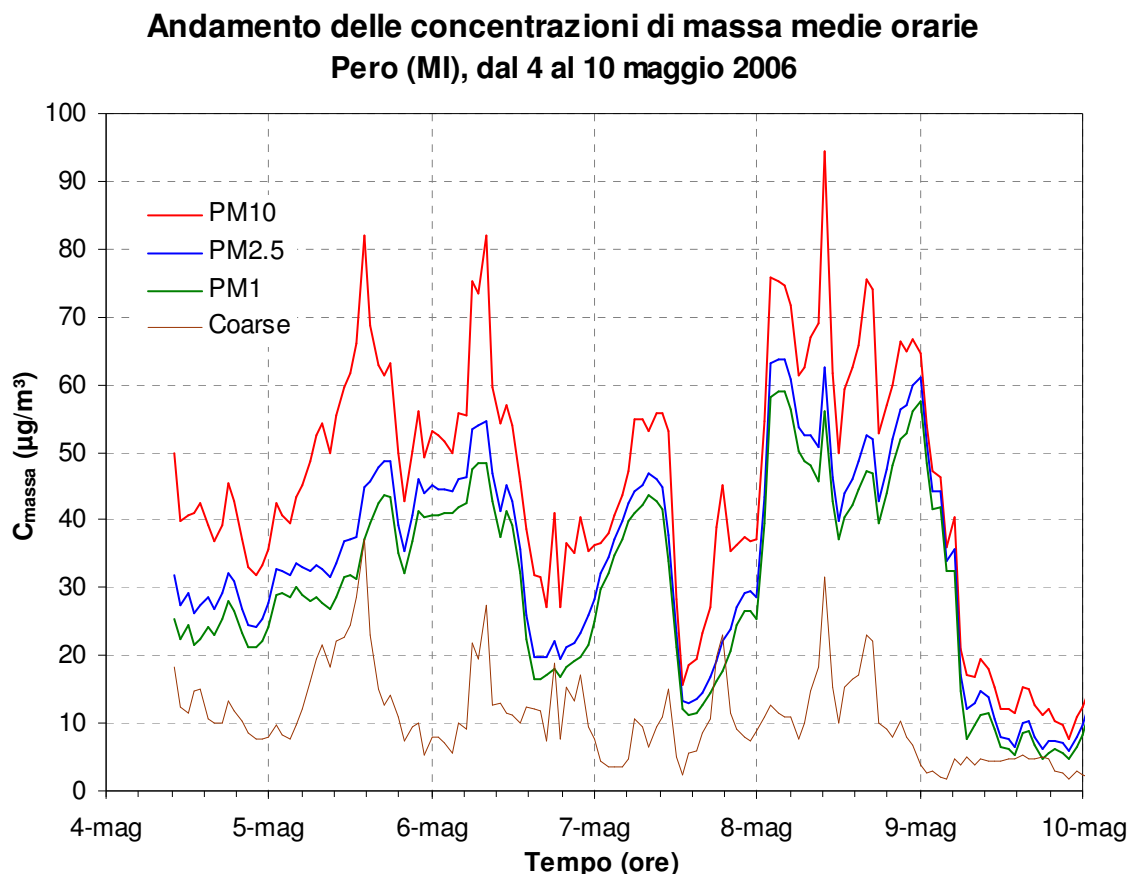


Figura 12.1: andamento delle concentrazioni di massa medie orarie per PM10, PM2.5, PM1 e "Coarse"

⁶ Il metodo gravimetrico è il metodo di riferimento per la misura della concentrazione di massa del PM10; sinteticamente esso consiste nella raccolta su filtro, in condizioni controllate e con inlet idoneo, della polvere aerodispersa e successiva pesata in laboratorio; per dettagli si rimanda alla relazione citata nell'introduzione.

**Andamento delle concentrazioni di massa giornaliere
Pero (MI), dal 4 al 10 maggio 2006**

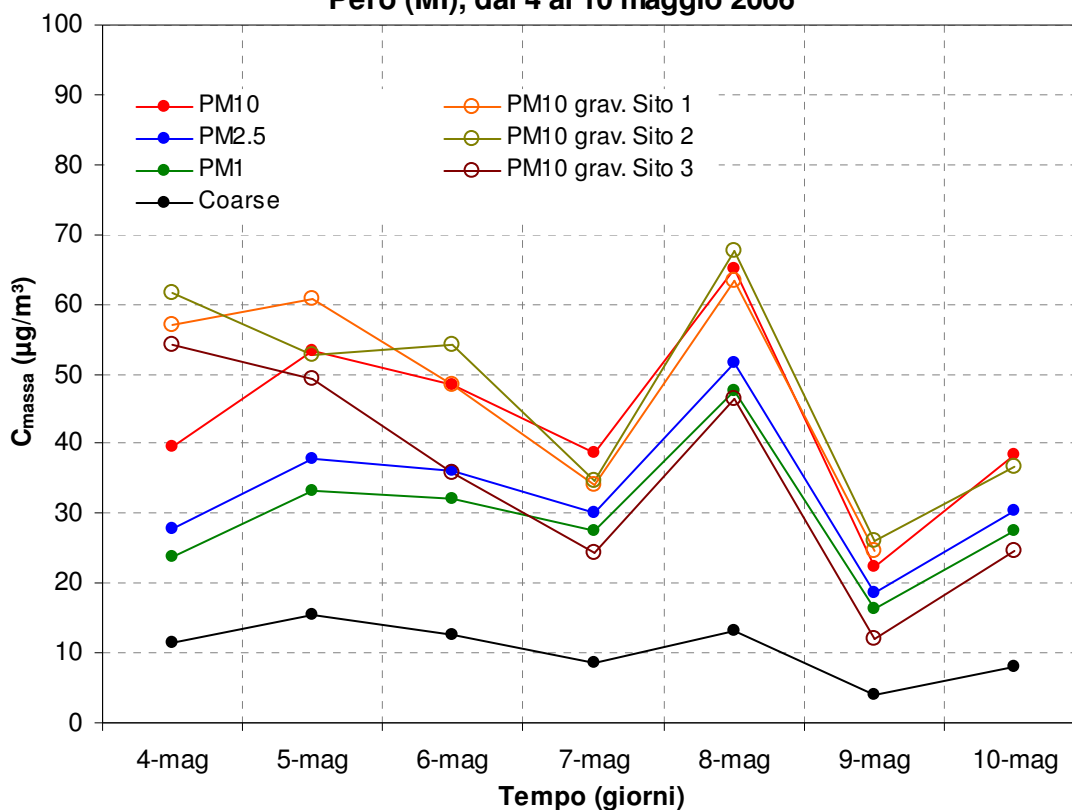


Figura 12.2: andamento delle concentrazioni di massa medie giornaliere per PM10, PM2.5, PM1, Coarse e PM10 misurato con il metodo gravimetrico nei tre siti della campagna Pero 2006

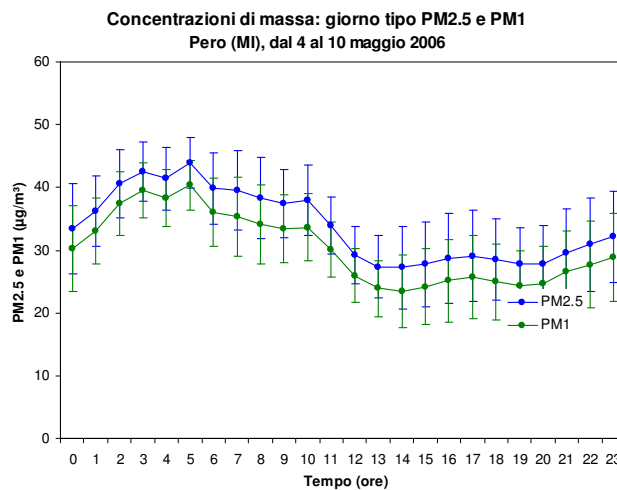
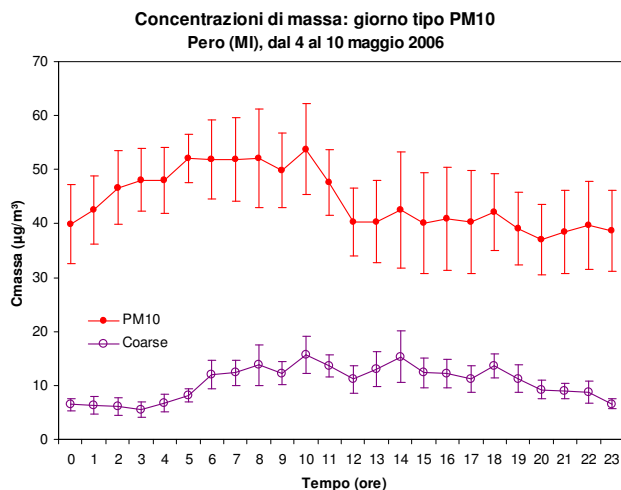


Figura 12.3/4: giorni tipo delle concentrazioni di massa di PM1, PM2.5, PM10 e "Coarse"

**Andamento dei rapporti tra C_{massa} PM1, PM2.5 e PM10
Però (MI), dal 4 al 10 maggio 2006**

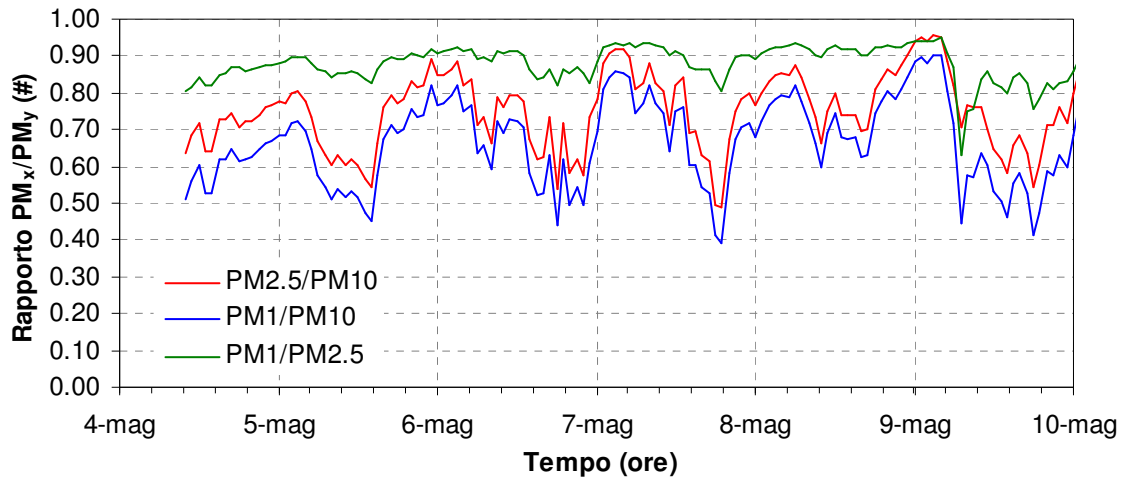


Figura 13.1: andamento dei rapporti medi orari tra le concentrazioni di massa di PM10, PM2.5 e PM1

**Andamento dei rapporti tra C_{massa} PM1, PM2.5 e PM10
Però (MI), dal 4 al 10 maggio 2006**

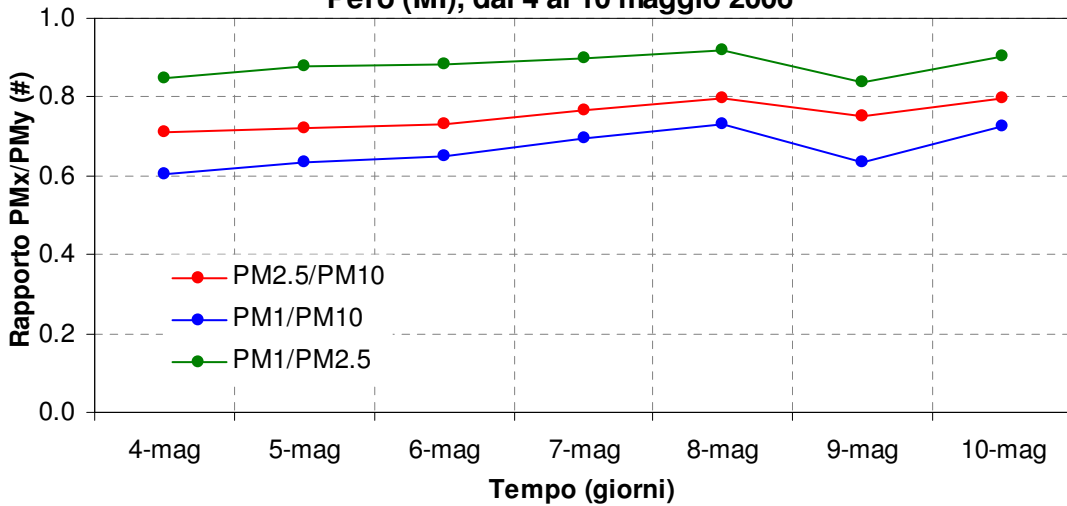


Figura 13.2: andamento dei rapporti medi giornalieri tra le concentrazioni di massa di PM10, PM2.5 e PM1

**Rapporti di massa: giorno tipo
Però (MI), dal 4 al 10 maggio 2006**

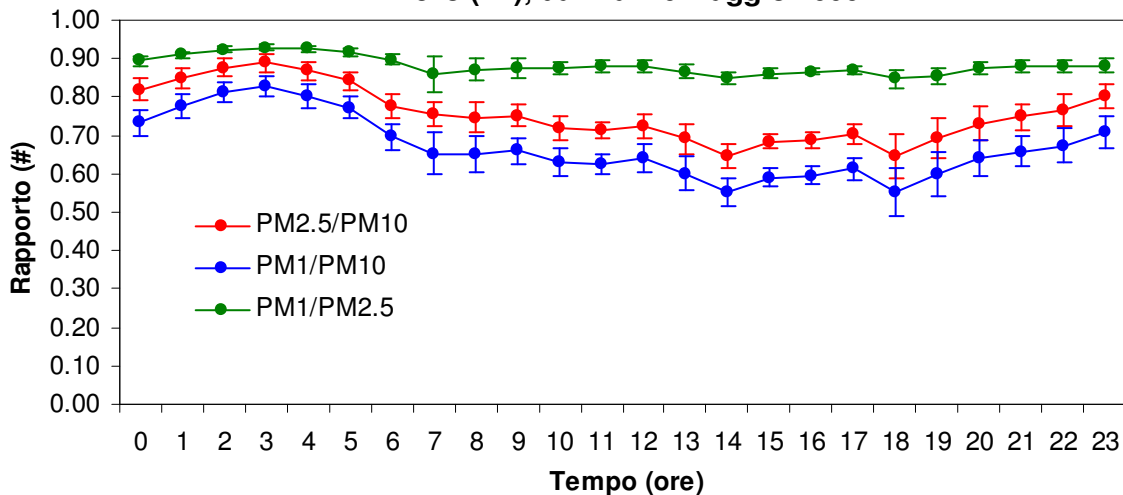


Figura 13.1: andamento dei rapporti tra le concentrazioni di massa di PM10, PM2.5 e PM1

L'inquinamento da polveri è risultato variabile da giorno a giorno, in relazione alla variabilità delle condizioni meteorologiche. Per la differente natura delle particelle di dimensioni superiori o inferiori a 2.5 µm, come già osservato per le concentrazioni numeriche, gli andamenti orari del PM10 differiscono talvolta da quelli del PM2.5 e del PM1, mentre questi ultimi sono tra loro molto più simili. Si ha un buon accordo tra le concentrazioni di massa del PM10 rilevate con l'OPC nel sito Autostrada e con il metodo gravimetrico nei siti Autostrada, Autogrill e Cabina. Per quantificare tale accordo sono state determinate le rette e i parametri della correlazione (cfr. fig. 14).

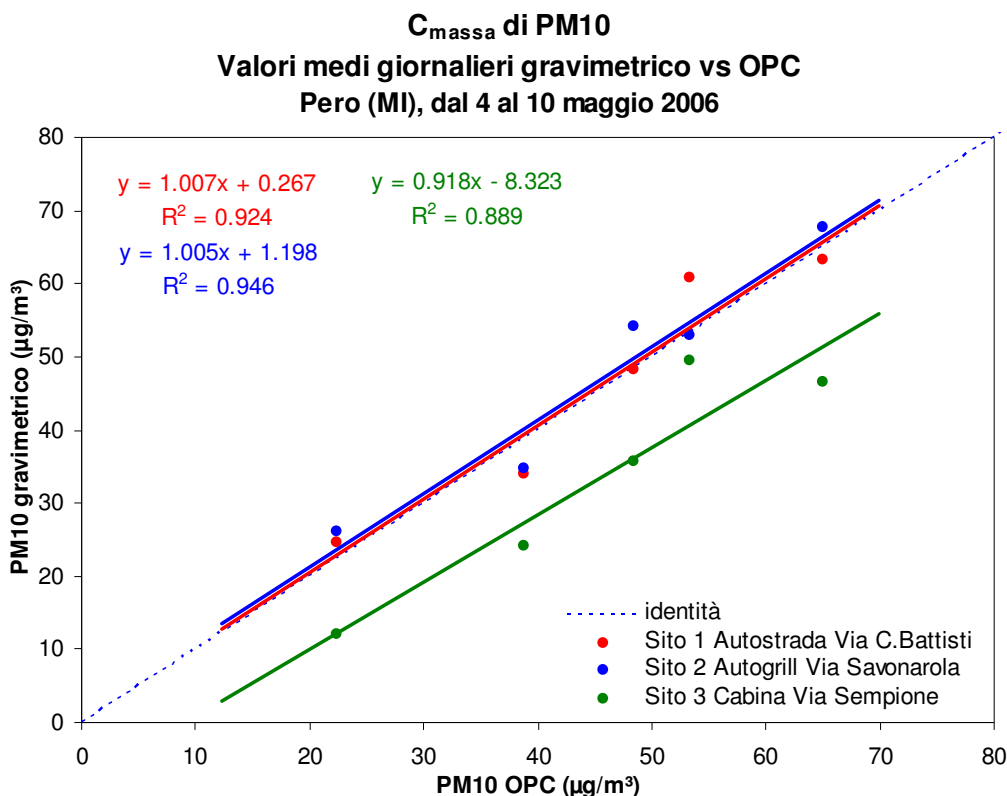


Figura 14: correlazione tra le concentrazioni di massa del PM10 rilevate dall'OPC e quelle misurate con il metodo gravimetrico nei tre punti della campagna Pero 2006

La correlazione è ottima essendo i coefficienti R^2 superiori a 0.9 per i siti più vicini all'autostrada. Inoltre le rette di interpolazione relative ai siti 1 e 2 non si distinguono dall'identità: i risultati dell'OPC sono equivalenti a quelli ottenuti con il metodo di riferimento. Le concentrazioni nel sito 3 più lontano dall'autostrada sono sistematicamente inferiori a quelle degli altri due siti. Per un confronto dettagliato tra i tre siti si rimanda comunque alla relazione citata nell'introduzione; si riportano qui, come risultato sintetico, le concentrazioni di PM10 medie di tutto il periodo della campagna Pero 2006 (6 aprile ÷ 10 maggio 2006): 50 µg/m³ nel sito 1 "Autostrada", 44 µg/m³ nel sito 2 "Autogrill" e 36 µg/m³ nel sito 3 "Cabina". Da questi dati si calcola che l'incremento di particelle fini per le emissioni dirette dell'autostrada comporta un aumento delle concentrazioni di massa di circa 40%.

I giorni tipo delle concentrazioni di massa (cfr. fig. 12.3 e 12.4) riflettono, mediando, le osservazioni già fatte sulle concentrazioni numeriche.

Gli andamenti dei rapporti delle concentrazioni di massa mettono in evidenza una ciclicità giornaliera legata al fenomeno della risospensione di polvere dal suolo; infatti il rapporto PM1/PM2.5 è quasi costante, mentre i rapporti PM1/PM10 e PM2.5/PM10 si riducono nelle ore diurne e in coincidenza si rileva un aumento della frazione “Coarse” (cfr. fig. 12.3).

I rapporti di massa medi giornalieri rimangono invece costanti, indicando che i fenomeni su citati con periodicità giornaliera sono importanti, mentre la variabilità delle condizioni meteorologiche nei giorni della campagna ha influito in misura equivalente sulle tre classi dimensionali, inducendo a pensare che non sia cambiata la “qualità” del particolato (ovvero la sua composizione) durante la settimana di campagna con l’OPC.

Conclusioni

La breve campagna di misura con l’OPC è stata effettuata come approfondimento sulla distribuzione dimensionale del particolato nell’ambito della campagna più estesa realizzata nel comune di Pero, avente come principale obiettivo lo studio del contributo delle emissioni da traffico in generale, e più in particolare del traffico autostradale, all’inquinamento atmosferico da gas e polveri fini nel territorio comunale.

I dati raccolti con l’OPC hanno messo in evidenza come varia la dimensione delle particelle aerodisperse in relazione ad alcuni importanti parametri meteorologici; in particolare un aumento dell’intensità del vento favorisce la riduzione del particolato di dimensioni sub-micrometriche ma tende ad aumentare la concentrazione delle particelle super-micrometriche. Sebbene le emissioni di polveri avvengano nelle ore diurne, per le condizioni termodinamiche e per le proprietà diffusive delle particelle legate alle loro dimensioni le particelle sub-micrometriche fanno registrare le concentrazioni elevate prevalentemente nelle ore notturne, mentre le particelle più grossolane subiscono il fenomeno della sedimentazione e la loro concentrazione si riduce in poche ore in assenza di sorgenti.

In relazione all’impatto dell’autostrada sull’inquinamento da polveri, è stato stimato un incremento di circa un fattore 3.2 per la concentrazione numerica di particelle nell’intervallo dimensionale $0.30\div 0.65\ \mu\text{m}$ al bordo della sede autostradale rispetto al sito nel centro di Pero. Un tale incremento nel numero delle particelle sub-micrometriche, considerate le loro piccole dimensioni, non corrisponde ad un aumento proporzionale nella concentrazione di massa; l’incremento percentuale di massa calcolato è di circa 40%.

Tale fatto conduce ad affermare che, in generale, la sola concentrazione di massa del PM10 è un indice insufficiente per caratterizzare l’inquinamento da polveri aerodisperse.

U.O. Aria
Il Fisico Dirigente
Dott. Vorne Gianelle