



**Misurazione del PM<sub>10</sub>, del PM<sub>2,5</sub> e di gas nell'area  
portuale della Laguna di Venezia.**

(contratto Autorità Portuale di Venezia con IDPA-CNR, Venezia)

Responsabile Scientifico

IDPA-CNR, Venezia

Prof. Paolo Cescon

Prof. Andrea Gambaro

## **Ricercatori e personale impiegato nel Progetto di Ricerca**

Prof. P. Cescon	IDPA-CNR Venezia
Prof. A. Gambaro	Dip. Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari Venezia
Dr. G. Giovanelli	ISAC-CNR Bologna
Dr. D. Bortoli	ISAC-CNR Bologna
Dr. A. Petritoli	ISAC-CNR Bologna
Dr. I. Kostadinov	ISAC-CNR Bologna
Dr. S. Masieri	ISAC-CNR Bologna
Dr. A. Stortini	IDPA-CNR Venezia
Dr. S. De Pieri	IDPA-CNR Venezia
Dr. M. Radaelli	Dip. Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari Venezia
Dr. E. Zuccon	IDPA-CNR Venezia
V. Zampieri	Dip. Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari Venezia
I. Ongaro	Università Ca' Foscari Venezia
Dr. F. Ravegnani	ISAC-CNR Bologna
Dr. M. Premuda	ISAC-CNR Bologna
Dr. R. Zangrando	Dip. Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari Venezia

# INDICE

1. Introduzione
2. Siti di misura e strumentazione utilizzata
  - 2.1 Rilevatori ottici
  - 2.2 Rilevatori gravimetrici
  - 2.3 Rilevatore DOAS
3. Metodologie analitiche
  - 3.1 Pesata dei filtri
  - 3.2 Misure di flussi gassosi con sistemi a Remote sensing
4. Risultati e discussione
  - 4.1 Risultati e rilevamenti a Sacca San Biagio e Capitaneria di Porto (San Marco)  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$
  - 4.2 Risultati e rilevamenti a Santa Marta  
Misura delle emissioni gassose nel Canale della Giudecca.
5. Conclusioni

## 1. INTRODUZIONE

In questo studio, iniziato a settembre 2008 e terminato il 20 novembre 2008, è stata misurata l'influenza del traffico delle grandi navi sulla qualità dell'aria nell'area urbana di Venezia. È stato indagato l'eventuale apporto di aerosol con diametro aerodinamico inferiore a  $10\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) e  $2.5\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) e di specie gassose inquinanti ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) dovuto al passaggio e sosta delle grandi navi.

Tali obiettivi vengono raggiunti mediante:

- la determinazione delle concentrazioni di  $\text{PM}_{2.5}$  e  $\text{PM}_{10}$  in due stazioni dell'area urbana di Venezia nel periodo settembre-novembre 2008;
- la misura dei flussi di emissione in massa di  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  nei mesi di settembre-novembre 2008 durante il passaggio di grandi navi (traghetti e da crociera) e di tutto il traffico giornaliero che attraversa il Canale della Giudecca

La stima dell'influenza antropica sulla matrice aria è basata sulla stima delle emissioni (cioè la pressione ambientale) in termini di massa per unità di tempo rilasciata dalle sorgenti considerate e delle immissioni (cioè gli effetti sulla qualità dell'aria) in termini di massa per unità di volume degli inquinanti considerati. Fra le emissioni e le immissioni non esiste una relazione lineare in quanto la dispersione degli inquinanti in atmosfera è regolata da processi complessi legati sia alle condizioni meteorologiche locali (stabilità dell'atmosfera e parametri meteorologici) sia dalle trasformazioni chimiche che subiscono gli inquinanti.

Questo studio è una prosecuzione di due indagini effettuate precedentemente nel periodo marzo-dicembre 2007 (contratto Autorità Portuale di Venezia con IDPA-CNR, Venezia "Misurazione dell'influenza del traffico portuale sulla qualità dell'aria per la città di Venezia"; contratto Autorità Portuale di Venezia con Dip. Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari Venezia "Misurazione del  $\text{PM}_{10}$  e  $\text{PM}_{2.5}$  nell'area portuale della Laguna di Venezia") a cui si deve fare riferimento per quanto riguarda le problematiche generali e introduttive che ne hanno ispirato l'attuazione. In particolare nella parte introduttiva dei precedenti studi sono riportate le diverse metodologie di indagine per la valutazione delle immissioni che generalmente prevedono l'impiego di modelli di trasporto degli inquinanti, in generale accoppiati a modelli di carattere meteorologico, che forniscono, per diverse condizioni atmosferiche e caratteristiche delle sorgenti, la concentrazione al suolo dei diversi

inquinanti. Un secondo approccio, che si avvale di campionamenti effettuati sia con le centraline delle reti di monitoraggio che con stazioni di misura specificamente allestite, cerca di ottenere delle indicazioni sugli effetti specifici sulla qualità dell'aria dovuti alle sorgenti considerate. E' riportato inoltre che l'analisi delle medie a 24 ore, ottenute dalle stazioni di misura ARPAV per il  $PM_{10}$  e per il  $PM_{2.5}$  dalle campagne sperimentali effettuate, non evidenzia relazioni con il traffico navale. Ciò è spiegabile considerando sia la meteorologia locale (andamento giornaliero della direzione di provenienza del vento - ciclo delle brezze - e variazione giornaliera dell'altezza dello strato limite) sia le caratteristiche delle sorgenti emmissive studiate che non permettono di correlare su scale temporali così ampie (24 ore) l'eventuale incremento nella concentrazione di particolato ambientale con il passaggio delle grandi navi. Pertanto, come nelle precedenti indagini, in questo studio si sono utilizzate metodologie basate su strumentazione ad alta risoluzione temporale per le stime delle immissioni di particolato fine dovute al traffico navale. In particolare si sono impiegati dei nefelometri (DusTrak, TSI) posizionati lungo il Canale della Giudecca, con una frequenza di acquisizione di un dato ogni 20 secondi, unitamente a valori dei parametri meteorologici forniti dall'Ente Zona Marghera. Per le emissioni gassose si è utilizzata una metodologia che prevede l'utilizzo di sistemi DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) a remote sensing per valutare l'impatto ambientale dovuto al trasporto marittimo attraverso rilevazioni a distanza. Tale tecnica, fornisce la misura del flusso, espresso in massa, dei principali gas emessi da una nave ( $NO_2$  e  $SO_2$ ), misurandone la differenza relativa fra il momento del passaggio del pennacchio, dovuto al transito della nave, e il fondo. La relazione presenterà una breve descrizione delle diverse metodologie sperimentali utilizzate rimandando a una più dettagliata descrizione agli studi "Misurazione dell'influenza del traffico portuale sulla qualità dell'aria per la città di Venezia" e "Misurazione del  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$  nell'area portuale della Laguna di Venezia" e si focalizzerà sui risultati ottenuti.

## 2. SITI DI MISURA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'indagine si è svolta analizzando i risultati di rilevamenti svolti in 3 siti di misura opportunamente allestiti lungo il tragitto delle navi che andranno a stazionare presso l'area della Marittima di Venezia. I siti di misura sono evidenziati in Fig. 2.1 e sono: Sacca San Biagio, Santa Marta (in figura è indicato come DOAS) e Capitaneria di Porto (S. Marco).



**Fig. 2.1** Immagine tratta da Google Earth che illustra la posizione dei diversi siti di misura utilizzati in questa indagine.

I diversi siti di misura sono equipaggiati con strumentazione avanzata basata sia su rilevatori della concentrazione di  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$  ad alta risoluzione temporale sia su strumentazione di campionamento tradizionale su supporto filtrante utilizzata per la calibrazione dei rilevatori “veloci”. In particolare:

- Presso l'isola di Sacca San Biagio sono stati installati un campionatore sequenziale SkyPost (TECORA) con testa  $PM_{2.5}$  per la determinazione gravimetrica del  $PM_{2.5}$  e N. 2 campionatori DusTrak con testa  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$ .
- Presso la stazione di San Marco, sopra il tetto della Capitaneria di Porto, è stato installato un campionatore Dustrak con testa  $PM_{2.5}$  e una sonda per il monitoraggio dell'umidità relativa.

- Presso la stazione di Santa Marta è stata installata una stazione mobile contenente un sistema a remote sensing, dotato di una particolare ottica d'ingresso con movimenti alt-azimutali per il monitoraggio dei gas inquinanti ( $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ ) lungo piani verticali perpendicolari al canale.

## **2.1 Rilevatori ottici**

La strumentazione utilizzata comprende due rilevatori ottici DustTrak (TSI Instruments) utilizzati per la misura del  $\text{PM}_{2.5}$  e del  $\text{PM}_{10}$  (Fig. 2.2) alla frequenza di acquisizione di 1 dato ogni 20 sec (1/20 Hz). Il rilevatore DustTrak opera utilizzando lo scattering a  $90^\circ$  della radiazione emessa da un diodo laser ed è calibrato con la frazione respirabile della ISO 12103-1 (chiamata anche Arizona test dust). La selezione dimensionale è affidata ad un impattore che lavora a portata costante attraverso una pompa interna allo strumento. La strategia di campionamento prevede l'acquisizione in continuo per periodi di una settimana in cui i dati sono registrati nella memoria interna dello strumento.

Il sistema deve essere calibrato attraverso il test di zero ed il controllo della portata operativa ad ogni operazione di *download* dei dati e riattivazione.



**Fig. 2.2** Il rilevatore ottico di particolato atmosferico DustTrak (TSI Instruments)

## **2.2 Rilevatori gravimetrici**

Oltre ai rilevatori ottici di particolato è stato utilizzato un campionatore gravimetrico sequenziale di PM<sub>2.5</sub> (Tecora Skypost PM) visibile in Fig. 2.3, con testa di campionamento e portata in accordo al D.M. 60/2002.



**Fig. 2. 3** Campionatore gravimetrico (Tecora Skypost PM).

## **2.3 Rilevatore DOAS**

Il lavoro del Gruppo “Trasferimento Radiativo e Gas Minori in Atmosfera (ETMGA)” dell’Istituto ISAC nell’ambito delle misure svolte a Venezia è articolato nell’impiego di un sistema a remote sensing, utilizzando la metodologia DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) per la misura delle emissioni gassose di inquinanti come NO<sub>2</sub> ed SO<sub>2</sub>, dovute alle navi che attraversano il Canale della Giudecca in entrata o in uscita al porto di Venezia.

Questo tipo di osservazione si ricava da un metodo relativamente nuovo che, attraverso una serie di misure della radiazione solare diffusa ottenute a diversi angoli zenitali con il sistema a Remote Sensing permette di calcolare la struttura verticale dei valori della concentrazione dei gas in esame nel primo chilometro di quota, lungo un piano verticale ideale posto alla fine del Canale della Giudecca nell'area antistante al porto passeggeri di Venezia (fig. 2.1), dove è stato posizionato il mezzo mobile di ISAC (fig. 2.5) Da queste rilevazioni, effettuate in continuo per tutti i periodi diurni dell'intera campagna d'indagine, si è potuto valutare il contributo delle emissioni gassose dovuto alle navi, che attraccano e attraversano il porto, e separarlo dall'emissione dell'area della città di Venezia, applicando un metodo di sottrazione delle concentrazioni lungo lo stesso piano verticale, prima e dopo il passaggio di ciascuna nave.

Sul tetto del mezzo mobile è installato un piccolo telescopio ricevitore dotato di movimenti alt-azimutali (vedere fig. 2.4), collegato via fibra ottica allo spettrometro posizionato all'interno del furgone.

La metodologia DOAS presenta caratteristiche molto vantaggiose, tra cui la misura simultanea delle concentrazioni di diverse specie di gas in traccia (ad es. SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) integrate su vaste aree, minimizzando le fluttuazioni su piccola scala dovute ai processi di turbolenza locale e garantendo così minori costi e un'analisi dei processi chimici coinvolti nell'atmosfera di un particolare sito.

La DOAS trova applicazione nell'analisi delle concentrazioni medie dei gas lungo un percorso ottico orizzontale facendo uso di sorgenti artificiali di radiazione (*configurazione attiva*) e nella determinazione del contenuto colonnare dei gas atmosferici facendo uso di sorgenti naturali di radiazione diffusa (*configurazione passiva*). L'attenuazione della radiazione risulta sperimentalmente proporzionale alla densità del mezzo, al suo coefficiente di estinzione e allo spazio percorso:

$$I_{\lambda}(s) = I_{\lambda}(0) \cdot \exp\left[-\int_0^s \sigma_{\lambda} \cdot \rho(s) \cdot ds\right]$$

dove il termine tra parentesi quadra è definito spessore ottico monocromatico.

Le misure passive utilizzano la luce solare diffusa come sorgente di radiazione e permettono di ricavare il contenuto colonnare di un gas, ossia la concentrazione integrata lungo la colonna d'aria sopra lo strumento.

Le misure DOAS a diversi angoli zenitali possono essere utilizzate, abbinate a opportune metodiche d'inversione dei dati e alla modellistica di trasferimento radiativo, per ricavare la distribuzione a 2 o 3 dimensioni degli inquinanti atmosferici nel basso strato.

Per effettuare tali misure presso il CNR-ISAC di Bologna è stato realizzato un telerilevatore ottico, che utilizza un nuovo metodo di analisi da applicare alle misure DOAS. La strumentazione consiste in uno spettrometro UV-Vis, denominato TropoGAS (Tropospheric Gas Absorption Spectrometer, fig. 2.5a), corredato con un telescopio ricevitore (TeleA-A, fig. 2.4) montato su una piccola piattaforma, dotata di movimenti alt-azimutali. Il telescopio è collegato allo spettrometro via fibra ottica.

La piattaforma alt-azimutale rappresenta il cuore della metodologia di misura proposta. Essa, infatti, può “raccolgere” in rapide sequenze la radiazione solare diffusa lungo diversi angoli di osservazione, dalla combinazione dei quali e applicando le metodiche di ricostruzione e inversione sviluppate *ad hoc*, si può risalire alla distribuzione bidimensionale delle concentrazioni dei gas inquinanti in esame su un piano verticale (detta anche tomografia bidimensionale degli inquinanti).

Una piccola web-camera consentiva di registrare la simultaneità delle misure lungo il piano verticale con il passaggio delle navi (Fig. 2.5c).



**Fig. 2.4** Vista Telescopio con movimenti alt-azimutali.



**Figura 2.5** (a) Mezzo mobile utilizzato dall'Istituto ISAC per rivelazioni di gas in atmosfera. (b) Vista dell'interno con strumentazione a remote sensing installata, (c) Passaggio di una nave nel Canale della Giudecca inquadrato dalla Web-Cam

### **3. METODOLOGIE ANALITICHE**

#### **3.1 PESATA DEI FILTRI**

Sono stati utilizzati filtri in fibra di vetro di porosità 0.45  $\mu\text{m}$  e diametro 47 mm. La concentrazione di  $\text{PM}_{2.5}$  è stata ottenuta per via gravimetrica, ricavando il peso del particolato raccolto dalla differenza tra il peso del filtro prima e dopo l'esposizione. Affinché le misure siano significative è necessario che le pesate dei filtri vengano effettuate nelle medesime condizioni di temperatura e soprattutto di umidità. Per tale motivo è stata necessaria una fase di previo condizionamento ( $> 24$  ore), all'interno di un box d'azoto a una temperatura di  $23^\circ\text{C}$ . Per effettuare la pesata è stata utilizzata una bilancia analitica Sartorius CP225D a cinque cifre decimali (0.01 mg), e le pesate sono state eseguite con valori di umidità relativa pari a  $50\% \pm 2$ . Per ogni filtro sono state eseguite almeno tre misure e da queste è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

#### **3.2 MISURE DI FLUSSI GASSOSI CON SISTEMI A REMOTE SENSING**

MISURE DI FLUSSI GASSOSI DOVUTI AL PASSAGGIO INDIVIDUALE DI NAVI LUNGO IL CANALE DELLA GIUDECCA.

Per questo metodo lo spettrometro dotato di uno telescopio d'ingresso con movimenti alt-azimutali, è piazzato su un lato della bocca del Canale della Giudecca (Fig. 2.1) e misura in continuo la radiazione solare diffusa raccolta per diversi angoli zenitali e sempre posti nello stesso piano (stesso angolo azimutale). In figura 3.1 è mostrata la rappresentazione grafica delle coordinate spaziali per una misura del pennacchio di una nave, dove:

$\beta_j$  è l'angolo azimutale del piano di misura del  $j$ -esimo set di rilevazioni (questo angolo non cambia di norma e quindi la sua numerazione serve per conteggiare la sequenza di sezioni di misure nell'arco della periodo diurno del giorno);

$\vartheta_i$  è l'angolo zenitale  $i$ -esimo sullo stesso piano verticale.

L'angolo azimutale deve servire per individuare la sezione verticale normale alla direzione del pennacchio (si deve tenere conto della direzione del vento durante la misura e della direzione di moto della nave).

La procedura della misura è la seguente:

- 1- lo strumento esegue in sequenza sezioni verticali sempre per lo stesso valore azimutale;
- 2- le immagini di una web-cam posta nel retro del furgone segnalano il sopraggiungere di una nave nel canale;
- 3- si indicano con  $j-2$  e  $j-1$  le due sezioni verticali che precedono il passaggio della nave in esame;
- 4- si indicano con  $j$  e  $j+1$  ecc. le sezioni verticali dopo il passaggio della ciminiera della nave in esame;
- 5- per ciascuna  $j$ -esima sezione verticale il valore di flusso del gas in esame emesso nell'unità di tempo (*flow rate emission*) è definito dall'espressione:

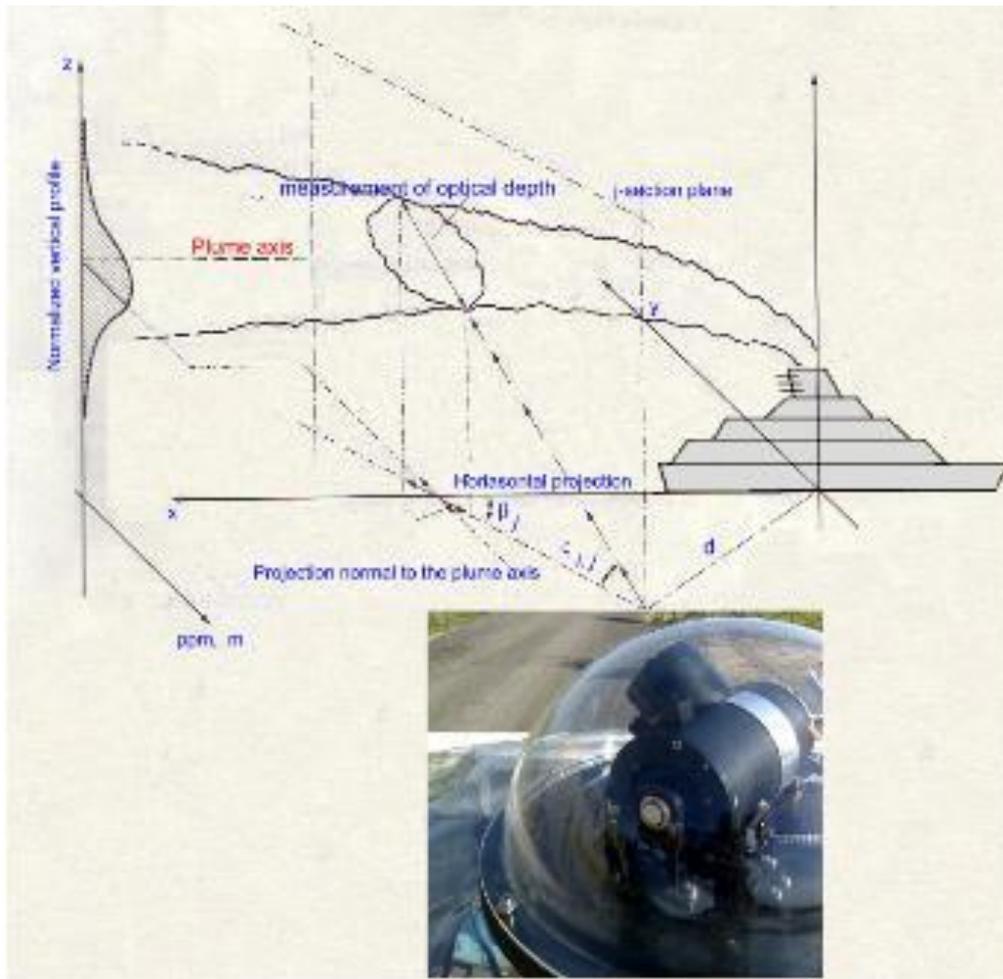
$$F_j = \sum_i (CL)_{i,j} \cdot \Delta z_i \cdot \bar{u}_j \cdot \text{sen} \beta_j \cdot \cos \mathcal{G}_i$$

dove:  $F_j$  è il flow rate del gas in esame attraverso la  $j$ -esima sezione verticale,  
 $(CL)_{i,j}$  è il valore dell' $i$ -esimo spessore ottico del gas in esame sul  $j$ -esimo piano,  
 $\Delta z_i$  è l'incremento verticale fra la  $i$ -esima e la  $(i-1)$ -esima misura,  
 $\bar{u}_j$  è la velocità media del vento nella  $j$ -esima sezione verticale.

Per calcolare la quantità di gas emesso nell'unità di tempo (flow rate emission) dal camino della nave si dovrà sottrarre a  $F_j$  il valore  $F_{(j-1)}$ . Scritto in forma esplicita la quantità di gas ( $Q_m$ ) emessa dalla ciminiera della nave  $m$ -esima (con  $m$  variabile da 1, 2, .. $n$ , dove  $n$  è il numero di navi che passano in un giorno definito) sarà:

$$Q_m = \sum_i (CL)_{i,j} \cdot \Delta z_i \cdot \bar{u}_j \cdot \text{sen} \beta_j \cdot \cos \mathcal{G}_i - \sum_i (CL)_{i,(j-1)} \cdot \Delta z_i \cdot \bar{u}_{(j-1)} \cdot \text{sen} \beta_j \cdot \cos \mathcal{G}_i$$

Il metodo consiste nel calcolo della quantità di gas emesso dalla ciminiera della nave nell'unità di tempo (flow rate emission, espresso in g/s), mediante una serie di misure della radiazione solare diffusa ricavate a diversi angoli zenitali.



**Fig. 3.1.** Rappresentazione grafica della misura del pennacchio di una nave che attraversa il Canale della Giudecca con indicazione delle coordinate spaziali di riferimento.

## **4 RISULTATI E DISCUSSIONE**

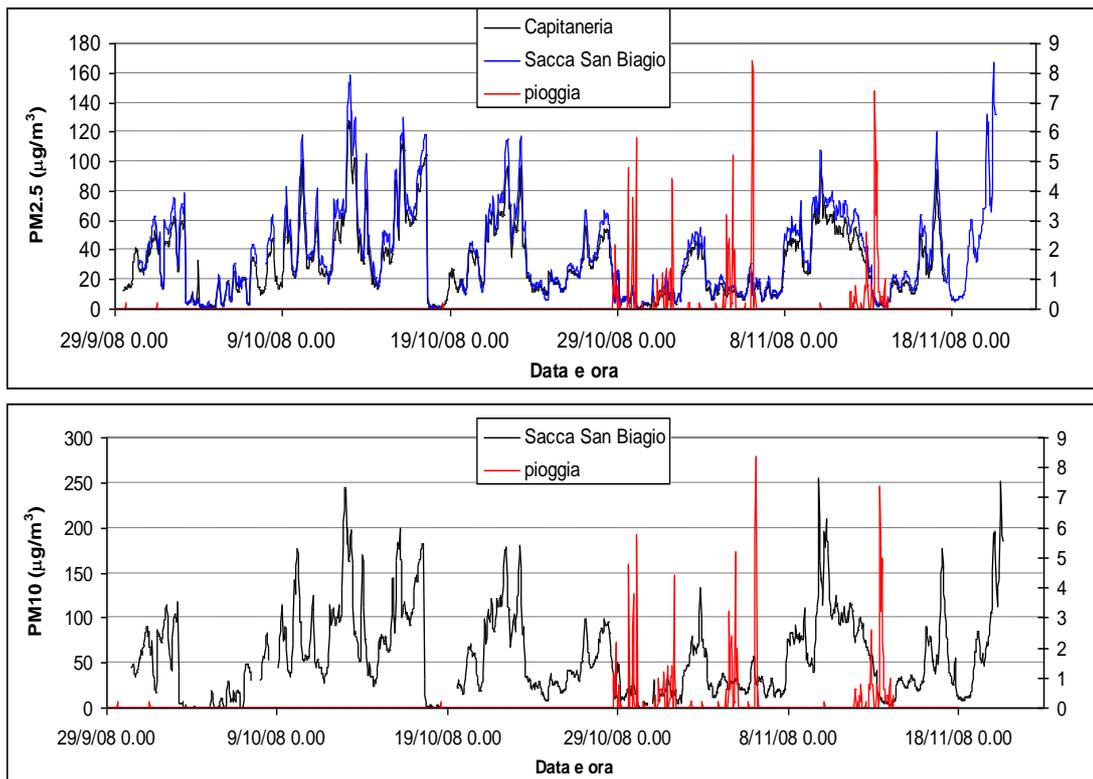
I dati raccolti saranno elaborati con tempi di media di 1 minuto, orari e giornalieri in modo da poter evidenziare picchi brevi di concentrazione che potrebbero essere associati al passaggio delle navi utilizzando la media di 1 minuto e le medie orarie e giornaliere per l'individuazione di andamenti giornalieri nei dati ed il confronto con i rilevamenti standard delle centraline della rete di monitoraggio. La procedura di elaborazione dati utilizzata per i rilevatori ottici prevede inizialmente la correzione dell'effetto dell'umidità relativa sui valori di concentrazione misurata dal sensore ottico.

### **4.1 RISULTATI DEI RILEVAMENTI A SACCA SAN BIAGIO E SAN MARCO**

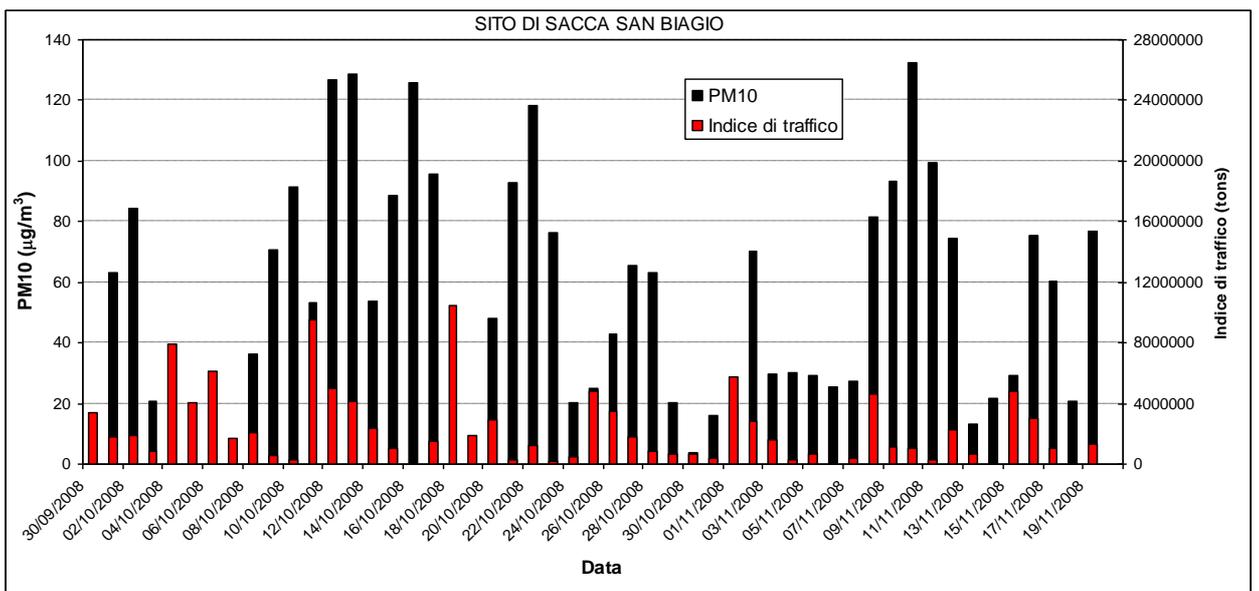
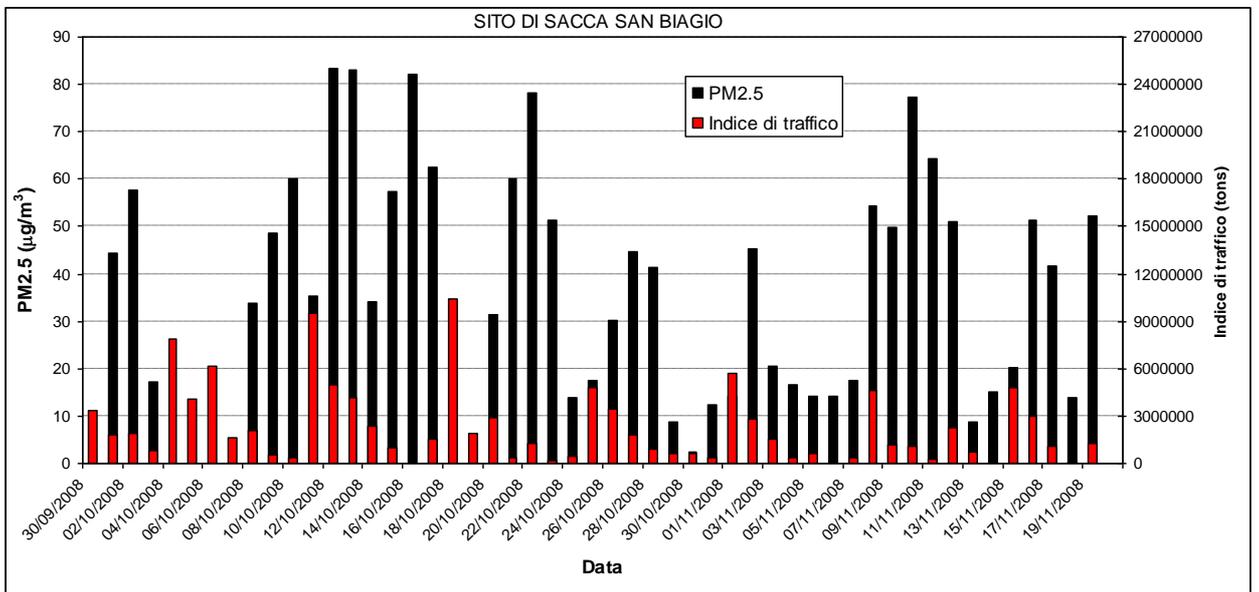
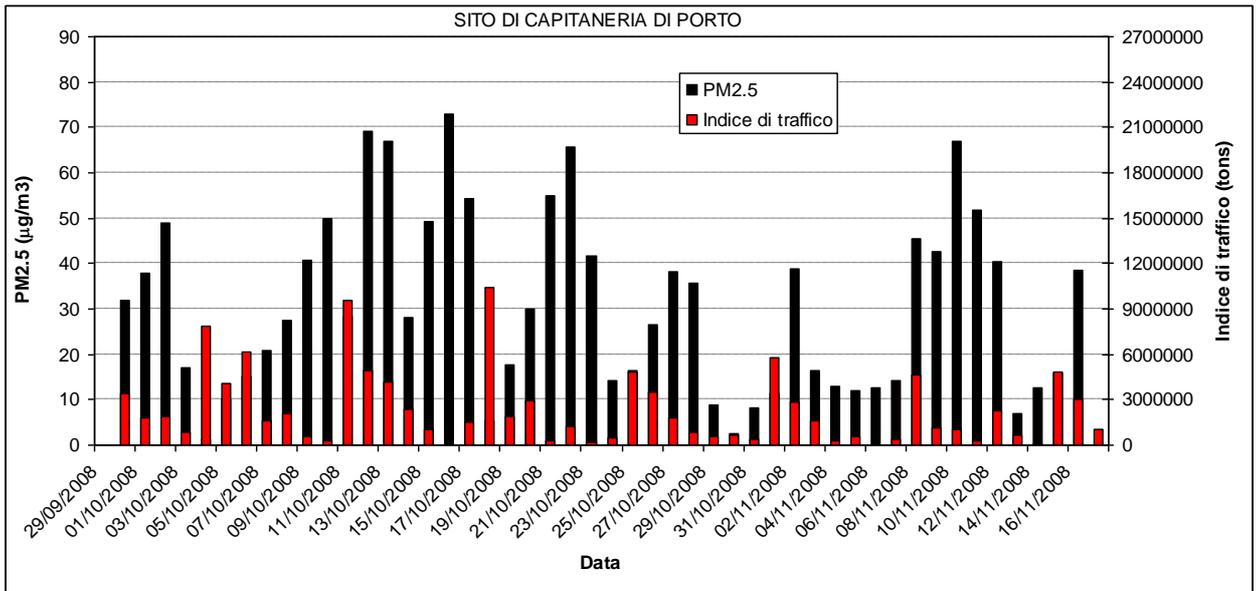
#### **PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>**

Nella Figura 4.1 si riporta la concentrazione media giornaliera di PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub> osservata nella campagna di misura a Sacca San Biagio confrontata con i rilevamenti svolti nello stesso periodo presso la Capitaneria di Porto a S. Marco. I risultati mostrano la coerenza dei rilevamenti nei diversi siti di misura seppure, a livello di medie giornaliere, non permettono di evidenziare in maniera efficace il contributo del traffico navale presso l'area di Marittima. Questo viene evidenziato ponendo in un grafico (Fig. 4.2 a e b) le concentrazioni medie giornaliere di PM<sub>10</sub> e di PM<sub>2,5</sub> rilevate nelle due stazioni di misura in funzione di un indicatore del traffico navale che è il tonnellaggio giornaliero totale (somma di partenze e arrivi) via Lido.

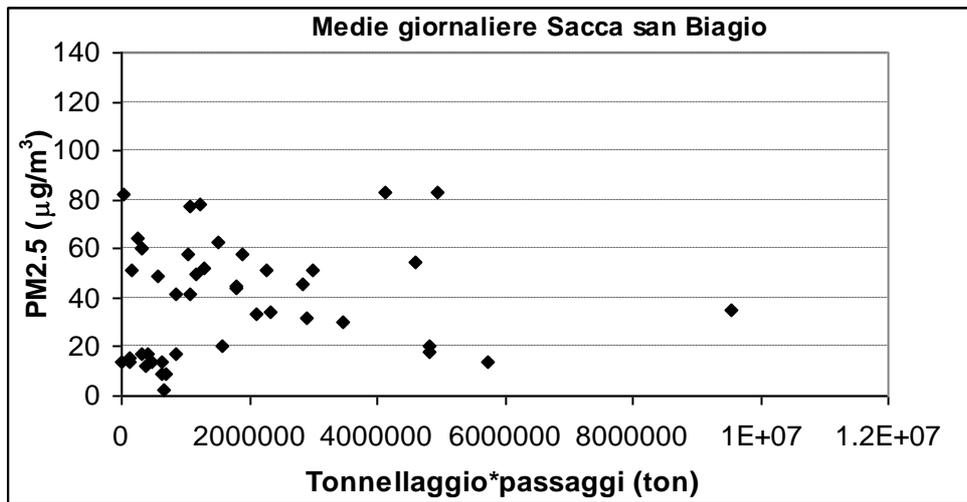
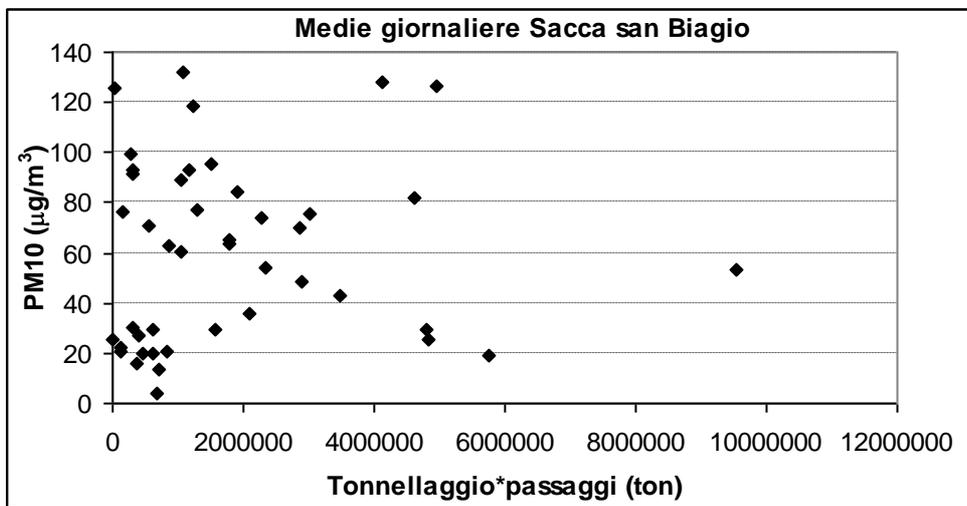
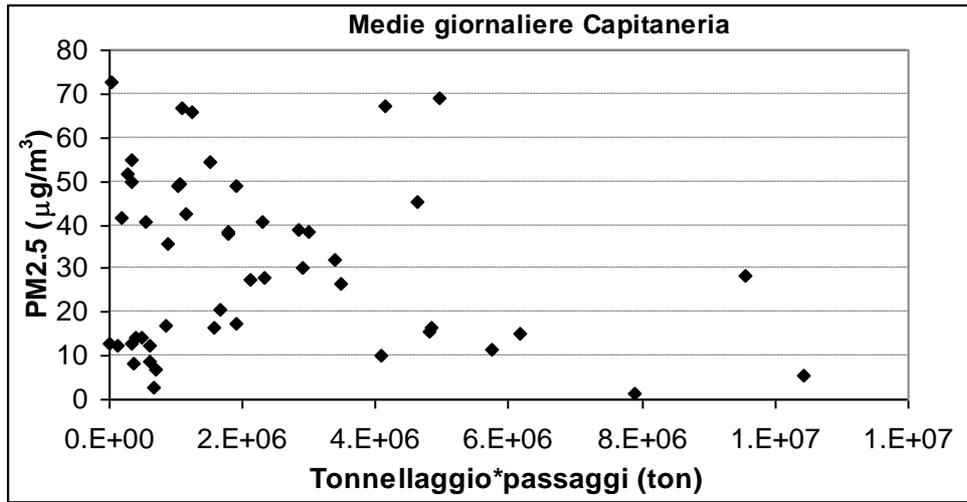
Non si osservano evidenti correlazioni fra le concentrazioni giornaliere e l'indice di traffico navale. Questo è un risultato atteso in quanto, come dimostra lo studio svolto nel 2007, il contributo delle emissioni navali da traffico passeggeri alle concentrazioni del particolato atmosferico è, in media, di pochi punti percentuali e quindi non è lecito aspettarsi una evidente correlazione. Inoltre questa campagna di misura è stata svolta in un periodo con limitato traffico navale.



**Fig. 4.1** Concentrazione medie giornaliere di PM<sub>2.5</sub> e di PM<sub>10</sub> nel periodo di misura nelle stazioni indagate.



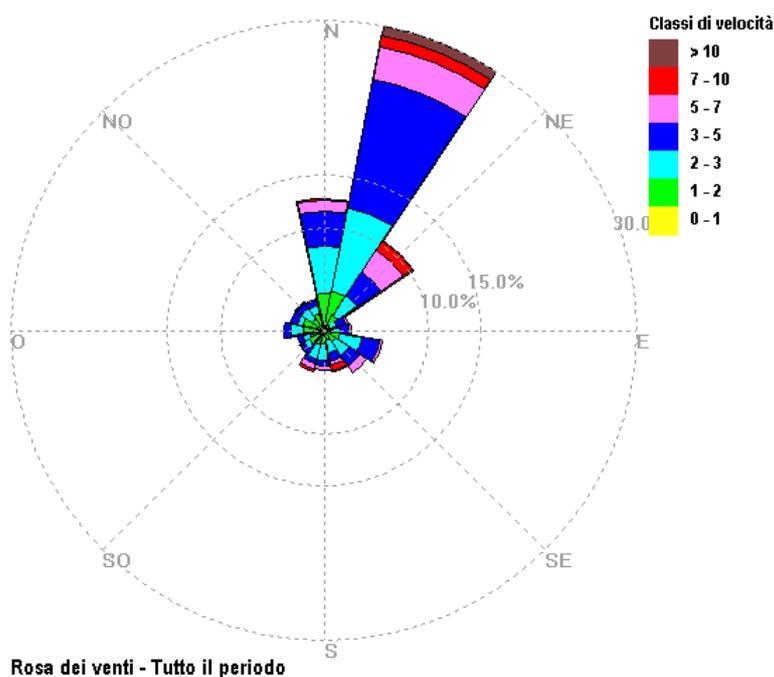
**Fig. 4.2.a.** Andamento delle medie giornaliere in funzione dell'indice di traffico navale.



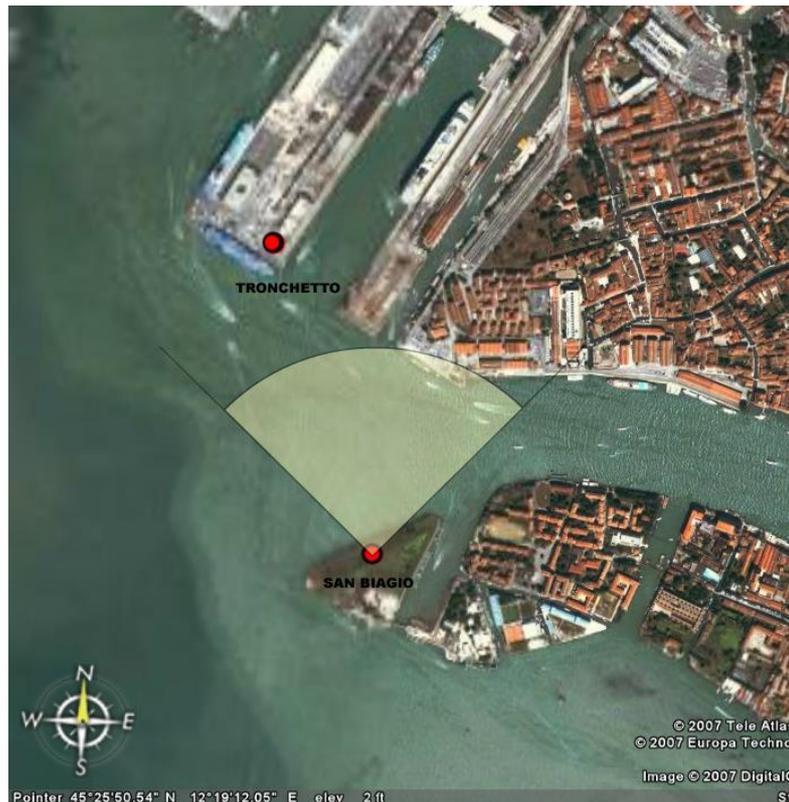
**Fig. 4.2.b.** Andamento delle medie giornaliere in funzione dell'indice di traffico navale.

Dall'analisi delle misure di concentrazione di  $PM_{2.5}$  su medie di 1 minuto si osserva la presenza di una complicata struttura di picchi da cui verrà estratta l'informazione di interesse utilizzando sia i parametri meteorologici rilevati dall'Ente Zona di Marghera sia il database di arrivi e partenze delle navi fornito dall'Autorità Portuale di Venezia.

I rilevamenti meteorologici forniti dall'Ente Zona sono riassunti nella Fig. 4.3 tramite la rosa dei venti che illustra come sia presente nel periodo di studio una circolazione sulla Laguna di Venezia con direzione del vento prevalente dal settore N-NE. Tale direzione prevalente fa sì che la stazione di misura di Sacca San Biagio risulti sottovento rispetto al Canale della Giudecca e all'area della Marittima (Fig.4.4).



**Fig.4.3-** Rosa dei venti di tutto il periodo di misura, dati della stazione 23 dell'Ente Porto Marghera.



**Fig.4.4** Schema del settore di direzioni scelto per l'analisi dei dati a Sacca san Biagio.

Nella Figura 4.5 si riporta l'andamento delle concentrazioni di  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$  (su medie di un minuto) rilevate nelle due stazioni di misura in funzione della direzione del vento. Non si osserva un chiaro andamento che permetta di evidenziare un contributo associato a specifiche direzioni del vento (soprattutto nel sito di Capitaneria di Porto). Nel caso di Sacca San Biagio si osservano i massimi di concentrazione nel settore NO-NE tuttavia la metodologia di indagine basata solo sulla direzione del vento non è idonea ad evidenziare una specifica sorgente in quanto non è selettiva. Per questo motivo è stata utilizzata la metodologia che tiene conto simultaneamente della direzione del vento e degli effettivi passaggi di navi sviluppata in occasione delle campagne di misura del 2007 e qui riportata brevemente. In particolare è stato prodotto un database del traffico (in tonnellaggio) a livello orario per tutto il periodo delle misure. L'incrocio dei dati relativi alla direzione del vento ed al passaggio delle navi registrate nel database fornisce l'informazione per sviluppare una metodologia di indagine dell'effetto diretto del traffico navale sulle concentrazioni più approfondita di quella descritta precedentemente. Infatti è possibile valutare la media di concentrazione quando la

direzione del vento è nel settore di analisi (NO-NE per Sacca San Biagio) e contemporaneamente sono presenti dei passaggi di navi  $C_{DP}$  e poi la media di concentrazione quando la direzione del vento è ancora nel settore di analisi (NO-NE) ma non avvengono passaggi di navi  $C_{DSP}$ . A questo punto è possibile valutare l'effetto, in termini medi, del passaggio delle navi sulla concentrazione misurata su di uno specifico settore di direzioni del vento  $\Delta_P = C_{DP} - C_{DSP}$ . Per valutare il contributo diretto del traffico navale in termini relativi  $\varepsilon$  si deve tenere conto della frequenza di passaggio delle navi  $F_P$  valutata come il rapporto fra le ore in cui si sono verificati passaggi ed il numero totale di ore in cui la direzione del vento era nel settore in analisi. Il contributo  $\varepsilon$  può quindi essere valutato come:

$$\varepsilon = \frac{C_{DP} - C_{DSP}}{C_D} \cdot \overline{F_P} = \frac{\Delta_P F_P}{C_D}$$

essendo  $C_D$  la concentrazione media di PM2.5 nei casi in cui il vento proviene dal settore in esame indipendentemente dal fatto che ci siano dei passaggi di navi.

I settori di direzione del vento analizzati sono NE-NO per Sacca san Biagio e ESE-SO per il sito di Capitaneria di Porto.

I risultati indicano che il contributo sul PM10 è essenzialmente analogo a quello sul PM2.5 e questo è compatibile con quanto osservato nelle campagna di misura del 2007. L'analisi per il sito di Capitaneria di Porto evidenzia un contributo di circa 1%. L'analisi svolta per il sito di Sacca San Biagio non è conclusiva al di sopra dell'incertezza sperimentale. Si può affermare che il contributo è inferiore a 1%. Si vuole sottolineare che il traffico totale di navi nel periodo della campagna di misura (dettagliato in Figura 4.6) è piuttosto limitato anche perché nell'analisi è necessario considerare solo i passaggi che avvengono con direzioni del vento compatibili con un possibile trasporto delle emissioni. Questa è alla base delle difficoltà di evidenziare il piccolo contributo rispetto alle altre sorgenti di particolato che insistono nella zona di misura.

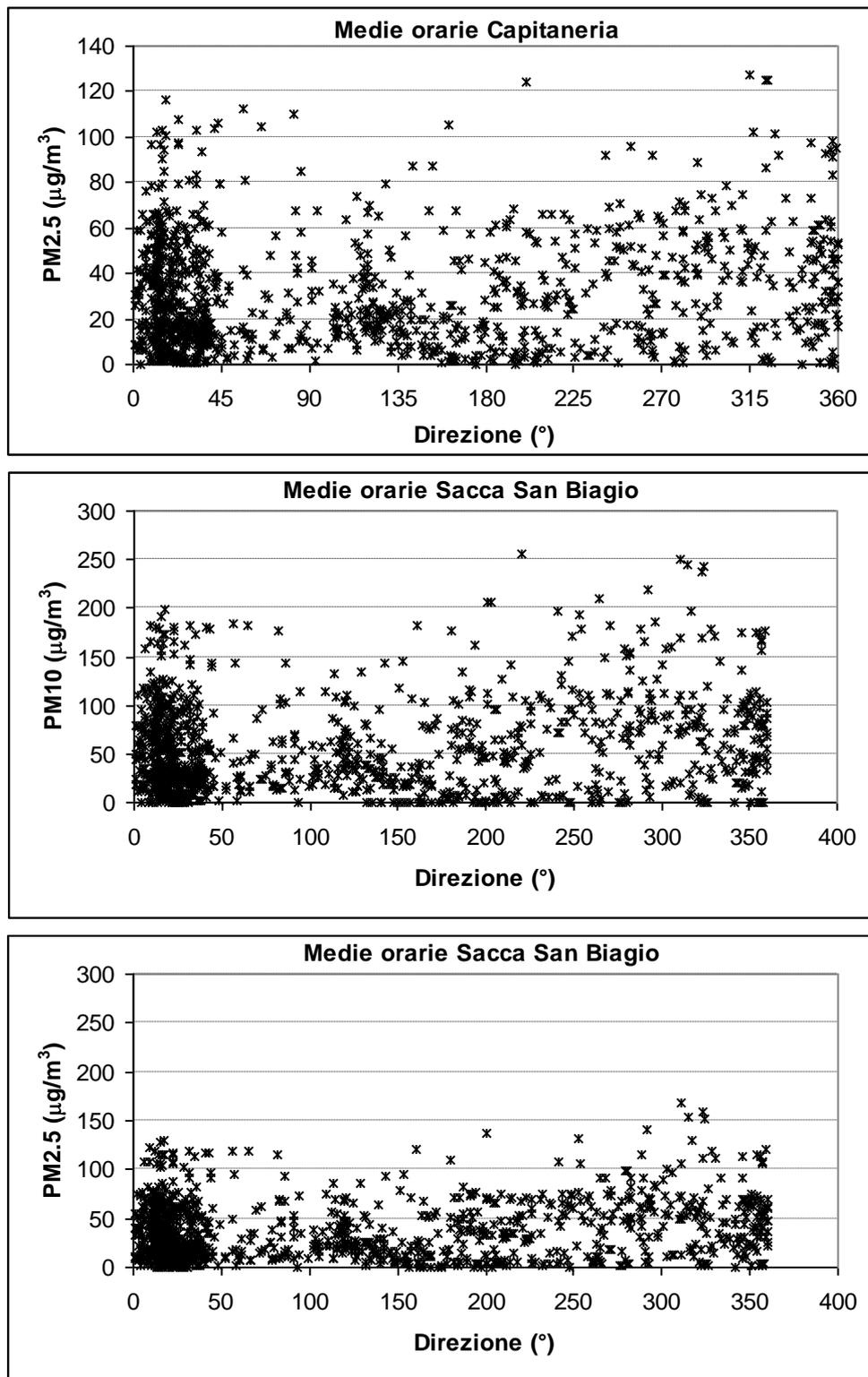


Fig. 4.5 Andamento delle concentrazioni orarie in funzione della direzione del vento.

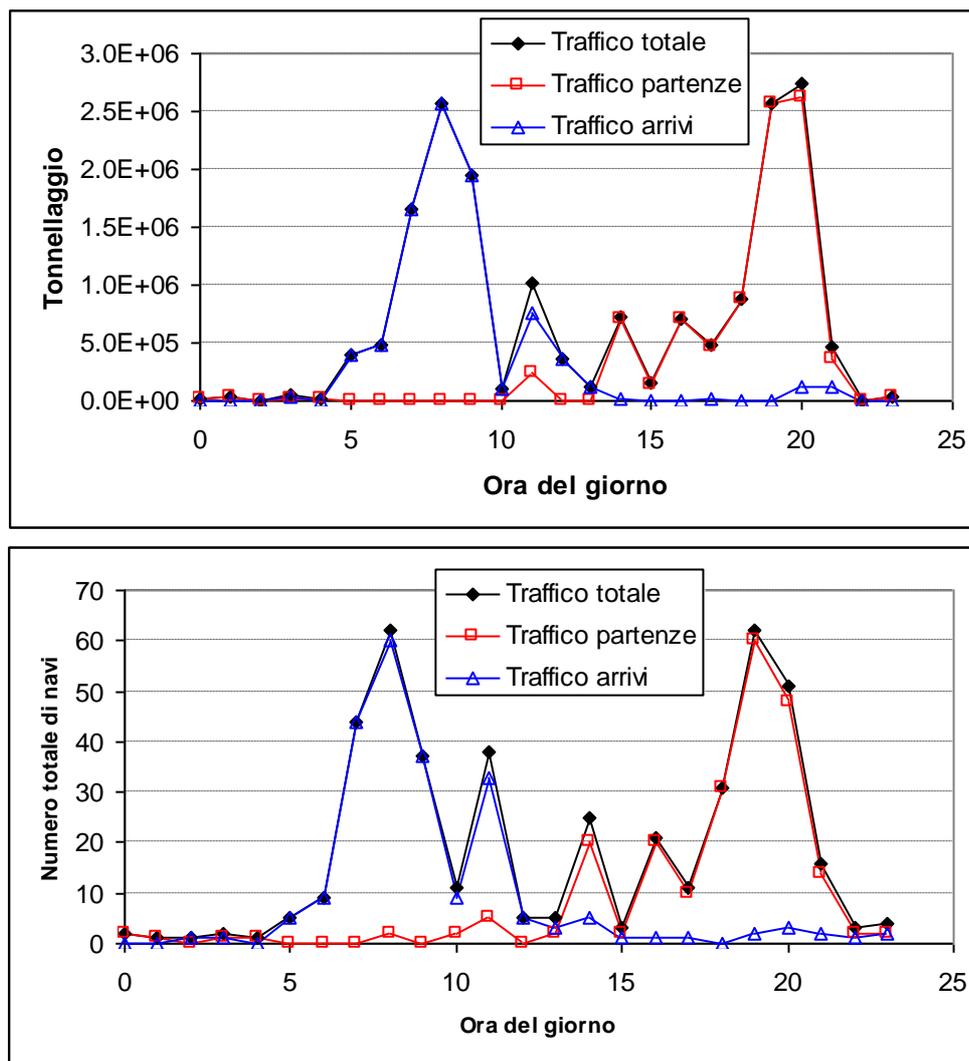


Fig. 4.6) Andamento orario del traffico di navi nel periodo di misura.

## 4.2 RISULTATI E RILEVAMENTI A SANTA MARTA

### MISURA DELLE EMISSIONI GASSOSE NEL CANALE DELLA GIUDECCA

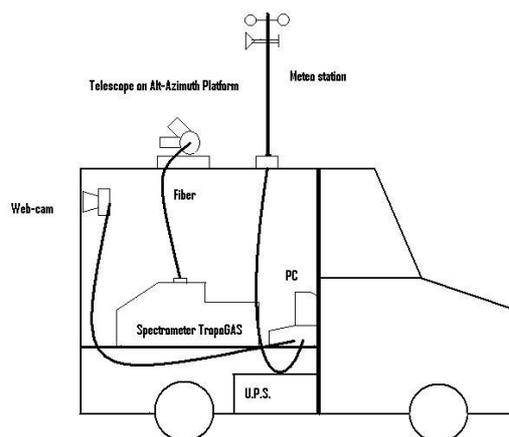
L'impatto delle emissioni gassose dovuto al transito di grandi navi nelle aree lagunari rappresenta un argomento di studio che richiede indagini sperimentali appropriate poiché operare rilevazioni delle emissioni gassose (e di particelle) dovute al passaggio di navi lungo un canale non è cosa semplice, se non si intende installare analizzatori all'interno dei camini delle stesse navi che transitano. Una metodologia sicuramente originale e relativamente nuova propone l'utilizzo di sistemi DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) a remote sensing per valutare l'influenza ambientale dovuta al trasporto marittimo attraverso rilevazioni a distanza

che consentono di ricavare i valori del flusso di emissioni gassose (flow rate gas emission) espresso in peso nell'unità di tempo.

Lungo il Canale della Giudecca è stata effettuata una precedente campagna tendente ad evidenziare il contributo delle emissioni delle navi che vi transitano sull'impatto globale dell'area di Venezia. Durante questa campagna, che comprendeva due periodi di studio: uno estivo ed uno autunnale, si è ampiamente testata questa tecnica del "flow rate gas emission". Le misure presentano diversi vantaggi che si possono sintetizzare nei seguenti punti:

- non sono invasive (non provocano cioè alterazioni fisiche o chimiche al mezzo in esame);
- rappresentano un metodo economico poiché con un unico sistema a remote sensing si possono rilevare diversi inquinanti contemporaneamente;
- consentono di ottenere indagini anche su vaste aree se il sistema è installato su mezzi mobili.

La metodologia utilizzata permette di ricavare la quantità di gas emessa da ogni nave al suo passaggio mentre la velocità e la direzione del vento consentono di calcolare la portata di ogni nave. Il calcolo di questa quantità è fondamentale perché consente di avere informazioni riguardo ogni singolo istante della giornata; in pratica, conoscendo il "flow rate emission" (o FRE) di ogni singola nave si può calcolare quale sia il suo contributo in termini di quantità di gas emesso, durante tutto il suo tragitto lungo il canale. L'apparato sperimentale usato, come si vede in figura 4.8, è costituito da 4 elementi fondamentali: 1) lo spettrometro DOAS con telescopio alt-azimutale per eseguire le scansioni a differenti angoli zenitali; 2) un gruppo di continuità per disporre di corrente elettrica costante e stabilizzata; 3) una web cam rivolta verso il canale, al fine di acquisire immagini relative al passaggio di navi; 4) una centralina meteo, per avere informazioni circa velocità e direzione del vento, ma anche temperatura, umidità, pressione etc. utili per la caratterizzazione meteorologica del periodo in esame. Il tutto inserito all'interno di un mezzo mobile (FIAT IVECO).



**Fig. 4.8** Rappresentazione schematica del mezzo mobile in cui sono riconoscibili i 4 elementi utilizzati.

I dati relativi alla portata delle varie navi che sono transitate nel canale della giudecca durante il periodo in cui sono state fatte le misurazioni sono riportate in Tabella 1.

<b>Nave</b>	<b>Tonnellaggio</b>	<b>SO<sub>2</sub> f.r. (g/s)</b>	<b>NO<sub>2</sub> f.r. (g/s)</b>	<b>N° Conteggi</b>
1	48500	5.2	12.5	2
2	109000	4.2	14.3	2
3	30500	6.6	17.3	2
4	42000	2.9	9.6	2
5	30500	4.7	8.4	3
6	93000	2.1	12.6	2
7	47000	1.2	10.4	2
8	113000	3.2	11.6	4
9	103000	1.4	12.9	4
10	82500	3.5	13.2	1
11	114000	2.8	17.9	1
12	90100	1.5	14.0	4
13	115000	1.1	8.7	3

**Tabella 1.** Elenco delle principali navi transitate lungo il canale e FRE calcolato per ogni nave transitata mediato sul numero di navi dello stesso tipo individuate.

Di queste navi è stata calcolata la portata in g/s di NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> misurata dallo spettrometro DOAS impiegato, denominato TropoGAS (Tropospheric Gas Absorption Spectrometer). I valori riportati in tabella rappresentano la media dei flow rate misurati per ogni tipo specifico di nave, identificata mediante la webcam posta sul retro del mezzo mobile. Per mezzo di queste foto si è anche stimata la velocità della nave, contando il numero di fotogrammi in cui la nave era inquadrata. Questa stima, considerando la lunghezza del tragitto che dal porto va alle bocche di uscita, ha permesso di calcolare il tempo di transito della nave nella laguna, equivalente a circa 4000 secondi, che rappresenta per quanto tempo la nave emette inquinanti nell'area di Venezia.

Il valore medio della quantità di gas emessa da tutte le grandi e medie navi rilevate è stata poi riportata nella Tabella 3.

Nella tabella 2 è riportato invece l'impatto totale (giornaliero) estrapolato sul totale dell'inquinamento nell'area di Venezia, ovvero il contributo di tutto il traffico navale all'interno del Canale della Giudecca.

Data	SO <sub>2</sub> [kg/day]			NO <sub>2</sub> [kg/day]		
	Totale	Fondo	Sottrazione	Totale	Fondo	Sottrazione
23/09/2008	632	32	600	654	35	619
24/09/2008	730	42	688	872	65	807
25/09/2008	345	53	292	435	89	346
26/09/2008	607	23	584	976	45	931
27/09/2008	320	34	286	703	88	615
28/09/2008	145	45	100	1256	173	1083
29/09/2008	190	24	166	2067	165	1902
30/09/2008	480	26	454	1440	132	1308
1/10/2008	533	24	509	156	112	44
2/10/2008	483	34	449	798	105	693
3/10/2008	1098	54	1044	546	49	497
4/10/2008	648	101	547	412	48	364
11/10/2008	312	102	1110	287	32	255
12/10/2008	592	95	497	1945	217	1728
13/10/2008	578	17	561	329	25	304
14/10/2008	1236	105	1131	1096	23	1073
15/10/2008	224	76	148	354	19	335
16/10/2008	346	35	311	867	195	672
17/10/2008	609	58	551	1025	69	956
18/10/2008	1208	87	1121	496	42	454
<b>Media (Kg)</b>	<b>610.8</b>	<b>53.35</b>	<b>557.45</b>	<b>835.7</b>	<b>86.4</b>	<b>749.3</b>

**Tabella 2.** Impatto totale del traffico sul Canale della Giudecca sull'intera attività portuale, calcolato nei giorni di rilevamento considerati ottimali per il tipo di rilevazione; vengono riportati anche il valore totale misurato e il fondo sottratto.

Tali dati sono riconducibili ai Flow rate totali ricavati nella parte luminosa del giorno e includono sia il contributo delle grandi navi sia quello di tutte le altre, che come si può notare confrontando i valori riportati nelle successive Tabelle 3 e 4, pesano in maniera significativa. Va infine ricordato che questi valori, relativi al traffico nel Canale, sono solo una componente dell'intera attività portuale, poiché non si tiene conto delle emissioni delle navi all'interno del porto stesso, durante i periodi di stazionamento.

In Tabella 2 si presenta il valore giornaliero di questo parametro per una serie di giorni selezionati in cui si sono eseguite le misure per i due gas di interesse. Nella tabella è anche riportata la stima del valore di "fondo" riconducibile alle altre sorgenti esterne all'area di Venezia, o che non sono riconducibili al traffico navale, strettamente collegato all'attività nel porto, come ad esempio le emissioni provenienti dal Porto Marghera.

## **CONCLUSIONI**

### **SO<sub>2</sub> , NO<sub>2</sub>**

La valutazione dell'impatto delle grandi navi che transitano nel canale della Giudecca, come precedentemente detto, deriva direttamente dalla quantità di gas emessi da ciascuna singola nave durante il suo attraversamento del canale medesimo. Infatti si può supporre che una nave da crociera abbia una velocità di pochi metri al secondo quando attraversa il canale; pertanto conoscendo la sua portata (FRE) ed il tempo di transito nel canale si risale alla *Quantità in massa* (Q.m.) totale di inquinante emessa dalla nave, espresso in chilogrammi. Dal conteggio delle navi e dal confronto di questo con il calendario delle navi passate nel periodo in esame si è ricostruito un parametro giornaliero indicativo del traffico navale. Esso mediato su tutti i giorni della campagna fornisce la quantità totale di emissione giornaliera media. I risultati di questi calcoli sono riassunti in Tabella 3.

Daily FRE	SO <sub>2</sub> (Kg)	NO <sub>2</sub> (Kg)
Misurato	159	272
Stimato	186	320

**Tabella 3.** Quantità in massa giornaliero di SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> calcolato per le grandi e medie navi; nella seconda linea si stima un incremento percentuale per tener conto delle navi non identificate all'alba e al tramonto (15%).

La tabella riportata si riferisce quindi ai valori misurati per ogni nave moltiplicato per il numero di conteggi medio della specifica nave che attraversava il canale. Dal momento che l'individuazione del tipo di nave era fatto sulla base delle foto acquisite dalla web-cam posta sul retro del mezzo mobile, si ritiene che i valori indicati possano essere incrementati di un 15%, percentuale ricavata su una stima delle navi che possono essere "sfuggite" alle rilevazioni della web-cam, che aveva una frequenza di registrazione ben definita, o di quelle non misurate dal sistema remote sensing in periodi del giorno non operativo (poiché si fanno misure della radiazione solare diffusa, lo strumento è operativo un'ora dopo l'alba e fino ad un'ora prima del tramonto). Infine, non si stima il contributo alle emissioni durante la notte. Si è inoltre messo in evidenza la possibilità di ricavare un parametro indicativo sul traffico complessivo giornaliero nel Canale della Giudecca, dovuto al passaggio di tutte le navi e non solo delle medie e grandi. Questo valore è più significativo della misurazione per ogni singola nave per valutare la componente da attribuirsi al transito navale sull'impatto globale nell'area del Canale della Giudecca. Nella Tabella 4 vengono riproposti i valori medi ricavati nelle giornate considerate ottimali per le misure operate. Questi valori sono riconducibili alla Quantità in massa (espressa in kg) dell'emissione gassosa attribuibile a tutto il traffico navale nel Canale della Giudecca.

<b>Total Daily FRE</b>	<b>SO<sub>2</sub> (Kg)</b>	<b>NO<sub>2</sub> (Kg)</b>
Misurato	557	749
Stimato	724	937

**Tabella 4.** Quantità in massa giornaliero di SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> calcolato per tutto il traffico navale che attraversa il Canale; nella seconda linea si stima un incremento percentuale per tener conto delle navi non identificate all'alba e al tramonto (15%). e, solo per le piccole navi, un secondo incremento per il traffico notturno (stimato in +30%).

Si possono ora confrontare i risultati ottenuti con i due diversi metodi: dal confronto dei dati riportati nelle Tabelle 3 e 4 si nota che la quantità in massa dovuta alle emissioni delle grandi e medie navi pesa per 1/4 sul totale delle emissioni di SO<sub>2</sub> e di circa 1/3 per quelle di NO<sub>2</sub>.

E' bene precisare che dalle foto della web-cam, confrontate con il calendario ufficiale delle navi, risultano escluse dalle misurazioni tutte le navi che entrano ed escono dal porto nella prima ora dopo l'alba e in quella prima del tramonto. Inoltre, nel periodo notturno resta solo il traffico delle piccole navi, che è stimato come un incremento sul totale diurno di circa il 30%.

La differenza precedentemente indicata fra i valori riscontrati nelle grandi e medie navi e nelle piccole è di estremo interesse poiché l'emissione delle grandi e medie navi può essere ridotta utilizzando un combustibile BTZ, o applicando la migliore tecnologia nei processi di combustione. Per quanto riguarda l'impiego di combustibili a basso tenore di zolfo (BTZ), se si esamina il rapporto percentuale delle emissioni dovute alle grandi navi rispetto a quello riscontrato per le piccole (come differenza fra i valori di Tabella 4 e Tabella 3) si rileva un 38% per l'SO<sub>2</sub> e un 45% per l'NO<sub>2</sub>. Si può quindi notare che il rapporto diminuisce di alcuni punti percentuali passando dall'NO<sub>2</sub> all'SO<sub>2</sub>. Ciò può indicare che alcune delle grandi o medie navi utilizzano combustibili a basso tenore di Zolfo, pur non essendo ancora obbligatorio. Questa ipotesi è anche avvalorata da quanto indicato nella Tabella 1, dove sono riportati i valori misurati dei Flussi di emissione per le grandi navi, in cui si riscontrano per alcune navi, valori di FLOW rate di SO<sub>2</sub> molto bassi rispetto ad altri.

I risultati ottenuti con l'impiego di tecniche a remote sensing per monitorare il flow rate dovuto al passaggio di navi, grandi o piccole, nel Canale della Giudecca

confermano l'efficacia del metodo proposto, che non richiede interventi diretti e consente indagini relativamente agevoli e rapide tanto da poter proporre anche per fini ispettivi.

### **PM10, PM2,5**

I risultati indicano che il contributo diretto del traffico navale sul PM10 è essenzialmente analogo a quello sul PM2.5 e questo è compatibile con quanto osservato nelle campagne di misura del 2007. L'analisi per il sito di Capitaneria di Porto evidenzia un contributo di circa 1%. L'analisi svolta per il sito di Sacca San Biagio non è conclusiva al di sopra dell'incertezza sperimentale. Si può affermare che il contributo è inferiore a 1%. Si vuole sottolineare che il traffico totale di navi nel periodo della campagna di misura è piuttosto limitato anche perché nell'analisi è necessario considerare solo i passaggi che avvengono con direzioni del vento compatibili con un possibile trasporto delle emissioni. Questa è alla base delle difficoltà di evidenziare il piccolo contributo rispetto alle altre sorgenti di particolato che insistono nella zona di misura.

In sintesi lo Studio evidenzia quanto segue:

- alcune delle grandi o medie navi utilizzano combustibili a basso tenore di Zolfo;
- la quantità in massa dovuta alle emissioni delle grandi e medie navi pesa per 1/4 sul totale delle emissioni di SO<sub>2</sub> e di circa 1/3 per quelle di NO<sub>2</sub>;
- il contributo diretto del traffico navale sul PM10 è essenzialmente analogo a quello sul PM2.5;
- nel periodo di misurazione (S.Marco; settembre-novembre 2008) il contributo delle emissioni della navi al PM10 e PM2.5 è di circa 1%.