

Piano Strutturale del Comune di Livorno
Valutazione Ambientale Strategica

Rapporto Ambientale

Redatto ai sensi dell'art. 24 della LRT 10/2010 e ss.mm.ii.

ALLEGATO 13

Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti dal PR del Porto di Livorno. Campagna di monitoraggio della qualità dell'aria nella città di Livorno



Predisposto da: IBIMET –CNR Istituto di Biometereologia
Novembre 2018



Consiglio Nazionale delle Ricerche

**SERVIZIO DI SVILUPPO ED IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA INTEGRATO
FINALIZZATO ALLA VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI SULLA QUALITÀ DELL'ARIA, PER
LA GESTIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI NEL PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI
LIVORNO (PRP)**

***CAMPAGNA DI MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA NELLA CITTÀ DI
LIVORNO***

Rapporto finale

Autori:

*Rita Baraldi
Federico Carotenuto
Osvaldo Facini
Beniamino Gioli
Giovanni Gualtieri
Francesca Martelli
Carla Mazziotti
Laura Pellegrino
Graziella Rossini
Piero Toscano
Marin Tudoroiu
Carolina Vagnoli
Alessandro Zaldei*

16/11/2018

INDICE

1. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA: IL RUOLO DI IBIMET NEL PROGETTO	3
2. DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI MONITORAGGIO	4
2.1 Stazioni mobili AIRQino	4
2.2 Laboratorio mobile (AIRQlab)	5
3. CAMPAGNA DI MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA	8
3.1 Reti di monitoraggio della qualità dell'aria a Livorno	8
3.2 Caratteristiche della rete di monitoraggio IBIMET	9
3.3 Ricalibrazione delle centraline AIRQino tramite misure del mezzo mobile ARPAT	17
3.4 Risultati del monitoraggio tramite centraline AIRQino	23
3.5 Risultati del monitoraggio tramite stazione AIRQLab	30
3.5 Risultati del monitoraggio dei VOC tramite il PTR-MS della stazione AIRQLab	36
4. MAPPE DI QUALITÀ DELL'ARIA	38
4.1 Inquadramento anemologico	38
4.2 Mappe basate sulle stazioni AIRQino	41
4.2.1 Concentrazioni di PM ₁₀	41
4.2.2 Rapporto delle concentrazioni PM _{2.5} /PM ₁₀	41
4.2.3 Concentrazioni di NO ₂	42
4.3 Mappe basate sulla stazione AIRQLab	49
4.3.1 Concentrazioni di NO _x	49
4.3.2 Concentrazioni di PM ₁₀	49
4.3.3 Rapporto delle concentrazioni PM _{2.5} /PM ₁₀	50
4.3.4 Concentrazioni di SO ₂	50
BIBLIOGRAFIA	64

1. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA: IL RUOLO DI IBIMET NEL PROGETTO

Il lavoro si inquadra nell'ambito degli adempimenti connessi alle prescrizioni della procedura di Valutazione Ambientale Strategica (VAS) del nuovo Piano Regolatore Portuale (PRP) attuato dall'Autorità Portuale di Livorno. Tra i suddetti adempimenti rientra lo sviluppo di un modello integrato che fornisca dinamicamente informazioni sulla qualità dell'aria, comprendendo non solo gli effetti del singolo progetto, ma anche l'effetto combinato delle singole azioni precedentemente attuate; quest'ultimo aspetto ha preso in esame sia l'ambito di attuazione del PRP, che altre strategie di pianificazione ed attuazione sviluppatesi nel frattempo (Piano Regolatore Generale, piani di settore quali la mobilità, energetico, di risanamento atmosferico, acustico, etc.)

La durata complessiva del progetto è di un anno.

Il sistema integrato finalizzato alla valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria è stato realizzato da ARIANET attraverso un modello alimentato con dati territoriali, meteorologici, ed emissivi. Le uscite del modello di qualità dell'aria (concentrazioni orarie di inquinanti al suolo, per il periodo annuale di riferimento) sono state validate a fronte dei dati di qualità dell'aria disponibili all'interno dell'area di studio: le serie storiche delle concentrazioni rilevate presso le stazioni fisse della rete di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPAT, nonché quelle ricavate da campagne eseguite su specifiche aree.

La validazione del modello di qualità dell'aria è stata inoltre effettuata sulla scorta di dati acquisiti mediante campagne di monitoraggio *ad hoc* effettuate dal CNR-IBIMET. Le campagne sono state svolte lungo l'intero arco di un anno tramite stazioni fisse *low-cost* e tramite laboratorio mobile.

In particolare, IBIMET ha svolto le seguenti campagne di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico:

- una campagna fissa, mediante utilizzo di 6 stazioni di qualità dell'aria *low-cost* (AIRQino), in corrispondenza di punti di misura opportunamente scelti in base alle specifiche esigenze del progetto;
- una campagna mediante utilizzo di laboratorio mobile (AIRQLab), originariamente prevista come articolata in 4 campagne mobili della durata di 2 settimane, ciascuna all'interno delle diverse stagioni, in corrispondenza di punti di misura opportunamente scelti in base alle specifiche esigenze del progetto. Tale campagna – su indicazione di ARPAT – è stata invece svolta continuativamente per la durata di un anno ed utilizzando un unico punto fisso di monitoraggio, con sospensione temporanea nel periodo estivo.

Oltre che fornire un supporto alla validazione del modello di qualità dell'aria realizzato da ARIANET, la rete IBIMET ha consentito il monitoraggio oggettivo della qualità dell'aria nell'area di studio.

La presente relazione finale documenta l'insieme delle attività svolte nell'intero arco temporale del progetto, e più precisamente nel periodo compreso tra l'1/11/2017 e il 31/10/2018 (1 anno di calendario). Le analisi sono state suddivise in 2 sottoperiodi temporali omogenei:

- semestre "freddo": 01/11/2017–15/04/2018;
- semestre "caldo": 16/04/2018–31/10/2018.

Tale suddivisione deriva dal periodo di accensione (il primo) e spegnimento (il secondo) degli impianti di riscaldamento nell'area di studio, ed è pertanto finalizzata a discriminare le condizioni della qualità dell'aria in cui tale fonte emissiva contribuisce o meno ai livelli complessivi di inquinamento atmosferico.

2. DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI MONITORAGGIO

2.1 Stazioni mobili AIRQino

Le stazioni AIRQino sono delle piattaforme di monitoraggio della qualità dell'aria innovative, sviluppate e messe a punto da IBIMET nell'ambito delle attività "SMARTCITIES", che integrano in un solo apparato, compatto e *low-cost*, tutti i principali sensori di qualità dell'aria ed alcuni parametri ambientali come temperatura ed umidità relativa (Zaldei et al., 2017). Queste stazioni mobili sono state realizzate in linea con il D.Lgs. n. 155 del 13/08/2010 (Repubblica Italiana, 2010), che riconosce e regola l'importanza di misure aggiuntive rispetto a quelle delle stazioni fisse tradizionali. Attraverso un GPRS, ogni stazione trasmette i dati geolocalizzati ad un server centrale (*geodatabase*): attraverso un motore GIS ed un'applicazione *web*, i dati possono quindi essere visualizzati, interrogati ed analizzati in tempo reale. Tali centraline sono attualmente utilizzate in progetti di ricerca partecipativa sulle reti urbane SMARTCITIES e posizionate in diversi punti di interesse di varie città italiane (Firenze, Bologna, Pesaro, Siracusa). Le stazioni operano il monitoraggio ad alta risoluzione temporale (2-3 minuti).

Le stazioni AIRQino sono state calibrate in un laboratorio opportunamente allestito presso la sede dell'IBIMET di Firenze, utilizzando come strumenti di riferimento i sensori integrati nel laboratorio mobile AIRQLab descritto nel paragrafo seguente (Cavaliere et al., 2018).

La Tab. 1 riassume i parametri rilevati dalle stazioni AIRQino e le specifiche dei sensori utilizzati.

Tab. 1. Specifiche dei sensori integrati nelle stazioni mobili AIRQino e parametri misurati.

Parametro	Sensore
Conc. CO ₂	SenseAir S8 con metodo IR (in ppm)
Conc. O ₃ in ppb	MiCS-OZ47
Conc. O ₃ in conteggi	MiCS-2614
Conc. NO ₂ in conteggi	MiCS-2714
Conc. CO in conteggi	Figaro TGS-2600
Conc. VOC in conteggi	MiCS-5524
Conc. PM _{2.5} e PM ₁₀ (µg/m ³)	NOVASENSE SDS011
Temperatura (°C) e umidità relativa (%)	DHT22



Fig. 1. Foto delle stazioni AIRQino.

2.2 Laboratorio mobile (AIRQlab)

Il laboratorio AIRQLab è costituito da un furgone allestito con dei supporti *rack* contenenti gli analizzatori e la strumentazione di misura, avente le stesse caratteristiche di quella normalmente impiegata dalle reti fisse di monitoraggio della qualità dell'aria. Il laboratorio mobile è dotato di un apparato di alimentazione autonomo che gli consente campagne di misura *stand-alone* della durata di 24 ore. Nel caso di campagne di misura più lunghe, può essere alimentato da rete elettrica 220Vac. Il sistema è preposto al monitoraggio dei principali inquinanti atmosferici normati ai sensi del D.Lgs. n. 155 del 13/08/2010 (Repubblica Italiana, 2010). Tutti gli analizzatori utilizzati hanno certificazione TUV - Bericht 936/21204643D 07.Jul.2006, U.S.EPA REFERENCE Equivalent number EQSA-0506-159, EN 14212 and VDI 4202/4203USEPA.

Di seguito sono riportati i parametri rilevati e le specifiche dei sensori utilizzati.

Tab. 2. Specifiche dei sensori integrati nel laboratorio AIRQLab e parametri misurati.

Parametro	Analizzatore	Foto
Conc. NO, NO ₂ , NO _x	HORIBA Mod. APNA-370	
Conc. CO	HORIBA Mod. APMA-370	
Conc. O ₃	HORIBA Mod. APOA-370	

Conc. SO ₂	HORIBA Mod. APSA-370	
Conc. PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₁₀ , PTS	TSI DustTrak DRX Aerosol Monitor 8533	
Conc. CO ₂	LICOR-7500°	

Conc. VOC

IONICON PTR-MS Proton
Transfer Reaction - Mass
SpectrometryConc. CO₂ e
discriminazione
isotopi del carbonio
d₁₂ e d₁₃PICARRO G2131-i Cavity ring-
down spectroscopy (CRDS)

Per il rilevamento dei VOC, il CNR-IBIMET dispone in particolare di una strumentazione molto sofisticata che, utilizzando una reazione di trasferimento protonico (PTR-MS), è in grado di monitorare le variazioni di concentrazione dei VOC in tempo reale, senza necessità quindi di alcun supporto di pre-concentrazione del campione di aria, ed allo stesso tempo di garantire un'elevatissima sensibilità che può arrivare anche a concentrazioni di 10-20 pptv. Le concentrazioni di VOC misurate con la strumentazione PTR-MS sono poi opportunamente quantificate mediante gas standard certificato.

Allo scopo di poter valutare in modo appropriato il trasporto e la diffusione degli inquinanti, il laboratorio AIRQLab è inoltre dotato di una stazione completa per il monitoraggio dei parametri meteorologici, così composta:

- Anemometro a coppe e banderuola: Velocità del Vento (VV) e Direzione del Vento (DV);
- Termometro: Temperatura atmosferica (T);
- Igrometro: Umidità relativa (UR);
- Barometro: Pressione atmosferica (P);
- Pluviometro: Pioggia caduta (Prec);
- Radiometro globale: Radiazione solare (RadS).

3. CAMPAGNA DI MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

3.1 Reti di monitoraggio della qualità dell'aria a Livorno

In Fig. 2 è mostrata la mappa delle reti di monitoraggio della qualità dell'aria attualmente operative nella città di Livorno. La rete ARPAT si compone di 3 stazioni fisse: La Pira (Urbana Fondo, UF), Carducci (Urbana Traffico, UT), e Capiello (UF). Alla rete ARPAT si sovrappone la nuova rete di monitoraggio realizzata da IBIMET nell'ambito del progetto, costituita da 6 centraline AIRQino, e dal laboratorio mobile AIRQLab.



Fig. 2. Mappa delle reti di monitoraggio della qualità dell'aria IBIMET ed ARPAT operative a Livorno.

3.2 Caratteristiche della rete di monitoraggio IBIMET

Per quanto riguarda le centraline AIRQino, la rete di monitoraggio IBIMET è costituita da 5 centraline installate all'interno dell'area portuale (denominate SMART 02, 06, 07, 08 e 13), finalizzate al monitoraggio diretto delle emissioni portuali, e da una centralina posta nell'entroterra urbano (denominata SMART11), finalizzata all'acquisizione dei livelli di concentrazione non influenzati dalle emissioni portuali.

La Tab. 3 riassume l'ubicazione delle stazioni AIRQino installate ed il periodo complessivo delle acquisizioni da parte di ciascuna.

In Fig. 3 è riportata la mappa della rete di monitoraggio ed i particolari fotografici di ciascuna centralina.

Nelle Figg. 4-9 è mostrata la ripresa aerea delle zone di Livorno in cui è stata installata ciascuna stazione.

Tab. 3. Anagrafica delle stazioni AIRQino utilizzate nella campagna di monitoraggio.

Nome Stazione	Ubicazione in Livorno	Long (°E)	Lat (°N)	Periodo acquisizioni
SMART 02	Via Enriques, Calambrone	10.325038	43.580282	19/10/2017–31/10/2018
SMART 06	Terminal Darsena Toscana	10.304750	43.567917	19/10/2017–31/10/2018
SMART 07	Via L. Da Vinci, Darsena Toscana	10.314412	43.573677	19/10/2017–31/10/2018
SMART 08	Calata Sgarallino, Fortezza Vecchia	10.30152	43.55184	19/10/2017–31/10/2018
SMART 11	Scuola Dal Borro, Via Montebello 80	10.309308	43.537567	16/11/2017–31/10/2018
SMART 13	Scali Rosciano 6, sede AP	10.306535	43.553858	16/11/2017–31/10/2018

In aggiunta alle centraline AIRQino, la rete di monitoraggio IBIMET si avvale del laboratorio mobile AIRQLab, ubicato nella stessa posizione della centralina SMART02. Su indicazione di ARPAT, AIRQLab è stato utilizzato come ulteriore punto fisso di misura.

In Tab. 4 è riportata l'ubicazione di AIRQLab ed il periodo complessivo delle acquisizioni degli inquinanti, che differiscono per tipologia: per gli inquinanti gassosi, i dati non sono disponibili nel periodo 27/06/2018–19/09/2018; per le polveri, i dati sono disponibili da inizio campagna fino al 23/05/2018.

Tab. 4. Anagrafica della stazione AIRQLab utilizzata nella campagna di monitoraggio.

Nome Stazione	Ubicazione in Livorno	Long (°E)	Lat (°N)	Periodo acquisizioni	
				Inquinanti	Sottoperiodi
AIRQLab	Via Enriques, Calambrone	10.325038	43.580282	O ₃ , NO, NO ₂ , NO _x	22/01/2018–26/06/2018
				CO, SO ₂	20/09/2018–31/10/2018
				PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₁₀ , PTS	22/01/2018–23/05/2018



Fig. 3. Mappa della rete di monitoraggio della qualità dell'aria IBIMET realizzata a Livorno, costituita da 6 centraline AIRQino. Nei riquadri è riportato il particolare fotografico di ciascuna centralina.

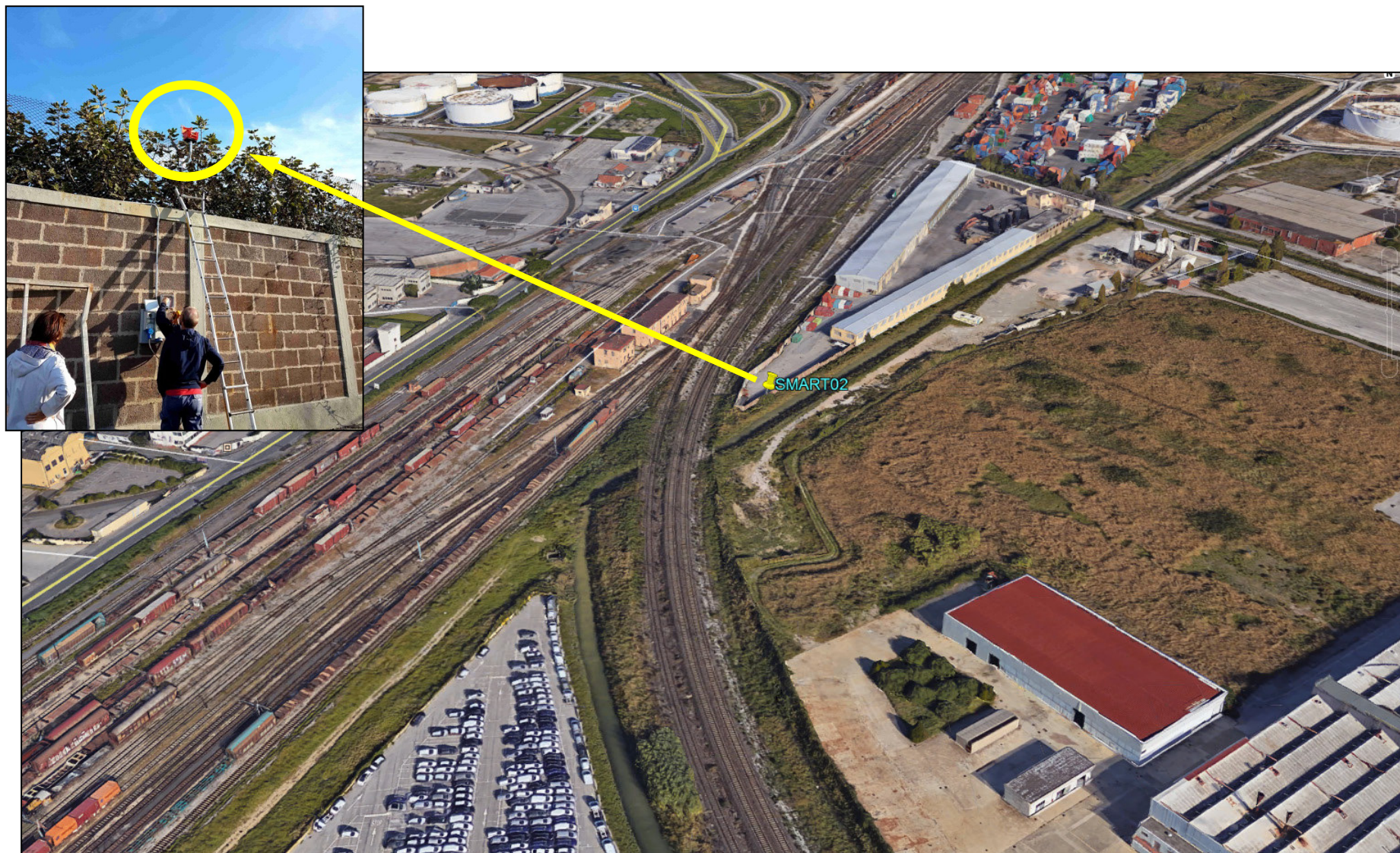


Fig. 4. Vista aerea della zona in cui sono state installate le stazioni SMART02 e AIRQLab, con evidenziato il particolare fotografico della centralina SMART02 e della stazione AIRQLab (Fonte: Google Earth).



Fig. 5. Vista aerea della zona in cui è stata installata la stazione SMART06, con evidenziato il relativo particolare fotografico (Fonte: Google Earth).

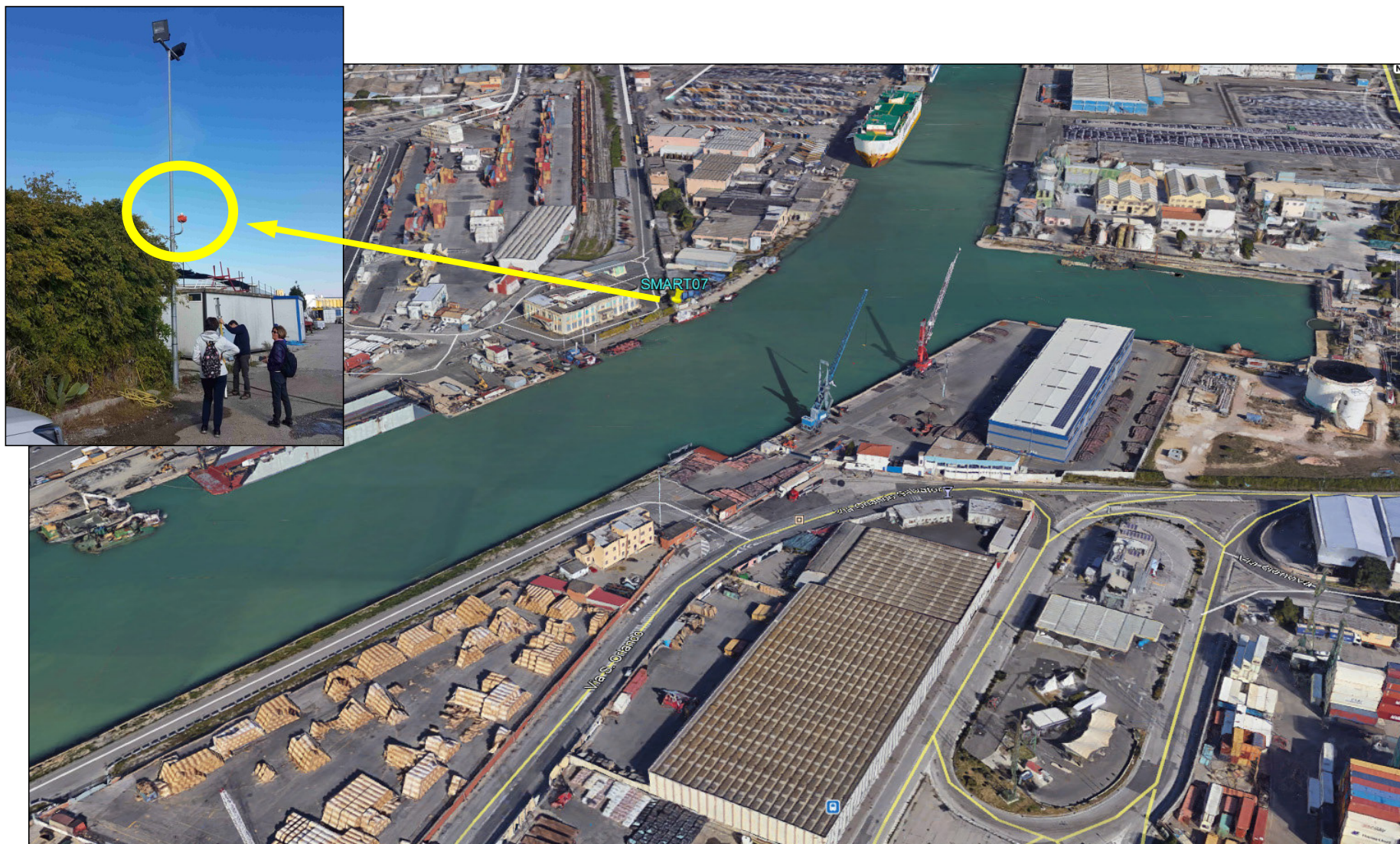


Fig. 6. Vista aerea della zona in cui è stata installata la stazione SMART07, con evidenziato il relativo particolare fotografico (Fonte: Google Earth).



Fig. 7. Vista aerea della zona in cui è stata installata la stazione SMART08, con evidenziato il relativo particolare fotografico (Fonte: Google Earth).



Fig. 8. Vista aerea della zona in cui è stata installata la stazione SMART11, con evidenziato il relativo particolare fotografico (Fonte: Google Earth).



Fig. 9. Vista aerea della zona in cui è stata installata la stazione SMART13, con evidenziato il relativo particolare fotografico (Fonte: Google Earth).

3.3 Ricalibrazione delle centraline AIRQino tramite misure del mezzo mobile ARPAT

Le centraline AIRQino SMART 06 e 08 sono state affiancate al laboratorio mobile ARPAT, operativo presso i due siti di Fortezza Vecchia e Darsena Toscana Ovest (Fig. 2) nei seguenti periodi:

- Fortezza Vecchia: 26/10/2017–20/11/2017; 13/02/2018–24/02/2018; 12/04/2018–02/05/2018; 19/07/2018–31/07/2018;
- Darsena Toscana: 22/11/2017–11/02/2018; 06/05/2018–27/05/2018; 01/08/2018–20/08/2018.

Attraverso il confronto diretto con le misure del mezzo mobile ARPAT, è stato quindi possibile ricalibrare le centraline SMART06 e SMART08, ricalibrando in particolare i seguenti sensori:

- NO₂, usando misure orarie;
- PM_{2.5} e PM₁₀, usando misure giornaliere.

Non sono stati invece ricalibrati i seguenti sensori:

- O₃, in quanto sia per SMART06 che per SMART08 le misure di O₃ non sono state disponibili;
- CO, in quanto poco significativo.

Relativamente alle concentrazioni di NO₂, in Tab. 5 sono riassunte le statistiche di base delle concentrazioni medie orarie misurate nei due siti dal laboratorio mobile ARPAT e dalle due centraline SMART06 e SMART08 non calibrate, mentre in Tab. 6 sono riportati gli indicatori statistici del confronto tra i dati dello stesso laboratorio mobile ARPAT e le due centraline ricalibrate, sia considerate separatamente che nell'insieme.

Analogamente per le concentrazioni di PM_{2.5} e PM₁₀, in Tab. 7 sono riportate le statistiche di base delle concentrazioni medie giornaliere misurate nei due siti dal laboratorio mobile ARPAT e dalle centraline SMART06 e SMART08 non calibrate, mentre in Tab. 8 sono riportati gli indicatori statistici del confronto rispetto ai dati dello stesso laboratorio mobile ARPAT delle due centraline ricalibrate, sia considerate separatamente che nell'insieme.

L'andamento delle serie storiche delle concentrazioni medie orarie di NO₂ misurate nei due siti – considerando sia gli andamenti delle SMART non calibrate che quelli delle SMART ricalibrate – è illustrato in Fig. 10 (Fortezza Vecchia) ed in Fig. 11 (Darsena Toscana Ovest). In Fig. 12 sono invece presentati gli andamenti delle concentrazioni medie giornaliere di PM_{2.5} e PM₁₀ misurate nei due siti, considerando sia quelli delle SMART non calibrate che ricalibrate in entrambi i siti.

Sia attraverso il confronto grafico nelle Figg. 10, 11 e 12, che mediante i valori statistici riportati nelle Tabb. 6 e 8, si evince un certo miglioramento delle concentrazioni originali (non calibrate) misurate dalle centraline SMART06 e SMART08. Come mostrato in Fig. 12, il miglioramento è sostanziale per quanto riguarda le concentrazioni medie giornaliere di PM₁₀, caratterizzate da valori di Normalised Root Mean Square Error (NRMSE) compresi tra circa il 27 e il 35.3% e da un r^2 compreso tra 0.502 e 0.528 (Tab. 8), mentre è meno pronunciato per quelle di PM_{2.5}, caratterizzate da valori di NRMSE compresi tra circa il 37.5 e il 42% e da valori di r^2 inferiori a 0.3 (Tab. 8). Sebbene in misura meno significativa, anche la ricalibrazione del sensore di NO₂ apporta un certo beneficio alle misure delle concentrazioni orarie delle centraline SMART06 e SMART08 (Figg. 10 e 11), caratterizzate da valori di NRMSE compresi tra circa il 52 e il 60.4% e da valori di r^2 compresi tra 0.306 e 0.425 (Tab. 6).

Per quanto riguarda la ricalibrazione di tutte le altre centraline SMART non co-locate con il laboratorio mobile ARPAT, sono stati utilizzati i coefficienti di calibrazione ottenuti considerando l'insieme dei dati misurati dal mezzo mobile ARPAT nei due siti di riferimento contrapposti all'insieme dei dati misurati dalle centraline SMART 06 e 08. Al solito, ciò ha riguardato sia le concentrazioni medie orarie di NO₂ (Tab. 6), che quelle medie giornaliere di PM_{2.5} e PM₁₀ (Tab. 8).

Tab. 5. Statistiche di base delle concentrazioni medie orarie di NO₂ (µg/m³) misurate a Livorno dalle centraline SMART06 e SMART08 non calibrate contrapposte a quelle misurate dal laboratorio mobile ARPAT.

Sito	Periodi	Stazione	Min	Media	Dev. St.	Max	N
Fortezza Vecchia							
	26/10/2017–20/11/2017	ARPAT	1.29	23.34	16.55	101.31	1105
	13/02/2018–24/02/2018	SMART08	2.90	16.13	9.99	86.00	1105
	12/04/2018–02/05/2018						
	19/07/2018–31/07/2018						
Darsena Toscana Ovest							
	22/11/2017–11/02/2018	ARPAT	0.03	25.20	16.63	92.25	2470
	06/05/2018–27/05/2018	SMART06	4.20	18.89	13.18	57.90	2470
	01/08/2018–20/08/2018						

Tab. 6. Indicatori statistici della ricalibrazione delle concentrazioni medie orarie di NO₂ (µg/m³) misurate a Livorno dalle centraline SMART06 e SMART08 sulla base di quelle misurate dal laboratorio mobile ARPAT.

Sito	Periodi	Stazione vs. ARPAT	Mean Bias (µg/m ³)	Norm. Mean Bias (%)	Root Mean Square Error (µg/m ³)	Norm. Root Mean Square Error (%)	r ²
Fortezza Vecchia							
	26/10/2017–20/11/2017 13/02/2018–24/02/2018 12/04/2018–02/05/2018 19/07/2018–31/07/2018	SMART08	0.00	-0.01	14.42	60.41	0.306
Darsena Toscana Ovest							
	22/11/2017–11/02/2018 06/05/2018–27/05/2018 01/08/2018–20/08/2018	SMART06	0.00	0.00	12.92	51.97	0.425
Fortezza Vecchia & Darsena Toscana Ovest							
	Tutti	SMART06 & SMART08	0.00	0.01	13.52	55.63	0.378

Tab. 7. Statistiche di base delle concentrazioni medie giornaliere di PM_{2.5} e PM₁₀ (µg/m³) misurate a Livorno dalle centraline SMART06 e SMART08 non calibrate contrapposte a quelle misurate dal laboratorio mobile ARPAT.

Sito	Periodi	Inquinante	Stazione	Min	Media	Dev. St.	Max	N
Fortezza Vecchia								
	26/10/2017–17/11/2017	PM _{2.5}	ARPAT	4.00	13.25	5.85	34.00	51
	13/02/2018–27/02/2018		SMART08	2.30	8.23	3.23	17.40	51
	12/04/2018–30/04/2018	PM ₁₀	ARPAT	5.00	23.14	9.81	46.00	51
	20/07/2018–27/07/2018		SMART08	3.80	10.42	3.73	20.50	51
Darsena Toscana Ovest								
	22/11/2017–06/12/2017	PM _{2.5}	ARPAT	1.00	13.63	6.62	28.00	47
	12/01/2018–26/01/2018		SMART06	2.90	9.14	3.58	17.20	47
	06/05/2018–23/05/2018	PM ₁₀	ARPAT	10.00	25.02	9.21	47.00	47
	01/08/2018–03/08/2018		SMART06	5.50	11.16	3.44	19.60	47

Tab. 8. Indicatori statistici della ricalibrazione delle concentrazioni medie giornaliere di PM_{2.5} e PM₁₀ (µg/m³) misurate a Livorno dalle centraline SMART06 e SMART08 sulla base di quelle misurate dal laboratorio mobile ARPAT.

Sito	Periodi	Inquinante	Stazione vs. ARPAT	Mean Bias (µg/m ³)	Norm. Mean Bias (%)	Root Mean Square Error (µg/m ³)	Norm. Root Mean Square Error (%)	r ²
Fortezza Vecchia								
	26/10/2017–17/11/2017	PM _{2.5}	SMART08	0.00	-0.02	5.50	42.05	0.286
	13/02/2018–27/02/2018							
	12/04/2018–30/04/2018	PM ₁₀		0.00	0.02	8.08	35.26	0.528
	20/07/2018–27/07/2018							
Darsena Toscana Ovest								
	22/11/2017–06/12/2017	PM _{2.5}	SMART06	0.00	-0.03	5.27	37.55	0.234
	12/01/2018–26/01/2018							
	06/05/2018–23/05/2018	PM ₁₀		0.00	0.00	6.78	26.99	0.502
	01/08/2018–03/08/2018							
Fortezza Vecchia & Darsena Toscana Ovest								
	Tutti	PM _{2.5}	SMART06 & SMART08	0.00	0.01	5.43	39.91	0.242
		PM ₁₀		0.00	-0.01	7.44	30.96	0.522

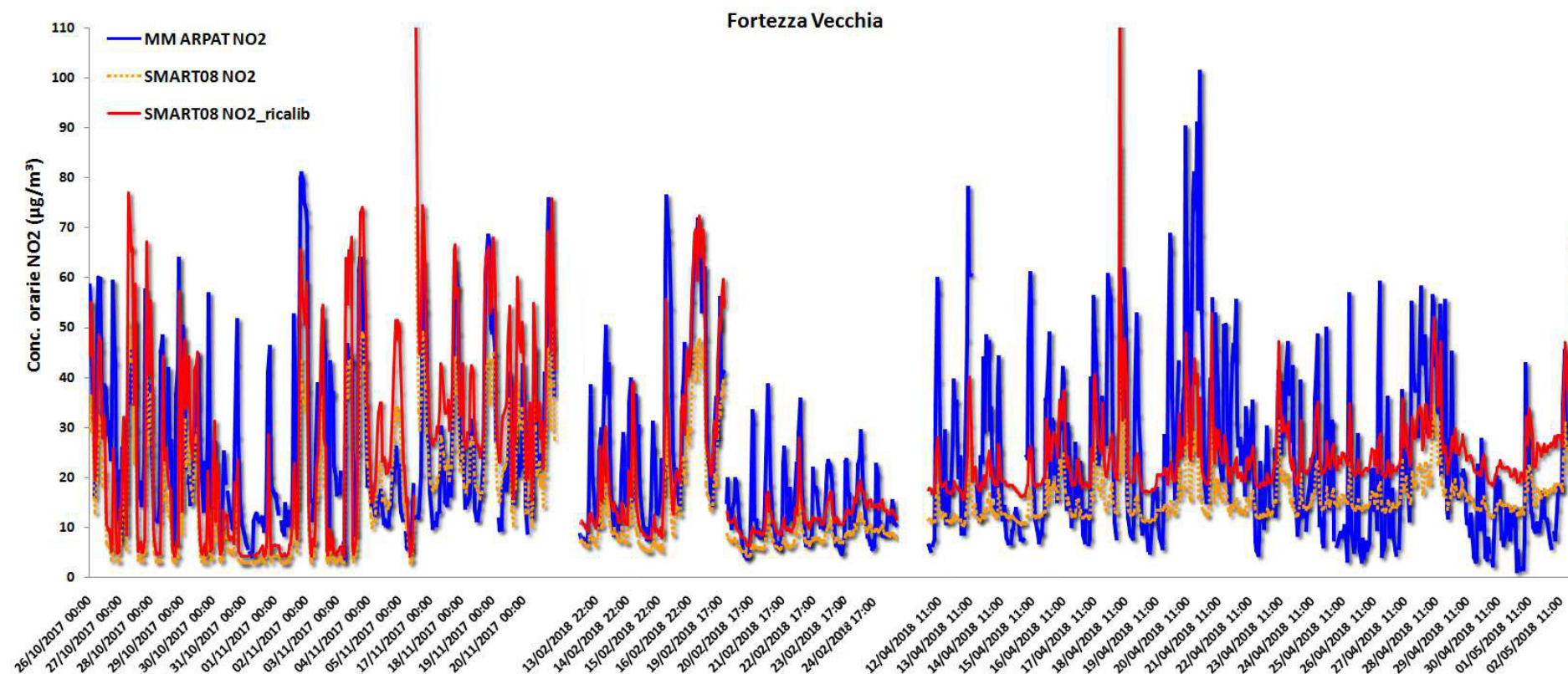


Fig. 10. Serie storiche delle concentrazioni medie orarie di NO₂ misurate in Fortezza Vecchia a Livorno dalla centralina SMART08 – sia non calibrata che ricalibrata – contrapposte a quelle misurate dal mezzo mobile ARPAT, nei diversi periodi delle campagne di misura.

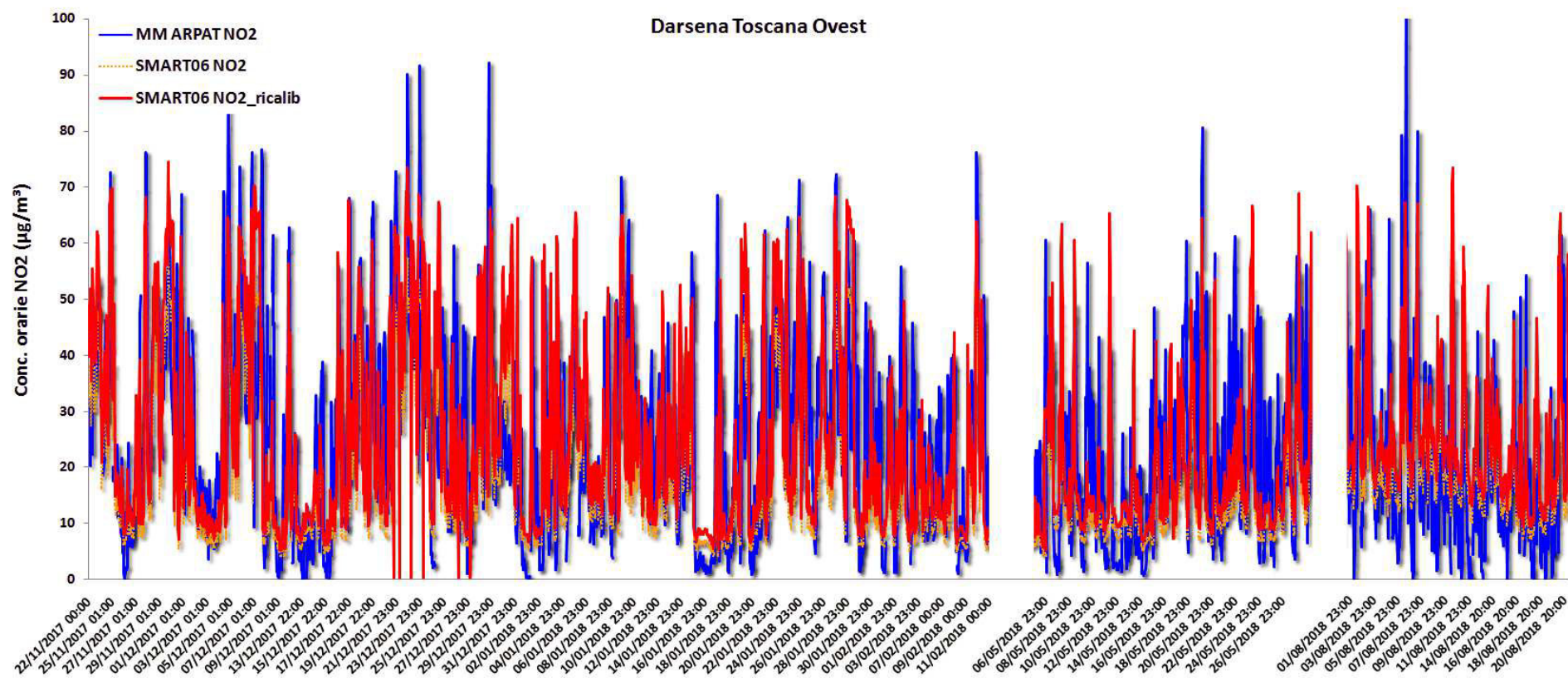
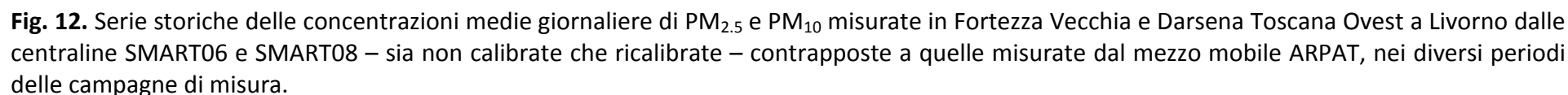


Fig. 11. Serie storiche delle concentrazioni medie orarie di NO₂ misurate in Darsena Toscana Ovest a Livorno dalla centralina SMART06 – sia non calibrata che ricalibrata – contrapposte a quelle misurate dal mezzo mobile ARPAT, nei diversi periodi delle campagne di misura..



3.4 Risultati del monitoraggio tramite centraline AIRQino

In Tab. 9 è riportata la sintesi delle concentrazioni misurate dalle 6 centraline AIRQino nel semestre “freddo”, mentre in Tab. 10 quella nel semestre “caldo”. C'è da notare che per SMART 06, 07 e 08 le misure di O₃ non sono disponibili. Inoltre – come evidenziato nel paragrafo 3.3 –, per tutte le centraline le concentrazioni di O₃ e CO non sono state ricalibrate.

Tab. 9. Statistiche di base delle concentrazioni misurate nell'ambito della campagna di monitoraggio realizzata tramite le centraline AIRQino a Livorno (01/11/2017–15/04/2018).

	SMART					
	02	06	07	08	11	13
O ₃ (µg/m ³)						
Min	9.2				8.4	9.7
Media	67.6				79.9	59.7
Dev. St.	31.6				33.3	24.3
Max	120.1				124.8	114.5
N	23175				21233	18204
% Validi	97.56				89.38	76.63
NO ₂ (µg/m ³)						
Min	4.2	3.7	0.4	4.5	0.8	2.6
Media	26.6	23.1	18.3	25.3	17.4	20.2
Dev. St.	19.2	17.9	17.7	17.1	15.5	14.9
Max	103.4	89.2	96.1	124.1	128.9	175
N	23176	21271	23314	21098	21233	18204
% Validi	97.56	89.54	98.14	88.81	89.38	76.63
CO (mg/m ³)						
Min	0.06	0.03	0.03	0.11	0.05	0.08
Media	0.22	0.22	0.23	0.24	0.22	0.25
Dev. St.	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04
Max	0.55	0.45	0.47	0.56	0.54	0.54
N	23176	21265	23314	21098	21233	17885
% Validi	97.56	89.52	98.14	88.81	89.38	75.29
PM _{2.5} (µg/m ³)						
Min	2.2	2.4	1.8	2.9	3.5	5.5
Media	20.7	18.23	21.4	14.65	12.44	19.53
Dev. St.	14.7	12.71	16.9	6.75	5.26	9.47
Max	242.4	225.2	176.2	101.6	50.6	108
N	23123	21248	23294	21078	20883	17536
% Validi	97.34	89.45	98.06	88.73	87.91	73.82
PM ₁₀ (µg/m ³)						
Min	2.7	3.1	2.4	5.2	4.3	6.7
Media	30	30.5	37.1	21.12	18.3	29.4
Dev. St.	19.5	19.3	27.5	8.76	7.88	13.7
Max	293.2	447.4	566.4	166.8	65.7	138.9
N	23176	21265	23314	21105	21161	17885
% Validi	97.56	89.52	98.14	88.84	89.08	75.29
PM _{2.5} / PM ₁₀						
Min	0.161	0.090	0.195	0.170	0.110	0.255
Media	0.688	0.598	0.572	0.689	0.688	0.670
Dev. St.	0.138	0.160	0.161	0.151	0.138	0.160
Max	0.835	0.876	0.828	0.871	0.884	0.896
N	23123	21247	23294	21078	20880	17511
% Validi	97.34	89.44	98.06	88.73	87.90	73.72

Tab. 10. Statistiche di base delle concentrazioni misurate nell'ambito della campagna di monitoraggio realizzata tramite le centraline AIRQino a Livorno (16/04/2018–31/10/2018).

	SMART					
	02	06	07	08	11	13
O₃ (µg/m³)						
Min	4.3				14.4	16.1
Media	56.6				70.9	61.5
Dev. St.	22.7				20.7	16.2
Max	119.8				124.4	116.2
N	27808				25192	28192
% Validi	97.51				88.33	98.85
NO₂ (µg/m³)						
Min	10.7	5.4	0.8	16.8	8.6	10.7
Media	35.6	21.8	26.3	38.3	34.0	34.5
Dev. St.	16.5	13.2	14.4	12.1	11.3	10.4
Max	150.4	101.9	84.2	237.8	113.2	83.7
N	27809	28088	28220	28079	25196	28192
% Validi	97.51	98.49	98.95	98.46	88.35	98.85
CO (mg/m³)						
Min	0.00	0.10	0.10	0.00	0.00	0.10
Media	0.22	0.22	0.26	0.40	0.20	0.27
Dev. St.	0.05	0.05	0.05	0.13	0.04	0.05
Max	0.50	0.40	0.40	1.20	0.30	0.40
N	27679	27969	28114	27960	23468	26469
% Validi	97.05	98.07	98.58	98.04	82.29	92.81
PM_{2.5} (µg/m³)						
Min	2.9	2.6	2.6	4.9	3.5	5.5
Media	17.7	16.9	20.1	19.0	12.8	19.8
Dev. St.	10.6	8.6	11.6	8.7	4.9	8.4
Max	164.9	70.1	113.9	64.6	70.4	59.2
N	27361	17276	28220	27838	25159	27910
% Validi	95.94	60.58	98.95	97.61	88.22	97.86
PM₁₀ (µg/m³)						
Min	6.1	5.6	4.0	5.7	4.8	6.7
Media	24.6	27.0	29.9	27.2	17.0	28.3
Dev. St.	14.8	11.5	15.3	11.7	6.1	10.0
Max	293.5	157.7	173.0	191.9	170.6	119.9
N	27415	17276	28220	28071	25196	28138
% Validi	96.13	60.58	98.95	98.43	88.35	98.66
PM_{2.5} / PM₁₀						
Min	0.152	0.111	0.150	0.102	0.133	0.248
Media	0.714	0.611	0.658	0.692	0.747	0.689
Dev. St.	0.120	0.135	0.131	0.121	0.097	0.127
Max	0.835	0.786	0.830	0.881	0.835	0.851
N	27361	17276	28220	27838	25159	27906
% Validi	95.94	60.58	98.95	97.61	88.22	97.85

In Fig. 13 è riportata la sintesi grafica delle concentrazioni medie misurate nei due sottoperiodi per O₃, NO₂, PM_{2.5} e PM₁₀.

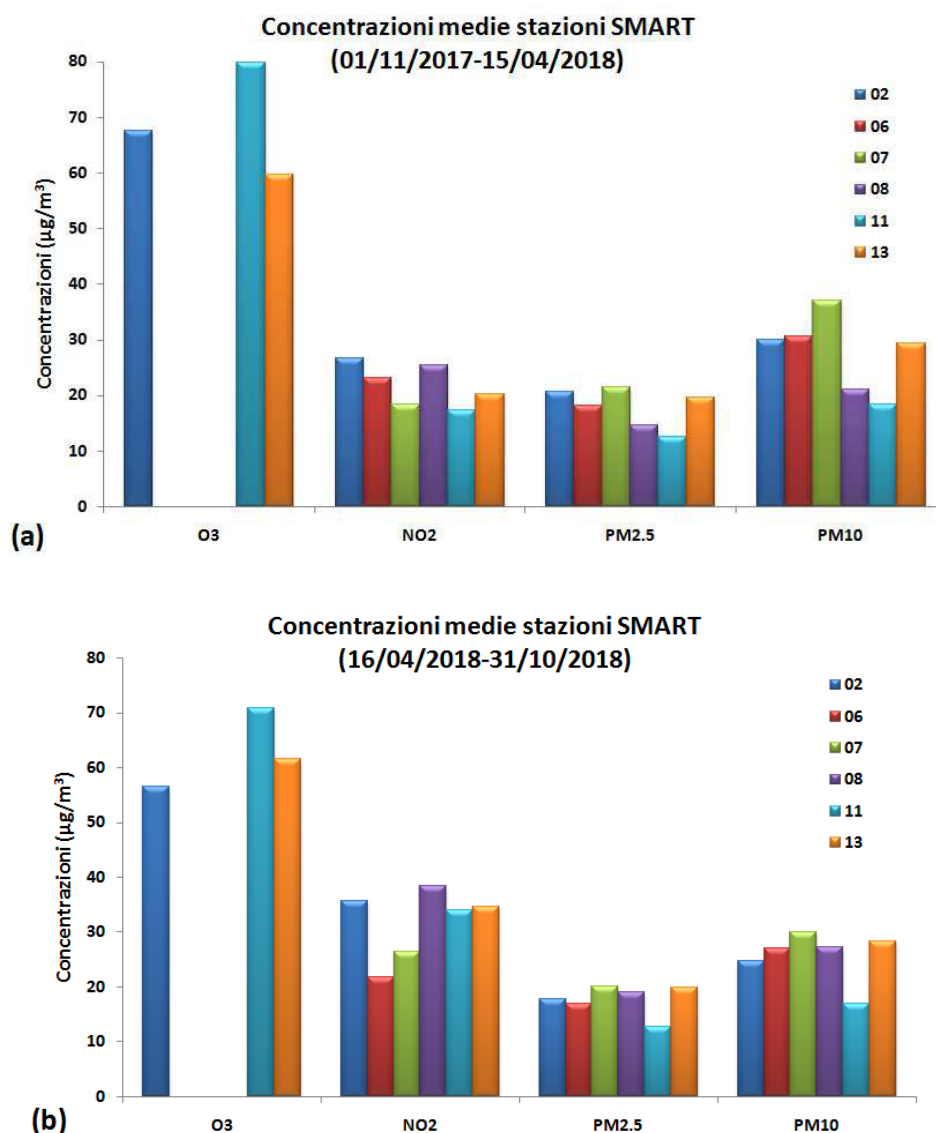


Fig. 13. Valori medi delle concentrazioni misurate durante la campagna di monitoraggio realizzata tramite le centraline AIRQino a Livorno: (a) 01/11/2017–15/04/2018; (b) 16/04/2018–31/10/2018.

Sia attraverso il confronto dei valori numerici (Tabb. 9 e 10) che da quelli graficati (Fig. 13), si osserva come nel semestre freddo le concentrazioni di PM_{10} siano mediamente più alte (di circa l'8%) rispetto a quelle del semestre caldo, mentre variazioni stagionali poco sostanziali si registrano in media per il $PM_{2.5}$: ne consegue che in media il rapporto delle concentrazioni $PM_{2.5}/PM_{10}$ risulti più alto nel semestre caldo (0.690) che non in quello freddo (0.651). Le concentrazioni di NO_2 sono decisamente più elevate (31.3%) nel semestre caldo rispetto a quello freddo, segno di una più pronunciata attività fotochimica, mentre per contro le concentrazioni di O_3 risultano sorprendentemente più alte (9.6%) nel semestre freddo che non in quello caldo.

Relativamente alle concentrazioni medie giornaliere di $PM_{2.5}$ e PM_{10} , le serie storiche misurate dalle 6 centraline AIRQino sono state confrontate con quelle misurate dalle 3 stazioni ufficiali della rete ARPAT (Fig. 2). Nelle Figg. 14 (periodo freddo) e 15 (periodo caldo) sono mostrati gli andamenti delle concentrazioni medie giornaliere di $PM_{2.5}$, mentre nelle Figg. 16 e 17 quelli delle concentrazioni medie giornaliere di PM_{10} . C'è da sottolineare che tale confronto ha valore puramente indicativo, in quanto – come mostrato in Fig. 2 – le stazioni delle 2 diverse reti di monitoraggio non sono direttamente confrontabili, sia perché significativamente distanti, sia in quanto diverse per tipologia – e quindi per sorgente emissiva presumibilmente misurata.

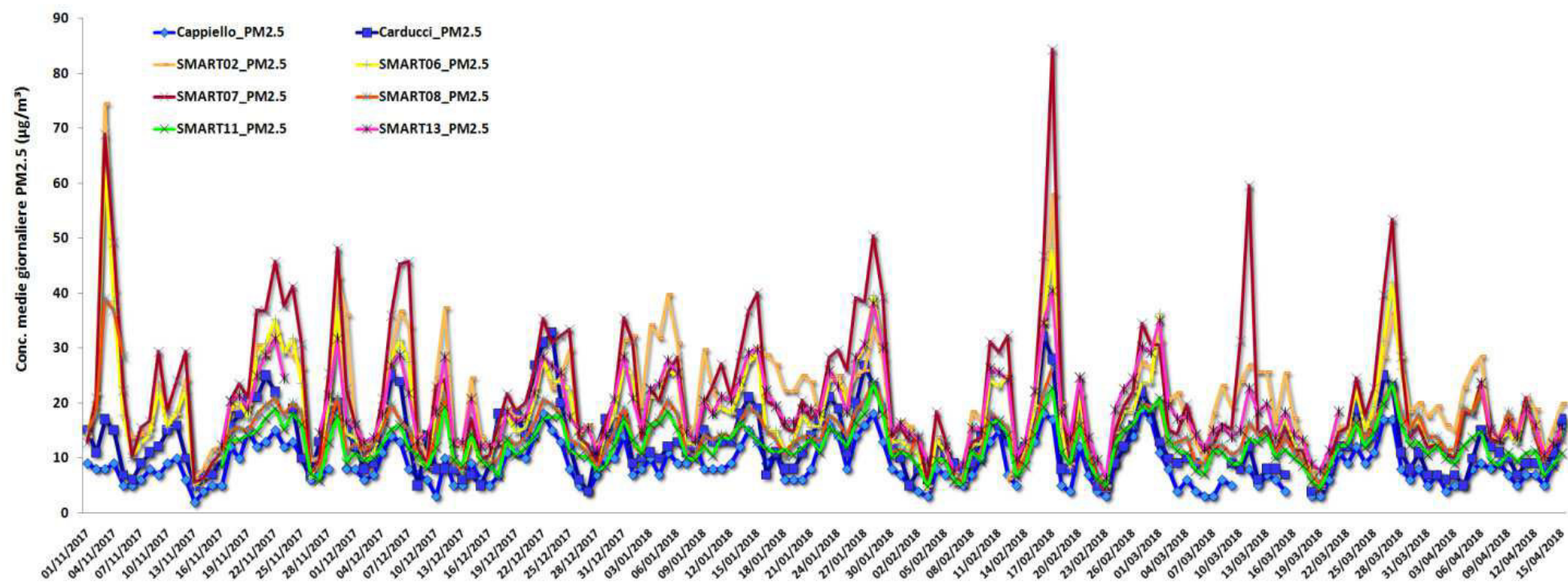


Fig. 14. Serie storica delle concentrazioni medie giornaliere di PM_{2.5} misurate a Livorno dalla rete di monitoraggio IBIMET contrapposte a quelle misurate dalla rete ARPAT (01/11/2017–15/04/2018).

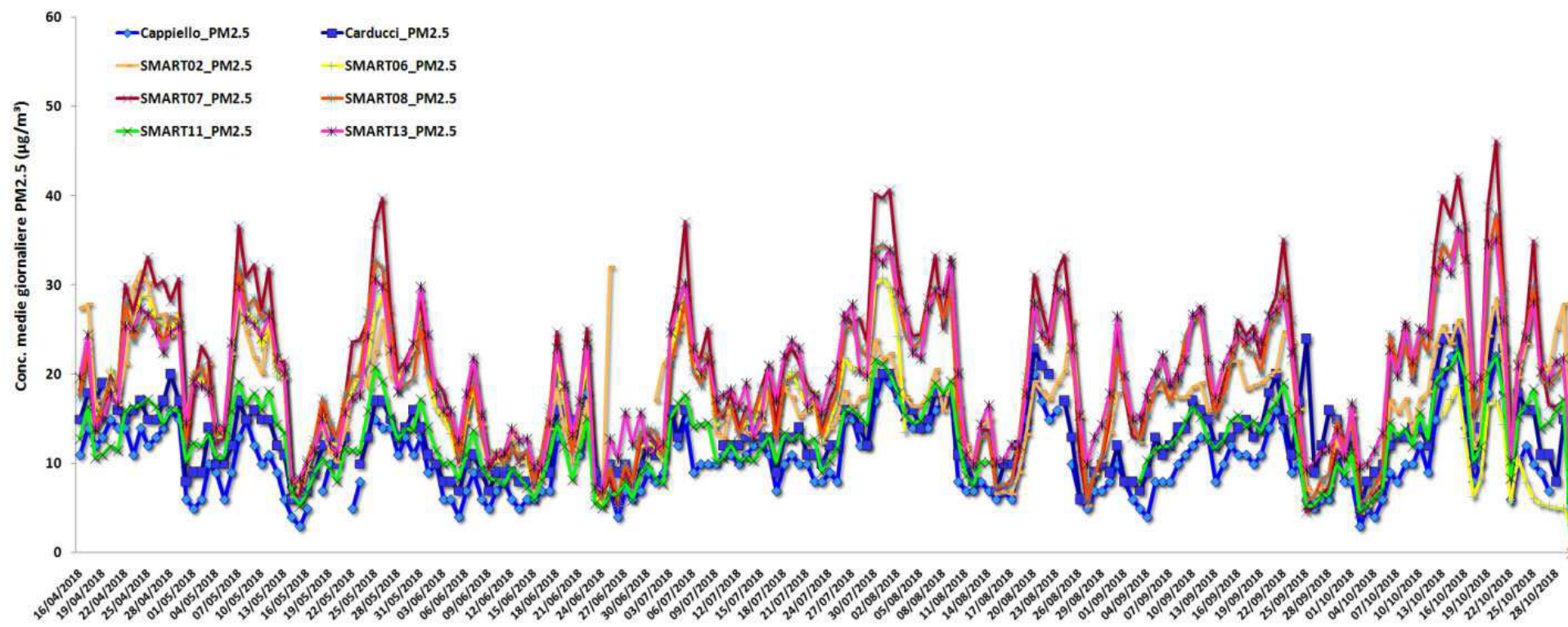


Fig. 15. Serie storica delle concentrazioni medie giornaliere di PM_{2.5} misurate a Livorno dalla rete di monitoraggio IBIMET contrapposte a quelle misurate dalla rete ARPAT (16/04/2018–31/10/2018).

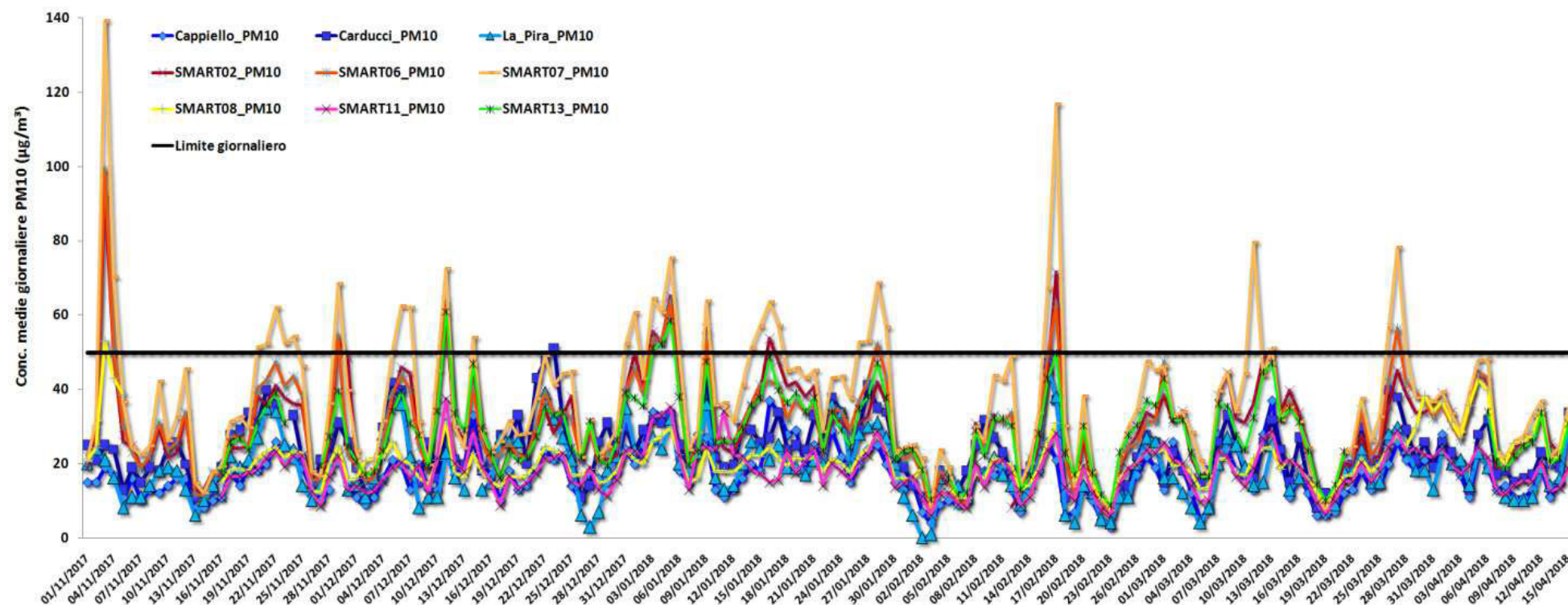


Fig. 16. Serie storica delle concentrazioni medie giornaliere di PM₁₀ misurate a Livorno dalla rete di monitoraggio IBIMET contrapposte a quelle misurate dalla rete ARPAT (01/11/2017–15/04/2018).

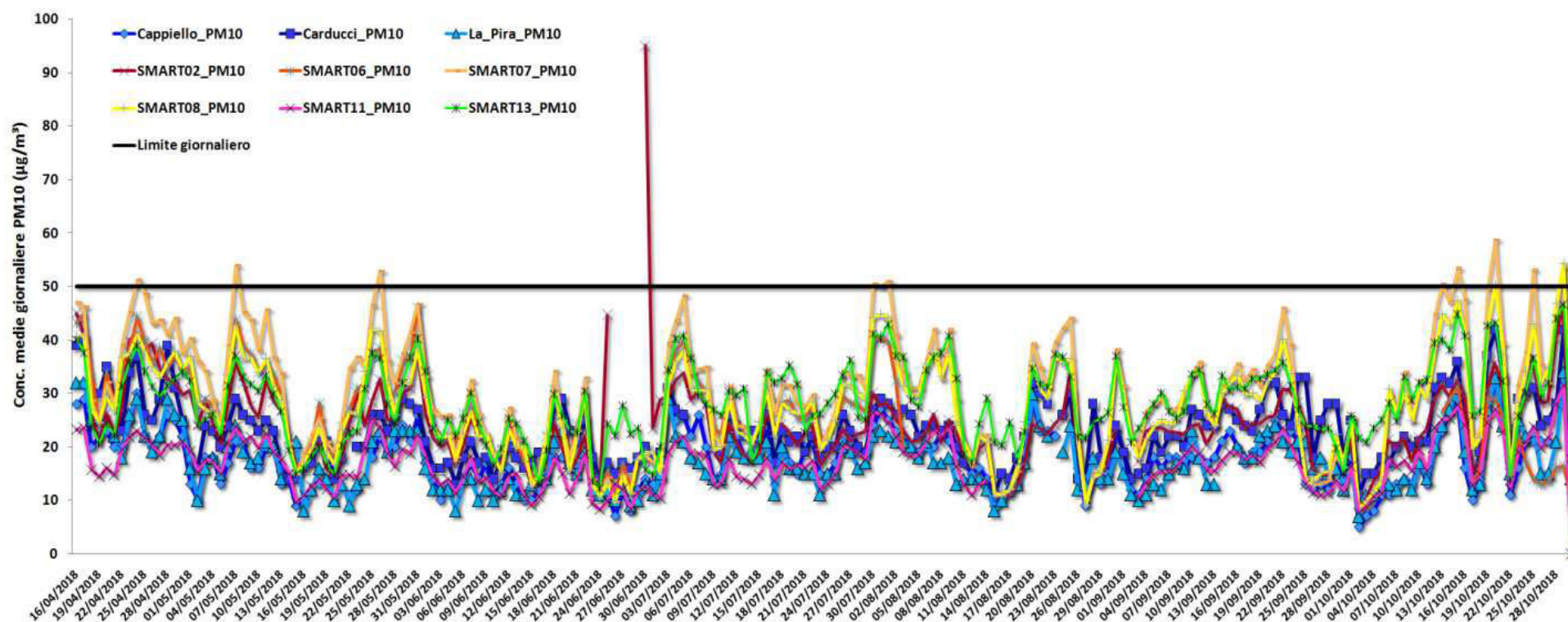


Fig. 17. Serie storica delle concentrazioni medie giornaliere di PM₁₀ misurate a Livorno dalla rete di monitoraggio IBIMET contrapposte a quelle misurate dalla rete ARPAT (16/04/2018–31/10/2018).

3.5 Risultati del monitoraggio tramite stazione AIRQLab

In Tab. 11 è riportata la sintesi statistica per periodo delle concentrazioni misurate dalla stazione AIRQLab, mentre in Fig. 18 è mostrata la sintesi grafica delle concentrazioni medie.

Nel semestre freddo si ha una copertura di quasi 4 mesi (22/01/2018–15/04/2018). Nel semestre caldo, i sensori gassosi (Horiba) sono stati disattivati nel periodo 27/06/2018–19/09/2018, fornendo quindi una copertura di circa 3 mesi e mezzo (16/04/2018–26/06/2018; 20/09/2018–31/10/2018). Nello stesso periodo, il sensore delle polveri (DustTrak) è stato attivo fino al 23/05/2018, fornendo quindi un monitoraggio di poco superiore ad 1 mese. Per queste ragioni, quindi, non è possibile effettuare un confronto tra gli andamenti nel semestre freddo ed in quello caldo alla stregua di quello fatto per le centraline SMART (§ 3.4).

Tab. 11. Statistiche di base delle concentrazioni medie orarie misurate nell'ambito della campagna di monitoraggio realizzata tramite la stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018).

Periodo	Inquinante (U. misura)	Min	Media	Dev. St.	Max	N	% Validi
22/01/2018–15/04/2018							
	O ₃ (µg/m ³)	0.00	58.10	30.60	164.30	14380	99.38
	NO (µg/m ³)	0.00	5.50	12.00	156.60	14396	99.50
	NO ₂ (µg/m ³)	1.40	26.20	18.00	124.40	14396	99.50
	NO _x (µg/m ³)	1.80	34.60	33.30	346.40	14396	99.50
	CO (mg/m ³)	0.10	0.21	0.07	0.50	14396	99.50
	SO ₂ (µg/m ³)	2.10	7.40	12.90	404.00	14397	99.50
	PM ₁ (µg/m ³)	1.00	8.57	8.01	361.00	14464	99.96
	PM _{2.5} (µg/m ³)	1.00	9.49	8.14	364.40	14464	99.96
	PM ₁₀ (µg/m ³)	2.00	11.70	8.90	373.20	14464	99.96
	PM _{2.5} /PM ₁₀	0.280	0.805	0.121	1.000	14464	99.96
16/04/2018–31/10/2018							
16/04/2018–26/06/2018	O ₃ (µg/m ³)	0.00	70.40	31.10	164.30	15860	55.61
20/09/2018–31/10/2018	NO (µg/m ³)	0.00	4.20	9.59	287.10	16002	56.11
	NO ₂ (µg/m ³)	0.40	21.10	16.60	236.30	16002	56.11
	NO _x (µg/m ³)	0.50	27.50	28.60	492.70	16001	56.11
	CO (mg/m ³)	0.10	0.19	0.06	1.10	15860	55.61
	SO ₂ (µg/m ³)	4.30	8.14	5.48	160.50	15822	55.48
	PM ₁ (µg/m ³)	3.00	8.20	7.40	361.00	5327	18.68
16/04/2018–23/05/2018	PM _{2.5} (µg/m ³)	3.00	9.30	7.70	364.40	5327	18.68
	PM ₁₀ (µg/m ³)	3.80	12.10	9.60	373.20	5327	18.68
	PM _{2.5} /PM ₁₀	0.232	0.781	0.106	1.000	5327	18.68

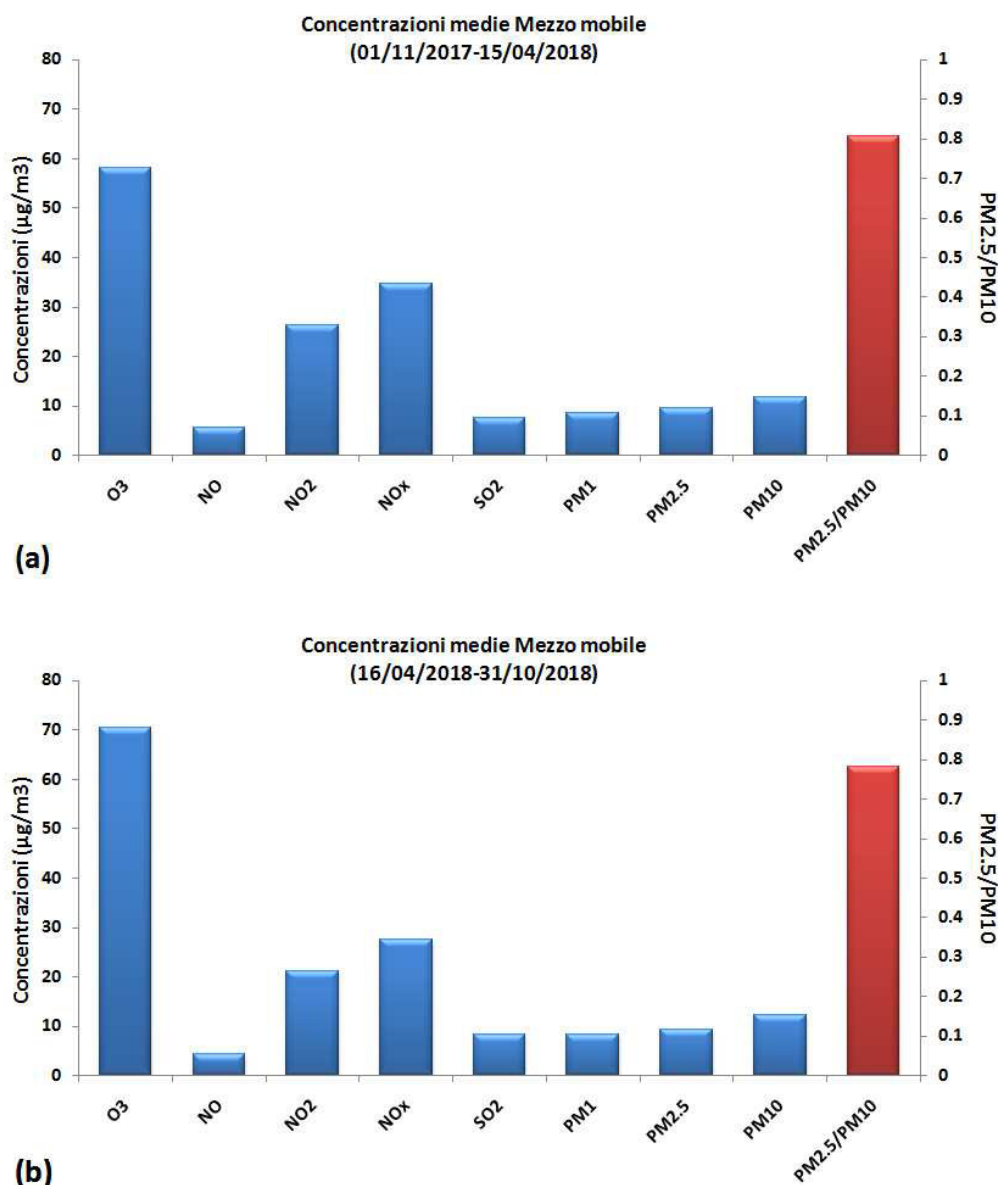


Fig. 18. Valori medi delle concentrazioni orarie misurate durante la campagna di monitoraggio realizzata tramite la stazione AIRQLab a Livorno: (a) 01/11/2017–15/04/2018; (b) 16/04/2018–31/10/2018.

In Fig. 19 è riportato l'andamento delle serie storiche delle concentrazioni orarie di O₃, NO, NO₂, NO_x ed SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab durante il semestre freddo, mentre in Fig. 20 quello durante il semestre caldo (con esclusione dei giorni di non campionamento).

Parimenti, in Fig. 21 è illustrato l'andamento delle concentrazioni orarie di PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ e del rapporto PM_{2.5}/PM₁₀ durante il semestre freddo, mentre in Fig. 22 il corrispondente andamento nel periodo di operatività durante il semestre caldo (16/04/2018–23/05/2018).

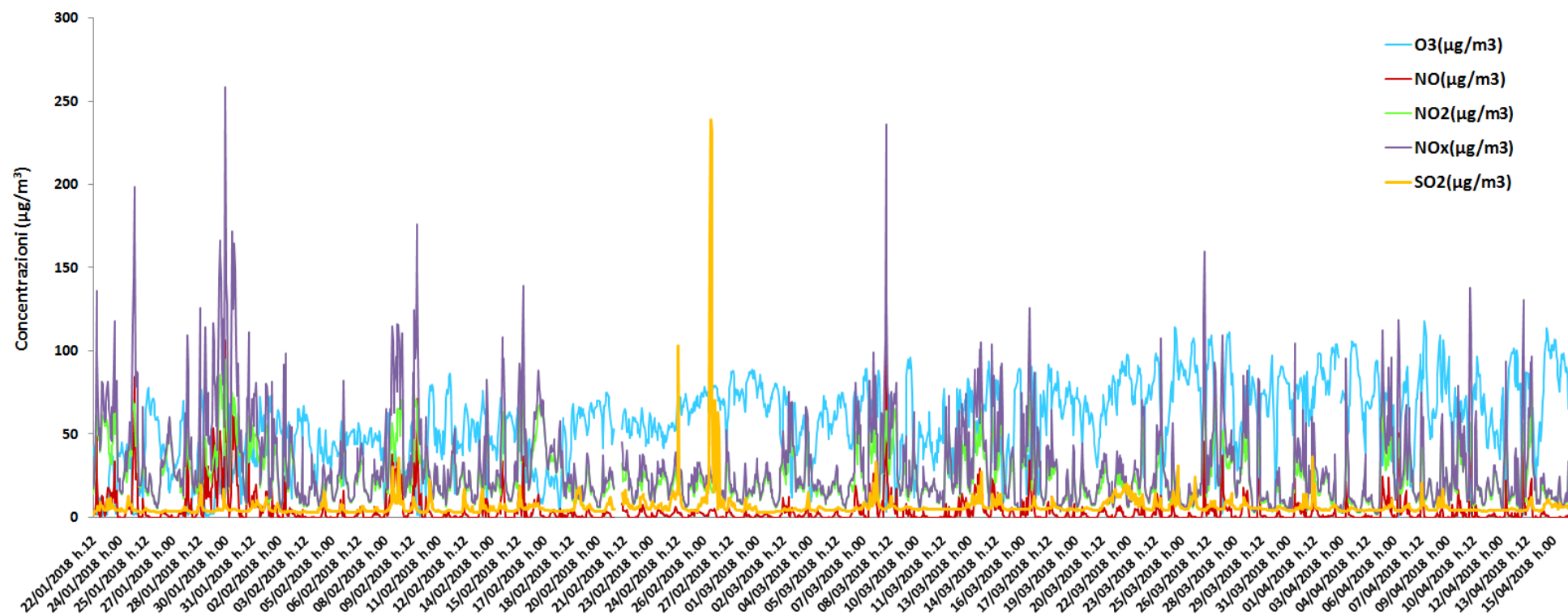


Fig. 19. Serie storica delle concentrazioni medie orarie di O₃, NO, NO₂, NO_x ed SO₂ misurate a Livorno dalla stazione AIRQLab (22/01/2018–15/04/2018).

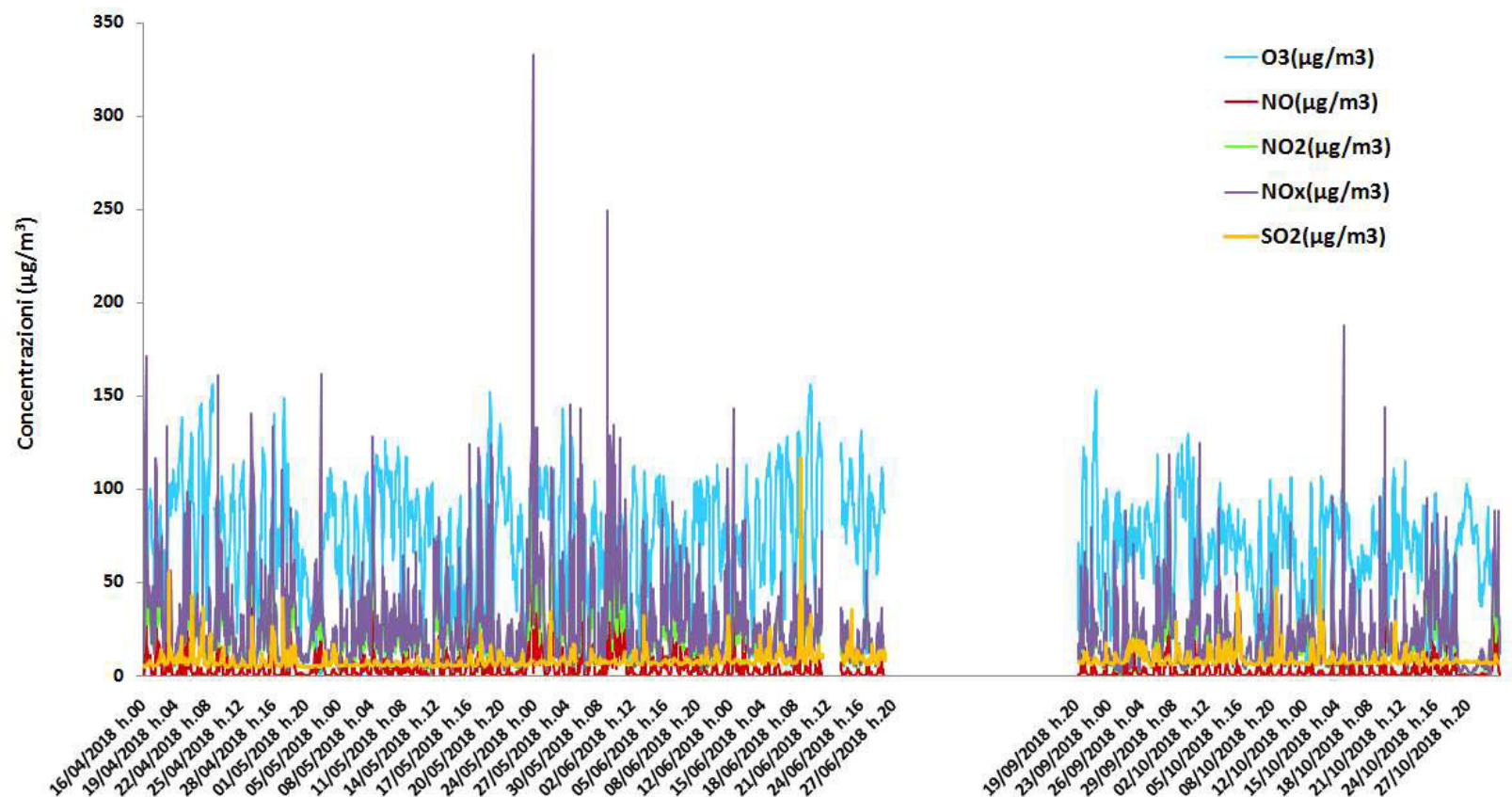


Fig. 20. Serie storica delle concentrazioni medie orarie di O₃, NO, NO₂, NO_x ed SO₂ misurate a Livorno dalla stazione AIRQLab (16/04/2018–31/10/2018). I dati non sono disponibili nel periodo: 27/06/2018–19/09/2018.

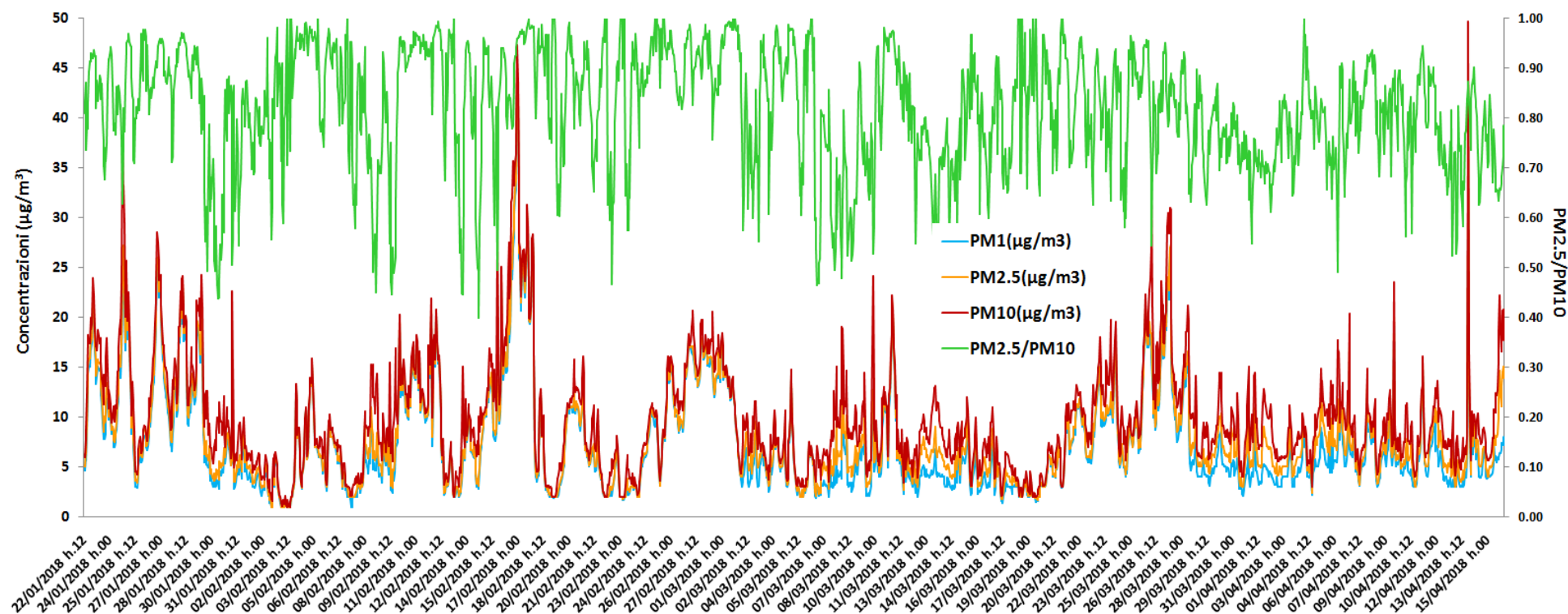


Fig. 21. Serie storica delle concentrazioni medie orarie di PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 e del corrispondente rapporto $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ misurati a Livorno dalla stazione AIRQLab (22/01/2018–15/04/2018).

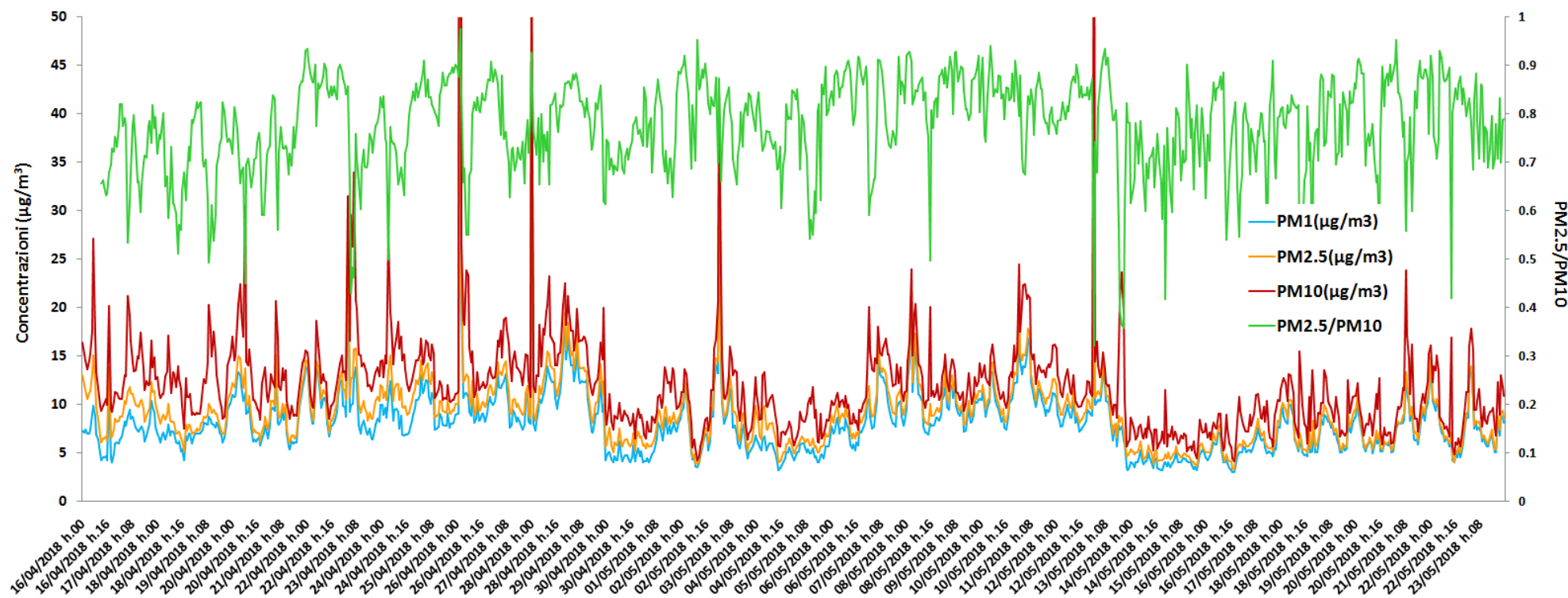


Fig. 22. Serie storica delle concentrazioni medie orarie di PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 e del corrispondente rapporto $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ misurati a Livorno dalla stazione AIRQLab (16/04/2018–23/05/2018).

3.5 Risultati del monitoraggio dei VOC tramite il PTR-MS della stazione AIRQLab

L'analisi dei composti organici volatili (VOC) presenti nell'aria nei pressi del porto di Livorno è stata approfondita attraverso due diverse tecniche di spettrometria di massa. In particolare, l'andamento della concentrazione di molti VOC nell'arco delle 24 ore durante la giornata del 19/03/2018 stato monitorato *in tempo reale* mediante uno spettrometro di massa a reazione di trasferimento protonico (PTR-MS, Ionicon, Austria) attraverso il prelievo continuo di un piccolo flusso di aria (~200 ml/min) al di sopra da una postazione fissa (Fig. 23). La tecnica PTR-MS permette l'analisi diretta di concentrazioni anche molto basse (a livello di 50-100 ppt) di molti VOC in base al loro peso molecolare (m/z) con tempi di acquisizione molto brevi senza nessun tipo di trattamento preliminare dell'aria. In questa analisi, è stato investigato VOC con peso molecolare compreso tra le masse nominali 20 a 220 (m/z); poiché ogni unità di peso nominale di massa (m/z) è stata analizzata per la durata di un 1 secondo, si è potuto registrare un ciclo completo di analisi ogni 200 secondi.



Fig. 23. Particolare fotografico del PTR-MS (a) e del tubo di campionamento dell'aria (b).

In Fig. 24 sono riportati alcuni risultati ottenuti con la tecnica PTR-MS, corrispondenti all'andamento temporale di alcuni VOC (come benzene, toluene e xilene), i quali al di sopra di certe concentrazioni possono avere effetti cancerogeni e/o tossici.

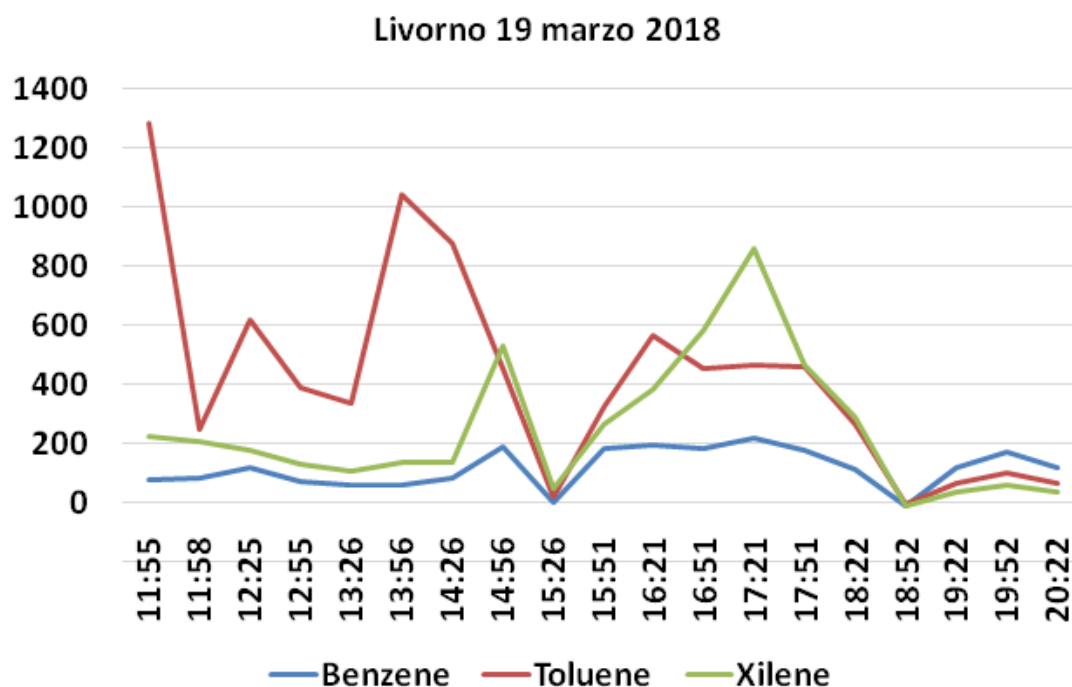


Fig. 24. Andamento in tempo reale dei segnali registrati mediante la tecnica PTR-MS e relativi alle concentrazioni di benzene, toluene e xilene (19/03/2018).

Simultaneamente all'analisi PTR-MS, durante tutto il periodo di monitoraggio sono stati prelevati 8 litri di aria con una pompa di precisione (alla velocità costante di 200 ml/min) e fatti passare attraverso trappole costituite da tubi di acciaio contenenti 200 mg di materiale adsorbente (denominato Tenax®). In questo modo, tutti i VOC contenuti in tale volume di aria sono stati concentrati all'interno della trappola. Ciascuna trappola è stata poi trasportata in laboratorio, dove i VOC sono stati prima termo-desorbiti (TD) attraverso uno speciale dispositivo, e successivamente analizzati per gas-cromatografia associata alla spettrometria di massa (GC-MS) (Agilent, USA). Più in dettaglio, i VOC desorbiti dalle trappole sono stati separati in base al loro tempo di ritenzione su una colonna cromatografica leggermente polare (ZB-5MSi) riscaldata con un gradiente di temperatura crescente da 35°C fino a 50°C con incrementi di 6°C/minuto. Dopo essere stato separato, ciascun VOC è stato prima identificato in base allo spettro di frammentazione prodotto mediante confronto con l'archivio degli spettri di frammentazione di tutti i VOC disponibile dalla National Institute of Standards and Technology (NIST, USA), e poi quantificato utilizzando una curva di calibrazione misurata con un gas standard. Quindi, l'analisi GC-MS ha permesso di separare ed identificare in maniera univoca i VOC presenti in aria ed ovviare alle ambiguità dei risultati dell'analisi PTR-MS in cui VOC diversi aventi lo stesso peso molecolare sono rilevati tutti insieme come se fossero un unico VOC. Inoltre, l'analisi GC-MS ha permesso di quantificare in maniera accurata la concentrazione di VOC presente nel campione di aria, poiché la frammentazione che si verifica inevitabilmente a seguito della reazione di trasferimento protonico nell'analisi PTR-MS spesso porta ad una sottostima della quantità di alcuni VOC.

In conclusione, la combinazione delle tecniche di spettrometria di massa PTR-MS e GC-MS ha permesso un'investigazione molto approfondita dei VOC presenti nell'aria, sia attraverso il monitoraggio *in tempo reale* degli andamenti giornalieri delle loro concentrazioni, che provvedendo ad un'accurata identificazione e quantificazione.

4. MAPPE DI QUALITÀ DELL'ARIA

I dati di qualità dell'aria misurati nell'intero periodo di monitoraggio dalle 6 centraline AIRQino (01/11/2017–31/10/2018) e dalla stazione AIRQLab (22/01/2018–31/10/2018) sono stati elaborati in modo da ricavare delle mappe di qualità dell'aria sull'intera area urbana. Allo scopo è stata utilizzata una serie di *tool* grafici implementata all'interno del pacchetto "Openair" (Carslaw, 2018) dell'ambiente di programmazione statistico R (Venables et al., 2018), quali in particolare: PolarPlot, PercentilePlot, PolarAnnulus e PolarFreq. Ciò ha richiesto la disponibilità di dati anemologici rappresentativi dell'area urbana di Livorno – ed in particolare di quella portuale – con cui incrociare i dati di concentrazione misurati. In assenza di dati meteo che coprissero l'intero periodo considerato, sono stati utilizzati quelli della stazione meteo appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (<http://www.mareografico.it>). Poiché tali dati sono campionati a 10 minuti, anche i dati di concentrazione sono stati mediati a 10 minuti.

4.1 Inquadramento anemologico

La Fig. 25 mostra l'ubicazione della stazione meteo di Livorno della Rete Mareografica Nazionale, sita all'interno del Porto Mediceo, e quindi decisamente rappresentativa delle condizioni anemologiche dell'area portuale e di quella urbana limitrofa.

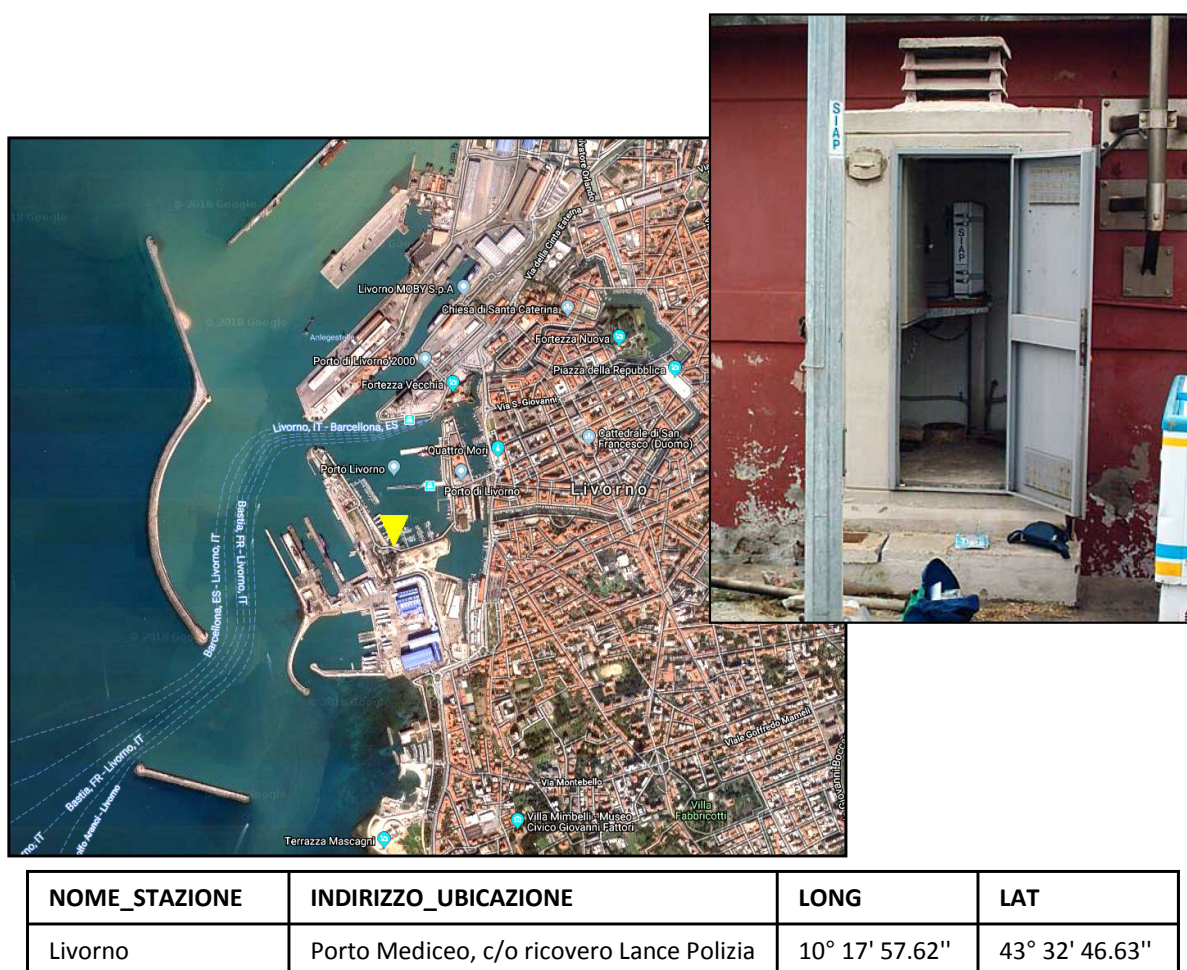


Fig. 25. Ubicazione e particolare fotografico della stazione meteo di Livorno della Rete Mareografica Nazionale.

In Fig. 26 sono rappresentate le rose dei venti elaborate durante l'intero periodo di monitoraggio, distinte per semestre freddo (Fig. 26a) e semestre caldo (Fig. 26b). Tali rose sono utilizzate per la rappresentazione delle mappe di concentrazione basate sui dati misurati dalle centraline AIRQino. Durante il semestre freddo (Fig. 26a), i settori di provenienza prevalenti del vento sono il NE (25%) e l'ENE (19%). Nel complesso, i venti del primo quadrante ricorrono in oltre il 50% dei casi. Sebbene meno frequenti, i venti costieri – ed in particolare il libeccio, proveniente da SW – presentano intensità mediamente più elevate. La media complessiva della velocità del vento è pari a 3.1 m/s, mentre le calme di vento (intensità inferiori a 0.5 m/s) risultano abbastanza rare (3.35%). Nel semestre caldo (Fig. 26b), i venti provenienti dal primo quadrante risultano meno frequenti (14% da NE e 12.5% da ENE), mentre decisamente più ricorrenti sono quelli provenienti dal mare (12% da W, 8% ciascuno da WNW e da NW), questi ultimi caratterizzati da intensità più elevate. Rispetto allo scenario del semestre freddo, si ha un netto aumento della velocità media complessiva (4.7 m/s) ed un'analogia riduzione della presenza di calme di vento (2.52%).

In Fig. 27 sono presentate le rose dei venti elaborate durante l'intero periodo di monitoraggio operato dalla stazione AIRQLab. In particolare, secondo quanto riportato in § 3.5, il semestre freddo è coperto all'incirca per 4 mesi (Fig. 27a), mentre quello caldo per 3 mesi e mezzo relativamente agli inquinanti gassosi (Fig. 27b), e per poco più di un mese per le polveri (Fig. 27d). In Fig. 27c è inoltre riportata la rosa dei venti relativa al mese di febbraio 2018, funzionale alle analisi relative ai picchi di concentrazione di SO₂.

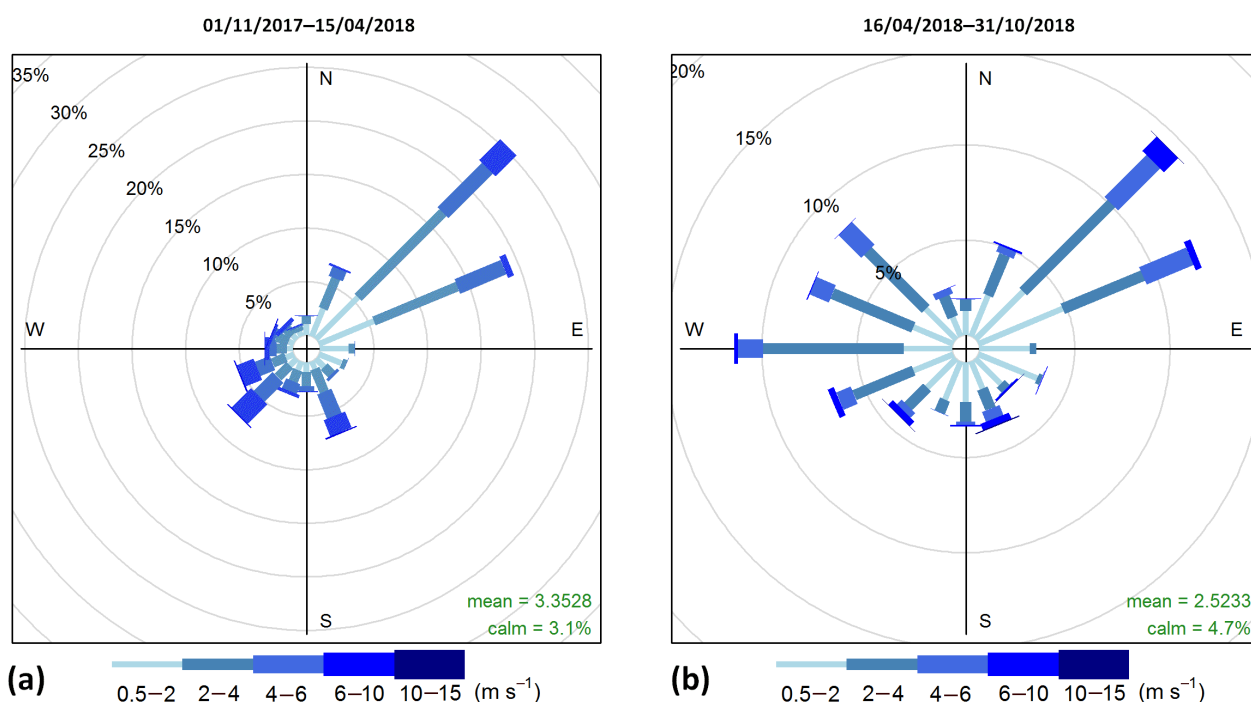


Fig. 26. Rose dei venti misurate dalla stazione meteo di Livorno della Rete Mareografica Nazionale, utilizzate per elaborare le mappe delle centraline AIRQino: (a) 01/11/2017–15/04/2018; (b) 16/04/2018–31/10/2018.

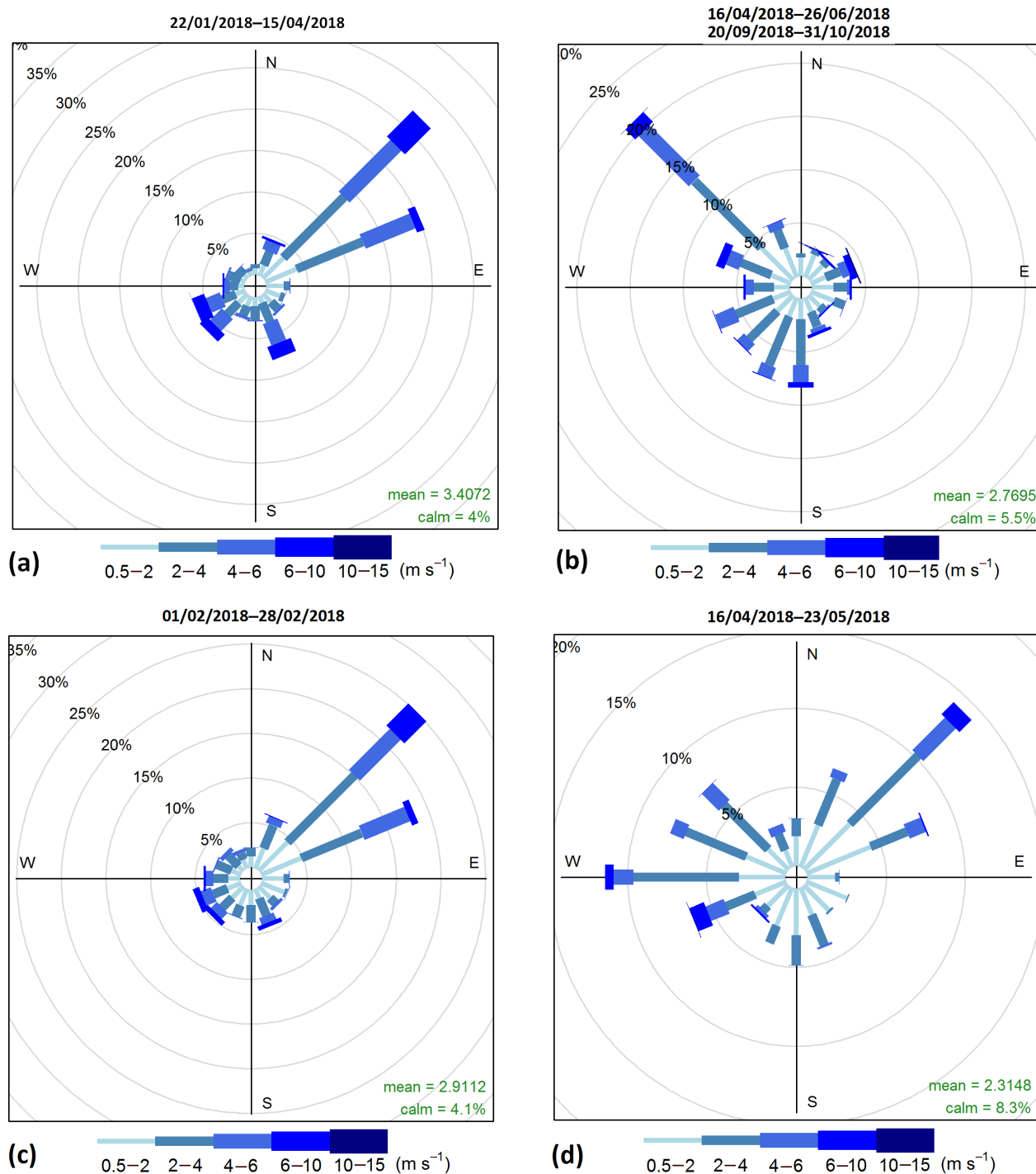


Fig. 27. Rose dei venti misurate dalla stazione meteo di Livorno della Rete Mareografica Nazionale, utilizzate per elaborare le mappe della stazione AIRQLab: (a) 22/01/2018–15/04/2018; (b) 16/04/2018–26/06/2018 & 20/09/2018–31/10/2018; (c) 01/02/2018–28/02/2018; (d) 16/04/2018–23/05/2018.

4.2 Mappe basate sulle stazioni AIRQino

I dati di vento utilizzati per realizzare le mappe basate sui dati delle centraline AIRQino sono quelli corrispondenti alle rose dei venti del semestre freddo (Fig. 26a) e del semestre caldo (Fig. 26b).

4.2.1 Concentrazioni di PM_{10}

In Fig. 28 è mostrata la mappa dei PolarPlot delle concentrazioni medie di PM_{10} misurate dalle 6 centraline AIRQino durante il semestre freddo, mentre in Fig. 29 è mostrata l'analoga mappa ottenuta durante il semestre caldo. I PolarPlot sono stati ottenuti incrociando i valori di concentrazione medi misurati nei vari periodi con i concomitanti valori di intensità e provenienza del vento.

Durante il semestre freddo (Fig. 28), in tutte le stazioni le concentrazioni associate ai venti più frequenti (quelli del primo quadrante, presenti in circa il 50% dei casi, Fig. 26a) risultano decisamente modeste. Nella zona più industriale dell'area portuale – quella a nord –, contributi emissivi significativi appaiono provenire da SW, e quindi dal mare: in particolare, le stazioni SMART 02, 06 e soprattutto 07 mostrano i livelli di concentrazione piuttosto rilevanti. Essendo tali livelli associati a venti abbastanza sostenuti (intensità superiore a 10 m/s, Fig. 26a), è presumibile che derivino da sorgenti poste ad una certa distanza dalle centraline: per le stazioni SMART 02 e 07 questo è presumibilmente riconducibile alle attività marittime nei canali della Darsena Toscana. Concentrazioni di PM_{10} molto basse si registrano nella zona della Fortezza Vecchia (SMART08): il traffico delle navi da crociera fornisce quindi in questo periodo un contributo non particolarmente significativo. Un massimo secondario di PM_{10} si rileva generalmente nel quadrante SE: i venti provenienti da questa direzione veicolano anch'essi apporti riconducibili a sorgenti poste ad una certa distanza dalle stazioni, presumibilmente dovuti alle emissioni antropogeniche (traffico stradale e riscaldamento) provenienti dal contesto urbano. La SMART11 si conferma un'ottima stazione di fondo urbano per misurare i livelli di PM_{10} dell'area portuale, in quanto le corrispondenti concentrazioni risultano modeste da qualunque direzione esse provengano.

Durante il semestre caldo (Fig. 29), un po' in tutte le stazioni risulta evidente la scomparsa del picco di concentrazione associato ai venti provenienti dal mare (SW), mentre permane quello associato a venti sostenuti di provenienza meridionale, presumibilmente riconducibili – in assenza di riscaldamento – al contributo emissivo del solo traffico stradale. Gli apporti emissivi della zona più industriale dell'area portuale (SMART 02 e 07), soprattutto quelli riconducibili alle attività marittime nei canali della Darsena Toscana (SMART06), risultano piuttosto contenuti. Rispetto al semestre freddo, nella zona della Fortezza Vecchia (SMART08) si registrano concentrazioni di PM_{10} associate al traffico delle navi da crociera (venti da SW) leggermente più elevate, presumibilmente dovute al numero maggiore di attracchi. In generale, confrontando gli andamenti dei PolarPlot con la corrispondente rosa dei venti (Fig. 26b), c'è da osservare che i valori di picco delle concentrazioni di PM_{10} siano piuttosto infrequenti (meno del 5% dei casi).

4.2.2 Rapporto delle concentrazioni $PM_{2.5}/PM_{10}$

Nelle Figg. 30 e 31 sono rappresentate le mappe dei PolarPlot relative al rapporto delle concentrazioni di $PM_{2.5}$ e PM_{10} per i due semestri, che risultano chiaramente collegate alle corrispondenti mappe dei PolarPlot delle concentrazioni di PM_{10} (Figg. 28 e 29).

Durante il semestre freddo (Fig. 30), in tutte le stazioni la frazione fine del PM_{10} associata a venti provenienti dall'entroterra (primo quadrante) risulta preponderante sul PM_{10} complessivo (valori di $PM_{2.5}/PM_{10}$ tendenti ad 1): considerando come tali venti siano anche i più frequenti (Fig. 26a), se ne conclude come questo scenario sia quello generalmente prevalente a Livorno. Fortunatamente, però, poiché le concentrazioni complessive di PM_{10} associate a venti da NE sono abbastanza modeste (Fig. 28), lo sono anche queste concentrazioni del più nocivo $PM_{2.5}$. Per contro, la presenza della componente fine nei picchi di concentrazione di PM_{10} registrati nelle

SMART 02 e 07 per i settori SSE e SW (Fig. 28) risulta non superiore al 30–40% del totale (Fig. 30): la meno nociva frazione grossolana del PM_{10} – presumibilmente riconducibile alle attività in Darsena – risulta quindi prevalente, fornendo un contributo notevole nei livelli di PM_{10} totali. Altri picchi del rapporto $PM_{2.5}/PM_{10}$ si registrano nella stazione posta in Fortezza Vecchia (SMART08), e soprattutto in quella all'interno della città (SMART11), in corrispondenza di venti elevati (intensità superiore a 10 m/s) provenienti da SW, e quindi dal mare: anche in questo caso, però, tali rapporti prossimi ad 1 sono associati a concentrazioni di PM_{10} abbastanza modeste (Fig. 28).

Durante il semestre caldo (Fig. 31), i picchi del rapporto $PM_{2.5}/PM_{10}$ tendono a ridursi di intensità e a distribuirsi più uniformemente, risentendo quindi meno delle particolari direzioni di provenienza dei venti. In questo caso, i massimi relativi sono associati a venti generalmente provenienti dal secondo quadrante (NW), sia di modesta che di rilevante intensità: pertanto, tali massimi di concentrazione del $PM_{2.5}$ sono riconducibili sia a sorgenti vicine alle centraline, che poste ad una certa distanza. Anche in questo periodo, i valori del rapporto $PM_{2.5}/PM_{10}$ associati alle concentrazioni di PM_{10} più elevate provenienti da SSE risultano fortunatamente contenuti, soprattutto nelle centraline dove le concentrazioni totali sono maggiori (SMART 02, 07, 08 e 13, Fig. 29). Anche in questo caso, quindi, in tali picchi di PM_{10} (venti da SSE) la meno nociva frazione grossolana risulta prevalente, con l'eccezione delle concentrazioni nella SMART02, dove in realtà la frazione fine – presumibilmente da ricondurre alle sorgenti da traffico stradale – sembra pareggiare quella grossolana (rapporto $PM_{2.5}/PM_{10}$ di circa 0.5). Per quanto riguarda la zona della Fortezza Vecchia (SMART08), la frazione di $PM_{2.5}$ presente nelle concentrazioni di PM_{10} veicolate da venti provenienti da SW, e quindi associate al traffico delle navi da crociera, risulta dell'ordine del 50% sul totale.

4.2.3 Concentrazioni di NO_2

Le mappa dei PolarPlot delle concentrazioni medie di NO_2 mostrano scenari significativamente diversi tra i due periodi di campionamento.

Nel semestre freddo (Fig. 32), in tutte le stazioni i massimi di concentrazione sono associati a venti molto bassi (al di sotto di 2 m/s), che quindi suggeriscono contributi provenienti da sorgenti molto vicine alle centraline: nella zona industriale del porto è presumibile che si tratti di macchinari industriali o mezzi pesanti, quindi con motori alimentati a gasolio. Livelli elevati di concentrazione riconducibili a sorgenti un po' più distanti (associati a venti d'intensità compresa tra 3 e 5 m/s) si registrano in SMART02 – emissioni provenienti da W –, e nella stazione presso la Fortezza Vecchia (SMART08) – emissioni provenienti da NW.

Lo scenario cambia radicalmente durante il semestre caldo (Fig. 33). Mentre nel periodo freddo il comportamento dell' NO_2 sembra ricalcare quello di un inquinante inerte (sorgente vicina ben localizzata e modesta dispersione spaziale, Fig. 32), in quello caldo appare palese la partecipazione dell' NO_2 alle attività fotochimiche pilotate dalla radiazione solare, con picchi di concentrazione non soltanto ben localizzati, ma anche più uniformemente distribuiti ed associati a sorgenti poste ad una certa distanza (Fig. 33). Livelli di NO_2 distribuiti abbastanza uniformemente e generalmente elevati si registrano all'interno della città (SMART 11 e 13), mentre nella zona industriale del porto i livelli sono apprezzabili presso SMART02, riducendosi presso SMART 07 e 06. Di particolare rilievo sono i massimi di concentrazione di NO_2 registrati nella zona della Fortezza Vecchia (SMART08) associati a venti provenienti da NW e SW: in questo caso, il contributo emissivo del traffico delle navi da crociera – più intenso rispetto a quello del semestre freddo – risulta quindi significativo, determinando concentrazioni di NO_2 fino a 40–50 $\mu g/m^3$.

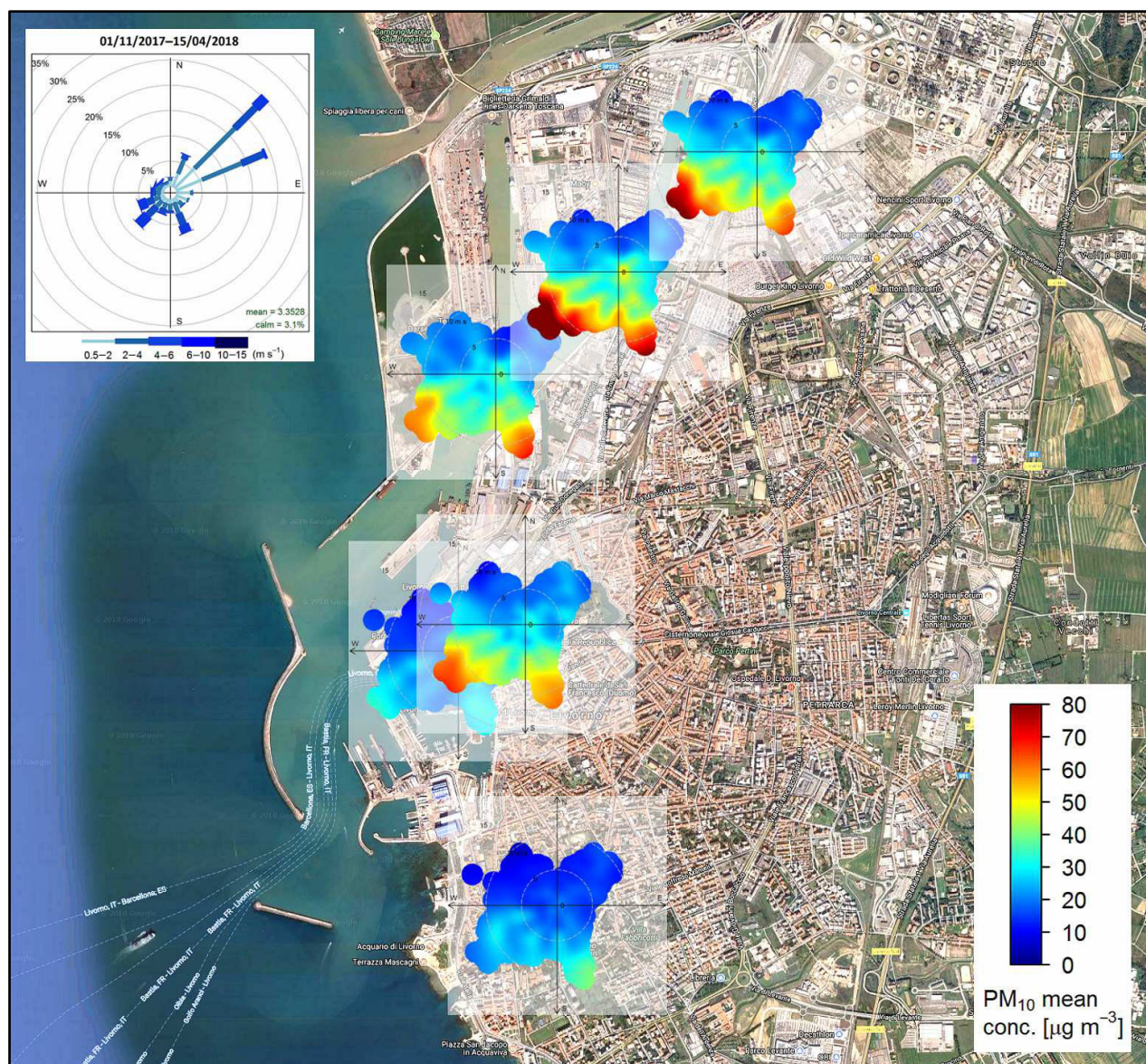


Fig. 28. Mappa dei PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di PM₁₀ misurate dalle centraline AIRQino a Livorno (01/11/2017–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

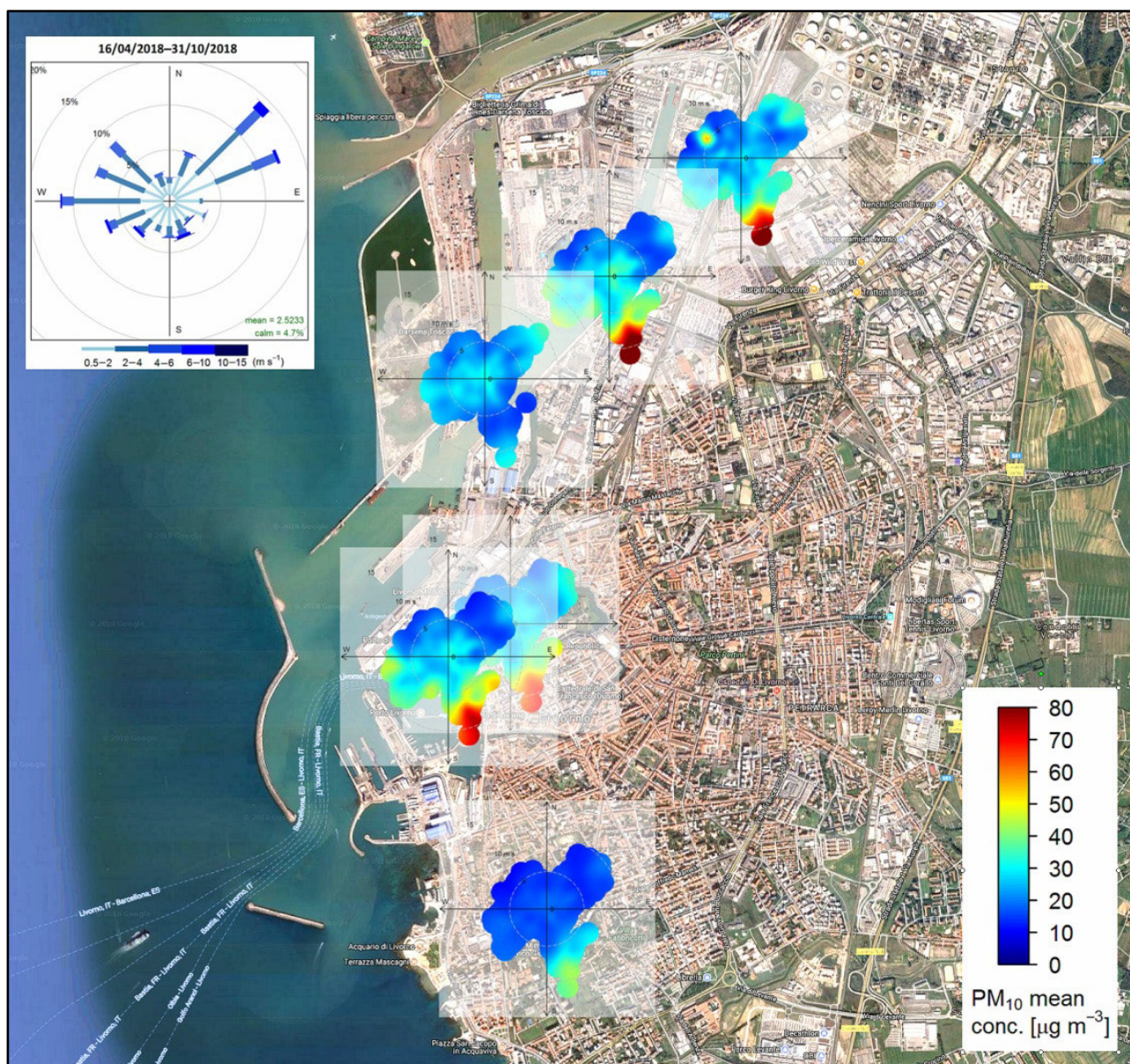


Fig. 29. Mappa dei PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di PM₁₀ misurate dalle centraline AIRQino a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

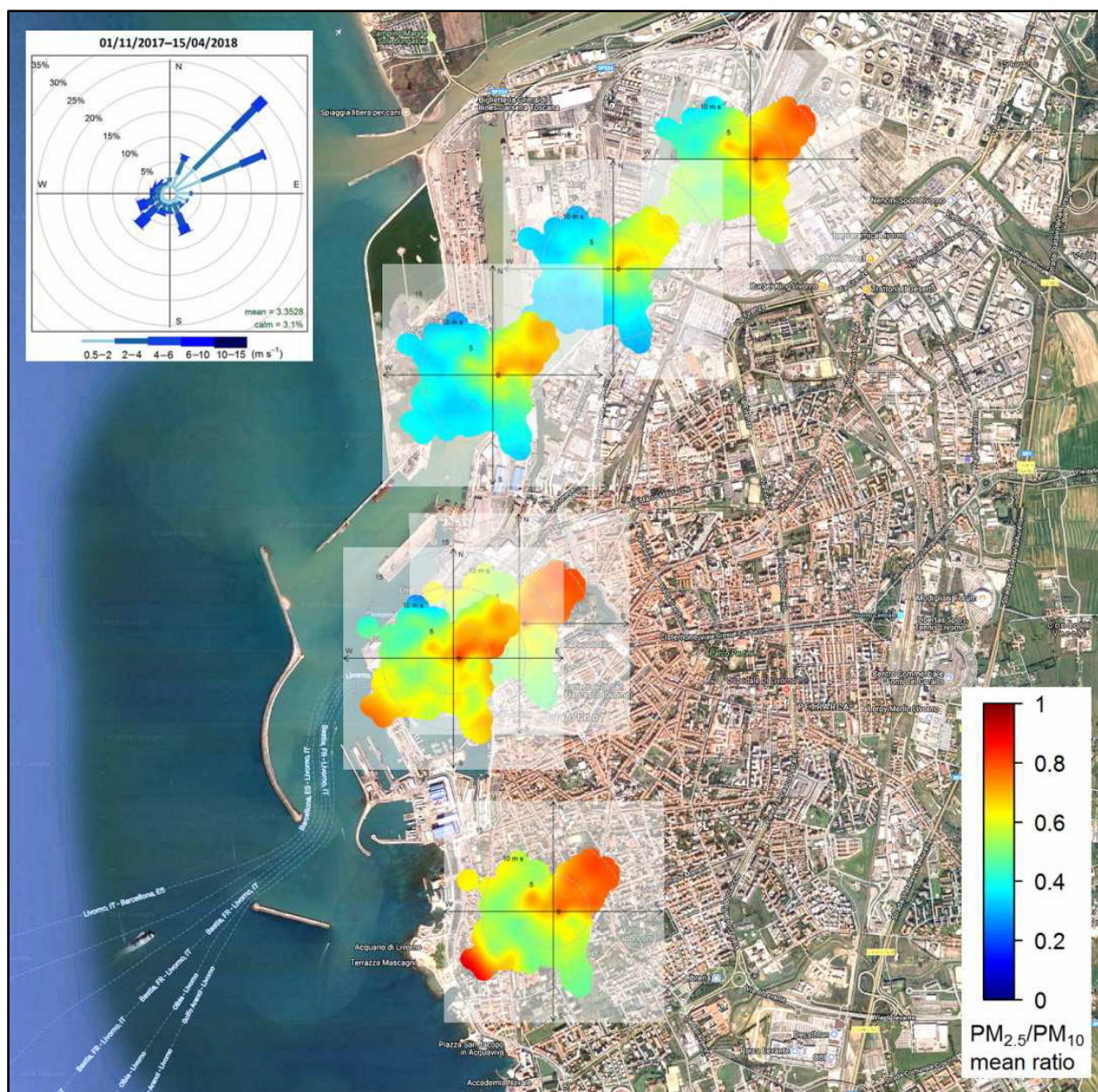


Fig. 30. Mappa dei PolarPlot del rapporto $PM_{2.5}/PM_{10}$ delle concentrazioni medie a 10 minuti misurate dalle centraline AIRQino a Livorno (01/11/2017–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

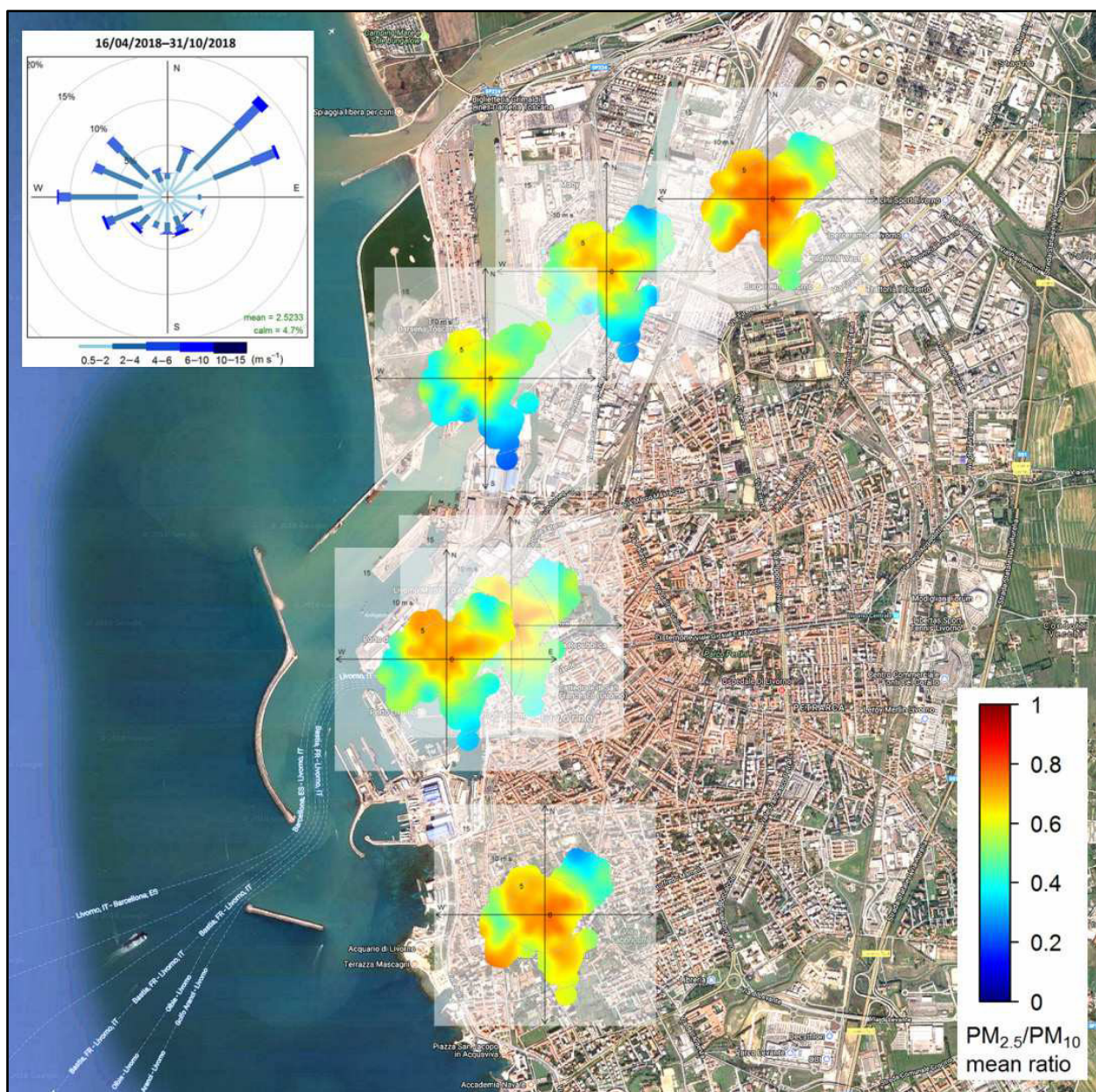


Fig. 31. Mappa dei PolarPlot del rapporto $PM_{2.5}/PM_{10}$ delle concentrazioni medie a 10 minuti misurate dalle centraline AIRQino a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

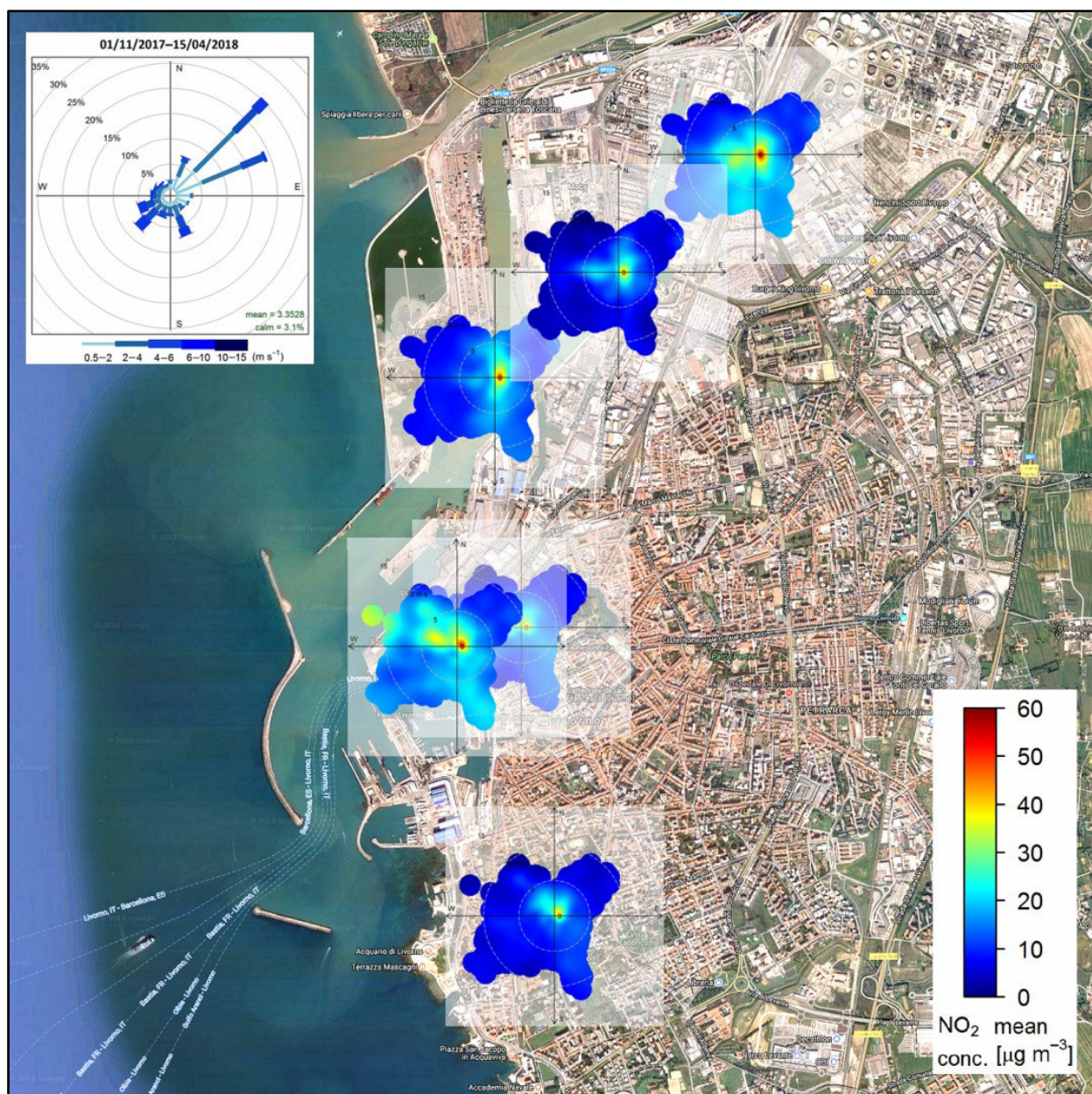


Fig. 32. Mappa dei PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di NO₂ misurate dalle centraline AIRQino a Livorno (01/11/2017–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

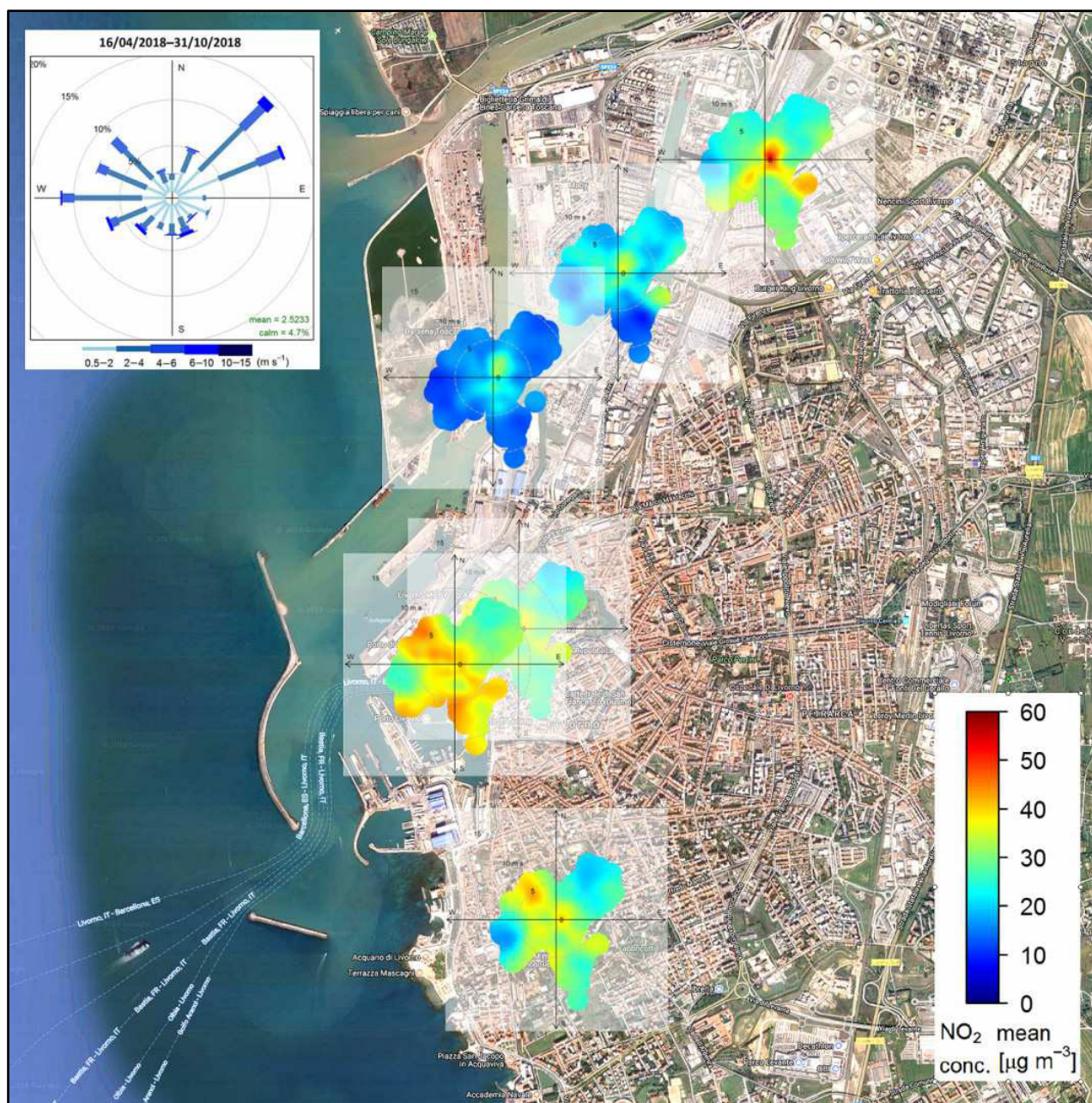


Fig. 33. Mappa dei PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di NO₂ misurate dalle centraline AIRQino a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

4.3 Mappe basate sulla stazione AIRQLab

Come già evidenziato in § 4.1, i dati di vento utilizzati per realizzare le mappe basate sui dati della stazione AIRQLab sono quelli corrispondenti alla rosa dei venti presentata in Fig. 27a nel semestre freddo, e alle rose dei venti rappresentate in Fig. 27b (inquinanti gassosi) e Fig. 27d (polveri) nel semestre caldo. Per la specifica analisi degli andamenti delle concentrazioni di SO₂, i dati di vento utilizzati sono quelli corrispondenti alla rosa dei venti del mese di febbraio 2018 (Fig. 27c).

4.3.1 Concentrazioni di NO_x

La mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie di NO_x misurate dalla stazione AIRQLab nel periodo freddo (Fig. 34) mostra chiaramente un picco associato a venti moderati (3–6 m/s) provenienti da W-WNW, riconducibili ad emissioni da sorgenti non molto distanti dalla stazione, probabilmente ascrivibili alle attività nel vicino canale della Darsena. Per contro, nel periodo caldo i livelli di NO_x si riducono drasticamente un po' per tutti i settori di provenienza del vento (Fig. 35), mostrando in particolare apporti emissivi trascurabili anche dalle attività nel canale della Darsena. Leggermente più elevati, invece, risultano i contributi emissivi da SE, presumibilmente riconducibili al traffico stradale proveniente dalla città.

La mappa del PercentilePlot, che incrocia valori di concentrazione, percentili e direzioni di provenienza del vento, conferma come nel periodo freddo picchi di notevole entità (concentrazioni superiori a 150 µg/m³) siano associati a venti provenienti da WNW (Fig. 36). Nel periodo caldo, picchi che sfiorano i 200 µg/m³ sono associati a venti provenienti da SSW (Fig. 37).

La mappa del PolarAnnulus, che incrocia valori di concentrazione, ore della giornata e direzioni di provenienza del vento, fornisce ulteriori informazioni sulla presumibili cause dei livelli di concentrazione. Nel periodo freddo (Fig. 38) è possibile individuare chiaramente due fasce circolari di picchi di concentrazione, associate soprattutto a venti provenienti dal secondo quadrante e, in misura minore, da E-SE: in entrambi i casi, tali picchi ricorrono nella fascia mattutina (h. 08-10) e in quella pomeridiana (h. 15-17). Tale mappa sembra quindi confermare come i massimi di concentrazione di NO_x siano riconducibili alle attività nel vicino canale della Darsena. Nel periodo caldo (Fig. 39), picchi di entità minore rispetto al periodo freddo si registrano da E-NE e da SE, risultando in entrambi i casi associati ad attività condotte nel canale della Darsena durante le ore lavorative della prima mattina e delle ore centrali del pomeriggio.

4.3.2 Concentrazioni di PM₁₀

La mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie di PM₁₀ misurate dalla stazione AIRQLab mostra nel periodo freddo (Fig. 40) livelli decisamente più contenuti rispetto a quelli registrati dalle centraline AIRQino (Fig. 28). I picchi di concentrazione sono palesemente associati a venti provenienti da SE, e quindi dall'entroterra urbanizzato (Fig. 42), temporalmente localizzate nelle primissime ore del mattino e nella tarda serata (Fig. 44): è quindi maggiormente plausibile che la loro origine sia il riscaldamento domestico piuttosto che sorgenti tipicamente diurne come il traffico stradale o le varie attività all'interno dell'area portuale.

Nel periodo caldo, coincidente con un unico mese (primaverile) di monitoraggio, le concentrazioni medie di PM₁₀ rappresentate attraverso la mappa del PolarPlot risultano nettamente più basse, con sorgenti emissive significative difficilmente individuabili (Fig. 41). La mappa del PercentilePlot, per contro, consente invece di individuare un notevole picco di concentrazione (quasi 150 µg/m³) veicolato da venti provenienti da NNE (Fig. 43), per i quali non si esclude l'origine dal vicino traffico ferroviario. Quanto alla collocazione temporale dei massimi di concentrazione (Fig. 44), le primissime ore del mattino e la tarda serata risultano ancora le fasce temporali in cui si registrano i contributi maggiori provenienti dall'entroterra urbanizzato posto a SE della stazione.

4.3.3 Rapporto delle concentrazioni $PM_{2.5}/PM_{10}$

Rispetto al corrispondente andamento registrato dalle centraline AIRQino (Figg. 30 e 31), le mappe del PolarPlot del rapporto delle concentrazioni di $PM_{2.5}$ e PM_{10} misurato dalla stazione AIRQLab mostrano valori decisamente più alti, sia nel periodo freddo (Fig. 46), che in quello primaverile (Fig. 47).

Nel periodo freddo (Fig. 46) la frazione fine risulta largamente prevalente (rapporti $PM_{2.5}/PM_{10}$ prossimi ad 1) soprattutto per i contributi dall'entroterra industrializzato (NE) e da quello urbanizzato (SE), mentre una certa riduzione si ha per le concentrazioni di PM_{10} veicolate da venti provenienti da W, associate quindi ad emissioni provenienti dall'area portuale in cui la frazione grossolana fornisce un contributo significativo.

Nel periodo primaverile (Fig. 47) le concentrazioni di $PM_{2.5}$ risultano ancora prevalenti nel computo del PM_{10} complessivo, sebbene con una certa riduzione per quanto riguarda il contributo dalla città (SE), presumibilmente dovuto all'assenza dell'apporto emissivo addizionale del riscaldamento domestico.

4.3.4 Concentrazioni di SO_2

L'analisi delle concentrazioni medie di SO_2 basata sulla mappa del PolarPlot dei valori misurati dalla stazione AIRQLab evidenzia chiaramente, nel periodo freddo (Fig. 48), un picco associato a venti sostenuti (6-7 m/s) provenienti da NE, e quindi riconducibili a sorgenti presumibilmente elevate poste ad una certa distanza sopravvento rispetto alla stazione. Tale conclusione è confermata sia dal corrispondente PercentilePlot (Fig. 50), che dal corrispondente PolarFreq (Fig. 52), che mostrano chiaramente la provenienza NE dell'emissione associata a tale picco.

Analizzando con maggiore dettaglio l'andamento delle serie storiche delle concentrazioni medie orarie riportate in Fig. 19 ed isolando quelle relative all' SO_2 (Fig. 54), si evidenzia chiaramente un picco anomalo di concentrazione rilevato esattamente il giorno 26/02/2018 alle h. 09:00. A questo scopo è stato quindi ristretto il campo temporale di investigazione all'intero mese di febbraio 2018, caratterizzato peraltro da altri picchi secondari di concentrazione (Fig. 54). Relativamente a questo arco temporale, quindi, sono state elaborate delle ulteriori mappe di concentrazione, utilizzando i dati di vento corrispondenti alla rosa riportata in Fig. 27c.

La mappa del PolarPlot di febbraio 2018 (Fig. 55) consente chiaramente di attribuire la provenienza del picco di concentrazione in esame al settore NE, cosa che la mappa del PercentilePlot (Fig. 56) evidenzia in maniera ancora più inequivocabile, mentre dalla mappa del PolarAnnulus (Fig. 57) si ha l'effettiva conferma della collocazione temporale (h. 09:00). Se ne conclude che tale picco anomalo di concentrazione di SO_2 possa essere attribuito ad emissioni provenienti dai camini elevati posti a NE della stazione, come evidenziato nel riquadro di Fig. 58.

L'analisi del PolarPlot (Fig. 36) evidenzia inoltre un massimo secondario di concentrazione associato a venti ancora sostenuti (4-5 m/s) provenienti da WSW, come confermato dal PercentilePlot (Fig. 56). Si tratta quindi di contributi emissivi rilasciati da sorgenti poste ad una certa distanza dalla stazione, più strettamente riconducibili alle attività lavorative diurne all'interno dell'area portuale, presumibilmente nei canali della Darsena, come chiaramente evidenziato dal PolarAnnulus (Fig. 57).

Nel periodo freddo lo scenario appare completamente diverso, con massimi delle concentrazioni medie molto più bassi e allo stesso tempo associati a venti sostenuti (6-10 m/s) provenienti da NW e da SW (Fig. 49). Le attività nel canale della Darsena determinano presumibilmente dei picchi di concentrazione di SO_2 fino a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Fig. 51), con contributi emissivi particolarmente significativi per quanto riguarda i venti del secondo quadrante (Fig. 53).

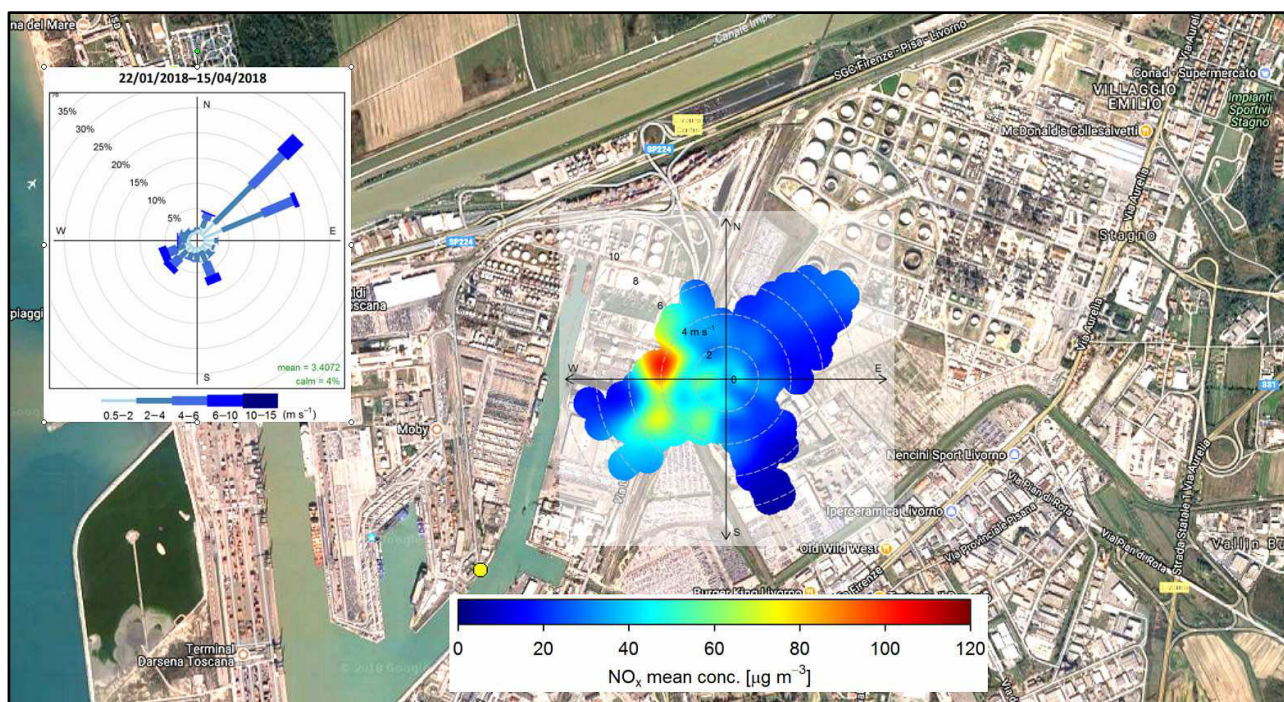


Fig. 34. Mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di NO_x misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

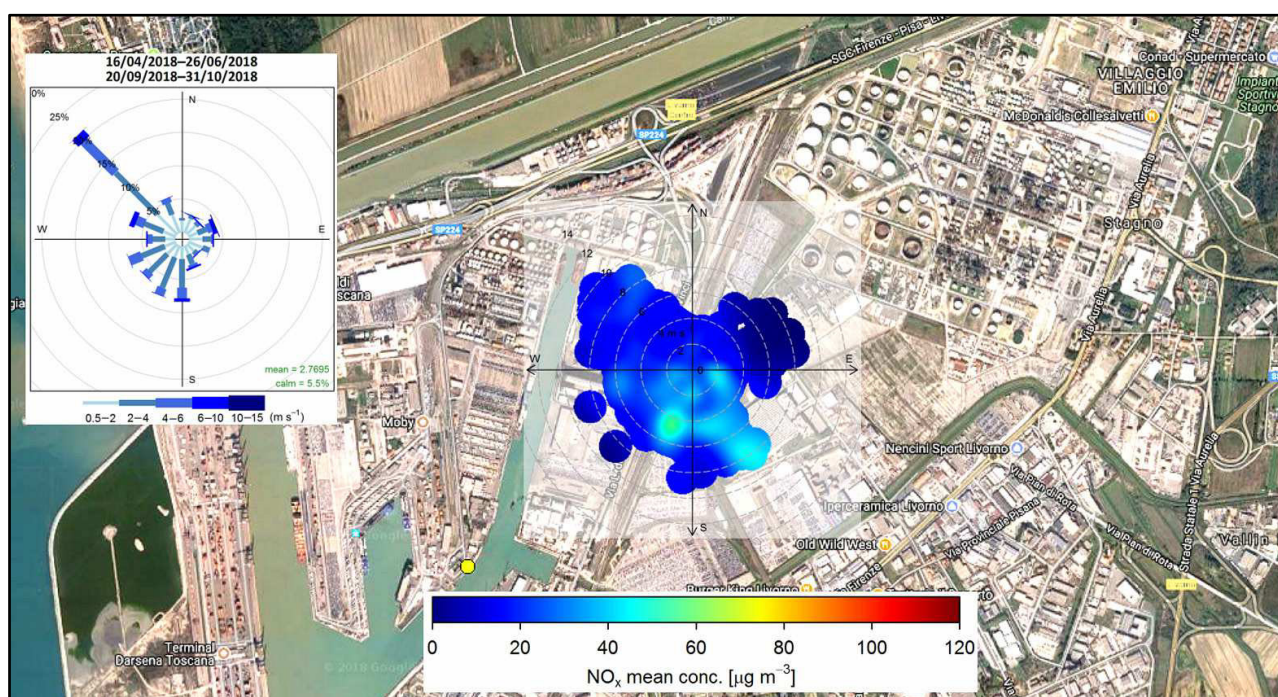


Fig. 35. Mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di NO_x misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

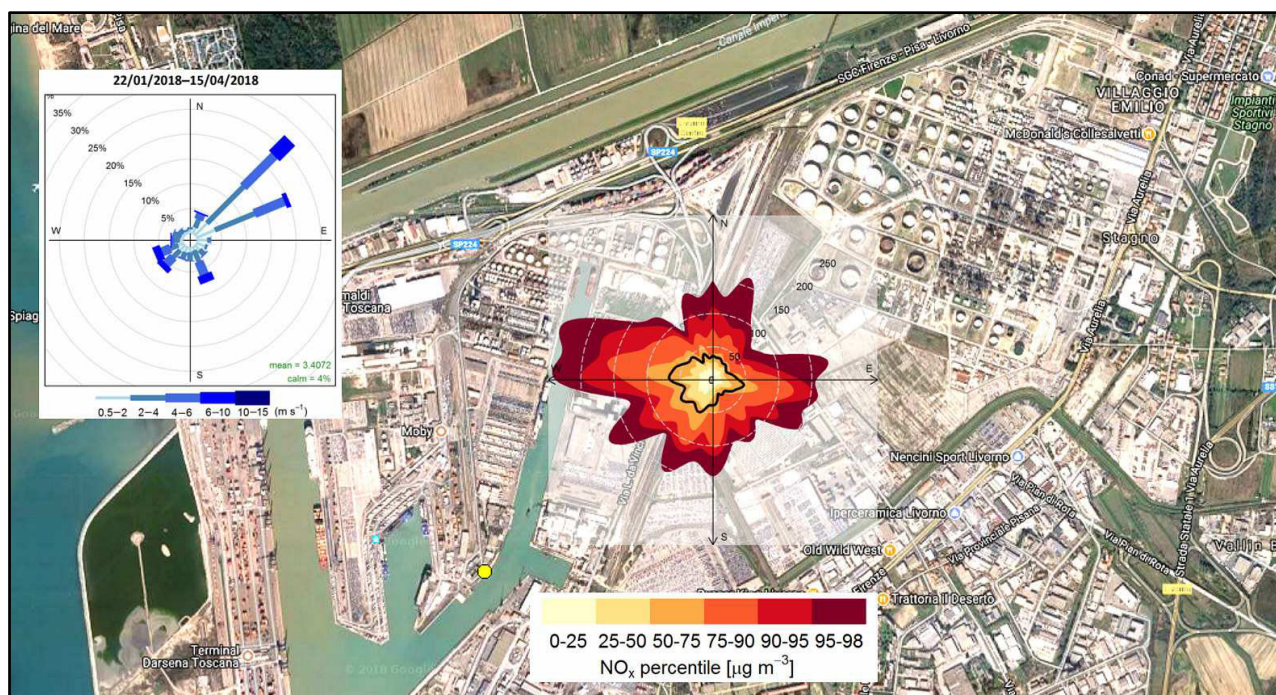


Fig. 36. Mappa del PercentilePlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di NO_x misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

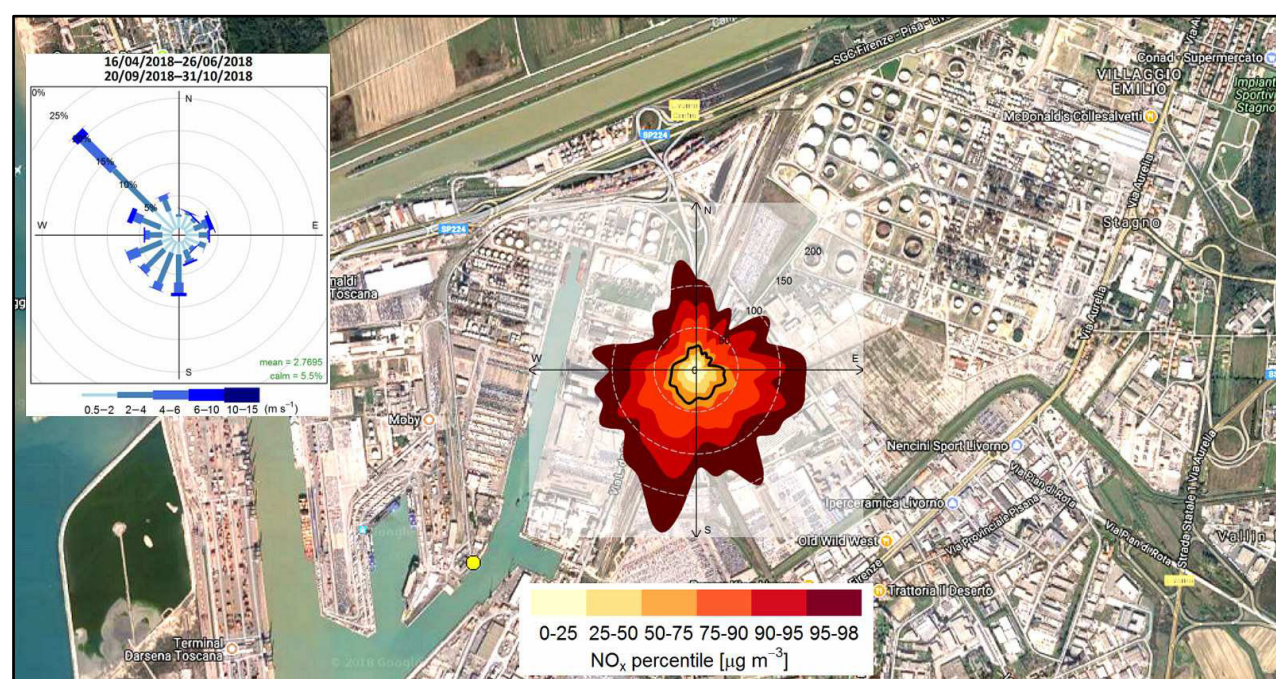


Fig. 37. Mappa del PercentilePlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di NO_x misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

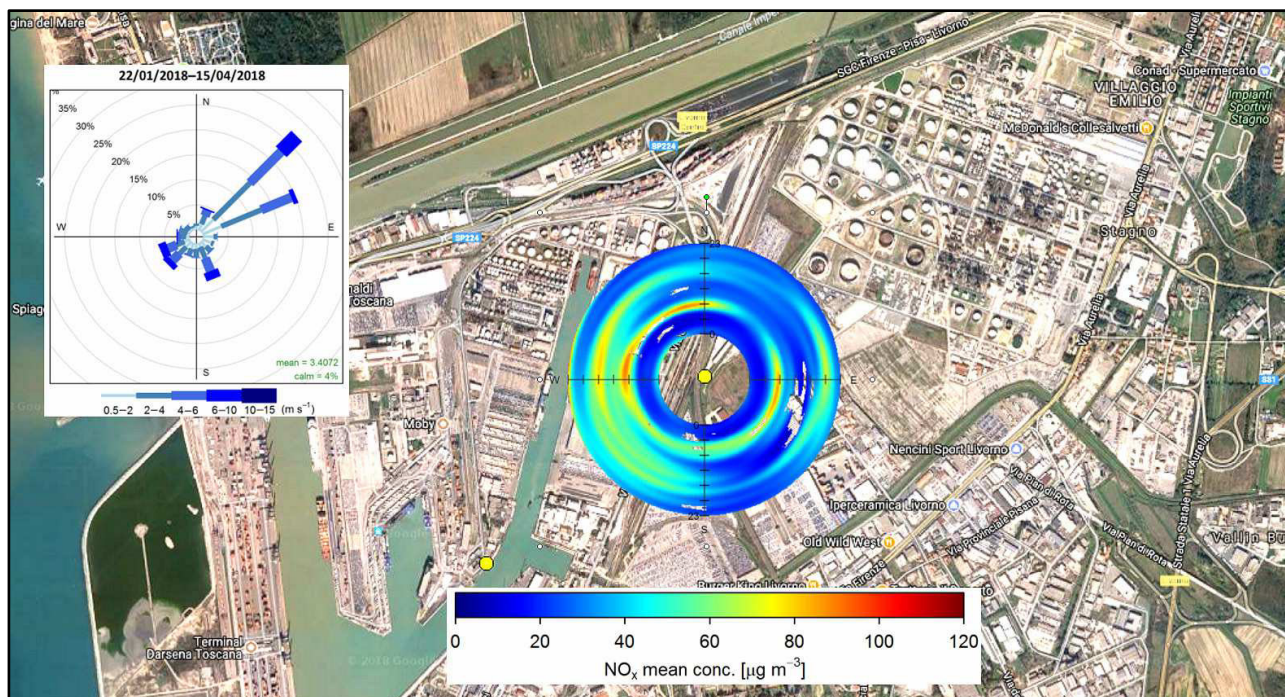


Fig. 38. Mappa del PolarAnnulus delle concentrazioni medie a 10 minuti di NO_x misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

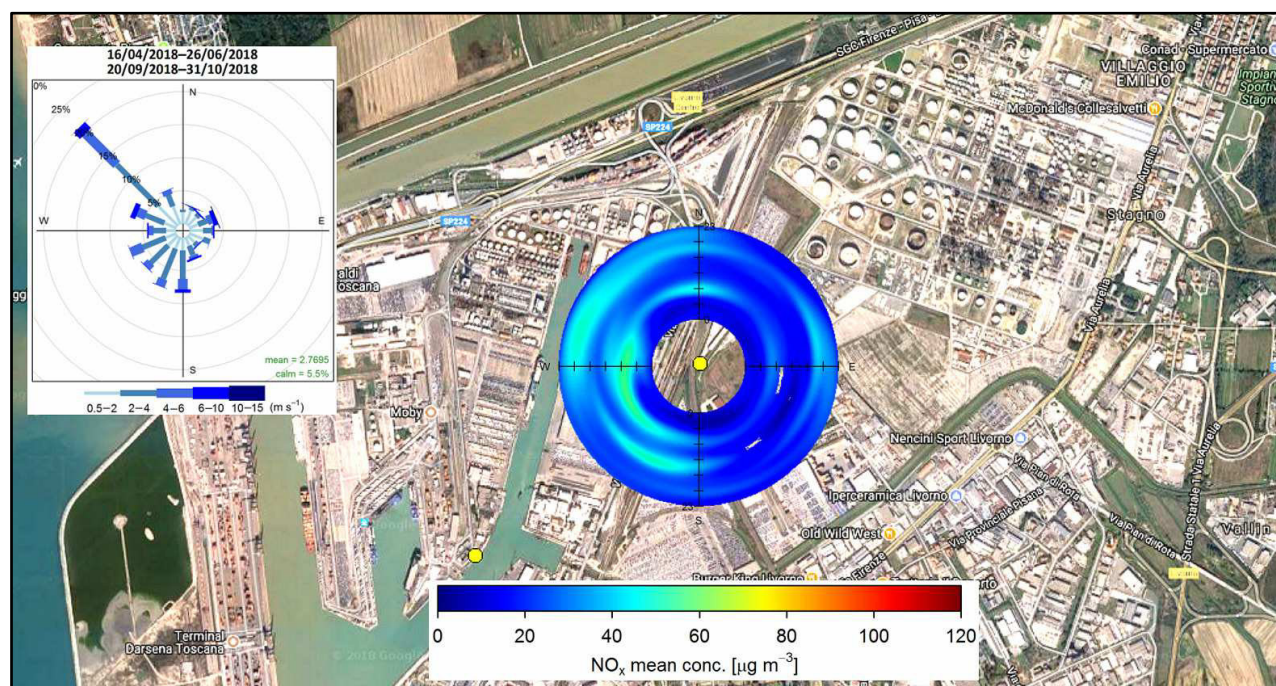


Fig. 39. Mappa del PolarAnnulus delle concentrazioni medie a 10 minuti di NO_x misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

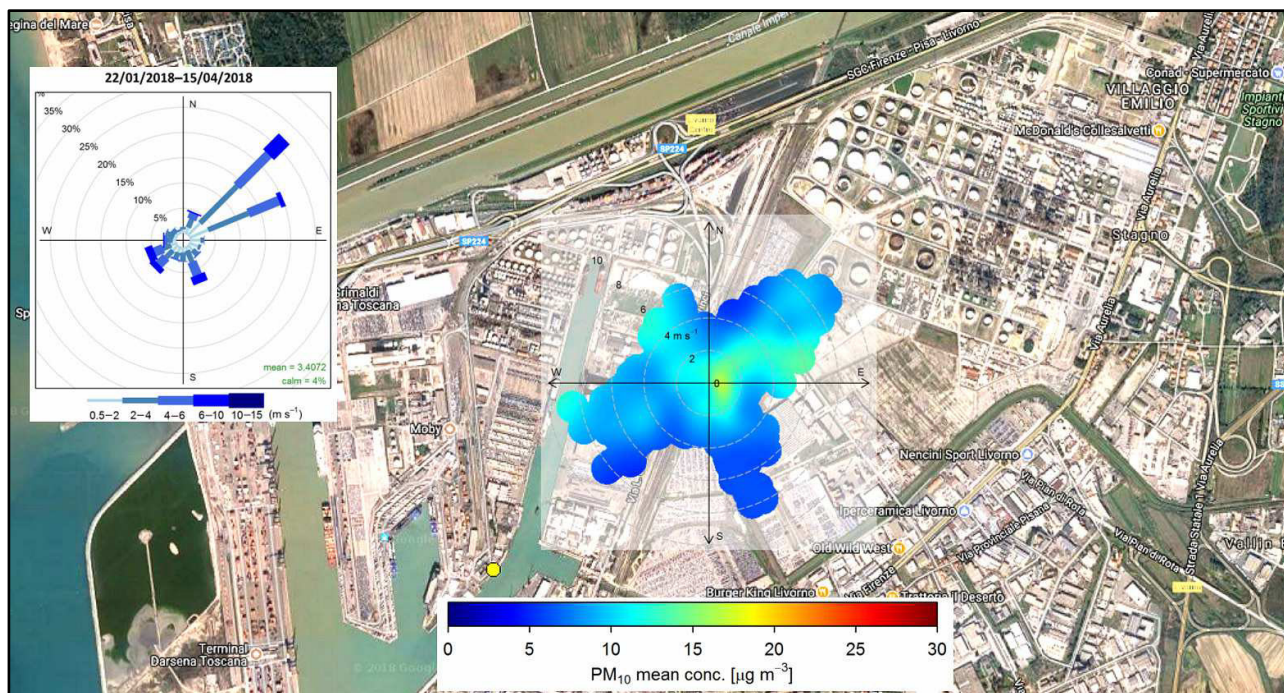


Fig. 40. Mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di PM₁₀ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

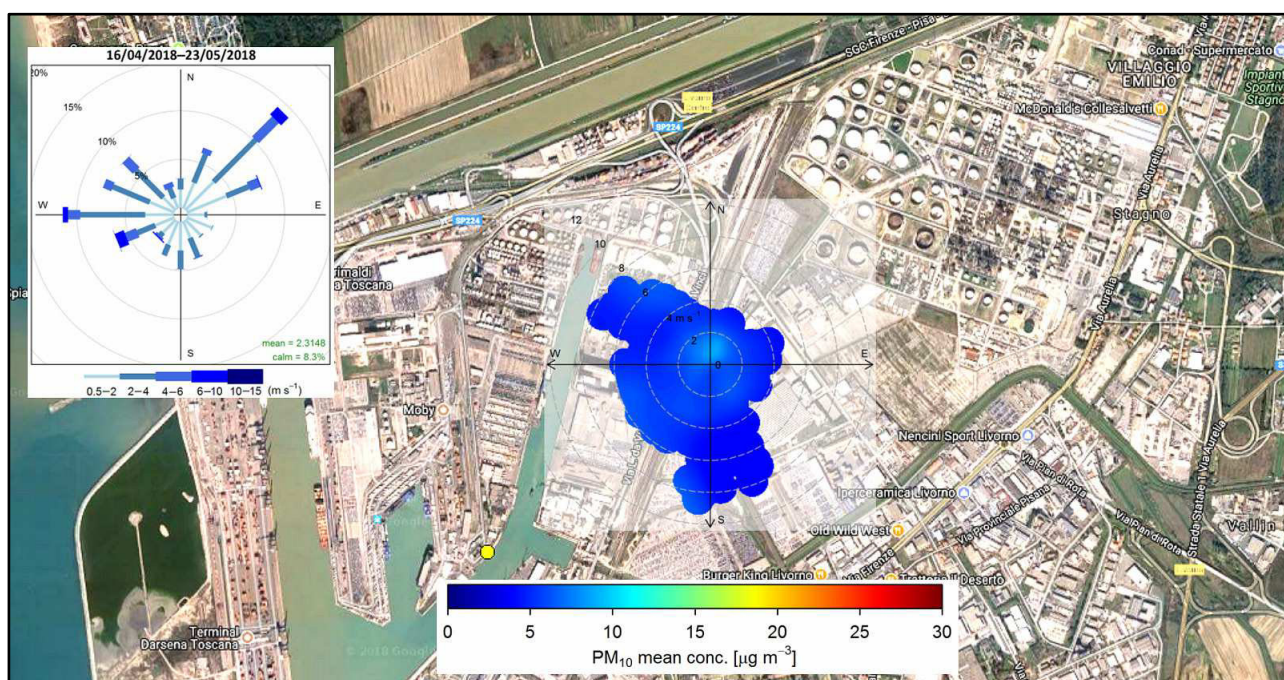


Fig. 41. Mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di PM₁₀ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–23/05/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

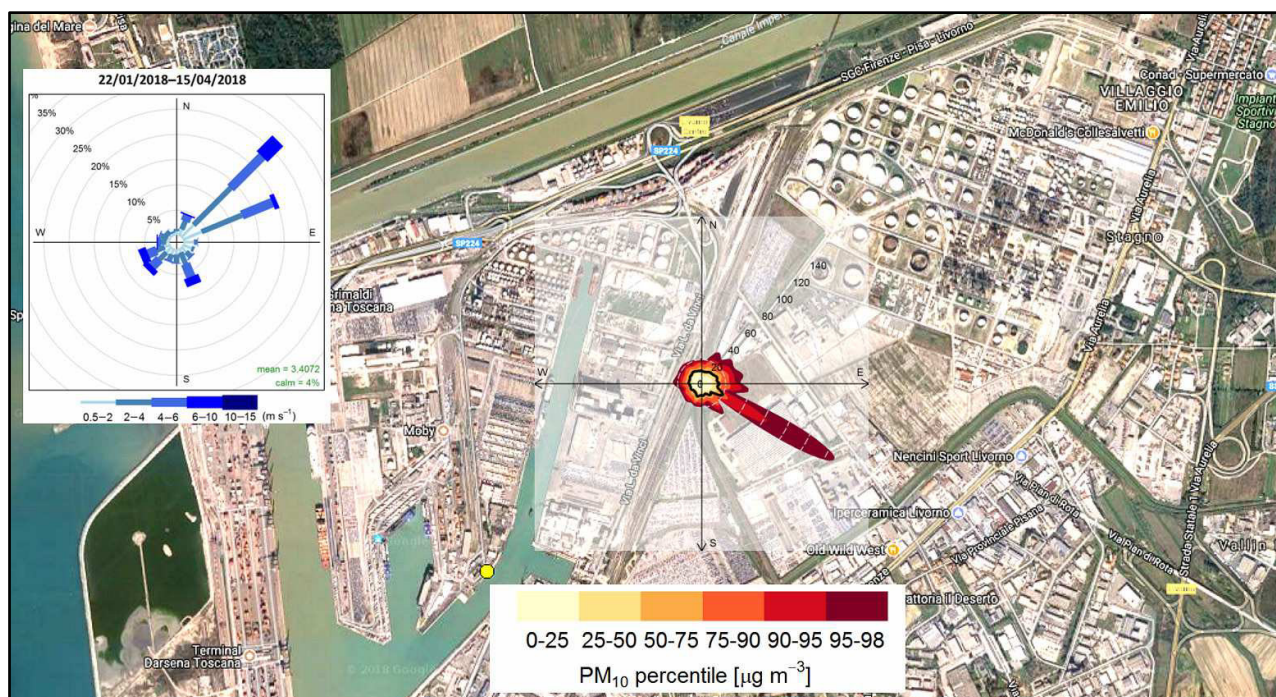


Fig. 42. Mappa del PercentilePlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di PM₁₀ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

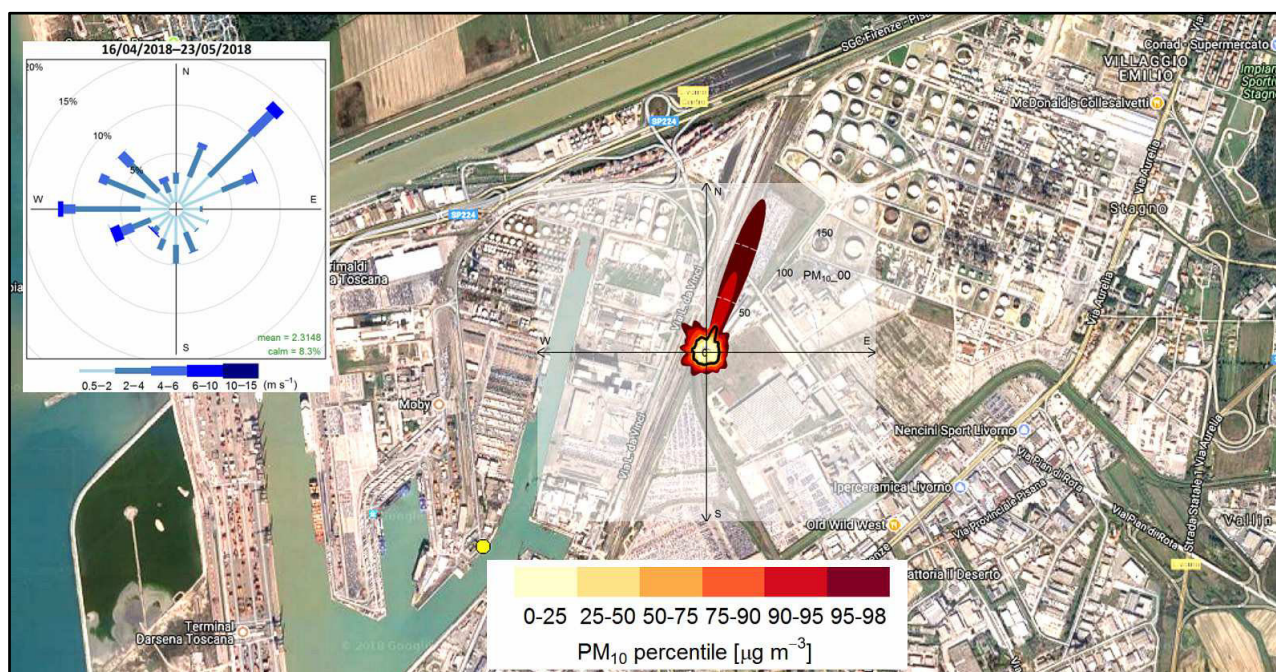


Fig. 43. Mappa del PercentilePlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di PM₁₀ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–23/05/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

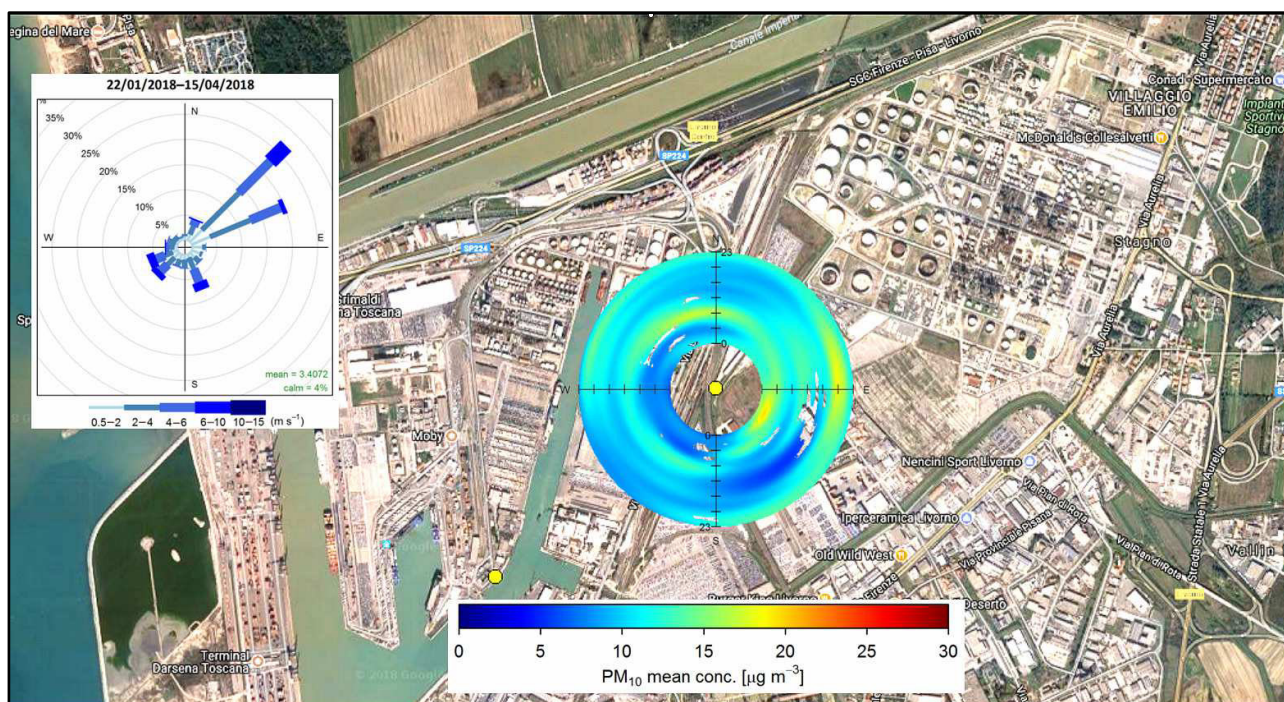


Fig. 44. Mappa del PolarAnnulus delle concentrazioni medie a 10 minuti di PM₁₀ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

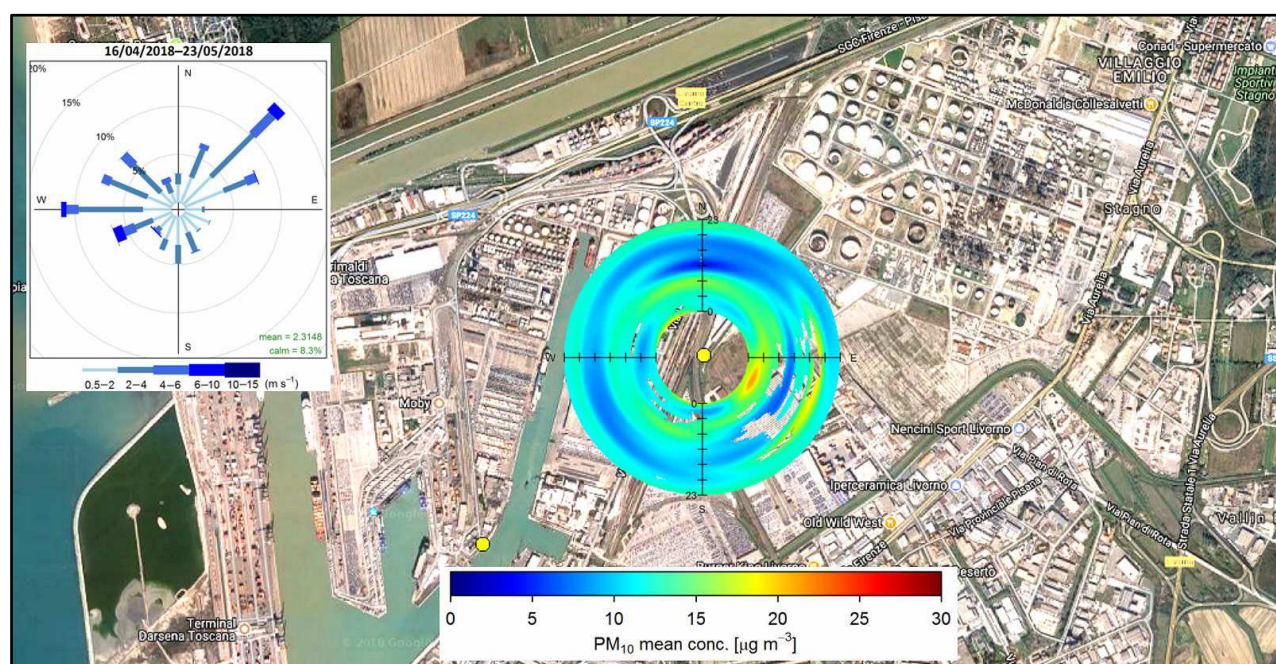


Fig. 45. Mappa del PolarAnnulus delle concentrazioni medie a 10 minuti di PM₁₀ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–23/05/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

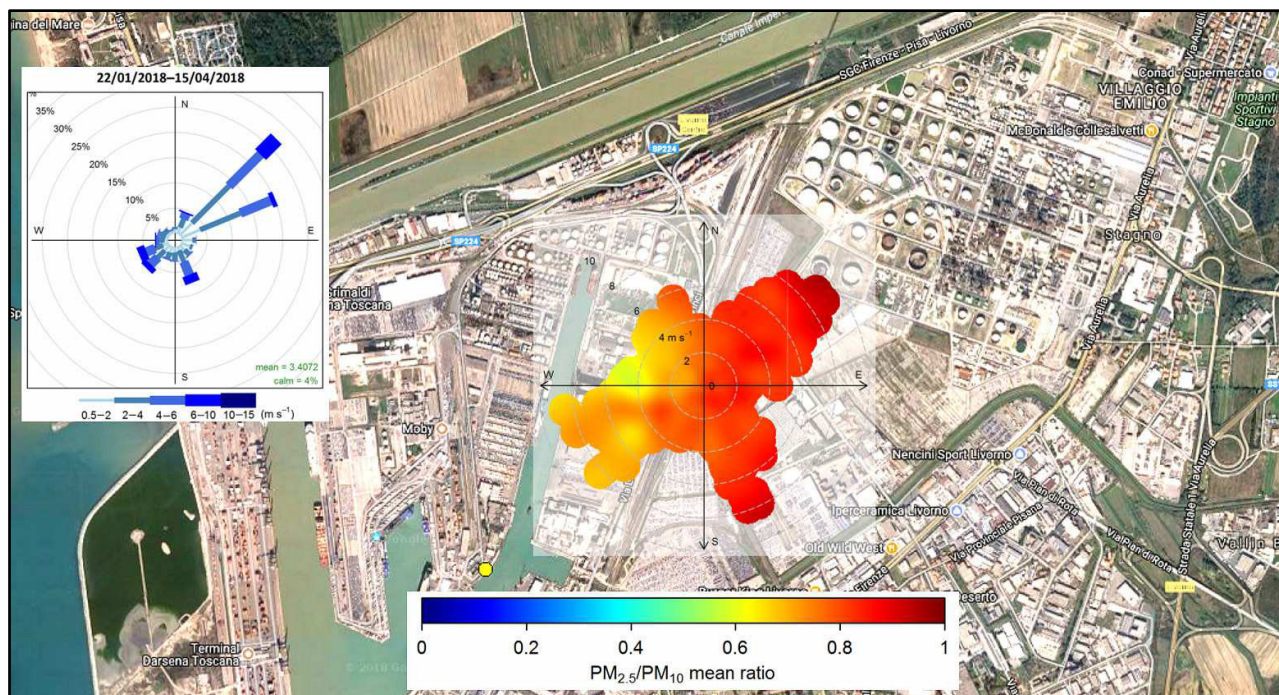


Fig. 46. Mappa del PolarPlot del rapporto $PM_{2.5}/PM_{10}$ delle concentrazioni medie a 10 minuti misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

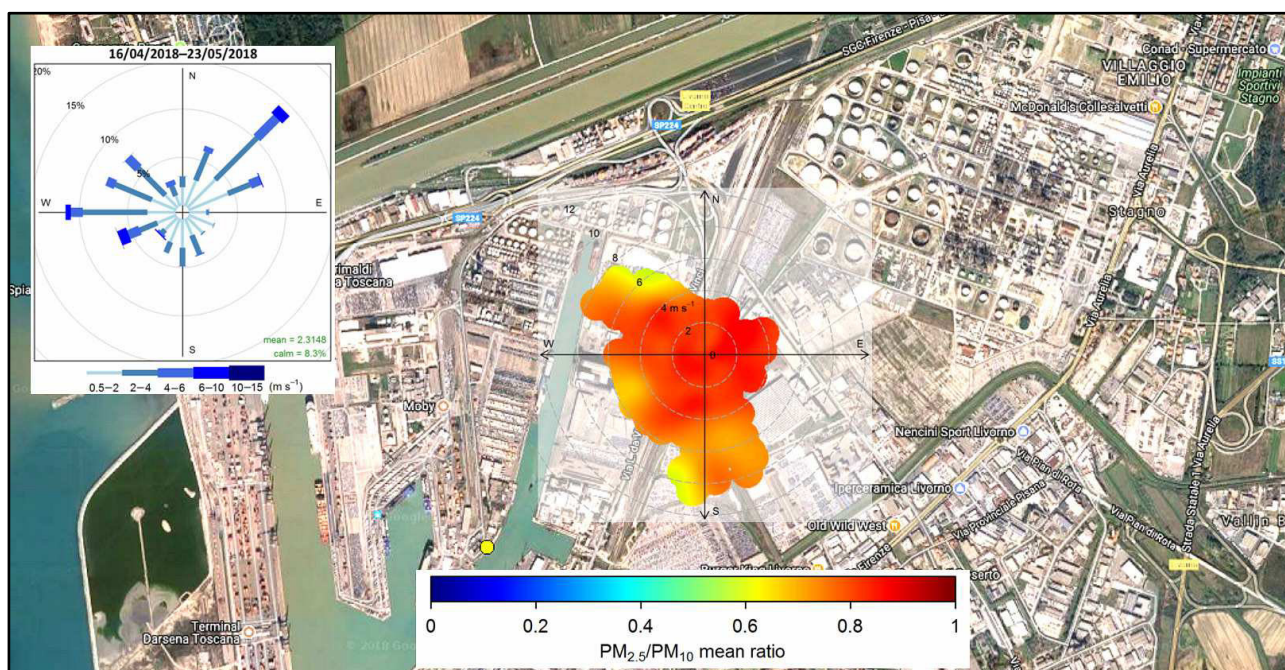


Fig. 47. Mappa del PolarPlot del rapporto $PM_{2.5}/PM_{10}$ delle concentrazioni medie a 10 minuti misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–23/05/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

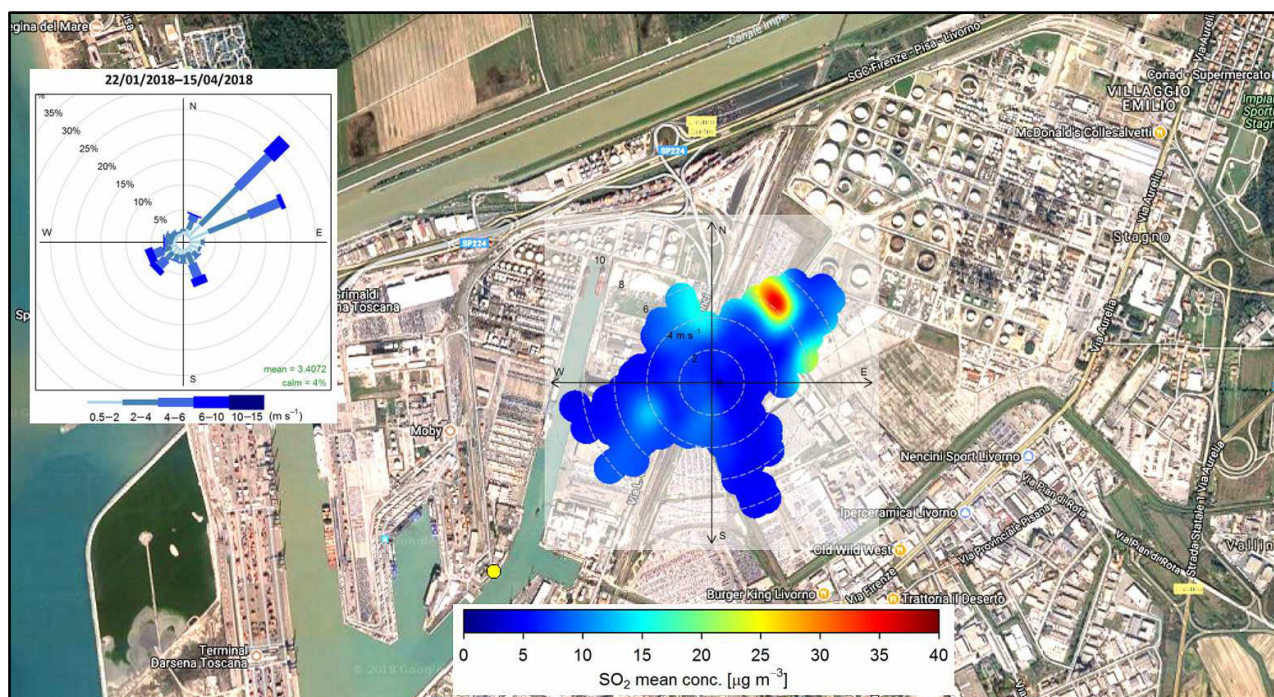


Fig. 48. Mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

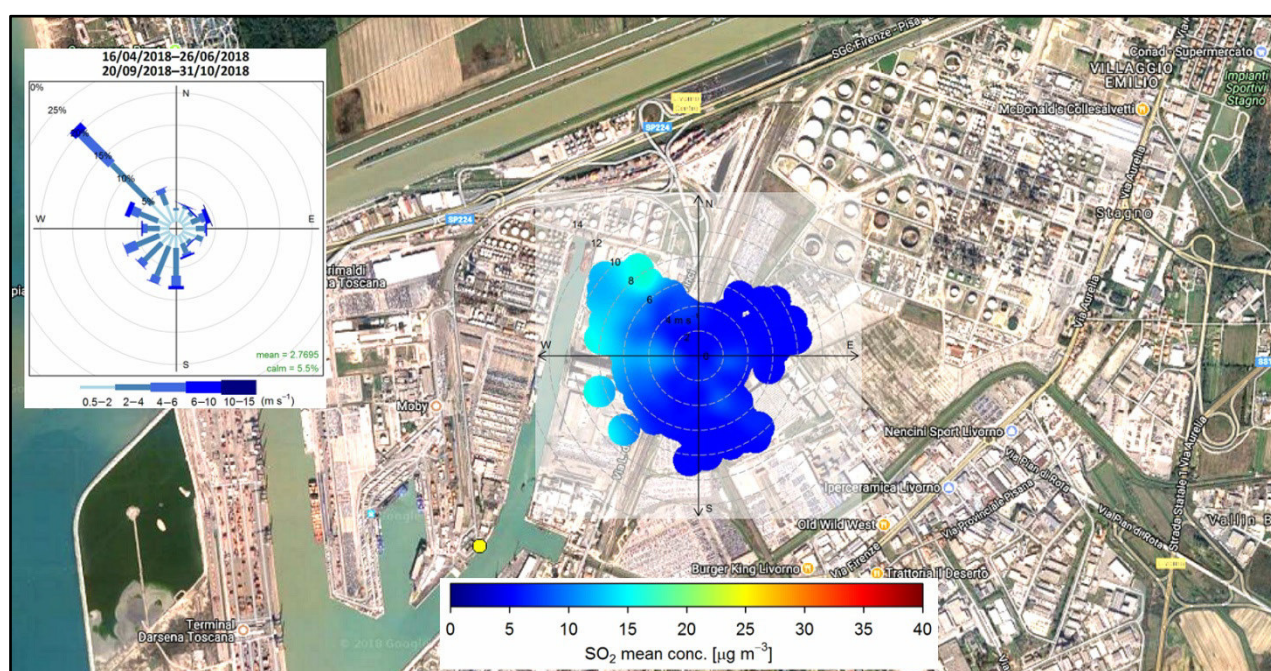


Fig. 49. Mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

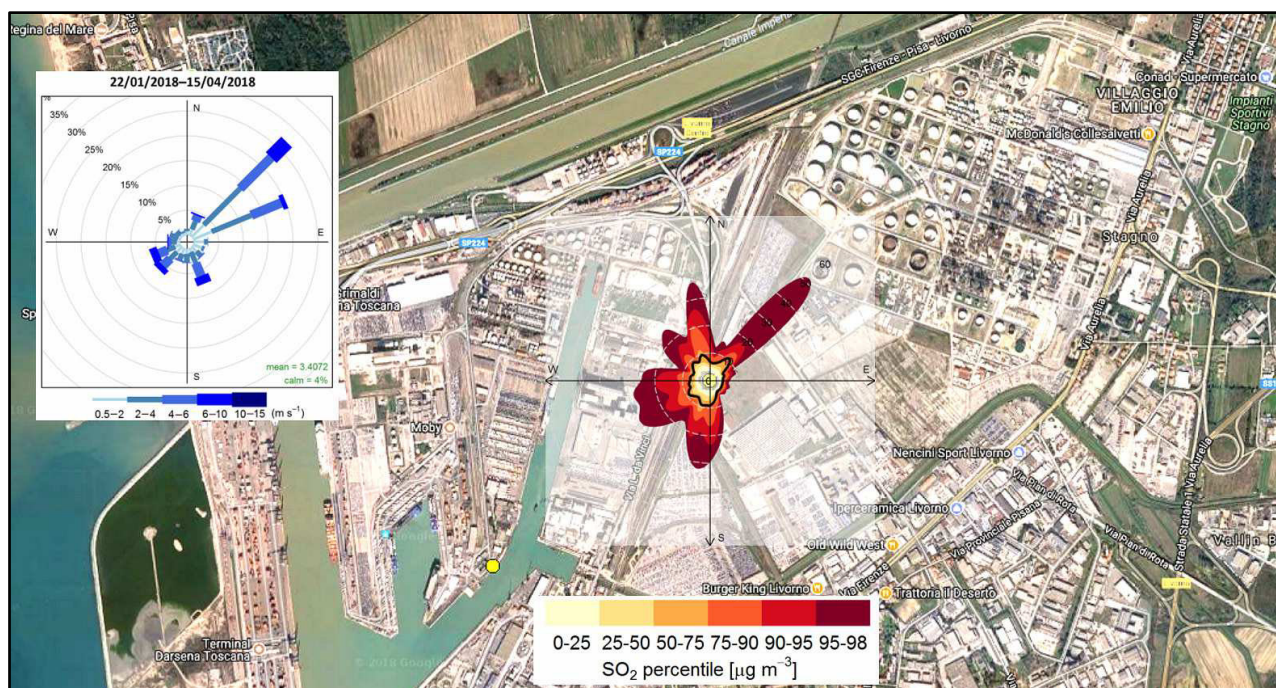


Fig. 50. Mappa del PercentilePlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

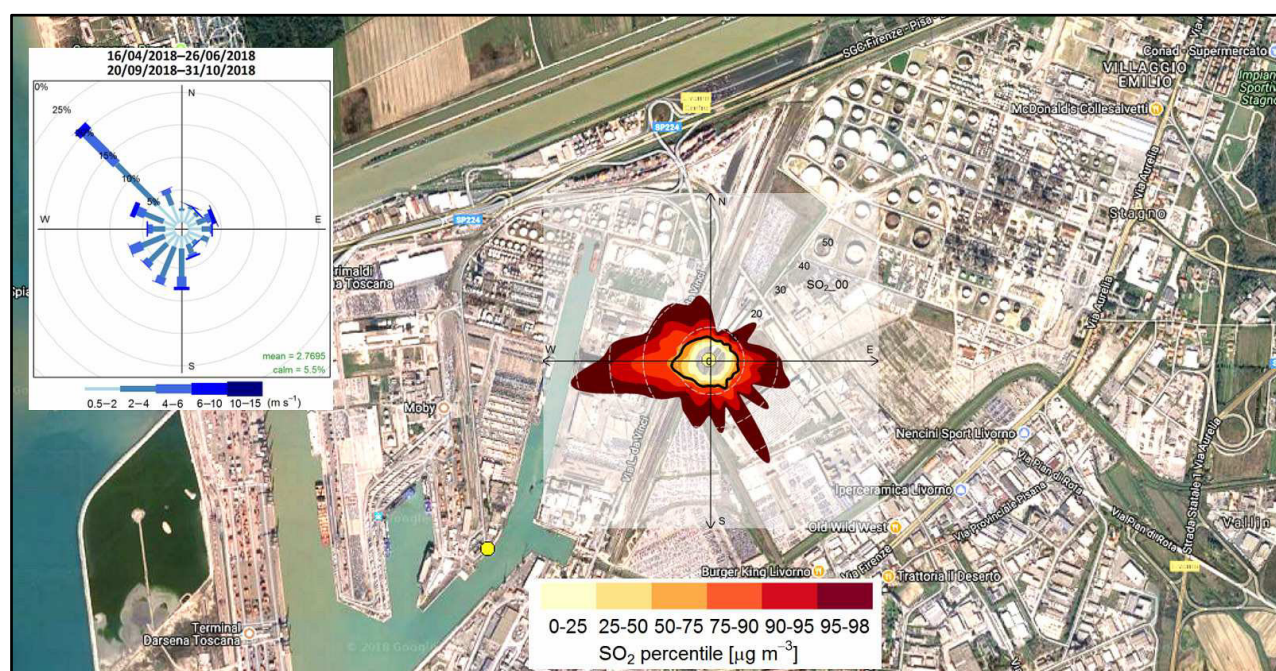


Fig. 51. Mappa del PercentilePlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

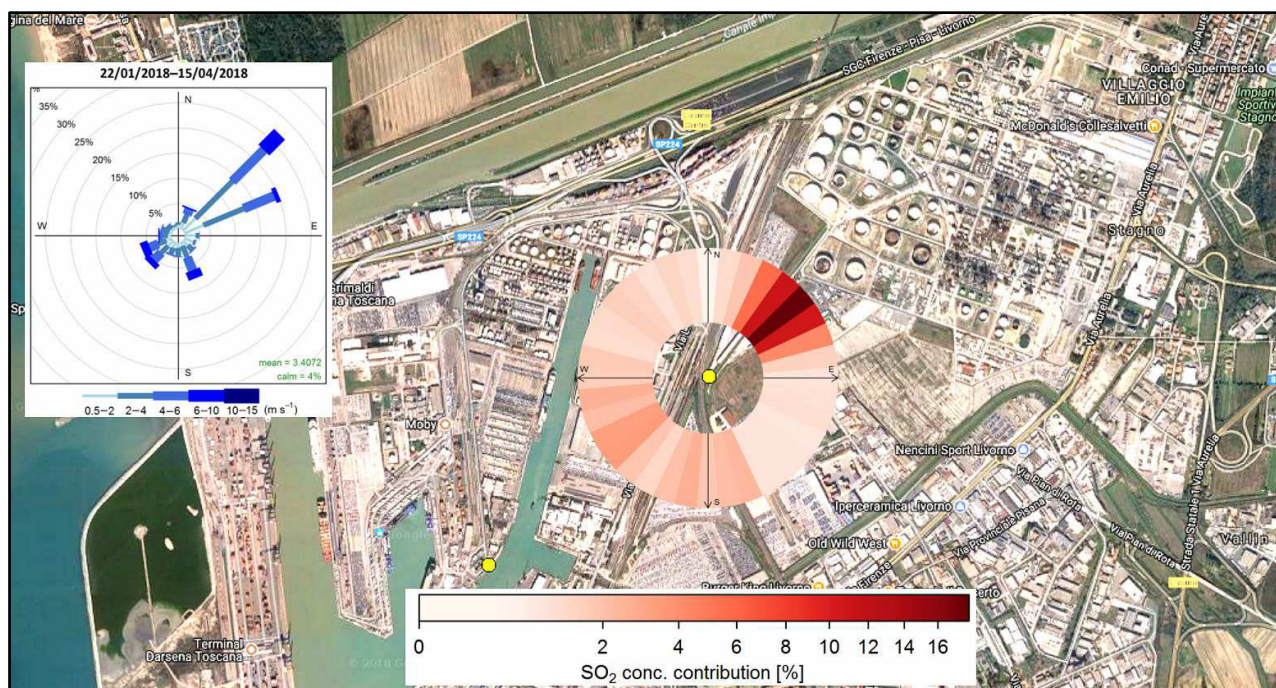


Fig. 52. Mappa del PolarFreq delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (22/01/2018–15/04/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

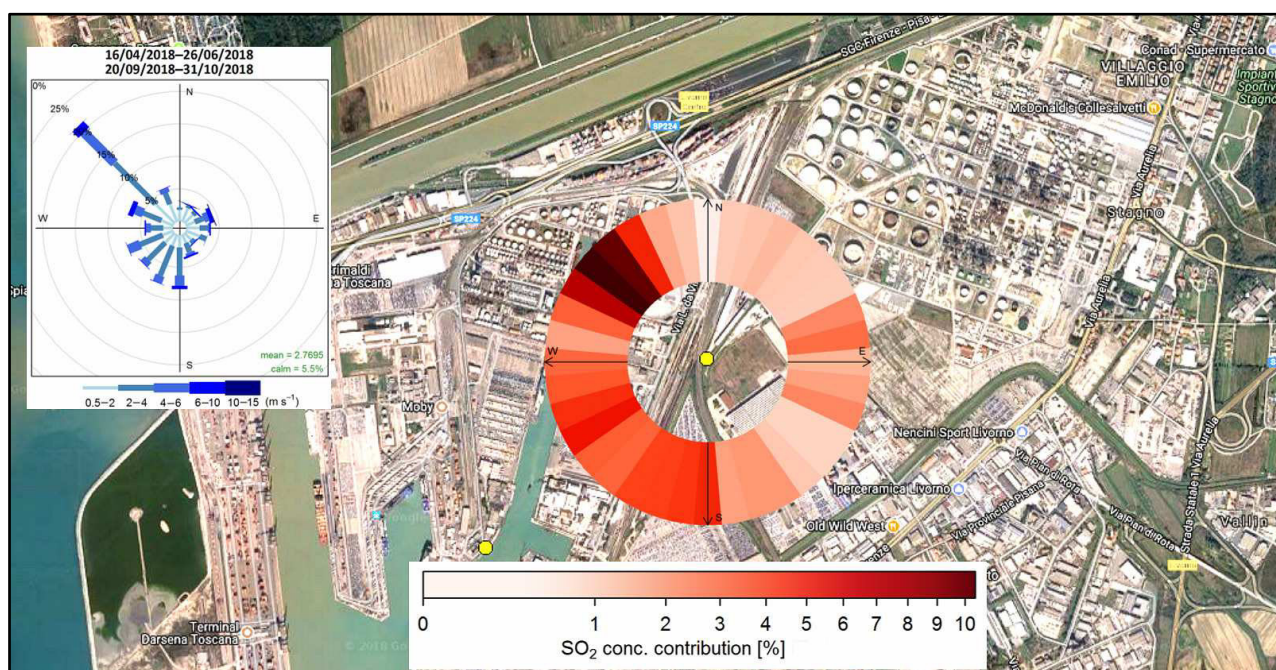


Fig. 53. Mappa del PolarFreq delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (16/04/2018–31/10/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

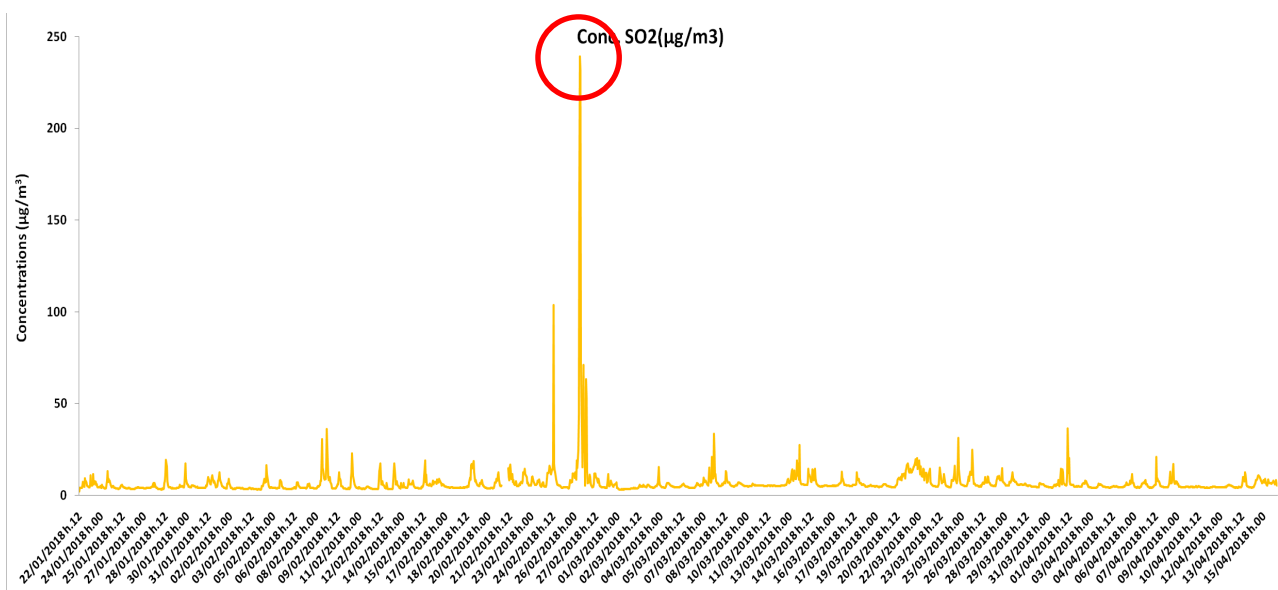


Fig. 54. Serie storica delle concentrazioni medie orarie di SO_2 misurate a Livorno dalla stazione AIRQLab (22/01/2018–15/04/2018), con evidenziato il picco ($239.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) registrato il giorno 26/02/2018 alle h. 09:00.

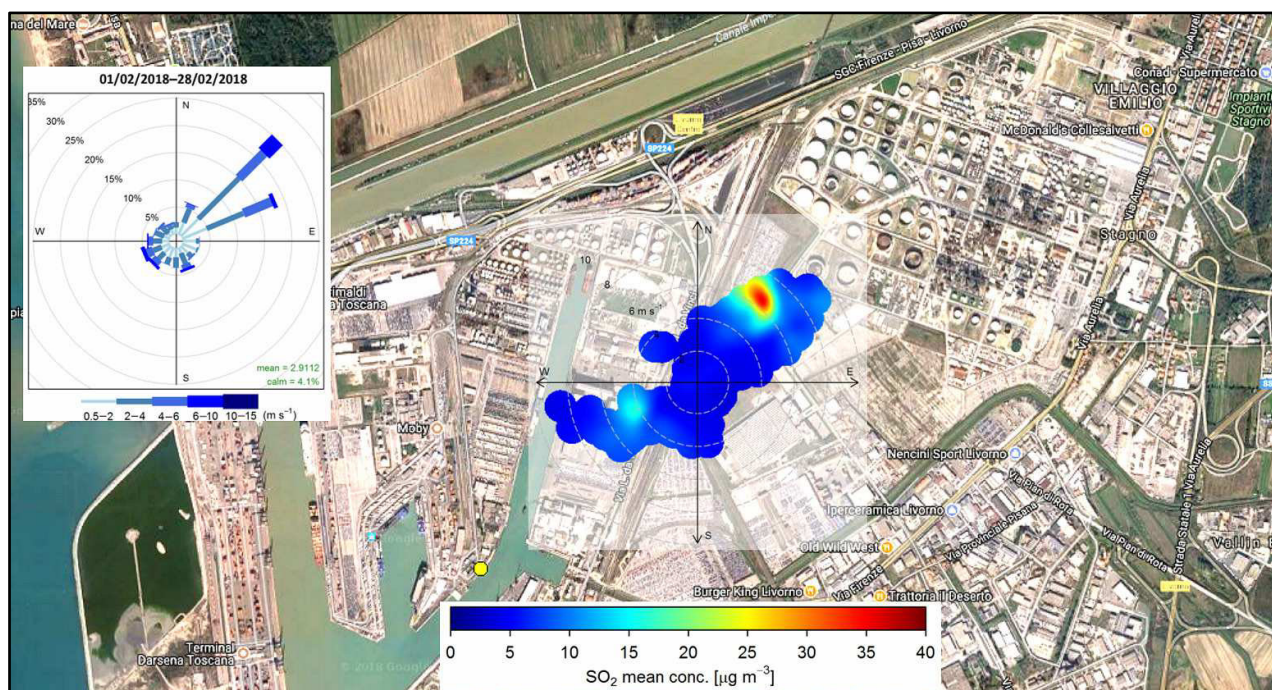


Fig. 55. Mappa del PolarPlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO_2 misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (01/02/2018–28/02/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

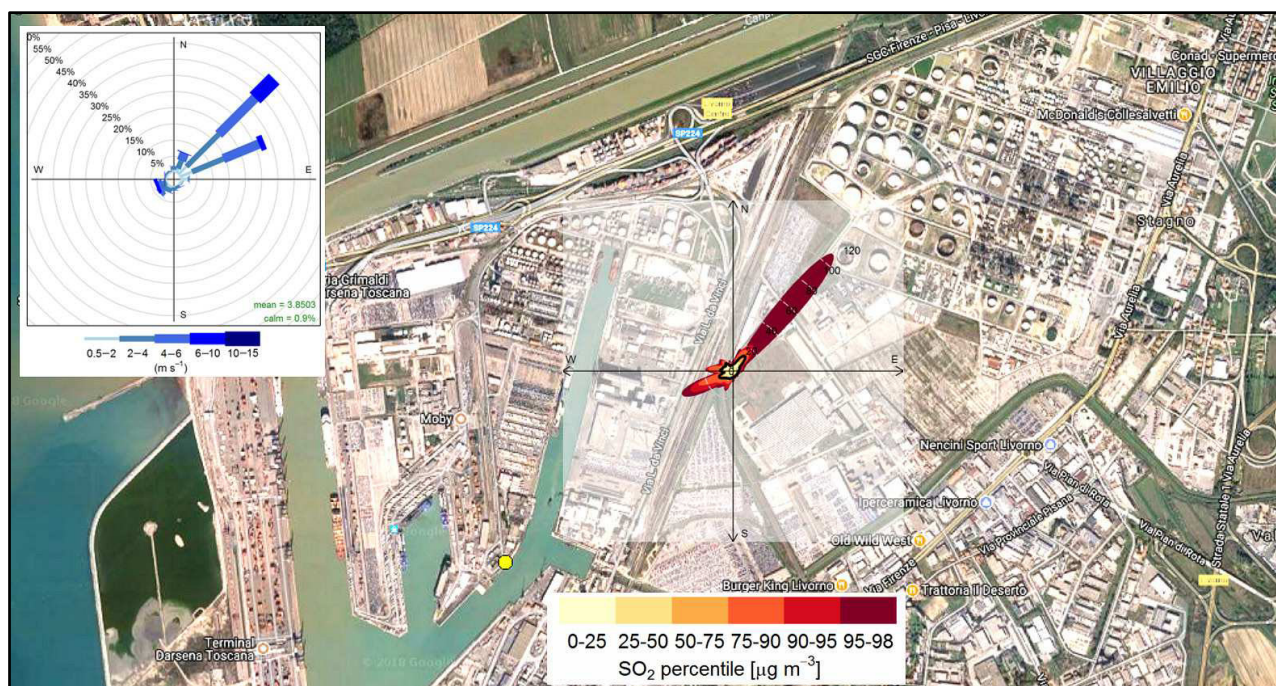


Fig. 56. Mappa del PercentilePlot delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (01/02/2018–28/02/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

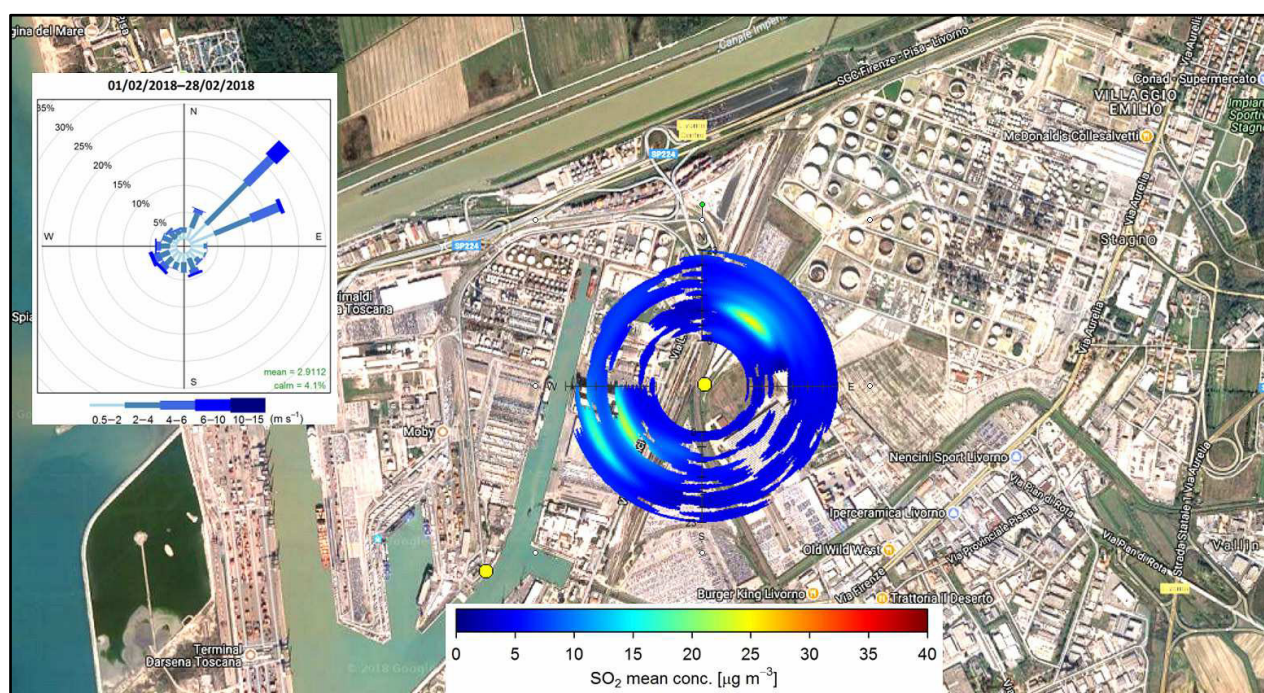


Fig. 57. Mappa del PolarAnnulus delle concentrazioni medie a 10 minuti di SO₂ misurate dalla stazione AIRQLab a Livorno (01/02/2018–28/02/2018). Nel riquadro è riportata la corrispondente rosa dei venti misurata dalla stazione meteo della Rete Mareografica Nazionale.

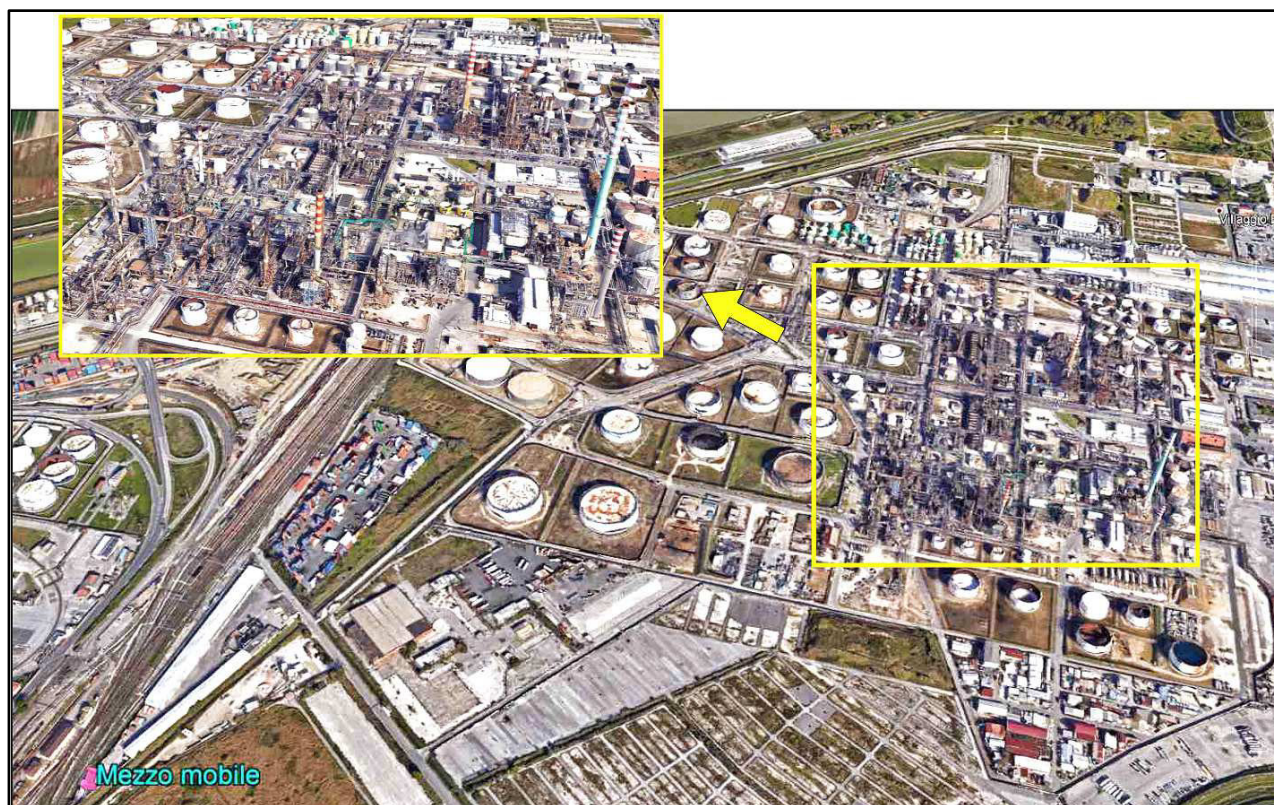


Fig. 58. Vista aerea della zona posta a NE della stazione AIRQLab a Livorno, con evidenziato in alto a sinistra l'ingrandimento delle possibili sorgenti responsabili del rilascio anomalo di emissioni di SO_2 (Fonte: Google Earth).

BIBLIOGRAFIA

Carslaw, D. (2018). The Openair project. <http://www.openair-project.org> (accesso 12/11/2018).

Cavaliere, A., Di Gennaro, F., Di Lonardo, S., Gioli, B., Gualtieri, G., Martelli, F., Matese, A., Toscano, P., Vagnoli, C., Zaldei, A. (2018). Development of low-cost air quality stations for next generation monitoring networks: validation of PM_{2.5} and PM₁₀ sensors. *Sensors*, 18(9), 2843.

Repubblica Italiana (2010). Decreto legislativo n. 155 del 13/08/2010: Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 216 del 15/09/2010.

Venables, W.N., Smith, D.M., R Core Team (2018). An Introduction to R. Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics Version 3.5.0 (2018-04-23). <http://www.r-project.org> (accesso 12/11/2018).

Zaldei, A., Camilli, F., De Filippis, T., Di Gennaro, F., Di Lonardo, S., Dini, F., Gioli, B., Gualtieri, G., Matese, A., Nunziati, W., Rocchi, L., Toscano, P., Vagnoli, C. (2017). An integrated low-cost road traffic and air pollution monitoring platform for next citizen observatories. *Transportation Research Procedia*, 27, 609-616.