

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE E DEI  
MATERIALI (DICAM)**

***CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO***

**TESI DI LAUREA**

in

Previsioni di Impatto Ambientale di Impianti Produttivi e di Trattamento Rifiuti M

**PROCEDURA PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ  
DELL'ARIA IN PROSSIMITÀ DEL PLESSO UNIVERSITARIO DI  
VIA TERRACINI**

**CANDIDATO:**  
Giulia Fiorentino

**RELATORE:**  
Chiar.mo Prof. Giacomo  
Antonioni

**CORRELATORE:**  
Ing. Eleonora Foschi

Anno Accademico 2017/2018

Sessione II



*Dedicata alla mia famiglia e  
a due care amiche Cecilia e  
Alessandra.*



## Indice

1. Introduzione.....	3
2. Inquadramento normativo .....	7
2.1 Riferimenti normativi comunitari .....	7
2.2 Riferimenti normativi nazionali.....	8
2.2.1 Inquinanti più diffusi.....	11
2.2.2 Biossido di zolfo (SO <sub>2</sub> ) .....	12
2.2.3 Ossidi di azoto (NO <sub>x</sub> ).....	12
2.2.4 Monossido di carbonio (CO) .....	13
2.2.5 Ozono (O <sub>3</sub> ).....	13
2.2.6 Particolato atmosferico (PM10 e PM2,5) .....	14
2.2.7 Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ).....	14
2.2.8 Idrocarburi policiclici aromatici (IPA) .....	15
2.2.9 Metalli pesanti.....	15
2.3 Riferimenti normativi regionali .....	16
3. La qualità dell'aria.....	17
Premessa .....	17
3.1 La qualità dell'aria in Italia .....	18
3.1.1 Ossidi di zolfo .....	19
3.1.2 Ossidi di azoto.....	20
3.1.3 Composti organici .....	21
3.1.4 Particolato atmosferico .....	22
3.1.5 Idrocarburi policiclici.....	23
3.1.6 Monossido di carbonio.....	24
3.1.7 Benzene .....	25
3.1.8 Metalli pesanti.....	26
3.2 La qualità dell'aria in Emilia-Romagna .....	27
4. Descrizione del progetto .....	31
4.1 Scopo del progetto e origine dei dati .....	31
4.2 Descrizione dei campionatori .....	37
5. Analisi dei dati di monitoraggio .....	41
5.1 Taratura della centralina portatile.....	41

5.2 Confronto con il valore limite orario e giornaliero.....	42
5.3 Qualità dell'aria di Via Terracini.....	44
5.3.1 Analisi del periodo 23 febbraio – 3 marzo.....	50
5.3.2 Condizioni metereologiche del periodo 23 febbraio – 3 marzo.....	52
5.3.2.1 Direzione e velocità del vento.....	52
5.3.2.2 Stabilità atmosferica.....	57
5.4 Correlazione tra flussi di traffico e concentrazioni di biossido di azoto .....	62
6. Conclusioni.....	65
7. Appendice.....	69
8. Bibliografia.....	93

---

## 1. Introduzione

Negli ultimi anni si sta manifestando una crescente attenzione per le questioni ambientali ed in particolare per le problematiche relative all'inquinamento atmosferico sia da parte delle Istituzioni pubbliche sia da parte di molti cittadini, i quali vogliono essere maggiormente consapevoli delle condizioni dell'ambiente in cui vivono e degli effetti socio-sanitari che queste hanno sulla popolazione [1].

I dati forniti dall'Organizzazione mondiale della sanità (Oms) infatti riferiscono che a livello mondiale ogni anno circa 7 milioni di persone muoiono a causa dell'aria inquinata che respirano [2].

Occorre ricordare che i principali attori della produzione di sostanze inquinanti in aria sono gli impianti industriali, il traffico veicolare e il riscaldamento degli edifici, che soprattutto nelle grandi città hanno un potenziale effetto nocivo sulla salute degli abitanti.

Il traffico in particolare è responsabile della produzione di ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ), di monossido di carbonio (CO), di ozono ( $\text{O}_3$ ), di benzene ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) e di particolato aerodisperso (PM10).

Questa situazione allarmante ha indotto le Autorità governative a produrre una normativa di riferimento per la tutela della qualità dell'aria, che è divenuta nel corso degli anni sempre più stringente e vincolante nei confronti delle emissioni inquinanti, ed ha avuto riflessi significativi sulle politiche ambientali di molte città italiane che hanno adottato misure emergenziali per affrontare questa problematica [3].

Ad esempio, il Comune di Bologna ha adottato misure antismog rientranti nel Piano Aria Integrato Regionale 2020 (PAIR 2020) in vigore dal 1° ottobre 2018 al 31 marzo 2019 [4].

Nella stessa città di Bologna è stato elaborato nei primi mesi dell'anno 2018 un progetto dal basso per il monitoraggio della qualità dell'aria chiamato "Aria Pesa", con lo scopo di aumentare il grado di sensibilizzazione dei cittadini e delle Istituzioni pubbliche e di reclamare un cambiamento nelle decisioni politiche urbane [5].

Questa iniziativa è stata creata e supportata da una rete civica composta da associazioni e comitati di cittadini bolognesi che attraverso la costruzione di una mappa del biossido di

azoto presente nell'aria si prefiggono l'obiettivo di avere un quadro sulla situazione reale dei livelli di inquinamento nei diversi punti della città.

A questo progetto ha partecipato anche il dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna, installando un campionatore passivo di biossido di azoto su un edificio situato in Via Terracini 28.

La fase di elaborazione dati è stata condotta dal comitato scientifico di Aria Pesa col supporto del dipartimento di chimica industriale coordinato dal professore Francesco Luca Basile.

I risultati ottenuti dalla campagna di monitoraggio sono stati utilizzati in questo elaborato di tesi per poter effettuare un confronto con i dati restituiti da una centralina portatile posizionata vicino al campionatore passivo.

Successivamente i dati ottenuti dalla centralina portatile sono stati utilizzati con il fine di realizzare una modellazione dell'impatto del traffico veicolare sulla qualità dell'aria esterna e di indagare su una possibile correlazione tra i due fattori.

In mancanza di uno strumento posto nella sezione stradale di interesse per il monitoraggio dei flussi di traffico, sono stati utilizzati i dati relativi ai due sensi di percorrenza di Via Prati di Carrara, forniti gentilmente dal Comune di Bologna.

Tale attività è stata effettuata tenendo conto delle condizioni meteorologiche relative al mese di rilievo, che sono state analizzate prendendo in considerazione i principali parametri che le caratterizzano, quali la direzione di provenienza e la velocità del vento, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa dell'aria, la radiazione visibile e la precipitazione, rilevati nella stazione di Bologna Urbana attraverso il sistema Dexter con il quale è possibile accedere al database del servizio Idro-Meteo-Clima di ARPA [6].

Nel secondo capitolo vengono presentati i principali riferimenti normativi relativi al monitoraggio e alla gestione della qualità dell'aria a livello comunitario, nazionale e regionale. In particolare, viene presentata la disciplina del D.Lgs. 155/2010 che regola le principali sostanze inquinanti e definisce per ciascuna di esse i valori limite, l'obbligo di concentrazione e l'obiettivo di riduzione delle esposizioni.

Nel terzo capitolo viene presentato un quadro generale della situazione attuale relativo alla qualità dell'aria in Italia ed in Emilia-Romagna e una descrizione dettagliata dei principali inquinanti atmosferici.

Nel quarto capitolo viene descritto l'iter progettuale di questo elaborato di tesi, frutto di una continua rielaborazione in itinere ed oggetto di diversi cambiamenti decisionali, i quali ne hanno determinato lo scopo e le fasi che lo caratterizzano.

Infine, nel quinto capitolo viene riportata l'analisi dei dati della campagna di monitoraggio insieme allo studio condotto per verificare un eventuale legame tra i dati non sistematici dei flussi di traffico e i dati analizzati in riferimento alla qualità dell'aria.



---

## **2. Inquadramento normativo**

### **2.1 Riferimenti normativi comunitari**

In questo paragrafo vengono presentate le principali direttive europee che caratterizzano il complesso quadro normativo in materia della qualità dell'aria ambiente.

La Direttiva 2003/4/CE del 28 gennaio 2003, che ha abrogato la direttiva 90/313/CEE del Consiglio, garantisce il diritto di accesso all'informazione ambientale detenuta dalle autorità pubbliche e ne assicura la piena diffusione [7].

La Direttiva 2003/35/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 26 maggio 2003 prevede la partecipazione del pubblico nell'elaborazione di taluni piani e programmi in materia ambientale e modifica le direttive del Consiglio 85/337/CEE e 96/61/CE relativamente alla partecipazione del pubblico e all'accesso alla giustizia. Obiettivo della presente direttiva è di contribuire all'attuazione degli obblighi derivanti dalla convenzione di Århus, in particolare il desiderio di garantire il diritto di partecipazione del pubblico alle attività decisionali in materia ambientale, per contribuire a tutelare il diritto di vivere in un ambiente adeguato ad assicurare la salute e il benessere delle persone [8].

La Direttiva 2004/107/CE fissa i valori obiettivo da raggiungere col fine di ridurre al minimo gli effetti nocivi della sostanza inquinante, prevede un monitoraggio obbligatorio quando le concentrazioni superano determinate soglie di valutazione, definisce le tecniche di misura normalizzate su criteri comuni per l'ubicazione delle stazioni di misura affinché le informazioni ottenute siano confrontabili e prevede che queste informazioni siano messe a disposizione del pubblico [9].

Infine, la Direttiva 2008/50/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008 relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa è stata recepita in Italia con il D.Lgs. n. 155 del 13 agosto 2010. Essa si pone l'obiettivo di prevenire o ridurre le emissioni di inquinanti atmosferici nocivi, definire adeguati obiettivi per la qualità dell'aria ambiente che tengano conto delle pertinenti norme e programmi dell'Organizzazione mondiale della sanità e infine di realizzare una migliore cooperazione tra gli stati dell'Unione europea in materia di inquinamento atmosferico [10].

## **2.2 Riferimenti normativi nazionali**

La Direttiva 2003/4/CE sull'accesso del pubblico all'informazione ambientale è stata attuata in Italia tramite il D.Lgs. 195 del 19 agosto 2005.

Il decreto stabilisce che le informazioni ambientali, ovvero i dati ricavati dal monitoraggio di attività che possono incidere sull'ambiente, devono essere sistematicamente e progressivamente messe a disposizione del pubblico attraverso l'uso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione [11].

Il D.Lgs. 152 del 3 aprile 2006 disciplina le norme in materia ambientale e, in particolare nella parte quinta, la tutela dell'aria e la riduzione delle emissioni in atmosfera.

Nel decreto l'inquinamento atmosferico viene definito come “ogni modificazione dell'aria atmosferica, dovuta all'introduzione nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da ledere o da costituire un pericolo per la salute umana o per la qualità dell'ambiente oppure tali da ledere i beni materiali o compromettere gli usi legittimi dell'ambiente”. Inoltre, riconduce le principali fonti di inquinamento atmosferico, originato da attività antropica, a tre categorie: emissioni provenienti da attività produttive, emissioni da impianti di riscaldamento di insediamenti civili ed emissioni da traffico veicolare [12].

Il D.Lgs. 155 del 13 agosto 2010, che recepisce la Direttiva comunitaria 2008/50/CE, ha riformato il quadro normativo relativo alla qualità dell'aria, abrogando il D.Lgs. 351/99 e i rispettivi decreti attuativi (il DM 60/02, il D.Lgs. 183/2004 e il DM 261/20002).

Il decreto regola la gestione della qualità dell'aria, definendo per i principali inquinanti atmosferici i valori di concentrazione da non superare. Inoltre, riporta gli strumenti attraverso cui effettuare la valutazione della qualità dell'aria, la zonizzazione, la classificazione del territorio, la rilevazione ed il monitoraggio dei livelli di inquinamento atmosferico, indicando in caso di superamento dei valori limite, le competenze e le modalità affinché siano intraprese misure necessarie per agire sulle principali sorgenti di emissione.

Il D.Lgs. 155/2010 stabilisce i valori limite e gli obiettivi di qualità per le concentrazioni nell'aria ambiente di una serie di sostanze inquinanti, quali biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>), biossido di azoto (NO<sub>2</sub>), benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), monossido di carbonio (CO), piombo (Pb),

particolato PM10, particolato PM2,5 e ozono (O<sub>3</sub>) ed è finalizzato ad assicurare che le stesse situazioni di inquinamento siano valutate e gestite in modo uniforme in tutto il territorio nazionale.

Si riportano le principali definizioni di:

- *valore limite*: livello fissato in base alle conoscenze scientifiche, incluse quelle relative alle migliori tecnologie disponibili, al fine di evitare, prevenire o ridurre gli effetti nocivi per la salute umana o per l'ambiente nel suo complesso, che deve essere raggiunto entro un termine prestabilito e che non deve essere successivamente superato;
- *valore obiettivo*: valore limite da conseguire entro una data prestabilita;
- *soglia di informazione*: livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana per alcuni gruppi particolarmente sensibili della popolazione per esposizioni di breve durata ed il cui raggiungimento impone di assicurare informazioni tempestive e adeguate;
- *soglia di allarme*: livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana per tutta la popolazione per esposizioni di breve durata ed il cui raggiungimento impone di adottare provvedimenti immediati;
- *livello critico*: oltre il quale possono sussistere effetti negativi sull'ambiente;
- *obiettivo a lungo termine*: livello da raggiungere nel lungo periodo mediante misure proporzionate al fine di salvaguardare la protezione della salute umana e dell'ambiente;
- *indicatore di esposizione media*: livello da verificare sulla base di selezionate stazioni di fondo nazionali che riflette l'esposizione media della popolazione;
- *obbligo di concentrazione dell'esposizione*: livello da raggiungere entro una data prestabilita;
- *obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione*: riduzione percentuale dell'esposizione media rispetto ad un anno di riferimento, da raggiungere entro una data prestabilita.

Di seguito viene riportata la tabella dei parametri normativi.

<b>Inquinante</b>	<b>Limite</b>	<b>Periodo di mediazione</b>	<b>Valore limite</b>	<b>Superamenti in un anno</b>
SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Valore limite giornaliero	Media giornaliera	125 µg/m <sup>3</sup>	Massimo 35
	Valore limite su 1 ora per la protezione della salute umana	Media massima oraria	350 µg/m <sup>3</sup>	Massimo 24
NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Valore limite orario per la protezione della salute umana	Media massima oraria	200 µg/m <sup>3</sup>	Massimo 18
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	Anno civile	40 µg/m <sup>3</sup>	
CO (mg/m <sup>3</sup> )	Valore limite orario per la protezione della salute umana	Media massima giornaliera calcolata su 8 ore	10 mg/m <sup>3</sup>	
O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Soglia d'informazione	Media massima oraria	180 µg/m <sup>3</sup>	
	Soglia d'allarme	Media massima oraria	240 µg/m <sup>3</sup>	
	Valore obiettivo	Media massima giornaliera calcolata su 8 ore	120 mg/m <sup>3</sup>	≤ 25 volte/anno come media su 3 anni
	Valore limite orario per la protezione della salute umana	AOT40, calcolato sulla base dei valori di 1 ora da maggio a luglio	1800 µg/m <sup>3</sup> come media su 5 anni	

PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Valore limite sulle 24 ore per la protezione della salute umana	Media giornaliera	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Massimo 35
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	Anno civile	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM2,5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	Anno civile	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Benzene ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	Valore limite su base annua	Anno civile	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Benzo(a)pirene ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	Concentrazione presente nella frazione PM10 del materiale particolato, calcolato come media su un anno civile	Anno civile	1 $\text{ng}/\text{m}^3$	
Metalli pesanti ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	Arsenico	Anno civile	6 $\text{ng}/\text{m}^3$	
	Cadmio	Anno civile	5 $\text{ng}/\text{m}^3$	
	Nichel	Anno civile	20 $\text{ng}/\text{m}^3$	
	Piombo	Anno civile	0,5 $\text{ng}/\text{m}^3$	

Tabella 2.1: Limiti alle concentrazioni di inquinanti dell'aria previsti dalla normativa nazionale

### 2.2.1 Inquinanti più diffusi

Nel seguente paragrafo si analizzano i principali inquinanti atmosferici, riportando per ciascuno di essi una breve descrizione degli stessi e degli effetti che possono provocare all'uomo e all'ambiente.

Occorre ricordare che nell'ambiente urbano il fenomeno di diffusione degli inquinanti in atmosfera è un fenomeno molto complesso. Esso è legato principalmente alla morfologia del territorio e alle condizioni metereologiche, influenzandone la modalità di trasporto e la modalità di dispersione.

### **2.2.2 Biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>)**

Il biossido di zolfo è un gas incolore che può avere origine naturale dalle eruzioni vulcaniche, oppure antropica dalla combustione domestica degli impianti non metanizzati e dall'uso di combustibili liquidi e solidi nelle centrali termoelettriche.

Gli ossidi di zolfo in generale svolgono un'azione indiretta nei confronti della fascia di ozono stratosferico, fungendo da substrato per i clorofluorocarburi anche se, al contempo, si oppongono al fenomeno dell'effetto serra poiché riflettono le radiazioni solari, producendo un raffreddamento del pianeta.

L'effetto nocivo sulla salute umana è dovuto alla sua elevata solubilità in acqua, che favorisce l'assorbimento dalle mucose del naso e del tratto superiore dell'apparato respiratorio.

Per quanto riguarda i danni sull'ambiente bisogna considerare l'effetto degli ossidi di zolfo sull'acidificazione delle precipitazioni, che porta a gravi danni ai bacini idrici e alla vegetazione.

### **2.2.3 Ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>)**

Gli ossidi di azoto vengono prodotti durante i processi di combustione a temperature molto elevate, da una reazione tra l'azoto presente nell'aria e l'ossigeno, che determina la formazione di monossido di azoto e che a sua volta si trasforma in atmosfera in biossido di azoto. Si parla dunque di NO<sub>x</sub>, in cui la x sta ad indicare una miscela di NO e NO<sub>2</sub> [13].

Una fonte principale di ossidi di azoto sono le reazioni che avvengono all'interno delle camere di combustione dei motori degli autoveicoli, infatti nelle zone urbane dove il traffico veicolare è in forte crescita e genera emissioni continue, si verifica un aumento di concentrazione di NO<sub>x</sub> con un andamento secondo un ciclo giornaliero, in cui si registrano picchi di concentrazione nelle ore diurne e diminuzioni di concentrazione nelle ore notturne.

Molto importante è il processo dello "smog fotochimico", che si manifesta in presenza di forte radiazione solare ed aria immobile, in cui l'ossido di azoto ed altri inquinanti

atmosferici producono diversi inquinanti secondari pericolosi, come l'ozono o l'acido nitrico.

Il biossido di azoto è responsabile degli effetti nocivi e tossici per la salute umana che si manifestano principalmente a livello polmonare.

Mentre per quanto riguarda gli effetti sull'ambiente, bisogna considerare i fenomeni di eutrofizzazione e di acidificazione delle precipitazioni piovose.

#### **2.2.4 Monossido di carbonio (CO)**

Il monossido di carbonio può avere origine sia naturale che antropica e si forma da tutte le combustioni incomplete. Occorre evidenziare che il 90% delle emissioni è causato dagli scarichi automobilistici [13].

Il monossido di carbonio provoca effetti trascurabili sull'ambiente, mentre è da ritenersi estremamente pericoloso per la salute dell'uomo. Infatti, la sua presenza riduce la capacità di ossidazione dei tessuti; i sintomi di avvelenamento sono nausea, mal di testa, stordimento, difficoltà respiratorie. Grandi concentrazioni possono essere letali: esso viene assorbito dagli alveoli polmonari dove, legandosi con l'emoglobina del sangue, forma la carbossiemoglobina che impedisce il trasporto di ossigeno e perciò l'ossigenazione dei tessuti. È stato dimostrato che esposizioni prolungate già a 20 ppm di CO sono sufficienti per innalzare del 3% il contenuto di carbossiemoglobina nel sangue. Aggrava, inoltre, le malattie cardiovascolari e riduce la percezione visiva [14].

#### **2.2.5 Ozono (O<sub>3</sub>)**

L'ozono troposferico è un inquinante secondario, la cui origine è dovuta a processi fotochimici in presenza di inquinanti precursori, quali ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) ed i composti organici volatili non metanici (COVNM), prodotti principalmente dal traffico veicolare e dai processi di combustione.

L'aumento della concentrazione di questo inquinante è direttamente proporzionale all'aumento della radiazione solare e della temperatura, infatti questo fenomeno si osserva nei mesi più caldi dell'anno e nelle ore di massimo irraggiamento solare.

Dopo il particolato, l'ozono è l'inquinante atmosferico che, per tossicità e per i livelli di concentrazione che possono essere raggiunti, incide maggiormente sulla salute umana e la sua pericolosità viene spesso sottovalutata, nonostante le stime dell'Agenzia Ambientale Europea (EEA) riportino 13.600 morti premature riconducibili all'ozono in Europa nel 2015, di cui 2.900 solo in Italia [15].

### **2.2.6 Particolato atmosferico (PM10 e PM2,5)**

Il particolato atmosferico è definito come l'insieme delle particelle atmosferiche solide e liquide sospese in aria ambiente. Esso viene distinto in particolato primario se è stato emesso direttamente in atmosfera e in particolato secondario se la sua formazione è dovuta a reazioni chimiche fra diverse specie inquinanti.

La sua origine può essere sia naturale che antropica, in quest'ultimo caso un ruolo fondamentale è rappresentato dal traffico veicolare.

Il particolato aerodisperso viene classificato rispetto al taglio, quindi si definisce PM10 l'insieme delle particelle di diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 10  $\mu\text{m}$  e PM2,5 l'insieme delle particelle aventi diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 2,5  $\mu\text{m}$ .

Tra gli inquinanti atmosferici il particolato è quello con il maggior impatto sulla salute umana. Esso infatti è causa di malattie cardiache, malattie respiratorie e malattie oncologiche. L'agenzia IARC (International Agency for Research on Cancer) ha inserito il materiale particolato aerodisperso nella categoria 1 (agenti sicuramente cancerogeni per l'uomo).

### **2.2.7 Benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)**

Il benzene è un idrocarburo volatile aromatico che fa parte della classe dei composti organici volatili.

La sua presenza in atmosfera è dovuta soprattutto alle emissioni dei veicoli a motore e alle perdite durante le fasi di rifornimento negli impianti di stoccaggio e di distribuzione dei combustibili.

I principali danni per la salute umana riguardano il suo effetto oncogeno, che è stato accertato dall'agenzia IARC e che lo ha quindi inserito nella categoria 1.

### **2.2.8 Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)**

Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono composti organici costituiti da più anelli benzenici che si originano dalla combustione incompleta di materiali organici e vengono emessi in atmosfera mediante l'adsorbimento sul materiale particolato.

Il loro effetto cancerogeno non è facilmente stimabile poiché la loro presenza in atmosfera avviene sottoforma di diverse miscele complesse di diversi IPA. Per questo motivo la IARC ha inserito in particolare il benzo(a)pirene (BaP) nella categoria 1.

### **2.2.9 Metalli pesanti**

Quando si parla dei metalli pesanti in particolare ci si riferisce al cadmio, al nichel, all'arsenico e al piombo, che vengono trasferiti in atmosfera insieme al materiale particolato.

La loro origine deriva maggiormente dalle attività di incenerimento dei rifiuti, dalle attività minerarie, dalle fonderie e dalle raffinerie.

Per questi inquinanti la Direttiva 2004/107/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 15 dicembre 2004 fissa un valore obiettivo e l'obbligo di valutazione e gestione della qualità dell'aria su tutto il territorio nazionale.

### **2.3 Riferimenti normativi regionali**

La regione Emilia-Romagna ha sviluppato una regolamentazione propria con cui ha affidato la gestione della qualità dell'aria a livello regionale all'agenzia regionale ARPA Emilia-Romagna (D.G.R. n.1614 del 26/10/2009).

Successivamente, attraverso l'adozione della D.G.R. n. 2001/2011 è stato recepito il D.Lgs. 155/2010 "Attuazione della Direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa".

In seguito al superamento dei valori limite di biossido di azoto e PM10, la Regione Emilia-Romagna ha richiesto proroga del termine per il conseguimento e deroga all'obbligo di applicare determinati valori limite per il biossido di azoto e per il PM10 (D.G.R. n. 344 del 14/03/2011).

La Regione Emilia-Romagna ha emanato diversi provvedimenti legati alle autorizzazioni alle emissioni in atmosfera ai sensi del D.Lgs. 152/2006, tra cui la D.G.R. n. 2236 del 28/12/2009 e successive modifiche ed integrazioni e la D.G.R. n. 1497 e n. 1498 del 24/10/2011 [16].

---

### **3. La qualità dell'aria**

#### **Premessa**

Attualmente la questione ambientale ha assunto dimensioni ben più ampie e drammatiche rispetto al passato, in seguito agli imponenti processi di industrializzazione, di sviluppo tecnologico e di urbanizzazione che hanno segnato la seconda metà del secolo scorso.

In particolare, il problema dell'inquinamento atmosferico e conseguentemente delle politiche dirette a migliorare la qualità dell'aria attraverso l'emanazione di leggi e di altri provvedimenti amministrativi, sta assumendo in questi ultimi tempi una importanza sempre più rilevante, soprattutto nel contesto dei grandi centri urbani.

Numerosi studi e ricerche sul campo hanno provato l'esistenza di una forte correlazione tra la concentrazione di sostanze inquinanti nell'atmosfera e il peggioramento delle condizioni di salute della popolazione. Ciò ha indotto le autorità governative a trovare soluzioni concrete per risolvere il problema delle emissioni inquinanti di origine antropica.

Le politiche di miglioramento della qualità dell'aria sono state sviluppate attraverso l'attuazione di programmi operativi e di azioni che hanno riguardato principalmente il problema del traffico veicolare, dal momento che esso rappresenta la fonte principale di inquinamento a livello del suolo nei grandi centri urbani. Gli scarichi dei veicoli contribuiscono infatti a generare gran parte delle emissioni di monossido di carbonio e di biossido di azoto e a produrre frazioni importanti della concentrazione delle altre sostanze inquinanti.

Nel presente capitolo viene presentato un quadro generale della situazione attuale relativo alla qualità dell'aria in Italia ed in Emilia-Romagna e una descrizione dettagliata dei principali inquinanti atmosferici (già analizzati nel secondo capitolo dell'elaborato). Inoltre, verranno trattate le modalità con le quali i diversi settori di attività antropica contribuiscono a produrre i suddetti inquinanti.

### **3.1 La qualità dell'aria in Italia**

Nell'ultimo decennio, grazie principalmente all'attuazione di specifiche politiche di sviluppo e di prevenzione volte a favorire la tutela dell'ambiente naturale, si è riscontrato sul territorio italiano un graduale miglioramento della qualità dell'aria.

Numerosi studi e ricerche sul campo hanno evidenziato una riduzione, seppure lenta, delle concentrazioni in aria dei principali inquinanti atmosferici, in particolare di PM10 e NO<sub>2</sub>, avvenuta grazie all'abbattimento delle emissioni generate dagli scarichi degli autoveicoli e dai processi di combustione civili ed industriali. I risultati positivi raggiunti sono la conseguenza tanto del miglioramento delle tecnologie impiegate nei processi di combustione e di quelle per l'abbattimento dei fumi, quanto dell'utilizzo di combustibili meno inquinanti (i.e. il gas naturale).

Tuttavia, fermo restando quanto appena detto, si segnala ancora un'elevata presenza nell'aria di particolato atmosferico, di biossido di azoto, di ozono troposferico e livelli atmosferici in crescita per il benzo(a)pirene. Le concentrazioni preoccupanti di questi inquinanti sono originate dalle crescenti emissioni di particolato e dalla combustione delle biomasse per il riscaldamento domestico. Negli ultimi anni è stato registrato infatti un crescente utilizzo di legname per il riscaldamento delle abitazioni favorito sia dal basso prezzo di mercato del legno, sia dalla diffusa convinzione che si tratti di combustibile ecosostenibile [17].

In Italia questa situazione riguarda principalmente le grandi aree urbane nonché svariate zone del bacino padano, per le quali è stato sottoscritto nel dicembre 2013 un apposito "Accordo di programma per l'adozione coordinata e congiunta di misure di risanamento della qualità dell'aria" da parte di cinque ministeri e otto regioni del bacino padano [18].

In quest'ultime aree, come risulta dal Rapporto Aree Urbane ed. XIII, nel 2016 il valore limite giornaliero del PM10 è stato superato in 33 aree urbane, principalmente localizzate al Nord, ma si registrano superamenti anche in alcune zone del Centro-Sud e in Sicilia.

Per quanto riguarda il PM2,5, invece, è emerso un maggior rispetto dei limiti imposti dal D.Lgs. 155/2010. Infatti, il valore limite è stato superato in 6 aree urbane localizzate nel Nord Italia e nella città di Terni.

Per quanto concerne l'ozono, il valore limite fissato come obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana è stato superato nel 2016 nella maggior parte delle zone monitorate, ovvero in 80 aree urbane su 91.

Il valore limite annuale per la protezione della salute umana relativo al biossido di azoto è stato superato soltanto in 21 aree urbane (la concentrazione media più alta di 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  è stata registrata a Torino), mentre il limite orario (non più di 18 superamenti di 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) è stato rispettato in tutte le altre aree urbane.

In ultimo, i dati per il benzo(a)pirene, disponibili solo per 60 aree urbane principalmente localizzate nel Nord Italia, hanno evidenziato il superamento del valore obiettivo (1,0  $\text{ng}/\text{m}^3$  come media annua) in 11 aree urbane [19].

Sulla base dei dati forniti dall'Inventario Nazionale delle Emissioni elaborato da ISPRA, ora vengono analizzate le principali sorgenti che producono emissioni nell'atmosfera di sostanze inquinanti. I settori produttivi maggiormente responsabili di questo fenomeno sono: il trasporto stradale e non, i processi di produzione di energia e trasformazione di combustibili, i processi di combustione industriale e non industriale e l'uso di solventi [20].

### **3.1.1 Ossidi di zolfo**

Gli ossidi di zolfo sono emessi per volatilizzazione da combustibili contenenti zolfo e dai vulcani. Le emissioni di  $\text{SO}_x$  sono responsabili dell'acidificazione dell'atmosfera e provocano attraverso le cosiddette piogge acide effetti negativi sull'ambiente e sui materiali. Essi sono originati principalmente nel settore del trasporto stradale. È importante sottolineare che le concentrazioni di ossidi di zolfo hanno subito nel 2015 una riduzione del 99,7% arrivando a pesare per circa lo 0,3% sul totale emesso a livello nazionale, grazie ai vincoli introdotti sul tenore di zolfo presente nei combustibili.

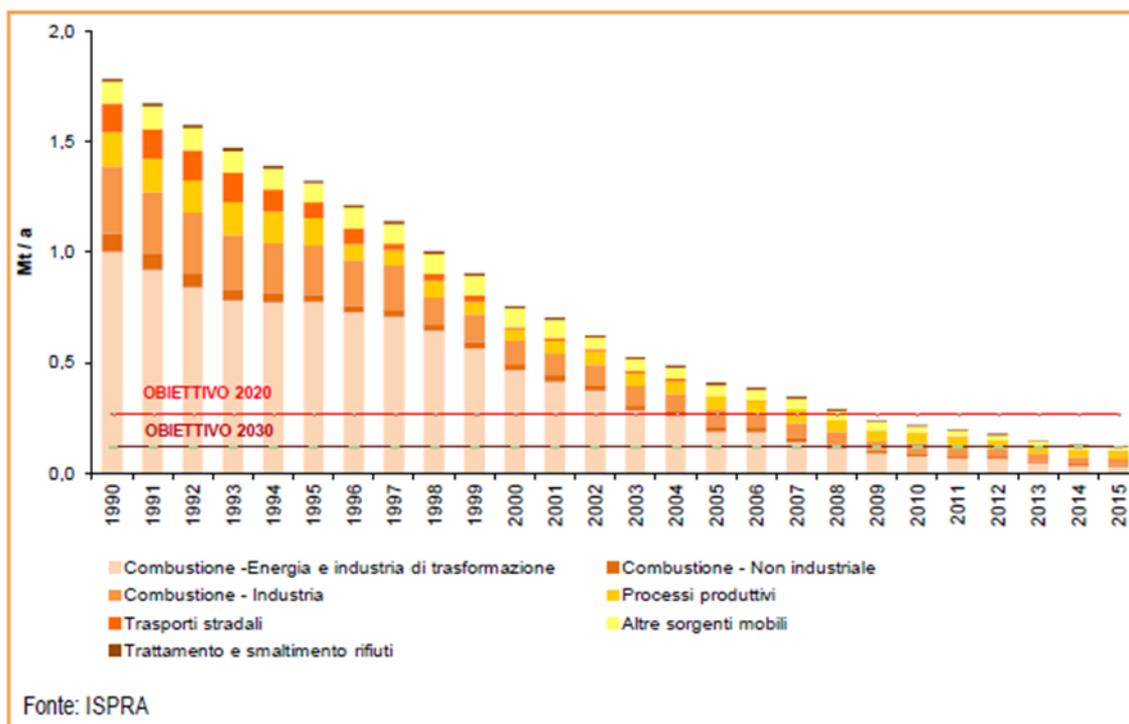


Figura 3.1: Emissioni nazionali di ossidi di zolfo per settore [20]

### 3.1.2 Ossidi di azoto

Gli ossidi di azoto si formano dai processi di combustione ad alte temperature. Le fonti principali sono i trasporti, gli impianti di riscaldamento, la combustione industriale e la produzione di elettricità.

Le emissioni di  $\text{NO}_x$  derivano in gran parte dal settore del trasporto stradale (51,7%) e in maniera minore dal contributo di altre sorgenti mobili (16,9%), dalla combustione non industriale (11,4%), dalla combustione industriale (8,5%) e dalla combustione nel settore della produzione di energia e dell'industria di trasformazione (6,8%).

Per queste sostanze inquinanti si riscontra una riduzione a partire dal 1990 pari al 58,2%.

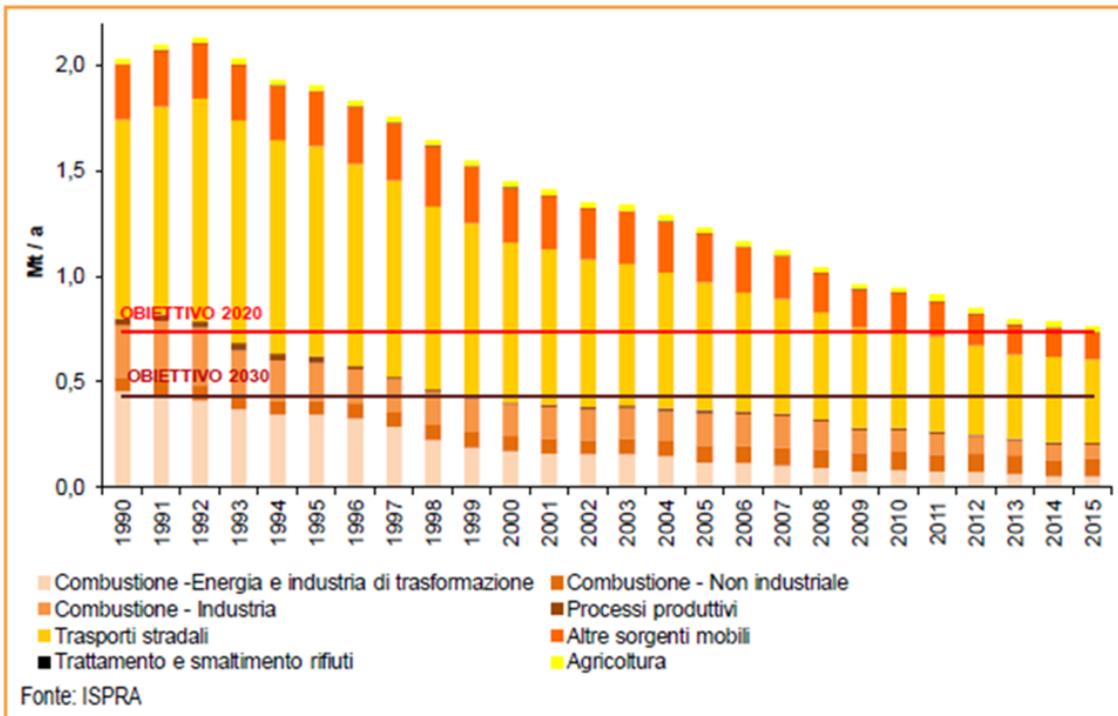


Figura 3.2: Emissioni nazionali di ossidi di azoto per settore [20]

### 3.1.3 Composti organici

I composti organici volatili non metanici insieme agli ossidi di azoto sono precursori dell'ozono troposferico, il quale si forma mediante reazioni fotochimiche durante il periodo estivo e crea effetti negativi alle persone, agli ecosistemi e ai beni storico-artistici.

Le principali sorgenti dei CONVM sono i trasporti, altri processi di combustione e soprattutto l'uso di solventi. Infatti, quest'ultimo è il settore che maggiormente contribuisce alla loro diffusione, più precisamente con il 41,9% nel 2015. Per quanto concerne gli altri settori, il trasporto stradale, che ha registrato un forte decremento dal 1990 pari all'83,3%, rappresenta il 17,1% delle emissioni mentre la combustione non industriale contribuisce per il 23,7%. Le emissioni di COVNM hanno fatto registrare una forte decrescita, pari al 56,5% dal 1990 al 2015.

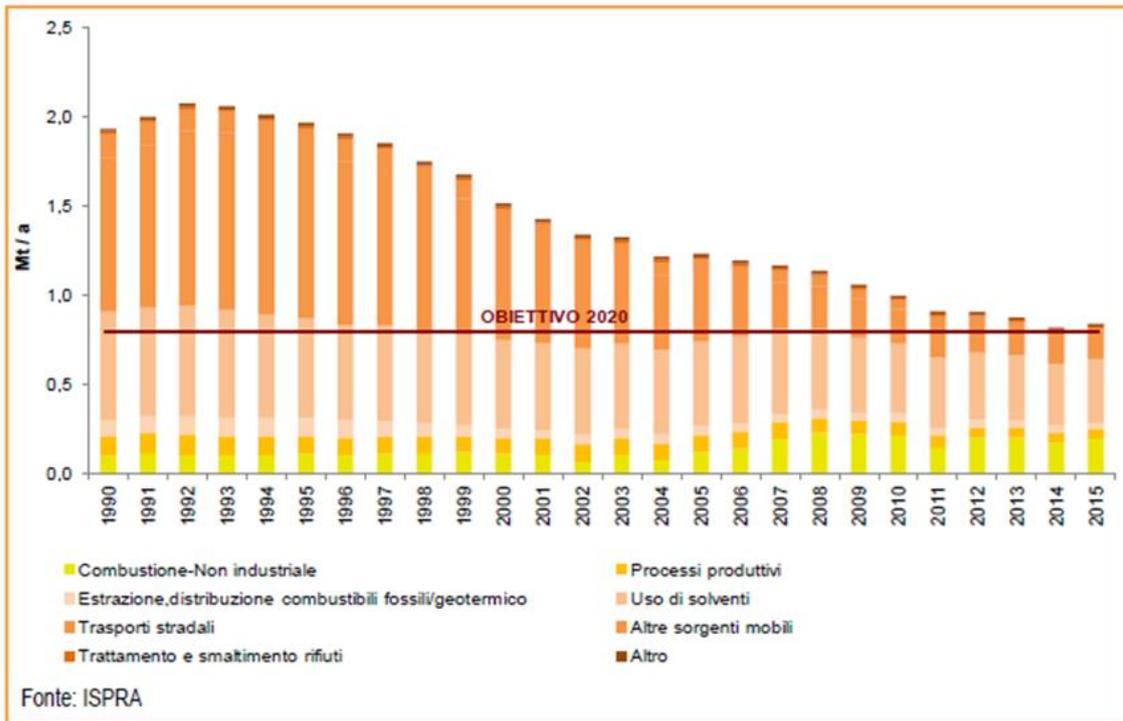


Figura 3.3: Emissioni nazionali di ossidi di CONVM per settore [20]

### 3.1.4 Particolato atmosferico

Il particolato atmosferico viene originato sia da fenomeni naturali, ad esempio l'erosione del suolo, l'aerosol marino e le emissioni vulcaniche, sia da attività antropiche, quali il traffico, il riscaldamento, i processi industriali e gli inceneritori. La loro pericolosità è dovuta soprattutto alle piccole dimensioni delle particelle, che ne favoriscono l'inalazione da parte delle persone.

Le emissioni di PM10 si sono ridotte del 34,1% a partire dal 1990 e sono dovute principalmente alla combustione non industriale per il 62,4% e ai trasporti su strada per il 12,2% (dati del 2015). Il settore della combustione per la produzione di energia e nell'industria di trasformazione partecipa alla formazione di particolato con lo 0,8% e il settore dei processi di combustione nell'industria con il 3,8%. Questi valori percentuali molto bassi denotano una forte decrescita di PM10 in tutti i settori, tranne che per il settore della combustione non industriale che ha subito invece una crescita nel periodo 1990-2015 del 64,5%.

Di minor rilievo sono le emissioni causate dalle attività agricole, dai processi produttivi e dalle altre sorgenti mobili, che pesano rispettivamente per il 7,2%, il 6,3% e il 5,5% sul totale, e che hanno registrato riduzioni rispettivamente pari al 36,1%, 49,0% e 68,6% dal 1990.

Anche le emissioni legate al trattamento e allo smaltimento dei rifiuti sono di piccola entità, infatti costituiscono l'1% del totale, ma a differenza delle altre registrano un aumento del 10,8% dal 1990.

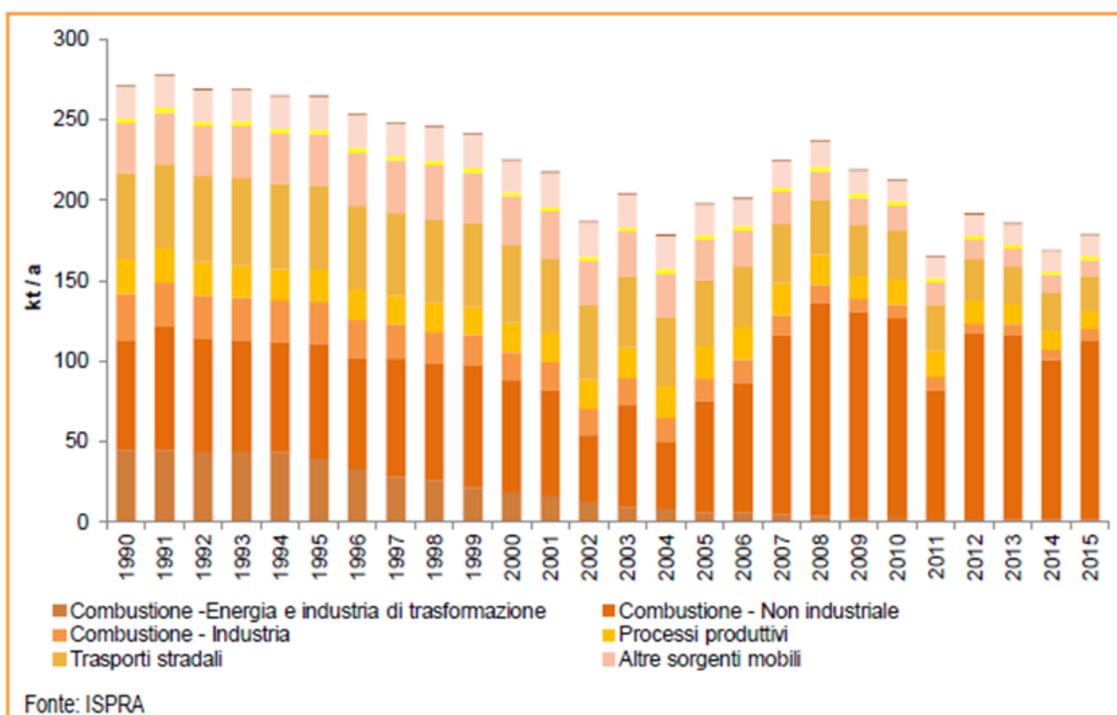


Figura 3.4: Emissioni nazionali di PM10 per settore [20]

### 3.1.5 Idrocarburi policiclici

Gli idrocarburi policiclici aromatici sono composti organici che derivano dai processi di produzione energetica, dalle attività industriali, dal traffico e da attività naturali come le eruzioni vulcaniche e gli incendi boschivi.

Essi sono ritenuti molto pericolosi a causa della loro tossicità e persistenza nell'ambiente e proprio per questo sono stati classificati dalla IARC come cancerogeni probabili.

Le emissioni di IPA hanno mostrato una riduzione complessiva del 17,1%, ma a differenza degli altri inquinanti, hanno mantenuto valori costanti dall'anno di riferimento 1990. Per contro la quota di emissioni del riscaldamento civile ha subito, durante tutto il periodo di riferimento, un forte incremento pari al 90,3%, a causa della crescita dei consumi di biomassa per il riscaldamento degli edifici.

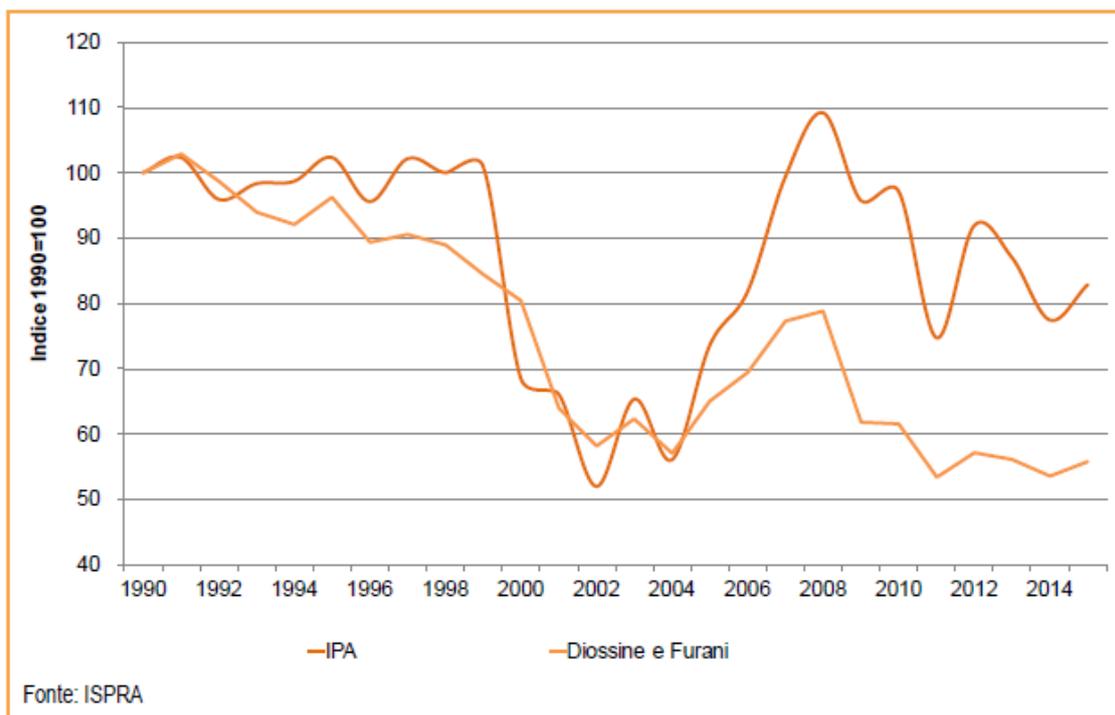


Figura 3.5: Trend delle emissioni nazionali di composti organici persistenti indicizzato al 1990 [20]

### 3.1.6 Monossido di carbonio

Il monossido di carbonio si crea a causa dell'incompletezza dei processi di combustione dovuta a carenza di ossigeno. Le fonti di emissioni sono gli impianti di combustione non industriale, gli autoveicoli, i processi produttivi e gli impianti di trattamento e smaltimento dei rifiuti.

Le emissioni di CO sono diminuite del 67,5% tra il 1990 e il 2015, grazie soprattutto al rinnovo del parco veicolare che ha determinato una riduzione del 90,7% delle emissioni nel settore del trasporto stradale. Per contro le emissioni derivanti dalla combustione non

industriale hanno registrato una forte crescita pari all'84,6%, portando il loro contributo nel 2015 al 62,3% delle emissioni totali.

I contributi alle emissioni del trasporto non stradale e dei processi di combustione in ambito industriale pesano sul totale rispettivamente per il 5,8% e il 3,8% e registrano una forte riduzione rispettivamente del 71,5% e del 70,8% dal 1990.

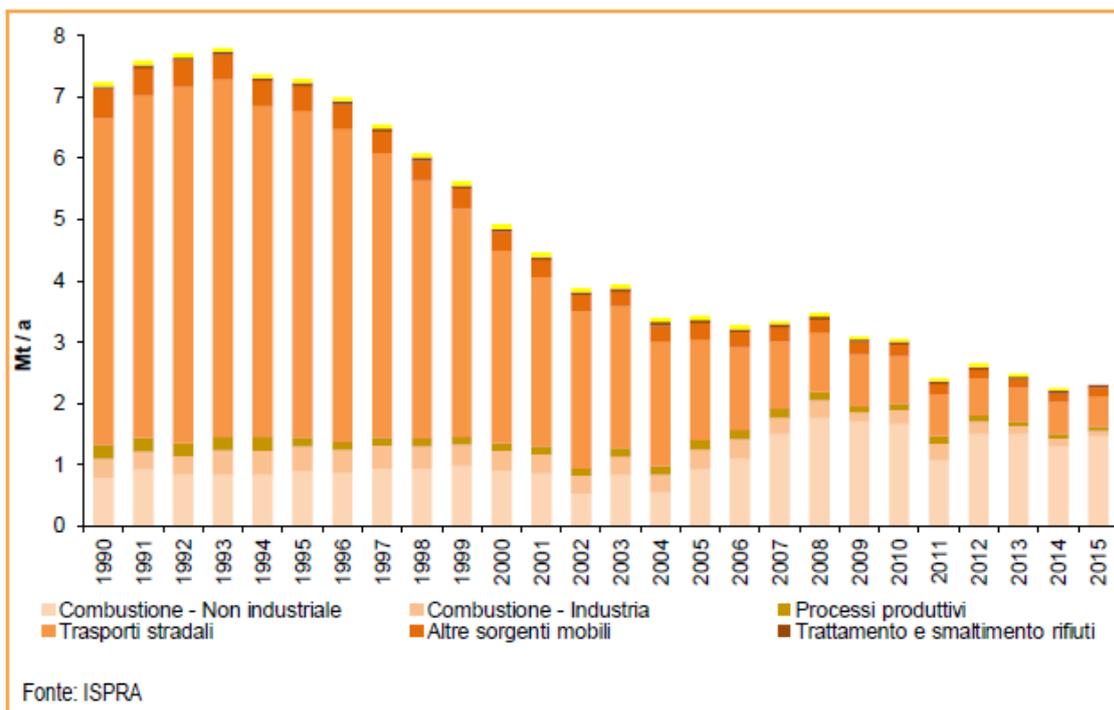


Figura 3.6: Emissioni nazionali di ossidi di CO per settore [20]

### 3.1.7 Benzene

Le emissioni di benzene sono dovute principalmente all'uso della benzina nei trasporti, all'uso di solventi e ai processi di volatilizzazione nei sistemi di stoccaggio e distribuzione dei carburanti. La fonte principale di questo inquinante è il trasporto stradale, in quanto esso viene emesso direttamente dallo scarico dei veicoli.

Le emissioni di benzene sono diminuite complessivamente dal 1990 al 2015 del 90,9%, in virtù dei miglioramenti introdotti nei processi di combustione nel settore del trasporto stradale e non stradale. Questi due settori hanno registrato rispettivamente una

diminuzione delle concentrazioni del 94,9% e del 90,3% e rappresentano nel 2015 una quota sul totale pari al 44,2% e al 12,4%. Anche le emissioni legate ai processi produttivi e all'uso di solventi diminuiscono rispettivamente del 69,7% e del 13,5%.

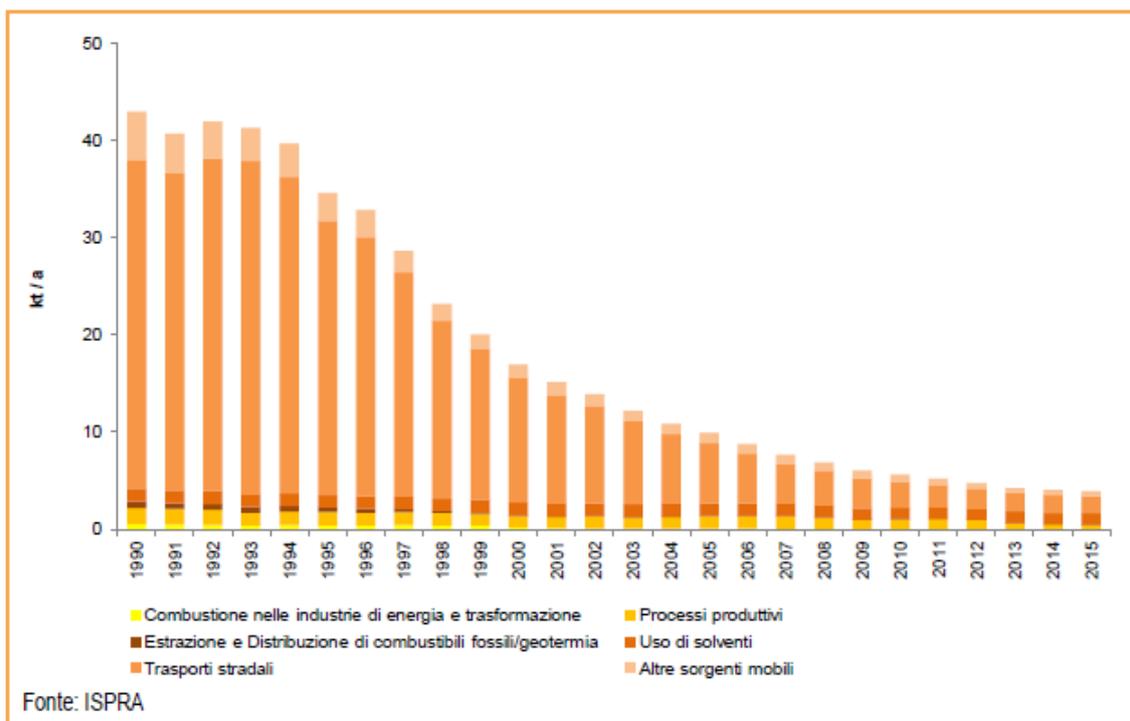


Figura 3.7: Emissioni nazionali di benzene per settore [20]

### 3.1.8 Metalli pesanti

I metalli pesanti sono prodotti in gran parte durante i processi di combustione industriale e non industriale, nelle attività produttive e nel settore energetico. La loro pericolosità è dovuta alla capacità di persistere nell'ambiente e di produrre effetti cancerogeni. Le emissioni dei metalli pesanti, quali il cadmio, mercurio e il piombo si sono ridotte rispettivamente del 36,6%, 29,4% e 94,1%, già a partire dai primi anni Novanta. Nel caso del cadmio e del mercurio, l'andamento decrescente è dovuto principalmente all'impiego di nuove tecniche nei processi della combustione industriale e dei processi produttivi, mentre per il piombo l'andamento positivo è dovuto soprattutto dall'impiego di benzine verdi. Attualmente il settore del trasporto stradale contribuisce alle emissioni di piombo con un valore medio inferiore al 5% del totale. Si registrano valori decrescenti anche per

le emissioni di cromo (50,8%), di rame (12,1%), di nichel (73,6%) e di zinco (11%). Per contro si riscontrano, invece, trend crescenti per le emissioni di arsenico (24,4%) e di selenio (9,2%).

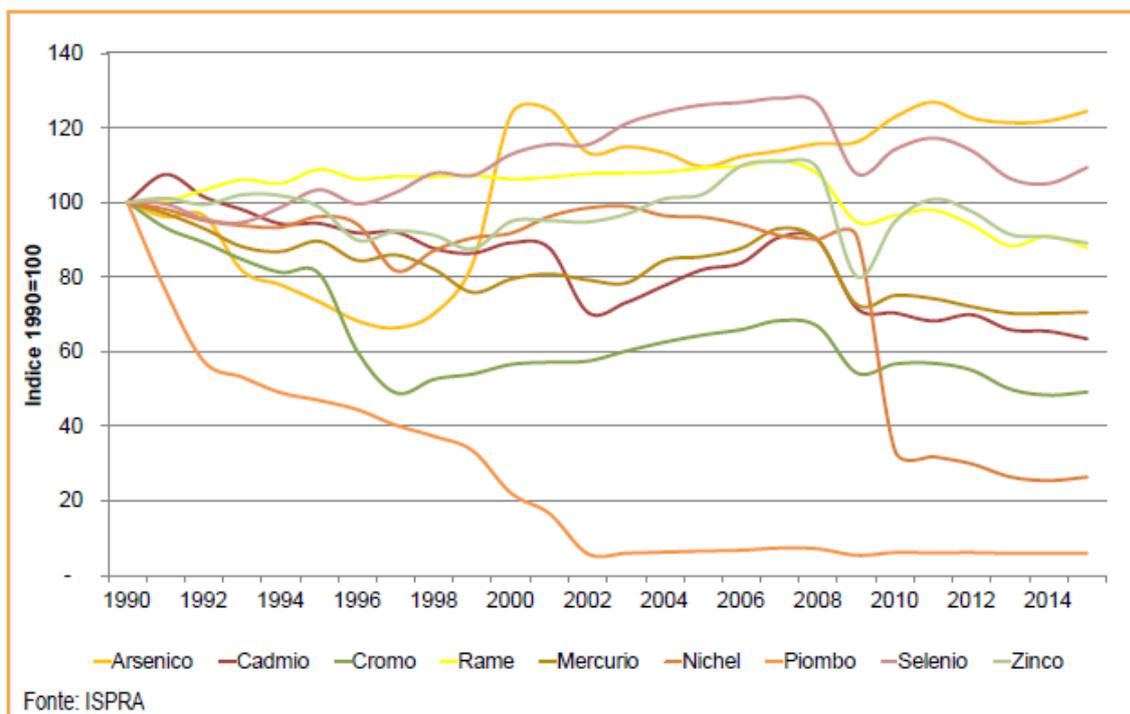


Figura 3.8: Trend delle emissioni nazionali dei metalli pesanti indicizzato al 1990 [20]

### 3.2 La qualità dell'aria in Emilia-Romagna

La situazione della qualità dell'aria in Emilia-Romagna, regione di interesse per il caso studio di questo elaborato, è analizzata facendo riferimento ai dati degli inquinanti atmosferici elaborati quasi in tempo reale dall'ente pubblico ARPA Emilia-Romagna.

Nel 2017 i valori di particolato atmosferico PM10 hanno superato il valore limite giornaliero di  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per oltre 35 giorni (numero massimo definito dalla normativa vigente) in 27 delle 43 stazioni della rete di monitoraggio regionale. Il maggior numero di superamenti sono stati registrati nelle stazioni di Piacenza/Giordani Farnese, Reggio Emilia/Timavo e Modena/Giardini (83), seguite da Parma/Montebello (74) e Colorno/Saragat (Pr) e Parma/Cittadella (69). A livello provinciale, la soglia dei 35 superamenti è stata raggiunta a Piacenza in 2 stazioni su 4, a Parma (3 su 4), a Reggio

Emilia (4 su 5), a Modena (6 su 6), a Bologna (3 su 7), a Ferrara (4 su 4), a Ravenna (2 su 4), a Forlì-Cesena (1 su 5), a Rimini (2 su 4). Risulta migliore la situazione relativa alla media annua ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), in quanto il valore limite è stato rispettato in tutte le 43 stazioni della rete di monitoraggio regionale.

Il valore limite per la media annuale di  $\text{PM}_{2,5}$  ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) è stato superato in due stazioni, Besenzone/Pc (27) e Guastalla/Re (26), delle 24 stazioni che effettuano il monitoraggio. La stazione di Besenzone aveva presentato valori oltre i limiti anche nel 2015. In generale nel 2017 i valori più elevati di  $\text{PM}_{2,5}$  sono stati registrati dalle stazioni poste al centro della Pianura Padana e le differenze tra città e campagna risultano trascurabili.

La situazione delle polveri in Emilia-Romagna è stata analizzata mettendo a confronto l'andamento del 2017 con gli andamenti degli anni precedenti. Dall'analisi è risultato che le concentrazioni del 2017 sono state superiori a quelle osservate nel 2016, simili a quelle misurate nel 2015 e inferiori rispetto agli anni fino al 2010.

Il limite per la media annuale del biossido di azoto ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) è stato superato in quattro stazioni su 47. In particolare i superamenti sono stati registrati a Reggio Emilia/Timavo ( $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Modena/Giardini ( $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Modena/Fiorano ( $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e Bologna/Porta San Felice ( $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Nel 2016 hanno rilevato valori superiori ai limiti quattro stazioni (Modena/Giardini, Fiorano Modenese/San Francesco, Bologna/San Felice, Rimini/Flaminia), nel 2015 cinque e nel 2014 quattro.

Per l'ozono il valore obiettivo per la protezione della salute ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  di media massima giornaliera calcolata su 8 ore nell'arco di 1 anno) è stato superato in gran parte delle stazioni. Il limite di 25 superamenti per la media sui 3 anni è stato rispettato soltanto nelle stazioni di Villa Minozzo/Febbio (Re) e Porretta Terme/Castelluccio (Bo).

I valori di biossido di zolfo, benzene e monossido di carbonio sono risultati tutti entro i limiti di legge.

Per comprendere meglio i risultati delle analisi effettuate, va ricordato che le condizioni meteorologiche nel 2017 sono risultate molto favorevoli all'accumulo degli inquinanti, a causa del verificarsi di condizioni di alta pressione, assenza di precipitazioni e scarsa ventilazione per lunghi periodi.

In ultimo vengono riportati i contributi alle emissioni inquinanti in Emilia-Romagna da parte di vari macrosettori di attività. I dati sono il risultato di stime effettuate grazie

all'ausilio del software INEMAR (INventario EMissioni ARia), database progettato per realizzare l'inventario delle emissioni in atmosfera.

Dall'inventario risulta che gli ossidi d'azoto sono principalmente prodotti dal traffico stradale, per una quota pari al 56,3% del totale. Contribuiscono alle emissioni di ossidi di azoto il trasporto non stradale per il 12,1%, la combustione industriale per il 15%, i processi di combustione non industriale per il 7,8% e in piccola parte l'incenerimento dei rifiuti per il 0,5%.

Le emissioni dei composti organici volatili (COV) sono imputabili a diverse attività, quali l'agricoltura (34,1%), il trasporto stradale (10,9%), l'uso dei solventi (14,7%) e in piccola parte la combustione non industriale.

Le emissioni del particolato atmosferico, PM10 e PM2,5, sono generate principalmente dal settore della combustione non industriale (rispettivamente 52,3% e 59%) e dal settore del trasporto stradale (rispettivamente 27,2% e 23,8% sul totale).

Infine, le emissioni di ossidi di zolfo sono prodotte in gran parte dal settore della combustione industriale (62,2%) mentre quelle di monossido di carbonio dal settore del trasporto stradale (47,1%) e dalla combustione non industriale (41,2%) [21].

Si riporta di seguito una rappresentazione grafica dei contributi alle emissioni da parte dei diversi settori.

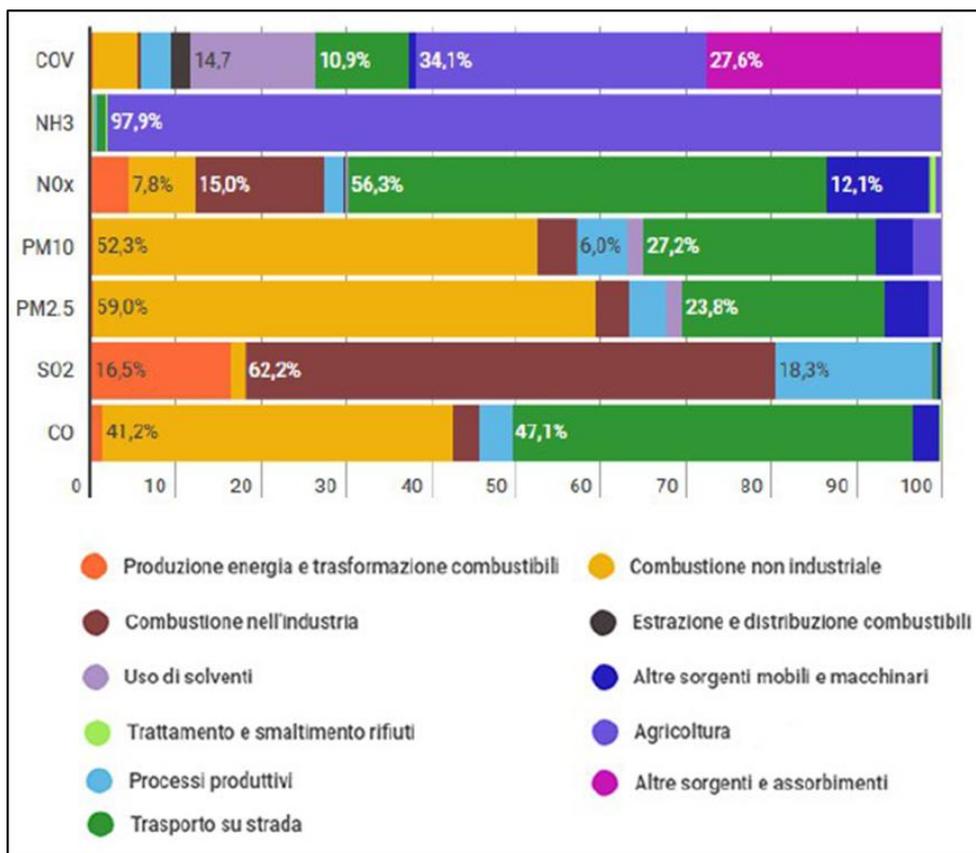


Figura 3.9: Fonti di inquinamento [21]

---

## 4. Descrizione del progetto

### 4.1 Scopo del progetto e origine dei dati

Il presente elaborato aveva, in un primo momento, lo scopo di proseguire il caso studio sviluppato dallo studente Andrea Angelini nella tesi intitolata “Metodologia per la stima dell’impatto sulla qualità dell’aria di sorgenti civili diffuse”, mediante la realizzazione di una campagna di monitoraggio dei fumi prodotti dall’impianto di riscaldamento della Facoltà di Ingegneria di Bologna situata in via Terracini [22].

L’attività di monitoraggio prevedeva l’utilizzazione di una centralina da installare il più possibile in prossimità del camino di una caldaia dell’impianto di riscaldamento, in grado di misurare emissioni di ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e di monossido di carbonio (CO).

Tuttavia, a causa di problematiche sopravvenute relative alla gestione del sistema di alimentazione elettrica e alla disattivazione delle caldaie, non è stato possibile attuare la campagna di monitoraggio dei fumi.

Si è deciso pertanto di utilizzare la medesima strumentazione per effettuare un’analisi dell’impatto delle emissioni del traffico veicolare sulla qualità dell’aria esterna.

Il lavoro di ricerca è stato sviluppato in tre fasi ben distinte. Nella prima fase si è proceduto alla taratura della centralina, nella seconda sono stati rilevati e analizzati i dati misurati dalla centralina, nell’ultima fase è stato effettuato il confronto tra i predetti dati e i dati relativi al flusso del traffico veicolare di Via Prati di Caprara.

La taratura dello strumento è stata effettuata confrontando i valori di concentrazione misurati dalla centralina con il valore di concentrazione media ottenuta da un campionatore passivo di biossido di azoto (posizionato accanto alla centralina), fornito dall’organizzazione che sviluppa il progetto "Aria Pesa".

Il progetto per il monitoraggio della qualità dell’aria “Aria Pesa” è stato realizzato mediante l’installazione di 340 campionatori passivi di  $\text{NO}_2$  (di cui 317 sono risultati validi), distribuiti a diversi utenti del comune di Bologna e del circondario bolognese, con la finalità di realizzare una rete aggiuntiva di monitoraggio dell’aria.

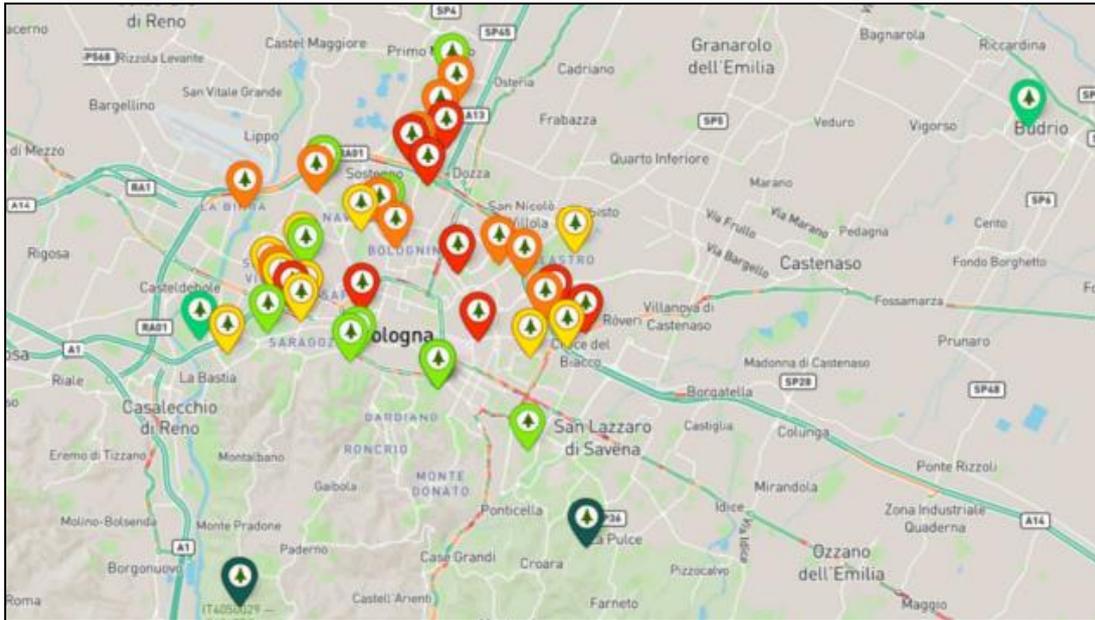


Figura 4.1: Distribuzione dei campionatori passivi di NO<sub>2</sub> utilizzati per il progetto Aria Pesa [23]

I due strumenti sono stati posizionati su un edificio di Via Terracini nei primi mesi dell'anno 2018. Più precisamente la fiala è stata installata il 29 gennaio e la centralina portatile l'8 febbraio. Successivamente il tappo della fiala è stato chiuso il giorno 26 febbraio e nei giorni seguenti lo strumento è stato inviato in Inghilterra per le analisi, mentre la centralina ha continuato a misurare fino al mese di aprile.



Figura 4.2: Posizione della centralina e della fiala Aria Pesa [29]



*Figura 4.3: Centralina e fiala Aria Pesa*

L'analisi dei dati restituiti dai campionatori passivi è stata resa possibile grazie al posizionamento di otto campionatori passivi nelle vicinanze delle centraline di ARPA. In particolare, essi sono stati posizionati quattro in Piazza di Porta San Felice e quattro ai Giardini Margherita.

L'analisi in termini relativi ha dimostrato una buona precisione per gli otto valori registrati, riportando un valore medio per il periodo pari a  $32,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per i Giardini Margherita e pari a  $52,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per Piazza di Porta San Felice.

Infatti, la deviazione standard fra le misure è risultata molto inferiore a quella teorica tenendo conto dell'errore riportato nella misura di laboratorio di analisi (7,8%). Nello specifico, la deviazione standard per i Giardini Margherita è risultata di  $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (1,5% della misura) e per Piazza di Porta San Felice di  $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (3% della misura). Ciò ha consentito di associare ai valori come errore di misura quello stimato dal laboratorio di analisi.

Per contro, l'analisi in termini assoluti, è risultata più difficoltosa a causa della differenza dei valori con le misure ARPA, le quali riportano una media delle misure del periodo pari a  $41,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per i Giardini Margherita e pari a  $68,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per Piazza di Porta San Felice. Tuttavia, l'analisi dei dati ha mostrato una differenza percentuale analoga e pertanto è stato realizzato un grafico a dispersione contenente la media dei valori dei Giardini Margherita rispetto a quelli di Piazza di Porta San Felice, che ha evidenziato una buona correlazione tra i dati grazie anche all'impiego della linea di tendenza passante per l'origine. Infatti, l'equazione della retta presenta un coefficiente angolare pari a 1,3 e tale valore può essere utilizzato come fattore di correzione utile per passare dai dati relativi ai dati assoluti [23].

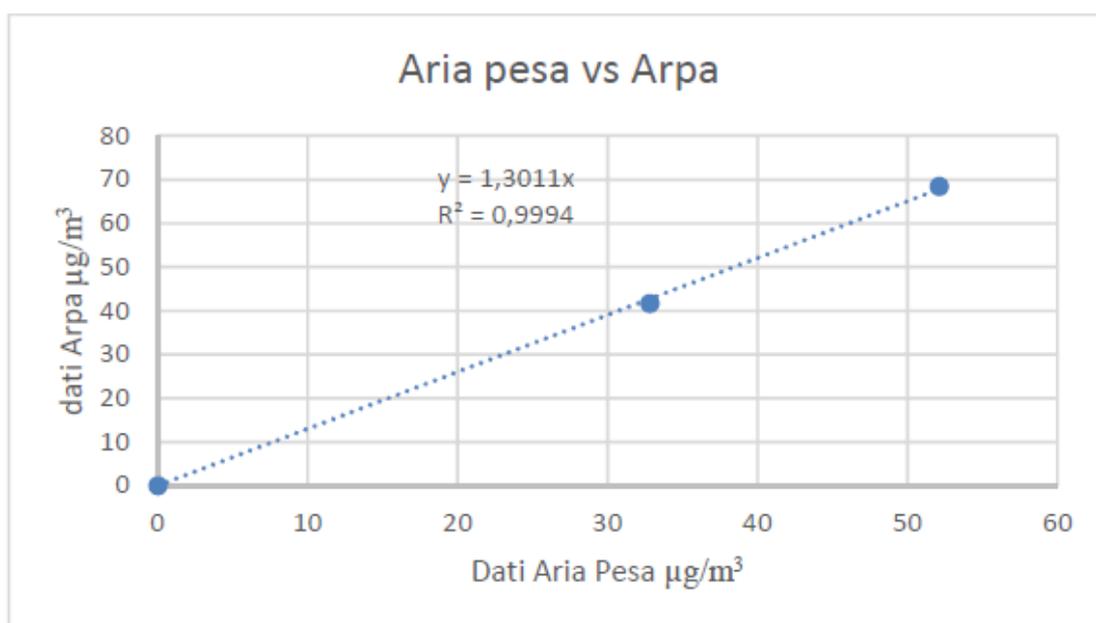


Figura 4.4: Confronto tra i dati Arpa e i dati Aria Pesa [23]

In una seconda fase, i dati misurati dalla centralina sono stati processati, analizzati ed infine calibrati in modo tale da poter condurre delle analisi su di essi nel periodo di osservazione scelto che va dall'8 febbraio al 21 aprile.

In considerazione del fatto che i dati della centralina non sono mai stati tarati è risultato necessario verificarne la coerenza in termini di andamenti nel tempo tenendo anche conto delle condizioni meteorologiche, che hanno una forte influenza sulla concentrazione nell'aria dei principali agenti inquinanti.

In particolare, sono stati esaminati i valori di diversi parametri, quali la direzione di provenienza e la velocità del vento, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa dell'aria, la radiazione visibile e la precipitazione. Questi valori sono stati rilevati nella stazione di Bologna Urbana situata nel comune di San Lazzaro di Savena, attraverso il sistema Dexter con il quale è possibile accedere al database del servizio Idro-Meteo-Clima di ARPAE.

A valle della calibrazione finale, è stato effettuato un confronto tra i dati misurati dalla centralina e i dati relativi al flusso del traffico veicolare di via Prati di Caprara, al fine di valutare l'esistenza di una possibile correlazione tra di essi in termini qualitativi e quantitativi.

A tal scopo sono stati richiesti i dati di traffico al signor Luca Matri funzionario del Dipartimento Cura e Qualità del Territorio del Comune di Bologna, il quale ha fornito una piantina dei sensori conta-traffico presenti sul territorio.



Figura 4.5: Piantina dei sensori conta-traffico

L'indisponibilità dei dati di traffico del tronco stradale di interesse ha portato a formulare l'ipotesi che i veicoli che transitano in Via Terracini sono in buona parte obbligati a raggiungere Via Prati di Caprara e pertanto per l'analisi sono stati considerati i dati di traffico di quest'ultima.

Il metodo di rilevamento del traffico di Bologna si basa sull'utilizzo di spire induttive, costituite da uno o più avvolgimenti di conduttore elettrico che vengono installati nella pavimentazione stradale. Le spire sono alimentate da un generatore di corrente e collegate a un dispositivo di conteggio. Il principio di funzionamento si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica che si manifesta quando un veicolo transita sulla spira generando un campo magnetico opposto a quello della spira. Questo fenomeno riduce l'induttanza della spira e di conseguenza determina un aumento della frequenza di oscillazione della corrente. Il tutto viene riprodotto dalla spira mediante dei segnali che vengono successivamente convertiti in forma digitale da un'unità elettronica [24].

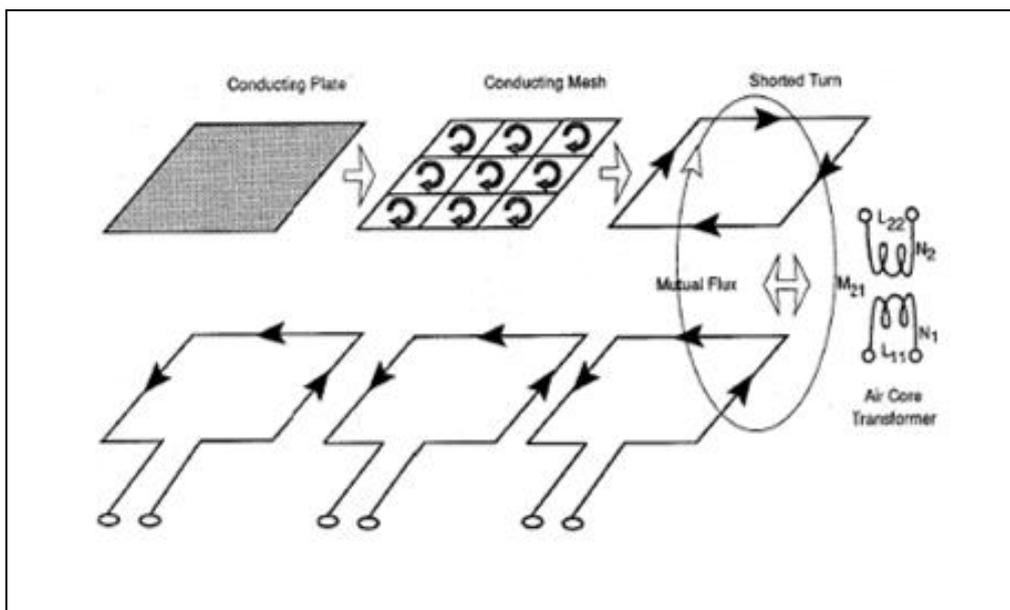


Figura 4.6: Schema di funzionamento elettromagnetico della coppia spira-veicolo [24]

I dati di traffico di Via dei Prati di Caprara calcolati in termini di giorno feriale medio, ovvero realizzando la media delle misure effettuate in due giorni lavorativi, sono stati rilevati considerando due direzioni: la direzione Sud che tiene conto del tratto stradale tra

Via dell'Ospedale e Via Emilia Ponente, e la direzione Nord che tiene conto del tratto stradale tra Via Emilia Ponente e Rotonda Granatieri di Sardegna.

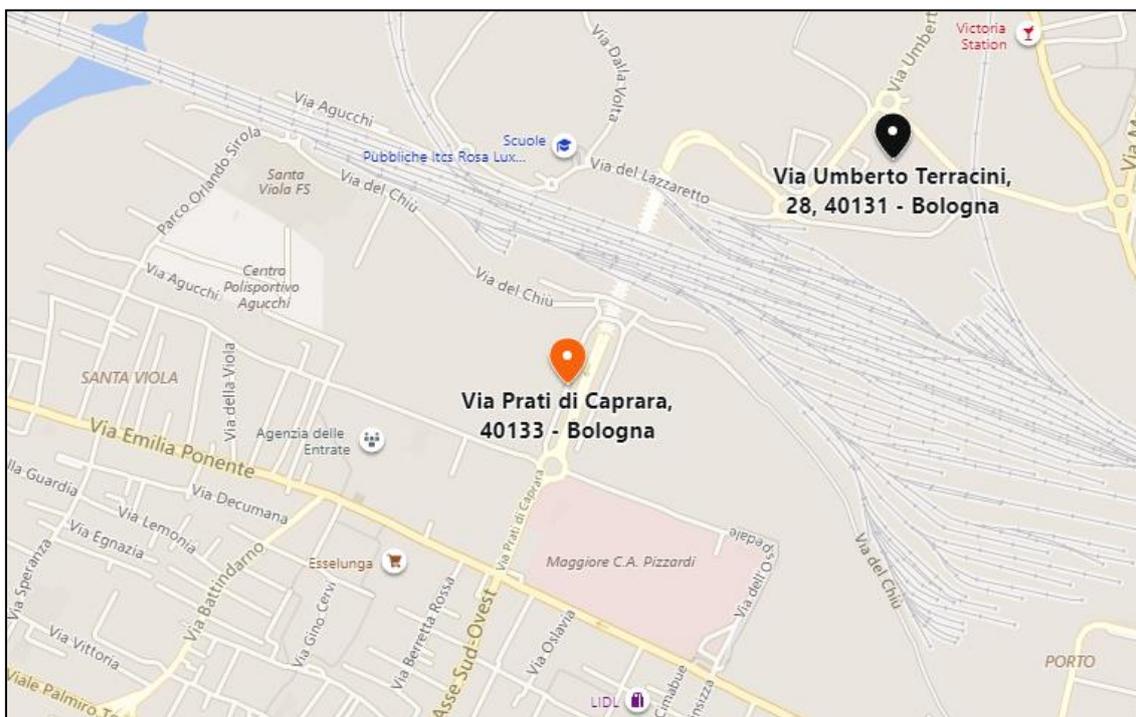


Figura 4.7: Mappa di Via dei Prati di Caprara e Via Umberto Terracini [29]

## 4.2 Descrizione dei campionatori

Per la realizzazione del progetto sono stati utilizzati due strumenti: la fiala e la centralina, che rispettivamente rientrano nella metodologia del campionamento passivo e attivo.

Il campionamento passivo è una tecnica ormai consolidata utilizzata per lo studio dell'inquinamento sia in ambienti interni dove le concentrazioni sono solitamente più elevate, sia in ambienti esterni per la verifica dei limiti di qualità dell'aria.

La fiala è costituita da un tubo della lunghezza di pochi centimetri all'interno del quale si diffondono gli inquinanti grazie alla creazione di un gradiente di concentrazione dato dalla differenza tra il valore massimo alla bocca aperta del tubo e il valore minimo sull'altro lato del tubo. In questo modo realizzandosi un flusso continuo di inquinanti all'interno del tubo, non è necessario l'impiego di un dispositivo per l'aspirazione

dell'aria. È, altresì, presente all'interno del tubo una sostanza assorbente (trietanoloammina) che reagendo con il biossido di azoto è in grado di trattenerlo.

Grazie alle sue caratteristiche, il campionatore passivo è in grado di restituire soltanto valori di concentrazione mediati su più giorni o settimane, diversamente dal campionatore attivo che consente di ottenere concentrazioni istantanee [25].

Va segnalato che questa tecnica presenta diversi vantaggi: il basso costo, l'assenza di manutenzione, lo scarso ingombro e la possibilità di campionare senza bisogno di alimentazione elettrica [26].



*Figura 4.8: Campionatore passivo di NO<sub>2</sub> [5]*

Relativamente al campionamento attivo, nel caso in esame è stata realizzato mediante l'utilizzo della centralina U-monitor, costituita da sensori di gas a semiconduttore, dispositivi che sfruttano un elemento sensibile alla concentrazione di gas e un elemento scaldante chiamato "heater".

Il principio di funzionamento si basa sul rilevamento di una resistenza elettrica che risulta proporzionale alla concentrazione di diversi tipi di gas presenti nell'aria circostante il sensore. Questa tensione viene poi inviata ad un sistema di misura composto da un convertitore analogico-digitale e da un microcontrollore che effettua gli opportuni calcoli e conversioni per poter riportare il valore di tensione letto dal partitore ad una grandezza di misura, ovvero "parti per milione di concentrazione di gas" [27].

Il dispositivo raccoglie i dati ad una frequenza programmabile e li invia al Centro Elaborazione che li trasforma in informazioni e ne permette la visualizzazione in tempo reale.

Di seguito una rappresentazione grafica della centralina U-Monitor.



*Figura 4.9: Campionatore attivo U-Monitor [27]*



---

## 5. Analisi dei dati di monitoraggio

### 5.1 Taratura della centralina portatile

Il comitato scientifico di Aria Pesa, dopo aver elaborato i dati misurati dai campionatori passivi, ha redatto un report contenente i risultati della campagna di monitoraggio e le considerazioni conclusive dello studio.

Ogni utente partecipante al progetto ha ricevuto i valori della concentrazione media di NO<sub>2</sub> registrati dal proprio campionatore passivo dal giorno 29 gennaio al giorno 26 febbraio. Il campionatore di Via Terracini ha riportato un valore pari a 46,99 µg/m<sup>3</sup>.

Come già detto nel capitolo quarto di questo elaborato, dallo studio svolto dal comitato scientifico di Aria Pesa emerge che il confronto tra le misure delle fiale e le misure fornite dalle centraline ARPA ha dimostrato una buona precisione dei valori analizzati e ha fornito un fattore di correzione di 1,3 utilizzato per trasformare i dati relativi in dati assoluti.

Il valore corretto di concentrazione media di NO<sub>2</sub> misurato dalla fiala è risultato pari a 61,09 µg/m<sup>3</sup>.

Si è proceduto quindi ad inserire nel computer i dati delle misure rilevate dal campionatore attivo nei mesi di febbraio, marzo e aprile, che successivamente sono stati processati tramite il software Excel.

Per poter proseguire l'analisi i valori di concentrazione di NO<sub>2</sub>, espressi in ppm, sono stati convertiti in µg/m<sup>3</sup> secondo la formula:

$$c \left[ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{c [\text{ppm}] \times \text{PM}(\text{NO}_2)}{24,45} \times 1000$$

con PM(NO<sub>2</sub>) peso molecolare del biossido di azoto pari a 46,01 kg/kmol.

La fase di calibrazione dei dati è stata effettuata prendendo in considerazione per la centralina i valori relativi al periodo 8 febbraio - 7 marzo, in modo tale da avere dati riferiti ad una stessa base temporale per entrambi gli strumenti di rilevazione.

L'elaborazione dei dati della centralina ha restituito un valore di concentrazione media di NO<sub>2</sub> di circa 165000 µg/m<sup>3</sup>, un valore molto elevato che può essere giustificato dal fatto

che la fase di calibrazione dello strumento, che prevede una corretta conversione tra la tensione registrata dallo strumento e la concentrazione dell'inquinante, non è mai stata effettuata. Inoltre, questo dispositivo normalmente viene utilizzato in condizioni "indoor" per identificare trend e comportamenti di una sostanza inquinante e non permette quindi l'analisi dei dati in termini assoluti.

Infine, rapportando il valore di concentrazione media della fiala e quello della centralina, è stato calcolato il fattore di correzione della centralina che è risultato pari a circa 2700. Con questo fattore di correzione sono stati convertiti i valori di concentrazione di NO<sub>2</sub> misurati dalla centralina in tutto il periodo del monitoraggio.

## **5.2 Confronto con il valore limite orario e giornaliero**

I valori di concentrazione di NO<sub>2</sub> misurati dalla centralina, dopo essere stati calibrati, sono stati confrontati con i valori limite previsti dalla normativa vigente.

Nel secondo capitolo di questo elaborato è stato citato il D.Lgs. 155/2010 che fornisce valori soglia su differenti scale temporali da non superare per determinati inquinanti atmosferici.

Per il biossido di azoto il decreto fissa il valore limite annuale per la protezione della salute umana in 40 µg/m<sup>3</sup> e il valore limite orario in 200 µg/m<sup>3</sup> da non superare più di 18 volte l'anno.

In questa fase sono stati considerati i valori rilevati nel periodo che va dal giorno 8 febbraio al 7 marzo e quelli rilevati dal 23 marzo al 21 aprile.

Gli andamenti delle concentrazioni medie orarie dei due periodi sono stati confrontati e valutati tenendo conto delle differenti condizioni meteorologiche che caratterizzano i mesi di febbraio e aprile.

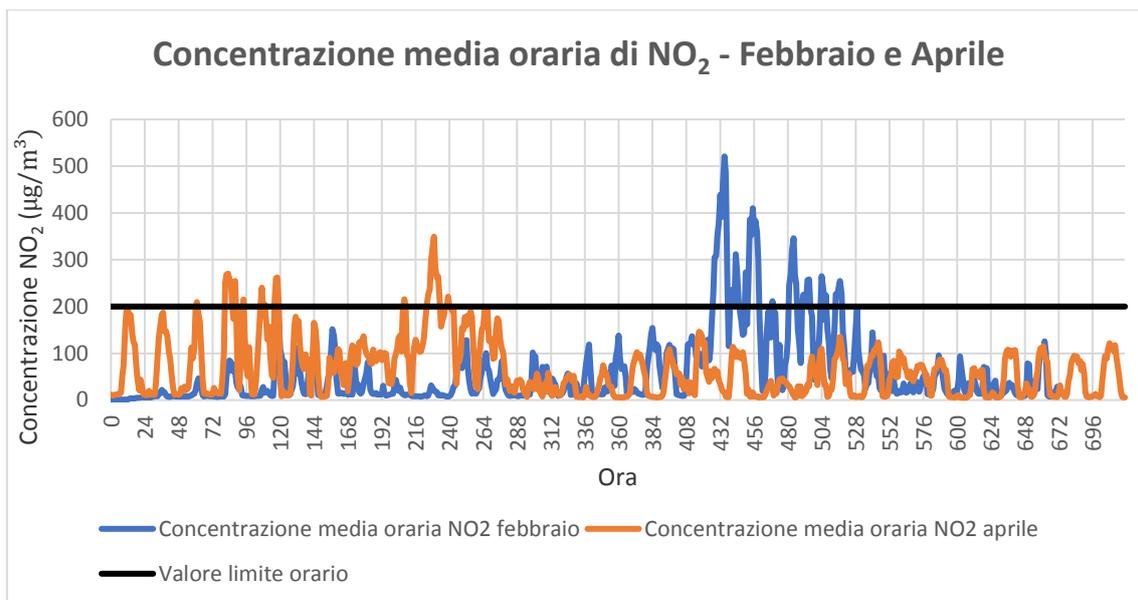


Figura 5.1: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del mese di febbraio e aprile

Dal grafico (Figura 5.1) è possibile osservare che in entrambi i mesi si hanno degli sforamenti del valore limite orario previsto dalla normativa. Più precisamente il numero di sforamenti registrati nel mese di febbraio è di cinque, mentre nel mese di aprile il valore limite orario 200 µg/m<sup>3</sup> è stato superato sei volte.

In totale quindi il numero di sforamenti nei due mesi considerati è stato pari a undici, un valore molto vicino al numero di sforamenti massimo che si può realizzare in un anno (18).

Con i dati disponibili è stata calcolata la proiezione annua degli sforamenti applicando la seguente formula:

$$\frac{\text{numero sforamenti in due mesi}}{58} \times 365 = \text{numero sforamenti in un anno}$$

Ponendo il numero di sforamenti nei due mesi pari a 11, la formula ha restituito un numero di sforamenti in un anno pari a 69. Ciò significa che il numero di sforamenti registrato nella zona di riferimento supera di quasi ben quattro volte quello ammesso dalla legge ed indica una situazione molto preoccupante per la salute delle persone.

Alle stesse conclusioni si perviene facendo il confronto tra il valore limite annuo di 40 µg/m<sup>3</sup> previsto dal dettato normativo e i dati dell'indagine. Infatti, con una concentrazione media del mese di febbraio pari a 61,09 µg/m<sup>3</sup> e una concentrazione media del mese di

aprile pari a 65,77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , il valore di concentrazione medio annuo, stimato mediante la formula:

$$\left(\frac{\text{concentrazione media febbraio} \times 28}{58}\right) + \left(\frac{\text{concentrazione media aprile} \times 30}{58}\right) \\ = \text{concentrazione media annua}$$

è risultato pari a 63,51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Dai dati rilevati emerge quindi una situazione allarmante visto che si verificano concentrazioni elevate non solo nel mese di febbraio, ma anche in quello di aprile. In quest'ultimo mese, caratterizzato da condizioni meteorologiche che normalmente favoriscono la dispersione degli inquinanti nell'aria, era prevedibile una situazione di minore criticità.

### **5.3 Qualità dell'aria di Via Terracini**

L'indagine sulla qualità dell'aria di via Terracini ha riguardato unicamente le concentrazioni di biossido di azoto  $\text{NO}_2$ , in quanto lo strumento è ancora in fase di sperimentazione e non è stato mai utilizzato per la misura, in valore assoluto, di altri inquinanti per i quali tra l'altro non erano disponibili misure di riferimento affidabili.

Il trend della concentrazione dell'inquinante è stato valutato mediante l'analisi delle medie giornaliere rilevate nel periodo di riferimento 8 febbraio – 7 marzo, riportate nel grafico seguente.



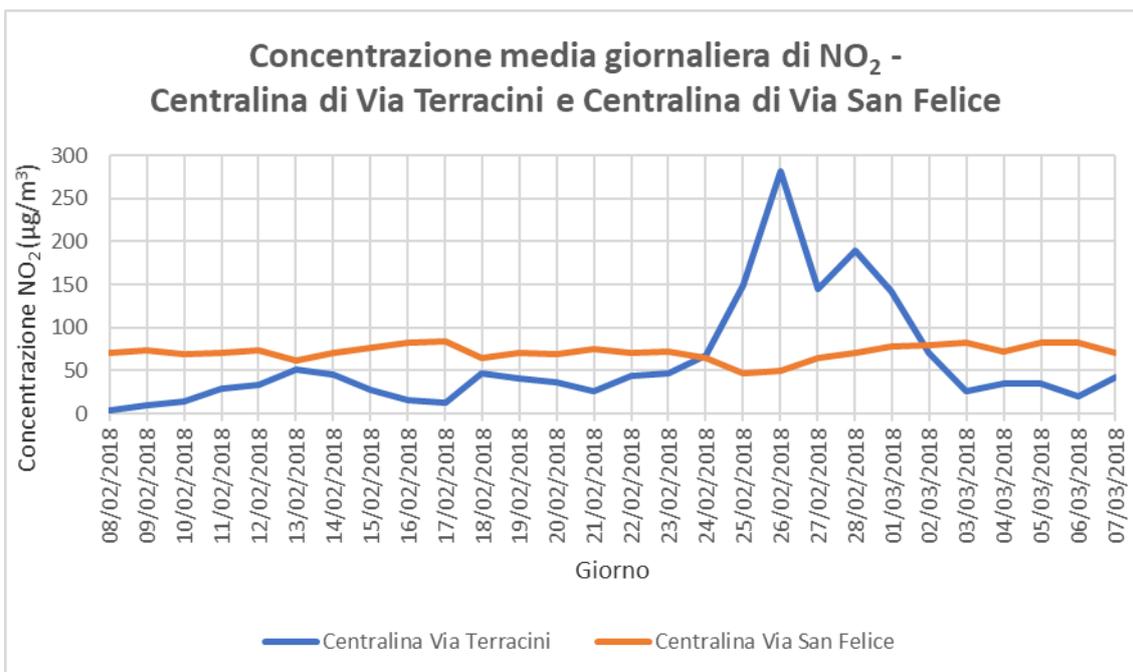
Figura 5.2: Andamento della concentrazione media giornaliera di NO<sub>2</sub> rilevate dalla centralina di Via Terracini

Il diagramma (Figura 5.2) non evidenzia grandi differenze di concentrazione tra i giorni feriali e il week-end della settimana, ma rileva una situazione alquanto anomala in corrispondenza del periodo che va dal 23 febbraio al 3 marzo, in cui si manifestano due grandi picchi di concentrazione.

Per capire meglio questo fenomeno si è proceduto all'analisi dei dati misurati dalla centralina ARPA situata in Via San Felice e dei dati relativi alle condizioni meteorologiche di quei giorni.

Il confronto dei dati ARPA con i dati della centralina (Figura 5.3) non ha fornito informazioni utili allo scopo del nostro studio. I dati della centralina ARPA non rilevano infatti picchi di concentrazione di NO<sub>2</sub> nel periodo 23 febbraio - 3 marzo.

I risultati differenti ottenuti possono essere spiegati se si tiene conto del fatto che le due situazioni esaminate presentano caratteristiche molto differenti, sia per quanto riguarda la tipologia e il posizionamento delle centraline rispetto alle sorgenti di inquinamento, sia per le caratteristiche morfologiche delle due aree.



*Figura 5.3: Andamento della concentrazione media giornaliera di NO<sub>2</sub> rilevate dalla centralina di Via Terracini e di Via San Felice*

Relativamente alla situazione metereologica sono stati presi in considerazione due dati meteo, ovvero la direzione del vento a 10 m dal suolo media giornaliera misurata in gradi e la precipitazione cumulata giornaliera. I valori delle condizioni meteo sono stati rilevati nella stazione di Bologna Urbana attraverso il sistema Dexter con il quale è possibile accedere al database del servizio Idro-Meteo-Clima di ARPA.

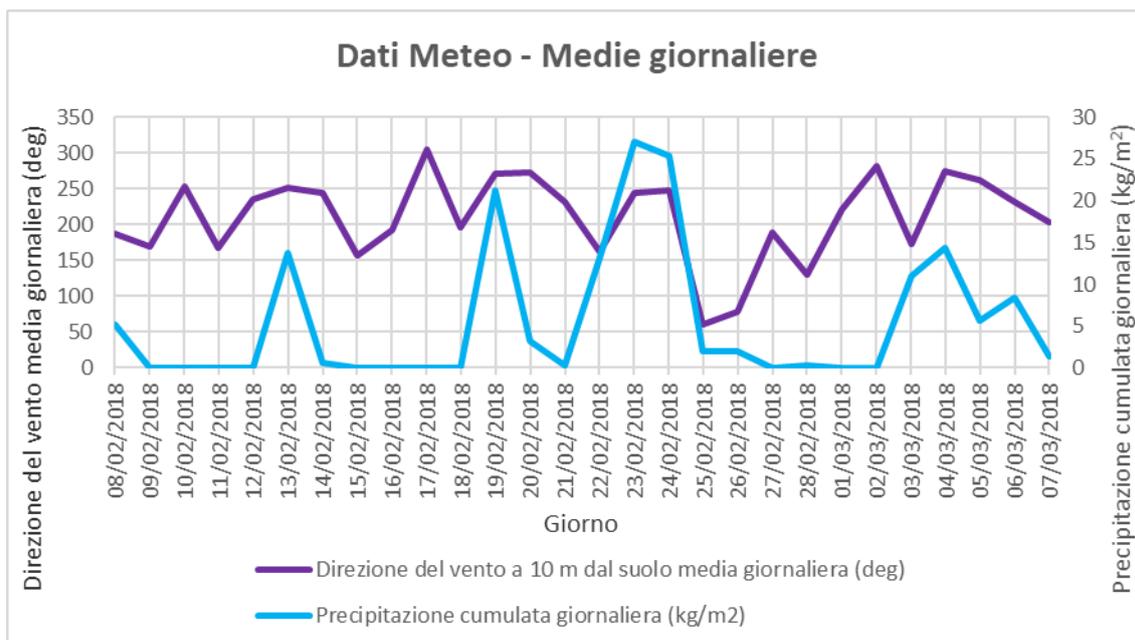


Figura 5.4: Medie giornaliere dei dati meteo del periodo 8 febbraio – 7 marzo

Dal grafico (Figura 5.4) si evince che nei giorni in cui si manifestano i grandi picchi di concentrazione la precipitazione è stata assente e tale condizione ha sicuramente favorito l'aumento delle concentrazioni di inquinante in atmosfera.

Dalla lettura del grafico si può constatare che la direzione di provenienza del vento ha subito variazioni notevoli in tutto il periodo considerato e questa circostanza ha consigliato di procedere ad una analisi più dettagliata del fenomeno.

A tal proposito, con l'ausilio del software "WRPLOT View" della Lakes Environmental, è stata realizzata la rosa dei venti ossia un diagramma polare costituito da un numero di settori che deve essere obbligatoriamente un multiplo di quattro.

In questo caso, ne sono stati considerati otto: Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ovest, Ovest e Nord-Ovest. Per ognuno di essi è stata calcolata la probabilità che il vento sia provenuto da quella specifica direzione, considerando successivamente diversi intervalli di velocità.

Per fare ciò sono stati scaricati dalla piattaforma Dexter i dati delle medie orarie scalari della direzione del vento a 10 metri dal suolo (deg), della velocità del vento a 10 m dal suolo (m/s) e della precipitazione cumulata su 1 ora (kg/m<sup>2</sup>).

Si riportano qui di seguito il diagramma della rosa dei venti (Figura 5.5) e la tabella contenente la distribuzione in frequenza delle classi di velocità media oraria vettoriale del vento (m/s) misurata a 10 metri dal suolo per direzione di provenienza (Tabella 5.1).

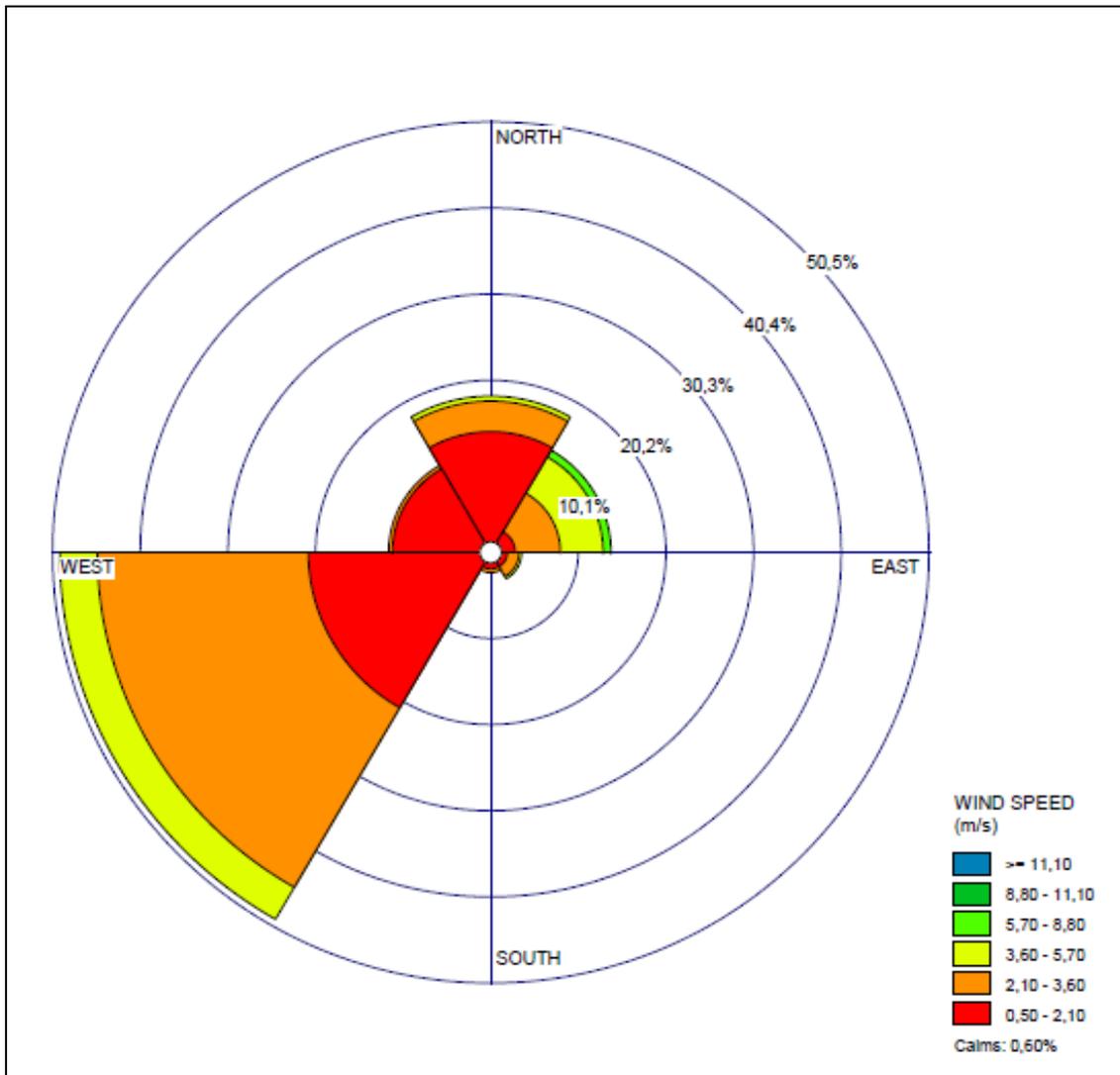


Figura 5.5: Rosa dei venti del periodo 8 febbraio - 7 marzo

Direzione / Classi del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
<b>N</b>	0,12	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
<b>NE</b>	0,03	0,04	0,04	0,01	0,00	0,00	0,12
<b>E</b>	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,06
<b>SE</b>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>S</b>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>SW</b>	0,14	0,10	0,03	0,00	0,00	0,00	0,27
<b>W</b>	0,14	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,31
<b>NW</b>	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
<b>Sub-Totale</b>	0,53	0,35	0,10	0,01	0,00	0,00	0,99
<b>Calme</b>							0,01

*Tabella 5.1: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del periodo 8 febbraio – 7 marzo*

Dal grafico (Figura 5.5) e dalla tabella (Tabella 5.1) si rileva che il vento predilige quattro direzioni di provenienza, ovvero il Nord, il Nord-Est, l'Ovest e il Sud-Ovest, assumendo velocità in tre diversi intervalli, ovvero  $0,50 \div 2,10$  m/s,  $2,10 \div 3,60$  m/s e  $3,60 \div 5,70$  m/s.

Da una attenta lettura di questi dati e tenendo presente la posizione della centralina (installata su un edificio situato di fronte a Via Terracini, Figura 5.6) è facile constatare che un vento proveniente da Nord-Est o da Sud-Ovest favorisce l'aumento delle concentrazioni di sostanze inquinanti misurate dalla centralina, poiché la direzione assunta dal vento è parallela alla direzione del tronco stradale e ciò permette allo strumento di rilevare la concentrazione di biossido di azoto generata dagli scarichi dei veicoli che transitano su tutto il tratto della strada. Invece quando il vento proviene da Nord-Ovest, con direzione perpendicolare a quella del tronco stradale, lo strumento rileva solo una parte della concentrazione di biossido di azoto, nello specifico quella che si origina nel tratto di strada posto di fronte alla centralina.



Figura 5.6: Via Umberto Terracini, 28 [29]

Per comprendere meglio l'azione dei principali fattori che hanno dato origine ai picchi di concentrazione di  $\text{NO}_2$  nel periodo 23 febbraio - 3 marzo, è stata svolta una analisi approfondita e dettagliata delle concentrazioni medie orarie dell'inquinante e delle condizioni metereologiche rilevate giornalmente, le cui rappresentazioni grafiche sono riportate in appendice.

### 5.3.1 Analisi del periodo 23 febbraio – 3 marzo

I grafici relativi alle concentrazioni di  $\text{NO}_2$  e alle condizioni metereologiche ottenuti nella fase iniziale dell'indagine indicano che l'andamento delle concentrazioni della sostanza inquinante non risulta compatibile con quello che normalmente ci si aspetterebbe, dal momento che i picchi di concentrazione si verificano in ore del giorno in cui non sono presenti sorgenti di emissione attive.

Questo fenomeno può essere spiegato considerando la dinamica delle reazioni chimico-fisiche che determinano la formazione del biossido di azoto.

In realtà, solo una minima parte di esso viene emesso direttamente in atmosfera durante le emissioni, poiché il biossido di azoto è prevalentemente un inquinante secondario che

si forma in seguito alla ossidazione del monossido di azoto NO secondo la reazione:  
 $2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2$  [28].

Per tenere conto di questo effetto tardivo, ossia del lasso di tempo che passa dal momento in cui vengono generate le emissioni del traffico veicolare a quello in cui avviene la formazione della sostanza inquinante effettivamente rilevata dallo strumento, l'andamento delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> è stato graficato con una traslazione di 18 ore, ottenendo così un trend più realistico. La bontà di questo risultato è stata convalidata anche dal confronto dei valori di concentrazione del biossido di azoto con i valori del flusso del traffico veicolare, analizzato nel paragrafo successivo.

A riprova di quanto detto si riporta il grafico relativo al giorno 1° marzo (giorno feriale), in cui è possibile apprezzare l'andamento delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> reale e quello traslato di 18 ore che risulta in linea con l'andamento del traffico veicolare (Figura 5.7). Inoltre, questo effetto tardivo dovuto alla reazione suddetta è stato osservato anche in altri studi più dettagliati come il monitoraggio dell'aria svolto esplicitamente per la valutazione dell'impatto sulla qualità dell'aria del progetto FI.Co [28].

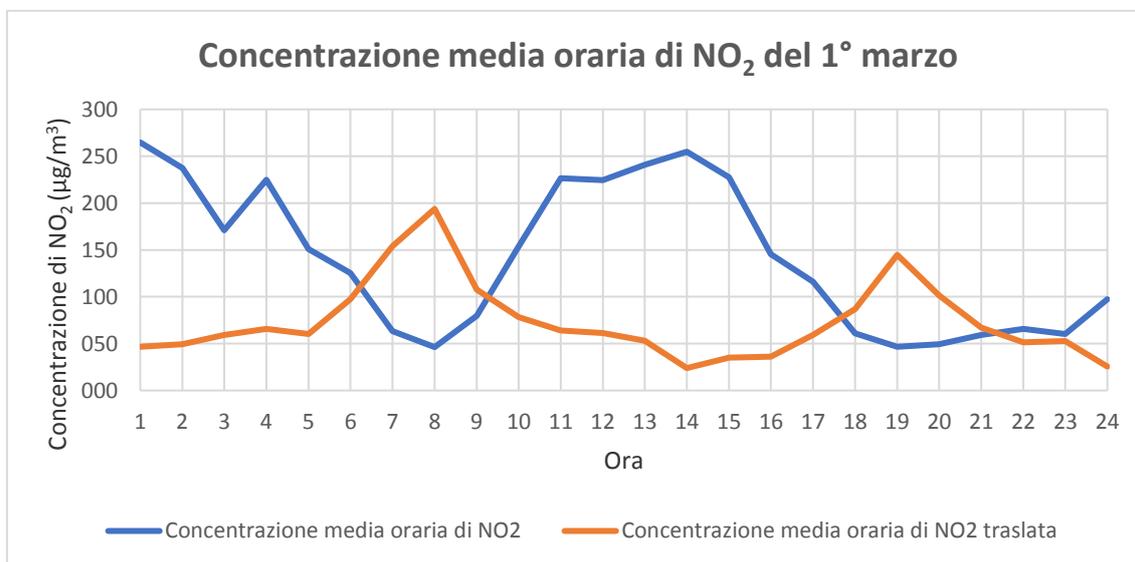


Figura 5.7: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 1° marzo

### **5.3.2 Condizioni metereologiche del periodo 23 febbraio – 3 marzo**

Per valutare correttamente gli andamenti delle concentrazioni degli inquinanti atmosferici è necessario inoltre analizzare i principali fattori metereologici di interesse per la loro dispersione, ovvero il vento e la stabilità atmosferica.

Per il vento si considerano due parametri, ovvero la direzione di provenienza e la velocità. Il primo risulta determinante per il trasporto orizzontale degli inquinanti, il secondo influenza il tempo di allontanamento dei gas dalle sorgenti di emissione e i meccanismi di accumulo.

La stabilità atmosferica indica se ed in quale misura sono favoriti i moti verticali dell'aria atmosferica che sono alla base della dispersione dei gas. Un'atmosfera stabile si manifesta in assenza di moti verticali, mentre un'atmosfera instabile è determinata dalla presenza di moti verticali favorevoli.

#### **5.3.2.1 Direzione e velocità del vento**

Generalmente per rappresentare la direzione di provenienza del vento, come già detto in precedenza, si realizza la rosa dei venti mediante il software “WRPLOT View” della Lakes Environmental.

Nel software sono stati inseriti i dati delle medie orarie scalari della direzione del vento a 10 metri dal suolo (deg), i dati della velocità del vento a 10 m dal suolo (m/s) e quelli della precipitazione cumulata su 1 ora ( $\text{kg/m}^2$ ).

Essi sono stati ottenuti dalla stazione di Bologna Urbana tramite il sistema Dexter che fa riferimento al database del servizio Idro-Meteo-Clima di ARPA.

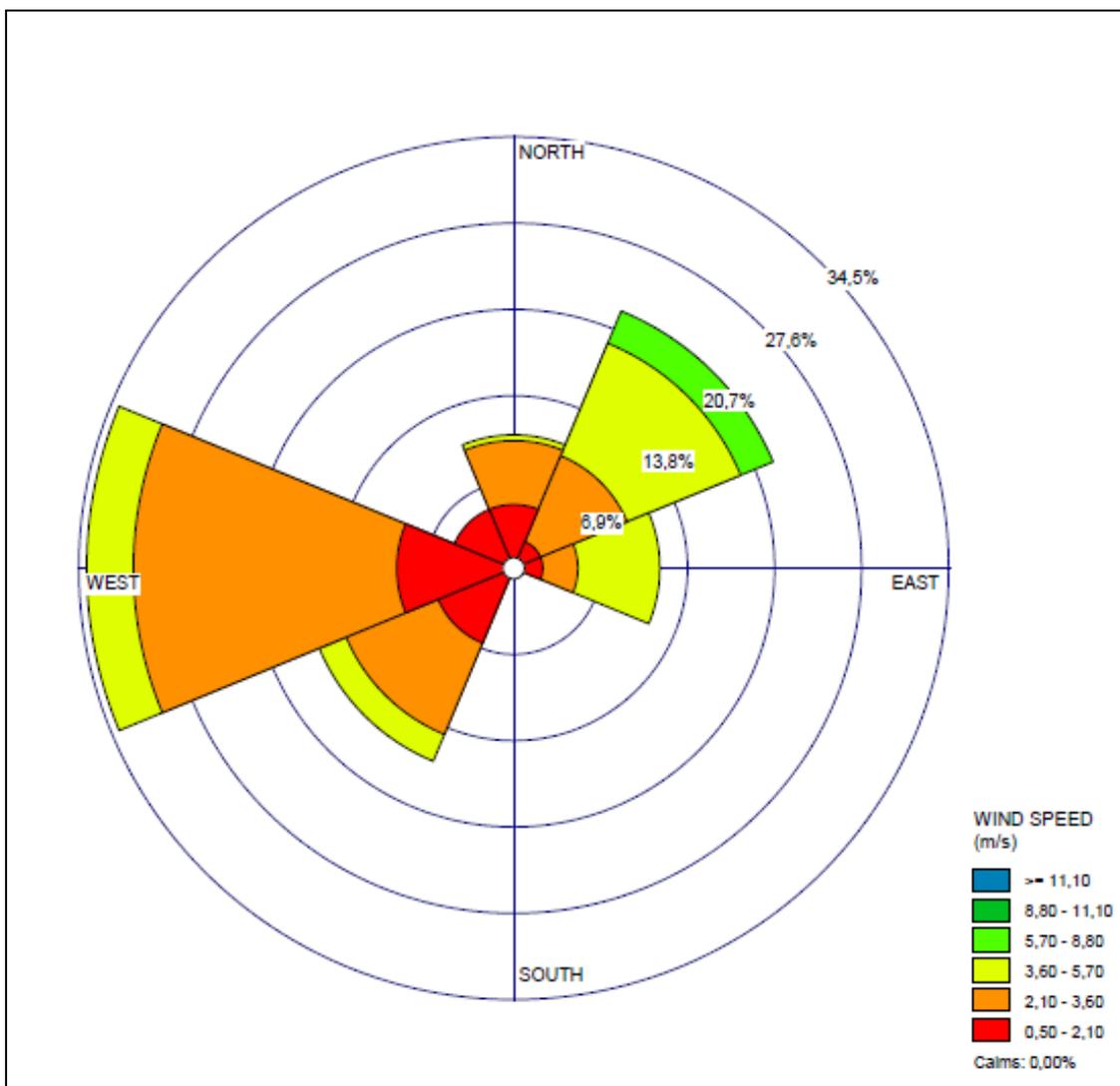


Figura 5.8: Rosa dei venti del periodo 23 febbraio – 3 marzo

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
NE	0,02	0,07	0,10	0,03	0,00	0,00	0,22
E	0,02	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00	0,12
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,06	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,17
W	0,09	0,21	0,04	0,00	0,00	0,00	0,34
NW	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
Sub-Totale	0,31	0,44	0,23	0,03	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 5.2: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del periodo

Dal grafico (Figura 5.8) e dalla tabella (Tabella 5.2) si riscontra che per il periodo considerato il vento è provenuto principalmente dalla direzione Nord, Nord-Est, Ovest e

Sud-Ovest, direzioni che, come già detto nel secondo paragrafo di questo capitolo, favoriscono la rilevazione delle concentrazioni dell'inquinante atmosferico da parte della centralina.

Dalla lettura del grafico a dispersione (Figura 5.9), che riporta i valori di concentrazione di NO<sub>2</sub> in funzione della direzione del vento media oraria, si evince che i valori più alti di concentrazione si verificano per le direzioni del vento assunte tra 0° e 45° (tra Nord e Nord-Est) e nell'intorno dei 225° (Sud-Ovest), come ci si attendeva in base alla disposizione reciproca della sorgente di inquinante (strada) e della centralina, precedentemente illustrata.

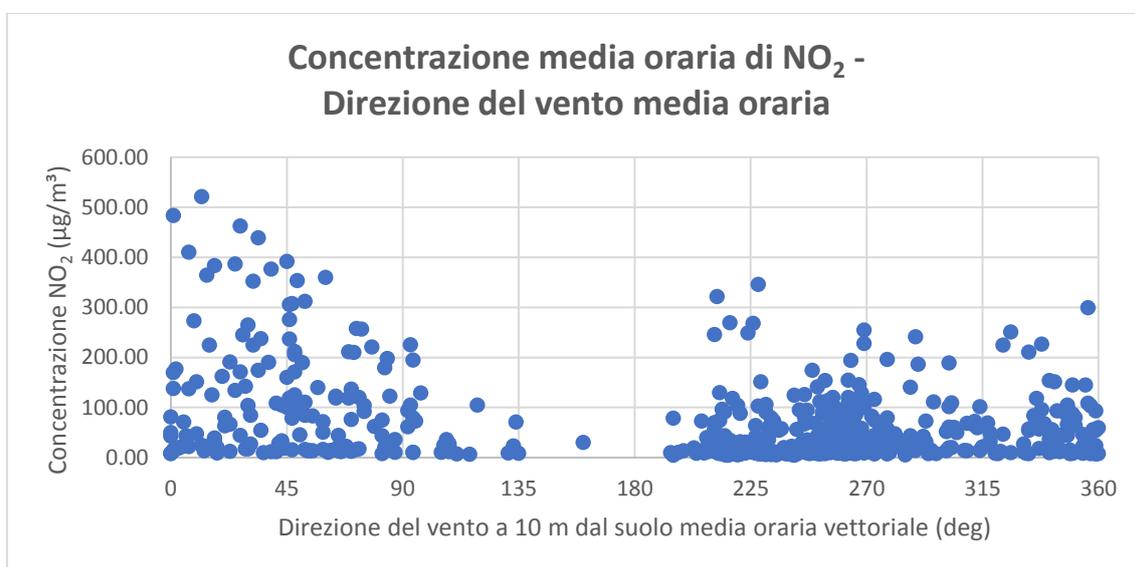


Figura 5.9: Concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> in funzione della direzione del vento media oraria

Le considerazioni sopra svolte consentono di spiegare l'andamento delle concentrazioni del 27 febbraio (Figura 5.10), giorno in cui la riduzione della concentrazione attesa nelle ore pomeridiane non si è verificata a causa del cambiamento della direzione del vento che ha favorito l'attività di rilevazione della centralina (Figura 5.11).

Inoltre, le concentrazioni elevate degli inquinanti in questo giorno possono essere state causate da valori di velocità del vento molto bassi che non favoriscono la dispersione degli inquinanti in atmosfera (Figura 5.12).

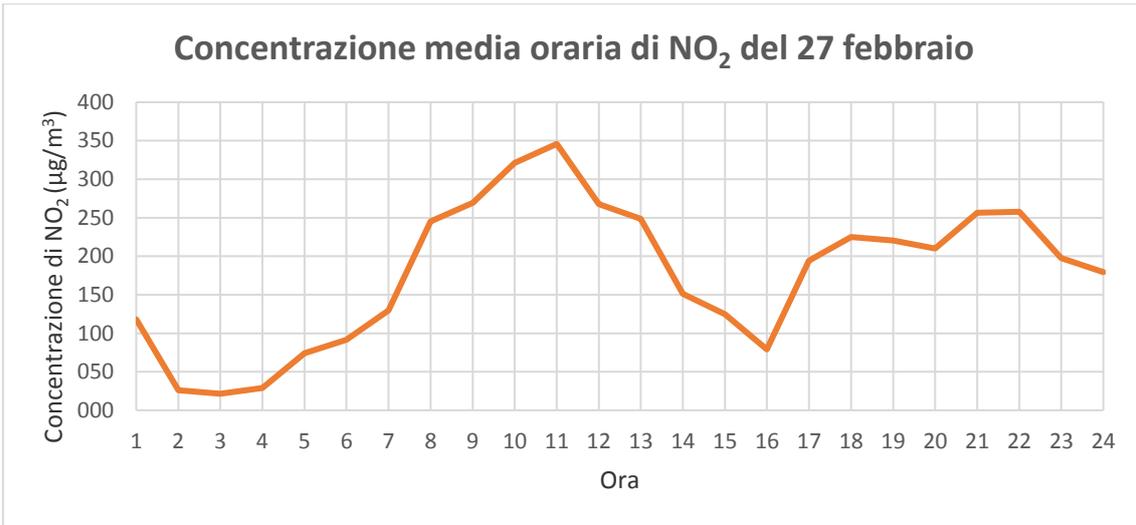


Figura 5.10: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 27 febbraio

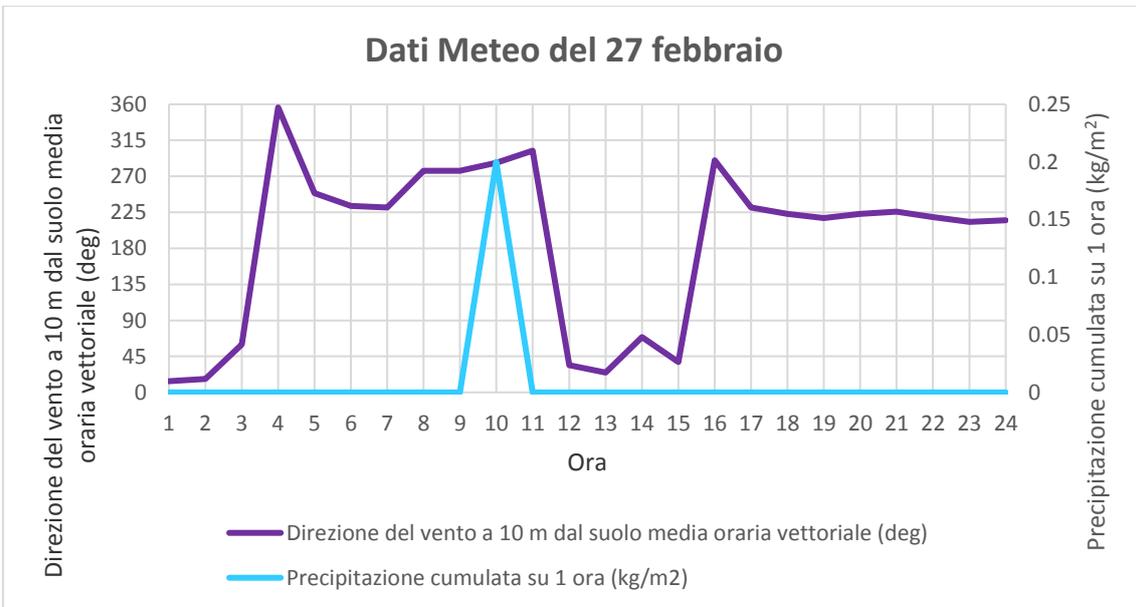


Figura 5.11: Dati meteo del giorno 27 febbraio

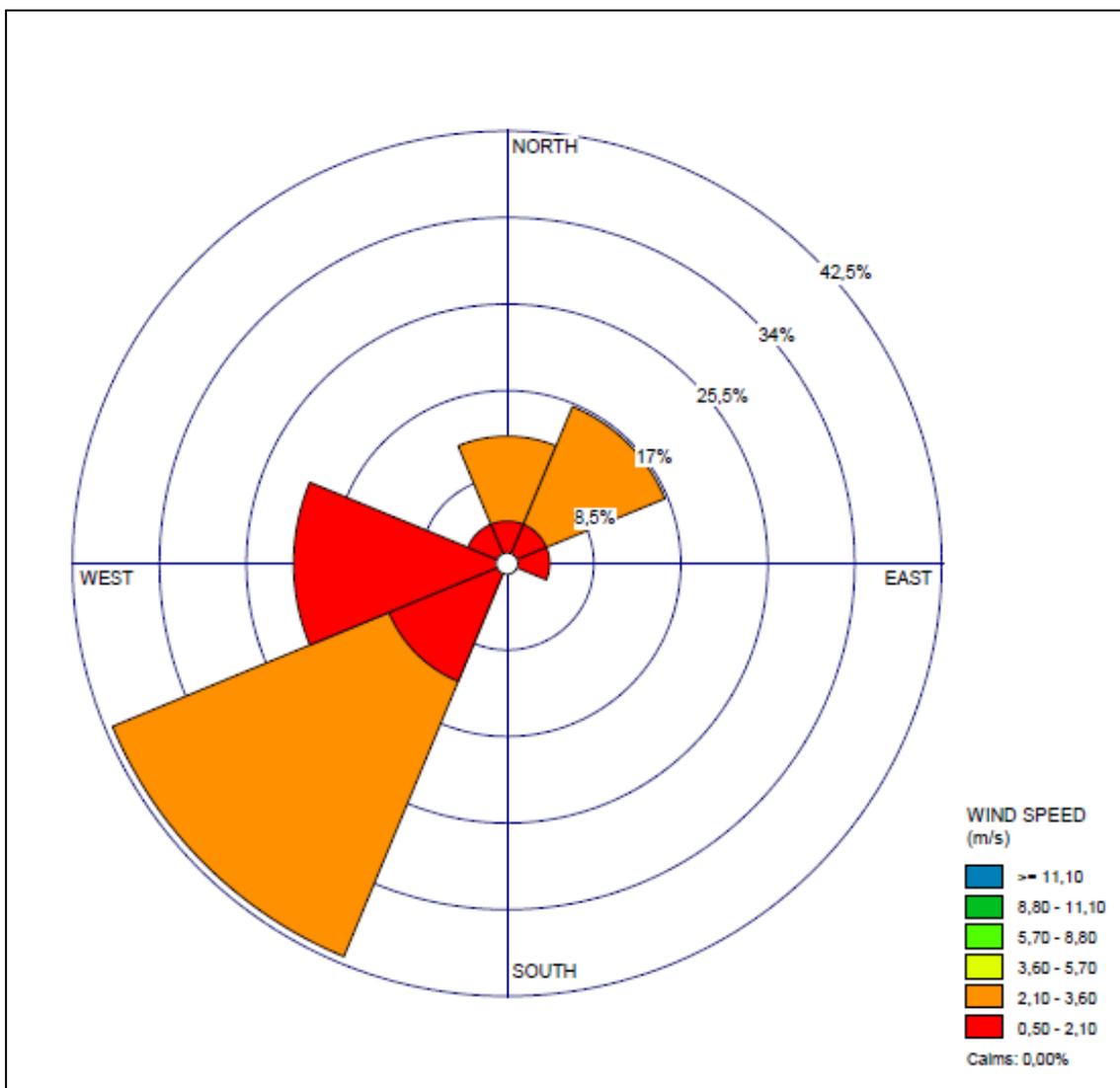


Figura 5.12: Rosa dei venti del giorno 27 febbraio

Direzione / Classi del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	>= 11,10	Totale
N	0,04	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
NE	0,04	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
E	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,13	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42
W	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
NW	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
Sub-Totale	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 5.3: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 27 febbraio

### 5.3.2.2 Stabilità atmosferica

La stabilità atmosferica, assunta come indice della turbolenza atmosferica ovvero del grado di dispersione degli inquinanti gassosi immessi nell'atmosfera, può essere classificata con il metodo delle "classi di stabilità atmosferica" creato da Frank Pasquill nel 1961. Le classi di stabilità sono basate sul valore del gradiente termico  $\Gamma$  dell'aria atmosferica e rappresentano sette condizioni dell'atmosfera:

- classe A, atmosfera fortemente instabile;
- classe B, atmosfera moderatamente instabile;
- classe C, atmosfera debolmente instabile;
- classe D, atmosfera neutra;
- classe E, atmosfera debolmente stabile;
- classe F, atmosfera stabile;
- classe G, atmosfera estremamente stabile.

L'atmosfera stabile (classi E ed F) favorisce l'accumulo di inquinanti nell'aria, in quanto i moti turbolenti hanno piccola intensità o sono del tutto assenti.

Per definire le classi sono stati utilizzati due grafici (Figura 5.13) che rispettivamente fanno riferimento alle condizioni giornaliere e alle condizioni notturne.

Le classi di stabilità durante il giorno sono determinate in funzione di due parametri: la velocità del vento e la radiazione solare. Quest'ultima può essere classificata in:

- "High" - radiazione solare superiore a  $500 \text{ W/m}^2$ ,
- "Medium" - radiazione solare compresa tra  $250$  e  $500 \text{ W/m}^2$ ,
- "Low" - radiazione solare inferiore a  $250 \text{ W/m}^2$ .

Nelle ore notturne le classi di stabilità sono determinate in funzione della velocità del vento e della copertura nuvolosa.

La copertura del cielo viene espressa in percentuale e fa riferimento alla copertura nuvolosa stimata in ottavi, ovvero al numero di parti del cielo coperte dalle nuvole risultanti da una cartografia del cielo rettangolare divisa in otto parti. Quindi, una copertura nuvolosa minore del 50% corrisponde a una copertura nuvolosa minore di  $4/8$ , viceversa una copertura nuvolosa maggiore del 50% sta ad indicare una copertura nuvolosa maggiore di  $4/8$ .

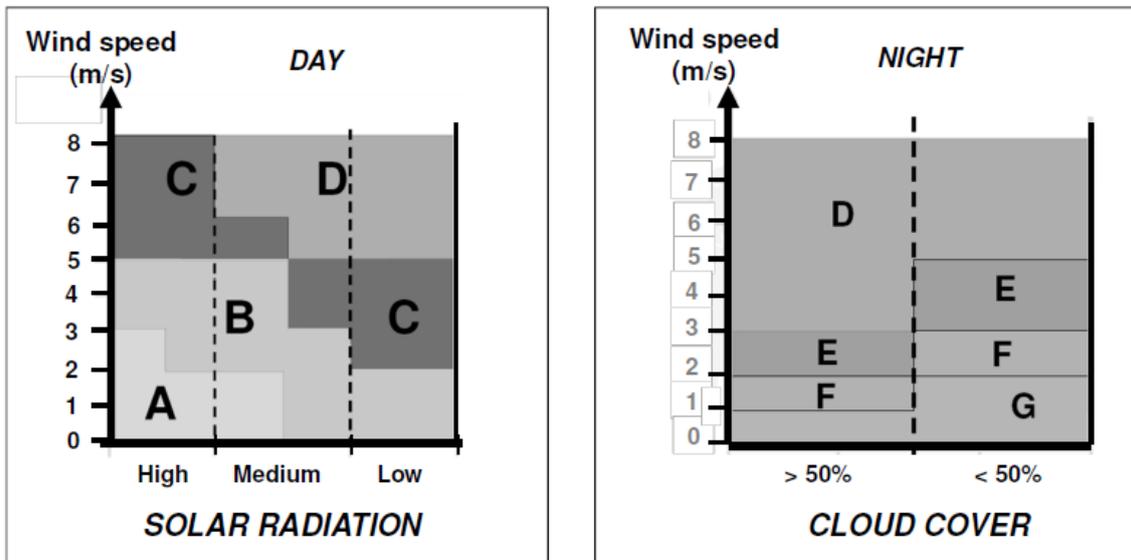


Figura 5.13: Grafici per determinare le classi di stabilità atmosferica

Le classi di stabilità atmosferica sono state calcolate per ogni ora del giorno e sono state rappresentate in un grafico (Figura 5.14) nel quale le lettere che indicano le classi di stabilità atmosferica sono state sostituite da numeri secondo l'associazione seguente:

- classe A pari al numero 1,
- classe B pari al numero 2,
- classe C pari al numero 3,
- classe D pari al numero 4,
- classe E pari al numero 5,
- classe F pari al numero 6,
- classe G pari al numero 7.

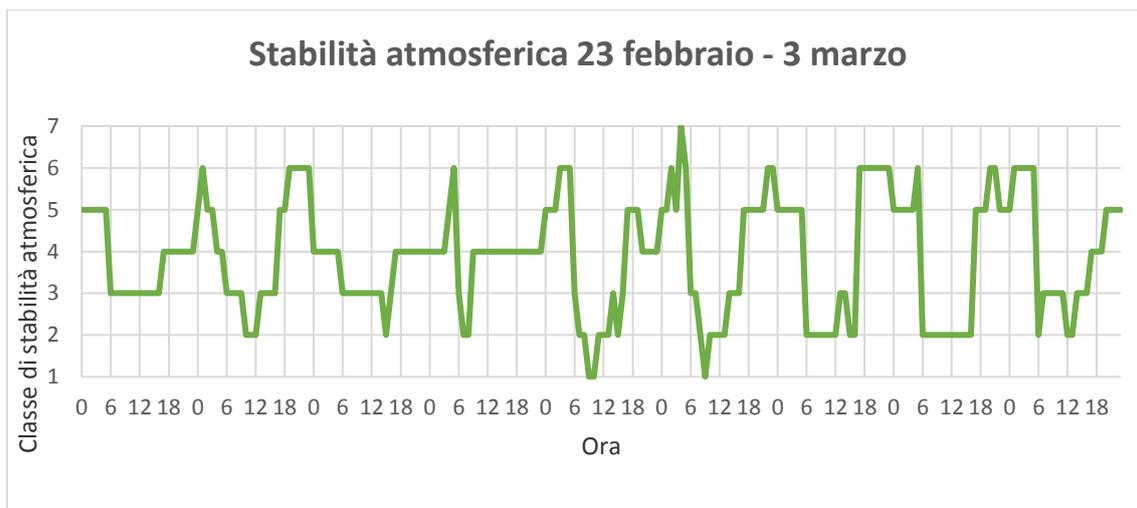


Figura 5.14: Stabilità atmosferica del periodo 23 febbraio – 3 marzo

Il grafico (Figura 5.14) mostra la presenza di condizioni stabili (classe E ed F) durante la notte e nelle prime ore del giorno dovute probabilmente alle basse temperature notturne. Nelle ore diurne, invece, si alternano la classe B e C che indicano un'atmosfera moderatamente e debolmente instabile, che si sviluppa quando i meccanismi di turbolenza termica hanno maggiore entità. Queste condizioni atmosferiche influenzano i livelli di concentrazione di biossido di azoto che risultano più alti proprio nelle ore notturne.

Come mostra il grafico successivo (Figura 5.15), l'accumulo degli inquinanti è favorito anche dalla persistenza di condizioni di stabilità atmosferica neutra (classe D), quando la capacità dell'atmosfera di disperdere i contaminanti risulta essere minima se paragonata ad altre condizioni tipicamente diurne.

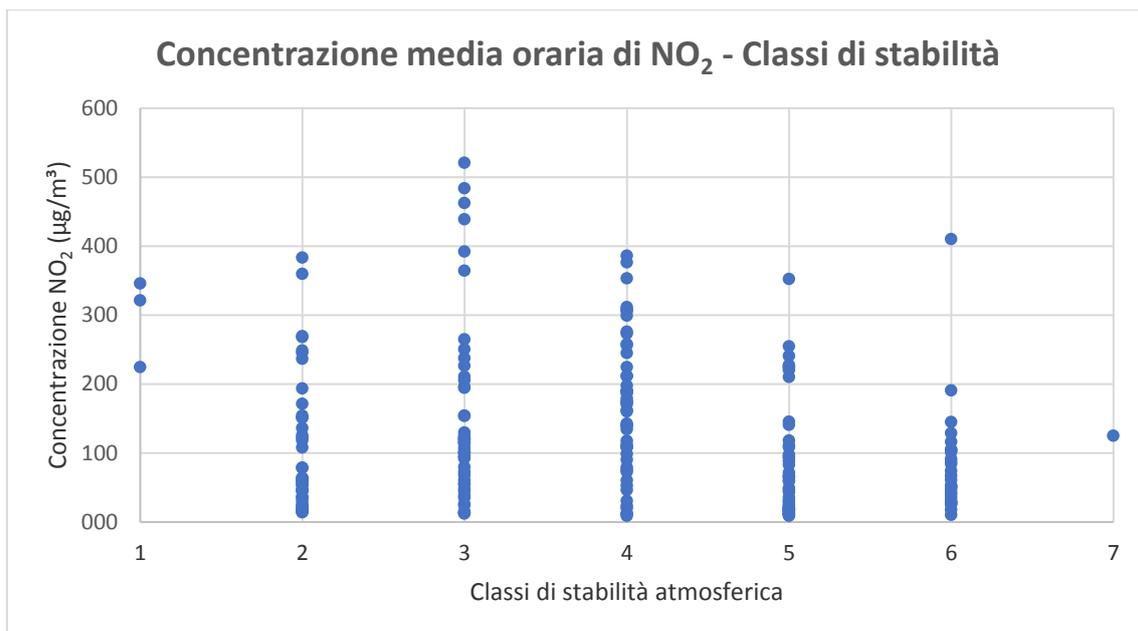


Figura 5.15: Concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> in funzione delle classi di stabilità

A supporto delle considerazioni svolte si riporta di seguito il grafico del giorno 24 febbraio (Figura 5.16), in cui non si osserva una riduzione di concentrazione NO<sub>2</sub> nelle ore notturne probabilmente a causa della mutata direzione del vento (Figura 5.17) e dell'estrema stabilità atmosferica.

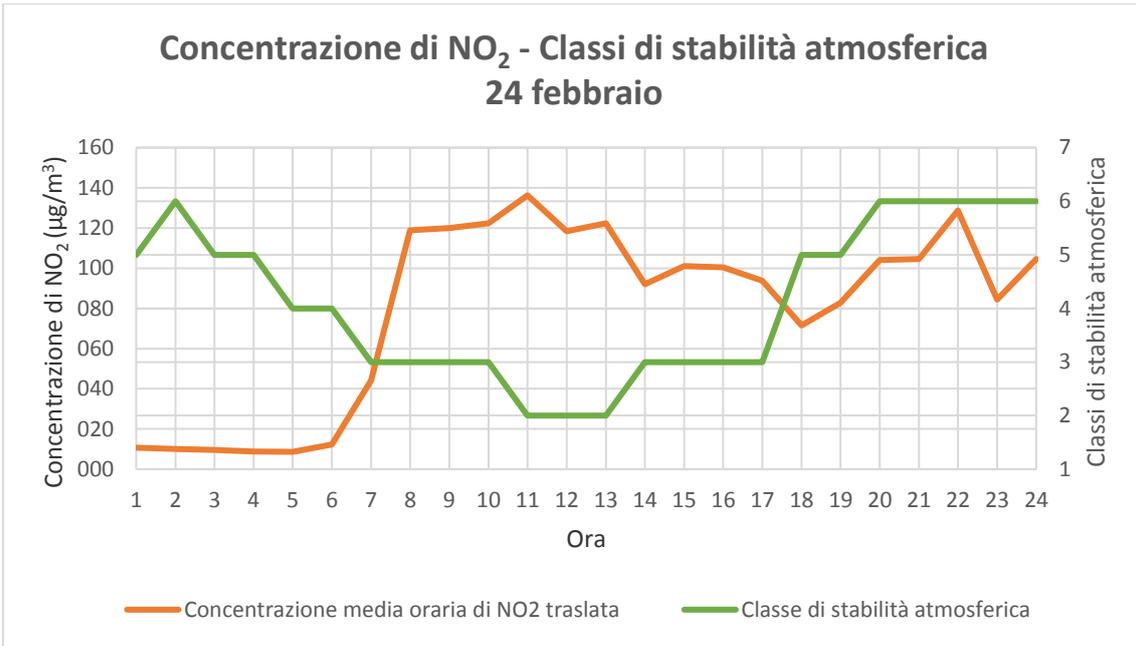


Figura 5.16: Andamento delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> e delle classi di stabilità atmosferica del giorno 24 febbraio

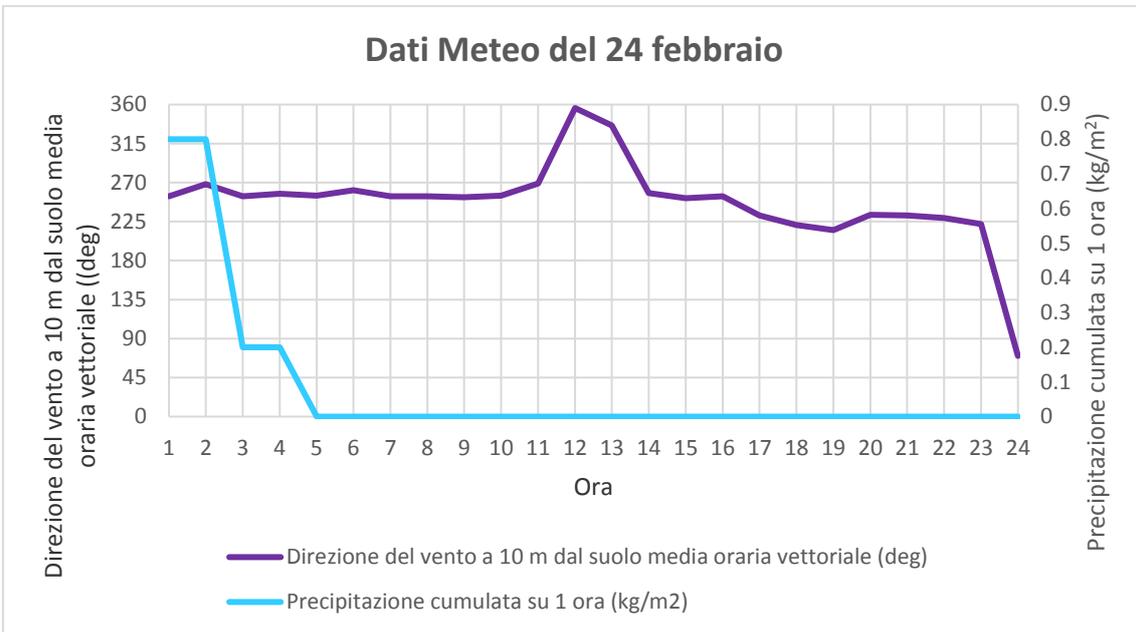


Figura 5.17: Dati meteo del giorno 24 febbraio

## 5.4 Correlazione tra flussi di traffico e concentrazioni di biossido di azoto

Le analisi condotte nel precedente paragrafo hanno mostrato un'evidente dipendenza tra le elevate concentrazioni di biossido di azoto e le condizioni metereologiche caratterizzanti il periodo di monitoraggio. Tuttavia, per analizzare con maggior efficacia gli andamenti riscontrati, si è deciso di analizzare più in dettaglio anche la correlazione tra le concentrazioni dell'inquinante e i flussi di traffico veicolare, che sono da ritenersi i principali responsabili delle concentrazioni di biossido di azoto rilevate.

Come riportato nel quarto capitolo dell'elaborato, i dati del traffico veicolare si riferiscono a Via Prati di Caprara e sono stati forniti dal Comune di Bologna che li ha calcolati in riferimento al "giorno feriale tipo" del mese di febbraio.

Per fare una comparazione legittima tra i dati a disposizione, sono state calcolate quindi le concentrazioni medie orarie del "giorno feriale tipo" del mese di febbraio tramite il software Excel, effettuando una media delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> rilevate alla stessa ora tutti i giorni del mese.

Anche in questo caso, trattandosi di medie orarie, i dati sono stati traslati di 18 ore per tenere conto della durata delle reazioni chimico-fisiche che danno origine al biossido di azoto.

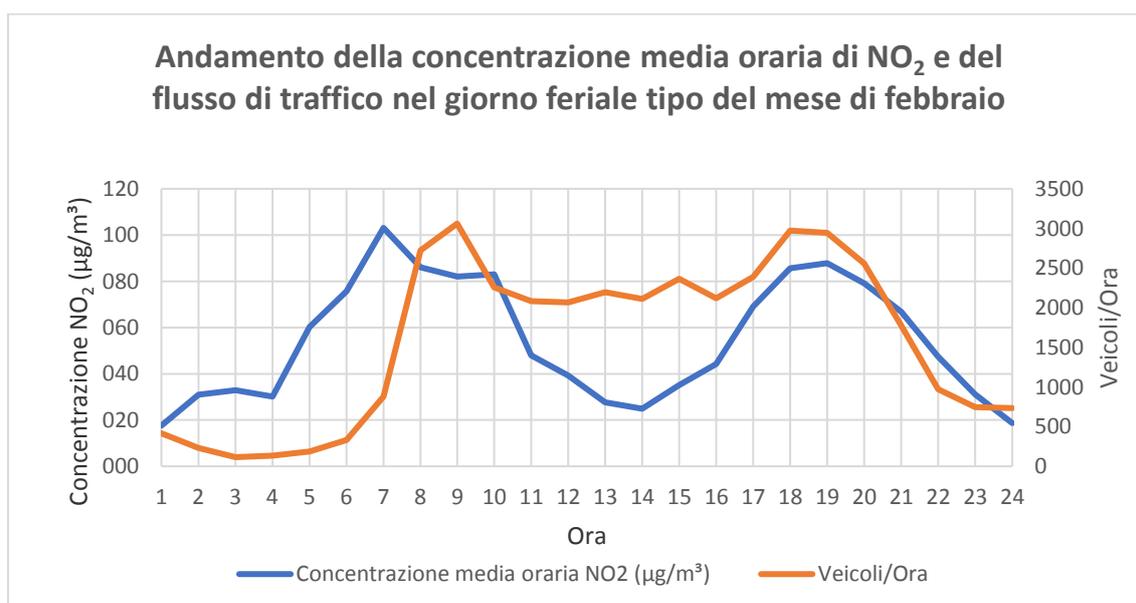


Figura 5.18: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> e del flusso di traffico nel giorno feriale tipo del mese di febbraio

Dal grafico (Figura 5.18) si può osservare che i due fenomeni hanno lo stesso andamento. In particolare, ciò risulta molto evidente nelle ore serali, mentre nelle ore giornaliere si evidenzia un leggero distacco tra le due curve in considerazione della maggiore influenza che hanno le condizioni metereologiche sulla dispersione degli inquinanti nell'aria.

Per avere una ulteriore conferma dei risultati ottenuti, è stato costruito un grafico a dispersione (Figura 5.19) in cui si riportano in ascissa il numero di veicoli/ora e in ordinata la concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub>.

Nonostante l'inevitabile presenza di "outliers" dovuta alle incertezze tipiche di questo tipo di valutazioni, il grafico mostra una buona correlazione esistente tra i dati. Infatti, i punti tendono a posizionarsi vicino alla retta di tendenza passante per l'origine, soprattutto all'aumentare del numero dei veicoli/ora.

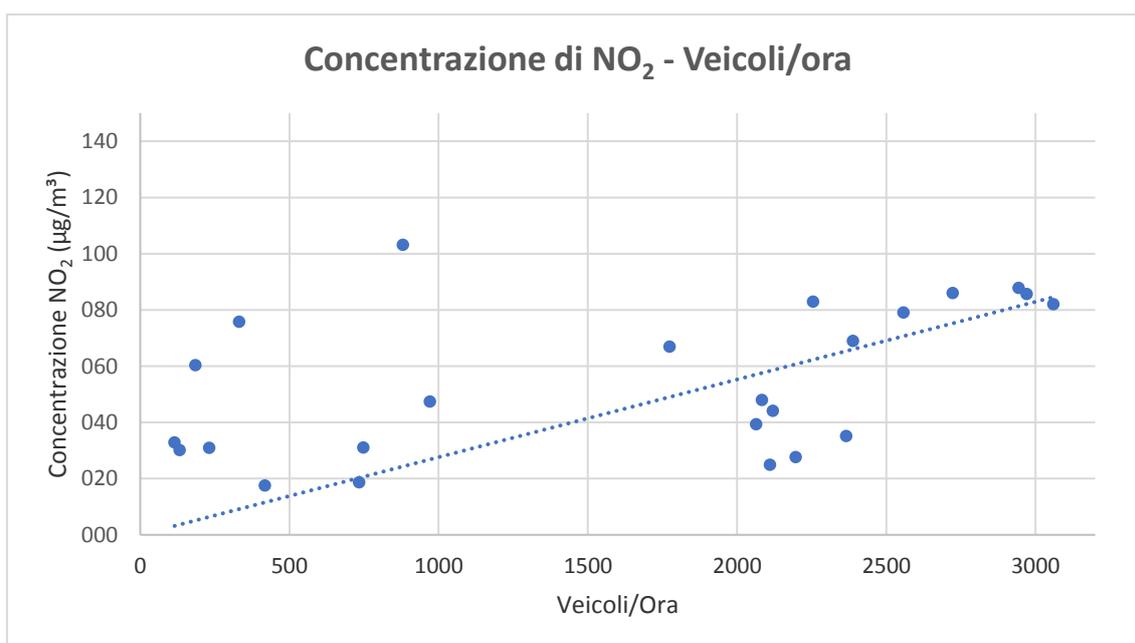


Figura 5.19: Concentrazione di NO<sub>2</sub> in funzione del flusso di traffico



---

## 6. Conclusioni

Lo scopo principale di questo elaborato di tesi è stato quello di realizzare una procedura per la valutazione dell'impatto del traffico veicolare sulla qualità dell'aria esterna nei dintorni del plesso universitario di Via Terracini e di indagare su una possibile correlazione tra i due fattori.

A tal proposito i dati di concentrazione di biossido d'azoto, rilevati da una centralina installata su un edificio della Facoltà di Ingegneria, sono stati posti a confronto con i valori limite di concentrazione previsti dal D.Lgs. 155/2010 e successivamente con i dati di flusso di traffico veicolare.

Dalla elaborazione dei dati è emersa una situazione preoccupante caratterizzata da concentrazioni medie di biossido di azoto molto elevate sia nel mese di febbraio che nel mese di aprile. Soprattutto in quest'ultimo mese sono stati rilevati valori in netto contrasto con le previsioni formulate a monte dello studio. Concentrazioni più basse di NO<sub>2</sub> erano previste in considerazione del fatto che il periodo primaverile è di norma caratterizzato da condizioni meteorologiche favorevoli al processo di dispersione degli inquinanti in atmosfera.

Infatti, sia il valore limite medio annuo, sia quello orario previsti dalla normativa per la protezione della salute umana sono stati abbondantemente superati. In particolare, la proiezione annua del numero di sforamenti del limite orario è risultata pari a 69, a fronte dei 18 sforamenti ammessi dal D.Lgs. 155/2010. Anche il valore medio annuo stimato di NO<sub>2</sub> è risultato pari a 63,51 µg/m<sup>3</sup>, superiore ai 40 µg/m<sup>3</sup> ammessi dalla legge.

Per comprendere meglio i fattori che influenzano la qualità dell'aria sono state analizzate le condizioni meteorologiche prendendo in considerazione due parametri principali: il vento e la stabilità atmosferica, i cui dati sono stati rilevati dalla stazione Bologna Urbana ubicata nel comune di San Lazzaro di Savena.

Per il primo parametro è stata realizzata la rosa dei venti, da cui è risultato che il vento è provenuto da Nord, Nord Est, Ovest e Sud Ovest, con velocità molto basse.

Questi due fattori hanno contribuito a determinare elevate concentrazioni di biossido di azoto in atmosfera, in quanto le direzioni hanno favorito il processo di rilevamento da

parte della centralina ed inoltre la bassa velocità del vento non ha agevolato il processo di dispersione degli inquinanti in atmosfera.

Per quanto riguarda la stabilità atmosferica, l'analisi ha messo in luce il prevalere delle classi di stabilità E, F e D, corrispondenti a condizioni stabili e neutre, che favoriscono i processi di accumulo degli inquinanti in atmosfera e ne determinano una maggiore persistenza in aria.

In ultimo, la ricerca di una possibile correlazione tra i valori di concentrazione di biossido di azoto e quelli del traffico veicolare è stata realizzata analizzando i dati del traffico relativi al giorno feriale medio del mese di febbraio, rilevati dal Comune di Bologna.

In un primo momento, dall'analisi del trend delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> è emerso un esito sconcertante: infatti, l'andamento presentava picchi di concentrazione di biossido di azoto in ore del giorno in cui le sorgenti di emissione sono solitamente inattive. Questo risultato, imputabile alla durata della reazione chimico-fisica che si sviluppa dopo le emissioni e che porta alla formazione della sostanza inquinante, è stato corretto effettuando una traslazione dei valori delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> di diciotto ore.

Dopo questa operazione i due fenomeni hanno assunto lo stesso andamento, sebbene le due curve presentino un distacco di modesta entità nelle ore diurne a causa della maggiore influenza delle condizioni meteorologiche.

L'andamento analogo assunto dai due fenomeni ci permette di affermare che le emissioni generate dal traffico veicolare contribuiscono in maniera rilevante alla formazione delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> nell'aria.

Gli studi e le numerose ricerche empiriche svolte sul campo e i risultati ottenuti con questo lavoro ci dicono che la questione ambientale ed in particolare le problematiche legate all'inquinamento atmosferico, costituiscono una emergenza globale non più eludibile, che per l'area europea riguarda principalmente la Pianura Padana.

Nel territorio padano, influenzato da condizioni climatiche sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti in atmosfera, da una ventilazione scarsa e da una densità abitativa ed industriale elevata, si registrano valori di inquinamento atmosferico che superano continuamente le soglie di sicurezza.

Questa situazione impone l'attuazione di provvedimenti legislativi ed amministrativi non più procrastinabili, per riportare i valori dell'inquinamento atmosferico a livelli accettabili per salvaguardare la salute dell'uomo e l'ambiente antropico e naturale.

È necessario intervenire soprattutto nelle grandi aree metropolitane dove si riscontrano maggiori criticità con politiche innovative volte al potenziamento della ricerca e alla rigenerazione di stili di vita in chiave sostenibile.

In questa prospettiva, lo stanziamento di maggiori risorse finanziarie a favore degli istituti di ricerca, sia pubblici che privati, finalizzato a sviluppare le campagne di monitoraggio ambientale e nuove tecniche strumentali, costituisce la condizione necessaria per disporre di dati ed informazioni sempre più precise, attendibili e tempestive.



## 7. Appendice

Si riportano i grafici realizzati per valutare l'andamento delle concentrazioni medie orarie di biossido di azoto  $\text{NO}_2$ , la direzione del vento media giornaliera, la precipitazione cumulata giornaliera e le classi di stabilità atmosferica (1 = classe A, 2 = classe B, 3 = classe C, 4 = classe D, 5 = classe E, 6 = classe F, 7 = classe G), relativi al periodo di riferimento 23 febbraio - 3 marzo.

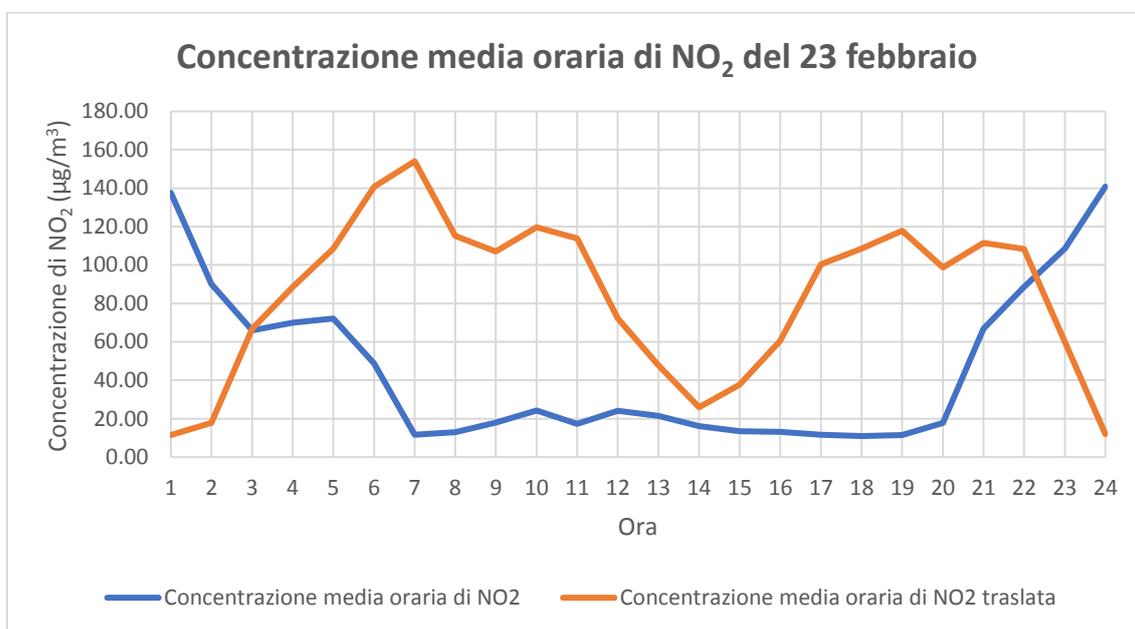


Figura 7.1: Andamento della concentrazione media oraria di  $\text{NO}_2$  del giorno 23 febbraio

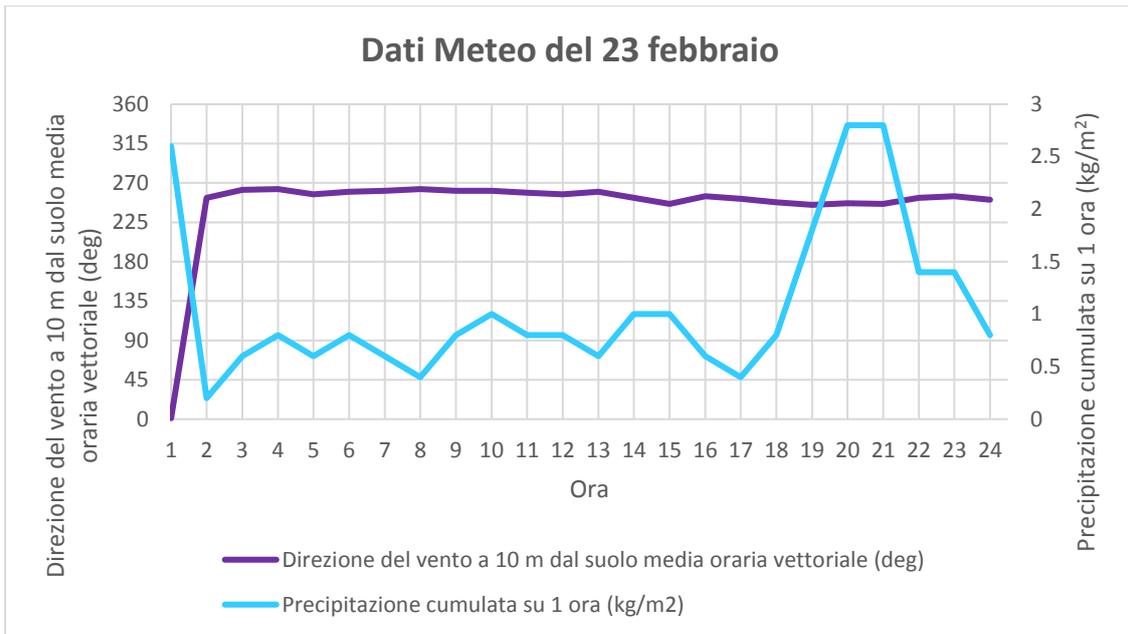


Figura 7.2: Dati meteo del giorno 23 febbraio

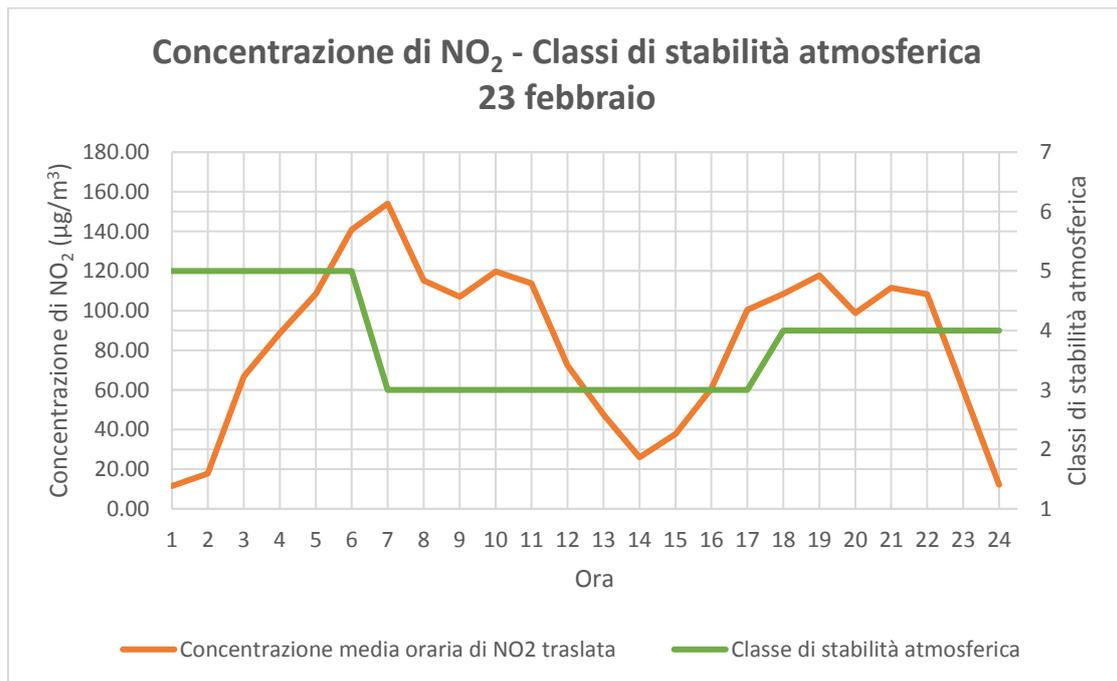


Figura 7.3: Andamento della concentrazione di NO<sub>2</sub> e della classe di stabilità atmosferica del giorno 23 febbraio

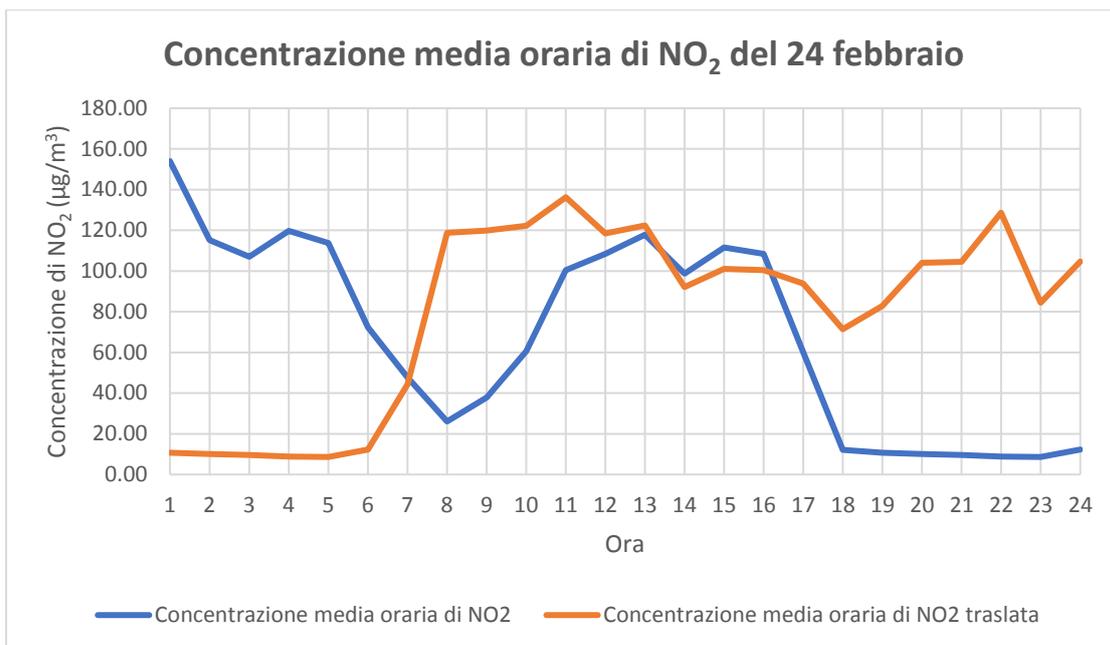


Figura 7.4: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 24 febbraio

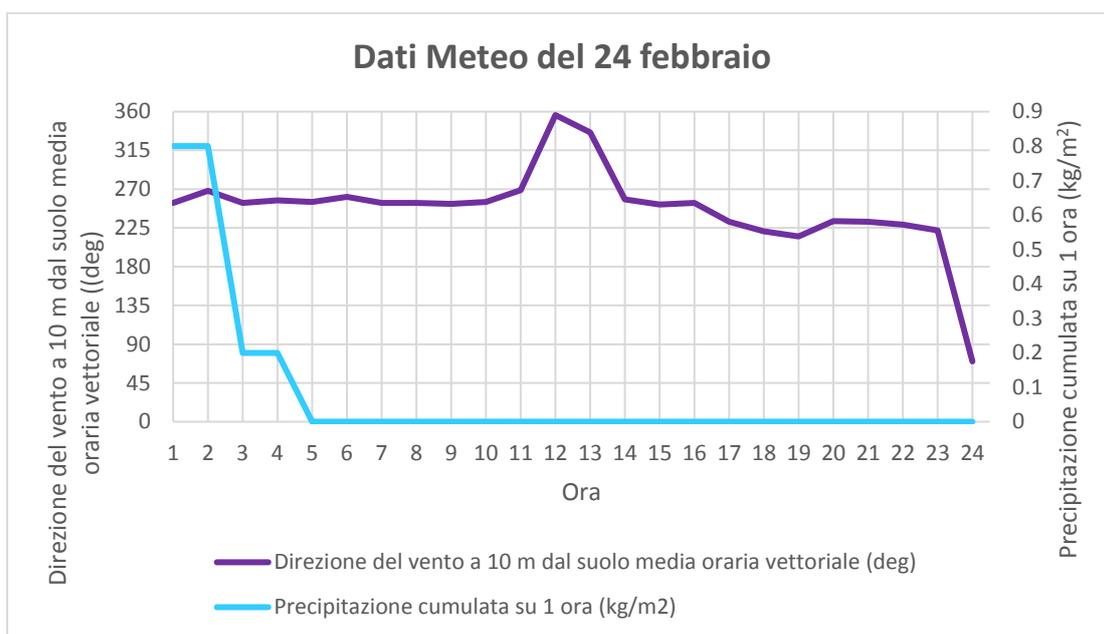


Figura 7.5: Dati meteo del giorno 24 febbraio

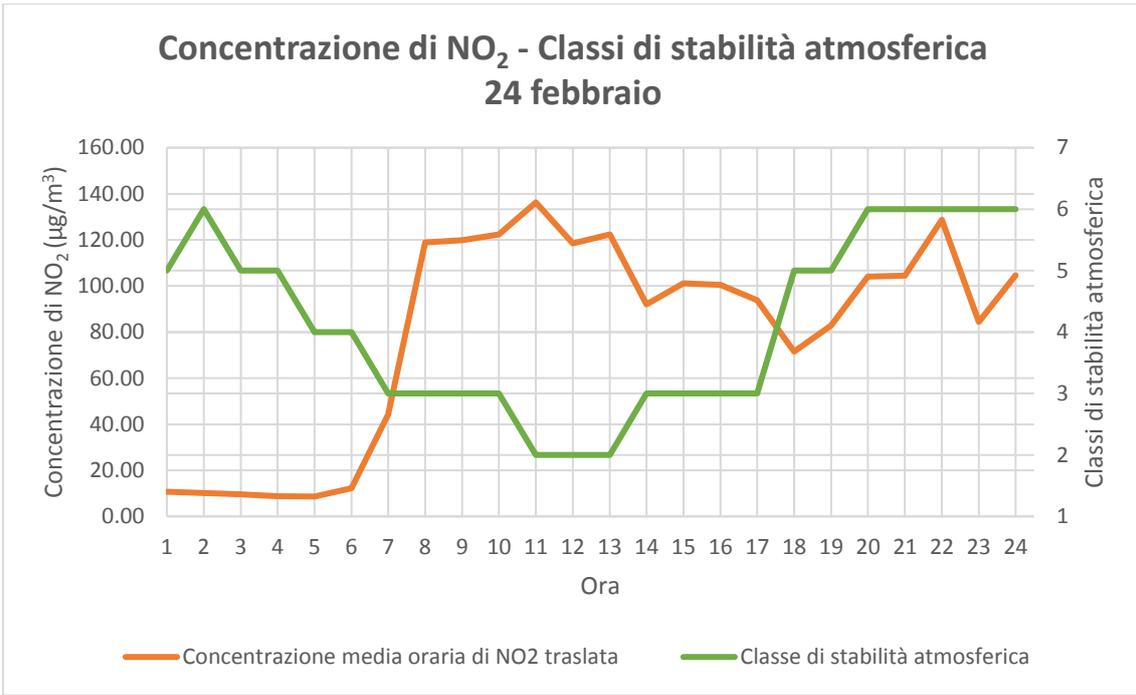


Figura 7.6: Andamento della concentrazione di NO<sub>2</sub> e della classe di stabilità atmosferica del giorno 24 febbraio

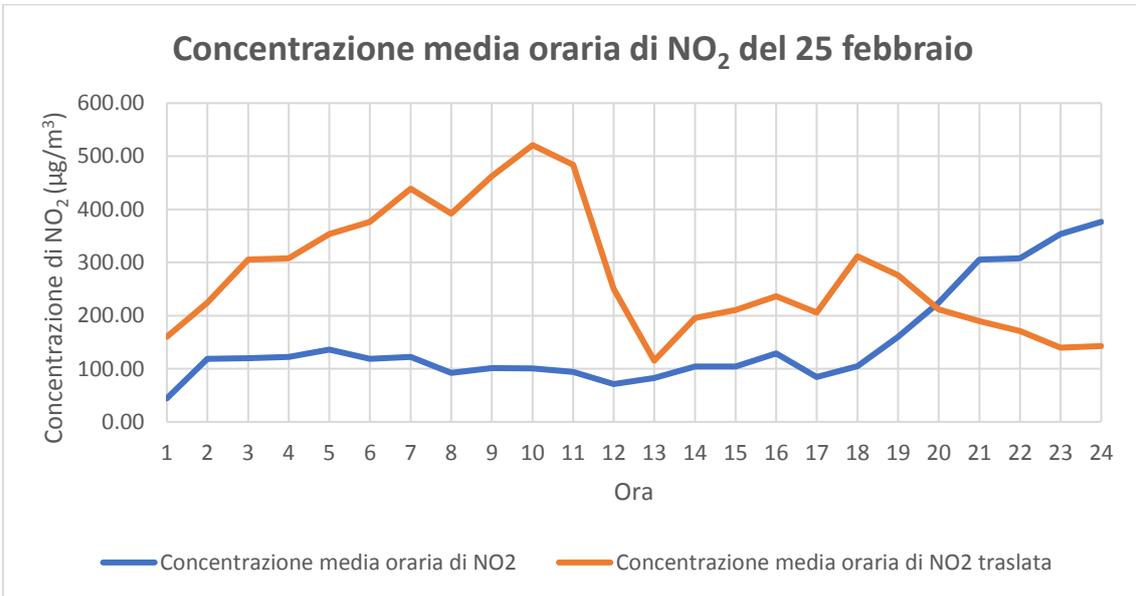


Figura 7.7: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 25 febbraio

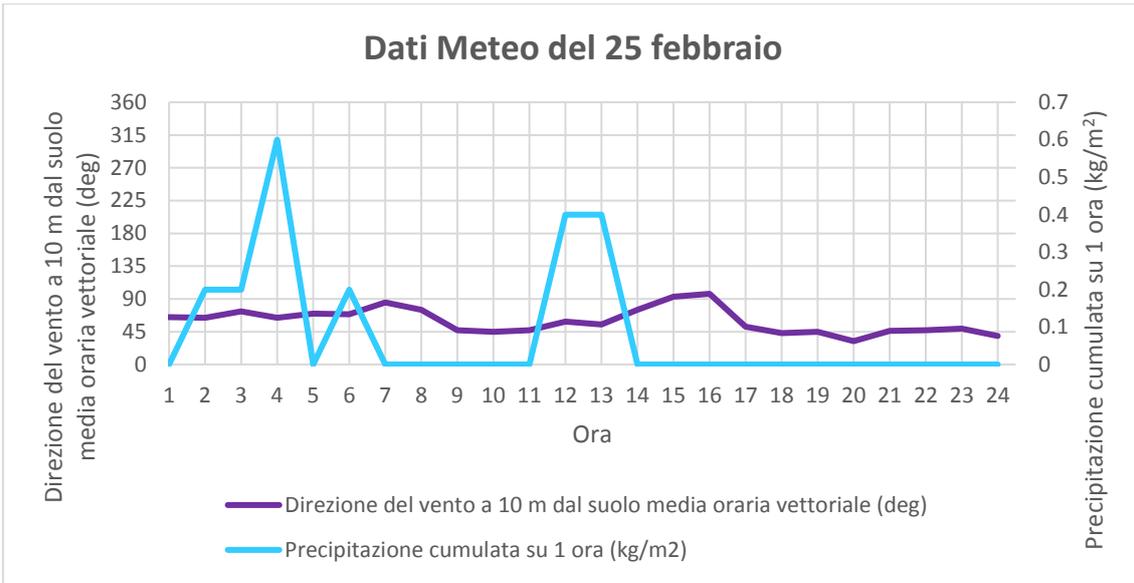


Figura 7.8: Dati meteo del giorno 25 febbraio

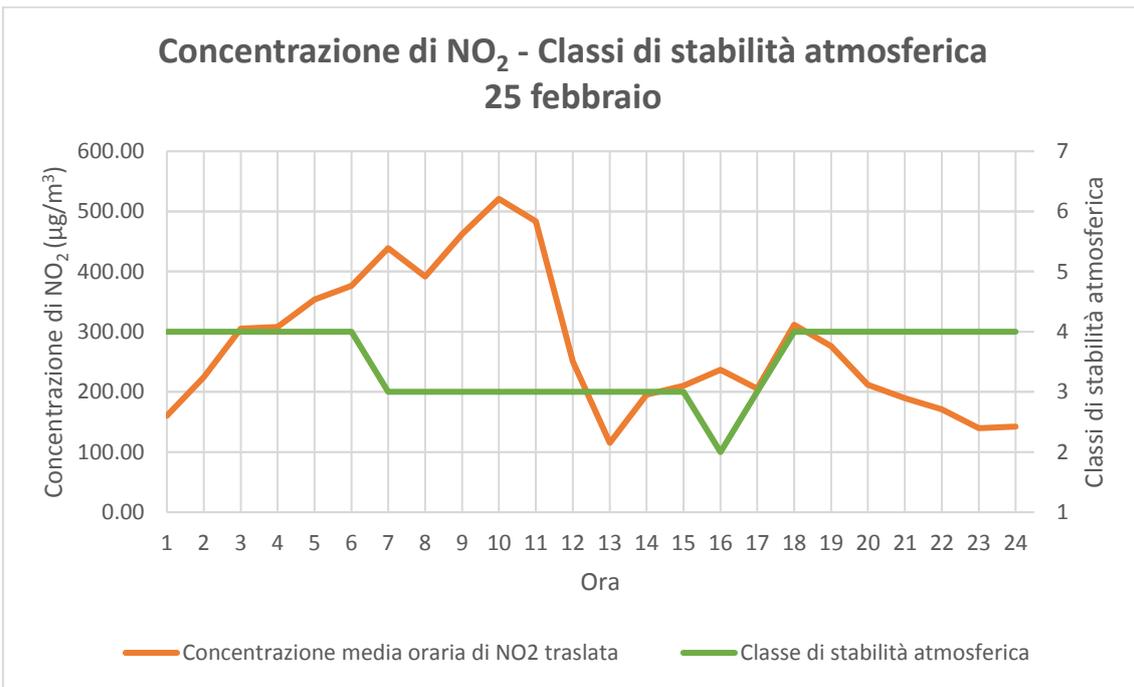


Figura 7.9: Andamento della concentrazione di NO<sub>2</sub> e della classe di stabilità atmosferica del giorno 25 febbraio

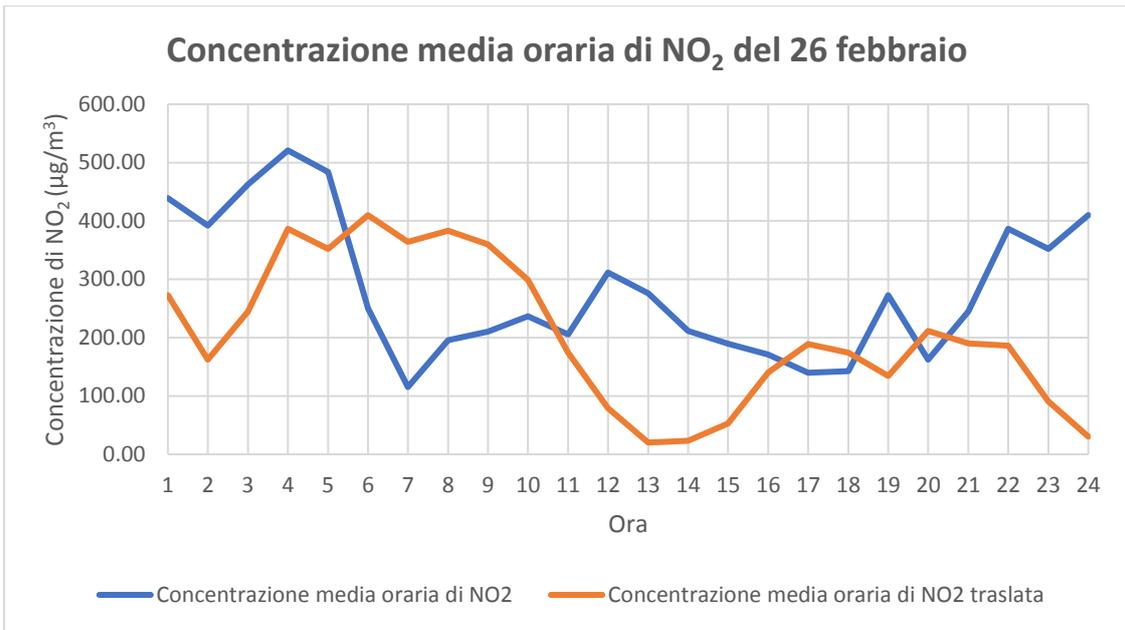


Figura 7.10: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 26 febbraio

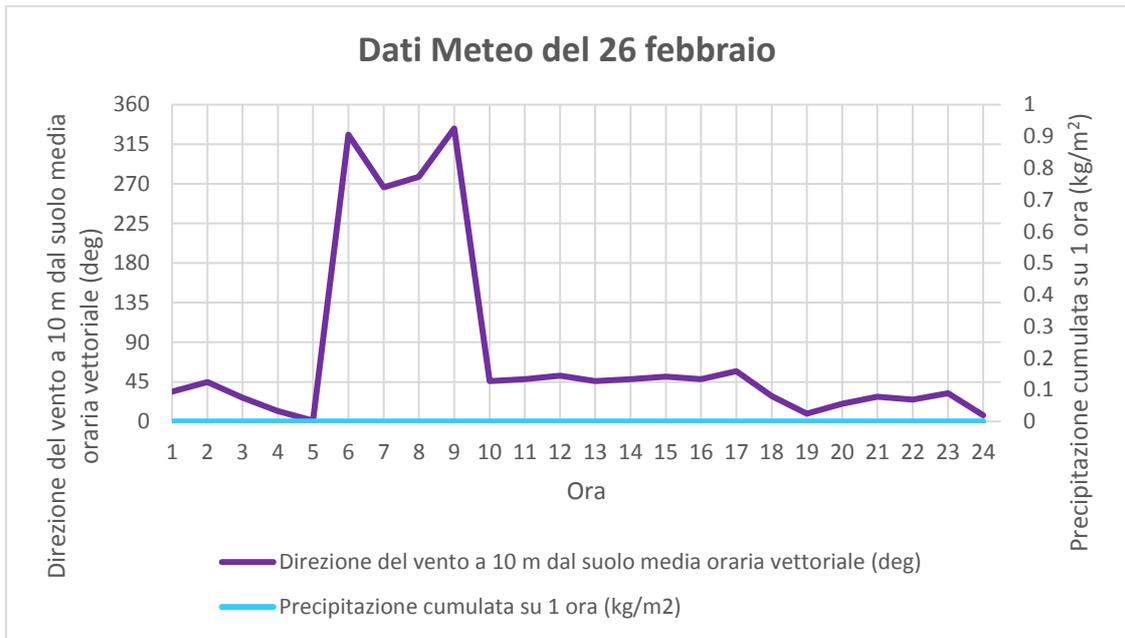


Figura 7.11: Dati meteo del giorno 26 febbraio

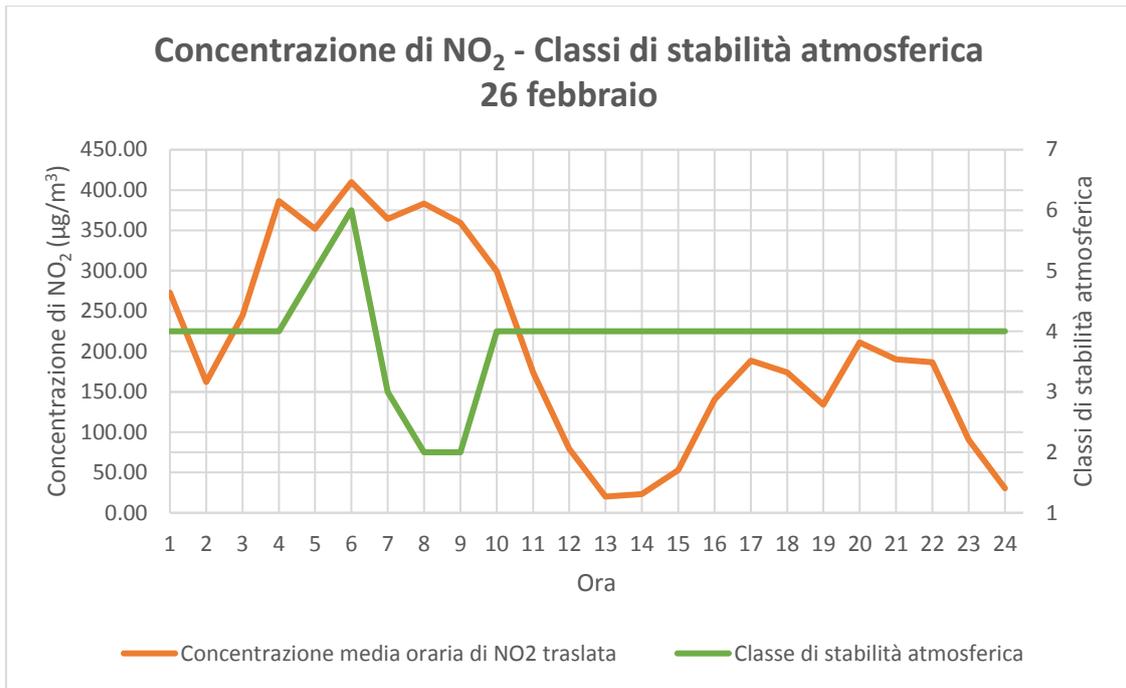


Figura 7.12: Andamento della concentrazione di NO<sub>2</sub> e della classe di stabilità atmosferica del giorno 26 febbraio

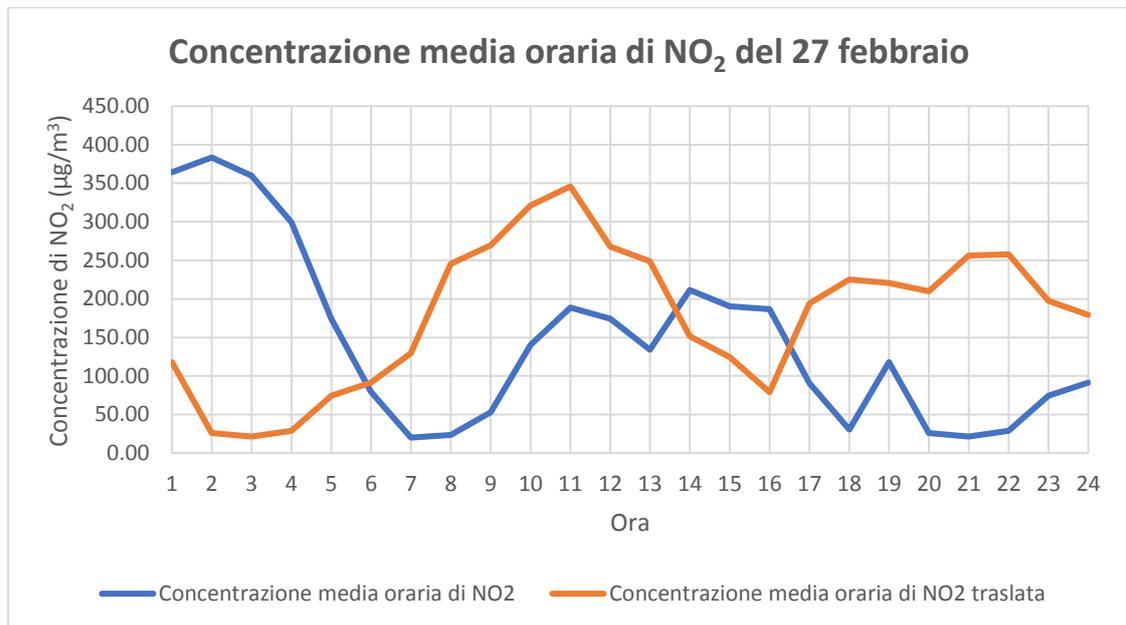


Figura 7.13: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 27 febbraio

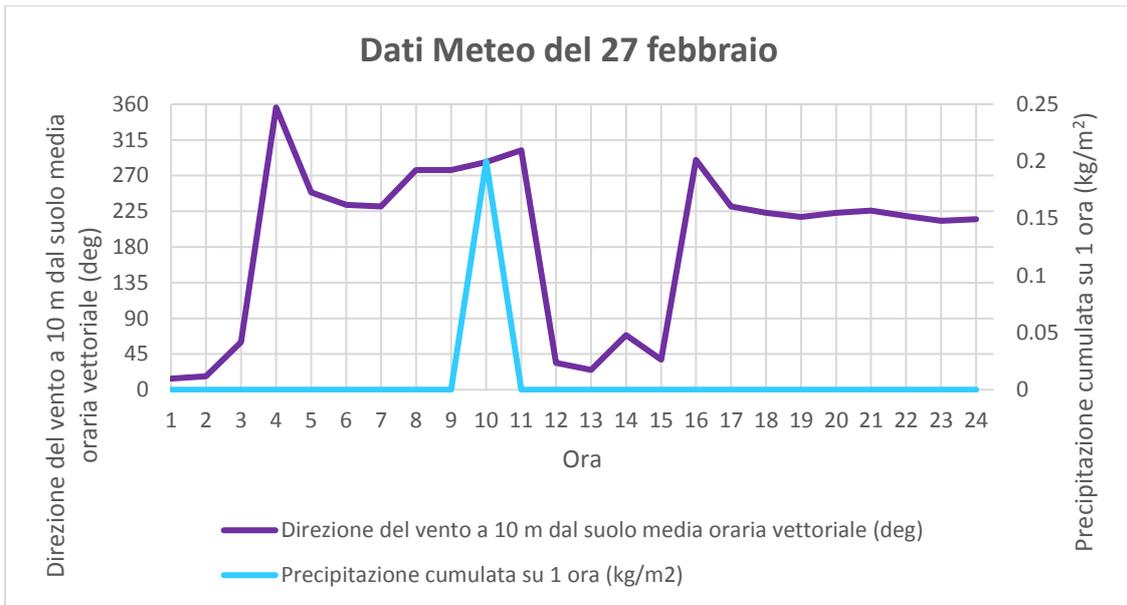


Figura 7.14: Dati meteo del giorno 27 febbraio

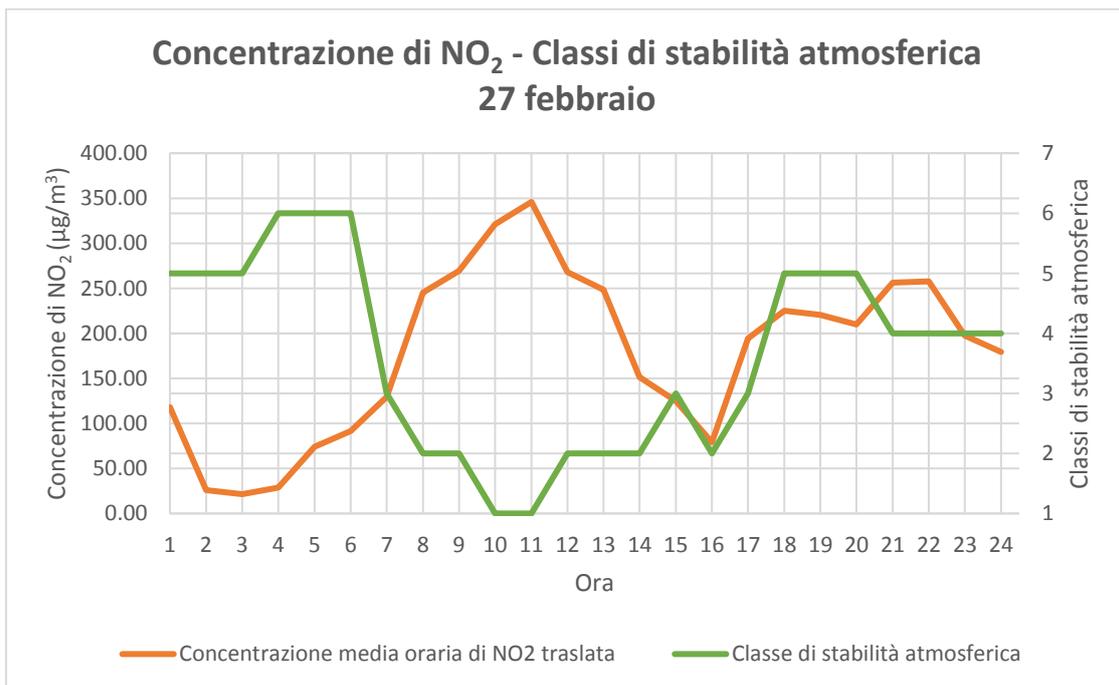


Figura 7.15: Andamento della concentrazione di NO<sub>2</sub> e della classe di stabilità atmosferica del giorno 27 febbraio

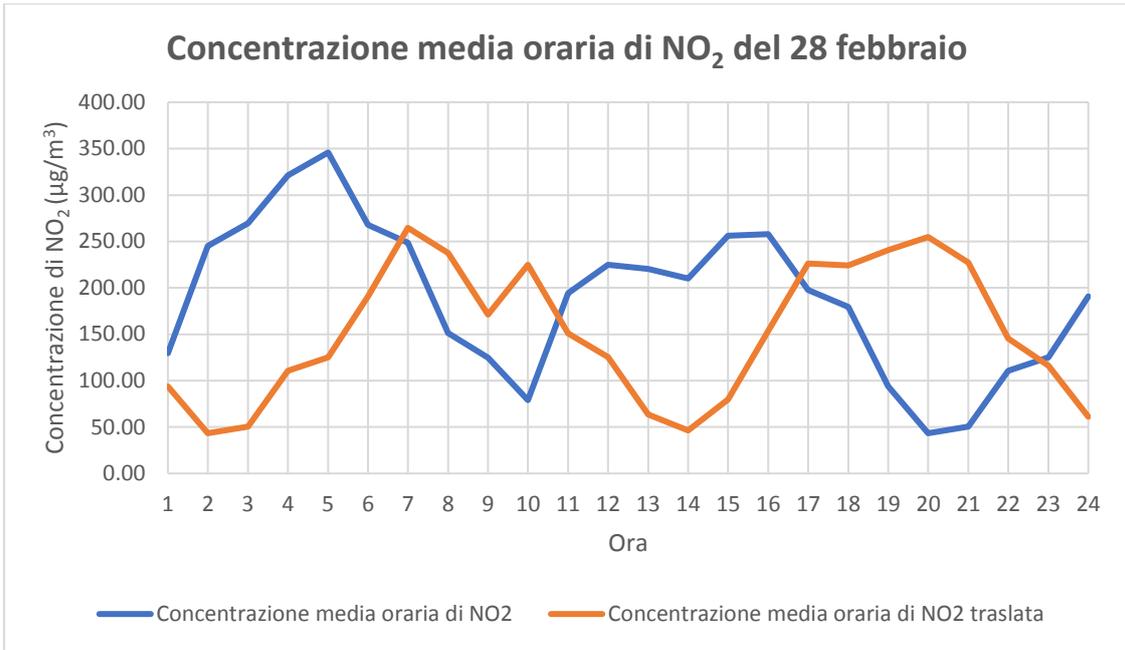


Figura 7.16: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 28 febbraio

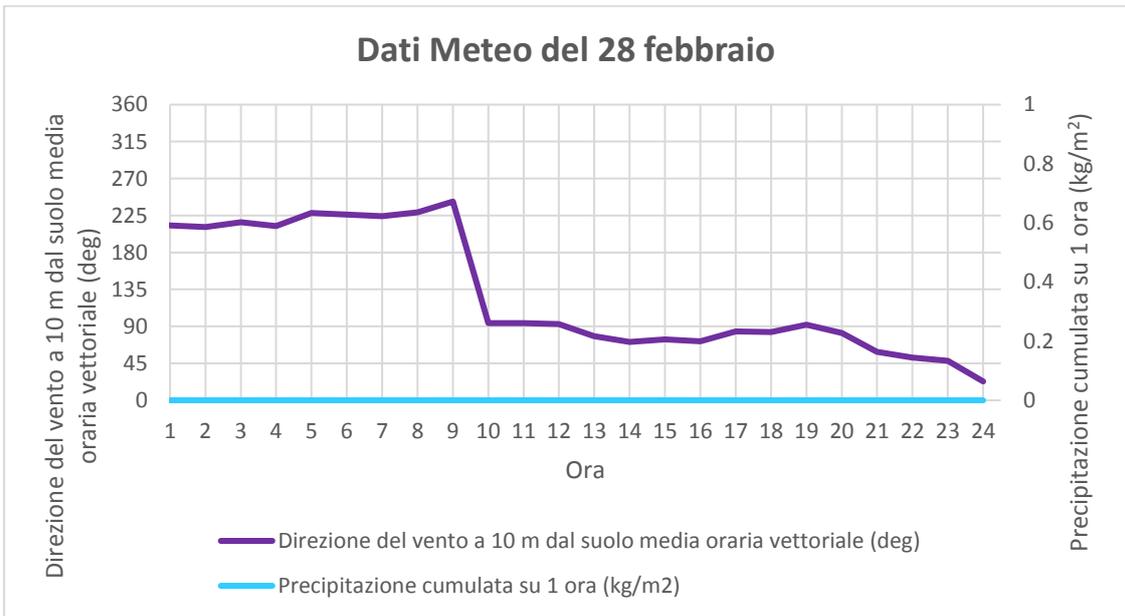


Figura 7.17: Dati meteo del giorno 28 febbraio

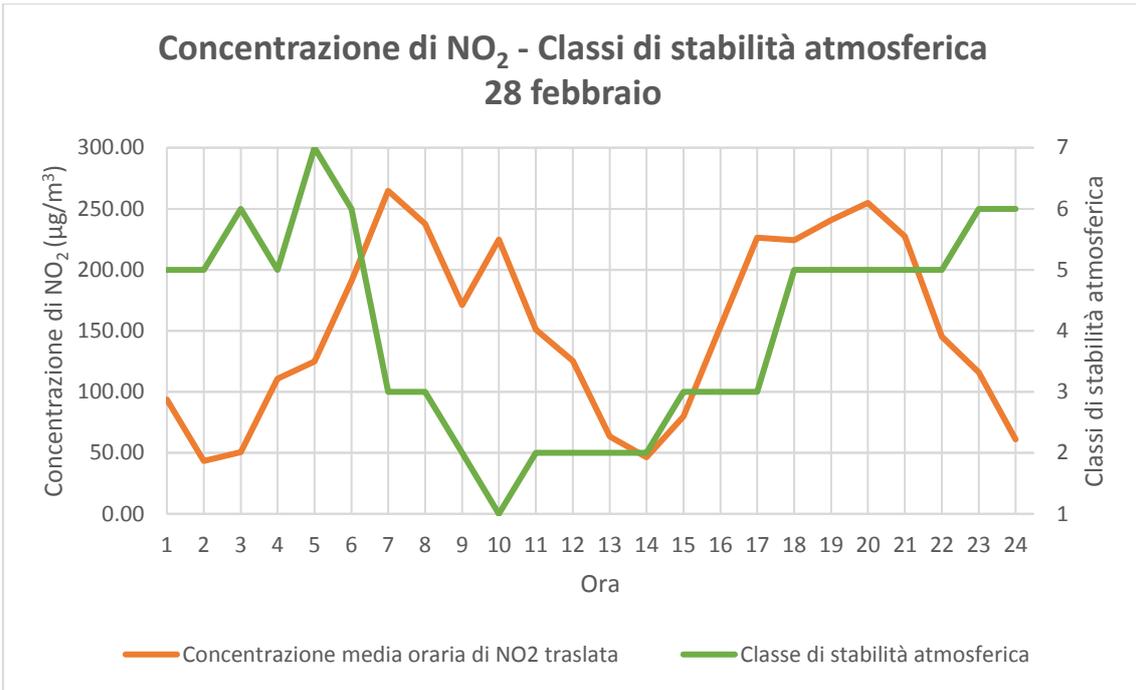


Figura 7.18: Andamento della concentrazione di NO<sub>2</sub> e della classe di stabilità atmosferica del giorno 28 febbraio

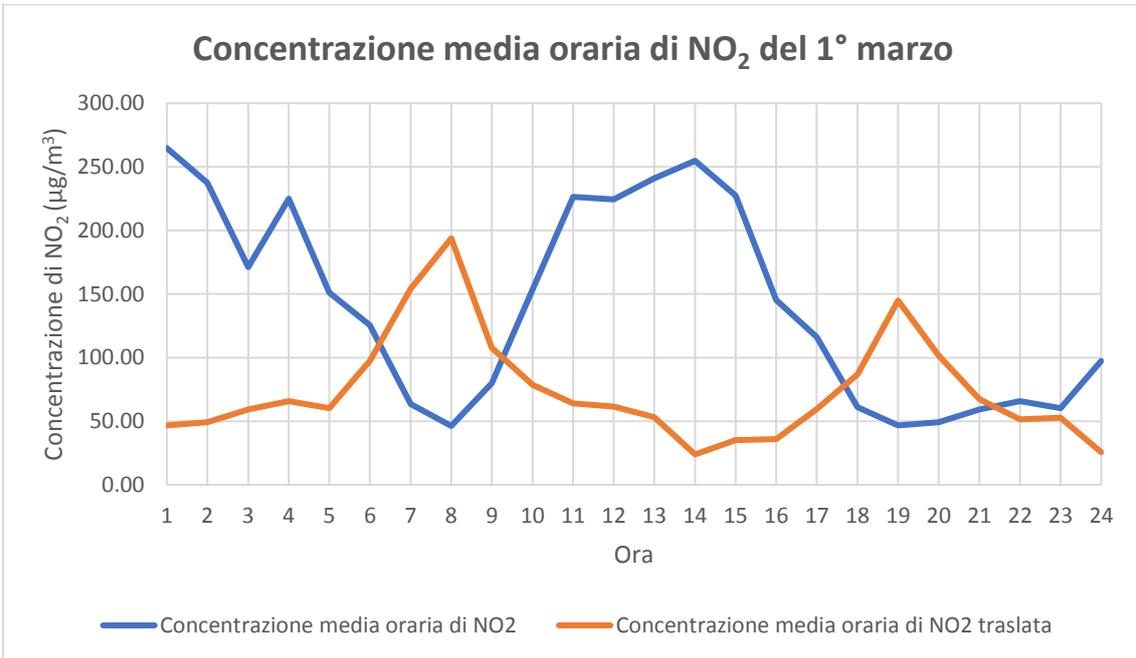


Figura 7.19: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 1° marzo

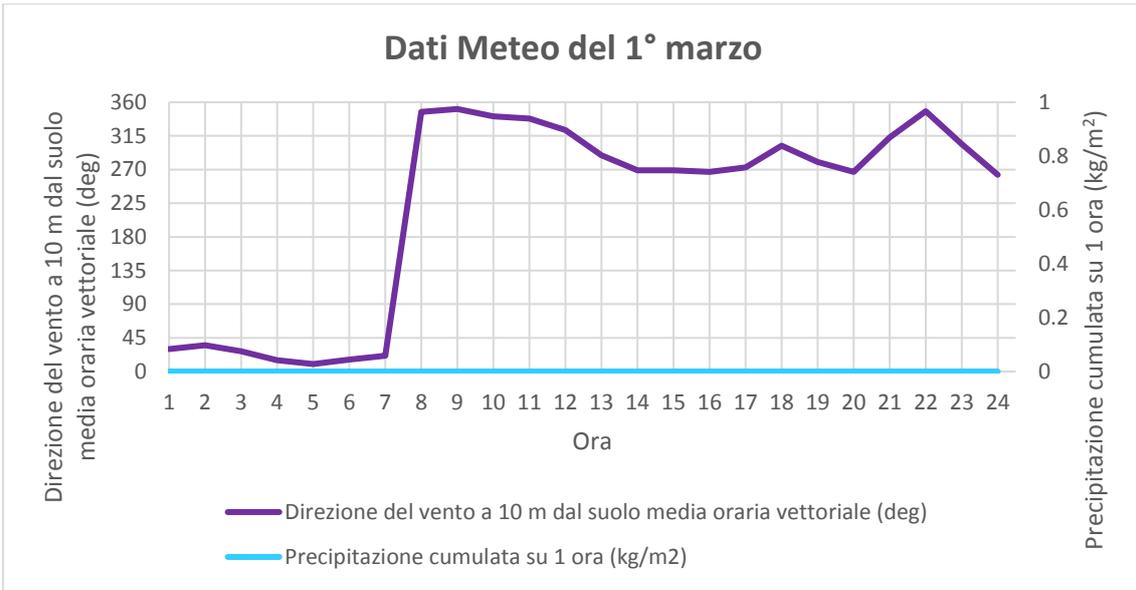


Figura 7.20: Dati meteo del giorno 1° marzo

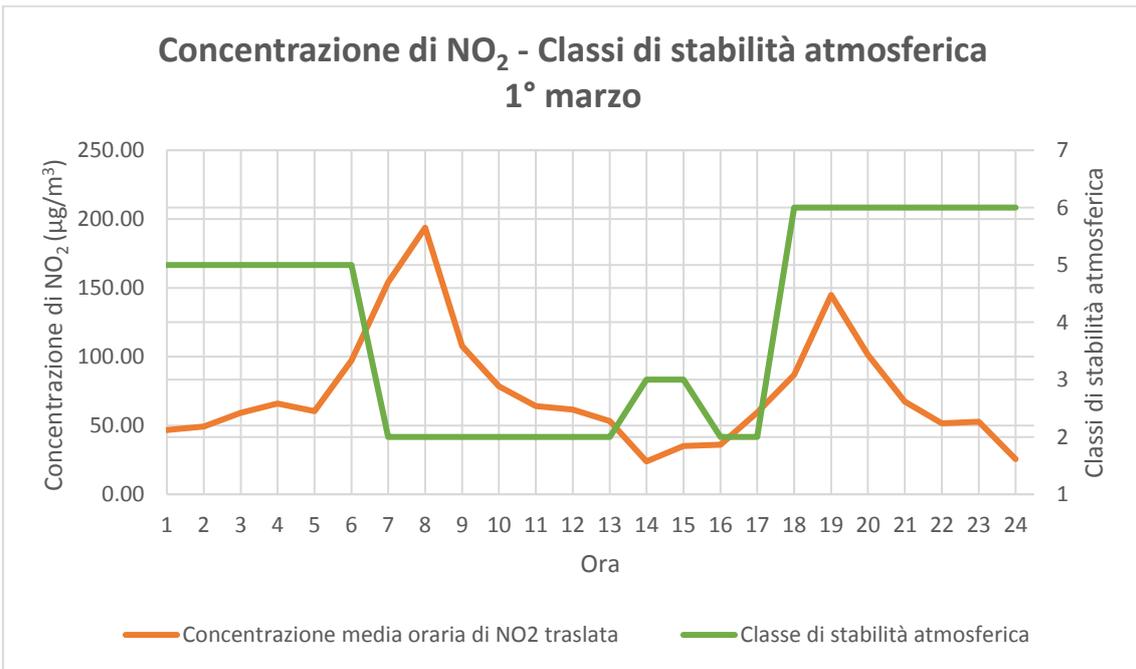


Figura 7.21: Andamento della concentrazione di NO<sub>2</sub> e della classe di stabilità atmosferica del giorno 1° marzo

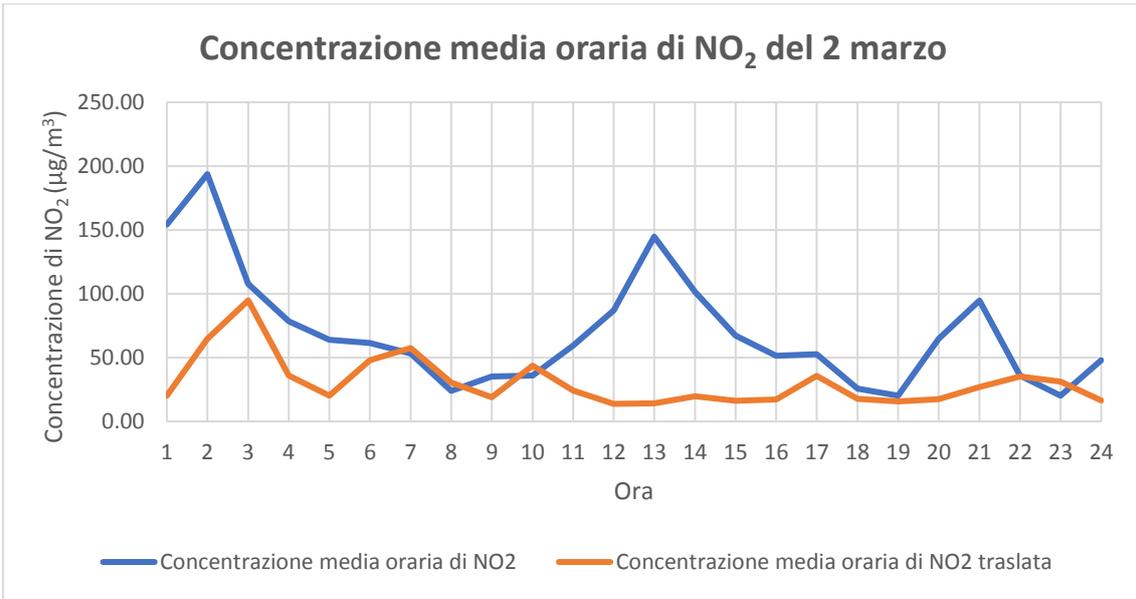


Figura 7.22: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 2 marzo

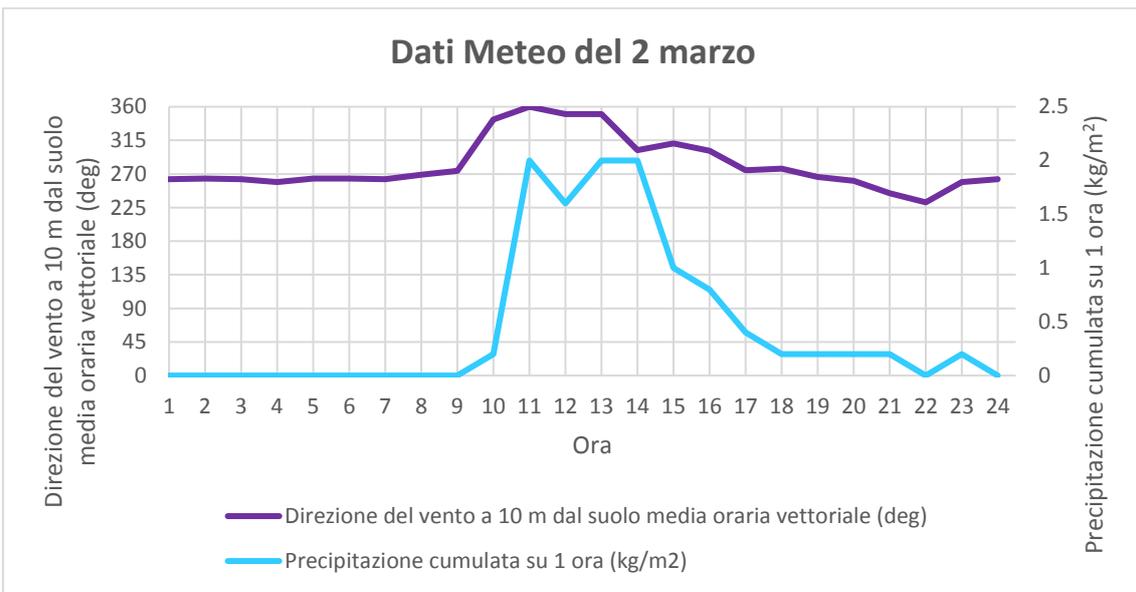


Figura 7.23: Dati meteo del giorno 2 marzo

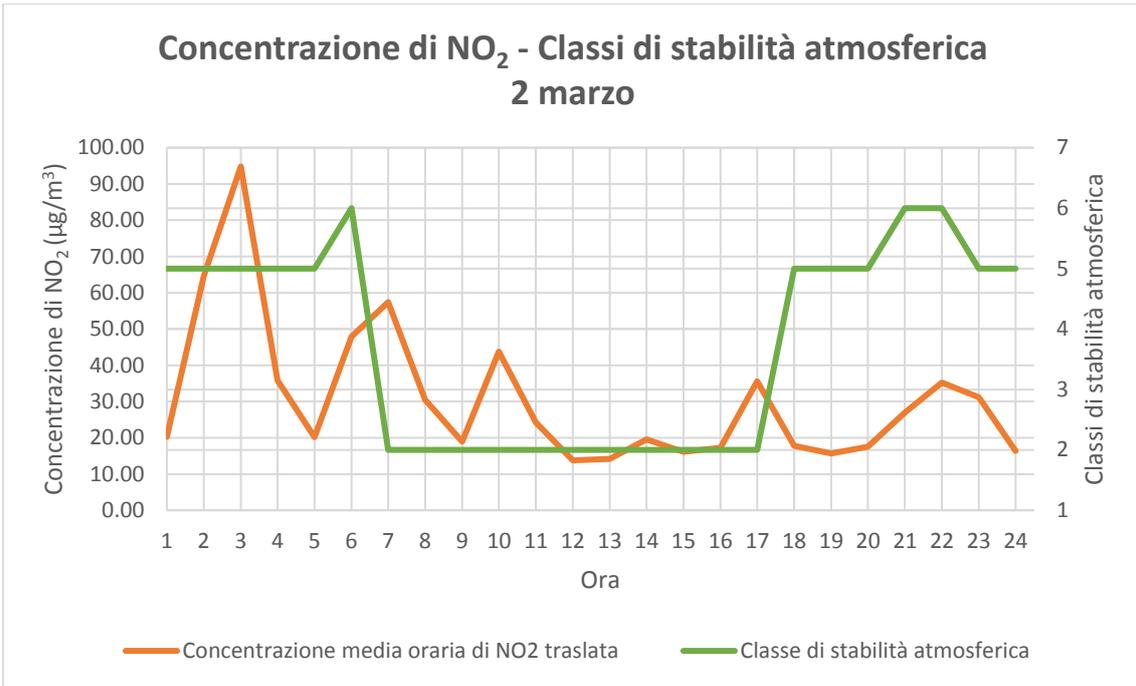


Figura 7.24: Andamento della concentrazione di NO<sub>2</sub> e della classe di stabilità atmosferica del giorno 2 marzo

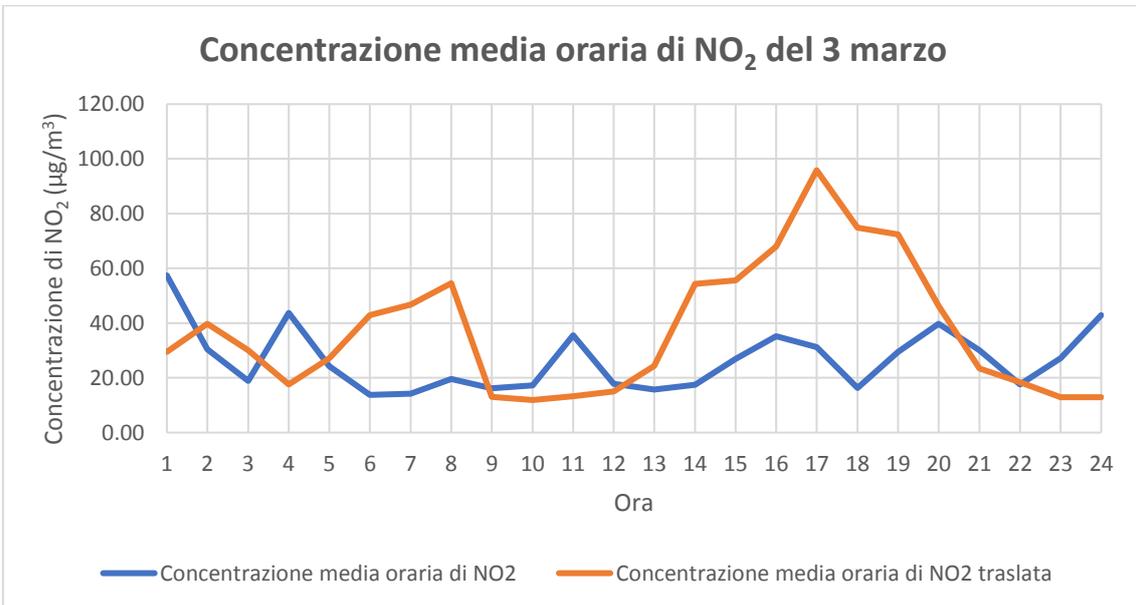


Figura 7.25: Andamento della concentrazione media oraria di NO<sub>2</sub> del giorno 3 marzo

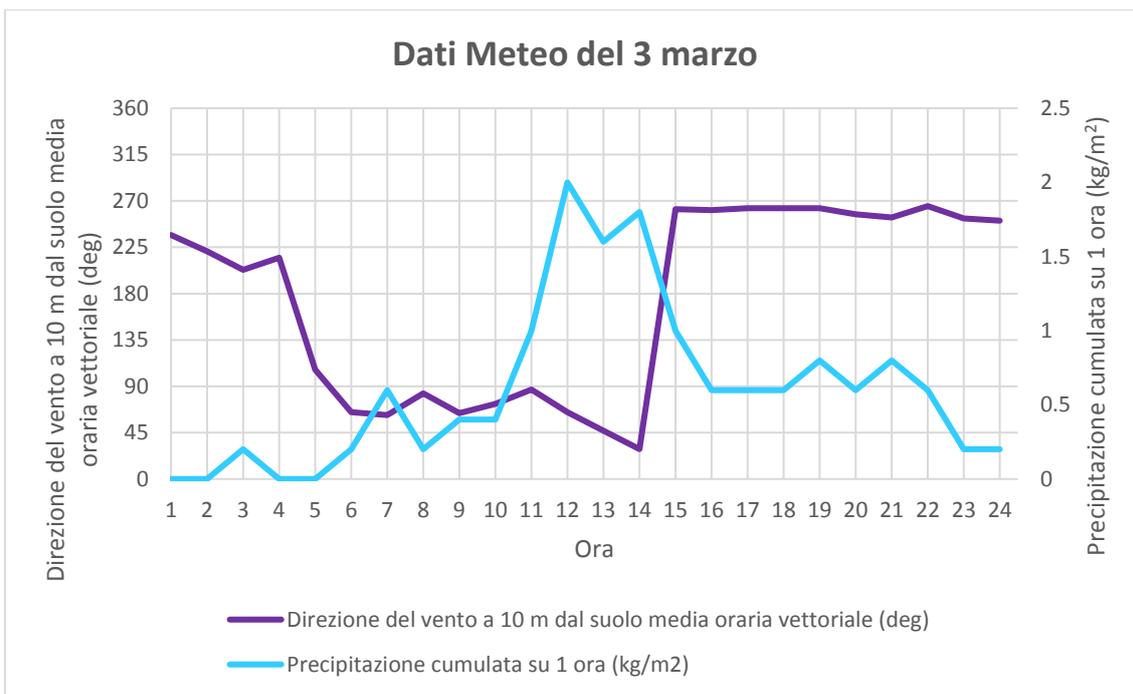


Figura 7.26: Dati meteo del giorno 3 marzo

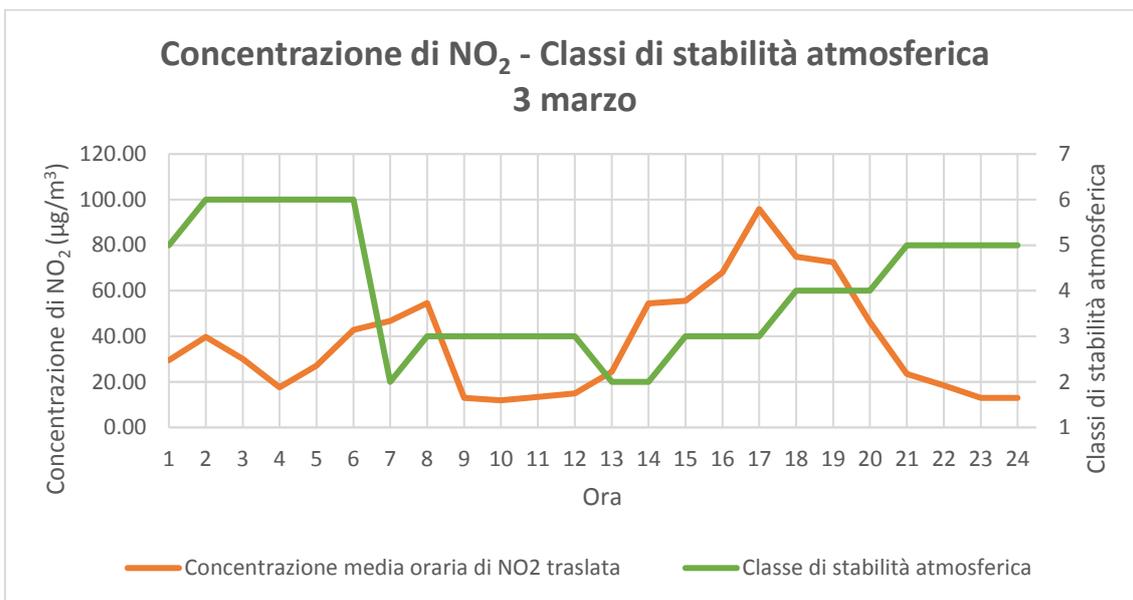


Figura 7.27: Andamento della concentrazione di NO₂ e della classe di stabilità atmosferica del giorno 3 marzo

Proseguono le rappresentazioni grafiche delle rose dei venti, realizzate nel medesimo periodo mediante il software “WRPLOT View” della Lakes Environmental, e le tabelle contenenti la distribuzione in frequenza delle classi di velocità media oraria vettoriale del vento (m/s) misurata a 10 metri dal suolo per direzione di provenienza.

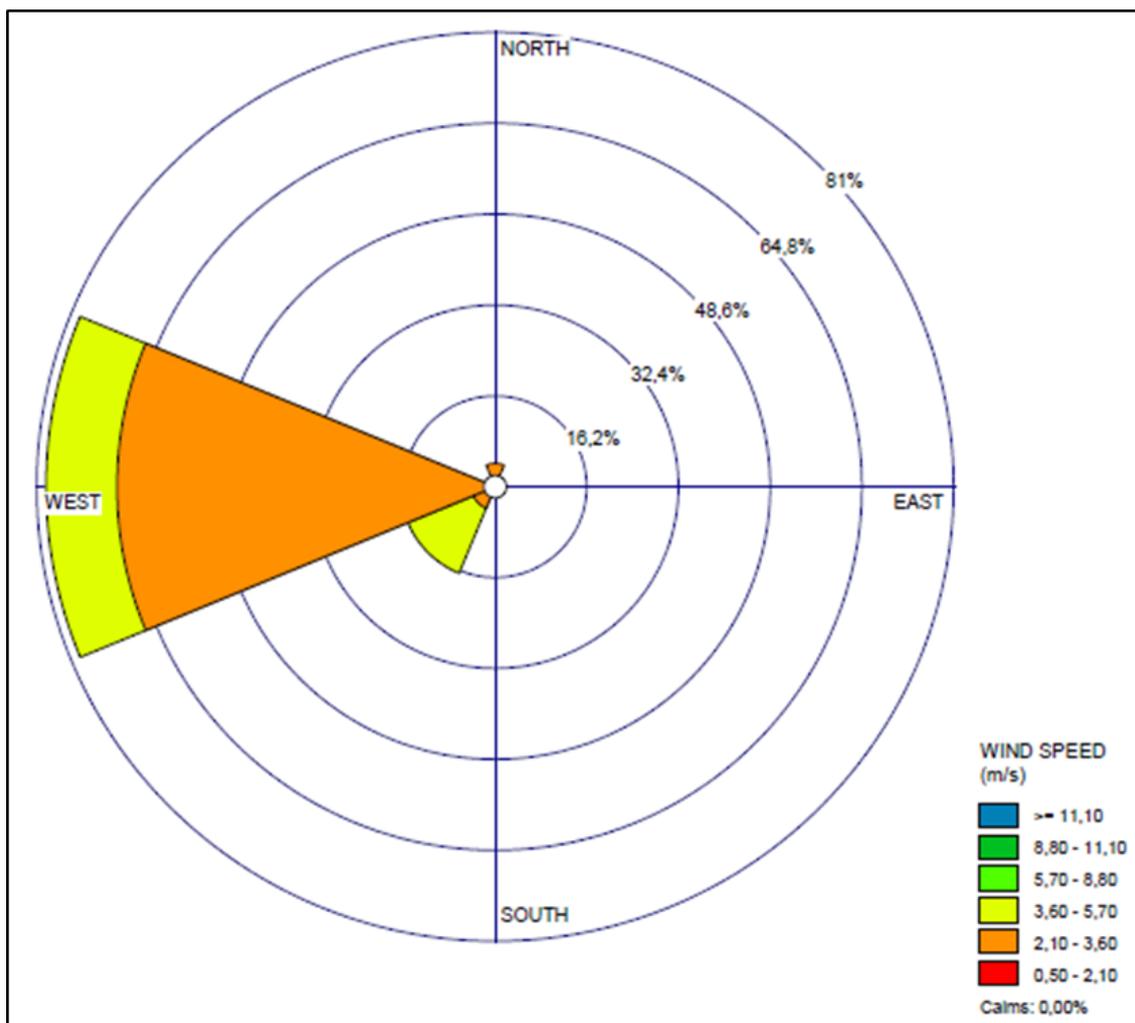


Figura 7.28: Rosa dei venti del giorno 23 febbraio 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
NE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,00	0,04	0,13	0,00	0,00	0,00	0,17
W	0,00	0,67	0,13	0,00	0,00	0,00	0,79
NW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Totale	0,00	0,75	0,25	0,00	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 7.1: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 23 febbraio 2018

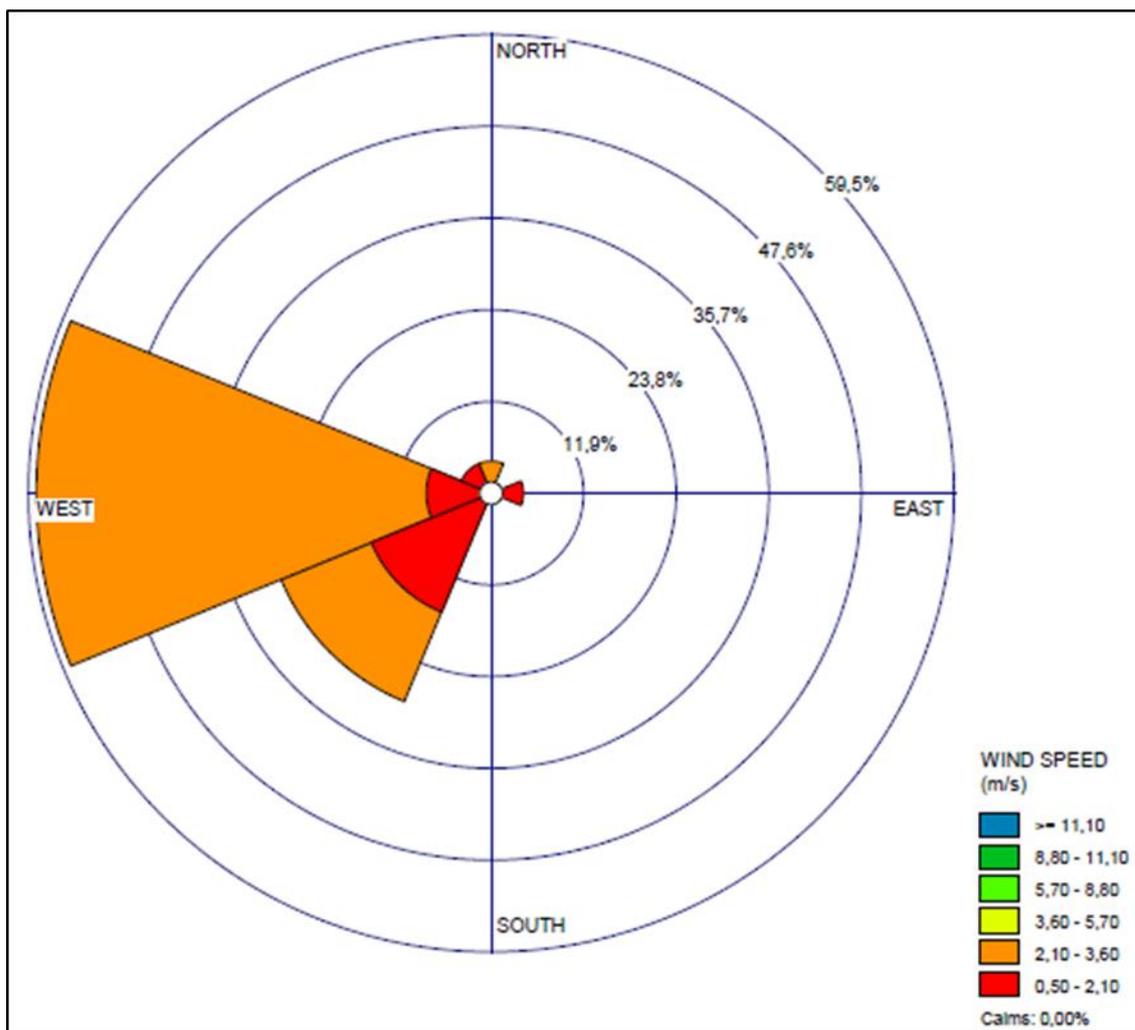


Figura 7.29: Rosa dei venti del giorno 24 febbraio 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
NE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,17	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29
W	0,08	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58
NW	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
Sub-Totale	0,33	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 7.2: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 24 febbraio 2018

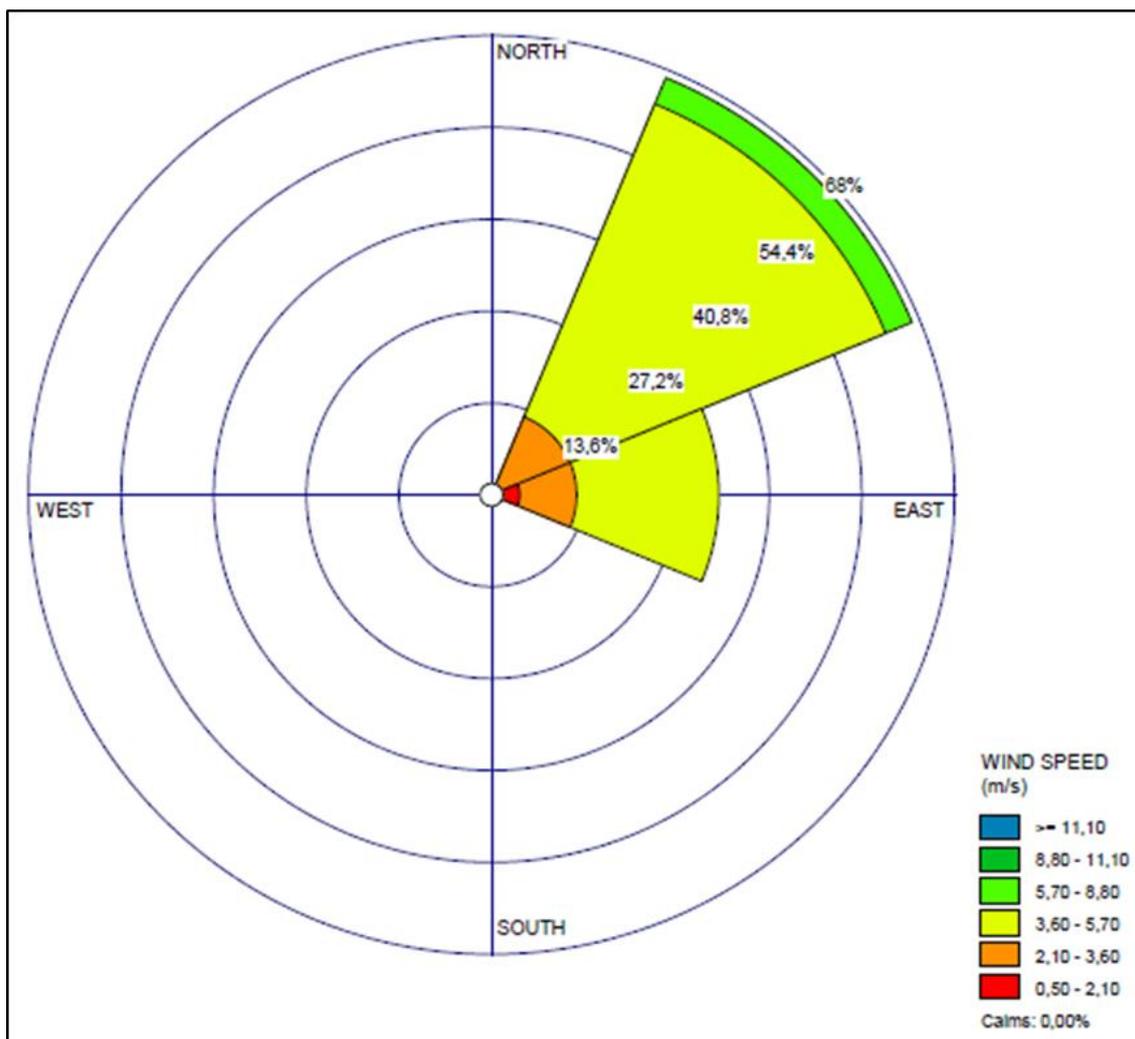


Figura 7.30: Rosa dei venti del giorno 25 febbraio 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NE	0,00	0,13	0,50	0,04	0,00	0,00	0,67
E	0,04	0,08	0,21	0,00	0,00	0,00	0,33
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Totale	0,04	0,21	0,71	0,04	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 7.3: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 25 febbraio 2018

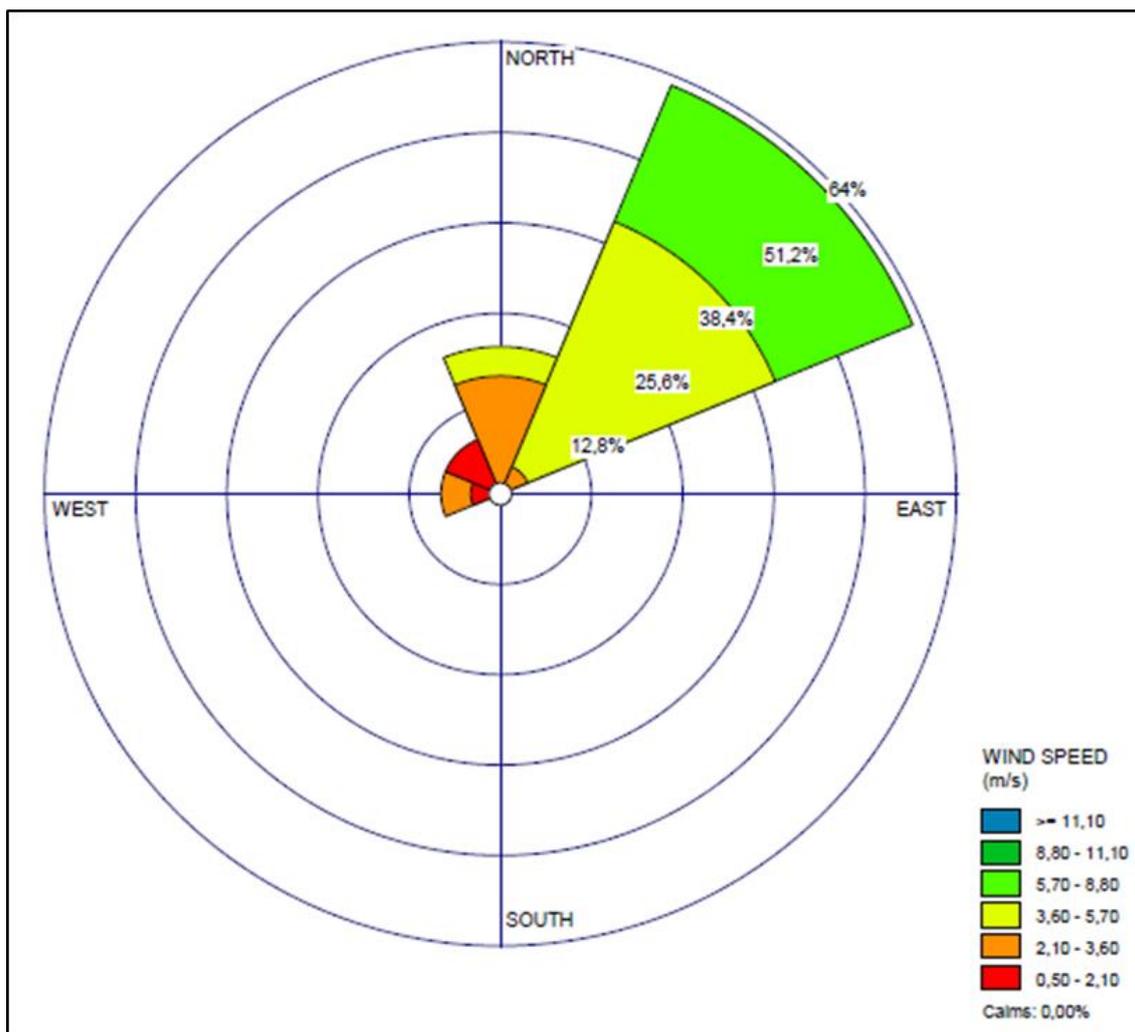


Figura 7.31: Rosa dei venti del giorno 26 febbraio 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,00	0,17	0,04	0,00	0,00	0,00	0,21
NE	0,00	0,04	0,38	0,21	0,00	0,00	0,63
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
NW	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
<b>Sub-Totale</b>	0,13	0,25	0,42	0,21	0,00	0,00	1,00
<b>Calme</b>							0,00

Tabella 7.4: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 26 febbraio 2018

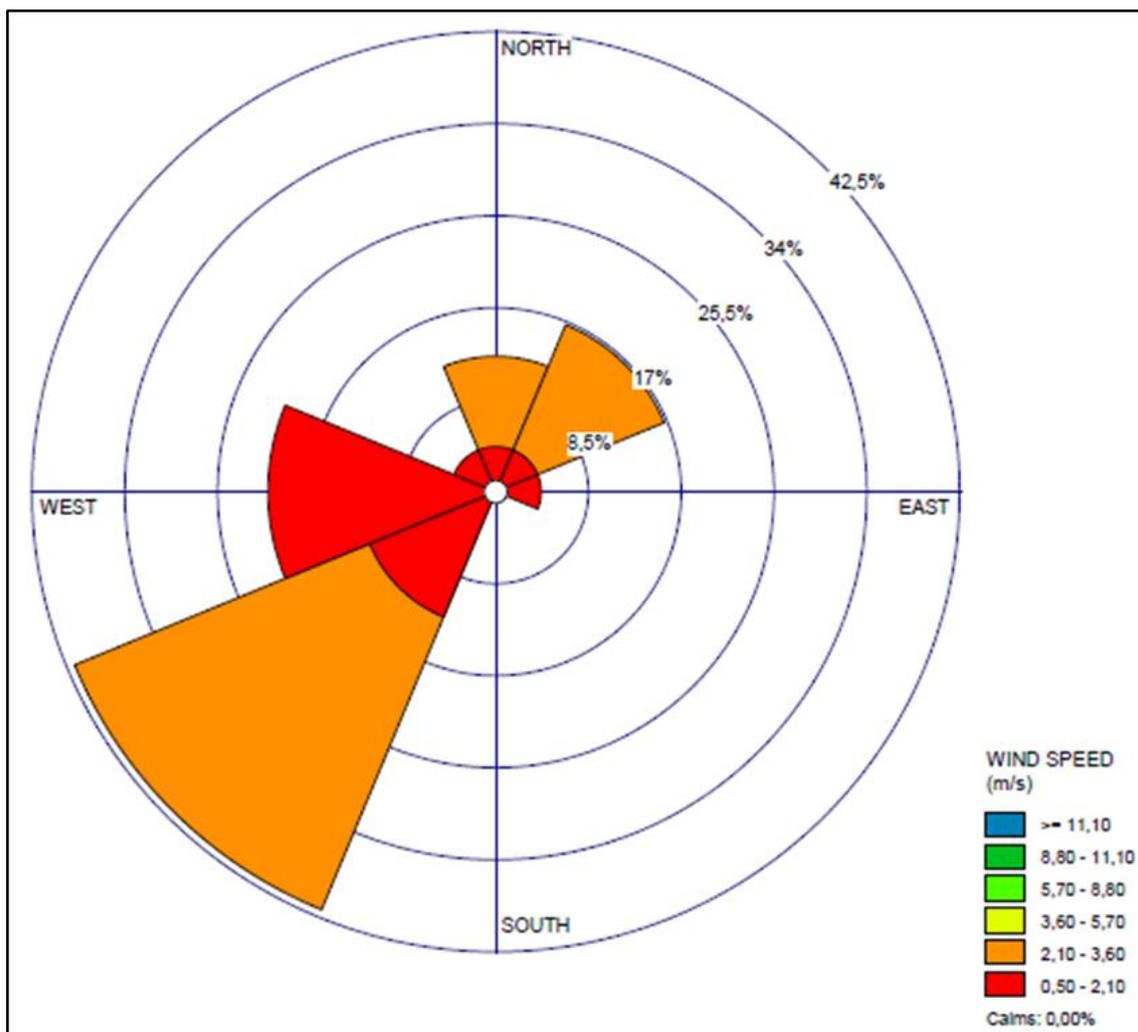


Figura 7.32: Rosa dei venti del giorno 27 febbraio 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,04	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
NE	0,04	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
E	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,13	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42
W	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
NW	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
<b>Sub-Totale</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>
<b>Calme</b>							<b>0,00</b>

Tabella 7.5: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 27 febbraio 2018

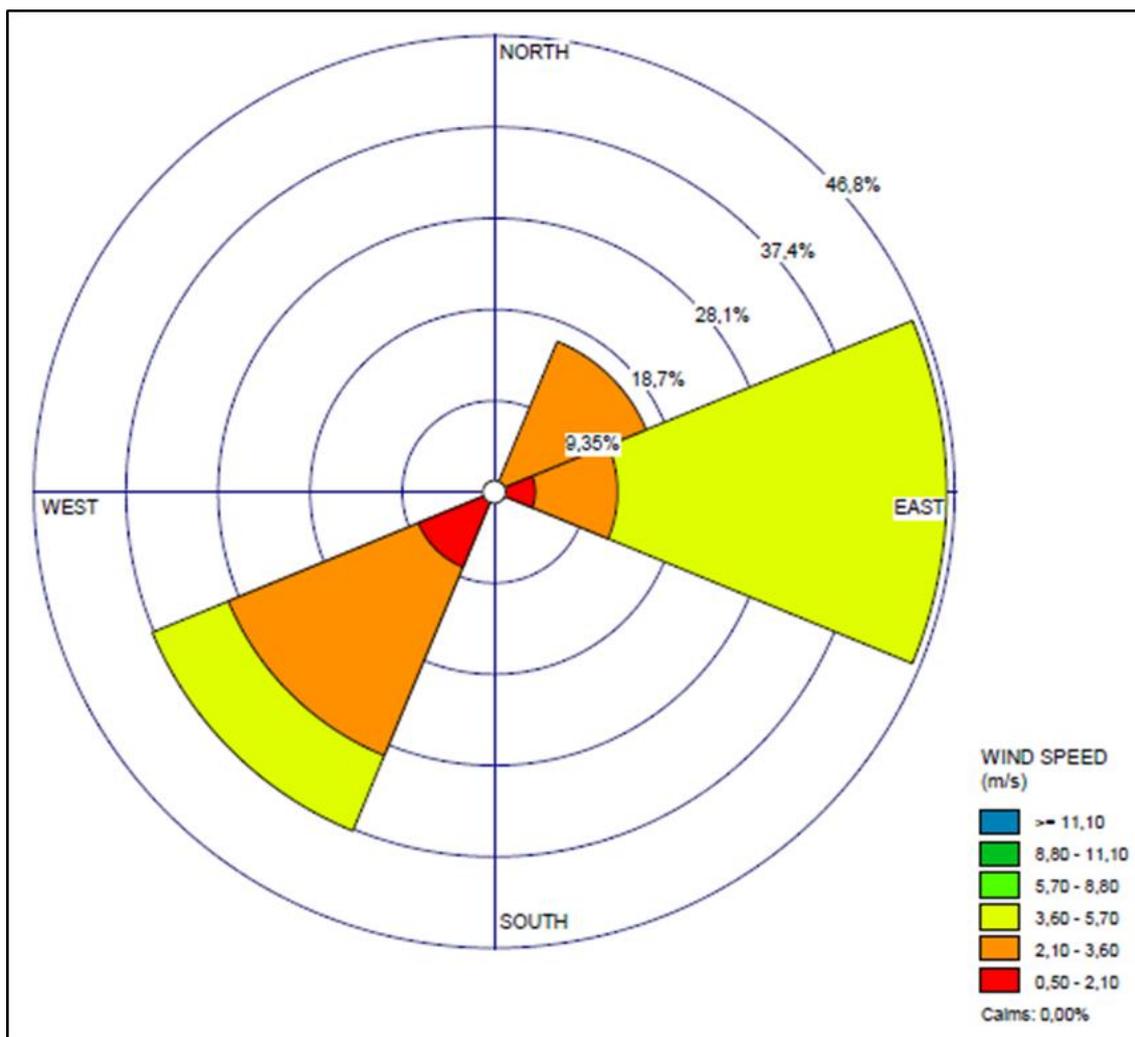


Figura 7.33: Rosa dei venti del giorno 28 febbraio 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NE	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
E	0,04	0,08	0,33	0,00	0,00	0,00	0,46
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,08	0,21	0,08	0,00	0,00	0,00	0,38
W	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Totale	0,13	0,46	0,42	0,00	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 7.6: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 28 febbraio 2018

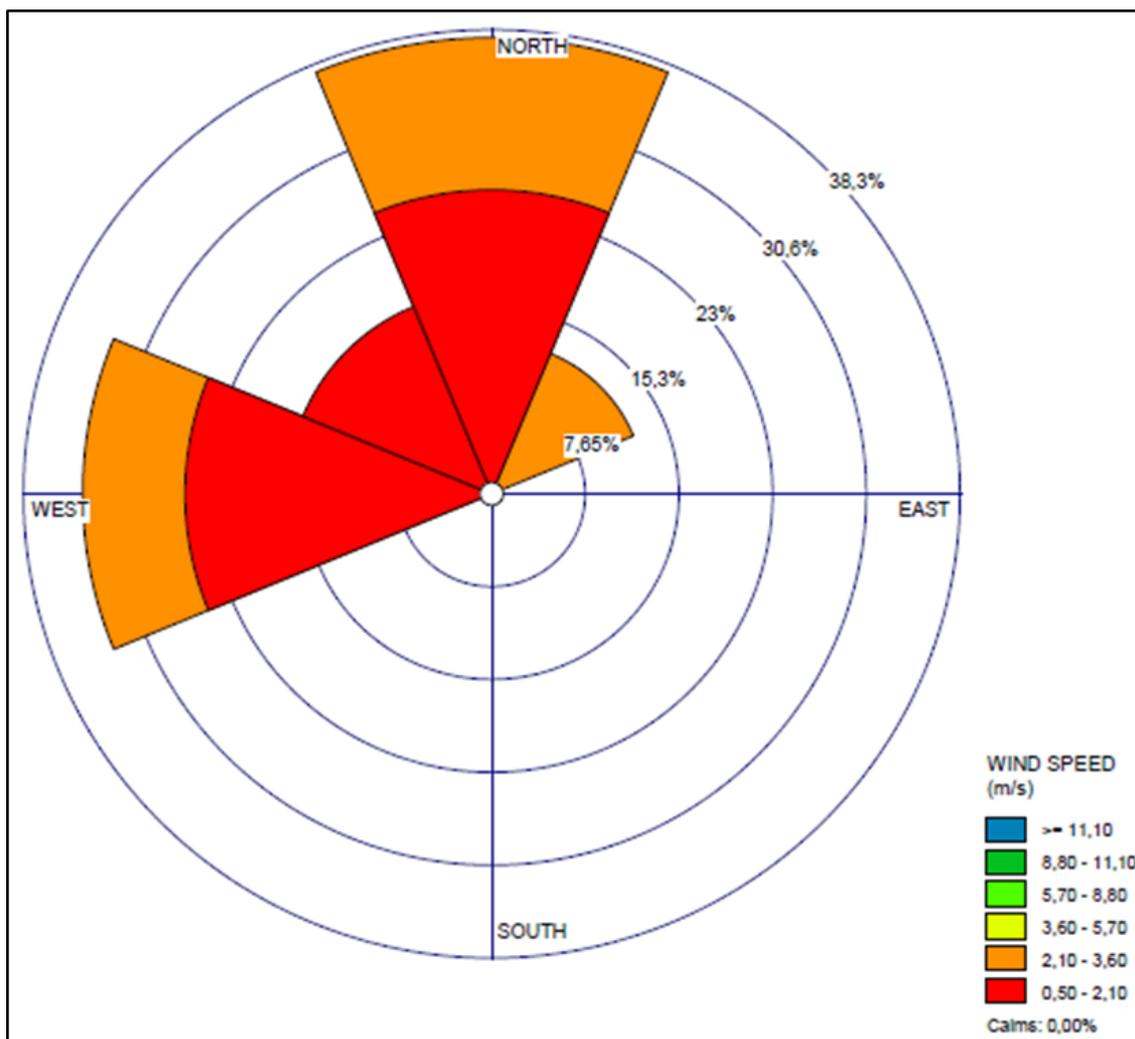


Figura 7.34: Rosa dei venti del giorno 1° marzo 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,25	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38
NE	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
W	0,25	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33
NW	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
Sub-Totale	0,67	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 7.7: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 1° marzo 2018

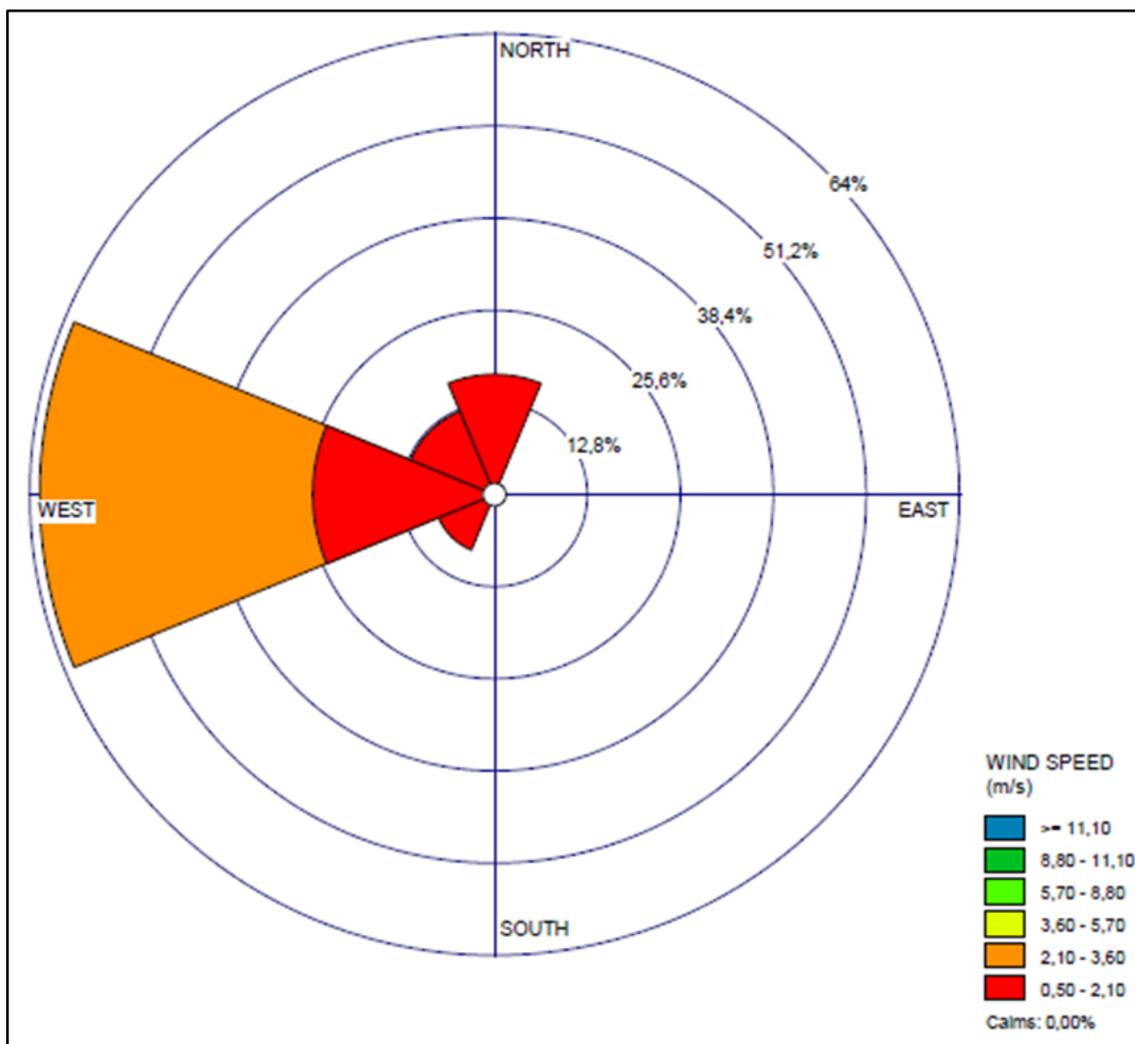


Figura 7.35: Rosa dei venti del giorno 2 marzo 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
NE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
W	0,25	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63
NW	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
Sub-Totale	0,63	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 7.8: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 2 marzo 2018

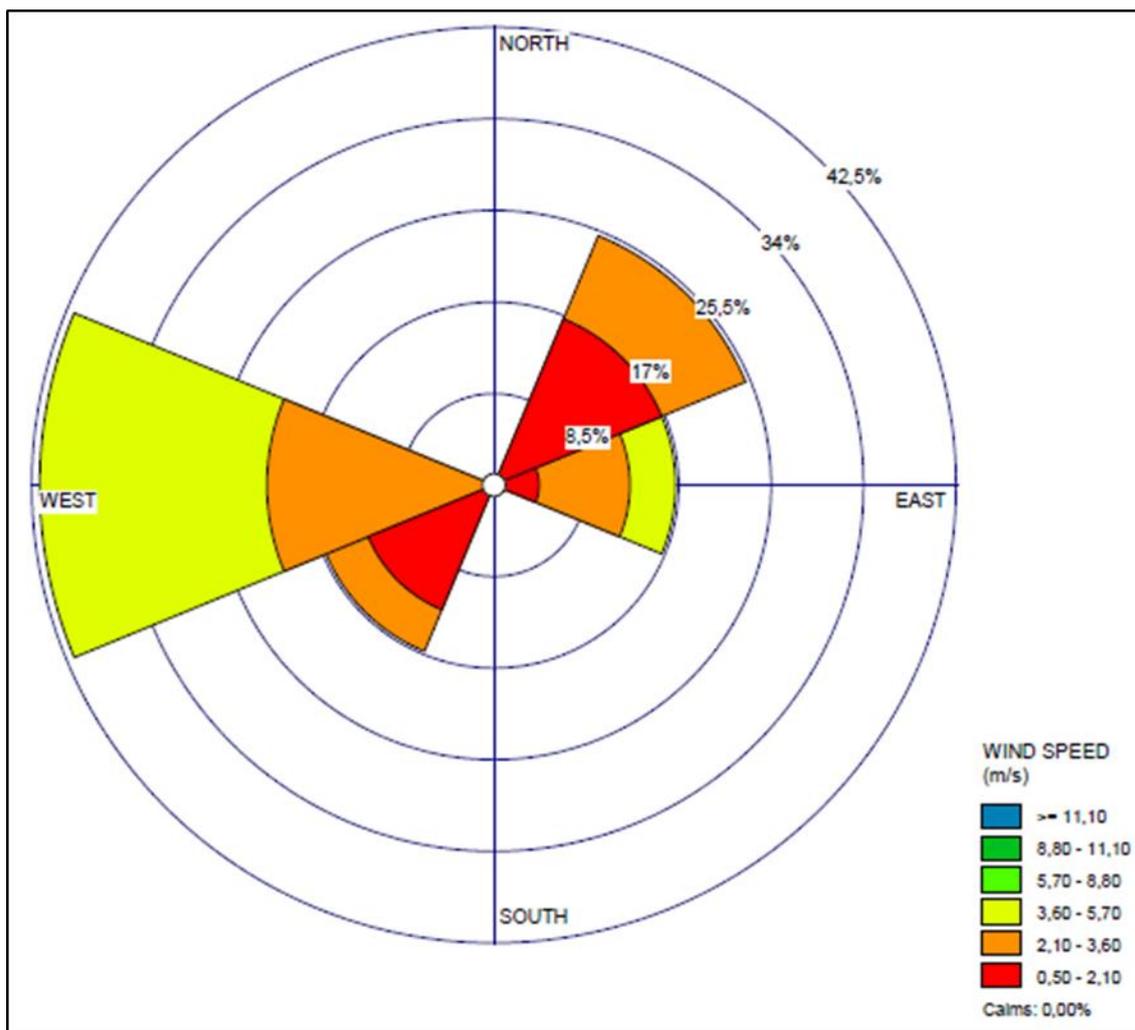


Figura 7.36: Rosa dei venti del giorno 3 marzo 2018

Direzione / Classe del vento (m/s)	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	≤ 11,10	Totale
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NE	0,17	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
E	0,04	0,08	0,04	0,00	0,00	0,00	0,17
SE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SW	0,13	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
W	0,00	0,21	0,21	0,00	0,00	0,00	0,42
NW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Totale	0,33	0,42	0,25	0,00	0,00	0,00	1,00
Calme							0,00

Tabella 7.9: Distribuzione in frequenza delle classi di velocità del vento per direzione del giorno 3 marzo

2018



---

## 8. Bibliografia

[1] Agenzia di informazione ANSA:

[http://www.ansa.it/canale\\_ambiente/notizie/inquinamento/2017/12/19/smog-e-plastiche-italiani-tra-i-piu-preoccupati-in-ue\\_be104fd0-7a73-4e7a-a7ab-944c8341cc3c.html](http://www.ansa.it/canale_ambiente/notizie/inquinamento/2017/12/19/smog-e-plastiche-italiani-tra-i-piu-preoccupati-in-ue_be104fd0-7a73-4e7a-a7ab-944c8341cc3c.html)

[2] Rivista Wired:

<https://www.wired.it/attualita/ambiente/2018/05/03/inquinamento-aria-oms/>

[3] Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare:

<http://www.minambiente.it/pagina/qualita-dellaria>

[4] Comune di Bologna:

<http://www.comune.bologna.it/trasporti/servizi/2:1686/3316/>

[5] Rete civica Aria pesa:

<https://ariapesa.org/>

[6] Servizio Idro-Meteo-Clima ARPA Emilia-Romagna:

<http://www.smr.arpa.emr.it/dext3r/>

[7] Regione Lombardia:

[https://www.cartografia.regione.lombardia.it/silvia/doc/normative/leggi\\_comunitarie/Dir\\_4\\_2003.htm](https://www.cartografia.regione.lombardia.it/silvia/doc/normative/leggi_comunitarie/Dir_4_2003.htm)

[8] Regione Lombardia:

[https://www.cartografia.regione.lombardia.it/silvia/doc/normative/leggi\\_comunitarie/Dir\\_35\\_2003.htm](https://www.cartografia.regione.lombardia.it/silvia/doc/normative/leggi_comunitarie/Dir_35_2003.htm)

[9] Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea:

<https://www.ambientediritto.it/Legislazione/INQUINAMENTO/2004/dir%202004%20107%20ce.pdf>

[10] Camera dei deputati:

<http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/10155dl.htm>

[11] Camera dei deputati:

<http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/05195dl.htm>

[12] Camera dei deputati:

<http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/06152dl.htm>

[13] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare:

<http://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>

[14] Stazioni Sperimentali per l'Industria, 2005. *Analisi comparativa dei combustibili a uso civile.*

[15] Legambiente, 2018. *Mal'aria. Rapporto di Legambiente sull'inquinamento atmosferico nelle città italiane.*

[16] Agenzia ARPA:

[https://www.arpae.it/dettaglio\\_generale.asp?id=2926&idlivello=1640](https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=2926&idlivello=1640)

[17] ISPRA, 2015. *Annuario dei dati ambientali 2014-2015.*

[18] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare:

<http://www.minambiente.it/comunicati/inquinamento-bacino-padano-il-19-roma-firma-accordo-di-programma>

[19] ISPRA, 2017. *Qualità dell'ambiente urbano – XIII Rapporto.*

[20] ISPRA, 2017. *Annuario dei dati ambientali 2017.*

[21] ARPA, 2018. *La qualità dell'aria in Emilia-Romagna nel 2017 in*  
[https://www.arpae.it/cms3/documenti/cerca\\_doc/aria/2018/RelazioneAriaSintesi2017\\_23gennaio.pdf](https://www.arpae.it/cms3/documenti/cerca_doc/aria/2018/RelazioneAriaSintesi2017_23gennaio.pdf)

[22] A. Angelini, 2017. *Metodologia per la stima dell'impatto sulla qualità dell'aria di sorgenti civili diffuse.*

[23] Aria Pesa: [https://ariapesa.org/docs/report\\_AriaPesa.pdf](https://ariapesa.org/docs/report_AriaPesa.pdf)

[24] M.G. Messina, G. Valenti, F. Carapellucci, G. Fusco, C. Colombaroni, A. Gemma, G. Ciccarelli, S. Lo Sardo, 2011. *Sistema di monitoraggio e previsione della mobilità veicolare per l'integrazione tra la rete della illuminazione pubblica e la rete della*

mobilità in [http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/smart-city/rds-330.pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/smart-city/rds-330.pdf)

[25] E. de Munari, C. Pironi, *Il monitoraggio passivo, punti di forza e criticità*, in “Ecoscienza” n. 3, marzo 2017.

[26] P. Veronesi, C. Mariotti, M.C. Verna, P. Vittori, Comune di Forlì, 2014. *Campagna di monitoraggio 2014 con campionatori passivi per la determinazione di benzene e biossido di azoto in ambito urbano*.

[27] U-earth Biotechnologies, 2015. *Documento tecnico U-Monitor* in <https://www.pure-air-zone.com/u-monitor>

[28] V. Moca, 2017. *Analisi dei dati preliminari del piano di monitoraggio ambientale del progetto F.I.CO*

[29] Bing: <https://www.bing.com/maps?q=via+terracini+28>