

# Monitoraggio degli inquinanti originati dalla combustione di biomasse nel Comune di Verona



Quinzano



Borgo Milano



Giarol



Ca' di David



Montorio

**Periodo di attuazione: inverno 2016-2017**

**RELAZIONE TECNICA**

Realizzato a cura di:

**A.R.P.A.V.**

**Dipartimento Provinciale di Verona**

Direttore: Ing. Cunego Giancarlo

**Servizio Controlli Ambientali**

Dirigente: Predicatori Francesca

De Zolt Sappadina Simona

**Ufficio Reti di Monitoraggio**

Responsabile: Salomoni Andrea

Forigo Antonello

Sarego Giacomo

**Dipartimento Regionale Laboratori - Servizio Laboratorio di Venezia**

Dirigente: Formenton Gianni

Daniele Antonio

De Gaspari Francesco

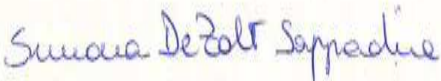

Coronaro Sara

Rovea Manuela

**Contestualizzazione meteo-climatica**

Ferrario Massimo

*NOTA: La presente Relazione tecnica può essere riprodotta solo integralmente. L'utilizzo parziale richiede l'approvazione scritta del Dipartimento ARPAV Provinciale di Verona e la citazione della fonte stessa.*

<b>Relazione tecnica n. 1/2018 – Rev. 2.0</b>	<b>Data : 20/06/2018</b>
F.to Il Tecnico Unità Operativa Fisica dell'Ambiente Dr.ssa Simona De Zolt Sappadina 	F.to Il Dirigente Servizio Controlli Ambientali Dr.ssa Francesca Predicatori 

## INDICE

1	Introduzione.....	4
2	Analisi della situazione attuale.....	5
3	Caratterizzazione dei siti e tempi di realizzazione .....	9
4	Informazioni sulla strumentazione e sulle analisi.....	12
5	Analisi dei dati rilevati .....	13
5.1	PM2.5.....	14
5.2	Levoglicosano.....	18
5.3	IPA.....	26
5.4	Carbonio Elementare (EC) e Organico (OC).....	31
5.4.1	EC.....	31
5.4.2	OC.....	34
5.5	SIA.....	36
5.6	Composizione relativa del particolato .....	44
5.7	Biossido di azoto (NO <sub>2</sub> )-Ossidi di azoto (NO <sub>x</sub> ) .....	49
5.8	Biossido di zolfo (SO <sub>2</sub> ).....	52
5.9	Polveri atmosferiche inalabili (PM10).....	53
5.10	Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) .....	54
5.11	Ammoniaca (NH <sub>3</sub> ) .....	55
6	Conclusioni.....	56
7	Appendice.....	59
7.1	Contestualizzazione meteo climatica.....	59
7.1.1	Periodo di monitoraggio 1: 29/10/2016- 13/11/2016 .....	59
7.1.2	Periodo di monitoraggio 2: 06/12/2016- 18/12/2016 .....	61
7.1.3	Periodo di monitoraggio 3: 17/01/2017- 29/01/2017 .....	63
7.1.4	Periodo di monitoraggio 4: 14/02/2017- 26/02/2017 .....	65
7.1.5	Periodo di monitoraggio 5: 21/03/2017- 03/04/2017 .....	67
7.2	Legenda parametri statistici.....	70
7.3	Inquinanti monitorati e normativa di riferimento .....	71
7.4	Figure supplementari.....	73
8	Bibliografia.....	75

# 1 Introduzione

Il particolato sospeso (PM) è rappresentato da una serie eterogenea di composti: particolare interesse per l'impatto sulla salute rivestono le frazioni più fini (PM10, polveri di diametro inferiore ai 10  $\mu\text{m}$ , e PM2.5, polveri di diametro inferiore a 2.5  $\mu\text{m}$ ) che possono penetrare in profondità nell'albero respiratorio. Il particolato fine è costituito solo in piccola parte da una frazione primaria, mentre la maggior parte è di tipo secondario e deriva da reazioni chimiche in atmosfera, che coinvolgono precursori gassosi quali ossidi di azoto e zolfo, ammoniaca, composti organici volatili e altri composti molecolari. La sua composizione chimica dipende dalle fonti emissive che lo originano e dalle reazioni chimiche che hanno portato alla sua formazione.

La tossicità del particolato dipende oltre che dalle sue dimensioni, che determinano la possibilità di penetrazione all'interno dell'organismo umano, dalla sua composizione chimica. Fra i componenti del PM10-PM2,5 rilevanti dal punto di vista sanitario vi sono composti potenzialmente tossici quali gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e il carbonio organico. Le varie specie di IPA hanno caratteristiche tossicologiche differenti, ma per tutte sono riconosciute proprietà mutagene e cancerogene (WMO, 2000): il benzo(a)pirene è stato inserito nell'elenco IARC delle sostanze cancerogene di classe 1 con la direttiva europea 2004/107/EC, ed è stato stabilito il limite sulla concentrazione media annuale pari a 1  $\text{ng}/\text{m}^3$ .

L'analisi della composizione chimica di PM10 e PM2,5 in vari siti, distribuiti nella regione Veneto, ha evidenziato che i livelli elevati di concentrazione di IPA possono essere raggiunti anche in aree rurali o suburbane non influenzate direttamente da fonti di tipo industriale o da traffico, suggerendo un ruolo di primaria importanza della combustione di legna e pellet (Masiol et al., 2013)

La crescita verificatasi negli ultimi anni dell'uso di biomasse solide per riscaldamento anche in ambiente urbano o suburbano ha determinato un aumento delle emissioni di particolato primario (PM10 e PM2,5) e delle concentrazioni di composti quali IPA e carbonio rilevabili sulla parte più fine del particolato.

Altri importanti indicatori di combustione di legna, rilevabili sul PM2,5, sono composti ionici quali il potassio, il carbonio organico ed elementare e alcuni zuccheri come il levoglucosano. I risultati di indagini condotte sia in Italia che in diversi paesi europei rilevano un aumento della concentrazione in aria di questi composti, coerentemente con un aumento dell'utilizzo di biomasse legnose per il riscaldamento domestico.

In questa relazione sono descritti i risultati del monitoraggio del PM2.5 condotto in diverse zone del comune di Verona. E' stata analizzata la distribuzione e la composizione di tale inquinante sul territorio comunale di Verona, sia in aree urbane caratterizzate da traffico intenso e alta densità di popolazione, sia in aree suburbane in cui potrebbe risultare fondamentale la presenza di piccole attività agricole e l'utilizzo di sistemi di riscaldamento a biomassa.

Sono state realizzate cinque campagne di misura, distribuite nei mesi invernali, tra ottobre 2016 e marzo 2017. Ogni campagna di misura ha avuto una durata di circa 15 giorni. E' stata eseguita la speciazione chimica del particolato di diametro equivalente inferiore a 2.5  $\mu\text{m}$  (PM2.5), attraverso la determinazione delle seguenti specie chimiche: idrocarburi policiclici aromatici (benzo(a)pirene, benzo(a)antracene, benzo(b)fluorantene, benzo(j)fluorantene, benzo(k)fluorantene, indeno(1,2,3-cd)pirene, dibenzo(a,h)antracene), levoglucosano, carbonio elementare, carbonio organico, ammonio, calcio, magnesio, potassio, sodio, solfati, nitrati, cloruri. Durante le campagne di misura, sono state misurate anche le concentrazioni dei principali inquinanti relativi alla qualità dell'aria, per consentire un confronto con i dati relativi al PM2.5 e una loro corretta interpretazione.

## 2 Analisi della situazione attuale

Gli Idrocarburi Policiclici Aromatici sono la componente del particolato atmosferico che desta più preoccupazione per gli effetti sanitari causati dalla loro inalazione. Essi comprendono varie specie chimiche, delle quali il benzo(a)pirene è considerato il più pericoloso, ed è stato classificato cancerogeno di livello I (corrispondente a cancerogeno certo per l'uomo) dallo IARC (International Agency for Research on Cancer). Per esso è in vigore un limite normativo pari  $1 \text{ ng/m}^3$ , relativo alla media annuale.

I dati di concentrazione in aria di IPA sono disponibili per la provincia di Verona dal 2002 per la stazione di VR-Borgo Milano, dal 2008 per la stazione di VR-Cason (da dicembre 2015 spostata a VR-Giarol), dal 2013 per la stazione di Bosco Chiesanuova. Le medie annuali dal 2002 della specie IPA denominata benzo(a)pirene sono riportate nel grafico di figura 1: si nota che dopo una iniziale decrescita delle concentrazioni di benzo(a)pirene, dal 2010 si ha una tendenza all'aumento nei dati rilevati a VR-Cason. A partire dal 2004, con l'eccezione del 2006, il limite di  $1 \text{ ng/m}^3$  sulla media annuale di questo inquinante è stato rispettato, nonostante le concentrazioni in periodo invernale possano risultare superiori a  $1 \text{ ng/m}^3$ . Negli ultimi due anni (2016 e 2017) è presente una lieve diminuzione della concentrazione di questo inquinante a Verona-Giarol e Boscochiesanuova.

A livello nazionale i dati disponibili indicano la tendenza a un aumento delle concentrazioni di IPA (ISPRA, 2015). Nella regione Veneto, nell'anno 2015, il 69% delle stazioni dove è stato eseguito il monitoraggio di IPA ha superato il limite normativo (ARPAV, 2015). L'analisi dell'andamento interannuale della concentrazione di IPA, inoltre, mostra una forte stagionalità, e durante il periodo invernale si registrano delle concentrazioni di benzo(a)pirene che superano ampiamente il riferimento del limite normativo. Questo è legato alle condizioni meteorologiche, che in inverno sono meno favorevoli alla dispersione degli inquinanti, ma anche al contributo del riscaldamento domestico nei mesi tra ottobre e marzo, e alle condizioni ambientali che, con basse temperature ed elevata umidità, favoriscono le reazioni di accumulo degli IPA sul particolato atmosferico e inibiscono la loro volatilizzazione.

La concentrazione di IPA in aria è collegata a diversi fenomeni di combustione, sia in ambito industriale che civile. Il contributo in termini emissivi delle diverse attività alle concentrazioni in aria rilevate può essere stimato tramite gli inventari delle emissioni redatti in ambito nazionale da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, in ambito locale da ARPAV (INEMAR 2013). I dati dell'inventario ISPRA del 2015, relativi alla provincia di Verona, indicano che la maggiore fonte emissiva di IPA è il riscaldamento domestico (82%), seguita da processi produttivi (7%), smaltimento di rifiuti (6%) e traffico (4%) (figura 2). L'inventario INEMAR (ARPAV, 2013), stima che il riscaldamento domestico e il traffico contribuiscano in modo ancor più preponderante alle emissioni di benzo(a)pirene (figura 3). I dati ISPRA evidenziano una tendenza all'aumento delle emissioni di IPA negli ultimi 20 anni, causato dalle attività classificate come "combustione di tipo non industriale" (Macrosettore 2, Figura 4), e in particolare dalle caldaie a biomassa con potenza termica inferiore ai 50 MW (Figura 5). Questa tendenza è in accordo con i dati di emissioni a livello europeo (EEA report, 2015. Air quality in Europe-2015 report). A livello comunale, ARPAV ha valutato, tramite il modello INEMAR, il contributo emissivo dei diversi macrosettori a Verona: il 90% delle emissioni di benzo(a)pirene, uno dei più caratteristici componenti IPA, deriva dalla combustione di biomasse in ambito civile.

In questo quadro, sono chiari l'interesse e l'utilità della realizzazione di un monitoraggio più accurato della concentrazione di polveri fini e della loro caratterizzazione.

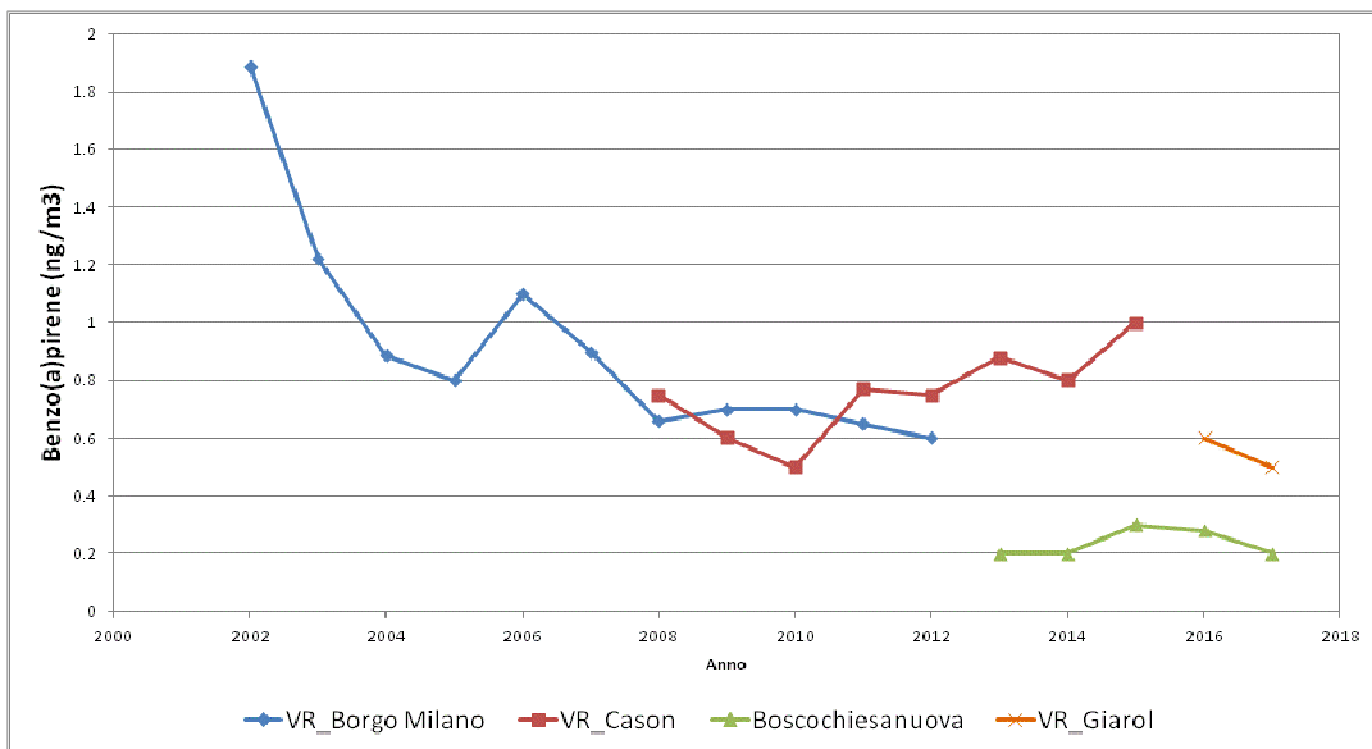


Figura 1. Concentrazione di benzo(a)pirene misurata dal 2002 al 2017 dalle centraline della provincia di Verona: medie annuali.

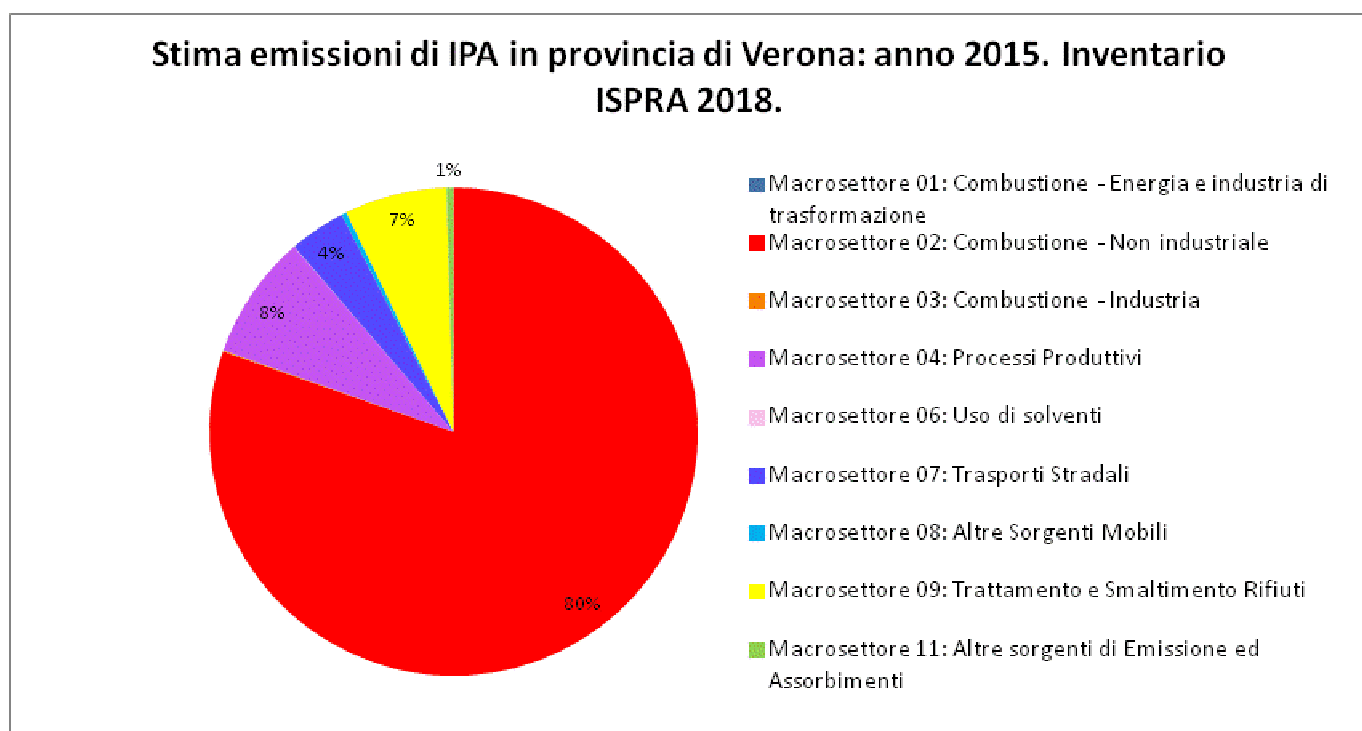
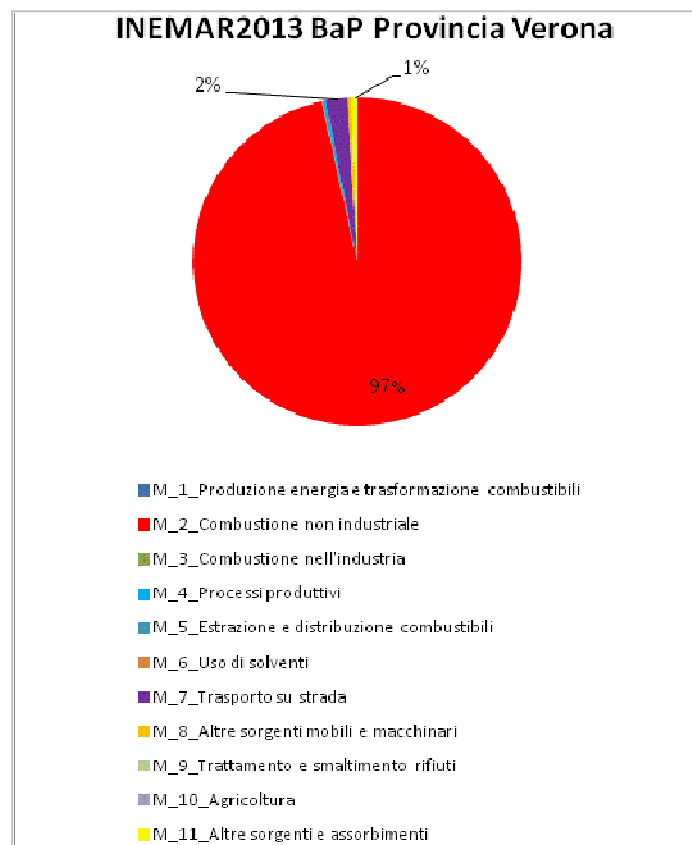
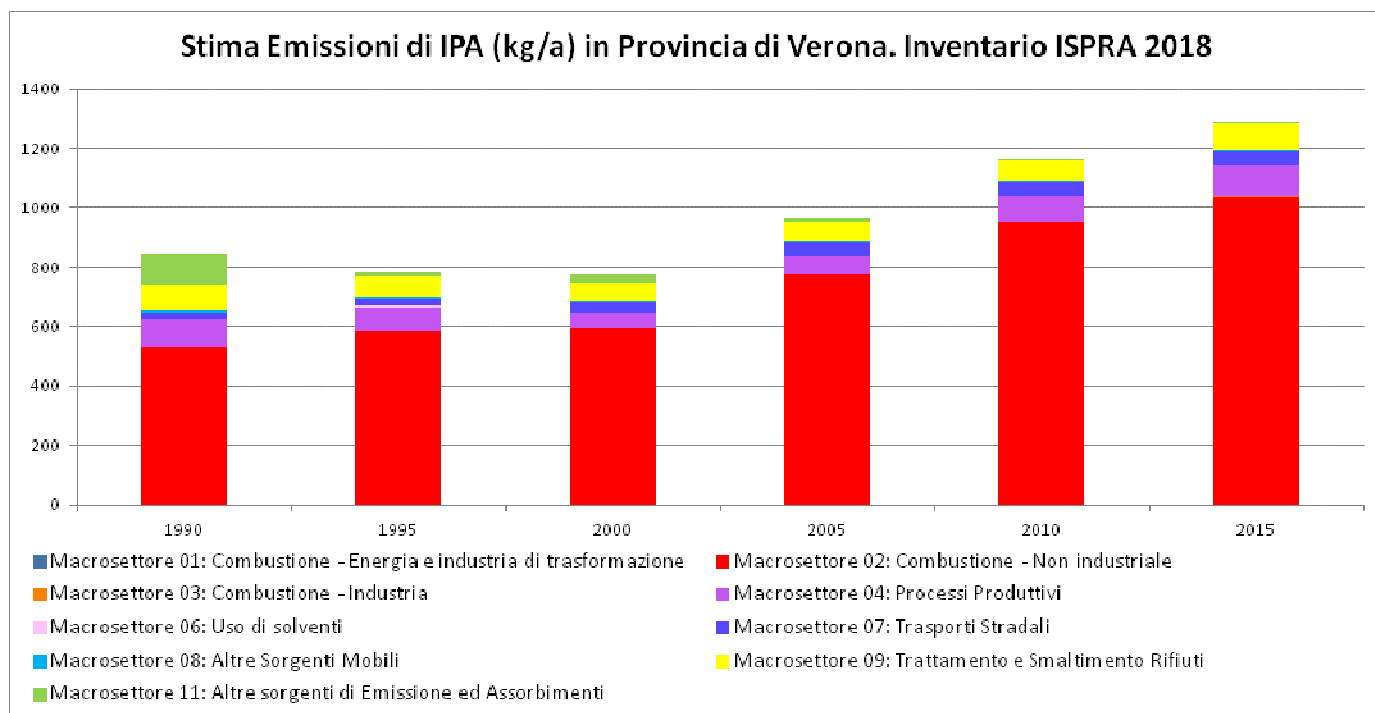


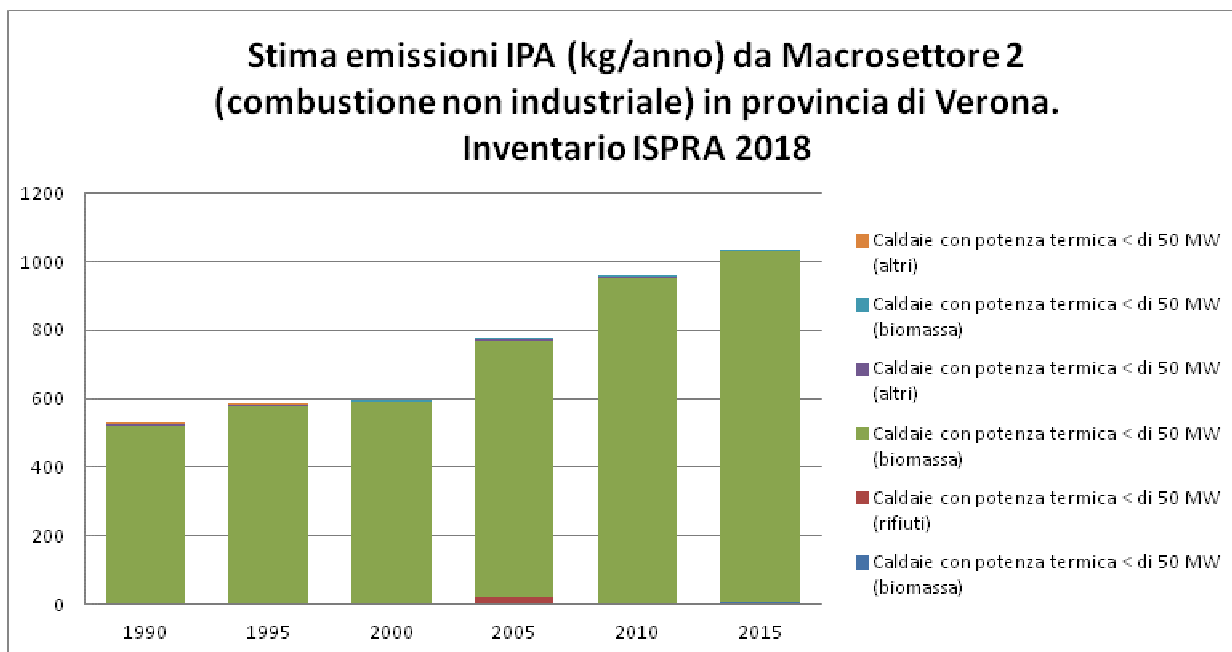
Figura 2 Inventario delle emissioni ISPRA 2018. Emissioni di IPA nel 2015: contributo delle diverse tipologie di fonte emissiva da parte dei diversi macrosettori.



**Figura 3** Inventario delle emissioni INEMAR 2013. Emissioni di benzo(a)pirene in provincia di Verona: contributo dei diversi macrosettori.



**Figura 4:** Inventario delle emissioni ISPRA 2018. Emissioni di IPA: contributo delle diverse tipologie di fonte emissiva, negli anni dal 1990 al 2010.



**Figura 5. Inventario delle emissioni ISPRA 2018. Emissioni di IPA da macrosettore 2 (combustione non industriale): contributo delle diverse tipologie di fonte emissiva, negli anni dal 1990 al 2015.**



### 3 Caratterizzazione dei siti e tempi di realizzazione

Le campagne di monitoraggio della qualità dell'aria sono state svolte nell'inverno 2016-2017, in cinque periodi di due settimane ognuno, indicati in tabella 1. Il campionamento delle polveri sottili PM2.5 è stato l'obiettivo principale del monitoraggio. A questo è stato affiancato il monitoraggio dei principali inquinanti attraverso la strumentazione automatica delle centraline fisse di VR-Giarol e VR\_Borgo Milano e delle unità mobili posizionate a Quinzano e Montorio: gli inquinanti misurati nelle diverse località sono riportati in tabella 3. Su tutti i filtri prelevati sono state effettuate le misure di concentrazione di PM2.5, IPA e levoglucosano; i filtri prelevati durante la prima settimana vengono usati per la determinazione della concentrazione di ammonio, calcio, magnesio, potassio, sodio, solfati, nitrati, cloruri; quelli prelevati durante la seconda settimana sono destinati alla misurazione di carbonio elementare e organico.

In Figura 6 è indicata la posizione dei punti di monitoraggio, elencati in Tabella 2. Di seguito, sono descritte le loro caratteristiche.

1. Stazione di monitoraggio della qualità dell'aria di Borgo Milano: situata all'interno di un quartiere densamente abitato, nei pressi di una delle arterie di penetrazione verso il centro della città. Il campionamento è rappresentativo delle concentrazioni di inquinanti in zone fortemente influenzate dal traffico veicolare e dal riscaldamento domestico. La zona è raggiunta dal teleriscaldamento ed è metanizzata: ci si attenderebbe pertanto un basso impatto della legna come combustibile per riscaldamento.
2. Stazione di monitoraggio della qualità dell'aria di via Belluno (Giarol Grande): situata all'interno di un grande parco urbano, è rappresentativa delle concentrazioni di fondo degli inquinanti.
3. Punto di monitoraggio di Quinzano: si tratta di un quartiere periferico di Verona ai piedi delle colline, nella zona Nord Ovest, circondato da zone verdi coltivate, prevalentemente olivi e vigneti, caratterizzato da case basse (due o tre piani) spesso mono o bifamiliari. Parzialmente raggiunto dal teleriscaldamento, la tipologia prevalente delle abitazioni fa ipotizzare una diffusione di impianti a combustibile solido (camini, stufe). Presso questa postazione è stata posizionata una unità mobile di monitoraggio della qualità dell'aria. 150 m a est di essa si trovano le piscine Santini, dotate di una propria caldaia per il sistema di riscaldamento, e 500 m in linea d'aria a sud-ovest c'è la centrale di cogenerazione AGSM (potenza termica 93.9 MW, potenza elettrica 30.5 MW).
4. Punto di monitoraggio di Montorio: zona periferica della città con caratteristiche simili a Quinzano, posta nella zona Nord-Est, circondata da coltivazioni e caratterizzata da case basse, spesso mono-bifamiliari. Presso questa postazione è stata posizionata una unità mobile di monitoraggio della qualità dell'aria.
5. Punto di monitoraggio di Ca' di David: si trova a sud della città, in una delle frazioni, che nel passato costituiva un abitato distinto da Verona. La zona scelta si trova relativamente lontana dalla SS12 (500 m a est), strada caratterizzata da un forte traffico veicolare, con un flusso elevato di mezzi pesanti. Anche in questa zona la tipologia abitativa è di tipo misto. Bassi condomini si alternano a case di tipo mono-bifamiliare. Inoltre, nelle vicinanze del punto di misura sono presenti due cartiere, le Saci S.p.a. 800 m a ovest, e la Mugnai Carta, 800 m a sud est: entrambe sono dotate di una propria centrale termica a metano, e inoltre la prima fa uso di gasolio e di olio combustibile nei suoi processi produttivi.

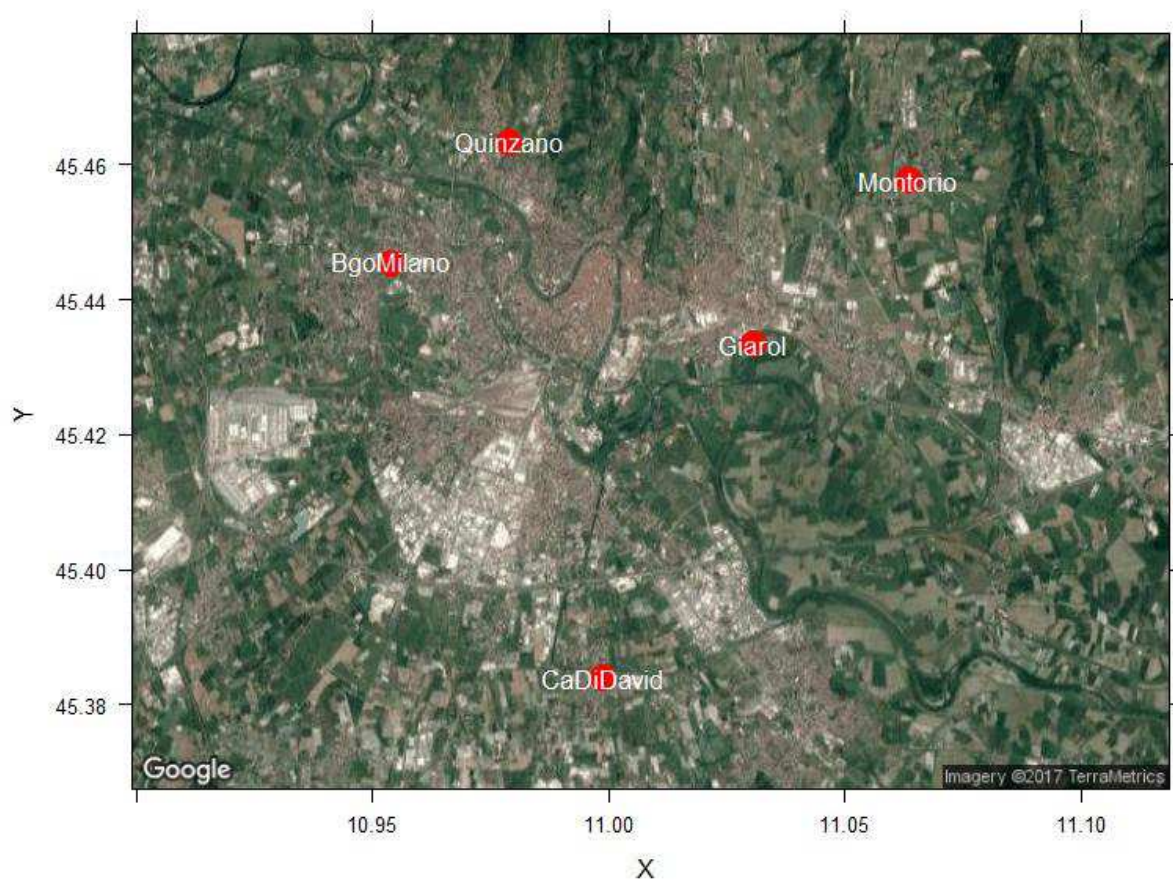
Periodo	Inizio	Fine
1	29/10/2016	13/11/2016
2	06/12/2016	18/12/2016
3	17/01/2017	29/01/2017
4	14/02/2017	26/02/2017
5	21/03/2017	03/04/2017

**Tabella 1. Date di inizio e fine delle campagne di misura.**

Postazione	Indirizzo
Quinzano	Via Villa-presso circoscrizione
Borgo Milano - centralina	Via Ugo Sesini
Ca' di David	Via Domenico Turazza-presso Scuola Secondaria Salgari
Giarol – centralina	Via Belluno
Montorio	Piazzale Buccari-presso Scuola Primaria Betteloni

**Tabella 2. Siti di monitoraggio.**

### Posizione punti di misura



**Figura 6. Ubicazione dei punti sottoposti a monitoraggio.**

<b>Postazione/Inquinante</b>	CO	NO <sub>2</sub>	NOx	O <sub>3</sub>	PM10	SO <sub>2</sub>	PM2.5	NH <sub>3</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
Quinzano	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Borgo Milano - centralina	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ca' di David							X	X	X
Giarol – centralina		X	X	X	X		X	X	X
Montorio	X	X	X	X	X	X	X	X	X

**Tabella 3. Inquinanti monitorati nei diversi siti di misura.**

## 4 Informazioni sulla strumentazione e sulle analisi

Gli analizzatori in continuo per l'analisi degli inquinanti convenzionali e non, allestiti a bordo delle stazioni rilocabili e nelle stazioni fisse, presentano caratteristiche conformi al D.Lgs. 155/2010 (i volumi sono stati normalizzati ad una temperatura di 20°C ed una pressione di 101,3 kPa) ed effettuano acquisizione, misura e registrazione dei risultati in modo automatico.

Il campionamento del particolato inalabile PM2.5 (diametro aerodinamico inferiore a 2.5 µm) e degli IPA (con riferimento al benzo(a)pirene) è stato realizzato con linee di prelievo sequenziale, che utilizzano filtri da 47 mm di diametro e cicli di prelievo di 24 ore. Detti campionamenti sono stati condotti con l'utilizzo di apparecchiature conformi alle specifiche tecniche dettate dal D.Lgs. 155/2010 (il volume campionato si riferisce alle condizioni ambiente in termini di temperatura e di pressione atmosferica alla data delle misurazioni). Le determinazioni analitiche sui campioni prelevati sono state effettuate al termine del ciclo di campionamento sui filtri esposti in quarzo: la concentrazione di polveri PM2.5 è stata determinata con metodo gravimetrico ("metodo UNI EN 12341:2014"); il contenuto di levoglucosano tramite gascromatografia e spettrometria di massa, (LC-MS). Sugli stessi campioni, tramite cromatografia liquida ad alta prestazione (HPLC "metodo UNI EN 15549:2008", UNI CEN/TS 16645:2014"), è stata determinata la concentrazione delle principali specie di IPA: benzo(a)antracene, crisene, benzo(b)fluorantene, benzo(k)fluorantene, benzo(a)antracene, ideno(1,2,3-c,d)pirene, dibenzo(a,h)antracene, benzo(g,h,i)perilene. Le specie ioniche sono state determinate utilizzando il protocollo EN 16913:2015. Il carbonio elementare e organico, come indicato nel DM 5 maggio 2015 Metodi di valutazione delle stazioni di misurazione della qualità dell'aria di cui all'articolo 6 del decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155.

Il benzene e l'ammoniaca sono stati misurati attraverso "campionamento passivo", tecnica di monitoraggio così definita poiché la cattura dell'inquinante avviene per diffusione molecolare della sostanza attraverso il campionatore (radiello), e non richiede quindi l'impiego di un dispositivo per l'aspirazione dell'aria. I dati ottenuti dai rilevamenti effettuati con tecnica di campionamento passivo, pertanto, non possono essere confrontati direttamente con i limiti di legge ma costituiscono ugualmente un riferimento utile per l'identificazione di eventuali azioni da intraprendere da parte delle Amministrazioni Comunali.

Con riferimento ai risultati riportati di seguito si precisa che la rappresentazione dei valori inferiori al limite di rivelabilità segue una distribuzione statistica di tipo gaussiano normale in cui la metà del limite di rivelabilità rappresenta il valore più probabile. Si è scelto pertanto di attribuire ai dati inferiori al limite di rivelabilità (che è diverso a seconda dello strumento impiegato e della metodologia adottata) un valore pari a metà del limite di rivelabilità stesso. Allo stato attuale, ai fini delle elaborazioni e per la valutazione della conformità al valore limite si utilizzano le "Regole di accettazione e rifiuto semplici", ossia le regole più elementari di trattamento dei dati, corrispondenti alla considerazione delle singole misure prive di incertezza e del valore medio come numero esatto. ("Valutazione della conformità in presenza dell'incertezza di misura". di R.Mufato e G. Sartori nel Bollettino degli esperti ambientali. Incertezza delle misure e certezza del diritto/anno 62, 2011 2-3).

## 5 Analisi dei dati rilevati

---

I periodi di campionamento hanno incluso momenti critici per le polveri sottili. Considerando i dati di PM10 di Giarol, le giornate in cui è avvenuto un superamento hanno rappresentato il 36% del totale, e in ognuno dei cinque periodi di monitoraggio è avvenuto almeno un superamento. L'analisi della situazione meteorologica durante il periodo di indagine consente di comprendere le cause di tali criticità.

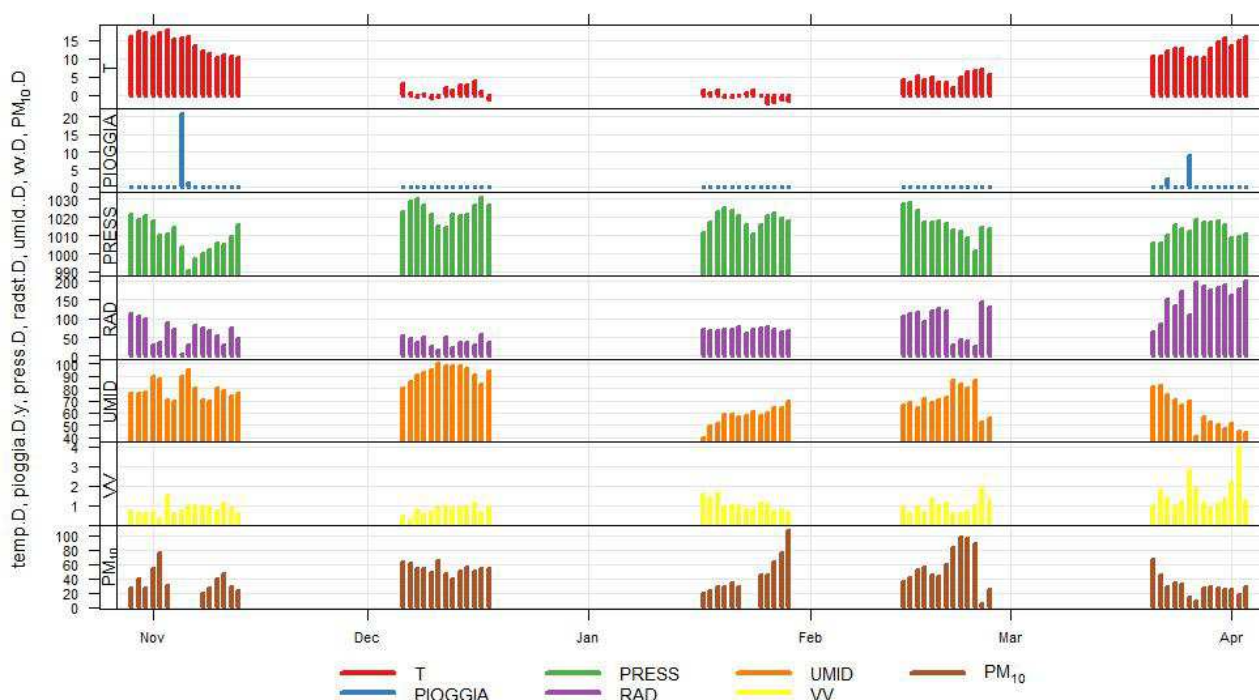
In figura 7 si riporta la serie temporale della concentrazione di PM10 a Giarol, insieme ai principali parametri meteorologici registrati nella stessa località, nelle varie campagne di misura.

Nel primo periodo di monitoraggio, a inizio novembre 2016, un promontorio atlantico ha garantito tempo stabile e correnti nord-occidentali d'aria relativamente mite: l'1 e il 2 novembre ci sono stati i primi superamenti del limite di legge di  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del PM10. Successivamente, nei giorni 5 e 6 novembre, una saccatura atlantica ha transitato sull'Italia portando piogge abbastanza abbondanti, e una diminuzione delle concentrazioni di polveri. Dal 10 fino al 13 novembre sono tornate condizioni di tempo stabile e piuttosto soleggiato, con una diminuzione delle temperature, ma le concentrazioni di PM10 non hanno dato luogo a superamenti.

Nei periodi di monitoraggio svoltisi a dicembre 2016 e gennaio e febbraio 2017, sono prevalse condizioni di alta pressione, che portano al ristagno e all'accumulo degli inquinanti, e hanno causato le condizioni più critiche di tutta la campagna di misura: in particolare a fine gennaio la concentrazione di polveri ha superato il doppio del limite normativo.

Nell'ultimo periodo di monitoraggio, tra fine marzo e inizio aprile, il passaggio di alcune saccature di origine atlantica ha favorito la dispersione degli inquinanti, e i valori delle polveri sottili sono progressivamente diminuiti.

Nei paragrafi che seguono saranno analizzati i dati di concentrazione delle polveri fini (PM2.5) e dei loro costituenti. Viene presentata sia una descrizione dettagliata delle singole specie chimiche (paragrafi da 5.1 a 5.5) sia una analisi della composizione percentuale del PM2.5 (paragrafo 5.6). Infine, i paragrafi da 5.7 a 5.11 sono dedicati agli altri inquinanti principali misurati, al fine di stabilire delle relazioni con le componenti del PM2.5 e caratterizzare meglio i siti oggetto di analisi dal punto di vista della qualità dell'aria.



**Figura 7. Evoluzione temporale di alcune variabili meteorologiche e della concentrazione di PM10 a Girol, nei periodi di monitoraggio: T = temperatura (°C), PIOGGIA = pioggia (mm/giorno), PRESS = pressione (hPa), RAD = radiazione media giornaliera (W/m<sup>2</sup>), UMID = umidità relativa (%), VV = velocità del vento (m/s), PM10 = concentrazione media PM10 (µg/m<sup>3</sup>).**

## 5.1 PM2.5

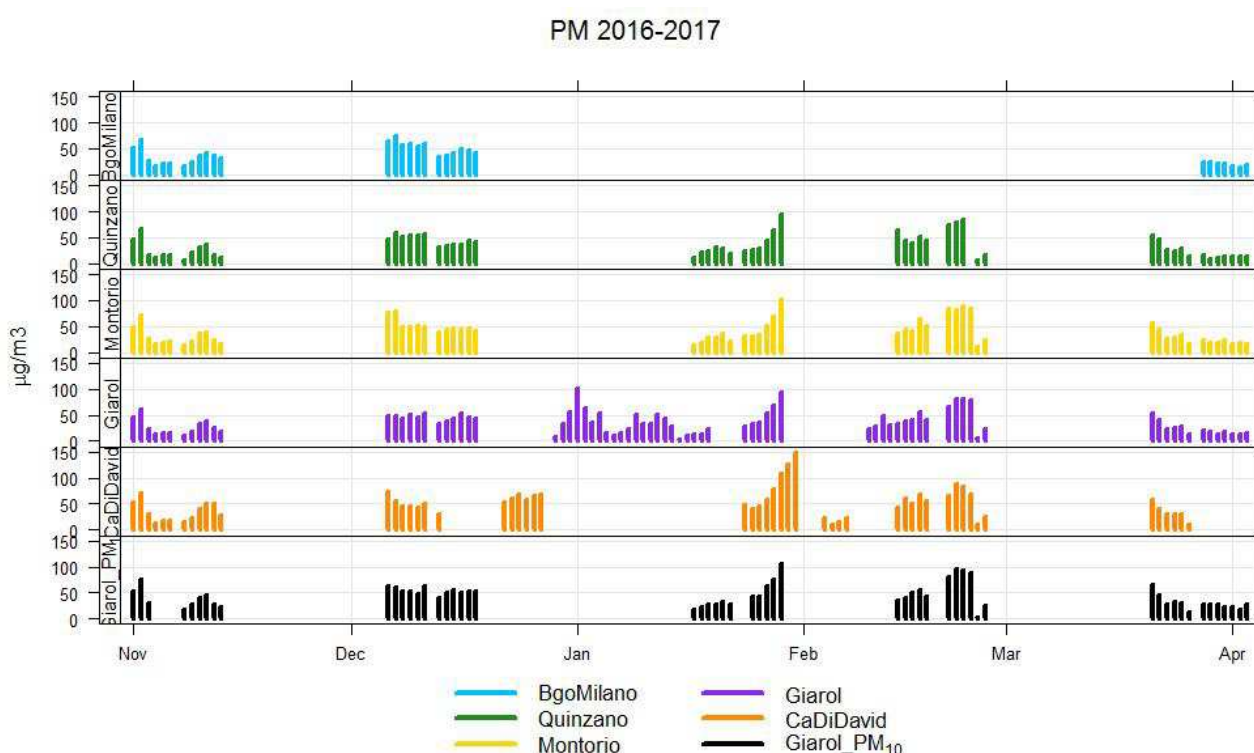
In figura 8 è riportato l'andamento temporale della concentrazione di PM2.5 nei diversi siti di monitoraggio. Si nota che per il sito di Borgo Milano mancano dati validi per i mesi di gennaio e febbraio. Invece a Girol sono disponibili più dati rispetto alle altre postazioni, riferiti alla prima metà di gennaio. E' interessante l'episodio critico di fine gennaio, in cui il PM2.5 di Ca' di David e Montorio supera i 100 µg/m<sup>3</sup>, e i valori di Ca' di David sono sempre superiori a quelli degli altri siti.

I PM2.5 delle varie località hanno lo stesso andamento nel tempo. La correlazione tra PM2.5 misurate in diversi siti è buona, come si vede in figura 9. La correlazione tra le polveri fini di Quinzano e Ca' di David è inferiore a quella tra gli altri siti (0.84), ma comunque significativa a un livello di confidenza del 99% (Spearman's correlation test). Questo risultato è in linea con quanto atteso, in quanto le polveri sottili sono un inquinante prevalentemente di natura secondaria, e quindi piuttosto uniforme sulla scala spaziale oggetto di analisi, e le loro concentrazioni variano prevalentemente in relazione alle condizioni meteorologiche.

In figura 10 sono riportati dei box-plot che rappresentano graficamente i principali parametri statistici relativi alla concentrazione di PM2.5: per tali elaborazioni, che consentono un confronto tra i diversi siti, sono state utilizzate solo le giornate in cui il dato di PM2.5 è disponibile per tutte le postazioni rappresentate in grafico. Nel pannello a sinistra di figura 10 e nella tabella 4 si riportano i dati statistici relativi ai cinque siti. Poiché la mancanza di dati a Borgo Milano, nel terzo e quarto periodo di monitoraggio, riduce sensibilmente il numero di dati su cui fare un confronto (19 dati), l'analisi è stata ripetuta utilizzando solamente i dati relativi agli altri quattro siti. I risultati sono

riportati nel pannello a destra di figura 10, e si basano su un numero di dati quasi doppio (41), come si vede nella tabella 5. I valori medi e massimi più elevati si trovano a Borgo Milano, che però ha dati solo per i primi due periodi di campionamento. Il confronto tra PM10 (polveri di diametro equivalente maggiore) di Borgo Milano e Giarol conferma che anche per queste polveri più grossolane i valori sono più elevati a Borgo Milano (capitolo 5.9). Dopo Borgo Milano, Ca' di David mostra i valori medi e massimi di PM2.5 più elevati.

La media di Ca' di David differisce significativamente da quella di Quinzano e Giarol, con un livello di significatività del 99%. Per quanto riguarda gli altri siti, invece, le medie non sono significativamente diverse, né se calcolate utilizzando i dati di tutti i periodi di campionamento, né considerando i singoli periodi di 15 giorni circa (test ANOVA). Il fatto che la differenza tra il valore medio di Borgo Milano, che è il più elevato, e quello delle altre stazioni non sia significativa è legato al numero esiguo di dati su cui viene elaborata la statistica.



**Figura 8. Serie temporale della concentrazione di PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) nelle cinque postazioni di misura (prime cinque pannelli dall'alto) e di PM10 a Giarol ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ultimo pannello in basso).**

pm2.5

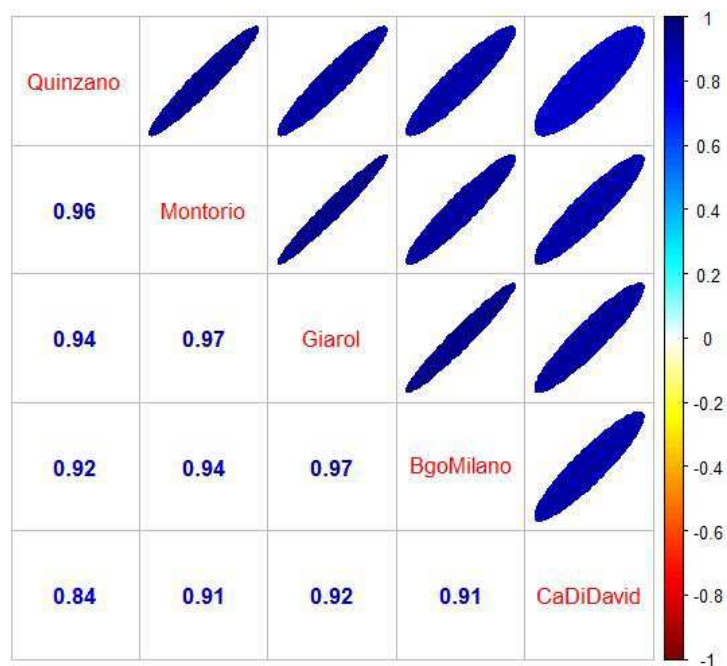


Figura 9. Grafico di correlazione tra la concentrazione di PM2.5 in diversi siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.



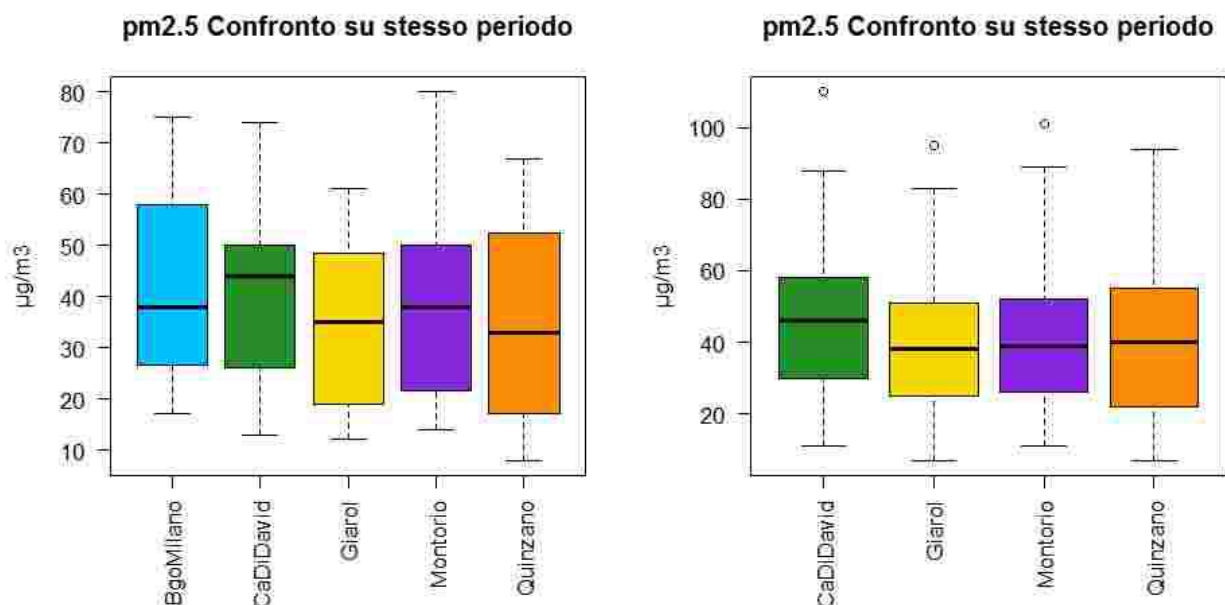


Figura 10. Box-plot della concentrazione di PM2.5 misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	42	40	35	40	35
n	19	19	19	19	19
sd	19	18	16	21	19
min	17	13	12	14	8
max	75	74	61	80	67

Tabella 4. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di PM2.5 misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i cinque siti. Rappresentazione grafica in Figura 10, pannello di sinistra.

PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	46	40	44	40
n	41	41	41	41
sd	22	20	23	22
min	11	7	11	7
max	110	95	101	94

Tabella 5. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di PM2.5 misurata in quattro dei siti monitorati: L'analisi di tabella 4 è stata ripetuta escludendo Borgo Milano, per il quale sono disponibili pochi dati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i quattro siti. Rappresentazione grafica in Figura 10, pannello di destra.

## 5.2 Levoglucosano

Il levoglucosano è uno zucchero prodotto dalla combustione di cellulosa a temperature superiori a 300°C. Esso non è associato a particolari effetti nocivi sulla salute umana, ma è ampiamente utilizzato come tracciante di combustione di biomassa. Infatti, è un composto stabile in atmosfera, e viene liberato in grandi quantità nei processi di combustione di biomassa, tanto da essere rilevato sul particolato a considerevoli distanze dalla sorgente di emissione (Simoneit et al., 1999). La concentrazione di levoglucosano è stata misurata su tutti i campioni di PM2.5.

In tabella 6 sono riportati i parametri statistici relativi alla concentrazione di levoglucosano, per ognuno dei siti di monitoraggio. I valori medi sono compresi tra 0.8 µg/m<sup>3</sup> a Giarol e 1.4 µg/m<sup>3</sup> a Ca' di David.

I valori medi rilevati nel comune di Verona, riportati in tabella 6, appaiono in linea con quelli riportati dagli studi delle altre ARPA regionali, relativi a località in cui è stato dimostrato che l'utilizzo di biomassa come combustibile è consistente, e con altri dati di letteratura:

- Reche et al. (2012) riportano valori compresi tra 0.04 e 0.57 µg/m<sup>3</sup> in siti urbani europei.
- ARPA Puglia, in seguito a un monitoraggio a Torchiarolo (Br), comune con valori particolarmente elevati di PM10 e levoglucosano rispetto alle centraline limitrofe, a causa di un utilizzo intenso di legna per riscaldamento, riporta una media di 1.71 µg/m<sup>3</sup> per la concentrazione di levoglucosano nel periodo 8-19 marzo 2008;
- ARPA Valle d'Aosta, in uno monitoraggio eseguito in diversi siti della regione nell'inverno 2012-2013, riporta medie da 0.16 a Morgex a 1.58 µg/m<sup>3</sup> a Donnas;
- APPA Trentino riporta valori medi compresi tra 0 e 6 µg/m<sup>3</sup>, nell'inverno 2013-2014 a Storo, località di montagna;
- ARPA Lombardia (Parfil Project) riporta valori medi invernali, nel 2005, compresi tra 0.4 µg/m<sup>3</sup> a Milano e 0.7 µg/m<sup>3</sup> a Sondrio.

Il levoglucosano è un tracciante della combustione ampiamente utilizzato, tuttavia la percentuale di levoglucosano sul particolato varia molto a seconda non solo della quantità di biomassa bruciata, ma anche del tipo di legna e delle condizioni di combustione (Puxbaum et al., 2007; Simoneit, 1999; Heringa et al, 2011). Pertanto, le differenze tra i siti oggetto di monitoraggio nei vari studi citati possono essere legate non solo ad una diversa meteorologia legata alla località e al periodo di misura, ma anche a diverse tipologie di carburante, di impianto di combustione, di condizioni di esercizio. Si consideri inoltre il forte aumento del consumo di legna a fini di riscaldamento domestico che si è verificato nell'ultimo decennio (MSE, 2016), in particolar modo dal 2013, che comporta un aumento delle emissioni di questa specie chimica.

L'andamento della concentrazione di levoglucosano nei diversi siti appare simile (figura 11). La correlazione tra levoglucosano nelle diverse località non è così elevata come per il PM2.5 (figura 12), e tuttavia sempre significativa al livello di significatività del 99%: questo può essere legato a sorgenti di levoglucosano per lo più di una stessa tipologia nelle diverse località, come anche al fatto che il levoglucosano può essere trasportato per lunghe distanze rimanendo stabile, e quindi, si distribuisce in modo abbastanza uniforme nell'area oggetto di analisi. D'altra parte è ragionevole aspettarsi una correlazione tra siti inferiore per la concentrazione di levoglucosano rispetto a quella per la concentrazione di polveri sottili: il PM2.5 comprende una componente secondaria importante, che si forma in seguito a reazioni chimiche a partire da diversi altri inquinanti, e per questo motivo risulta piuttosto omogeneo nell'area monitorata; il levoglucosano invece è emesso

direttamente dalle sorgenti di combustione di biomassa, e la sua distribuzione rispecchia la presenza delle sorgenti locali.

I valori medi e massimi di concentrazione di levoglucosano più elevati si trovano a Borgo Milano (figura 13 pannello di sinistra e tabella 7), che però ha pochi dati su cui eseguire un confronto (25). Ripetendo l'analisi senza Borgo Milano si possono utilizzare più dati (41) e la statistica risulta più robusta (figura 13 pannello di destra e tabella 8): si nota che i valori più elevati sono a Ca' di David, quelli più bassi a Giarol. La differenza tra la media di Ca' di David e quella di Giarol, Quinzano e Montorio risulta significativa (test ANOVA), come anche quella tra Borgo Milano e Giarol.

E' interessante notare anche come la concentrazione di levoglucosano nei vari siti abbia una relazione con la temperatura ambientale (figura 14, pannelli della prima riga in basso): a basse temperature corrispondono elevate concentrazioni di levoglucosano, e la relazione non è lineare, presentando una forma esponenziale negativa. La correlazione del levoglucosano con la temperatura potrebbe essere associata ad un aumento dell'uso di riscaldamento a biomassa in condizioni di clima più rigido: in questo caso, tuttavia, ci si attenderebbe anche un aumento della percentuale di levoglucosano sul PM2.5 in corrispondenza delle basse temperature, cosa che non appare evidente dai dati (figura 18). Invece, bisogna considerare che le temperature più basse, nella nostra regione, sono generalmente associate a condizioni di inversione termica, quando gli inquinanti vengono schiacciati in uno strato più sottile di aria fredda e densa vicino alla superficie e la loro concentrazione aumenta: questo fenomeno può giustificare la anticorrelazione di tutti gli inquinanti con la temperatura.

Il levoglucosano appare ben correlato con NOx e IPA, che rappresentano inquinanti associati alla combustione di biomassa (figura 60 in appendice). La correlazione con la componente inorganica del particolato è invece più bassa, come ci si può attendere, dal momento che si vanno a confrontare un inquinante primario con degli inquinanti prevalentemente di origine secondaria.

Analizzando la percentuale in peso di levoglucosano sul PM2.5, i valori medi e massimi più elevati si trovano a Borgo Milano e Ca' di David (tabella 10, tabella 11, figura 16). Tuttavia solo la differenza tra i valori medi di Borgo Milano e quelli di Giarol è significativa, con un livello di confidenza del 95%. Questo risultato appare sorprendente, poiché, in una zona del centro cittadino, ampiamente metanizzata come Borgo Milano, non ci si attenderebbe di trovare maggiori quantitativi di questo tracciante della combustione a biomassa rispetto a zone più rurali. Osservando i parametri statistici relativi a tale rapporto, si osserva che la percentuale di levoglucosano su PM2.5 varia considerevolmente nel tempo: ad esempio a Quinzano il valore minimo è 4‰ e il massimo 10‰ (tabella 9). Il rapporto tra levoglucosano e PM2.5 varia in modo coerente tra diversi siti (figura 15). Questo fa pensare a una sorgente di levoglucosano molto simile nei diversi siti ovvero al trasporto di questa specie chimica all'interno dell'area in esame.

Levoglucosano (µg/m <sup>3</sup> )	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
<b>media</b>	1.2	1.4	0.8	1	0.9
<b>n</b>	30	48	73	53	52
<b>sd</b>	0.8	1	0.5	0.6	0.7
<b>min</b>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<b>max</b>	2.9	4.1	2	2.5	2.6

**Tabella 6. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di levoglucosano misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati tutti i dati disponibili per i cinque siti.**

### Levoglucoosano ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

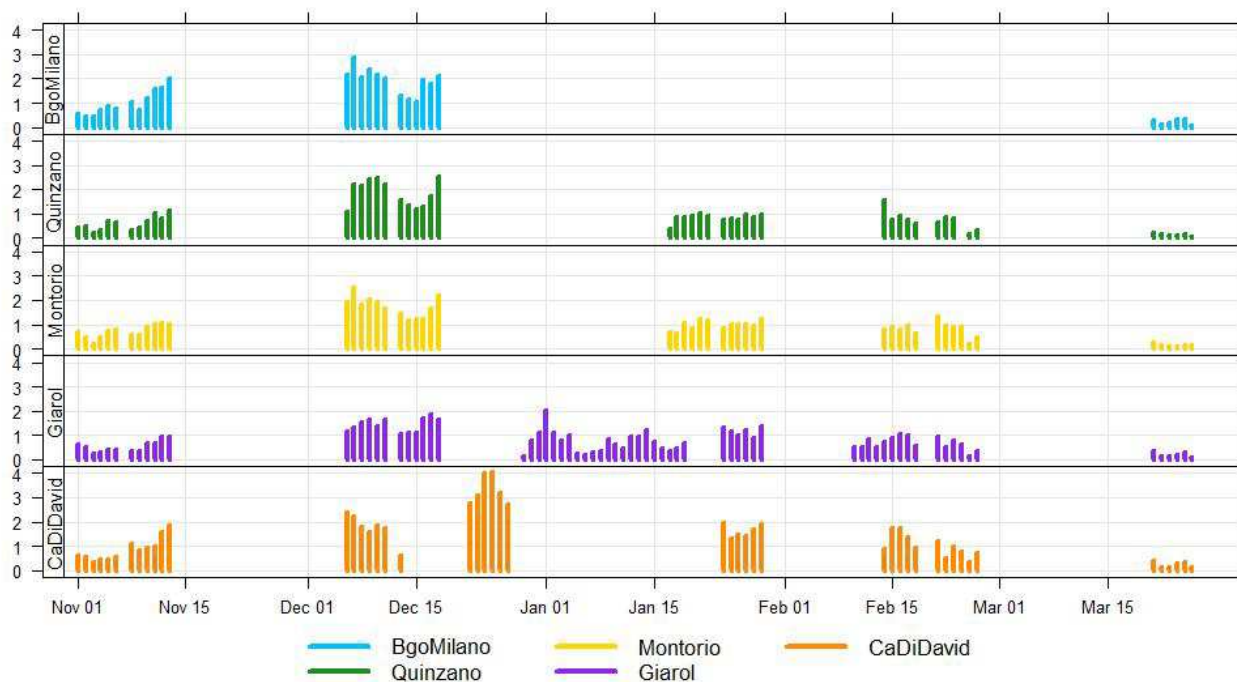


Figura 11. Serie temporale della concentrazione di levoglucosano nelle cinque postazioni di misura ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

### levoglucosano

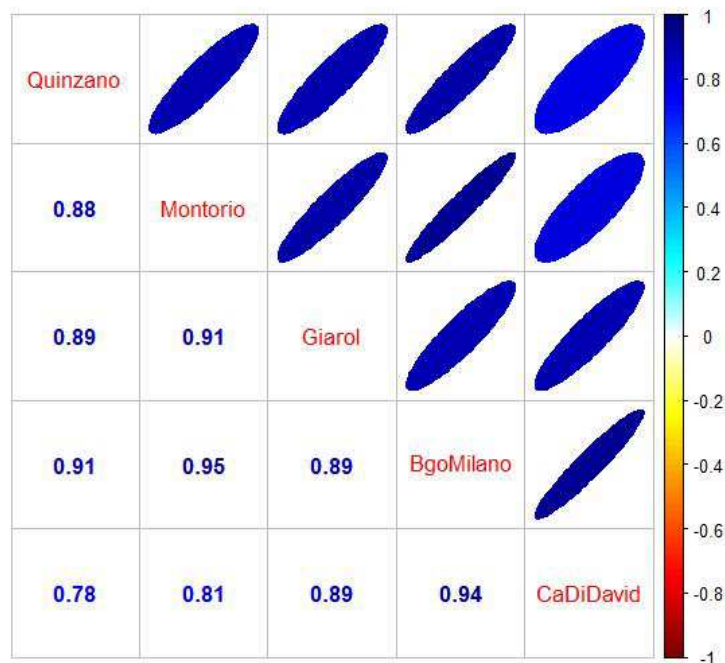


Figura 12. Grafico di correlazione tra la concentrazione di levoglucosano nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.

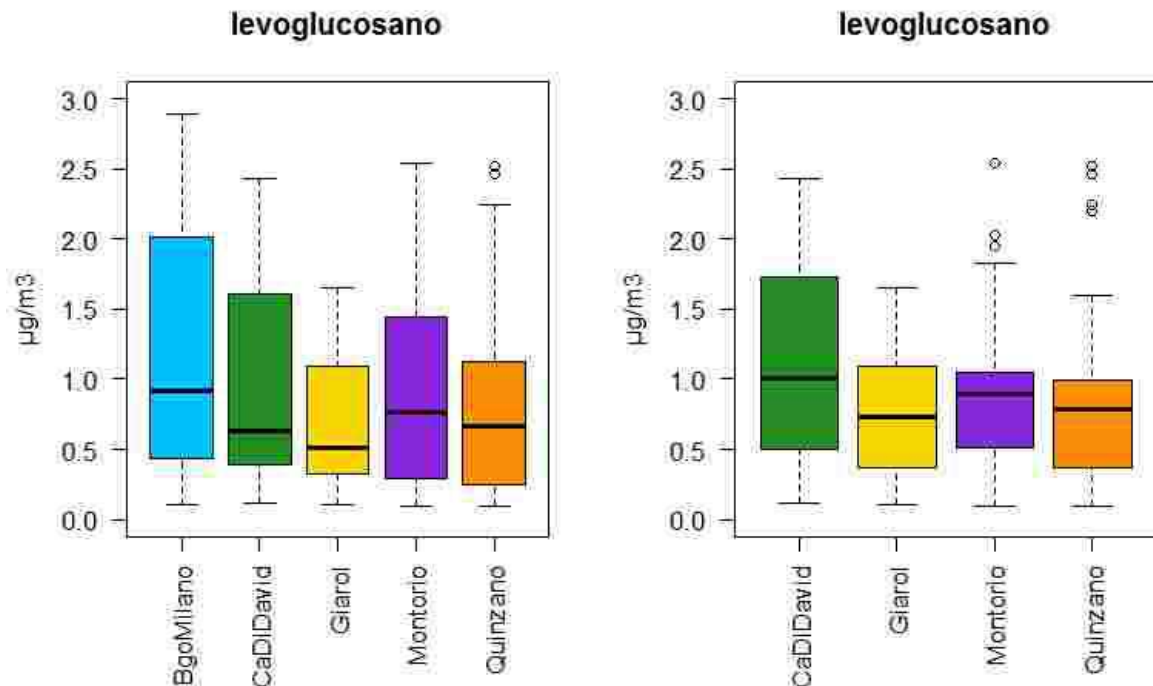


Figura 13. Box-plot della concentrazione di levoglucosano misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	1.1	1.0	0.7	0.9	0.9
n	25	25	25	25	25
sd	0.8	0.7	0.5	0.7	0.8
min	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
max	2.9	2.4	1.7	2.5	2.5

Tabella 7. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di levoglucosano misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i cinque siti. Rappresentazione grafica in Figura 13, pannello di sinistra.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	1.09	0.78	0.92	0.87
n	41	41	41	41
sd	0.6	0.5	0.6	0.7
min	0.12	0.11	0.1	0.1
max	2.43	1.65	2.54	2.52

Tabella 8. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di levoglucosano misurata in quattro dei siti monitorati: L'analisi di tabella 7 è stata ripetuta escludendo Borgo Milano, per il quale sono disponibili pochi dati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i quattro siti. Rappresentazione grafica in Figura 13, pannello di destra.

### Levoglucosano e T

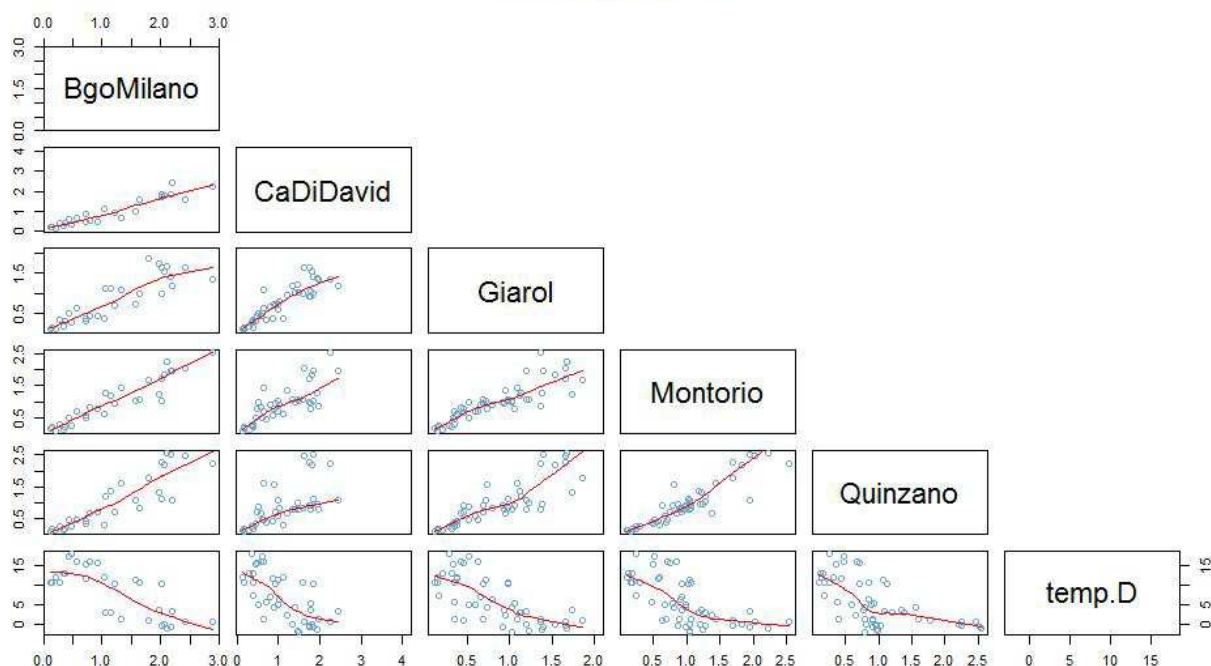


Figura 14. Concentrazione di levoglucosano ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Scatter-plot che mette a confronto questo inquinante in diversi siti di monitoraggio, e che visualizza la sua relazione con la temperatura.

### r\_lev\_pm25

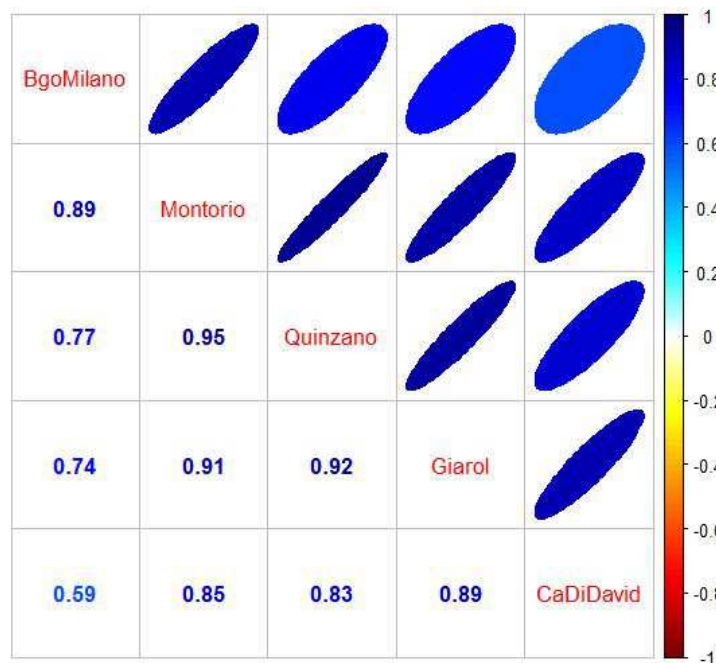


Figura 15. Grafico di correlazione tra il la percentuale di levoglucosano su PM2.5 nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.

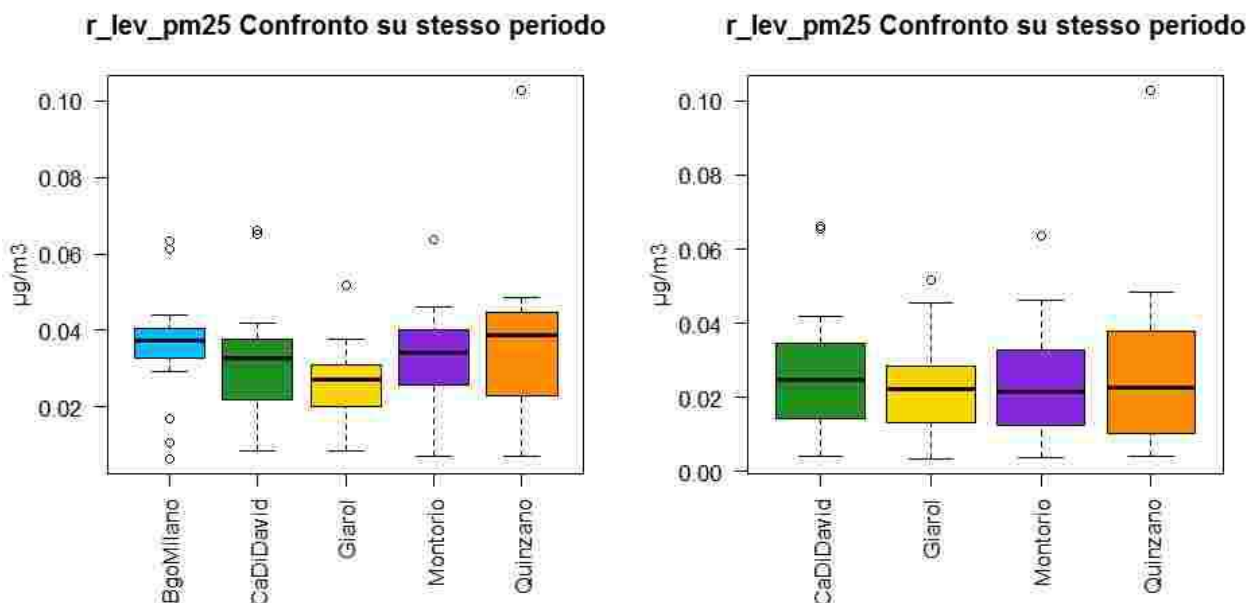


Figura 16. Box-plot della percentuale in peso di levoglucosano su PM2.5, misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

Lev/PM2.5	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.036	0.029	0.024	0.026	0.028
n	24	48	73	53	52
sd	0.013	0.017	0.021	0.014	0.018
min	0.006	0.004	0.004	0.004	0.004
max	0.063	0.069	0.183	0.064	0.103

Tabella 9. Principali parametri statistici relativi alla percentuale in peso di levoglucosano su PM2.5 misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati tutti i dati disponibili per i cinque siti.

Lev/PM2.5	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.036	0.032	0.026	0.033	0.036
n	19	19	19	19	19
sd	0.014	0.016	0.010	0.013	0.021
min	0.006	0.008	0.008	0.007	0.007
max	0.063	0.066	0.052	0.064	0.103

Tabella 10. Principali parametri statistici relativi alla percentuale in peso di levoglucosano su PM2.5 misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i cinque siti. Rappresentazione grafica in Figura 16, pannello di sinistra.

Lev/PM2.5	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.026	0.021	0.023	0.025
n	41	41	41	41
sd	0.014	0.011	0.014	0.019
min	0.004	0.004	0.004	0.004
max	0.066	0.052	0.064	0.103

Tabella 11. Principali parametri statistici relativi alla percentuale in peso di levoglucosano su PM2.5 misurata in quattro dei siti monitorati: L'analisi di tabella 10 è stata ripetuta escludendo Borgo Milano, per il quale sono disponibili pochi dati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i quattro siti. Rappresentazione grafica in Figura 16, pannello di destra.

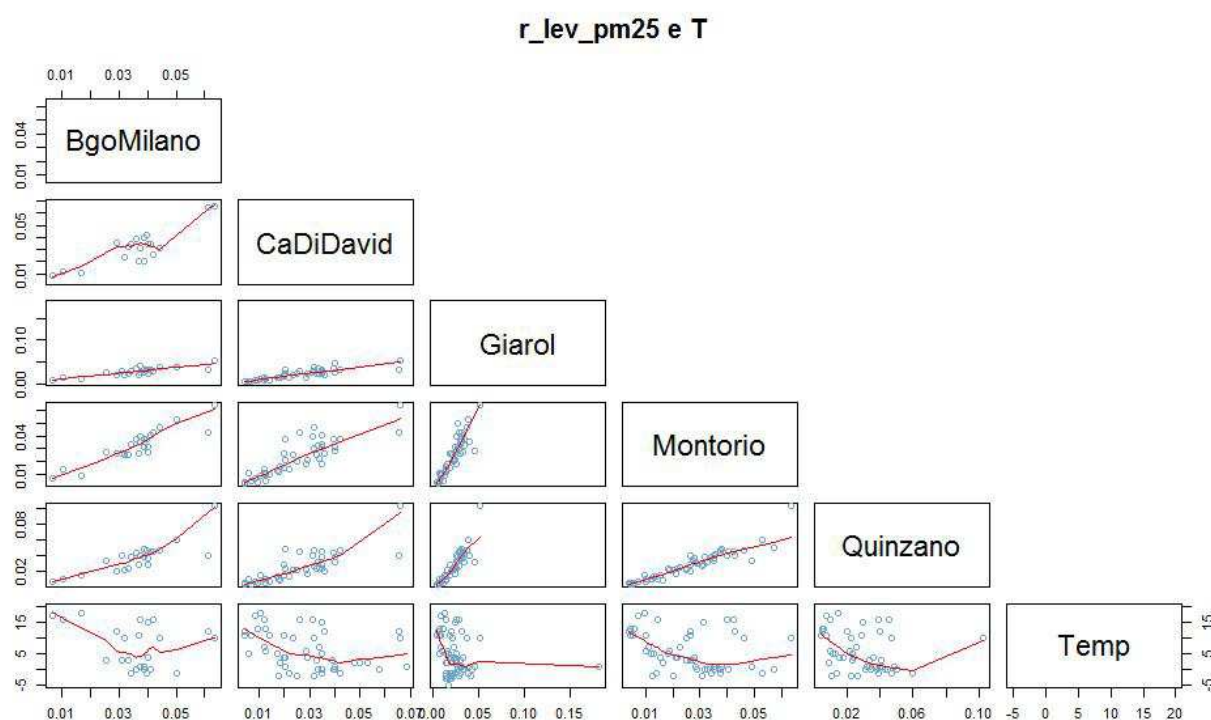


Figura 17. Rapporto tra concentrazione di levoglucosano e PM2.5 nei diversi siti di monitoraggio. Scatter-plot che mette a confronto questo rapporto in diverse postazioni di misura, e che visualizza la sua relazione con la temperatura a Giarol (°C).



### Colori in base a PM25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

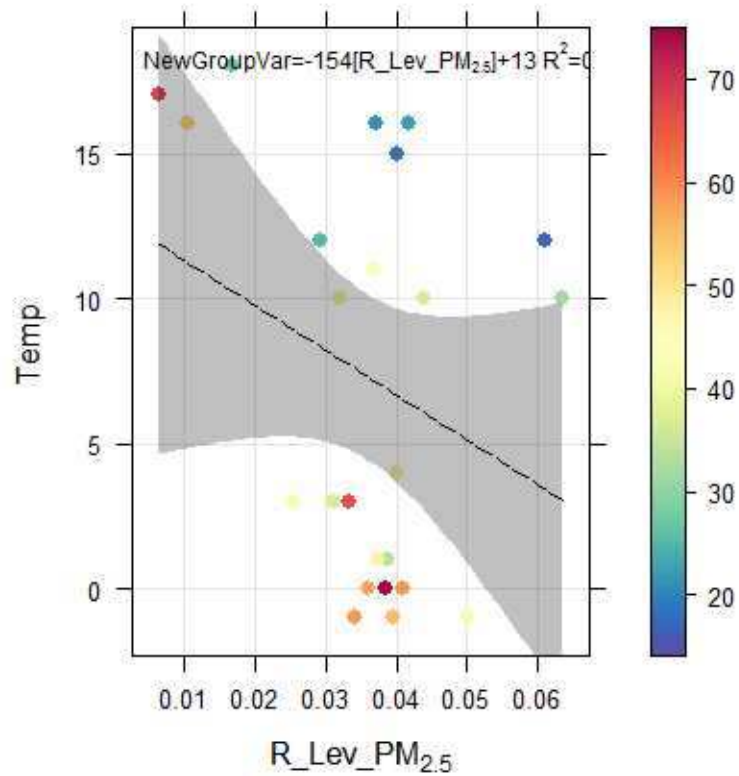


Figura 18. Scatter-plot: rapporto tra levoglucosano e PM2.5 (in ascissa), verso temperatura (°C, in ordinata). I punti sono colorati in base alla concentrazione di PM2.5 a essi relativa. Sito di Borgo Milano. Si osserva che il rapporto levoglucosano/PM2.5 non è correlato con la temperatura.

### 5.3 IPA

In figura 19 sono rappresentate la serie temporali della concentrazione di benzo(a)pirene nei cinque siti. Questo inquinante è l'unico degli IPA soggetto a limite di legge ( $1 \text{ ng/m}^3$  sulla media annuale), essendo considerato rappresentativo anche delle altre specie. Le serie temporali di benzo(a)pirene hanno lo stesso andamento nei diversi siti, e mostrano una correlazione elevata (figura 20) e sempre significativa (livello di significatività 99%).

Come per il levoglucosano, si nota l'anticorrelazione con la temperatura (figura 21, pannelli della prima riga in basso), anche in questo caso probabilmente legata all'aumento delle concentrazioni di inquinanti in condizioni di inversione termica. A questo si può aggiungere la maggior accuratezza della misura alle basse temperature, essendo il benzopirene un composto molto volatile. Anche in questo caso la relazione tra benzo(a)pirene e temperatura non è di tipo lineare.

Valori medi e massimi più elevati si osservano a Borgo Milano, a seguire a Ca' di David (figura 22, tabella 13 e tabella 14). I valori più bassi si trovano a Giarol, come per il levoglucosano. I valori medi di Ca' di David sono significativamente più elevati rispetto alle altre postazioni (test ANOVA), con un livello di significatività del 99% per Giarol, Montorio Quinzano, e del 95% per Borgo Milano. Si noti che il limite normativo, applicato alla media annuale, di benzo(a)pirene, è pari a  $1 \text{ ng/m}^3$ : i valori misurati in questo periodo sono elevati se confrontati con esso, arrivando a un massimo di  $6.47 \text{ ng/m}^3$  a Ca' di David.

Se si considera la somma degli IPA misurati, si possono trarre conclusioni analoghe. I valori di IPA misurati sono in linea con i dati storici della provincia di Verona (Masiol et al, 2013).

In ogni sito, gli IPA sono ben correlati con levoglucosano, NOx e OC (figura 60 in Appendice), e la relazione con essi è lineare. Questo suggerisce che tutti questi inquinanti siano associati alle stesse fonti emmissive, e che la meteorologia moduli la loro concentrazione nel tempo in modo analogo per i diversi siti. Invece, la correlazione tra IPA PM2.5 è inferiore.

L'analisi delle diverse specie di IPA non evidenzia significative differenze tra i siti. In figura 23 è illustrata la composizione percentuale degli IPA relativa al sito di Ca' di David, che può essere considerata rappresentativa di tutta l'area di analisi. In tabella 15 sono riportati i valori medi di concentrazione delle diverse specie di IPA nei cinque siti di monitoraggio.

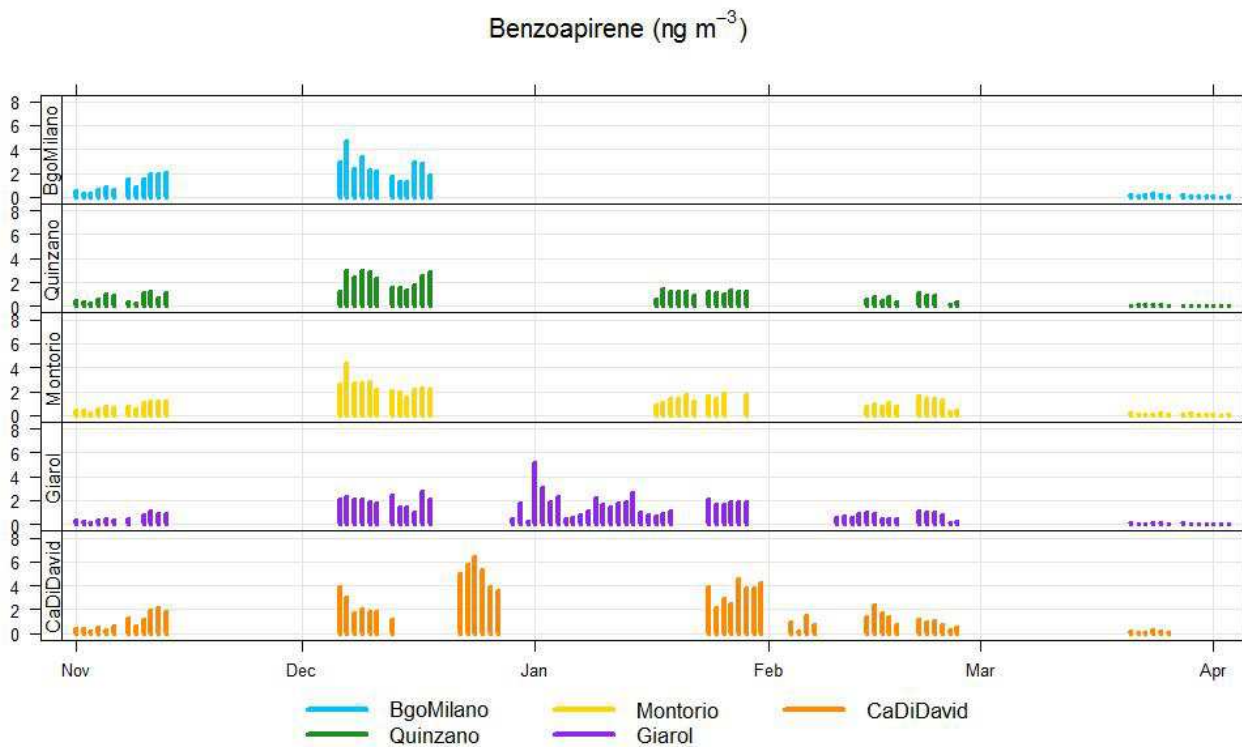


Figura 19. Serie temporale della concentrazione di benzo(a)pirene nelle cinque postazioni di misura (ng/m<sup>3</sup>).

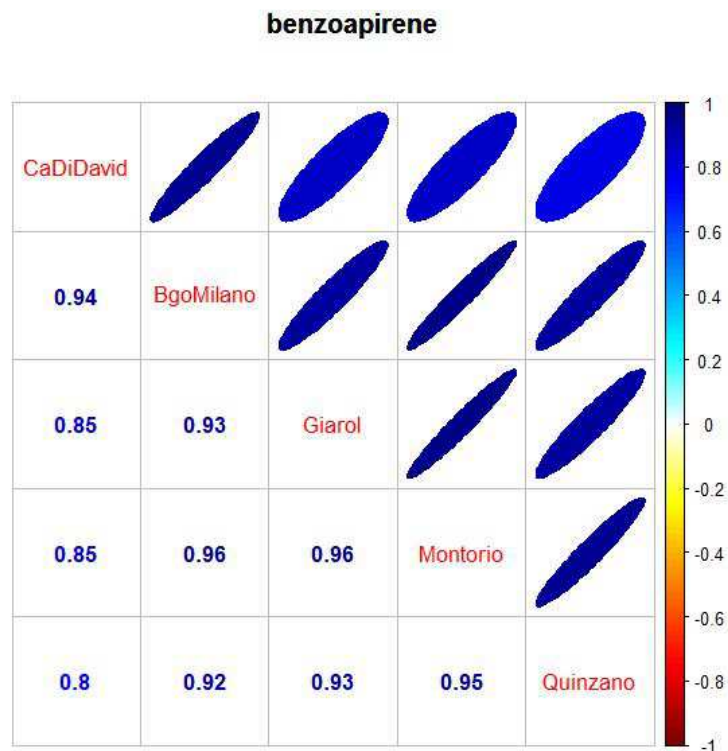
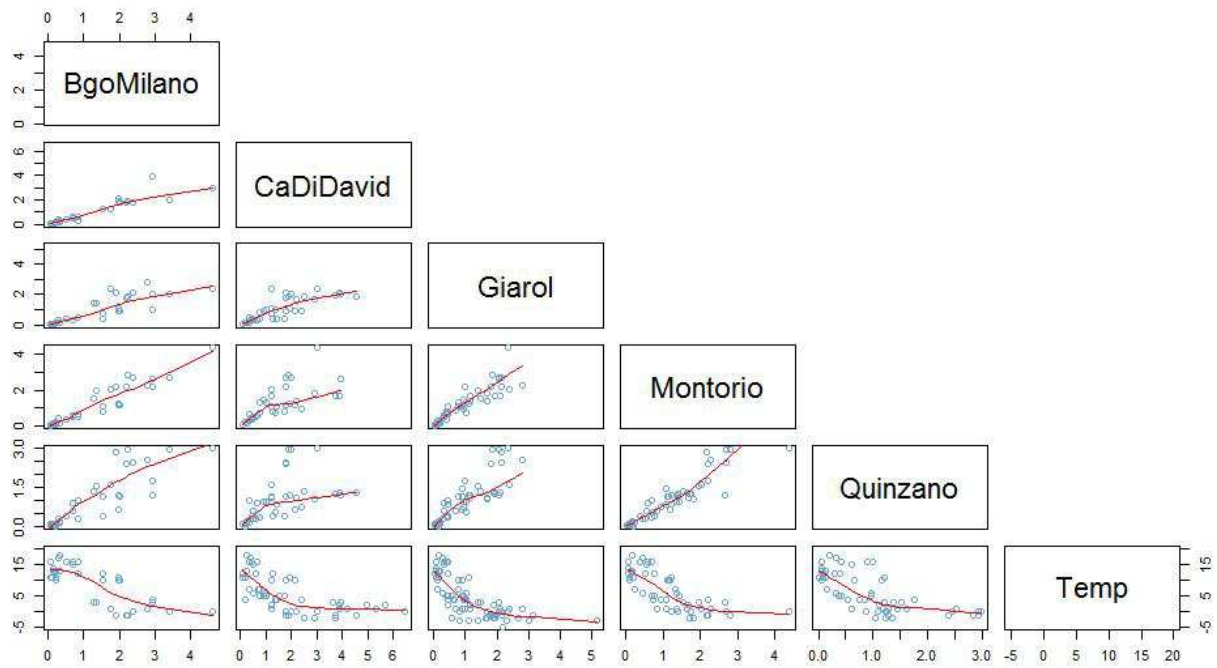


Figura 20. Grafico di correlazione tra la concentrazione di benzo(a)pirene nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.

## BAP e T



**Figura 21. Concentrazione di benzo(a)pirene (ng/m<sup>3</sup>) nei diversi siti di monitoraggio. Scatter-plot che mette a confronto questo inquinante in diverse postazioni di misura, e che visualizza la sua relazione con la temperatura (°C) a Giarol.**

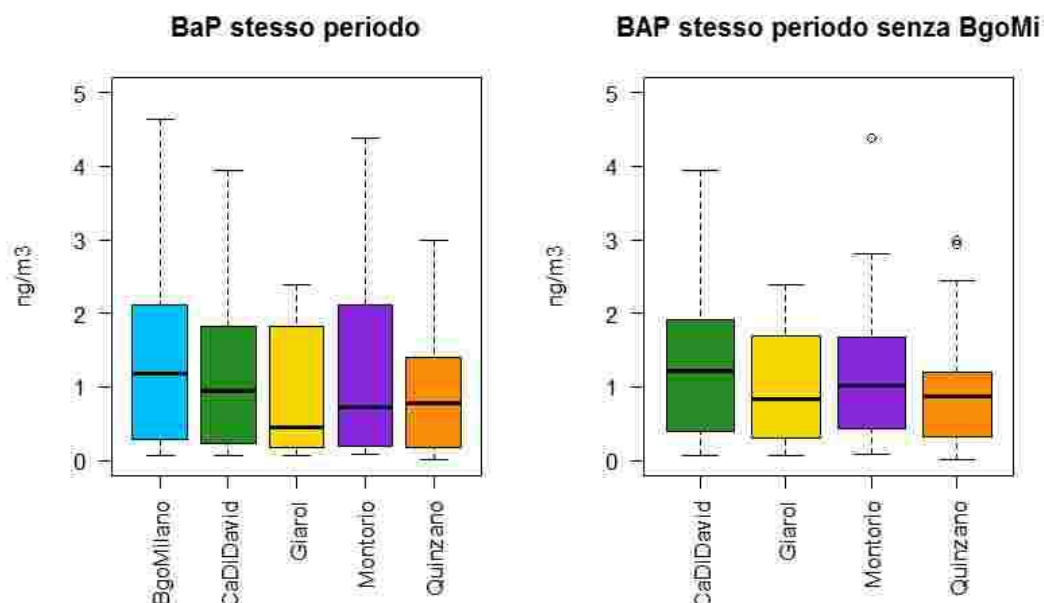


Figura 22. Box-plot della concentrazione di benzo(a)pirene su PM2.5, misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

ng/m <sup>3</sup>	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	1.21	1.88	1.10	1.12	0.95
n	37	54	79	58	59
sd	1.17	1.65	0.93	0.92	0.82
min	0.04	0.06	0.03	0.03	0.01
max	4.64	6.47	5.16	4.38	2.99

Tabella 12. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di benzo(a)pirene misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati tutti i dati disponibili per i cinque siti.

ng/m <sup>3</sup>	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	1.38	1.14	0.90	1.19	1.05
n	24	24	24	24	24
sd	1.22	1.04	0.84	1.17	1.00
min	0.07	0.06	0.06	0.08	0.01
max	4.64	3.94	2.39	4.38	2.99

Tabella 13. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di benzo(a)pirene misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i cinque siti. Rappresentazione grafica in Figura 22, pannello di sinistra.

ng/m <sup>3</sup>	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	1.36	0.94	1.17	0.95
n	38	38	38	38
sd	1.10	0.76	0.97	0.83
min	0.06	0.06	0.08	0.01
max	3.94	2.39	4.38	2.99

Tabella 14. Principali parametri statistici relativi alla percentuale in peso di levoglucosano su PM2.5 misurata in quattro dei siti monitorati: L'analisi di tabella 13 è stata ripetuta escludendo Borgo Milano, per il quale sono disponibili pochi dati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i quattro siti. Rappresentazione grafica in Figura 22, pannello di destra.

### IPA CaDiDavid



Figura 23. IPA a Ca' di David. Ripartizione nelle diverse specie misurate. Gli altri siti di monitoraggio mostrano una ripartizione molto simile.

ng/m <sup>3</sup>	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
benzoaantracene	1.05	1.51	0.97	0.98	0.64
indeno123cdpirene	0.82	1.26	1.06	0.95	0.77
crisene	1.11	1.90	1.04	1.04	0.73
dibenzoahantracene	0.06	0.11	0.07	0.07	0.06
benzokfluorantene	0.63	0.92	0.67	0.62	0.55
benzobfluorantene	1.17	1.73	1.24	1.14	1.02
benzoghiiperilene	1.25	1.69	1.27	1.24	1.10
benzo(a)pirene	1.21	1.88	1.10	1.12	0.95

Tabella 15. Concentrazioni medie di diverse specie di IPA nelle diverse postazioni. I dati a partire dai quali le medie sono calcolate non si riferiscono sempre allo stesso periodo di campionamento nei diversi siti.

## 5.4 Carbonio Elementare (EC) e Organico (OC)

### 5.4.1 EC

In figura 24 si vede che la concentrazione di EC ha un andamento temporale simile nelle varie postazioni di misura. Tuttavia la correlazione tra i diversi siti è più bassa rispetto a quella mostrata dagli inquinanti precedentemente analizzati, e per il sito di Ca' di David non è significativa (figura 25).

Non è evidente una relazione tra concentrazione di EC e temperatura o PM2.5, anche se i valori di EC più elevati si trovano con basse temperature (non mostrato). Questo evidenzia il fatto che l'EC è associato a emissioni di sorgenti locali, la cui variabilità non è associata alla meteorologia in modo così forte come la componente secondaria del PM2.5, che ne rappresenta la parte preponderante. L'EC costituisce una piccola percentuale del PM2.5 (circa il 3%, vedasi più sotto) e ne rappresenta il contributo primario. Il carattere locale della concentrazione di EC si manifesta anche nel fatto che la correlazione con gli altri inquinanti sia diversa a seconda del sito (figura 60 in Appendice). Ad esempio, a Ca' di David la correlazione col levoglucosano è elevata (0.85) mentre quella con il SIA è bassa (0.1), mentre a Borgo Milano e Montorio abbiamo una correlazione bassa e simile con entrambe le specie (Borgo Milano: correlazione con levoglucosano 0.59, con SIA 0.67; Montorio: correlazione con levoglucosano 0.58, con SIA 0.66). Questo può suggerire che il levoglucosano misurato in queste due ultime località possa avere origine a una certa distanza dal punto di misura: effettivamente questi siti hanno le caratteristiche tipiche di un quartiere urbano, ma confinano con zone agricole come la zona ovest del Chievo e tutto il circondario di Montorio. Un'altra spiegazione di quanto osservato può essere la presenza di un'altra sorgente locale di EC, diversa da quelle legate alla combustione di biomassa, ad esempio il traffico veicolare.

I valori medi di concentrazione di EC più elevati si trovano a Ca' di David, dove sono significativamente diversi da Giarol, Montorio e Quinzano (pannello a destra di figura 26 e tabella 17). A seguire, Borgo Milano ha i valori più elevati (pannello a sinistra di figura 26 e tabella 16). Risulta quindi che Borgo Milano mostri valori elevati di IPA, levoglucosano ed EC, ma l'EC non sia ben correlato con IPA e levoglucosano: questo supporta l'ipotesi che oltre all'apporto di inquinanti legati alla combustione, ci sia una sorgente locale di EC che fornisce un contributo significativo, che però non è possibile identificare con chiarezza con i dati disponibili. I valori più bassi di concentrazione di EC sono quelli di Giarol e Montorio. Nel caso di Ca' di David, invece, le elevate concentrazioni di EC, levoglucosano e IPA e la buona correlazione tra le concentrazioni di questi inquinanti possono essere collegate a una maggiore presenza del riscaldamento a biomassa, in un quartiere in cui la tipologia di abitazione favorisce maggiormente questa tipologia di riscaldamento domestico.

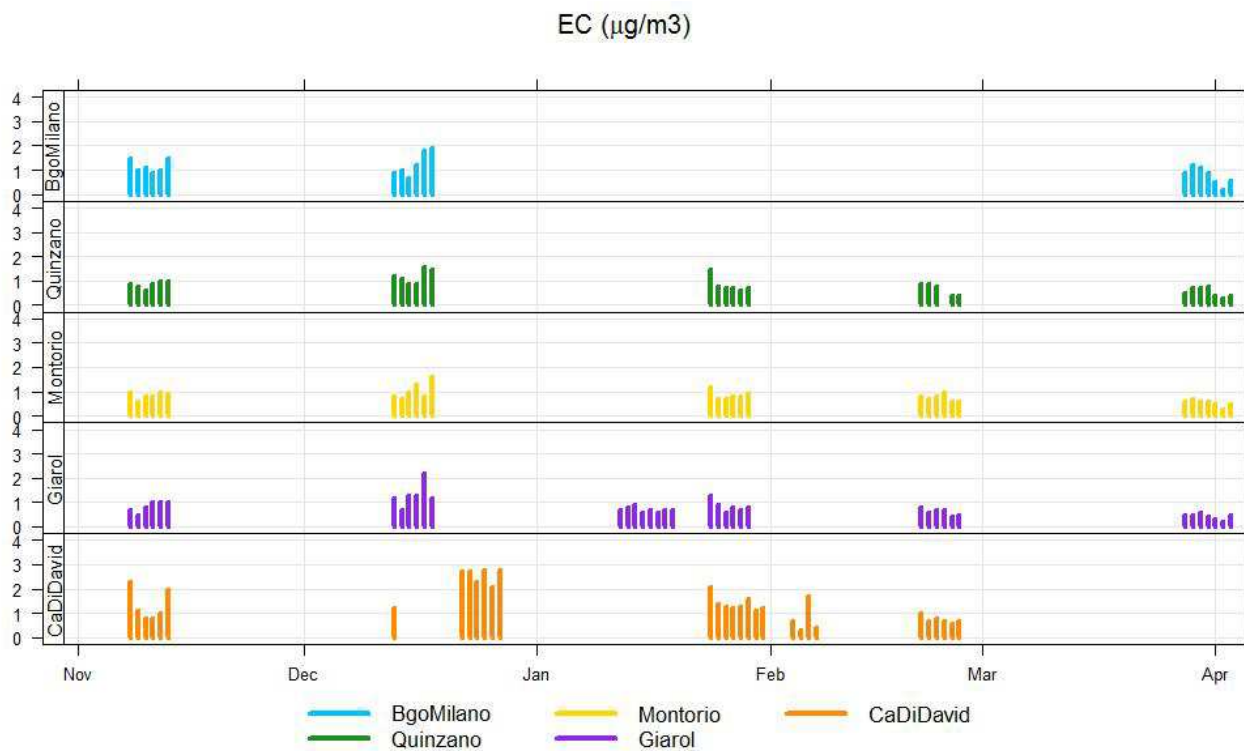


Figura 24. Serie temporale della concentrazione di Carbonio Elementare (EC) nelle cinque postazioni di misura.

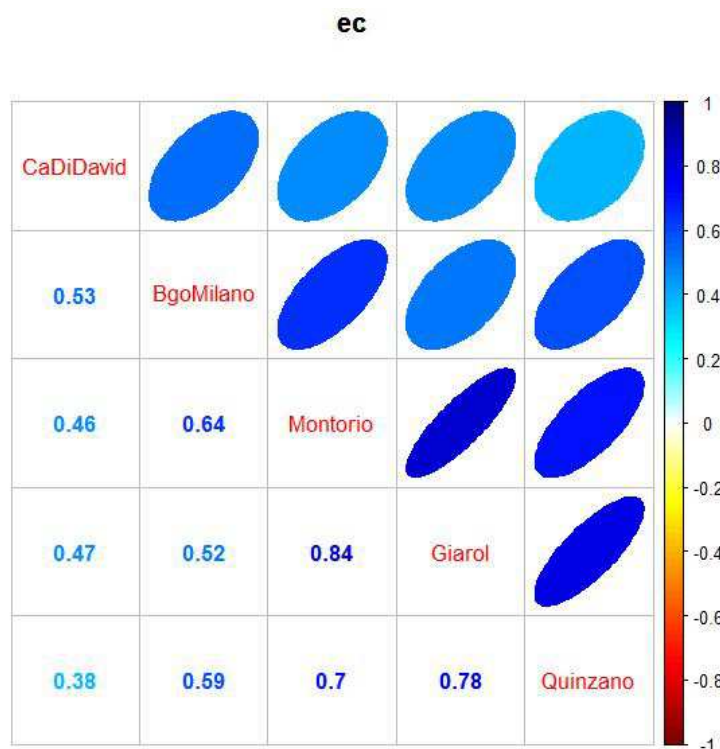


Figura 25. Grafico di correlazione tra la concentrazione di Carbonio Elementare (EC) nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.



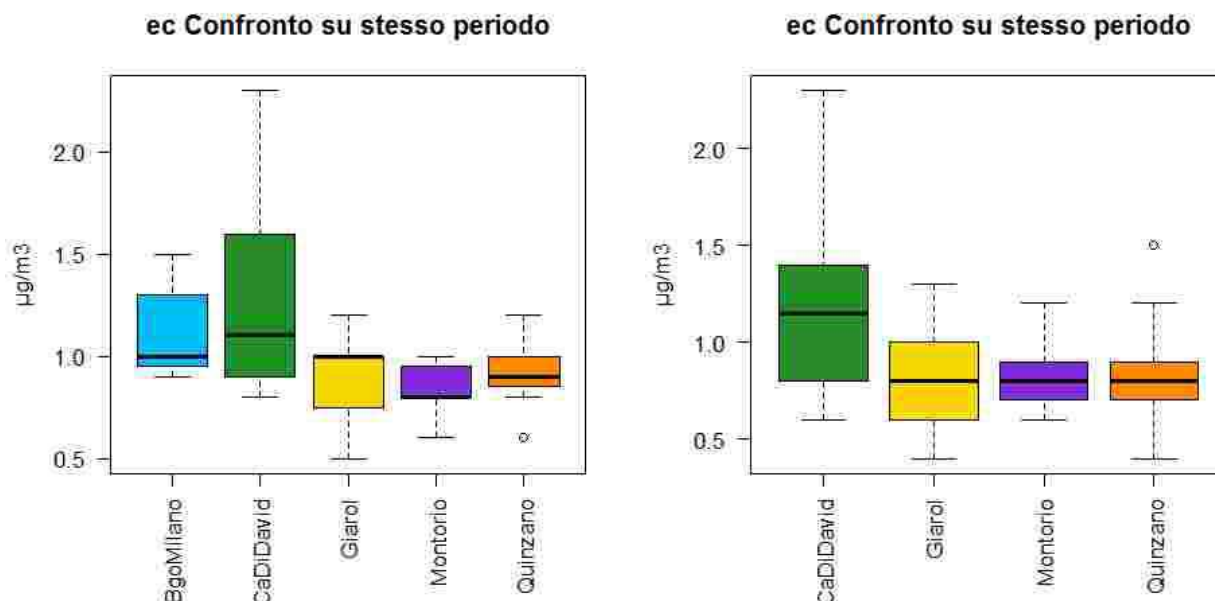


Figura 26. Box-plot della concentrazione di benzo(a)pirene su PM2.5, misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

µg/m <sup>3</sup>	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	1.1	1.3	0.9	0.8	0.9
n	7	7	7	7	7
sd	0.3	0.6	0.2	0.1	0.2
min	0.9	0.8	0.5	0.6	0.6
max	1.5	2.3	1.2	1.0	1.2

Tabella 16. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di Carbonio Elementare misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i cinque siti. Rappresentazione grafica in Figura 26, pannello di sinistra.

µg/m <sup>3</sup>	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	1.2	0.8	0.8	0.8
n	18	18	18	18
sd	0.5	0.2	0.2	0.3
min	0.6	0.4	0.6	0.4
max	2.3	1.3	1.2	1.5

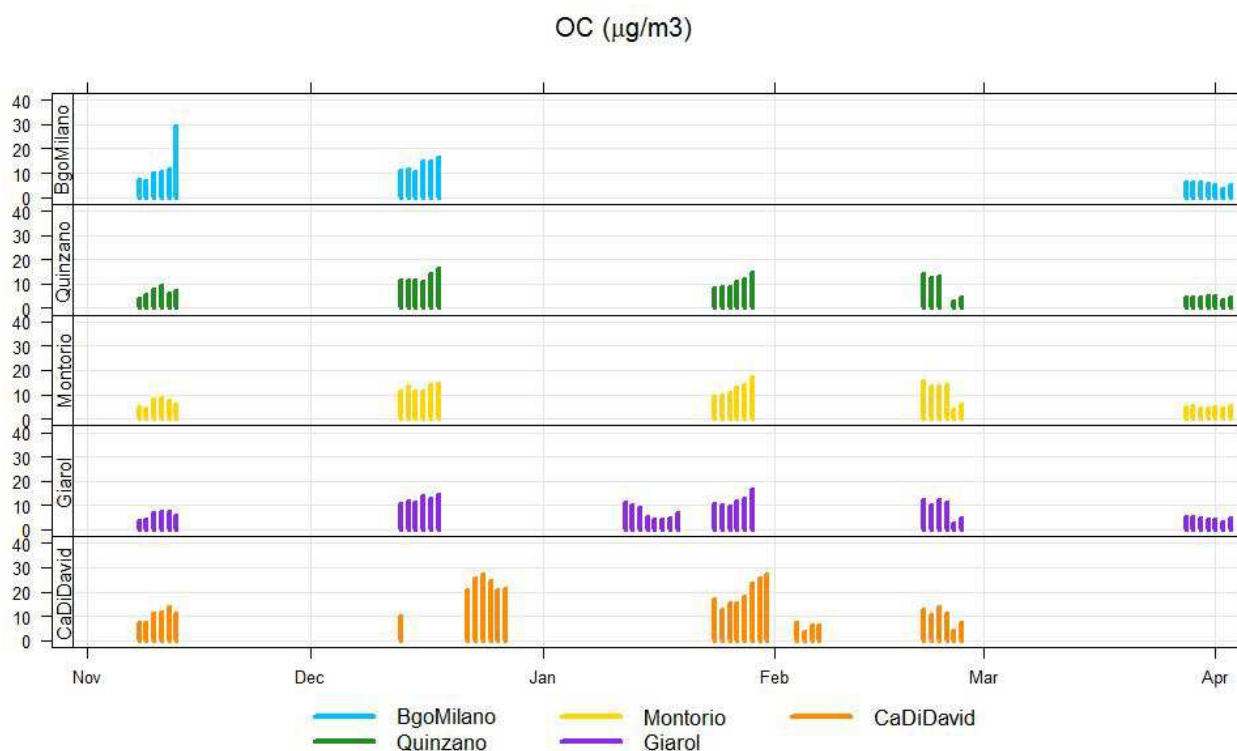
Tabella 17. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di Carbonio Elementare su PM2.5 misurata in quattro dei siti monitorati: L'analisi di tabella 16 è stata ripetuta escludendo Borgo Milano, per il quale sono disponibili pochi dati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i quattro siti. Rappresentazione grafica in Figura 26, pannello di destra.

## 5.4.2 OC

L'andamento della concentrazione di Carbonio Organico (OC) nei diversi siti è simile (figura 27), e la correlazione tra siti è buona (figura 28): solo quella tra Borgo Milano e Ca' di David è non significativa, a causa dell'esiguo numero di dati (7 valori). Giarol, Montorio e Quinzano sono correlate tra loro in modo più robusto rispetto a Ca' di David e Borgo Milano.

La concentrazione di OC è ben correlata con quella di PM2.5, IPA, levoglucosano, NOx, SIA (figura 60 in Appendice). La correlazione con levoglucosano e IPA è più elevata a Borgo Milano e Ca' di David.

I valori medi più elevati si trovano a Borgo Milano e Ca' di David (figura 29, tabella 18 e tabella 19), e la differenza rispetto alle altre postazioni è significativa a Ca' di David.



**Figura 27. Serie temporale della concentrazione della concentrazione di Carbonio Organico (CO,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) nelle cinque postazioni di misura.**

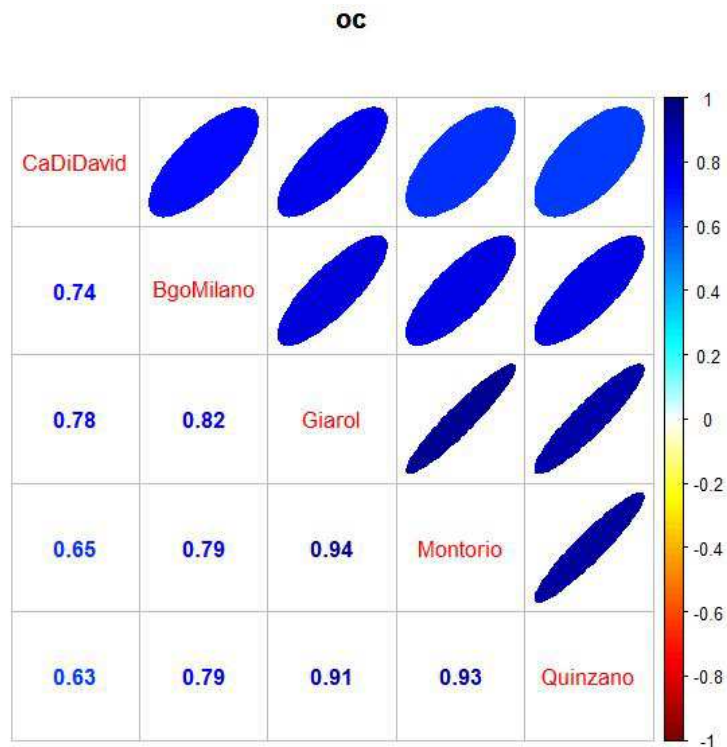


Figura 28. Grafico di correlazione tra la concentrazione di PM2.5 nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.

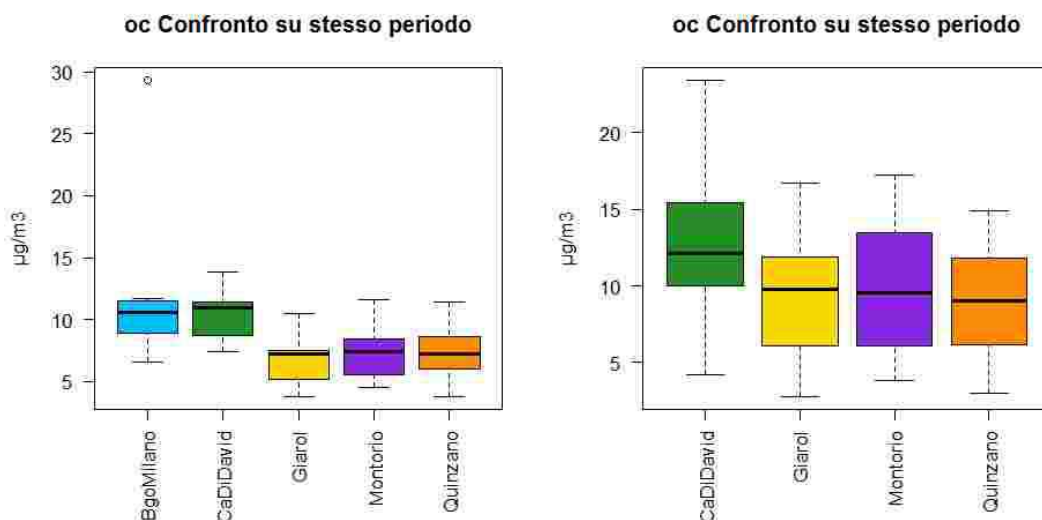


Figura 29. Box-plot della concentrazione di Carbonio Organico (OC) su PM2.5, misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	12.46	10.34	6.69	7.33	7.39
n	7	7	7	7	7
sd	7.67	2.32	2.25	2.46	2.48
min	6.60	7.40	3.80	4.50	3.80
max	29.30	13.80	10.50	11.60	11.40

Tabella 18. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di Carbonio Organico misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i cinque siti. Rappresentazione grafica in Figura 29, pannello di sinistra.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	12.40	8.94	9.91	9.08
n	18	18	18	18
sd	4.58	3.69	4.05	3.52
min	4.20	2.80	3.80	3.00
max	23.40	16.70	17.20	14.90

Tabella 19. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di Carbonio Organico su PM2.5 misurata in quattro dei siti monitorati: L'analisi di tabella 18 è stata ripetuta escludendo Borgo Milano, per il quale sono disponibili pochi dati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i quattro siti. Rappresentazione grafica in Figura 29, pannello di destra.

## 5.5 SIA

I componenti principali dell'aerosol inorganico secondario (SIA) sono rappresentati da ammonio ( $\text{NH}_4$ ), solfati ( $\text{SO}_4$ ) e nitrati ( $\text{NO}_3$ ). Sono inclusi in questa frazione del PM2.5 anche calcio, cloruri, potassio e sodio. La composizione percentuale media del SIA nei vari siti analizzati è molto simile: in figura 30 è riportato il grafico a torta che rappresenta la composizione percentuale del SIA a Ca' di David. La maggior parte del SIA è costituito dai nitrati (59%), a seguire dall'ammonio (21%) e dai solfati (11%).

Il valore medio del SIA è più elevato a Ca' di David rispetto alle altre postazioni di misura (pannello a destra di figura 31 e tabella 22) e la differenza risulta significativa rispetto a Quinzano e Giarol. Tuttavia, se si considera il rapporto tra SIA e PM2.5, non ci sono differenze significative tra i siti. Anche Borgo Milano mostra valori più elevati rispetto alle altre postazioni (pannello a sinistra di figura 31 e tabella 21).

La percentuale in peso di SIA sul PM2.5 totale può variare considerevolmente nel tempo, come si vede in tabella 23, assumendo valori compresi tra il 30% e il 70% circa. Essa varia allo stesso modo nei vari siti, tra i quali la correlazione per questo parametro risulta significativa (figura 32).

Recenti studi relativi alla formazione di particolato secondario nella pianura veneta (Masiol, 2015), hanno evidenziato che la formazione di nitrati avviene su scala locale grazie alla disponibilità di  $\text{NO}_2$ , alle basse temperature e all'elevata umidità: l'alta percentuale di nitrati sul particolato è quindi legata alle elevate concentrazioni di ossidi di azoto misurate in aria (capitolo 5.7). Tuttavia, il

confronto tra NO<sub>x</sub> e nitrati nei diversi siti non consente di trovare una corrispondenza tra concentrazioni più elevate di NO<sub>x</sub> e valori più alti di nitrati (non mostrato).

La formazione di solfati è legata soprattutto al trasporto di masse d'aria su scala regionale, e infatti la percentuale di solfati sul PM<sub>2.5</sub> è alta se confrontata con la bassa concentrazione dei precursori gassosi (SO<sub>2</sub>, capitolo 5.8).

Il magnesio e il calcio possono essere ritenuti indicatori della presenza di particelle cristalline. I valori misurati di concentrazione di magnesio sono sempre stati inferiori al limite di rivelabilità strumentale, tranne in un singola giornata a Giarol, il 1 gennaio (quando è stata misurata una concentrazione pari a 0.4 µg/m<sup>3</sup>, figura 33): questo picco potrebbe essere associato all'utilizzo di qualche gioco pirotecnico, tipico del capodanno, ipotesi avvalorata da un picco di concentrazione di potassio nella stessa data (figura 37). Per quanto riguarda invece il calcio, i valori mostrano delle variazioni nel tempo, che non sempre sono correlate tra diversi siti di misura (figura 34): concentrazioni di calcio più elevate della media appaiono come episodi circoscritti nel tempo, non sempre avvengono nello stesso periodo nelle diverse località, e non è evidente una correlazione con la concentrazione di altre specie. I valori medi e massimi sono più elevati a Montorio e a Borgo Milano, ma solo la differenza tra Montorio e Giarol risulta significativa al livello del 95%.

Il Cloro può avere diverse origini fra cui la combustione di legna o carbone, usi industriali, l'impiego di sale sulle strade nei periodi più freddi, il trasporto a lunga distanza di aerosol marino. Le serie temporali di cloruri mostrano una buona correlazione tra i vari siti (figura 35), sempre significativa, e valori più elevati a Borgo Milano e Ca' di David (figura 36): la differenza tra medie di Ca' di David e Quinzano è significativa. Questo porta a pensare che le più elevate concentrazioni di cloruri a Ca' di David siano associabili alla combustione di legna: in effetti, la correlazione tra cloruri e levoglucosano è più elevata a Ca' di David e Borgo Milano rispetto agli altri siti (figura 60 in Appendice).

Il potassio è un tracciante della combustione di biomassa (Chow et al, 2007). L'andamento temporale della concentrazione di potassio è simile per i diversi siti, e infatti la correlazione tra siti per questo inquinante è buona (figura 38). Esso è ben correlato con le altre specie chimiche associate alla combustione di biomassa (figura 60 in Appendice) come levoglucosano, IPA e cloruri. I valori medi nelle diverse postazioni di misura sono molto vicini (tabella 24).

### SIA CaDiDavid

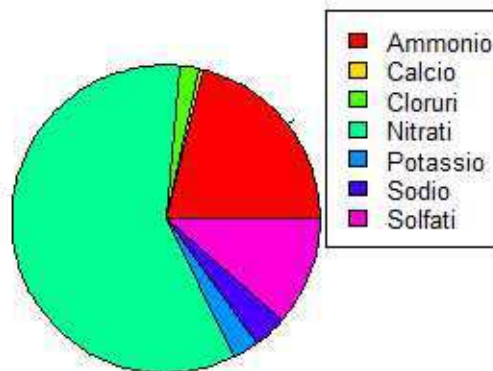


Figura 30. SIA a Ca' di David. Ripartizione nelle diverse specie misurate. Questo grafico è rappresentativo anche della situazione media negli altri siti di monitoraggio.

Specie	Percentuale di SIA rappresentata
Ammonio	21.1
Calcio	0.5
Cloruri	1.9
Nitrati	58.8
Potassio	2.8
Sodio	3.5
Solfati	11.4

Tabella 20. SIA a Ca' di David. Ripartizione nelle diverse specie misurate.

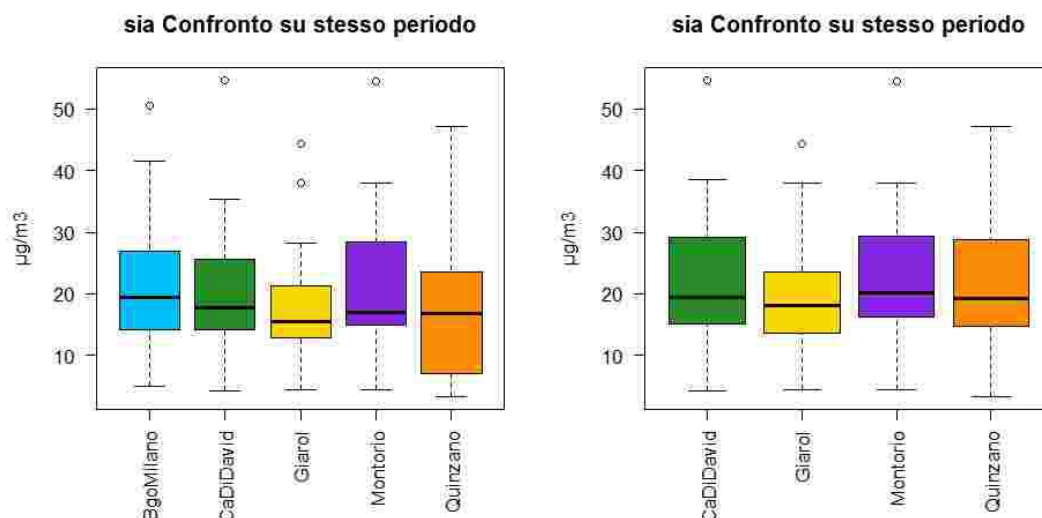


Figura 31. Box-plot della concentrazione di Aerosol Inorganico Secondario (SIA) su PM<sub>2.5</sub>, misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	21.60	19.92	18.16	21.01	18.72
n	18	18	18	18	18
sd	11.96	12.30	10.72	12.40	11.75
min	5.05	4.15	4.45	4.45	3.35
max	50.55	54.65	44.35	54.45	47.25

Tabella 21. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di SIA misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i cinque siti. Rappresentazione grafica in Figura 31, pannello di sinistra.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	21.91	19.37	21.96	20.76
n	23	23	23	23
sd	11.92	10.08	11.37	11.33
min	4.15	4.45	4.45	3.35
max	54.65	44.35	54.45	47.25

Tabella 22. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di SIA su PM<sub>2.5</sub> misurata in quattro dei siti monitorati: L'analisi di tabella 21 è stata ripetuta escludendo Borgo Milano, per il quale sono disponibili pochi dati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i quattro siti. Rappresentazione grafica in Figura 31, pannello di destra.

SIA/PM2.5	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.41	0.49	0.46	0.45	0.44
n	19	35	48	36	36
sd	0.11	0.12	0.11	0.14	0.13
min	0.28	0.27	0.28	0.28	0.27
max	0.74	0.77	0.73	0.89	0.71

Tabella 23. Principali parametri statistici relativi alla percentuale in peso di SIA su PM2.5 misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati tutti i dati disponibili per i cinque siti.

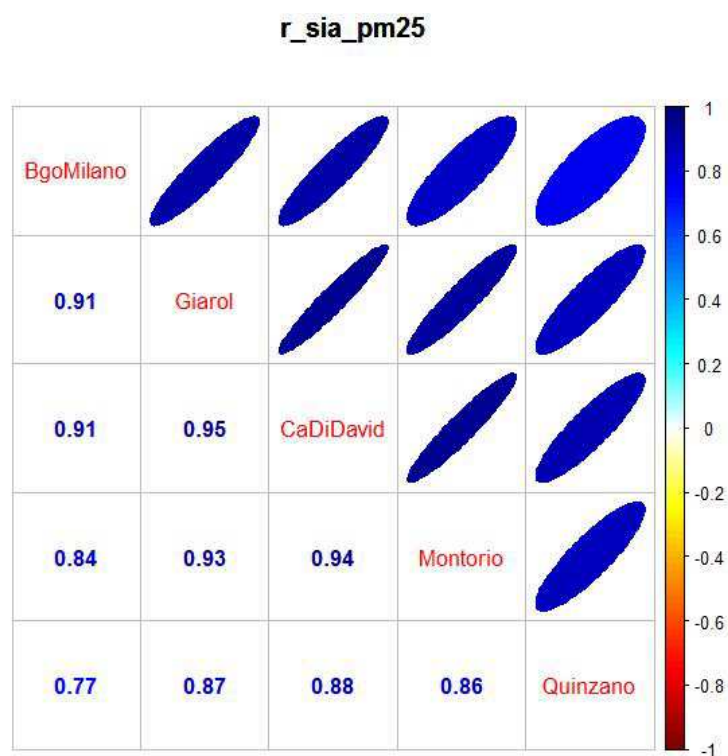
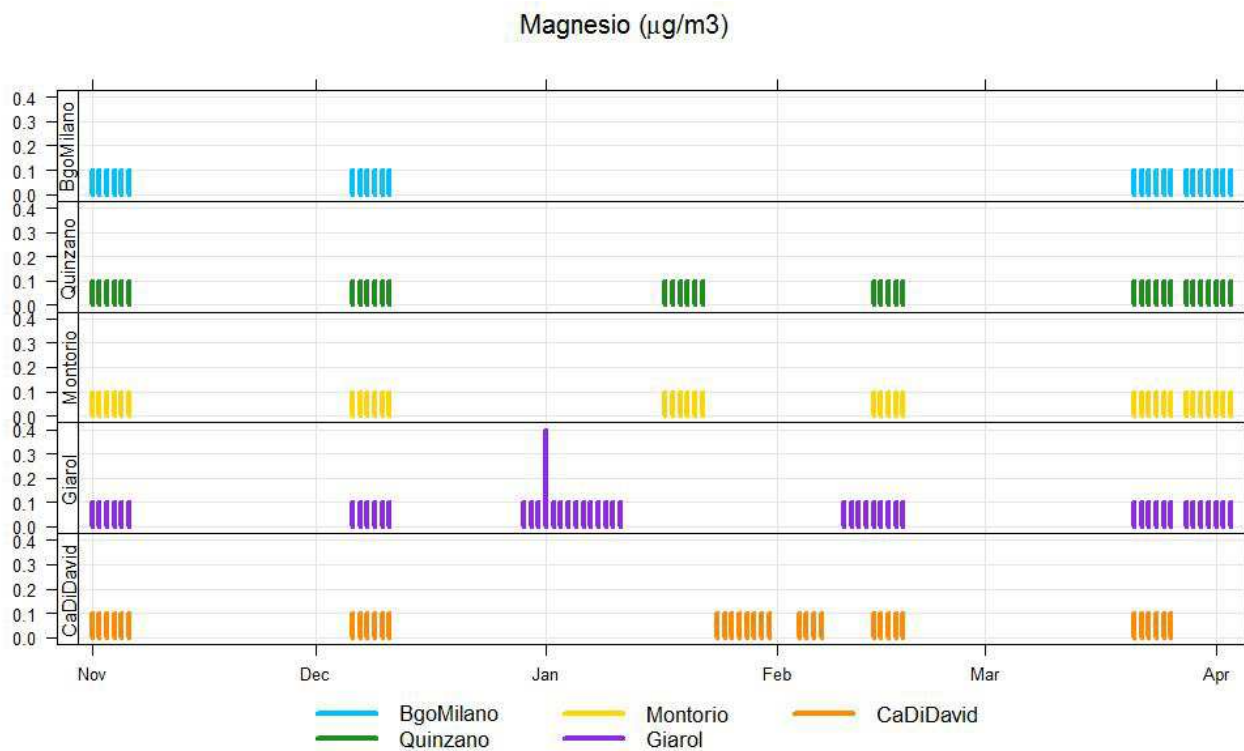
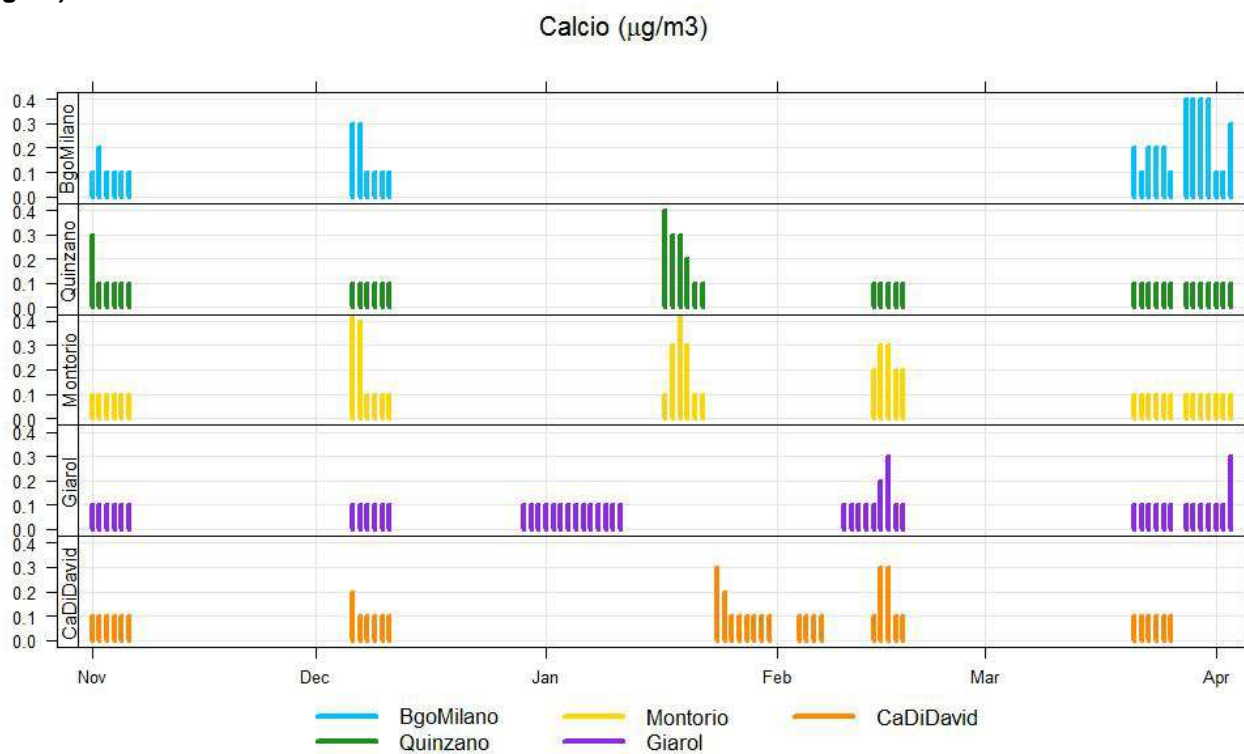


Figura 32. Grafico di correlazione tra la percentuale di SIA sul PM2.5 nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.





**Figura 33. Serie temporale della concentrazione di magnesio nelle cinque postazioni di misura ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).**



**Figura 34. Serie temporale della concentrazione di calcio nelle cinque postazioni di misura ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).**

### cloruri

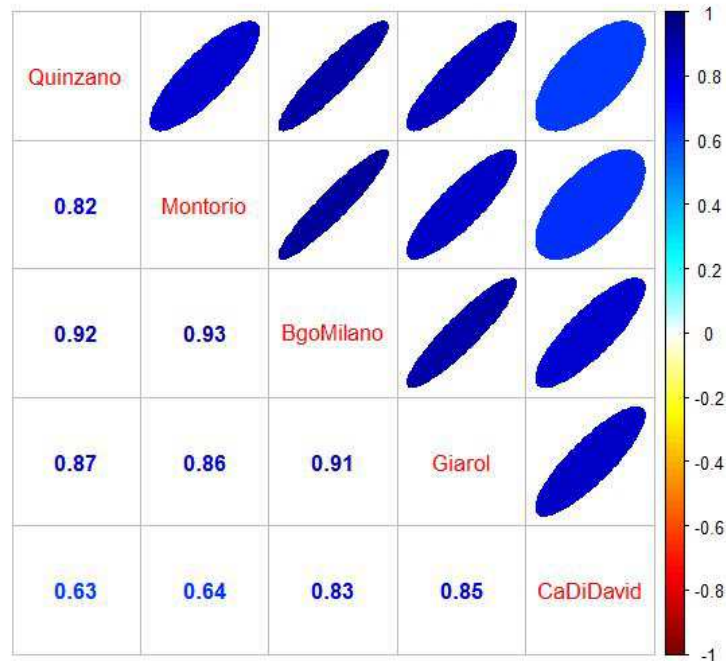


Figura 35. Grafico di correlazione tra la concentrazione di cloruri nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.

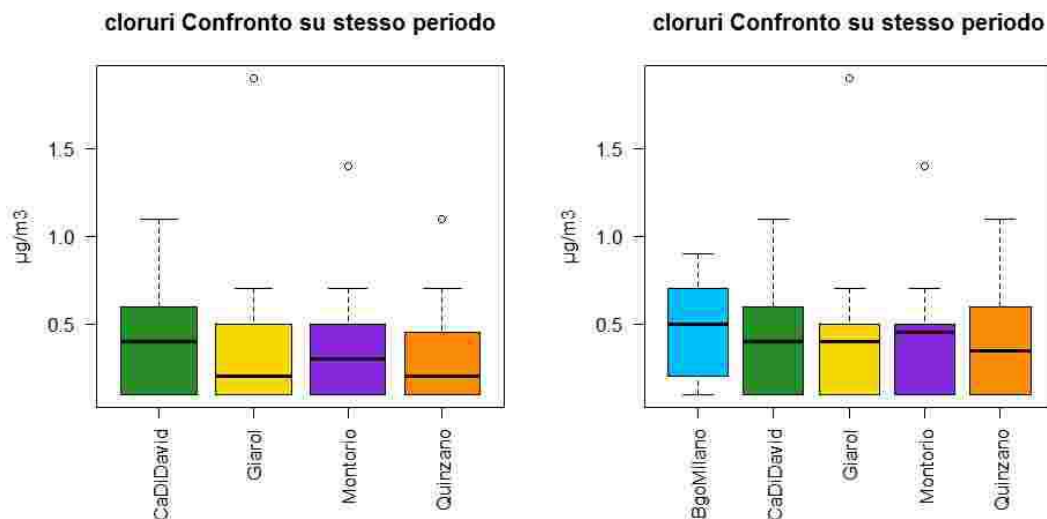


Figura 36. Box-plot della concentrazione di Cloruri su PM2.5, misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

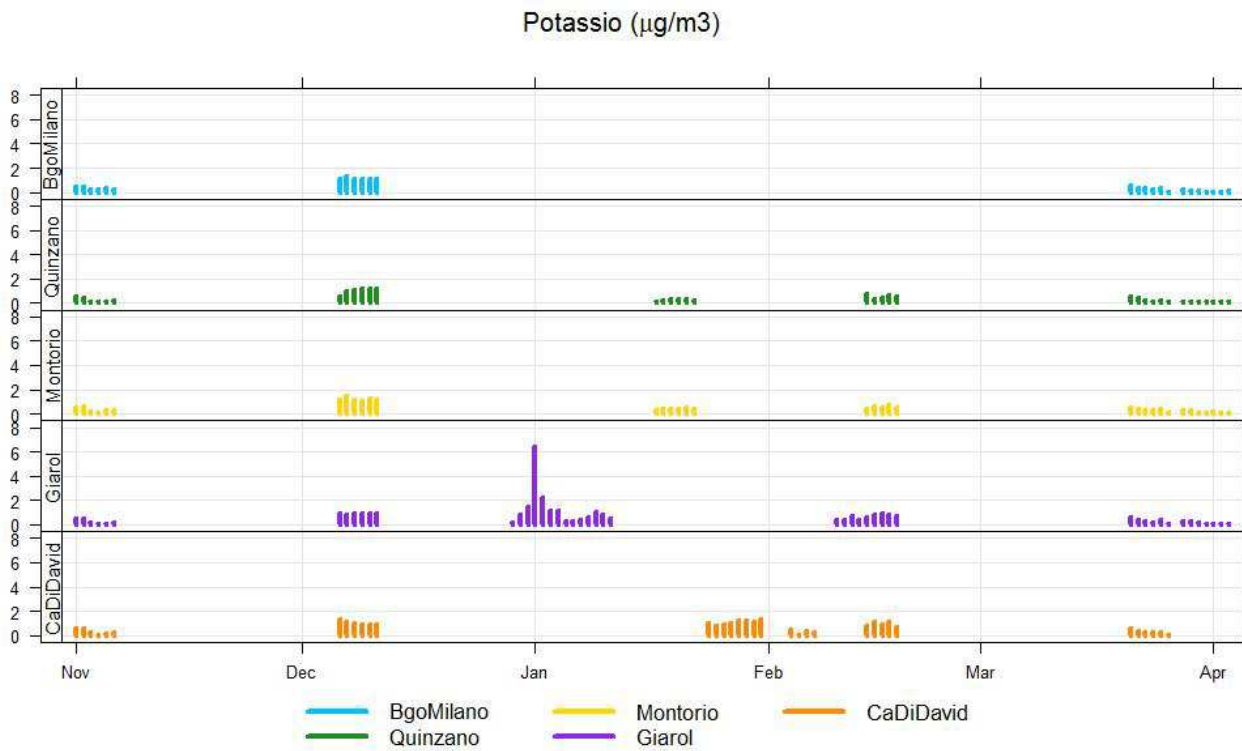


Figura 37. Serie temporale della concentrazione di potassio nelle cinque postazioni di misura ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

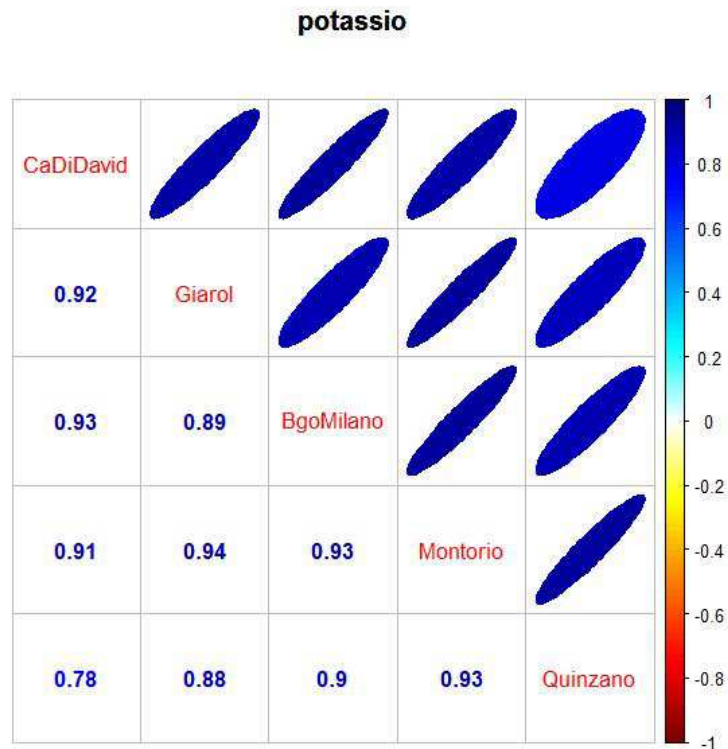


Figura 38. Grafico di correlazione tra la concentrazione di potassio nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.5	0.7	0.7	0.5	0.4
n	25	35	48	36	36
sd	0.4	0.4	1.0	0.4	0.3
min	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
max	1.4	1.4	6.5	1.5	1.2

**Tabella 24. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di potassio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) misurata nei cinque siti monitorati.**

## 5.6 Composizione relativa del particolato

Come è già stato detto all'inizio del paragrafo 5, il particolato atmosferico è costituito da una frazione inorganica e da una carboniosa, che comprende una frazione elementare (EC) e una organica (OC). Sulla maggior parte dei campioni di PM<sub>2.5</sub> prelevati, sono state eseguite alternativamente le misure o delle componenti inorganiche del particolato (nitrati, solfati, cloruri etc., prima settimana di campionamento) o di carbonio (OC ed EC, seconda settimana di campionamento). Invece levoglucosano ed IPA sono stati misurati su tutti i campioni.

La percentuale di SIA, OC e EC su PM<sub>2.5</sub> è riportata nelle tabelle 23, 26 e 27 rispettivamente. Essa varia notevolmente nel tempo e nei diversi siti. Mediamente, nel periodo di campionamento, è stata vicina al 45% per il SIA (tabella 23), al 30% per l'OC (tabella 26) e al 3% per l'EC (tabella 27). In uno stesso sito, nel tempo essa può variare tra il 27% e l'89% per il SIA, tra il 24% e il 92% per l'OC, e tra l'1% e il 15% per l'EC. La composizione relativa del SIA è già stata discussa al paragrafo 5.5 ed è sintetizzata in figura 30 e tabella 20: la maggior parte del SIA è costituito dai nitrati (59%), a seguire dall'ammonio (21%) e dai solfati (11%).

Se confrontati con la letteratura (Masiol et al., 2013), questi dati si avvicinano a quelli ottenuti per la provincia di Rovigo, e mostrano una maggior percentuale di nitrati e ammonio rispetto alle altre province del Veneto, in accordo con un maggior peso del settore agricolo, che utilizza queste specie chimiche come fertilizzante.

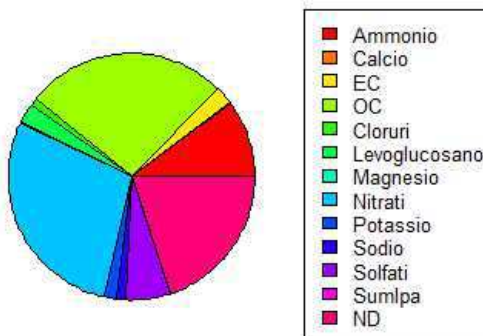
La correlazione tra siti diversi per il rapporto tra EC e PM<sub>2.5</sub> è più bassa di quella relativa al levoglucosano, e tuttavia significativa, tranne nel caso della coppia Borgo Milano-Giarol (figura 40, pannello a sinistra). La correlazione tra siti per il rapporto tra OC e PM<sub>2.5</sub> è più elevata, a conferma del fatto che la componente secondaria del particolato fine è omogenea su ampie aree (figura 40, pannello a destra). Questo indica che la percentuale di EC ed OC sul PM<sub>2.5</sub> varia allo stesso modo nei vari siti monitorati, e che solo a Borgo Milano si discosta da tale andamento.

Il rapporto tra EC ed OC diminuisce in presenza di un apporto di aerosol organico secondario. In figura 41, si nota che esso varia in modo simile nelle diverse postazioni: la correlazione tra siti è abbastanza buona (figura 42), tranne nel caso di Borgo Milano, dove si trovano anche i valori medi più bassi (figura 43, pannello a sinistra, e tabella 29), indice di una maggiore presenza di una componente organica secondaria. A Ca' di David si trovano invece i valori più elevati, che indicano la presenza di una componente primaria più importante (figura 43, pannello a destra, e tabella 30).

Nel sito di monitoraggio di Ca' di David nei giorni compresi tra il 24 e il 29 gennaio 2017, sono stati misurati sullo stesso filtro tutte le specie chimiche descritte. Questi dati sono stati utilizzati per elaborare la tabella 25, in cui è riportato l'apporto in percentuale delle varie specie chimiche al

peso del PM2.5. La figura 39 è una rappresentazione grafica della tabella 25. Si può osservare che su questi campioni la maggior parte del PM2.5 è costituito da nitrati (28.5%) e OC (26.5%); seguono l'ammonio (10.0%) e i solfati (5.7%). Le percentuali ottenute su questi campioni confermano le stime fatte utilizzando tutti i dati disponibili per le singole specie chimiche, e la figura 39 può quindi essere considerata una prima approssimazione della composizione media del particolato nell'area in studio.

**PM2.5 pie Ca' di David**



**Figura 39. Composizione del PM2.5: percentuale delle varie specie chimiche analizzate. ND indica "non determinato", cioè specie che non sono state misurate.**

Specie	%
Ammonio	10.0
Calcio	0.2
EC	2.3
OC	26.5
Cloruri	1.0
Levogluco sano	2.6
Magnesio	0.2
Nitrati	28.5
Potassio	1.6
Sodio	1.3
Solfati	5.7
Sumlpa	0.0
ND	19.9

**Tabella 25. Composizione del PM2.5: percentuale delle varie specie chimiche analizzate. ND indica "non determinato", cioè specie che non sono state misurate. Rappresentazione grafica di questa tabella in figura 39.**

OC/PM2.5	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.41	0.49	0.46	0.45	0.44
n	19	35	48	36	36
sd	0.11	0.12	0.11	0.14	0.13
min	0.28	0.27	0.28	0.28	0.27
max	0.74	0.77	0.73	0.89	0.71

Tabella 26. Principali parametri statistici relativi alla percentuale in peso di OC su PM2.5 misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati tutti i dati disponibili per i cinque siti.

EC/PM2.5	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
n	19	31	39	31	30
sd	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02
min	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
max	0.09	0.14	0.15	0.07	0.11

Tabella 27. Principali parametri statistici relativi alla percentuale in peso di EC su PM2.5 misurata nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati tutti i dati disponibili per i cinque siti.

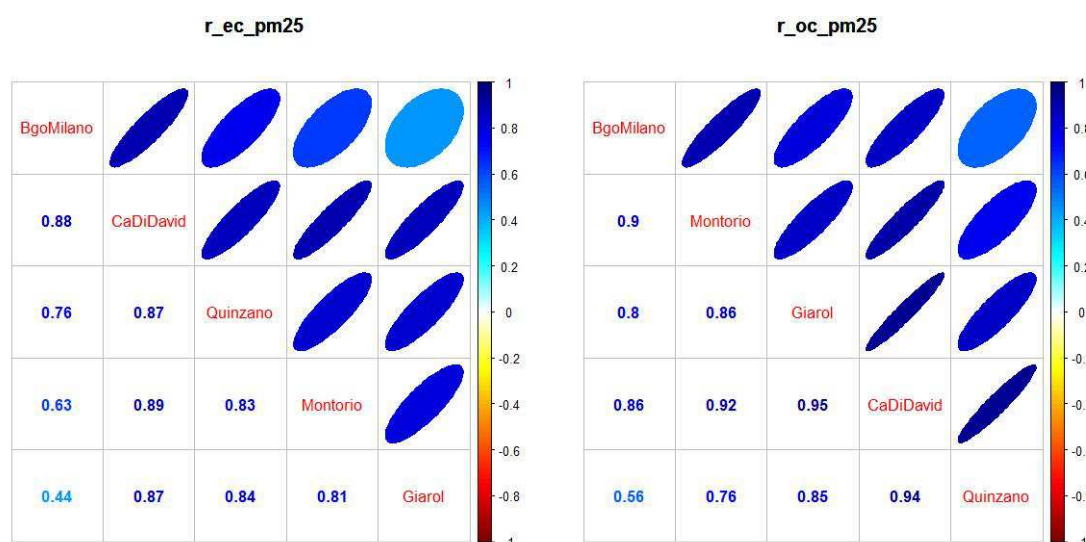
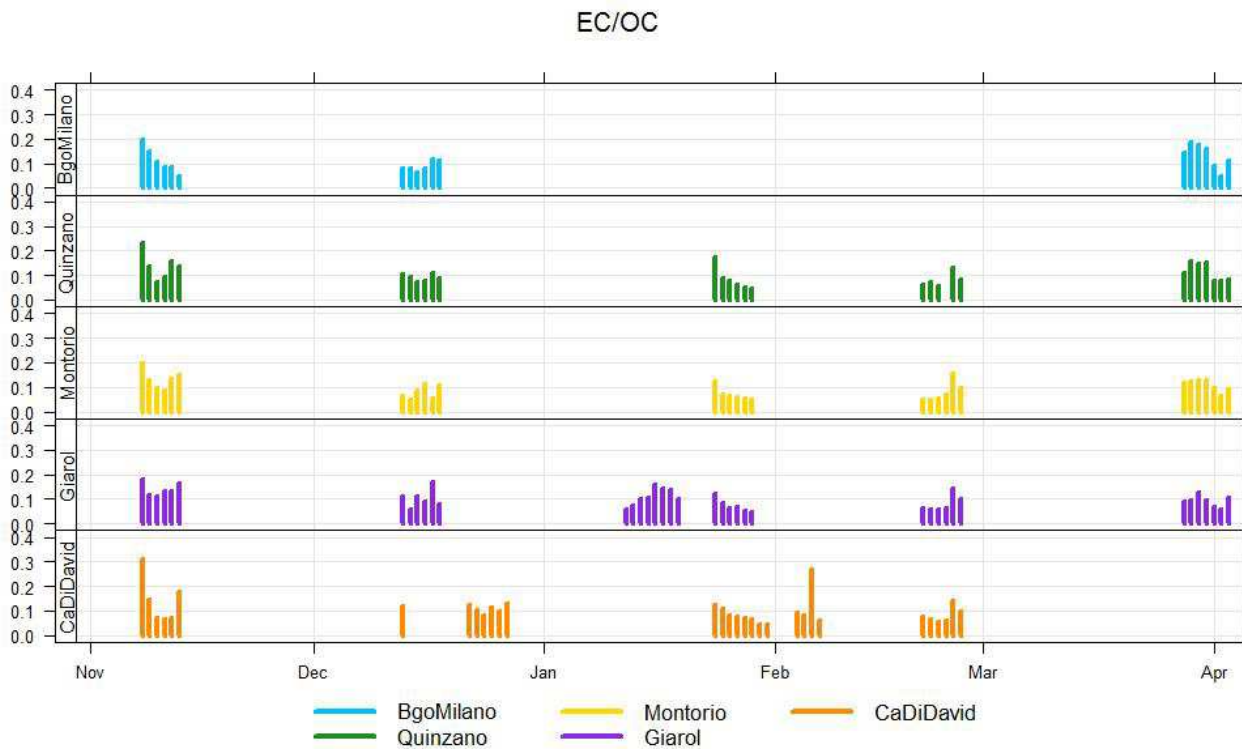
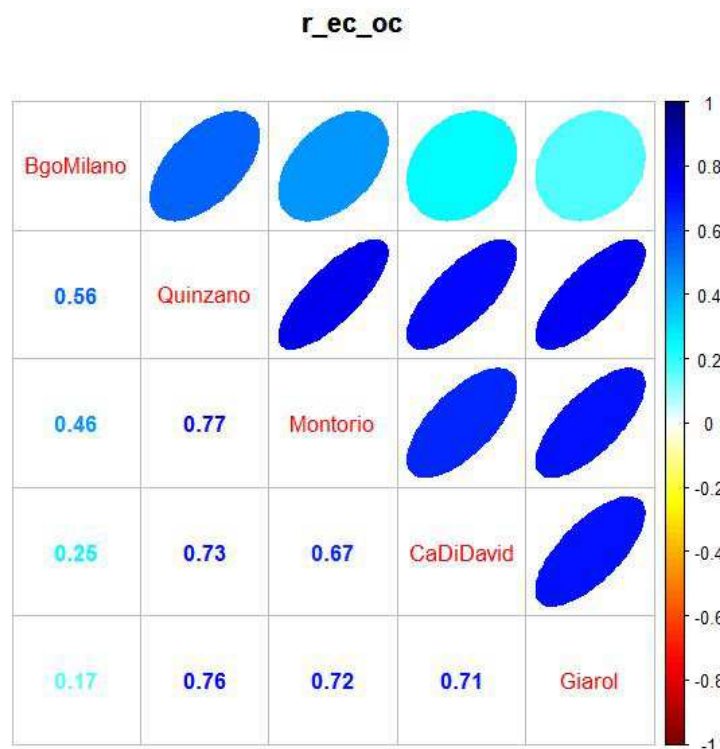


Figura 40. Grafico di correlazione tra la percentuale di EC (a sinistra) o OC (pannello a destra) su PM2.5 nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.



**Figura 41. Serie temporale del rapporto tra concentrazione di EC e concentrazione di OC nelle cinque postazioni di misura.**



**Figura 42 . Grafico di correlazione tra il rapporto tra le concentrazioni di EC e di OC su PM<sub>2.5</sub> nei vari siti. Ogni correlazione, riferita a una coppia di siti, è stata calcolata utilizzando tutte le giornate in cui sono disponibili dati per entrambi i siti. Il numero di dati può quindi differire a seconda della coppia di siti scelta.**

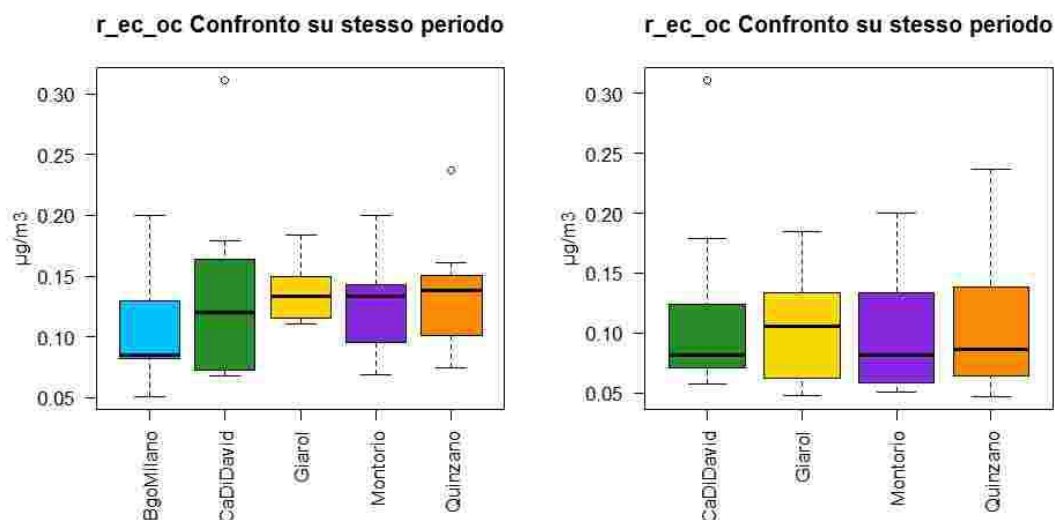


Figura 43. Box-plot della concentrazione di Carbonio Organico (OC) su PM<sub>2.5</sub>, misurata nei cinque siti di monitoraggio (indicati in ascissa). Il pannello di sinistra si riferisce alle giornate in cui sono disponibili dati per tutte le cinque postazioni. Per il pannello di destra, l'analisi è stata ripetuta escludendo la stazione di Borgo Milano, per avere a disposizione più dati.

EC/OC	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.11	0.11	0.10	0.10	0.11
n	19	31	39	31	30
sd	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04
min	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05
max	0.20	0.31	0.18	0.20	0.24

Tabella 28. Principali parametri statistici relativi al rapporto tra carbonio elementare e carbonio organico misurata nei cinque siti monitorati.

EC/OC	BgoMilano	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.11	0.14	0.14	0.13	0.14
n	7	7	7	7	7
sd	0.05	0.09	0.03	0.04	0.05
min	0.05	0.07	0.11	0.07	0.08
max	0.20	0.31	0.18	0.20	0.24

Tabella 29. Principali parametri statistici relativi al rapporto tra Carbonio Elementare e Carbonio Organico misurato nei cinque siti monitorati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i cinque siti. Rappresentazione grafica in Figura 43, pannello di sinistra.



EC/OC	CaDiDavid	Giarol	Montorio	Quinzano
media	0.11	0.10	0.10	0.10
n	18	18	18	18
sd	0.06	0.04	0.04	0.05
min	0.06	0.05	0.05	0.05
max	0.31	0.18	0.20	0.24

**Tabella 30. Principali parametri statistici relativi al rapporto tra Carbonio Elementare e Carbonio Organico misurata in quattro dei siti monitorati: L'analisi di tabella 29 è stata ripetuta escludendo Borgo Milano, per il quale sono disponibili pochi dati. Per l'elaborazione sono stati considerati solo i dati di giornate in cui la misurazione è disponibile per tutti i quattro siti. Rappresentazione grafica in Figura 43, pannello di destra.**

## 5.7 Biossido di azoto (NO<sub>2</sub>)-Ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>)

Le concentrazioni di biossido di azoto sono state determinate presso le stazioni fisse (Verona-Borgo Milano e Verona-Giarol) e presso le due postazioni del laboratorio mobile (Quinzano via Villa e Montorio Piazzale Buccari).

Come si può vedere in tabella 31 e in figura 44, durante le campagne di monitoraggio la concentrazione di biossido di azoto non ha superato il valore limite orario relativo all'esposizione acuta di 200 µg/m<sup>3</sup>, in nessuno dei quattro siti monitorati. I valori medi di NO<sub>2</sub> relativi a Borgo Milano e Quinzano sono più elevati, con una differenza significativa a livello di confidenza del 99% (Kruskal test) rispetto a quelli di Giarol e Montorio. Invece la differenza tra Borgo Milano e Quinzano non è significativa.

Considerando gli ossidi di azoto totali (NO<sub>x</sub>, tabella 32), si trova che i valori più elevati sono a Borgo Milano, a seguire a Quinzano. In questo caso anche la differenza tra Borgo Milano e Quinzano risulta significativa a livello del 99%. L'analisi dei dati evidenzia quindi una maggiore componente di origine secondaria a Quinzano, dove l'NO<sub>2</sub> ha un valore medio vicino a quello di Borgo Milano, ma gli ossidi di azoto totali (NO<sub>x</sub>) sono inferiori: infatti il rapporto NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> a Quinzano è simile a quello di Giarol e Montorio.

Nel grafico di figura 46, è riportato il giorno tipo della concentrazione di NO<sub>2</sub>, calcolato per i periodi di campagna. Sono evidenti due picchi, al mattino e alla sera, in corrispondenza delle ore di maggiore traffico, più pronunciati nella postazione di traffico di Verona Borgo Milano, meno evidenti negli altri siti. A Quinzano troviamo valori elevati, paragonabili a quelli di Borgo Milano, ma un andamento più simile a quello degli altri siti, che non sono di traffico.

I risultati ottenuti, per quanto riguarda Borgo Milano, sono in linea con le aspettative: infatti questo è un sito di traffico, e gli ossidi di azoto sono tipicamente associati a questa fonte emissiva. I risultati relativi a Quinzano, sono in parte inattesi: il fatto che la postazione si trovi in una zona residenziale, con caratteristiche urbanistiche simili alla zona di Montorio, giustifica l'andamento temporale della concentrazione di ossidi di azoto e il rapporto NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>; tuttavia valori medi così elevati di NO<sub>2</sub> non sono in linea con le aspettative. Questa caratterizzazione degli ossidi di azoto porta a pensare a una sorgente emissiva, anche a una certa distanza dal punto di misura, tale da giustificare la trasformazione di una parte degli ossidi di azoto in NO<sub>2</sub>: l'identificazione di tale sorgente richiederebbe ulteriori e più approfondite indagini. Tra le fonti emissive note presenti nelle vicinanze ci sono l'impianto di cogenerazione della AGSM, 1000m a sud-ovest del punto di

misura, le piscine Santini, che utilizzano un impianto di riscaldamento a metano, 100m a est del punto stesso si trovano, e di Via Trento, che rappresenta una delle principali arterie di penetrazione della città da ovest.

NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	BgoMilano	Quinzano	Montorio	Giarol
media	45	45	33	31
sd	19	20	17	14
min	7	7	<4	<4
max	110	114	99	114
mediana	44	45	32	30
N	1656	1656	1656	1656
dati mancanti	61	182	14	77
data.capture	96	89	99	95
massima media giornaliera	77	82	56	57
95°percentile	78	76	62	56
99°percentile	96	93	79	69
N superamenti 200 µg/m <sup>3</sup>	0	0	0	0
N superamenti 400 µg/m <sup>3</sup>	0	0	0	0

Tabella 31 Concentrazione di NO<sub>2</sub>: principali parametri statistici nei diversi siti di monitoraggio. Il limite di rivelabilità dello strumento di misura è 4 µg/m<sup>3</sup>.

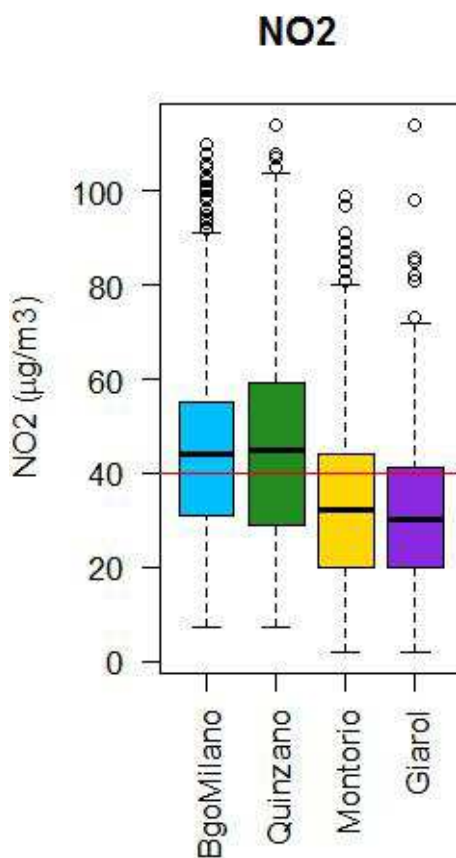
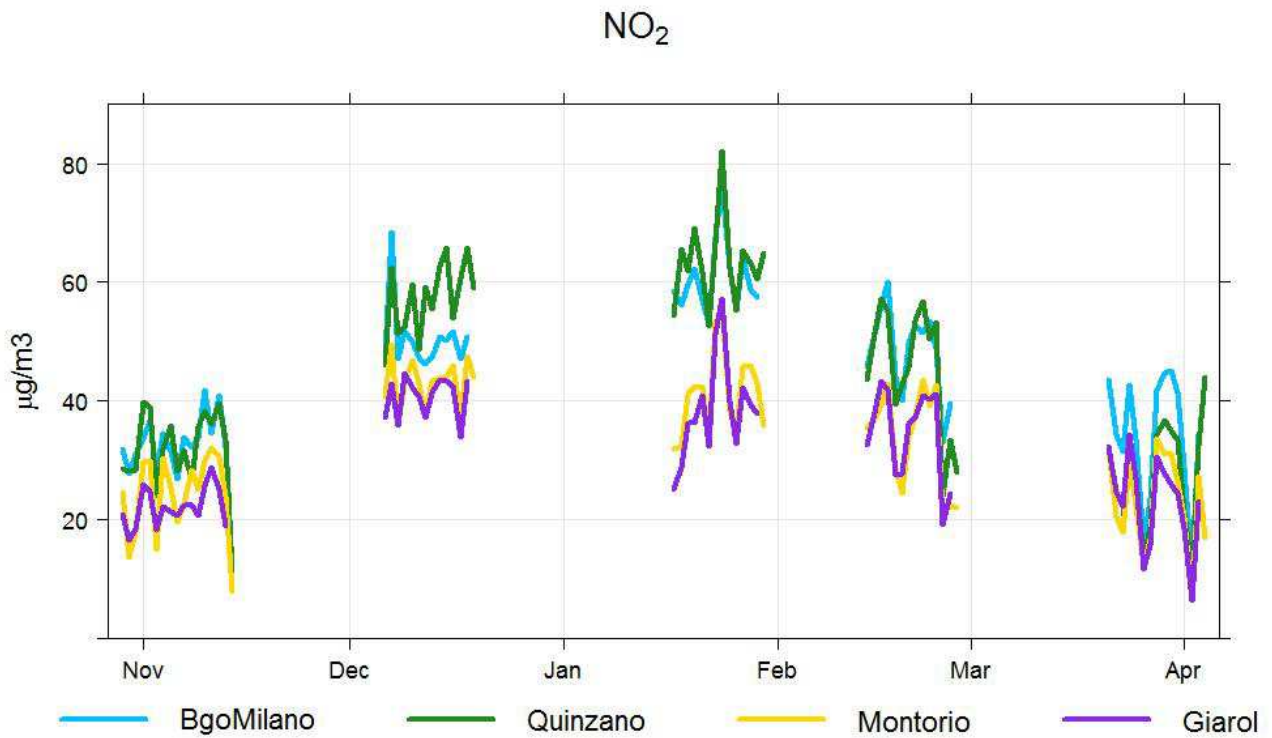
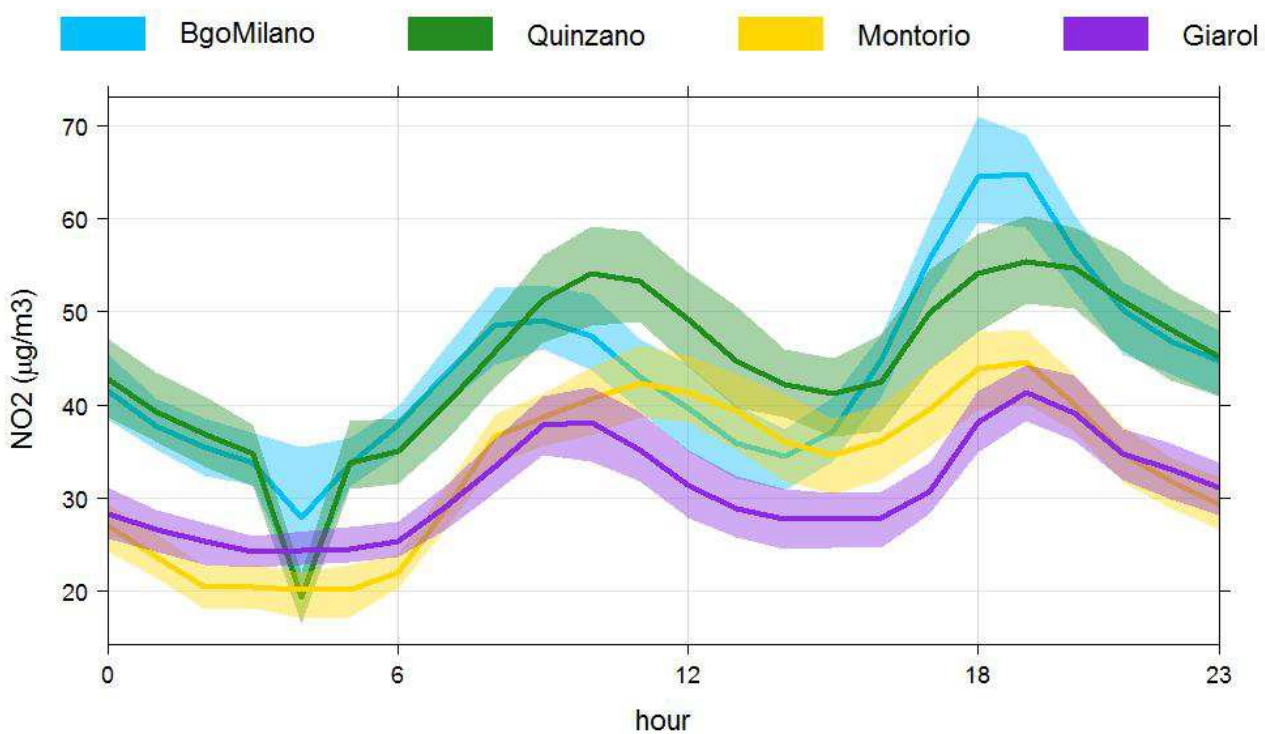


Figura 44 Box-plot della concentrazione di NO<sub>2</sub>. Dati relativi a Verona Quinzano e Montorio e alle due centraline di riferimento di Verona-Borgo Milano e Verona-Giarol.



**Figura 45. Andamento giornaliero delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> a Verona Borgo Milano, Giarol, Quinzano e Montorio**



**Figura 46: Andamento del giorno tipo delle concentrazioni orarie di NO<sub>2</sub> a Verona Borgo Milano, Giarol, Quinzano e Montorio**

NOx ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	BgoMilano	Quinzano	Montorio	Giarol
media	107	98	84	73
sd	79	78	77	66
min	10	8	2	2
max	689	488	464	450
mediana	88	74	57	50
N	1656	1656	1656	1656
dati mancanti	61	182	14	77
data.capture	96	89	99	95
massima media giornaliera	367	283	300	250
95°percentile	258	272	251	198
99°percentile	354	345	332	321

Tabella 32. Concentrazione di NOx: principali parametri statistici. Dati della campagna di misura, della centralina fissa di traffico urbano di Verona-Borgo Milano e della centralina di fondo urbano di Verona-Giarol. Il limite di rivelabilità dello strumento di misura è  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 5.8 Biossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ )

Durante le due campagne di monitoraggio, la concentrazione di biossido di zolfo è stata ampiamente inferiore ai valori limite di  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tabella 33), come tipicamente accade presso tutte le stazioni di monitoraggio della Provincia di Verona.

I valori medi misurati nei due periodi di campagna sono inferiori al limite di rivelabilità strumentale analitica ( $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Per quanto riguarda i valori massimi, sono evidenti quelli di Quinzano, più elevati di quelli delle altre postazioni di misura, e comunque molto modesti se confrontati col limite normativo.

$\text{SO}_2$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	BgoMilano	Quinzano	Montorio
media	<3	<3	<3
sd	1	2	1
min	<3	<3	<3
max	7	13	5
mediana	<3	<3	<3
N	1656	1656	1656
dati mancanti	59	123	78
data.capture (%)	96	93	95
massima media giornaliera	4	7	4
95°percentile	4	6	3
99°percentile	5	9	4
N superamenti $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	0
N superamenti $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0	0

Tabella 33 Concentrazione di  $\text{SO}_2$ : principali parametri statistici nei diversi siti di monitoraggio. Il limite di rivelabilità dello strumento di misura è  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 5.9 Polveri atmosferiche inalabili (PM10)

Il PM10 è stato misurato presso le centraline di Borgo Milano e Giarol mediante tecnica basata sull'assorbimento delle radiazioni beta, e presso l'unità mobile posizionata a Quinzano con metodo ottico.

In tabella 34, sono riportate le statistiche relative alle concentrazioni di PM10 rilevate durante le campagne di misura dei prodotti di combustione della biomasse a Borgo Milano, Quinzano e Giarol: i valori medi rilevati sono significativamente differenti nelle tre località. I valori più elevati si trovano a Borgo Milano, a seguire a Giarol e a Quinzano (figura 47).

PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	BgoMilano	Quinzano	Giarol
media	50	39	44
sd	20	17	22
min	15	11	4
max	101	88	106
N dati (giorni)	57	58	60
N superamenti 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24	12	21

Tabella 34. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di PM10 nei diversi siti di monitoraggio. Per il calcolo, sono stati considerati solo i giorni relativi alle campagne di monitoraggio degli inquinanti provenienti dalla combustione di biomasse. Il limite di rivelabilità dello strumento è 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

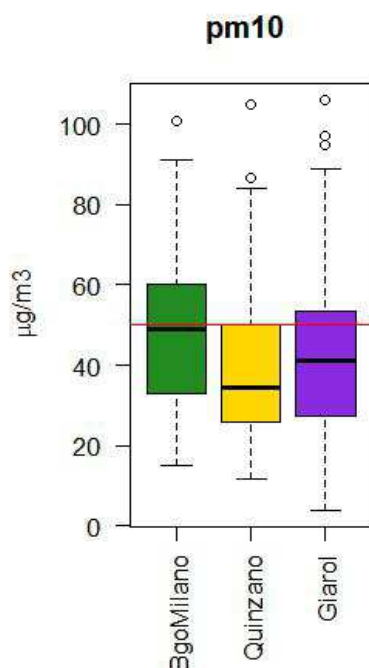


Figura 47. Grafico box-plot delle concentrazioni di PM10 rilevate a Verona Giarol, Borgo Milano, Quinzano, Montorio e Ca' di David durante i periodi delle campagne di monitoraggio dei prodotti di combustione della legna.

## 5.10 Benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

In tabella 35 sono stati riportati i principali parametri statistici relativi alla concentrazione di benzene misurata con campionatori passivi nei periodi di campagna e nei cinque punti di monitoraggio. Il confronto è indicativo, in quanto questo tipo di misura comporta l'esposizione di un radiello per circa 15-20 giorni, e i periodi di esposizione dei radielli delle diverse postazioni non coincidono esattamente. I dati utilizzati per elaborare le statistiche in tabella 35 sono rappresentati graficamente in figura 48.

La concentrazione di benzene è più elevata a Borgo Milano rispetto alle altre postazioni, sia nei valori medi sia in quelli massimi. L'andamento dei valori misurati è molto simile nelle diverse postazioni di misura. I valori sono comunque inferiori al limite normativo associato a questo inquinante, pari a 5 µg/m<sup>3</sup>, associato tuttavia alla media annua.

In tabella 36 sono riportati i valori medi di tutti gli idrocarburi aromatici misurati (benzene, etilbenzene, xilene e toluene) nelle diverse postazioni di misura e nei due periodi di campagna.

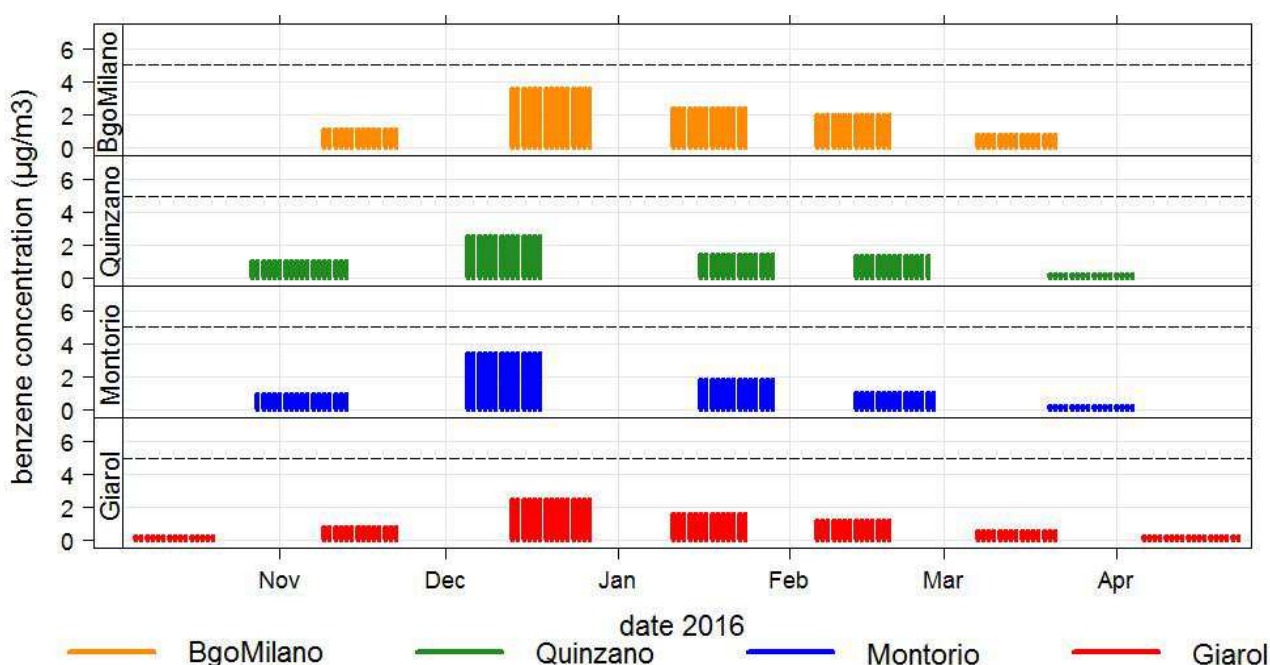


Figura 48. Andamento delle concentrazioni di benzene presso le quattro postazioni di Giarol, Montorio, Ca' di David e Borgo Milano

Benzene (µg/m <sup>3</sup> )	BgoMilano	Giarol	Montorio	Quinzano
Media	2.3	1.3	1.5	1.4
sd	1.1	0.8	1.2	0.8
max	3.6	2.5	3.4	2.6
min	0.8	0.6	0.5	<0.5

Tabella 35. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di benzene, in quattro siti di campionamento nel periodo novembre 2016 - marzo 2017. I dati delle quattro postazioni non si riferiscono esattamente agli stessi giorni di campionamento, pertanto il confronto è solamente indicativo. Il limite di rivelabilità dello strumento è 0.5 µg/m<sup>3</sup>.

Benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	BgoMilano	Giarol	Montorio	Quinzano
Benzene	2.3	1.3	1.5	1.4
Etilbenzene	0.9	0.5	0.7	0.7
Toluene	7.6	8.8	7.2	5.7
Xilene	6.0	3.1	4.3	4.3

Tabella 36. Valore medio di varie specie chimiche nei diversi siti di monitoraggio.

### 5.11 Ammoniaca ( $\text{NH}_3$ )

L'ammoniaca è un composto utilizzato diffusamente sia in ambito industriale sia in agricoltura, come fertilizzante, ed è proprio dall'ambito agricolo che derivano le maggiori emissioni in atmosfera. Dalla stima emissiva ottenuta tramite l'inventario delle emissioni INEMAR, si nota che in Veneto il macrosettore 10 (Agricoltura) contribuisce al 98% delle emissioni di ammoniaca (INEMAR 2013), il restante deriva dal contributo del traffico stradale e dalle emissioni in ambito domestico. L'ammoniaca non solo riveste un ruolo importante nei processi di eutrofizzazione ed acidificazione ma contribuisce alla formazione di particolato secondario, in particolare  $\text{PM}_{2.5}$ , attraverso la generazione di solfato e nitrato d'ammonio, per mezzo di reazioni con l'acido solforico e l'acido nitrico, derivanti dalle emissioni rispettivamente di  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ .

La concentrazione di ammoniaca è stata misurata tramite campionatori a diffusione, esposti per una settimana circa. Il dato medio rilevato nei cinque siti di monitoraggio è riportato nella tabella 37: a Montorio e Ca' di David sono state misurate le concentrazioni più elevate. Febbraio è stato il mese in cui la concentrazione di ammoniaca sono risultate maggiori con valori superiori a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Ammoniaca ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Bgo Milano	Cadidavid	Giarol	Montorio	Quinzano
Media	11.1	15.1	9.4	17.6	6.5
N settimane	9	9	9	9	9
sd	3.5	4.8	3.0	6.8	1.9
max	19.2	24.8	16.8	28.7	10.5
min	7.7	9.3	6.5	9.5	4

Tabella 37. Principali parametri statistici relativi alla concentrazione di ammoniaca nei cinque siti di campionamento. Il limite di rivelabilità dello strumento è  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . N indica il numero di settimane complessive di esposizione.

## 6 Conclusioni

Nel periodo compreso tra novembre 2016 e marzo 2017 è stato condotto un esteso monitoraggio della qualità dell'aria, volto a caratterizzare la composizione del PM<sub>2.5</sub> e valutare il contributo della combustione delle biomasse legnose alla formazione del particolato.

Per questo motivo sono stati individuati 5 punti di monitoraggio, due dei quali presso le stazioni di rilevamento fisse di Borgo Milano e di Giarol e tre in località periferiche della città di Verona, dove la conformazione urbanistica suggerisce una maggiore diffusione di sistemi di riscaldamento a biomassa solida quali stufe e camini chiusi: Quinzano, Montorio e Ca' di David. Presso le postazioni fisse di Borgo Milano e Giarol e le postazioni di Quinzano e Montorio sono stati rilevati anche inquinanti gassosi quali NO<sub>x</sub>, CO e SO<sub>2</sub> e il PM<sub>10</sub>. In tutte e cinque le postazioni è stato campionato il particolato fine (PM<sub>2.5</sub>) che poi è stato analizzato in laboratorio per determinarne la composizione chimica. A tal fine sono state misurate le concentrazioni di:

- Levoglucosano, uno zucchero tracciante delle emissioni da combustione di biomassa legnosa;
- varie specie di IPA (benzo(a)antracene, benzo(a)pirene, benzo(b)fluorantene, benzo(g,h,i)perilene, benzo(k)fluorantene, crisene, dibenzo(a,h)antracene, indeno(1,2,3-cd)pirene);
- nitrati, solfati, ammonio, che rappresentano la parte preponderante dell'aerosol inorganico secondario;
- Carbonio Elementare, inquinante primario, tracciante delle emissioni da combustione di biomassa e di carburanti fossili;
- Carbonio organico, che comprende una componente primaria, emessa dalle stesse sorgenti del EC, e una secondaria organica;
- potassio, sodio, calcio, magnesio.

Infine, sono state eseguite misurazioni di benzene e ammoniaca con campionatori passivi.

Tutti i periodi di campionamento sono stati caratterizzati da condizioni meteo sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti, in particolare scarsa o nulla piovosità e debole ventilazione. Le concentrazioni delle polveri sottili (PM<sub>10</sub>) hanno superato il limite normativo per il 36% del periodo monitorato a Giarol, e si sono verificati episodi in cui hanno superato il doppio del limite normativo. Il numero di superamenti del limite giornaliero, pari a 50 µg/m<sup>3</sup>, è stato 24 presso la stazione di Borgo Milano, 21 presso la stazione di Giarol e 12 a Quinzano.

Le concentrazioni di biossido di azoto sono risultate particolarmente alte a Quinzano con valori pari, in alcuni casi superiori, a quelli misurati presso la stazione fissa di traffico di Verona Borgo Milano. L'analisi delle serie temporali suggerisce che vi sia il contributo di una fonte emissiva diversa dal traffico, ma i dati a disposizione non ne consentono la precisa individuazione. Tuttavia si segnala la presenza dell'impianto di riscaldamento a metano delle piscine comunali Santini, 150 m a est del punto di campionamento, e l'impianto di cogenerazione AGSM 1000 m a sud-ovest e di Via Trento, che rappresenta una delle principali arterie di penetrazione della città da ovest.

Le analisi delle varie specie chimiche presenti sul PM<sub>2.5</sub> hanno evidenziato una composizione piuttosto omogenea del particolato fine nell'area oggetto di monitoraggio. La percentuale in peso delle varie specie chimiche sul PM<sub>2.5</sub> è vicina a quella riportata in altri studi relativi alla zona sud-



occidentali del Veneto: il maggior contributo è dato dalla componente inorganica secondaria (29% i nitrati, 10% ammonio, 6% solfati), seguita dalla componente carboniosa (30% Carbonio organico e 3% carbonio elementare), mentre il levoglucosano rappresenta circa il 3% della massa di PM2.5. La composizione relativa del particolato secondario varia nel tempo in modo piuttosto omogeneo nell'area oggetto di monitoraggio.

La concentrazione dei vari inquinanti varia nel tempo in modo ben correlato nelle cinque postazioni di misura: tale correlazione è maggiore per SIA, levoglucosano, IPA, potassio, cloruri rispetto a quella per OC e, specialmente, EC. Per quanto riguarda la componente inorganica secondaria, il risultato è in accordo con le aspettative: infatti gli inquinanti di origine secondaria, per la loro natura, tendono ad assumere concentrazioni piuttosto omogenee su una scala spaziale ben più vasta della municipalità di Verona (Masiol et al, 2017). Per quanto riguarda IPA e levoglucosano, che sono specie associate in modo prevalente alla combustione di biomassa, la debole variabilità spaziale può essere legata a una omogeneità delle sorgenti emissive e della meteorologia sulla scala spaziale considerata.

Tuttavia, sono state riscontrate delle differenze significative tra le concentrazioni medie di PM2.5, levoglucosano, IPA, EC ed OC a Ca' di David rispetto alle altre postazioni. Queste differenze suggeriscono un utilizzo più massiccio del riscaldamento domestico a biomassa, che appare verosimile in un quartiere caratterizzato dalla presenza di abitazioni del tipo villa mono o bifamiliare, in cui è più facile installare questo tipo di impianti. Si consideri che esistono anche altre fonti di pressione nelle vicinanze del punto di misura che potrebbero contribuire ai valori misurati di IPA e carbonio: le cartiere Saci S.p.a. 800 m a ovest, e la Mugnai Carta, 800 m a sud est, dotate di una propria centrale termica a metano, e inoltre la prima fa uso di gasolio e di olio combustibile nei suoi processi produttivi.

Anche i valori medi di questi inquinanti misurati a Borgo Milano sono più elevati rispetto alle altre postazioni, anche se non sempre le differenze sono significative, principalmente a causa della disponibilità di un numero esiguo di dati. In questa postazione, diversamente da Ca' di David, EC e levoglucosano non sono però ben correlati. Questo porta a pensare a una sorgente di EC diversa dal riscaldamento a biomassa, identificabile nel traffico veicolare, che in questo quartiere è più intenso. Il Carbonio Elementare, è infatti un inquinante primario emesso dalla combustione di biomassa e combustibili fossili, che può essere utilizzato per individuare le sorgenti di inquinamento. La correlazione tra la concentrazione di EC misurata in diversi siti è effettivamente più bassa di quella riscontrata per altri inquinanti quali PM2.5, levoglucosano e IPA.

I valori di levoglucosano misurati nelle diverse postazioni sono vicini a quelli misurati da altre ARPA nel corso di campagne di monitoraggio in siti di montagna, caratterizzati da un uso consistente di riscaldamento a biomassa. Le concentrazioni più elevate nella municipalità di Verona si trovano a Ca' di David (tra il 23 e il 26 dicembre 2016, massimo di  $4.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e Borgo Milano ( $2.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mentre il valore più basso ( $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) è stato misurato a Montorio e Quinzano. Si consideri che il levoglucosano è un tracciante stabile della combustione di biomassa legnosa, ma il suo fattore di emissione dipende fortemente da tipo di combustibile e condizioni di combustione. Le concentrazioni misurate nell'area di analisi sono una indicazione sicura della presenza di un contributo della combustione di biomassa legnosa, ma il peso relativo va valutato attraverso il confronto con altre specie chimiche. Il fatto che a Ca' di David e Borgo Milano si trovino anche i valori più elevati di IPA, EC, OC, avvalorata la ipotesi che in queste località vi sia un contributo della combustione di biomassa al particolato fine, superiore a quello degli altri siti di indagine.

I più alti livelli di inquinanti legati alla combustione di biomassa legnosa a Ca' di David è in linea con le aspettative, in quanto si tratta della postazione con caratteristiche più rurali tra quelle oggetto di indagine, con una tipologia di abitazioni in cui è più facile installare un caminetto o una stufa a legna. Invece Borgo Milano rappresenta un'area completamente metanizzata e caratterizzata da abitazioni più di tipo condominiale che singolo o bifamiliare. Non si può escludere tuttavia la presenza di sorgenti di combustione a biomassa, ma si può anche ipotizzare un contributo emissivo da parte di aree limitrofe.

## 7 Appendice

---

### 7.1 Contestualizzazione meteo climatica

La situazione meteorologica è stata analizzata mediante l'uso di diagrammi circolari nei quali si riporta la frequenza dei giorni con caratteristiche di piovosità e ventilazione definite in tre classi:

- in rosso (precipitazione giornaliera inferiore a 1 mm e intensità media del vento minore di 0.5 m/s): condizioni poco favorevoli alla dispersione degli inquinanti;
- in giallo (precipitazione giornaliera compresa tra 1 e 6 mm e intensità media del vento nell'intervallo 0.5 m/s e 1.5 m/s): situazioni debolmente dispersive;
- in verde (precipitazione giornaliera superiore a 6 mm e intensità media del vento maggiore di 1.5 m/s): situazioni molto favorevoli alla dispersione degli inquinanti.

I valori delle soglie per la ripartizione nelle tre classi sono state individuate in maniera empirica in base ad un campione pluriennale di dati.

Per la descrizione della situazione meteorologica si è scelto di utilizzare i dati della stazione di Buttapietra (VR) (con anemometro a 2 m) che è la più vicina della rete ARPAV (distanza inferiore a 10 km). Si fa presente che a causa della quota di misura, l'intensità del vento è sottostimata rispetto a misure effettuate a 5 o 10 m di altezza, per questo motivo nel grafico con i diagrammi circolari si utilizza una scala di intensità del vento che permetta di apprezzare eventuali differenze fra valori di bassa intensità del vento.

#### 7.1.1 Periodo di monitoraggio 1: 29/10/2016- 13/11/2016

Nella figura 49 si mettono a confronto le caratteristiche di piovosità e ventilazione ricavate dai dati rilevati presso la stazione meteorologica ARPAV di Buttapietra in tre periodi:

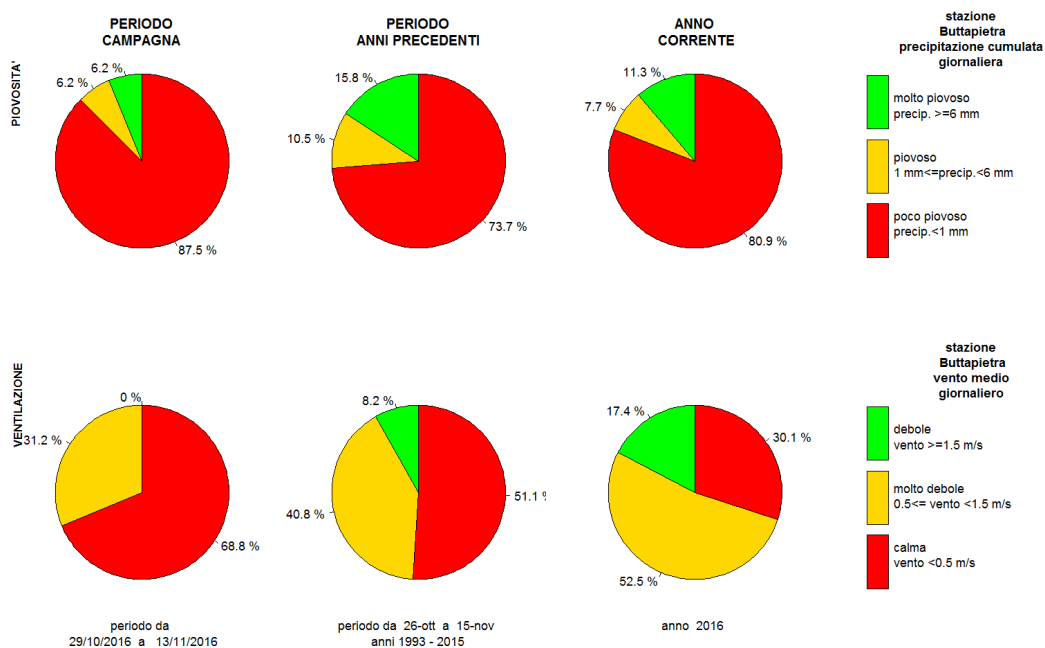
- 29 ottobre - 13 novembre 2016, periodo di svolgimento della campagna di misura;
- 26 ottobre - 15 novembre dall'anno 1993 all'anno 2015 (pentadi di riferimento, cioè PERIODO ANNI PRECEDENTI);
- 1 gennaio - 31 dicembre 2016 (ANNO CORRENTE).

Dal confronto dei diagrammi circolari risulta che durante il periodo di svolgimento della campagna di misura:

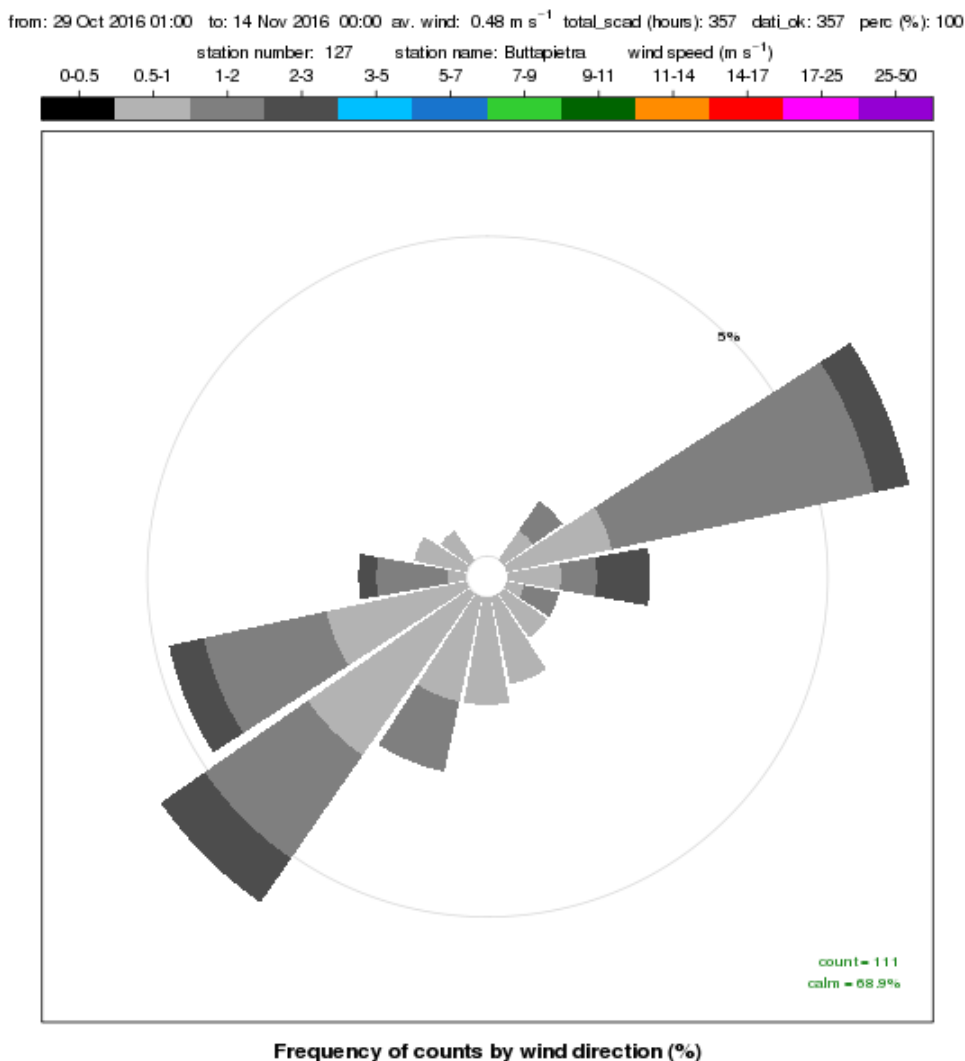
- i giorni poco piovosi sono stati più frequenti rispetto sia allo stesso periodo degli anni precedenti che all'anno corrente;
- i giorni con calma di vento sono stati ben più frequenti rispetto ad entrambi i periodi di riferimento, con uno scarto maggiore rispetto all'anno corrente.

In figura 50 si riporta la rosa dei venti registrati presso la stazione di Buttapietra durante lo svolgimento della campagna di misura: da essa si evince che a prevalere sono state le calme di vento (venti di intensità inferiore a 0.5 m/s) con una frequenza pari a circa il 69% dei casi; nei casi rimanenti le direzioni prevalenti di provenienza del vento sono state est-nord-est e sud-ovest (entrambe circa 6% dei casi), seguite da ovest-sud-ovest (circa 5%). La velocità media è stata pari a circa 0.5 m/s.

### DISTRIBUZIONE PIOVOSITA' E VENTILAZIONE



**Figura 49. Diagrammi circolari con frequenza dei casi di vento e pioggia nelle diverse classi: rosso (scarsa dispersione), giallo (debole dispersione), verde (forte dispersione). Confronto tra le condizioni in atto nel periodo di svolgimento della CAMPAGNA DI MISURA, nel periodo pentadale corrispondente degli anni precedenti (PERIODO ANNI PRECEDENTI) e durante l'intero anno in corso (ANNO CORRENTE).**



**Figura 50. Rosa dei venti registrati presso la stazione meteorologica di Buttapietra nel periodo 29 ottobre - 13 novembre 2016**

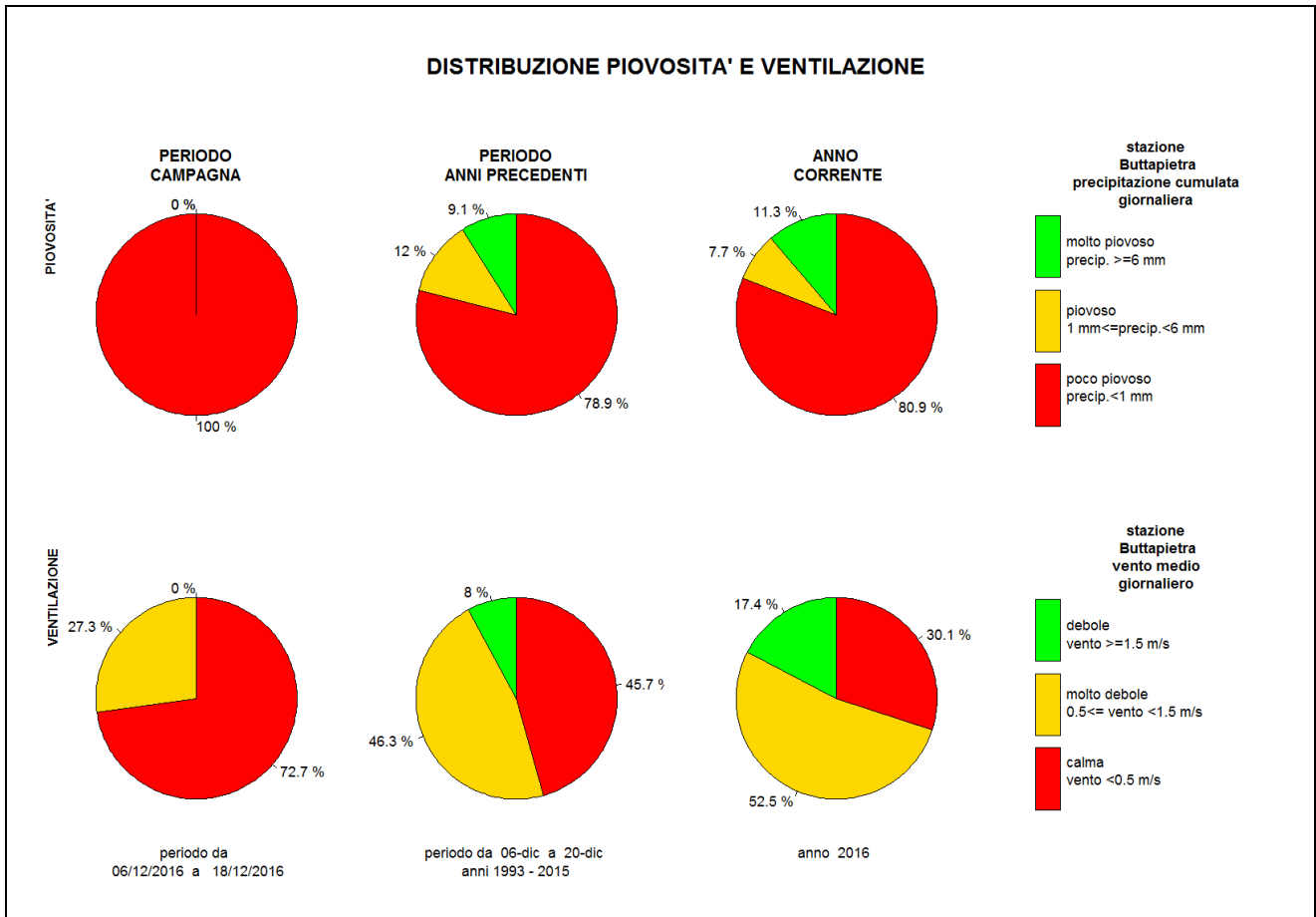
### **7.1.2 Periodo di monitoraggio 2: 06/12/2016- 18/12/2016**

Nella figura 51 si mettono a confronto le caratteristiche di piovosità e ventilazione ricavate dai dati rilevati presso la stazione meteorologica ARPAV di Buttapietra in tre periodi:

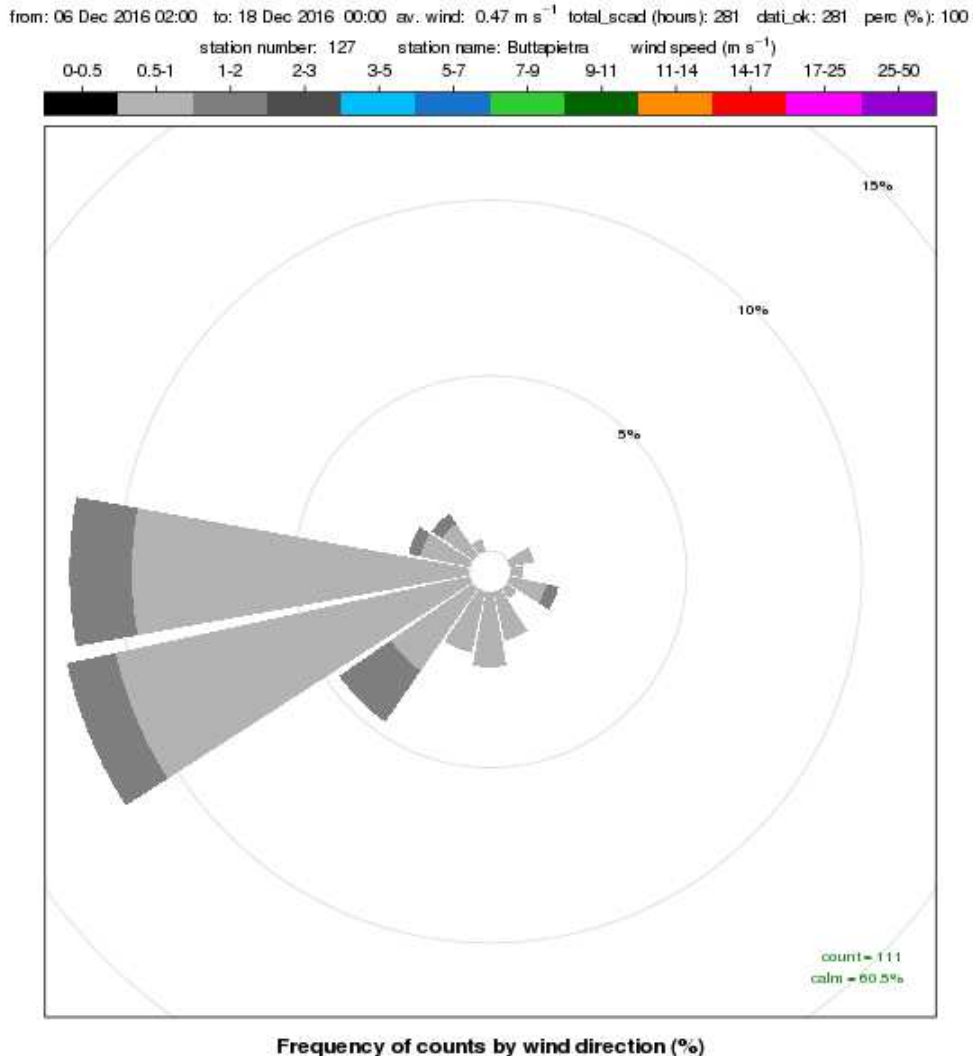
- dicembre - 18 dicembre 2016, periodo di svolgimento della campagna di misura;
- dicembre - 20 dicembre dall'anno 1993 all'anno 2015 (pentadi di riferimento, cioè PERIODO ANNI PRECEDENTI);
- 1 gennaio - 31 dicembre 2016 (ANNO CORRENTE).

Dal confronto dei diagrammi circolari risulta che durante il periodo di svolgimento della campagna di misura:

- tutte le giornate sono state poco piovose, quindi i giorni poco piovosi sono stati ben più frequenti rispetto sia allo stesso periodo degli anni precedenti che all'anno corrente;
- i giorni con calma di vento sono stati ben più frequenti rispetto ad entrambi i periodi di riferimento, con uno scarto maggiore rispetto all'anno corrente.



**Figura 51. Diagrammi circolari con frequenza dei casi di vento e pioggia nelle diverse classi: rosso (scarsa dispersione), giallo (debole dispersione), verde (forte dispersione). Confronto tra le condizioni in atto nel periodo di svolgimento della CAMPAGNA DI MISURA, nel periodo pentadale corrispondente degli anni precedenti (PERIODO ANNI PRECEDENTI) e durante l'intero anno in corso (ANNO CORRENTE).**



**Figura 52. Rosa dei venti registrati presso la stazione meteorologica di Buttapietra nel periodo 6 dicembre - 18 dicembre 2016**

In figura 49 si riporta la rosa dei venti registrati presso la stazione di Buttapietra durante lo svolgimento della campagna di misura: da essa si evince che a prevalere sono state le calme di vento (venti di intensità inferiore a 0.5 m/s) con una frequenza pari a circa il 61% dei casi; nei casi rimanenti le direzioni prevalenti di provenienza del vento sono state ovest-sudovest (circa 12% dei casi) e ovest (circa 11%). La velocità media è stata pari a circa 0.5 m/s.

### 7.1.3 Periodo di monitoraggio 3: 17/01/2017- 29/01/2017

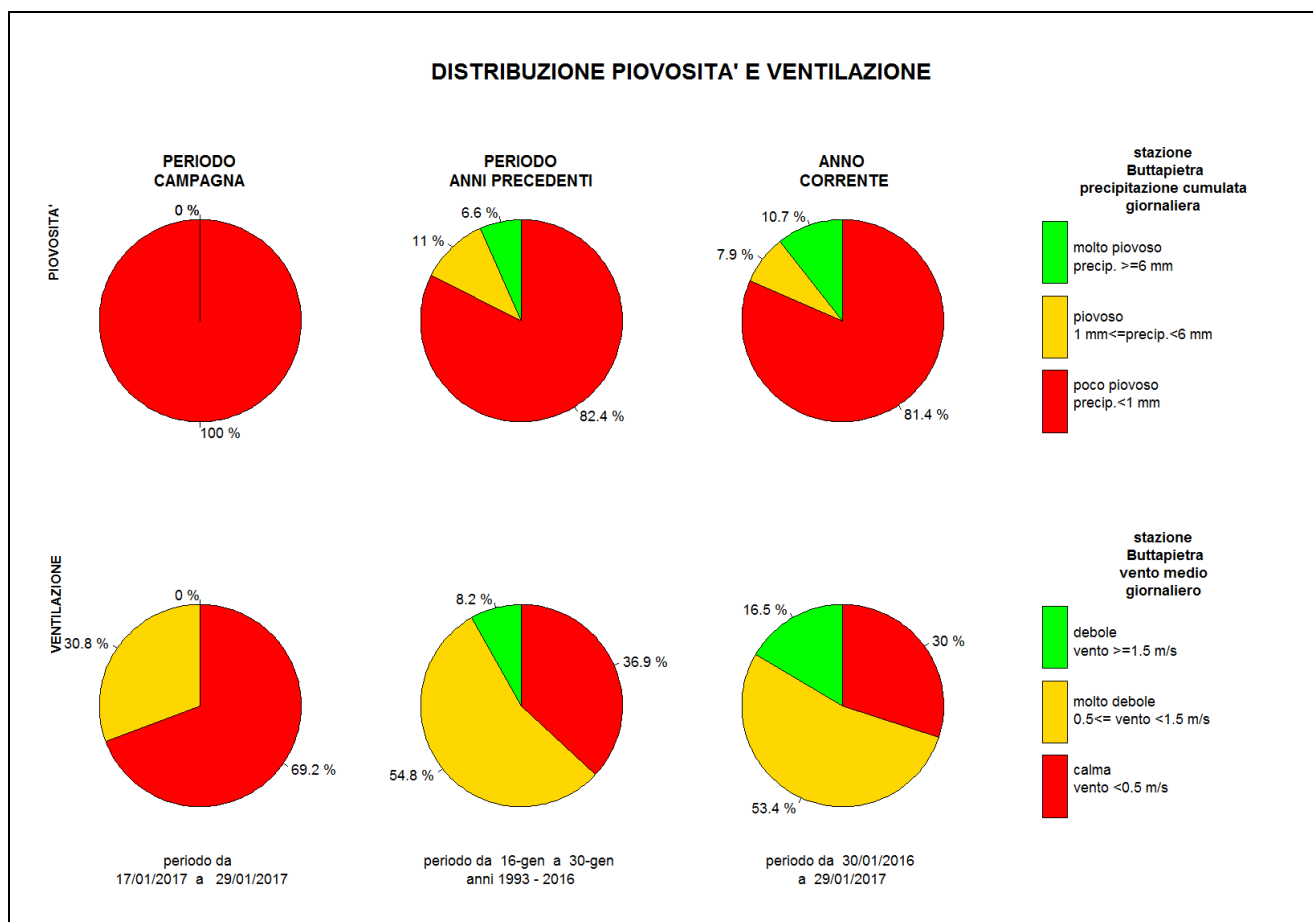
Nella figura 53 si mettono a confronto le caratteristiche di piovosità e ventilazione ricavate dai dati rilevati presso la stazione meteorologica ARPAV di Buttapietra in tre periodi:

- 17 gennaio - 29 gennaio 2017, periodo di svolgimento della campagna di misura;
- 16 gennaio - 30 gennaio dall'anno 1993 all'anno 2016 (pentadi di riferimento, cioè PERIODO ANNI PRECEDENTI);
- 30 gennaio 2016 - 29 gennaio 2017 (ANNO CORRENTE).

Dal confronto dei diagrammi circolari risulta che durante il periodo di svolgimento della campagna di misura:

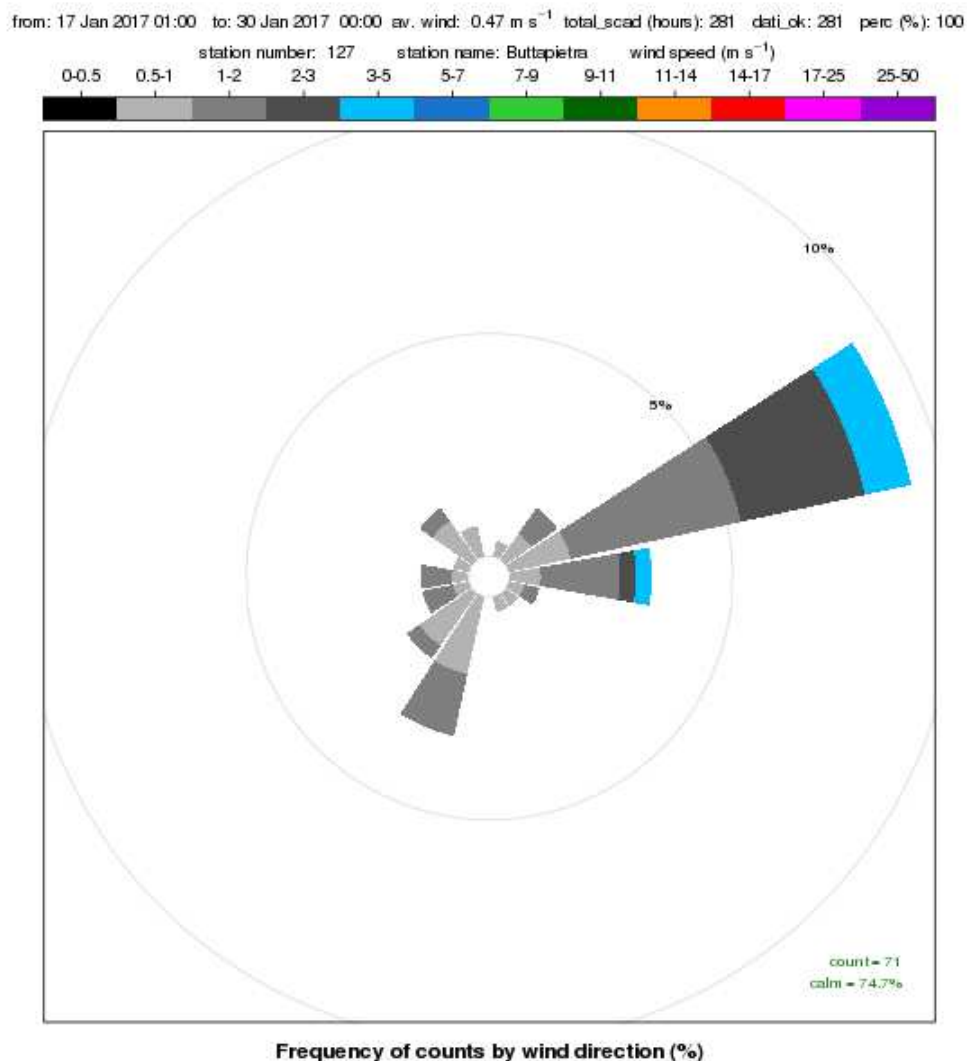
- tutte le giornate sono state poco piovose, quindi i giorni poco piovosi sono stati ben più frequenti rispetto sia allo stesso periodo degli anni precedenti che all'anno corrente;
- i giorni con calma di vento sono stati ben più frequenti rispetto ad entrambi i periodi di riferimento.

In figura 54 si riporta la rosa dei venti registrati presso la stazione di Buttapietra durante lo svolgimento della campagna di misura: da essa si evince che a prevalere sono state le calme di vento (venti di intensità inferiore a 0.5 m/s) con una frequenza pari a circa il 75% dei casi; nei casi rimanenti la direzione prevalente di provenienza del vento è stata est-nordest (circa 9% dei casi). La velocità media è stata pari a circa 0.5 m/s.



**Figura 53. Diagrammi circolari con frequenza dei casi di vento e pioggia nelle diverse classi: rosso (scarsa dispersione), giallo (debole dispersione), verde (forte dispersione). Confronto tra le condizioni in atto nel periodo di svolgimento della CAMPAGNA DI MISURA, nel periodo pentadale corrispondente degli anni precedenti (PERIODO ANNI PRECEDENTI) e durante l'intero anno in corso (ANNO CORRENTE).**





**Figura 54. Rosa dei venti registrati presso la stazione meteorologica di Buttapietra nel periodo 17 gennaio - 29 gennaio 2017**

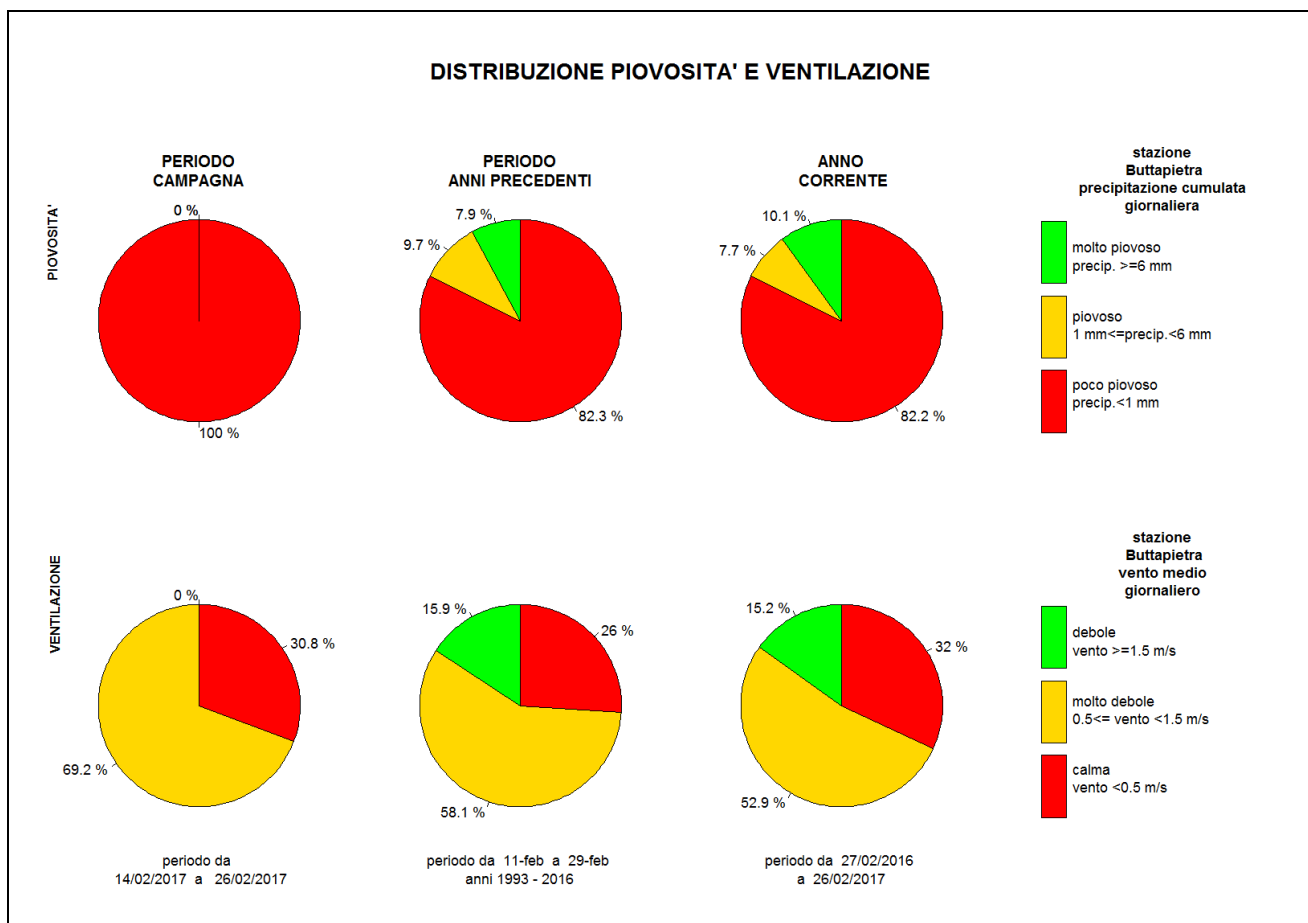
#### **7.1.4 Periodo di monitoraggio 4: 14/02/2017- 26/02/2017**

Nella figura 55 si mettono a confronto le caratteristiche di piovosità e ventilazione ricavate dai dati rilevati presso la stazione meteorologica ARPAV di Buttapietra in tre periodi:

- 14 febbraio - 26 febbraio 2017, periodo di svolgimento della campagna di misura;
- 11 febbraio - 29 febbraio dall'anno 1993 all'anno 2016 (pentadi di riferimento, cioè PERIODO ANNI PRECEDENTI);
- 27 febbraio 2016 - 26 febbraio 2017 (ANNO CORRENTE).

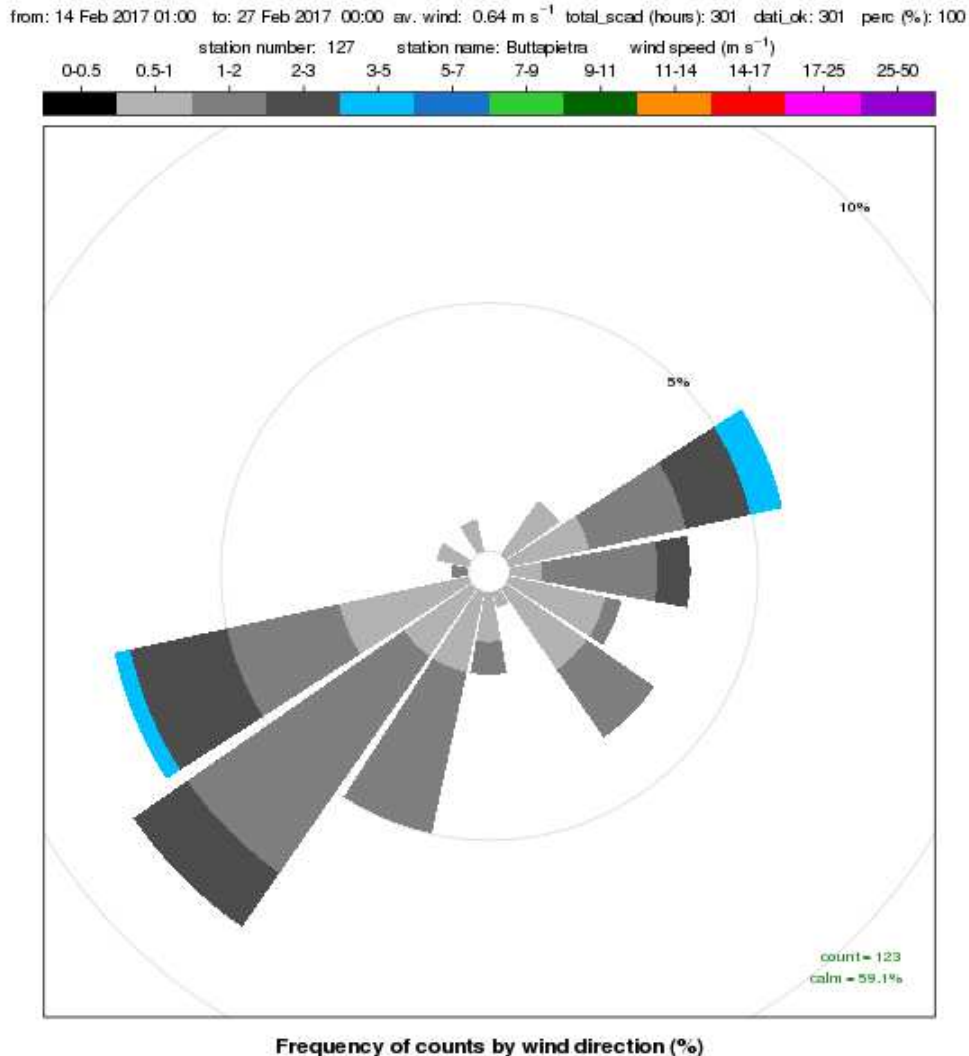
Dal confronto dei diagrammi circolari risulta che durante il periodo di svolgimento della campagna di misura:

- i giorni poco piovosi sono stati la totalità del periodo e quindi ben più frequenti rispetto sia allo stesso periodo degli anni precedenti che all'anno corrente;
- i giorni con vento debole (che per questa stazione rappresentano la classe più dispersiva) sono stati del tutto assenti e quindi ben meno frequenti rispetto ad entrambi i periodi di riferimento.



**Figura 5. Diagrammi circolari con frequenza dei casi di vento e pioggia nelle diverse classi: rosso (scarsa dispersione), giallo (debole dispersione), verde (forte dispersione). Confronto tra le condizioni in atto nel periodo di svolgimento della CAMPAGNA DI MISURA, nel periodo pentadale corrispondente degli anni precedenti (PERIODO ANNI PRECEDENTI) e durante l'intero anno in corso (ANNO CORRENTE).**

In figura 56 si riporta la rosa dei venti registrati presso la stazione di Buttapietra durante lo svolgimento della campagna di misura: da essa si evince che a prevalere sono state le calme di vento (venti di intensità inferiore a 0.5 m/s) con una frequenza pari a circa il 59% dei casi; nei casi rimanenti la direzione prevalente di provenienza del vento è stata sud-ovest (circa 8%), seguita da ovest-sudovest (circa 7%) e est-nordest (circa 6%). La velocità media è stata pari a circa 0.6 m/s.



**Figura 56. Rosa dei venti registrati presso la stazione meteorologica di Buttapietra nel periodo 14 febbraio - 26 febbraio 2017**

### **7.1.5 Periodo di monitoraggio 5: 21/03/2017- 03/04/2017**

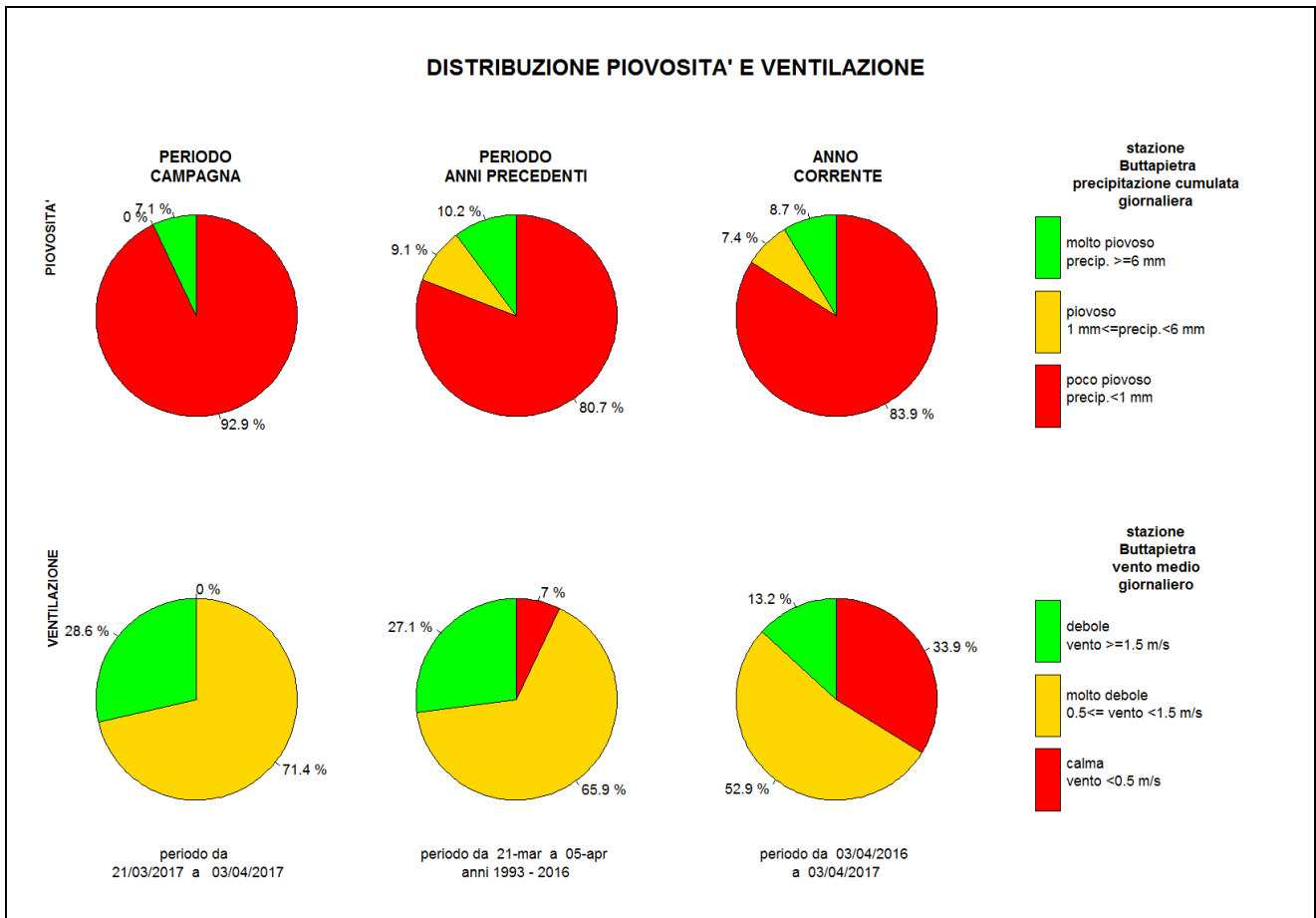
Nella figura 57 si mettono a confronto le caratteristiche di piovosità e ventilazione ricavate dai dati rilevati presso la stazione meteorologica ARPAV di Buttapietra in tre periodi:

- 21 marzo - 3 aprile 2017, periodo di svolgimento della campagna di misura;
- 21 marzo - 5 aprile dall'anno 1993 all'anno 2016 (pentadi di riferimento, cioè PERIODO ANNI PRECEDENTI);
- 3 aprile 2016 - 3 aprile 2017 (ANNO CORRENTE).

Dal confronto dei diagrammi circolari risulta che durante il periodo di svolgimento della campagna di misura:

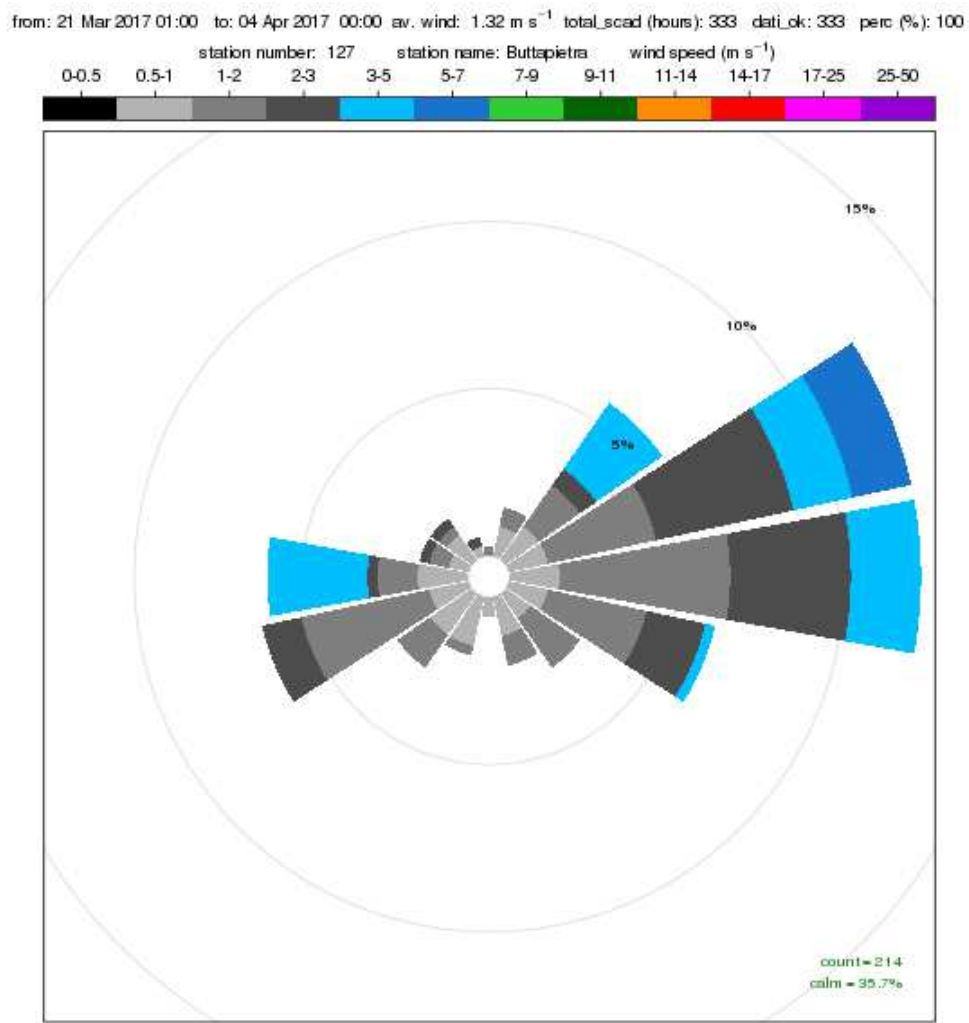
- i giorni poco piovosi sono stati più frequenti rispetto sia allo stesso periodo degli anni precedenti che all'anno corrente;

- i giorni con calma divento sono stati del tutto assenti e quindi meno frequenti rispetto ad entrambi i periodi di riferimento; inoltre le giornate con vento debole (che per questa stazione rappresentano la classe più dispersiva) sono stati più frequenti rispetto all'anno corrente.



**Figura 57. Diagrammi circolari con frequenza dei casi di vento e pioggia nelle diverse classi: rosso (scarsa dispersione), giallo (debole dispersione), verde (forte dispersione). Confronto tra le condizioni in atto nel periodo di svolgimento della CAMPAGNA DI MISURA, nel periodo pentadale corrispondente degli anni precedenti (PERIODO ANNI PRECEDENTI) e durante l'intero anno in corso (ANNO CORRENTE).**

In figura 58 si riporta la rosa dei venti registrati presso la stazione di Buttapietra durante lo svolgimento della campagna di misura: da essa si evince che le direzioni prevalenti di provenienza del vento sono est ed est-nord-est (entrambe circa 12% dei casi), seguite da ovest, ovest-sud-ovest nord-est ed est-nord-est (tutte e quattro circa 6%). Le calme di vento (venti di intensità inferiore a 0.5 m/s) sono state pari a circa il 36% dei casi. La velocità media è stata pari a circa 1.3 m/s.



Frequency of counts by wind direction (%)

Figura 58. Rosa dei venti registrati presso la stazione meteorologica di Buttapietra nel periodo 21 marzo - 3 aprile 2017

## 7.2 Legenda parametri statistici

In tabella 38 si riporta il significato delle sigle utilizzate nelle tabelle per descrivere i vari parametri statistici calcolati. Per rappresentare graficamente i risultati delle analisi sono stati utilizzati anche dei grafici tipo box-whisker, che sono spiegati in dettaglio nella figura 59.

Grandezza statistica	Significato
N	Numero totale di ore del periodo di analisi
dati mancanti	Numero di ore in cui il dato è mancante
data.capture	Percentuale di dati validi in tutto il periodo di analisi
media	Media
sd	Deviazione Standard
min	Minimo
max	Massimo
mediana	Mediana
massima media giornaliera	Massimo calcolato sulle medie giornaliere
max.rolling.8	Massimo della media mobile su 8 ore
N superamenti limite	Numero di superamenti di un certo limite

**Tabella 38 significato dei principali parametri statistici calcolati e riportati nella presente relazione.**

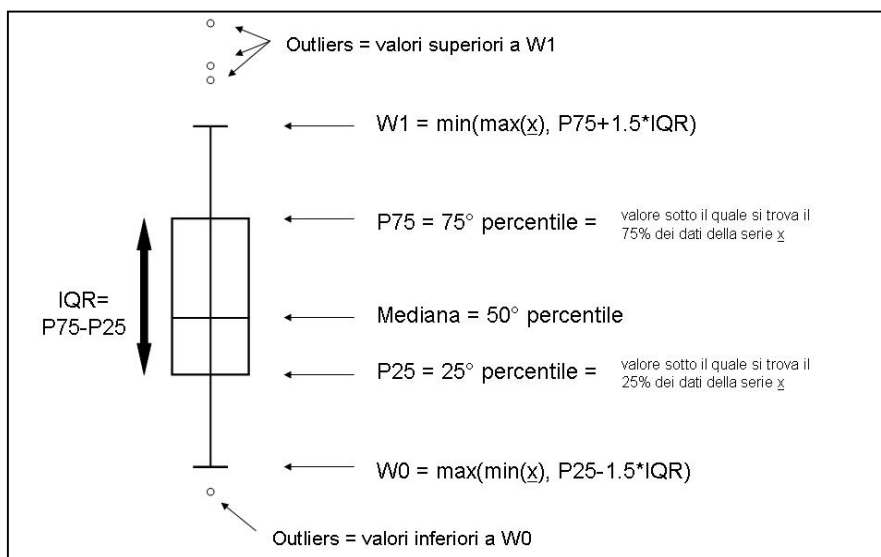


Figura 59. Schema esplicativo del box-whisker plot, utilizzato più volte nella presente relazione. La linea orizzontale nel mezzo della scatoletta (“box”) indica il valore della mediana (o 50° percentile) della distribuzione, cioè di quel valore rispetto al quale il 50% dei dati della popolazione rappresentata dal grafico è inferiore. Il segmento orizzontale che delimita inferiormente il “box” è il 25° percentile. Il segmento orizzontale che delimita superiormente il “box” è il 75° percentile. La differenza tra il 25° e 75° percentile si definisce “Inter Quartile Range” (IQR). In base all’IQR si definiscono i “baffi”, cioè le barre che si estendono in alto e in basso: lo spazio tra esse compreso dà un’indicazione della dispersione dei dati della serie rappresentata. Oltre i baffi, si trovano solo pochi dati della popolazione rappresentata, i valori minimi e massimi, che vengono chiamati “outliers” e indicati con dei pallini.

### 7.3 Inquinanti monitorati e normativa di riferimento

La stazione rilocabile è dotata di analizzatori in continuo per il campionamento e la misura degli inquinanti chimici individuati dalla normativa vigente, inerente all'inquinamento atmosferico, e più precisamente monossido di carbonio (CO), anidride solforosa (SO<sub>2</sub>), biossido di azoto (NO<sub>2</sub>), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), ozono (O<sub>3</sub>).

Contestualmente alle misure eseguite in continuo, sono stati effettuati anche dei campionamenti sequenziali per la determinazione gravimetrica delle polveri inalabili PM<sub>2.5</sub>, per l'analisi in laboratorio del benzene, degli idrocarburi policiclici aromatici IPA (con riferimento al benzo(a)pirene) e levoglucosano.

Sono stati inoltre misurati in continuo alcuni parametri meteorologici quali temperatura, umidità relativa, pressione, intensità e direzione del vento.

Per tutti gli inquinanti considerati, con l'eccezione del levoglucosano, sono in vigore i limiti individuati dal Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155, attuazione della Direttiva 2008/50/CE.

Nelle tabelle 39 e 40 si riportano, per ciascun inquinante, i limiti di legge previsti dal D.Lgs. 155/2010, suddivisi in limiti di legge a mediazione di breve periodo, relativi all'esposizione acuta della popolazione, e limiti di legge a mediazione di lungo periodo, relativi all'esposizione cronica della popolazione. In tabella 41 sono indicati i limiti di legge stabiliti dal D.Lgs. 155/2010 per la protezione degli ecosistemi.

Inquinante	Tipologia	Valore
SO <sub>2</sub>	Soglia di allarme (*)	500 µg/m <sup>3</sup>
	Limite orario da non superare più di 24 volte per anno civile	350 µg/m <sup>3</sup>
	Limite di 24 h da non superare più di 3 volte per anno civile	125 µg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	Soglia di allarme (*)	400 µg/m <sup>3</sup>
	Limite orario da non superare più di 18 volte per anno civile	200 µg/m <sup>3</sup>
PM10	Limite di 24 h da non superare più di 35 volte per anno civile	50 µg/m <sup>3</sup>
CO	Massimo giornaliero della media mobile di 8 h	10 mg/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	Soglia di informazione (Media 1 h)	180 µg/m <sup>3</sup>
	Soglia di allarme (Media 1 h)	240 µg/m <sup>3</sup>
	Valore obiettivo per la protezione della salute umana da non superare per più di 25 giorni all'anno come media su 3 anni (altrimenti su 1 anno) Media su 8 h massima giornaliera	120 µg/m <sup>3</sup>
	Obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana Media su 8 h massima giornaliera	120 µg/m <sup>3</sup>

**Tabella 39 Limiti di legge relativi all'esposizione acuta**

(\*) misurato per 3 ore consecutive in un sito rappresentativo della qualità dell'aria in un'area di almeno 100 Km<sup>2</sup>, oppure in un'intera zona o agglomerato nel caso siano meno estesi.

Inquinante	Tipologia	Valore
NO <sub>2</sub>	Valore limite annuale	40 µg/m <sup>3</sup>
PM10	Valore limite annuale	40 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>2,5</sub>	Valore limite annuale	25 µg/m <sup>3</sup>
Piombo	Valore limite annuale	0.5 µg/m <sup>3</sup>
Arsenico	Valore obiettivo (media su anno civile)	6.0 ng/m <sup>3</sup>
Cadmio	Valore obiettivo (media su anno civile)	5.0 ng/m <sup>3</sup>

Nichel	Valore obiettivo (media su anno civile)	<b>20.0</b> ng/m <sup>3</sup>
Benzene	Valore limite annuale	<b>5.0</b> µg/m <sup>3</sup>
B(a)pirene	Valore obiettivo (media su anno civile)	<b>1.0</b> ng/m <sup>3</sup>

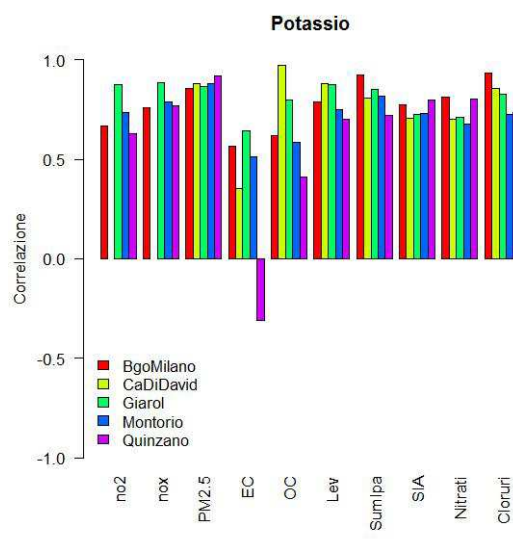
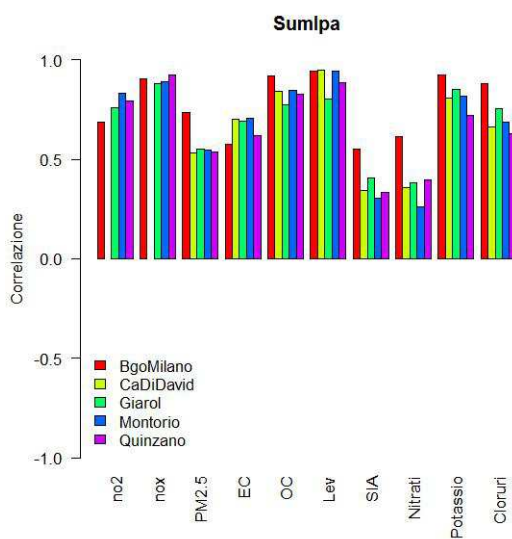
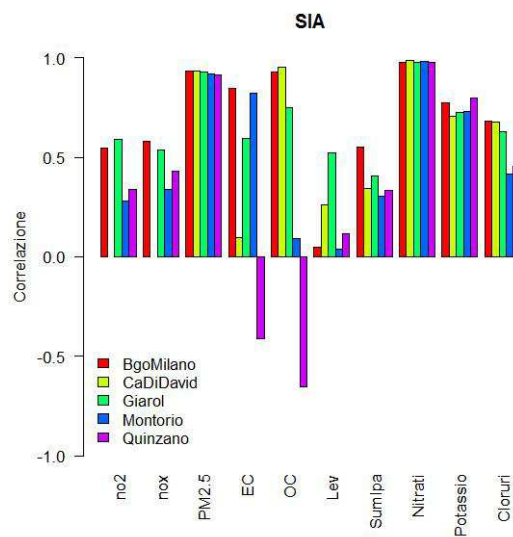
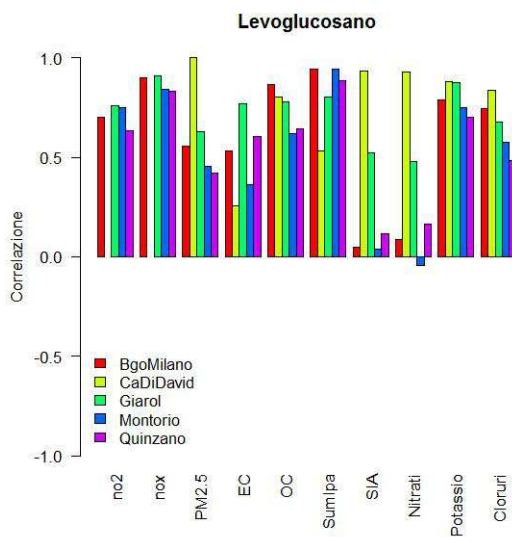
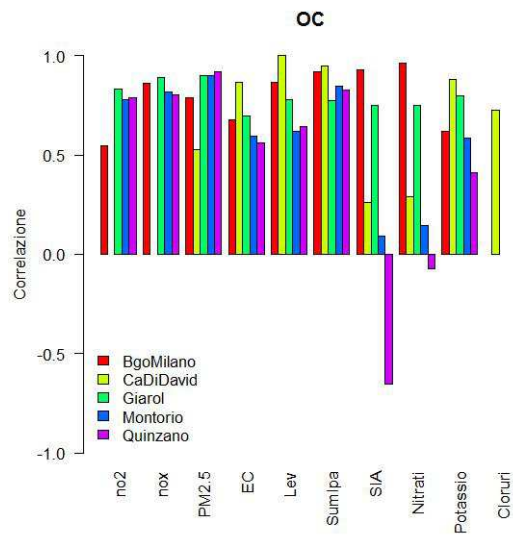
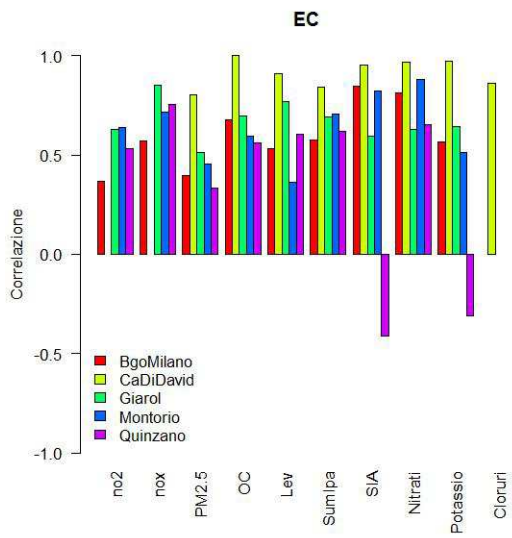
**Tabella 40: Limiti di legge relativi all'esposizione cronica.**

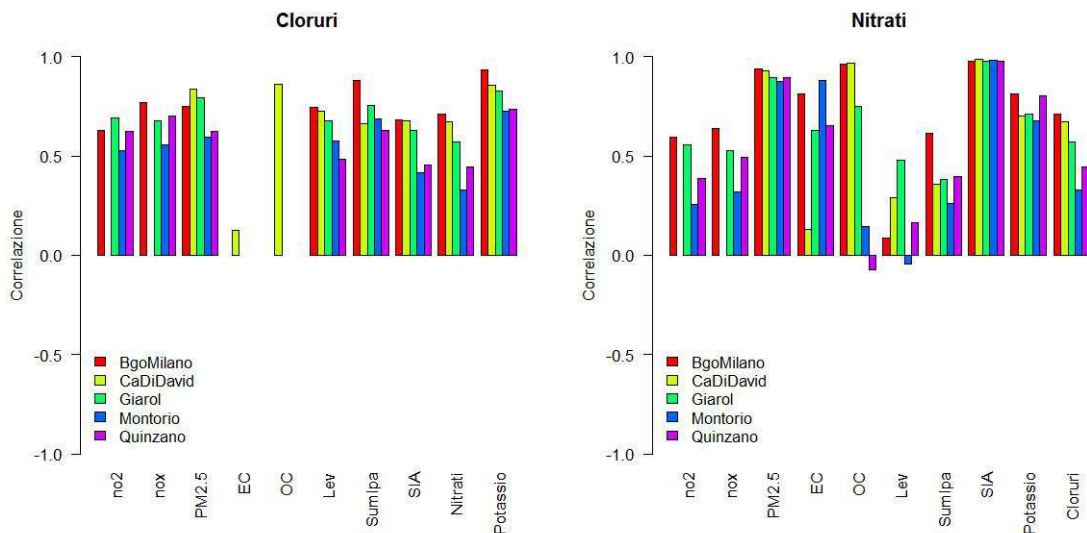
<b>Inquinante</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Valore</b>
SO <sub>2</sub>	Livello critico per la protezione della vegetazione Anno civile e inverno (01/10 – 31/03)	<b>20</b> µg/m <sup>3</sup>
NOX	Livello critico per la protezione della vegetazione Anno civile	<b>30</b> µg/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	Valore obiettivo per la protezione della vegetazione AOT40 su medie di 1 h da maggio a luglio Da calcolare come media su 5 anni (altrimenti su 3 anni)	<b>18000</b> µg/m <sup>3</sup> h
	Obiettivo a lungo termine per la protezione della vegetazione AOT40 su medie di 1 h da maggio a luglio	<b>6000</b> µg/m <sup>3</sup> h

**Tabella 41 Limiti di legge per la protezione degli ecosistemi.**



## 7.4 Figure supplementari





**Figura 60. Correlazione tra la concentrazione di diverse specie chimiche misurate. Ogni pannello si riferisce a una diversa specie chimica, indicata nel titolo: per essa, viene calcolata la correlazione con altre specie riportate in ascissa; la correlazione è quindi riportata in ordinata e rappresentata con una barretta. Per ogni specie rappresentata in ascissa, sono calcolate cinque correlazioni, relative ai cinque siti di monitoraggio, rappresentate con un diverso colore della barretta, riportato in legenda.**

## 8 Bibliografia

APPA Trento. Indagine ambientale: campagna di misura della qualità dell'aria, Storo, 13/08/2013 – 12/08/2014. 2015.

[http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat\\_appa\\_restyle/campagne\\_misura\\_aria/Campagna\\_di\\_misura\\_della\\_qualit\\_dell\\_aria\\_Storo\\_2013\\_14.1424175759.pdf](http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat_appa_restyle/campagne_misura_aria/Campagna_di_misura_della_qualit_dell_aria_Storo_2013_14.1424175759.pdf)

ARPA Puglia, dipartimento provinciale di Brindisi. Relazione tecnica: misure di EC, OC e levoglucosano su particolato fine presso i comuni di Torchiarolo (BR) e di Lecce-località S.M.Cerrate:risultati del monitoraggio.

2009.<file:///C:/Users/sdezolt/Downloads/Relazione%20Tecnica%20Levoglucosano%20-%20giugno%202009.pdf>

ARPA Valle d'Aosta. Azione 5.3.Emissioni di inquinanti dalla combustione di biomassa legnosa. 2013. <https://docplayer.it/19999076-Azione-5-3-emissioni-di-inquinanti-dalla-combustione-di-biomassa-legnosa-report-finale.html>

ARPA VENETO - REGIONE VENETO (febbraio 2017). INEMAR VENETO 2013 - Inventario Regionale delle Emissioni in Atmosfera in Regione Veneto, edizione 2013 – dati in versione definitiva. ARPA Veneto – Servizio Osservatorio Aria, Regione del Veneto - Area Tutela e Sviluppo del Territorio, Direzione Ambiente, UO Tutela dell'Atmosfera.

Roberta Vecchi, Paola Fermo, Gianluigi Valli, Andrea Piazzalunga, Sara Comero. PROGETTO PARFIL RAPPORTO TECNICO dettagliato - terza annualità UO3 – Università degli Studi di Milano. <https://docplayer.it/2988977-Progetto-parfil-rapporto-tecnico-dettagliato-terza-annualita-uo3-universita-degli-studi-di-milano.html>

ARPAV, RELAZIONE REGIONALE DELLA QUALITA' DELL'ARIA, anno 2015.

<http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/file-e-allegati/documenti/relazioni-regionali-della-qualita-dellaria/Relazione%20Annuale%20Qualita%20dellaria%202015.pdf/view>

Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., Chen, L. W. A., Zielinska, B., Mazzoleni, L. R. and Magliano, K. L.: Evaluation of organic markers for chemical mass balance source apportionment at the Fresno Supersite Atmospheric Chemistry and Physics, 7, 1741-1754, 2007.

Ding, X., Wang, X. M., Xie, Z. Q., Xiang, C. H., Mai, B. X., Sun, L. G., Zheng, M., Sheng, G. Y., Fu, J. M., and Pöschl, U.: Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons observed over the North Pacific Ocean and the Arctic area: Spatial distribution and source identification, Atmos. Environ., 41, 2061–2072, 2007.

EEA report: Air quality in Europe-2015 report, 2015.

Heringa, M. F., DeCarlo, P. F., Chirico, R., Tritscher, T., Dommen, J., Weingartner, E., Richter, R., Wehrle, G., Prevot, A. S. H., and Baltensperger, U.: Investigations of primary and secondary particulate matter of different wood combustion appliances with a high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometer, Atmos. Chem. Phys., 11, 5945–5957, doi:10.5194/acp-11-5945-2011, 2011.

ISPRA, Inventario nazionale delle emissioni in atmosfera 1990-2010. Informative Inventory Report 2017. <http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/inventario-nazionale-delle-emissioni-in-atmosfera-1990-2015.-informative-inventory-report-2017>

Masiol M., Formenton G., Pasqualetto G., Pavoni B.: Seasonal trends and spatial variations of PM10-bounded polycyclic aromatic hydrocarbons in Veneto Region, Northeast Italy. *Atmospheric Environment*, 2013.

Masiol, Mauro; Benetello, Francesca; Harrison, Roy M.; Formenton, Gianni; De Gaspari, Francesco; Pavoni, Bruno: Spatial, seasonal trends and transboundary transport of PM2.5 inorganic ions in the Veneto region (Northeastern Italy) in *Atmospheric Environment*, vol. 117 (ISSN 1352-2310), 2015.

Masiol M, Squizzato S, Formenton G, Harrison RM, Agostinelli C. Air quality across a European hotspot: Spatial gradients, seasonality, diurnal cycles and trends in the Veneto region, NE Italy. *Sci Total Environ*. 2017 Jan 15;576:210-224.

MSE - Ministero dello Sviluppo Economico, Statistiche dell'Energia, serie storica del Bilancio Energetico Nazionale (BEN). <http://dgsaie.mise.gov.it/dgerm/ben.asp>

C. Reche, M. Viana, F. Amato, A. Alastuey, T. Moreno, R. Hillamo, K. Teinilä, K. Saarnio, R. Seco, J. Peñuelas, C. Mohr, A.S.H. Prévôt, X. Querol. Biomass burning contributions to urban aerosols in a coastal Mediterranean City. *Science of the Total Environment* 427-428 (2012) 175–190.

Puxbaum, H., Caseiro, A., Sanchez-Ochoa, A., Kasper-Giebl, A., Claeys, M., Gelencser, A., Legrand, M., Preunkert, S., and Pio, C.: Levoglucosan levels at background sites in Europe for assessing the impact of biomass combustion on the European aerosol background, *J. Geophys. Res.*, 112, D23S05, doi:10.1029/2006JD008114, 2007.

Simoneit, B. R. T., Schauer, J. J., Nolte, C. G., Oros, D. R., Elias, V. O., Fraser, M. P., Rogge, W. F. and Cass, G. R.: Levoglucosan, A Tracer for Cellulose in Biomass Burning and Atmospheric Particles. *Atmos. Environ.*, 33: 173–182, 1999.

WMO (World Meteorological Organization): Air Quality Guidelines for Europe, second ed. In: WHO Regional Publications, European Series No. 91 WHO, Copenhagen, 2000.

Yan Lv, Xiang Li, Ting Ting Xu, Tian Tao Cheng, Xin Yang, Jian Min Chen, Yoshiteru Iinuma, and Hartmut Herrmann. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban atmosphere: sorption mechanism and source contributions to respiratory deposition. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 29–2983, 2016.