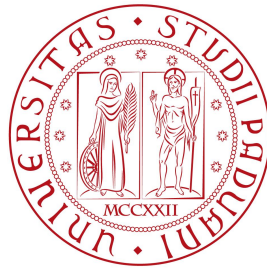


Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Scienze Statistiche  
Corso di Laurea Triennale in

Statistica per le tecnologie e le scienze



**ANALISI STATISTICA DELLA QUALITA' DELL'ARIA  
NEL COMUNE DI PADOVA: UN APPROCCIO TRAMITE  
L'ANALISI FATTORIALE DINAMICA**

Relatore: prof. Erlis Ruli  
Dipartimento di Scienze Statistiche

Laureando: Francesco Ciucevich  
Matricola n. 2003662

Anno Accademico 2022/2023

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
1.1	Introduzione . . . . .	2
1.2	Raccolta ed elaborazione dati . . . . .	4
1.3	Obiettivi e procedimento . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Analisi esplorativa</b>	<b>7</b>
2.1	Analisi descrittive . . . . .	7
2.1.1	Biossido di zolfo e Monossido di carbonio . . . . .	7
2.1.2	Particolato PM2.5 . . . . .	8
2.1.3	Particolato PM10 . . . . .	9
2.1.4	Ozono . . . . .	11
2.1.5	Ossidi di azoto . . . . .	12
2.2	Analisi delle stagionalità . . . . .	13
2.2.1	Stagionalità settimanale . . . . .	13
2.2.2	Stagionalità giornaliera . . . . .	14
2.3	Analisi delle correlazioni . . . . .	16
2.3.1	Analisi delle Correlazioni Canoniche . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Modellistica</b>	<b>19</b>
3.1	Modello Fattoriale . . . . .	19
3.1.1	Teoria . . . . .	19
3.1.2	Applicazione . . . . .	21
3.2	Modello Fattoriale Dinamico . . . . .	24
3.2.1	Teoria . . . . .	24
3.2.2	Applicazione . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>28</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>29</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Introduzione

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha stimato che ogni anno nel mondo circa 7 milioni di persone muoiono prematuramente per cause legate direttamente all'inquinamento atmosferico<sup>1</sup>. L'inquinamento atmosferico è il fenomeno di alterazione della normale composizione chimica dell'aria data da qualsiasi agente chimico, fisico o biologico potenzialmente pericoloso per la salute umana e dell'ecosistema. Gli inquinanti rilevati come più dannosi per l'uomo sono l'ozono ( $O_3$ ), il biossido di azoto ( $NO_2$ ) l'anidride solforosa ( $SO_2$ ), il monossido di carbonio ( $CO$ ) e i particolati PM2.5 e PM10, rispettivamente frazioni delle polveri inalabili caratterizzate da un diametro aerodinamico medio inferiore o uguale a 2.5 e 10 micrometri ( $\mu m$ ). I particolati sono in grado di penetrare in profondità nei polmoni e il PM2.5 può entrare nel flusso sanguigno, provocando problemi cardiovascolari e respiratori. A livello europeo l'Italia rappresenta il terzo paese per morti attribuibili all'inquinamento, come emerge dal rapporto dell'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) 2022.<sup>2</sup> Al fine di mitigare e ridurre questo fenomeno in costante espansione, negli anni sono state introdotte diverse normative a livello europeo per il contenimento dell'emissione di inquinanti. In Italia la normativa in materia di controllo dell'inquinamento atmosferico è rappresentata dal decreto legislativo 155/2010, come riportato nella tabella in Fig. 1.1. Tale decreto, oltre ad imporre dei valori limite per i principali inquinanti al fine della protezione dell'ambiente e della salute umana, regola anche la raccolta dati a carico degli enti regionali, al fine di disporre di misurazioni affidabili e accurate.

---

<sup>1</sup>World Health Organization (2021). WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva.

<sup>2</sup><https://www.rainews.it/articoli/2023/05/rischio-sanitario-ail-italia-terza-in-ue-per-decessi-da-inquinamento-d4e70d0f-b4bc-42db-8e1f-9afb3b9b8dfe.html>

Durante il 2022, come affermato dal rapporto Mal'aria di città 2023 di Legambiente, Padova è stata la quinta peggiore città d'Italia per quanto riguarda i livelli registrati di PM10 superando 70 volte, a fronte delle 35 previste, il limite di 50 microgrammi/metro cubo previsto dall'attuale normativa in vigore (Fig. 1.1). Anche per il PM2.5 Padova ha fatto registrare valori superiori a quelli previsti entro il 2030 dalla prossima Direttiva europea, con una media annua di  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tali valori, analogamente a quelli registrati per diversi inquinanti, sono influenzati da determinate condizioni metereologiche, quali la pressione atmosferica, la presenza di precipitazioni e l'inversione termica.

Inquinante	Nome limite	Indicatore statistico	Valore limite
SO <sub>2</sub>	Soglia di allarme	Superamento per 3h consecutive del valore soglia	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Limite orario per la protezione della salute umana	Media 1h	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 24 volte per anno civile
	Limite di 24 ore per la protezione della salute umana	Media 24h	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 3 volte per anno civile
NO <sub>2</sub>	Soglia di allarme	Superamento per 3h consecutive del valore soglia	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Limite orario per la protezione della salute umana	Media 1h	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 18 volte per anno civile
	Limite annuale per la protezione della salute umana	Media annuale	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10	Limite di 24 ore per la protezione della salute umana	Media 24h	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 35 volte per anno civile
	Limite annuale per la protezione della salute umana	Media annuale	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM2.5	Valore limite per la protezione della salute umana	Media annuale	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	Limite per la protezione della salute umana	Max giornaliero della media mobile 8h	10 $\text{mg}/\text{m}^3$
O <sub>3</sub>	Soglia di informazione	Superamento del valore orario	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Soglia di allarme	Superamento del valore orario	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana	Max giornaliero della media mobile 8h	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Valore obiettivo per la protezione della salute umana	Max giornaliero della media mobile 8h	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare per più di 25 giorni all'anno come media su 3 anni

Figura 1.1: Inquinanti e valori limite per la protezione della salute umana (D.Lgs.155/2010)

## 1.2 Raccolta ed elaborazione dati

In Veneto la raccolta dei dati in tema di qualità dell'aria, viene affidata all'ente regionale di competenza, ossia l'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV). Tale ente dispone di 44 centraline fisse disposte su tutta la regione e divise tra i 7 distretti provinciali.

I dati utilizzati in questa analisi sono stati cortesemente forniti dall'Unità Organizzativa Qualità dell'Aria del Dipartimento Regionale Qualità dell'Ambiente e provengono dalle misurazioni dell'anno solare 2022 relative alle 5 centraline presenti nel comune di Padova (figura 1.2) e qui elencate:

- stazione di monitoraggio Arcella, situata in via G. Reni;
- stazione di monitoraggio APS1, situata in viale Internato Ignoto;
- stazione di monitoraggio APS2, situata in via Carli;
- stazione di monitoraggio Granze, situata in via Beffagna;
- stazione di monitoraggio Mandria, situata in via Ca' Rasi.

Per ogni centralina sono stati rilevati i seguenti inquinanti:

- $PM_{10}$  (Particolato atmosferico), media giornaliera delle concentrazioni misurate in  $\mu g/m^3$ ;
- $PM_{2.5}$  (Particolato atmosferico), media giornaliera delle concentrazioni misurate in  $\mu g/m^3$ ;
- $CO$  (Monossido di Carbonio), rilevazione oraria delle concentrazioni misurate in  $mg/m^3$ ;
- $NO_2$  (Biossido di Azoto), rilevazione oraria delle concentrazioni misurate in  $\mu g/m^3$ ;
- $NO_x$  (Ossidi di Azoto), rilevazione oraria delle concentrazioni misurate in  $\mu g/m^3$ ;
- $NO$  (Monossido di Azoto), rilevazione oraria delle concentrazioni misurate in  $\mu g/m^3$ ;
- $O_3$  (Ozono), rilevazione oraria delle concentrazioni misurate in  $\mu g/m^3$ ;
- $SO_2$  (Biossido di Zolfo), rilevazione oraria delle concentrazioni misurate in  $\mu g/m^3$ .

Il campionamento dell'aria avviene con frequenza oraria o giornaliera e ciascuno strumento determina la concentrazione dell'inquinante in base al caratteristico principio chimico-fisico di funzionamento. I dati prodotti da ogni strumento sono raccolti e memorizzati da un computer (datalogger) presente in ciascuna centralina; successivamente trasmessi ai centri operativi provinciali dove viene eseguita l'operazione di verifica (validazione) e l'inserimento degli stessi nella tabella della qualità dell'aria presente nella pagina internet.

Al fine di una completa informazione, si fa notare che non tutte le centraline forniscono misurazioni per ogni inquinante misurabile. In particolare la centralina Granze misura solamente i livelli di PM10; la centralina Arcella non misura l'ozono e il PM2.5; la centralina Mandria non rileva il biossido di zolfo.

Inoltre sono stati scaricati dal sito web dell'ARPAV i dati storici del 2022, in formato *csv*, rilevati dalla centralina meteorologica n.234 del comune di Padova. Tali dati comprendono le misurazioni orarie per le seguenti variabili:

- temperatura dell'aria, misurata in gradi centigradi (°C)
- precipitazioni, misurate in millimetri (mm)
- umidità relativa percentuale (massima e minima)

I dati sono stati successivamente lavorati al fine di ottenere nuove variabili quali la temperatura media, con i relativi massimi e minimi giornalieri, e il totale giornaliero delle precipitazioni.

### 1.3 Obiettivi e procedimento

In questa relazione viene proposta un'analisi delle concentrazioni degli agenti inquinanti presenti nell'aria nell'anno solare 2022 nel comune di Padova. Inizialmente viene svolta un'approfondita indagine esplorativa degli inquinanti; successivamente viene applicato ai dati un Modello Fattoriale Dinamico al fine di individuare la presenza di fattori dinamici latenti.

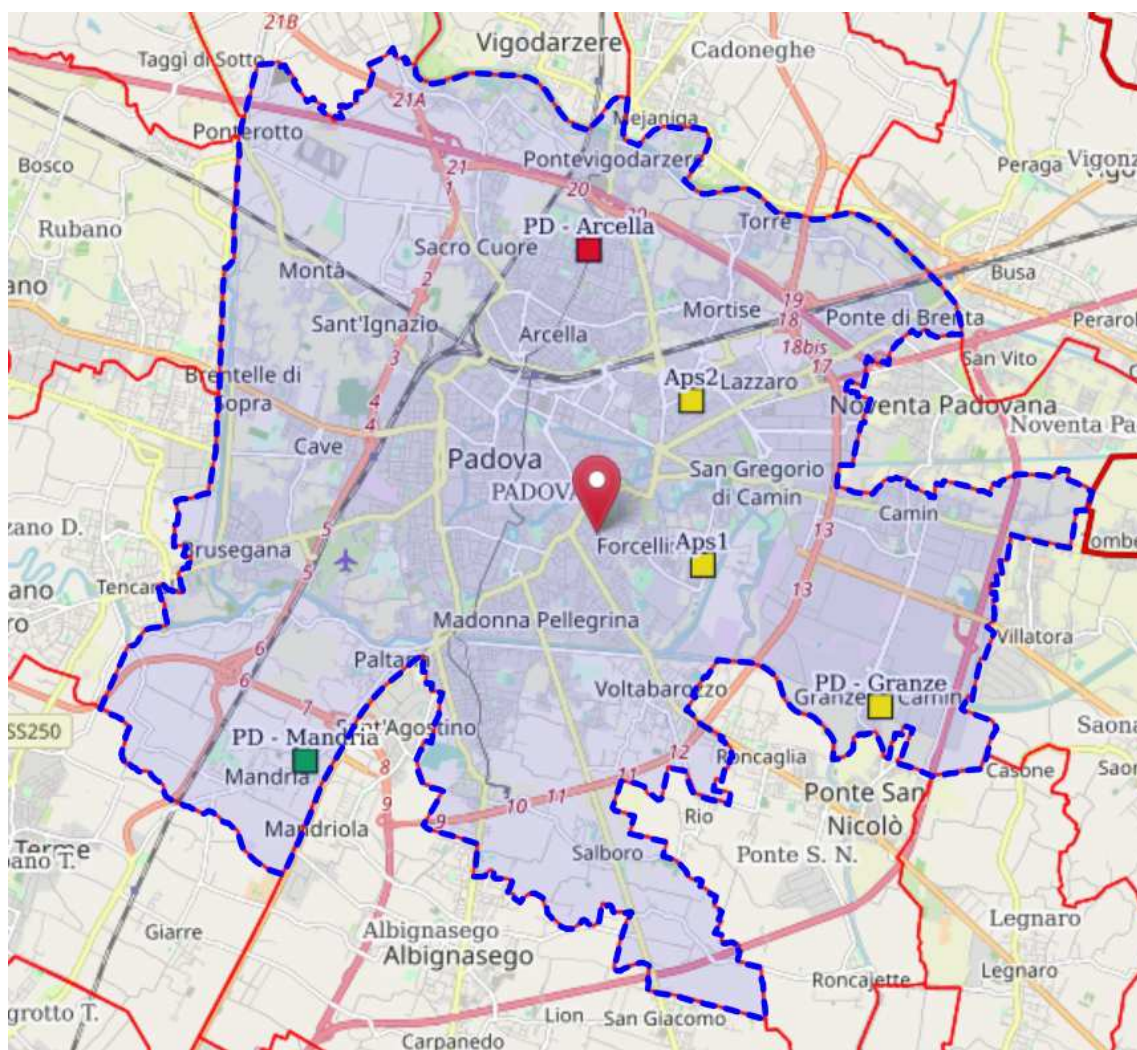


Figura 1.2: Localizzazione geografica delle cinque centraline del comune di Padova

# Capitolo 2

## Analisi esplorativa

In questa sezione vengono analizzate le principali caratteristiche degli inquinanti maggiormente rilevanti nel comune di Padova con riferimento all'anno solare 2022. Inizialmente viene proposta un'analisi esplorativa completa di ciascun inquinante al fine di rilevarne l'andamento medio e le principali statistiche descrittive; successivamente viene studiata la stagionalità presente nei dati con lo scopo di cogliere caratteristiche settimanali e giornaliere. Infine viene svolta un'analisi delle correlazioni tra inquinanti e agenti meteorologici per valutarne la dipendenza.

### 2.1 Analisi descrittive

#### 2.1.1 Biossido di zolfo e Monossido di carbonio

Viene analizzato lo stato della qualità dell'aria rispetto al biossido di zolfo ( $SO_2$ ) e al monossido di carbonio ( $CO$ ). Per l' $SO_2$  non vi sono stati superamenti della soglia di allarme di  $500 \mu g/m^3$ , né superamenti del valore limite orario ( $350 \mu g/m^3$ ) e del valore limite giornaliero ( $125 \mu g/m^3$ ). Esso può quindi essere considerato un inquinante primario<sup>1</sup> non critico per il territorio di Padova; ciò è stato determinato in gran parte dalle sostanziali modifiche dei combustibili avvenute negli ultimi decenni (da gasolio a metano), oltre alla riduzione della concentrazione di zolfo in tutti i combustibili, in particolare nei combustibili diesel (ARPAV, 2023).

Anche il monossido di carbonio ( $CO$ ) viene considerato un inquinante primario non critico: in tutte le centraline del comune di Padova in cui viene rilevato, non è mai stato superato il valore limite di  $10 mg/m^3$ , calcolato come valore massimo giornaliero delle medie mobili su 8 ore.

Data la non criticità a livello territoriale dei due tipi di inquinanti, non verrà successivamente proseguito il trattamento dell'analisi della loro concentrazione nell'aria.

---

<sup>1</sup>Per inquinante primario si intende un inquinante che deriva direttamente dalle sorgenti naturali od antropiche



## 2.1.2 Particolato PM2.5

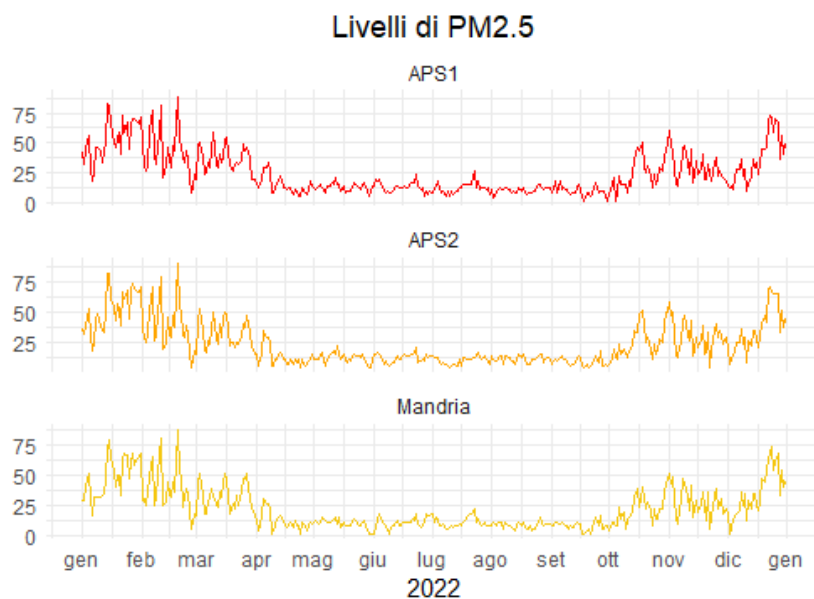


Figura 2.1: Andamento giornaliero del PM2.5 nelle centraline di Padova per il periodo gennaio-dicembre 2022.

Osservando i livelli giornalieri del particolato sottile si nota un andamento tendenzialmente comune per tutte e tre le centraline: i valori più elevati si registrano nei mesi freddi, con un netto calo nel periodo primaverile/estivo. Questo andamento è spiegato parzialmente sia dall'utilizzo di impianti di riscaldamento nei mesi invernali, che da fattori climatici quali l'inversione termica, la temperatura e la presenza di precipitazioni.

Centralina	APS1	APS2	Mandria
Media annua PM2.5	24.93	23.84	22.66

Tabella 2.1: Medie annue del PM2.5 (misurate in  $\mu g/m^3$ ) per le centraline di Padova.

Come si può notare dai dati riportati in tabella 2.1, il livello di particolato sottile nell'aria non supera in nessuna centralina il limite imposto dalla legge di  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  medi annui. Questi valori rientrano nei limiti di legge, tuttavia sono molto distanti dalle Linee Guida aggiornate stilate dall'OMS nel settembre 2021<sup>2</sup>: tali direttive, individuate per proteggere la salute umana, fissano la soglia limite per il PM2.5 a  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  medi annui.

### 2.1.3 Particolato PM10

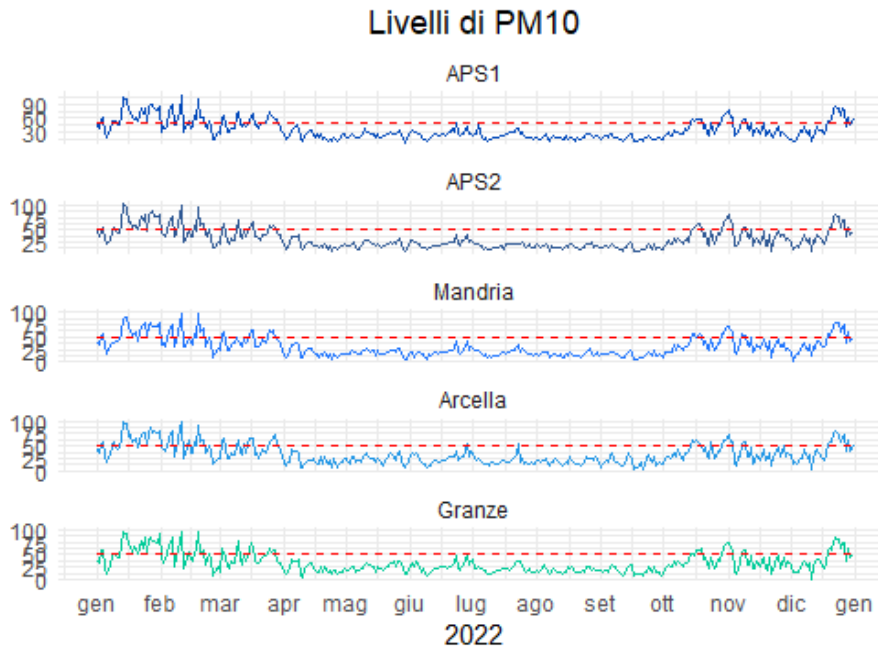


Figura 2.2: Andamento giornaliero del PM10 nelle centraline di Padova per il periodo gennaio-dicembre 2022.

Analogamente al particolato sottile, anche per il PM10 l'andamento mostra dei valori mediamente più alti nei mesi invernali con picchi nei primi tre mesi dell'anno solare, per poi stabilizzarsi regolarmente sotto al limite giornaliero imposto dalla legge di  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nei mesi più caldi. Nelle seguenti tabelle (Tab. 2.2 e Tab. 2.3) vengono riportate rispettivamente le medie annue dei livelli di particolato e il numero di volte in cui è stato superato il limite giornaliero per centralina.

<sup>2</sup>World Health Organization (2021). WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva.

Centralina	APS1	APS2	Mandria	Arcella	Granze
Media annua PM10	35.04	31.45	30.57	32.00	33.81

Tabella 2.2: Medie annue del PM10 (misurate in  $\mu g/m^3$ ) per le centraline di Padova.

Centralina	APS1	APS2	Mandria	Arcella	Granze
Giorni	75	59	61	70	70

Tabella 2.3: Numero di giorni durante i quali è stato superato il limite giornaliero di PM10 nel 2022.

Osservando i risultati ottenuti, si nota che la situazione è decisamente più critica per quanto riguarda l'inquinamento da PM10. Per ciò che concerne le medie annue il limite di  $40 \mu g/m^3$  non viene mai superato, tuttavia la situazione peggiora decisamente in termini di inquinamento giornaliero. Il limite quotidiano di  $50 \mu g/m^3$ , da non superare più di 35 volte l'anno secondo i limiti di legge, viene superato in tre centraline su cinque il doppio delle volte consentite. Anche per le centraline APS2 e Mandria il numero di superamenti è decisamente maggiore al limite imposto per la salvaguardia della salute umana.

Osservando l'andamento annuo della concentrazione di PM10 nell'aria (Fig. 2.2) si notano due principali periodi in cui si sono verificati la maggior parte dei superamenti giornalieri: un primo periodo molto fitto di eventi che va da inizio anno fino a marzo ed un secondo periodo che va dalla seconda metà di dicembre fino a fine anno.

Attraverso un'analisi più approfondita delle singole serie storiche annuali per le cinque centraline, si notano tre intervalli temporali all'interno dei quali si verificano gran parte degli eccessi giornalieri:

- dal 13 al 31 gennaio
- dal 5 al 24 febbraio
- dal 19 al 31 dicembre

Nel primo periodo il limite giornaliero è stato oltrepassato ogni giorno, con il picco massimo raggiunto di  $104 \mu g/m^3$  il 14 gennaio nella centralina dell'Internato Ignoto (APS1). Come riportato anche dalla relazione annuale sulla qualità dell'aria stilata dall'ARPAV, all'inizio della seconda decade di gennaio, un'area di alta pressione e l'avvezione di aria calda in quota hanno determinato un incremento dell'inversione termica e quindi creato condizioni favorevoli al ristagno degli inquinanti. Per quanto concerne il periodo delle festività invernali, come si evince dal grafico delle precipitazioni (Fig 2.3), dopo un lungo periodo nella prima metà di dicembre caratterizzato da numerosi eventi precipitativi, a partire dal 18 dicembre si sono instaurate sul Veneto condizioni anticicloniche che hanno portato tempo stabile, senza precipitazioni, con debole ventilazione e accentuazione dell'inversione termica, ossia ideali per l'accumulo delle polveri sottili.

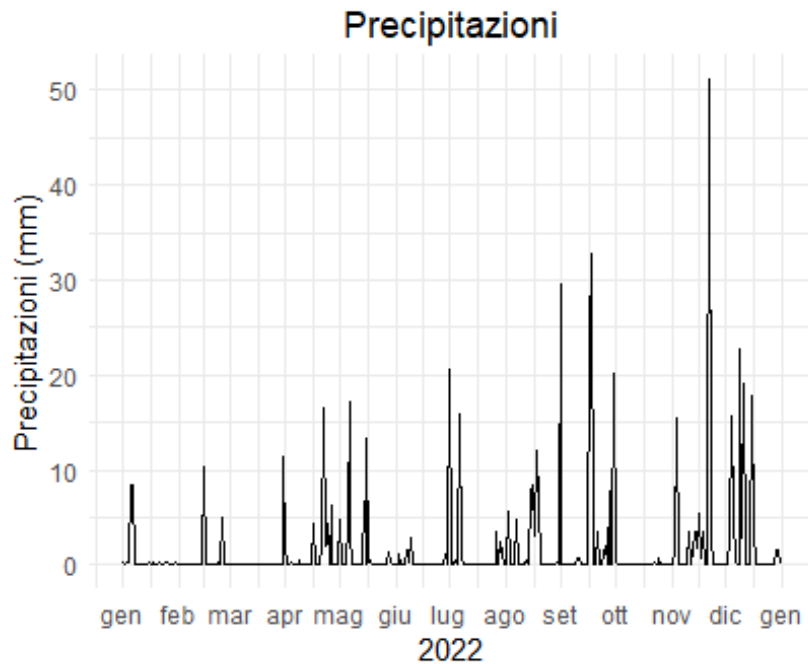


Figura 2.3: Precipitazioni (in mm) misurate dalla centralina n.234 di Padova nel 2022.

Come si nota dalla figura sovrastante, un ulteriore causa degli elevati livelli di inquinamento da PM10 nel primo trimestre dell'anno è dovuto dalla quasi totale assenza di eventi piovosi durante il medesimo periodo. In generale si nota un andamento crescente durante l'anno solare, ma con un numero totale di precipitazioni molto inferiore rispetto alla media regionale degli ultimi dieci anni.<sup>3</sup>

### 2.1.4 Ozono

L'ozono si definisce un inquinante secondario poiché non viene prodotto direttamente dalle fonti di emissione antropiche o naturali, ma si forma per reazione fotochimica di altri inquinanti, quali ossidi di azoto, in presenza della luce solare. Come si può notare dall'immagine in figura 2.4, le condizioni più favorevoli per la sua formazione si verificano durante la stagione estiva, caratterizzata tipicamente da forte insolazione, alte temperature e una ridotta ventilazione. L'andamento delle medie giornaliere di ozono nelle tre centraline sembra infatti seguire quello delle temperature medie. La soglia di informazione di  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , definita dalla legislazione come il livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana, viene superata dalle centraline Mandria e APS2 rispettivamente 8 e 6 volte in tutto l'anno solare. La centralina dell'Internato Ignoto contrariamente non ha fatto registrare raggiungimenti di tale soglia. Per la centralina situata nel quartiere Mandria gli episodi si sono verificati in cinque giorni diversi, tutti compresi tra il 3 luglio e il 6 agosto, mentre in via Carli i sei episodi hanno avuto luogo il 21 maggio, 3 e 27 luglio. La soglia di allarme di  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  non è mai stata oltrepassata in nessuna centralina di Padova.

<sup>3</sup>[https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/indicatori-ambientali/indicatori\\_ambientali/clima-e-rischi-naturali/clima/precipitazione-annua/2022](https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/indicatori-ambientali/indicatori_ambientali/clima-e-rischi-naturali/clima/precipitazione-annua/2022)

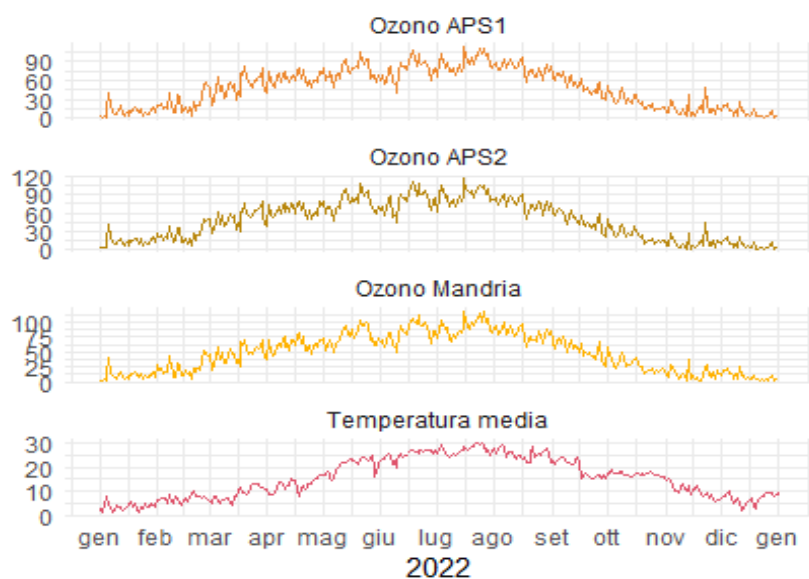


Figura 2.4: Medie giornaliere  $O_3$  ( $\mu g/m^3$ ) e temperatura ( $^{\circ}C$ ) nel 2022.

Tutti gli episodi di superamento della soglia limite sono avvenuti nelle ore più calde della giornata, ossia dalle 12 alle 18. Tale fascia oraria, caratterizzata da un forte irraggiamento solare, permette di raggiungere i valori massimi giornalieri. Sarà quindi di interesse nella prossima sezione, studiarne la stagionalità a livello giornaliero e settimanale.

### 2.1.5 Ossidi di azoto

Il termine  $NO_x$  indica la somma del monossido di azoto ( $NO$ ) e del biossido di azoto ( $NO_2$ ). L'ossido di azoto è un inquinante primario che si forma generalmente dai processi di combustione ad alta temperatura; è un gas a tossicità limitata, al contrario del biossido di azoto (circa 4 volte più tossico).

Nessuna centralina di Padova ha registrato episodi di raggiungimento della soglia di allarme di  $400 \mu g/m^3$  e neppure della soglia per la protezione della salute umana di  $200 \mu g/m^3$  per il biossido di azoto. Per quanto riguarda il limite di legge annuale, tutte le centraline presentano medie annuali pienamente entro il valore limite di  $40 \mu g/m^3$  (vedi Fig 2.5).

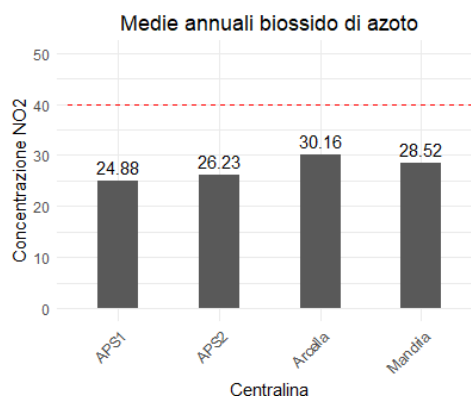


Figura 2.5: Medie annuali  $NO_2$  ( $\mu g/m^3$ ) e confronto con valore limite, anno 2022.

## 2.2 Analisi delle stagionalità

### 2.2.1 Stagionalità settimanale

Vengono quindi studiate le concentrazioni degli inquinanti al fine di coglierne caratteristiche settimanali; per fare ciò, i dati sono stati divisi in giorni appartenenti ai "mesi freddi" (Ottobre, Novembre, Dicembre, Gennaio, Febbraio, Marzo) e "mesi caldi" (Aprile, Maggio, Giugno, Luglio, Agosto, Settembre), come riportato nelle figure successive.

Per ogni inquinante sono stati presi in considerazione i dati provenienti dalla centralina che ha registrato i valori più critici; rispettivamente APS1, Arcella e Mandria per le polveri sottili,  $NO_2$  e  $O_3$ .

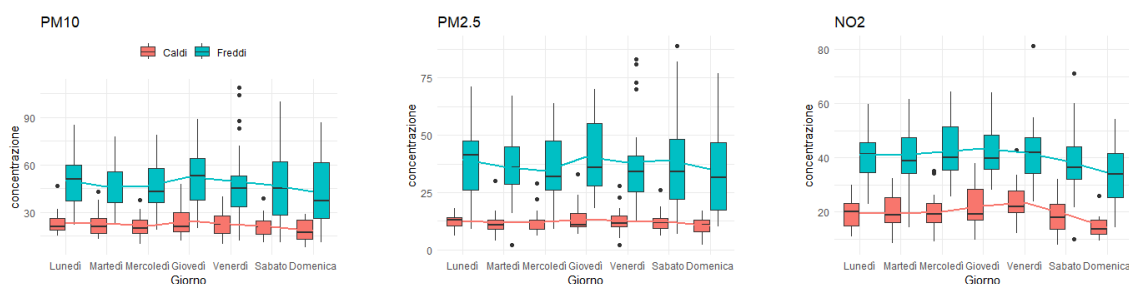


Figura 2.6: Boxplot e andamento medio per giorno della settimana di  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  (in  $\mu g/m^3$ ).

Come già riportato nel precedente paragrafo, si nota innanzitutto una differenza delle concentrazioni degli inquinanti a seconda del periodo dell'anno in considerazione: per le polveri sottili e il biossido di azoto concentrazioni superiori e maggiormente variabili nei mesi freddi; mentre un andamento opposto per l'ozono e la temperatura, con variabilità simile tra i due periodi e concentrazioni più alte nel periodo estivo.

Tra gli inquinanti in questione solamente il biossido di azoto ( $NO_2$ ) e l'ozono ( $O_3$ ), in maniera più leggera, mostrano una evidente stagionalità settimanale in media.

Inoltre si osserva che la quasi totalità degli eventi "estremi" per le polveri sottili si sono verificati di venerdì durante i mesi freddi dell'anno.

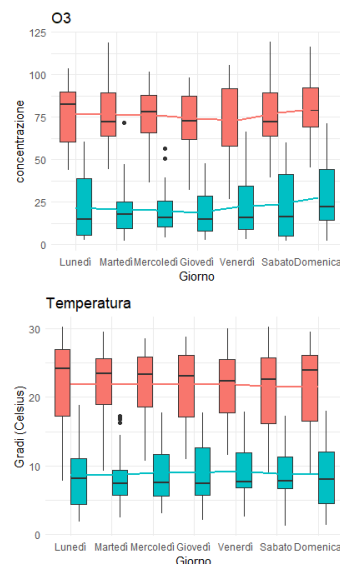


Figura 2.7: Boxplot e andamento medio per giorno della settimana di  $O_3$  (in  $mg/m^3$ ) e temperatura (in  $^{\circ}C$ ).

## 2.2.2 Stagionalità giornaliera

Si studiano ora le caratteristiche giornaliere degli inquinanti mantenendo la divisione dei dati in appartenenti ai "mesi freddi" e ai "mesi caldi", come riportato nelle figure successive.

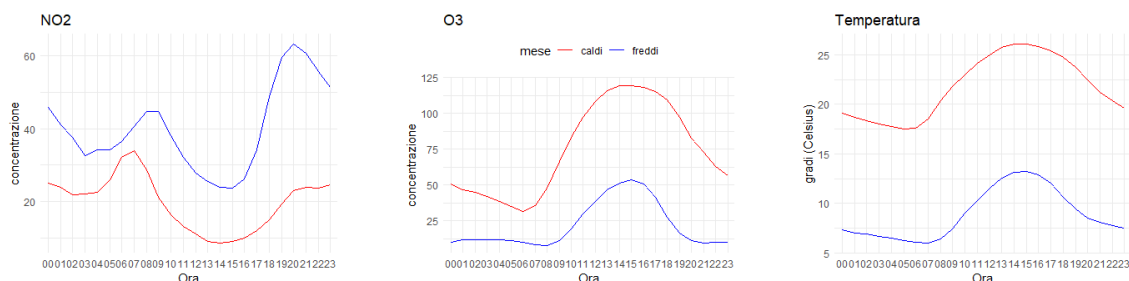


Figura 2.8: Medie orarie di  $NO_2$ ,  $O_3$  (in  $\mu g/m^3$ ) e temperatura (in  $^{\circ}C$ ).

I grafici sovrastanti sottolineano una stagionalità oraria evidente (Fig. 2.8). Le concentrazioni di  $NO_2$  in particolare, presentano aumenti dei valori durante gli orari di maggiore traffico stradale, ossia tra le 7 e le 9 di mattina e durante la sera nella fascia oraria 17-20. Questo risultato lascia comprendere meglio, rispetto alle analisi settimanali, come l'attività umana incida sull'inquinamento atmosferico. Come per i particolati  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$ , valori maggiori in media delle concentrazioni si verificano durante l'inverno e i mesi freddi.

Ozono e temperatura, come dimostrato nelle analisi descrittive iniziali, mostrano un andamento comune, raggiungendo il massimo tra le ore 14 e le 15 e valori di concentrazione superiori nel periodo caldo dell'anno. Questi risultati sono dovuti dal fatto che l'  $O_3$  è un tipico inquinante che si forma nell'atmosfera in seguito alle reazioni fotochimiche a carico di inquinanti precursori; necessitando quindi di molta luce si spiega il motivo di tale andamento crescente durante la giornata.

**Giornate ecologiche** Il Comune di Padova ha organizzato, in accordo il Pacchetto di misure straordinarie per il contenimento dell'inquinamento atmosferico (DGRV n. 238/2021 e DGRV n. 1089/2021), sei domeniche ecologiche durante le quali viene chiusa al traffico l'area perimetrata dalle mura cinquecentesche dalle 8:30 alle 18:30. Per il 2022 le domeniche scelte sono state: 23 gennaio, 6 e 20 febbraio, 2 ottobre, 6 novembre e 4 dicembre. In questa sezione vengono analizzati gli effetti di tali ordinanze sull'inquinamento.

In linea generale le domeniche del primo semestre dell'anno (23 gennaio, 6 e 20 febbraio) hanno fatto registrare valori degli inquinanti più elevati rispetto alle successive (2 ottobre, 6 novembre e 4 dicembre).

Nel grafico in Figura 2.9 sono riportati i valori delle polveri sottili (PM10 e PM2.5) registrati durante giornate ecologiche e, nella linea rossa tratteggiata, la rispettiva media invernale delle domeniche. Come si può notare, le prime tre domeniche hanno fatto registrare valori molto superiori alla media, mentre l'opposto si è verificato nelle tre domeniche tra ottobre e dicembre. Ciò potrebbe essere dovuto a fattori climatici: uno di questi riguarda la temperatura media giornaliera registrata nei primi due mesi del 2022 con valori dai 2 ai 6°C, inferiori alle medie dei mesi finali dell'anno; tali temperature molto basse richiedono quindi un utilizzo di massa degli impianti di riscaldamento. Un secondo motivo potrebbe essere legato alla quasi totale assenza di precipitazioni nei mesi iniziali, che hanno causato il ristagno dell'aria.

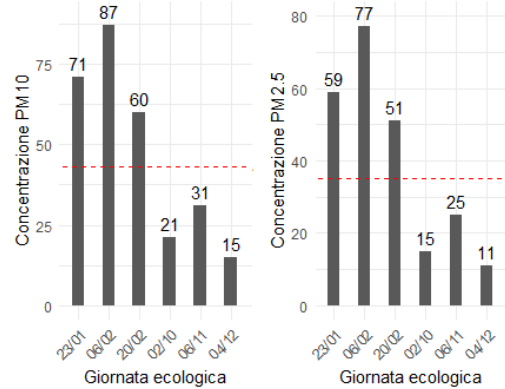


Figura 2.9: Concentrazioni giornaliere (in  $\mu g/m^3$ ) di particolato nelle domeniche ecologiche, anno 2022.

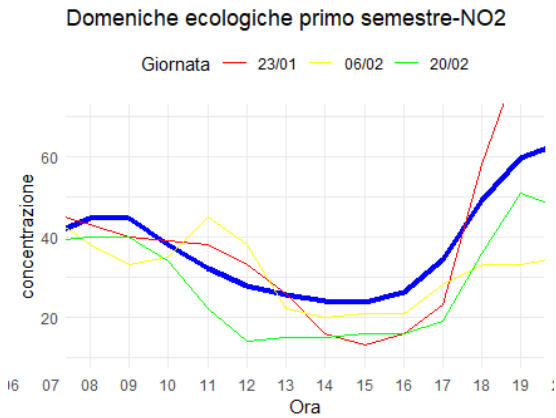


Figura 2.10: Concentrazione giornaliera (in  $\mu g/m^3$ ) di  $NO_2$  per le prime tre domeniche ecologiche, anno 2022.

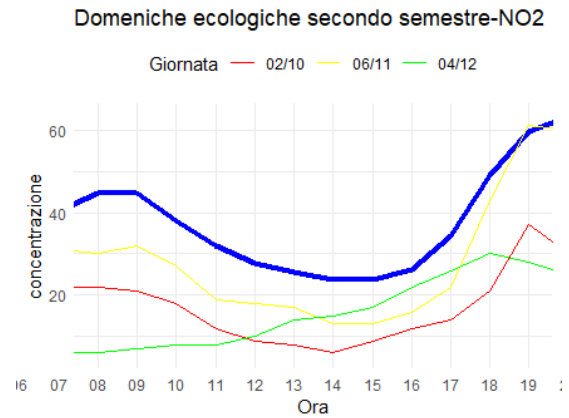


Figura 2.11: Concentrazione giornaliera (in  $\mu g/m^3$ ) di  $NO_2$  per le ultime tre domeniche ecologiche, anno 2022.

Nelle Figure 2.10 e 2.11 sono riportate invece le concentrazioni giornaliere di  $NO_2$  rispetto all'andamento giornaliero medio per la stagione invernale (linea blu). Per questo inquinante si possono trarre conclusioni simili alle precedenti, ma con un superamento della media circoscritto al solo orario tra le 10 e le 13; si nota infine un andamento giornaliero generalmente migliore durante le ultime tre domeniche.



In conclusione non è possibile tracciare un bilancio accurato su tali giornate, ma vengono riportate alcune considerazioni: l'andamento così altalenante delle sei giornate ecologiche suggerisce che, al fine di una efficace riduzione dell'inquinamento atmosferico, è necessario l'impegno dell'uomo condizionatamente al verificarsi di condizioni atmosferiche favorevoli. Inoltre, a seconda del periodo stagionale, è evidente che la giornata ecologica non sia sufficiente al fine di una riduzione dell'inquinamento atmosferico; una possibile soluzione potrebbe essere di raddoppiare il numero delle domeniche ecologiche o aggiungervi altri giorni.

## 2.3 Analisi delle correlazioni

Di seguito vengono analizzate le correlazioni tra gli inquinanti ritenuti più significativi per il comune di Padova ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$ ) e gli agenti meteorologici (Temperatura, Pressione e Umidità). Per ogni inquinante sono selezionati i dati provenienti dalla centralina che ha registrato i valori più elevati, come già anticipato nella sezione 2.2.

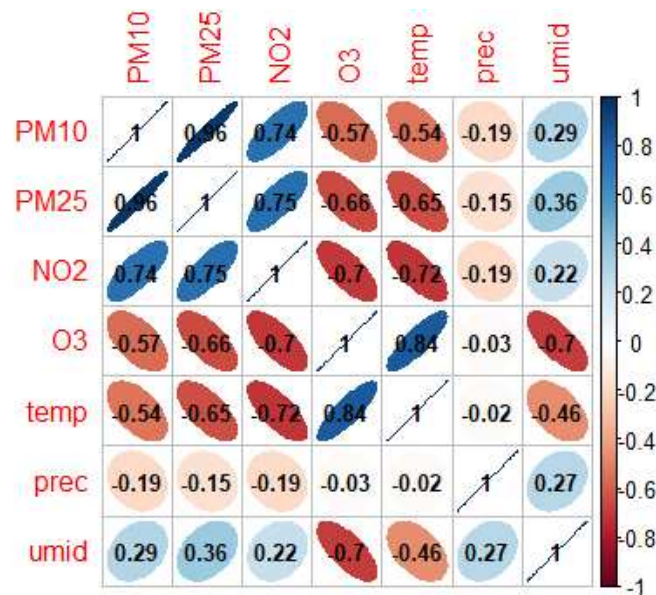


Figura 2.12: Matrice di correlazione delle medie giornaliere per inquinanti e agenti meteorologici.

Come si può notare dai risultati presentati nella figura sopra riportata, le polveri sottili ( $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$ ) e l' $NO_2$  sono positivamente correlati tra loro e negativamente con temperatura e ozono, a loro volta positivamente correlati. Questo indica che all'aumentare della temperatura diminuisce in media la concentrazione di particolato e di biossido di azoto, mentre aumenta la concentrazione media di ozono. Come ci si aspetta, si nota inoltre che le precipitazioni sono negativamente correlate con gli inquinanti, tuttavia in maniera troppo leggera per essere considerata significativa. Infine anche l'umidità presenta valori di correlazione non particolarmente elevati tranne che per l'ozono; infatti l'aumentare dell'umidità atmosferica provoca una diminuzione della concentrazione media giornaliera di ozono.

### 2.3.1 Analisi delle Correlazioni Canoniche

**Teoria** Viene presentata ora l'analisi delle correlazioni canoniche (CCA) con l'obiettivo di fornire una misura della correlazione globale tra due vettori casuali attraverso l'analisi delle singole correlazioni tra le coppie appartenenti ai vettori.

Siano  $X^{(1)}$  e  $X^{(2)}$  le matrici delle osservazioni rispettivamente per il primo ed il secondo gruppo di variabili, in questo caso meteo e inquinanti. Si definiscono:

$$Z_1 = \begin{matrix} X^{(1)} & A_1 \\ n \times \min(p,q) & n \times p \quad p \times \min(p,q) \end{matrix} \quad (2.1)$$

$$Z_2 = \begin{matrix} X^{(2)} & A_2 \\ n \times \min(p,q) & n \times q \quad q \times \min(p,q) \end{matrix} \quad (2.2)$$

dove  $Z_1$  e  $Z_2$  sono dette variabili canoniche. La CCA è in grado di determinare le trasformazioni lineari  $A_1$  e  $A_2$  che massimizzano la correlazione tra le variabili canoniche.

**Applicazione ai dati** Tramite l'analisi statistica con la funzione `cc` della libreria `CCA` del software R, si ottengono i seguenti risultati.

Le correlazioni tra le variabili canoniche stimate sono pari a 0.923 per la prima coppia di variabili canoniche, 0.610 per la seconda e 0.218 per la terza. Le matrici stimate  $A_1$  e  $A_2$  risultano:

$$A_1 = \begin{bmatrix} & 1^a \text{ var. canonica} & 2^a \text{ var. canonica} & 3^a \text{ var. canonica} \\ \text{temp} & 0.925 & 0.354 & -0.139 \\ \text{prec} & -0.034 & 0.392 & 0.919 \\ \text{umid} & -0.754 & 0.657 & -0.011 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} & 1^a \text{ var. canonica} & 2^a \text{ var. canonica} & 3^a \text{ var. canonica} \\ \text{PM10} & -0.582 & -0.284 & -0.710 \\ \text{PM2.5} & -0.699 & -0.310 & -0.499 \\ \text{NO}_2 & -0.688 & -0.636 & -0.297 \\ \text{O}_3 & 0.992 & -0.024 & 0.044 \end{bmatrix}$$

La correlazione più elevata è quella tra la prima coppia di variabili canoniche, pari a 0.923. Come già visto più volte precedentemente, si può affermare che la temperatura è fortemente e positivamente correlata con l'ozono e negativamente, e in maniera più debole, con gli altri inquinanti; un aumento della temperatura provoca quindi la diminuzione in concentrazione dei particolati e del biossido di azoto e un aumento dell'ozono. Inoltre l'umidità risulta negativamente correlata con l'ozono e positivamente con gli altri inquinanti. La seconda coppia di variabili canoniche ha una correlazione di 0.610 e coinvolge principalmente l'umidità, negativamente correlata con l' $NO_2$  e in maniera minore con le altre variabili. Si può affermare quindi che un aumento dell'umidità atmosferica comporta una diminuzione della concentrazione di biossido di azoto. La terza coppia di variabili canoniche ha una correlazione, minore rispetto alle altre, di 0.218 e coinvolge le precipitazioni, negativamente correlate maggiormente con  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$ ; quindi un aumento delle precipitazioni provoca una diminuzione della concentrazione di polveri sottili.

# Capitolo 3

## Modellistica

In questo capitolo vengono proposti due modelli: il Modello Fattoriale e il Modello Fattoriale Dinamico. Questi modelli nascono dalle rispettive Analisi Fattoriale (FA) e Analisi Fattoriale Dinamica (DFA), tecniche statistiche volte alla riduzione della dimensionalità di un dataset e all'individuazione di relazioni tra le variabili tramite la ricerca di fattori latenti.

L'obiettivo di questa parte di analisi è quello di trovare dei fattori latenti che riassumano una parte significativa dell'inquinamento cittadino di Padova. Ci si aspetta che una determinata combinazione lineare di un solo fattore latente possa portare a spiegare gran parte della variabilità racchiusa nei dati.

Vengono quindi applicati i due modelli successivi alle 365 osservazioni giornaliere di particolato PM10 divise per le cinque centraline del territorio comunale di Padova. L'unità statistica diventa quindi il singolo livello di concentrazione giornaliera per una determinata centralina.

La scelta di prendere in considerazione il PM10 come inquinante "simbolo" dell'inquinamento padovano deriva principalmente dalla sua tossicità per la salute umana e dalla sua forte concentrazione presente nel nostro territorio.

Al fine di utilizzare dati completi per le analisi è stata applicata l'approssimazione dei valori mancanti di PM10 tramite la funzione *na.approx* di R.

### 3.1 Modello Fattoriale

L'analisi dei dati tramite il modello fattoriale ha come scopo quello di descrivere le relazioni di covarianza tra molte variabili in termini di poche, ma non osservabili, quantità casuali chiamate fattori.

#### 3.1.1 Teoria

Sia un vettore casuale  $X = (X_1, \dots, X_p)$  con media  $\mu$  e matrice di covarianza  $\Sigma$ . Il modello fattoriale esprime  $X$  come trasformazione lineare di variabili latenti  $F_1, F_2, \dots, F_m$ , dette *fattori comuni*, sommate ad altre  $p$  variabili  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_p$ , dette

*fattori specifici* o *errori*. Il modello può essere espresso dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}
 X_1 - \mu_1 &= l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \cdots + l_{1m}F_m + \epsilon_1 \\
 X_2 - \mu_2 &= l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \cdots + l_{2m}F_m + \epsilon_2 \\
 &\vdots \\
 X_p - \mu_p &= l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \cdots + l_{pm}F_m + \epsilon_p
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

che in forma matriciale diventano:

$$\underset{(p \times 1)}{X} - \underset{(p \times 1)}{\mu} = \underset{(p \times m)}{L} \underset{(m \times 1)}{F} + \underset{(p \times 1)}{\epsilon} \tag{3.2}$$

dove  $L = [l_{ij}]$  è detta matrice dei *loadings* e  $l_{ij}$ , l'elemento della riga  $i$  e colonna  $j$  di  $L$ , rappresenta il peso dell' $i$ -esima variabile nel  $j$ -esimo fattore.  $F$  contiene i punteggi fattoriali dei *fattori comuni*.

Data la non praticità del modello, è usuale imporre le seguenti restrizioni:

- $E(F) = \underset{m \times 1}{0}$ ,  $COV(F) = E(FF^T) = \underset{m \times m}{I}$
- $E(\epsilon) = \underset{p \times 1}{0}$ ,  $COV(\epsilon) = \underset{p \times p}{\psi} = \text{diag}(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_p)$
- indipendenza tra  $F$  e  $\epsilon$ , ossia  $COV(F, \epsilon) = \underset{m \times p}{0}$

Questi vincoli assieme all'equazione (3.2) definiscono il *Modello a Fattori Ortogonali* (FA).

Il Modello a Fattori Ortogonali presenta quindi le due seguenti proprietà:

- $\Sigma_{FA} = COV(X|FA) = LL^T + \psi$
- $COV(X, F|FA) = L$

dove  $COV(X|FA)$  significa covarianza di  $X$  condizionatamente alle assunzioni della FA. In particolare,

$$\sigma_{ii}^{FA} = Var(X_i|FA) = l_{i1}^2 + l_{i2}^2 + \cdots + l_{im}^2 + \psi_i$$

dove  $l_{i1}^2 + l_{i2}^2 + \cdots + l_{im}^2 = h_i^2$  è chiamata *communality* e  $\psi_i$  *specificity*.

### 3.1.2 Applicazione

Le analisi seguenti sono state svolte tramite il software statistico R<sup>1</sup> utilizzando la funzione **fa** del pacchetto **psych**. È stato deciso di discutere a priori la scelta del numero di fattori mediante un'analisi delle componenti principali (PCA) tramite la funzione **prcomp** di R. L'analisi delle componenti principali ha mostrato che la prima componente da sola spiega circa il 97.3% della variabilità totale dei dati e che le componenti successive, dalla seconda alla quinta, aggiungono rispettivamente l'1%, 0,7%, 0,55% e 0,45%; valori troppo minori in relazione alla quantità di varianza spiegata dalla prima componente. Questo risultato si può vedere chiaramente anche dal grafico dello screeplot riportato nella figura sottostante (Fig. 3.1).

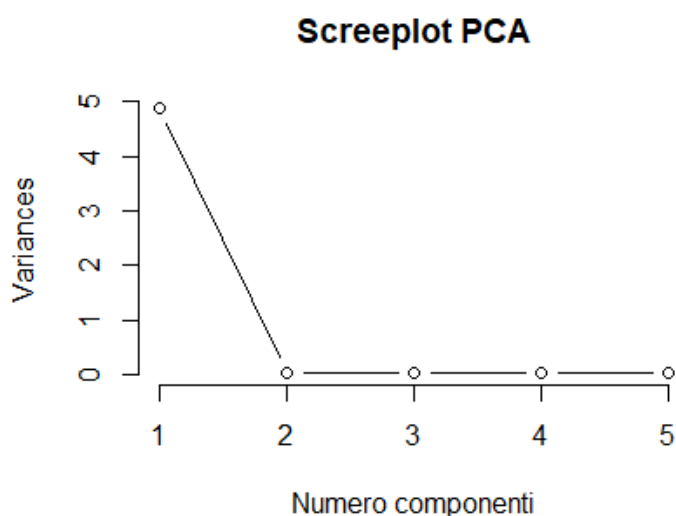


Figura 3.1: Screeplot della PCA

Si nota infatti dal grafico che il passaggio da una a due componenti è insignificante in termini di aggiunta della proporzione di varianza spiegata, motivo per cui si preferisce una componente. A confermare questa decisione si aggiunge la regola di Kaiser, che prevede l'inclusione nel modello finale di tutte le componenti con autovalore corrispondente maggiore o uguale a 1; dall'analisi, infatti, emerge che solo la prima componente presenta un autovalore pari a 2.2, mentre tutti quelli delle componenti successive risultano minori di 1.

---

<sup>1</sup>Versione 4.2.1

Una volta deciso il numero di fattori con cui svolgere lo studio, si procede con l'analisi fattoriale dei dati con un fattore latente. L'utilizzo della funzione **fa** deriva dal fatto di lavorare con dati non standardizzati e quindi avere la possibilità di ricavare i punteggi fattoriali nella stessa scala dei dati originari. Per la stima delle componenti è stato utilizzato il metodo dei minimi quadrati non pesati; ai loadings non è stata applicata alcuna rotazione e per i punteggi fattoriali è stato utilizzato il metodo della regressione.

Come ci si aspettava, il fattore spiega la quasi totalità della variabilità dei dati con il 97%; inoltre il vettore dei loadings presenta valori molto simili per le cinque variabili, ad indicare un effetto molto equilibrato delle centraline nell'inquinamento.

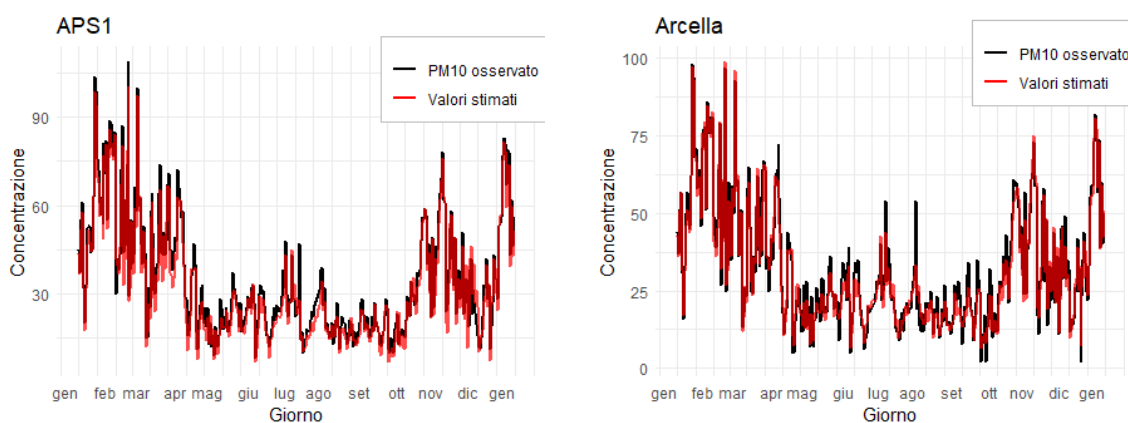


Figura 3.2: Valori di PM10 (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) osservati e stimati dal modello fattoriale a confronto.

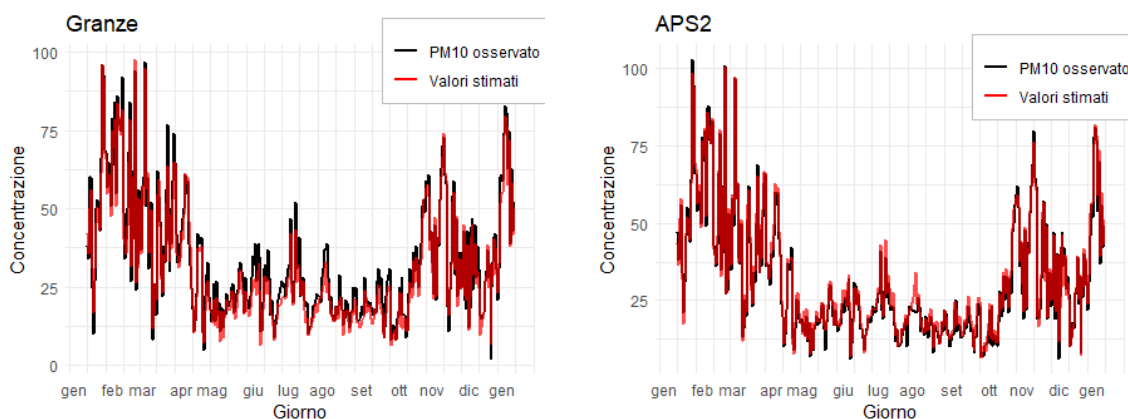


Figura 3.3: Valori di PM10 (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) osservati e stimati dal modello fattoriale a confronto.

Come si può notare dalle immagini in Fig. 3.3, 3.4 e 3.5, i valori di particolato stimati sembrano seguire, in media, discretamente l'andamento del PM10 osservato in tutte e cinque le centraline. In particolare, nelle centraline che hanno registrato valori più elevati di inquinamento da PM10 (APS1, Granze e Arcella), il modello fattoriale tende a sottostimare leggermente l'andamento dell'inquinante, in particolare durante i mesi caldi.

Nelle centraline con valori di particolato più bassi (APS2 e Mandria), i valori stimati dal modello fattoriale sono leggermente superiori in media di quelli osservati, con qualche valore di picco stimato in più rispetto a quelli osservati nel primo trimestre dell'anno solare.

Nelle tabelle sottostanti (Tab 3.1 e 3.2) vengono riportati i valori medi di PM10 e i giorni di superamento del limite giornaliero stimati dal modello fattoriale per le cinque centraline.

Le tre centraline con maggiore concentrazione media, come detto precedentemente, presentano dei valori stimati inferiori, mentre per Mandria e APS2 le concentrazioni risultano leggermente superiori a quelle osservate.

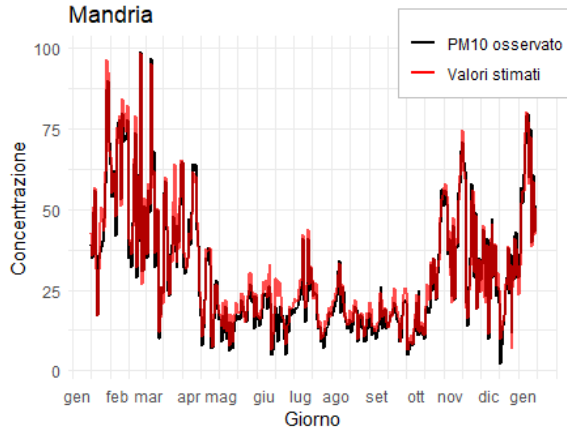


Figura 3.4: Valori di PM10 (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) osservati e stimati dal modello fattoriale a confronto.

Per quanto riguarda il numero di giorni oltre il limite legislativo il modello fattoriale tende ad assegnare lo stesso numero di giorni per tutte le centraline senza cogliere significative differenze.

In linea generale si può concludere che il modello fattoriale ad un fattore si adatta discretamente ai dati riuscendo a cogliere i trend e l'andamento annuale del PM10 e descrive in maniera riassuntiva l'inquinamento nel territorio di Padova, senza però cogliere al meglio le differenze di concentrazione tra le centraline.

Centralina	APS1	APS2	Mandria	Arcella	Granze
Media osservata	35.04	31.45	30.57	32.00	33.81
Media stimata	32.41	32.39	31.79	31.93	31.52

Tabella 3.1: Medie annue PM10 osservate e stimate dal modello FA.

Centralina	APS1	APS2	Mandria	Arcella	Granze
Giorni osservati	75	59	61	70	70
Giorni stimati	68	68	68	68	66

Tabella 3.2: Numero giorni superamento livello giornaliero PM10 osservati e stimati dal modello FA.



## 3.2 Modello Fattoriale Dinamico

### 3.2.1 Teoria

L'analisi fattoriale dinamica mira a spiegare la variazione temporale in un insieme di  $n$  serie storiche osservate utilizzando combinazioni lineari di un insieme di  $m$  *random walk*, dove  $m \ll n$ .

Una serie storica univariata rappresenta "una successione di dati numerici nella quale ogni dato è associato ad un particolare istante od intervallo di tempo  $t$ "<sup>2</sup>, mentre un processo *random walk* è così definito:

$$y_t = x_t + \epsilon_t$$

$$x_t = x_{t-1} + \eta_t$$

con  $x_t$  serie storica, dove  $t = 1, \dots, T$ ,  $\epsilon \sim N(0, r)$  e  $\eta \sim N(0, q)$ .

Nel caso in cui si abbiano  $n$  variabili risposta, esse possono essere analizzate autonomamente rispetto al modello univariato sopra descritto, interpretandole come  $n$  serie storiche separate. Il modello fattoriale dinamico riduce gli  $n$  trend univariati in  $m$  trend comuni (fattori latenti), dove  $1 \leq m < n$ . Il modello viene quindi così definito:

$$\begin{bmatrix} y_{1t} \\ y_{2t} \\ \vdots \\ y_{nt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1t} \\ x_{2t} \\ \vdots \\ x_{mt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{1t} \\ \epsilon_{2t} \\ \vdots \\ \epsilon_{nt} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{1t} \\ x_{2t} \\ \vdots \\ x_{mt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,t-1} \\ x_{2,t-1} \\ \vdots \\ x_{m,t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{1t} \\ \eta_{2t} \\ \vdots \\ \eta_{mt} \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

che in forma matriciale diventa:

$$y_t = Zx_t + a + \epsilon_t \quad (3.5)$$

$$x_t = x_{t-1} + \eta_t \quad (3.6)$$

---

<sup>2</sup>Di Fonzo T.; Lisi F. (2005). *Serie storiche economiche: Analisi statistiche e applicazioni*. Carocci editore, pag. 17.

dove  $y_{it}$  rappresenta la  $i$ -esima variabile risposta al tempo  $t$  ( $i = 1, \dots, n$  e  $t = 1, \dots, T$ ),  $a$  è un parametro di posizione e  $\epsilon_t$  l'errore. Le componenti  $x_{1t}, \dots, x_{mt}$  sono gli  $m$  trend comuni. L'idea è che ognuna delle  $n$  componenti  $y$  è data dalla combinazione lineare dei fattori latenti  $x$  (vettore  $m \times 1$ ) moltiplicati per i *loadings*  $Z$  (matrice  $n \times m$ ) sommati a un parametro di posizione  $a$  e all'errore  $\epsilon$ . Solitamente si assume che  $\epsilon_t \sim N(0, R)$  e  $\eta_t \sim N(0, Q)$ .

Allo scopo di rendere identificabile il modello, vengono inseriti i seguenti vincoli di parametro:

- i primi  $m$  valori di  $a$  sono imposti uguali a 0;
- nelle prime  $m - 1$  righe della matrice dei loadings  $Z$  gli elementi  $z_{ij}$ , ( $i$ -esima riga e  $j$ -esima colonna), vengono impostati a 0 se  $j > i$ ;
- la matrice  $Q = I_m$ .

Queste assunzioni, assieme alle equazioni 3.3 e 3.4, danno luogo al Modello Fattoriale Dinamico.

### 3.2.2 Applicazione

L'analisi fattoriale dinamica è stata applicata ai dati tramite la funzione **MARSS** della stessa libreria di R. Seguendo quanto svolto con l'analisi fattoriale, non sono state applicate rotazioni ai loadings ed è stato scelto un modello con un fattore latente.

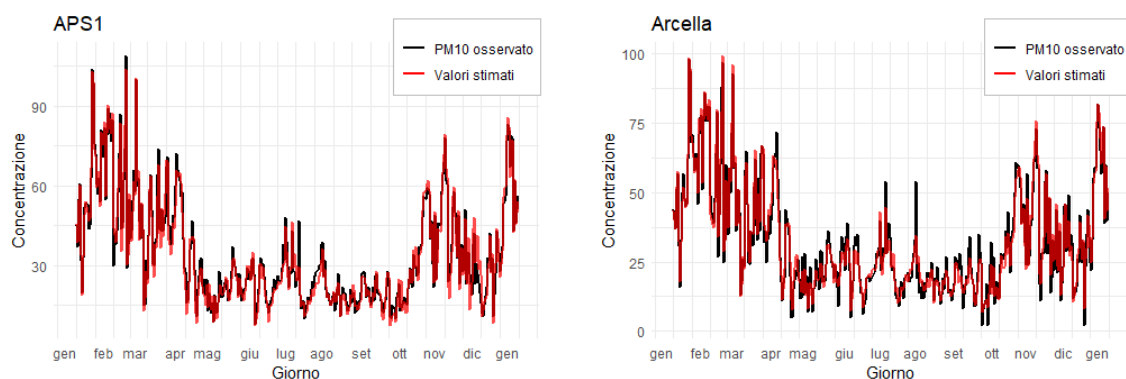


Figura 3.5: Valori di PM10 (in  $\mu g/m^3$ ) osservati e stimati dal modello fattoriale dinamico a confronto.

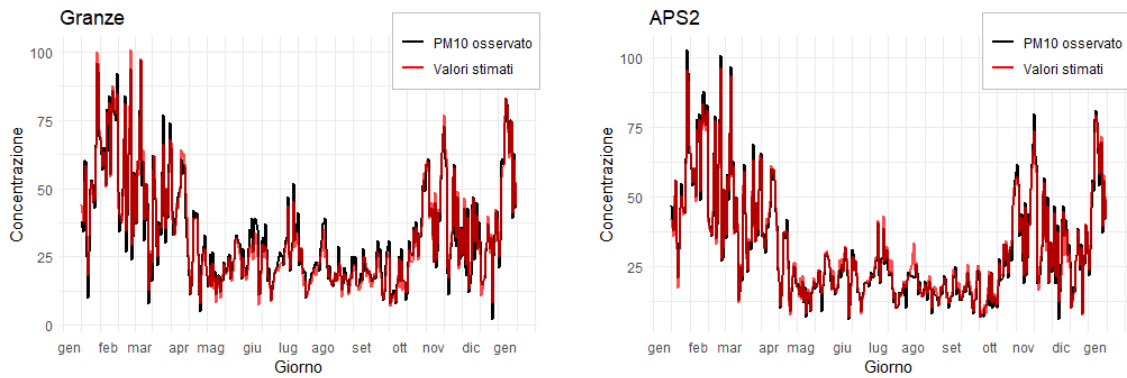


Figura 3.6: Valori di PM10 (in  $\mu g/m^3$ ) osservati e stimati dal modello fattoriale dinamico a confronto.

Come riportato dalle figure sovrastanti, i valori stimati dal modello fattoriale dinamico ad un fattore seguono bene l'andamento annuale del particolato riuscendo a cogliere gran parte delle variazioni, tranne per la centralina di Arcella in alcuni episodi verificatisi nel periodo estivo. Guardando i dati presenti nelle tabelle (Tab 3.3 e 3.4) si nota un miglioramento per quanto riguarda le medie annue dell'inquinante e i giorni di superamento del limite di legge: essi risultano sensibilmente più vicini ai veri valori osservati durante il 2022. A differenza del modello fattoriale, il modello dinamico riesce a cogliere maggiormente le differenze di concentrazione presenti tra le centraline.

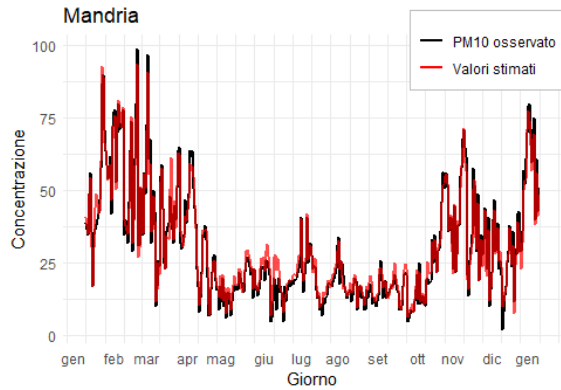


Figura 3.7: Valori di PM10 (in  $\mu g/m^3$ ) osservati e stimati dal modello fattoriale dinamico a confronto.

Centralina	APS1	APS2	Mandria	Arcella	Granze
Media osservata	35.04	31.45	30.57	32.00	33.81
Media stimata	34.14	31.71	30.80	32.66	33.14

Tabella 3.3: Medie annue PM10 osservate e stimate dal modello DFA.

Centralina	APS1	APS2	Mandria	Arcella	Granze
Giorni osservati	75	59	61	70	70
Giorni stimati	76	67	64	69	71

Tabella 3.4: Numero giorni superamento livello gionaliero PM10 osservati e stimati dal modello DFA.

Infine vengono analizzati gli RMSE (*root mean squared error*), ossia le radici quadrate degli errori quadratici medi delle osservazioni, ottenuti dai due modelli al fine di ottenere una valutazione concreta del confronto tra i modelli.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

Centralina	Analisi Fattoriale (FA)	Analisi Fattoriale Dinamica (DFA)
APS1	42.27	9.18
APS2	19.51	6.43
Arcella	16.78	2.92
Granze	40.22	9.18
Mandria	27.37	8.57

Tabella 3.5: RMSE a confronto: FA e DFA.

I valori degli RMSE riportati in Tabella 3.5 si dimostrano nettamente inferiori per il modello fattoriale dinamico, confermando le analisi svolte precedentemente. A seguito dei risultati ottenuti nelle precedenti sottosezioni si conclude che l'utilizzo di un fattore latente/trend riesce a cogliere la quasi totalità dell'inquinamento di Padova e che il modello fattoriale dinamico risulta più preciso nella rappresentazione rispetto al modello fattoriale semplice, anch'esso buono, ma incapace di cogliere sostanziali differenze di concentrazione tra le centraline.

# Capitolo 4

## Conclusioni

L'inquinamento nel 2022 nel territorio di Padova si è manifestato in maniera significativa e impattante. Gli inquinanti registrati nelle maggiori concentrazioni sono risultati il PM10 e l'ozono e in maniera minore anche il PM2.5. I valori delle concentrazioni degli inquinanti, ad eccezione dell'ozono, hanno risentito di variazioni stagionali: nei mesi di Gennaio, Febbraio, Marzo, Ottobre, Novembre e Dicembre sono state registrate le maggiori concentrazioni medie e il maggior numero di superamenti della soglia limite, per poi subire dei netti abbassamenti durante i restanti mesi dell'anno solare. Per l'ozono la distribuzione della concentrazione è stata opposta a quella appena descritta e in stretta correlazione con quella della temperatura media giornaliera: concentrazioni basse durante i mesi invernali e picchi nei mesi caldi. A livello giornaliero l' $O_3$  presenta un andamento crescente tra le ore 8 e le 16 per poi calare durante le ore serali. Gli ossidi di azoto non hanno mai fatto registrare valori da segnalare a livello della salute umana, ma presentano un andamento giornaliero definito, con i picchi di inquinamento maggiori registrati nelle fasce orarie più trafficate. Le variabili meteorologiche quali la temperatura, l'umidità e l'assenza di precipitazioni per gran parte dell'anno, hanno contribuito, assieme all'opera dell'uomo (automobili, riscaldamento, fabbriche), alla verifica di determinati livelli di inquinamento. L'utilizzo del modello fattoriale dinamico ad un solo trend comune ha permesso di spiegare la quasi totalità dell'inquinamento da PM10 nel territorio padovano e ha apportato delle migliorie rispetto al modello fattoriale classico, che non tiene conto della componente temporale.

# Bibliografia

- Johnson R.; Wichern D. (2014). *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Sixth Edition. Pearson Education.
- Di Fonzo T.; Lisi F. (2005). *Serie storiche economiche: Analisi statistiche e applicazioni*. Carocci editore.
- Holmes E. E.; Scheuerell M. D.; Ward E. J. (2020). *Applied Time Series Analysis for Fisheries and Environmental Sciences*.
- Pistollato S.; Zagolin L.; De Zolt S.; Innocente E.; Millini R.; Zemello C. (2023). *Relazione regionale della qualità dell'aria. Anno di riferimento: 2022*. Dipartimento Regionale Qualità dell'Ambiente, Unità Organizzativa Qualità Aria.
- Revelle, W. (2023). *Package 'psych': Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research*. Reference Manual (Version 2.3.6) from <https://cran.r-project.org/web/packages/psych/psych.pdf>
- Holmes E. E.; Ward E. J.; Scheuerell M. D.; Wills K. (2023). *Package MARSS: Multivariate Autoregressive State-Space Modeling*. Reference Manual (Version 3.11.8) from <https://cran.r-project.org/web/packages/MARSS/MARSS.pdf>
- Minutolo A.; Frasso C.; Pandolfo E. (2023) *Mal'aria di città: cambio di passo cercasi*. Legambiente
- World Health Organization (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva
- sito web ARPAV: <https://www.arpa.veneto.it/>