

Tesi di laurea

Gianpaolo Busetto

13 febbraio 2004

Indice

1	Obiettivi e articolazione della tesi	9
2	Le sostanze inquinanti	13
2.1	Il monossido di carbonio (CO)	13
2.2	Il biossido di azoto (NO ₂)	15
2.3	L'ozono (O ₃)	17
2.4	Le polveri atmosferiche (PTS, PM)	19
2.5	Il biossido di zolfo (SO ₂)	21
2.6	Direttive nazionali ed europee	22
3	Analisi preliminare (Anno 2000-2002)	25
3.1	La città di Verona	25
3.2	Le centraline di rilevazione	25
3.3	La scelta dei dati	27
3.4	Il modello statistico	28
3.5	Analisi descrittiva - triennio 2000-2002	30
3.6	Il monossido di carbonio	31
3.7	Il biossido di azoto	34
3.8	L'ozono	37
3.9	Il particolato totale sospeso	38
3.10	Il biossido di zolfo	41
3.11	Riepilogo degli inquinanti	43
4	Analisi dell'intervento - Anno 2003	45
4.1	Il blocco del traffico a Verona	45
4.2	Analisi descrittiva	47
4.3	Il monossido di carbonio	48
4.4	Il biossido di azoto	51
4.5	L'ozono	53
4.6	Il particolato totale sospeso	56
4.7	Il biossido di zolfo	58

5 Risultati	61
5.1 I risultati della regressione	61
5.2 Conclusioni	62
5.3 Problemi metodologici	62
Appendice	63
Modelli statistici	63
Modello Lineare Generalizzato (GLM)	63
Il modello SARIMA	64
Il criterio AIC	65
Il test di autocorrelazione dei residui	66
L'output di R	66
Il modello lineare	66
Le serie storiche	68
Bibliografia	69

Elenco delle tabelle

3.1	Disponibilità dei dati nelle centraline	27
3.2	Dati ambientali - analisi descrittiva (2000/2002)	30
3.3	Matrice di correlazione per i dati ambientali (2000/2002) . . .	31
3.4	Serie storiche per gli inquinanti - riepilogo (2000/2002)	43
4.1	Calendario dei giorni di blocco della circolazione a Verona - anno 2003	46
4.2	Dati ambientali - analisi descrittiva (2003)	47
4.3	Dati inquinanti ambientali - variazioni percentuali dal triennio 2000-2002 all'anno 2003	47
4.4	Matrice di correlazione per i dati ambientali (2003)	48
5.1	Riepilogo della significatività di I_t per gli inquinanti principali	61

Elenco delle figure

2.1	CO - "giorno tipo" (grafico 2002)	14
2.2	NO ₂ - "giorno tipo" (grafico 2002)	16
2.3	O ₃ - "giorno tipo" (grafico 2002)	17
2.4	PTS - "giorno tipo" (grafico 2002)	19
2.5	SO ₂ - "giorno tipo" (grafico 2002)	21
3.1	Collocazione delle centraline	27
3.2	umidità - grafico 2000/2002	32
3.3	temperatura - grafico 2000/2002	32
3.4	CO - grafico 2000/2002	33
3.5	CO - PACF dei residui di regressione	34
3.6	CO - diagnostica sui residui (ACF)	34
3.7	NO ₂ - grafico 2000/2002	35
3.8	NO ₂ - PACF dei residui di regressione	36
3.9	NO ₂ - diagnostica sui residui (ACF)	36
3.10	O ₃ - grafico 2000/2002	37
3.11	O ₃ - PACF dei residui di regressione	38
3.12	O ₃ - diagnostica sui residui (ACF)	39
3.13	PTS - grafico 2000/2002	39
3.14	PTS - PACF dei residui di regressione	40
3.15	PTS - diagnostica sui residui (ACF)	41
3.16	SO ₂ - grafico 2000/2002	41
3.17	SO ₂ - PACF dei residui di regressione	42
3.18	SO ₂ - diagnostica sui residui (ACF)	43
4.1	CO - grafico 2003	48
4.2	CO - residui di regressione (2003)	49
4.3	CO - residui modello serie storiche (2003)	50
4.4	NO ₂ - grafico 2003	51
4.5	NO ₂ - residui di regressione (2003)	52
4.6	NO ₂ - residui modello serie storiche (2003)	53
4.7	O ₃ - grafico 2003	53

4.8	O ₃ - residui di regressione (2003)	54
4.9	O ₃ - residui modello serie storiche (2003)	55
4.10	PTS - grafico 2003	56
4.11	PTS - residui di regressione (2003)	57
4.12	PTS - residui modello serie storiche (2003)	58
4.13	SO ₂ - grafico 2003	58
4.14	SO ₂ - residui di regressione (2003)	59
4.15	SO ₂ - residui modello serie storiche (2003)	60

Capitolo 1

Obiettivi e articolazione della tesi

Il problema dell'inquinamento atmosferico, e di conseguenza delle politiche tese a migliorare tramite adeguati provvedimenti la qualità dell'aria, sta assumendo in questi ultimi tempi un'importanza sempre più rilevante, soprattutto nel contesto delle grandi città. Numerosi studi hanno provato l'esistenza della correlazione tra la concentrazione di inquinanti nell'atmosfera e il peggioramento delle condizioni di salute della popolazione (misurate in termini di decessi o degenze per malattie cardiocircolatorie) e questa nuova consapevolezza ha obbligato i nostri organi amministrativi a far fronte concretamente al problema delle emissioni inquinanti di origine antropica.

Come è naturale, gli sforzi più intensi nelle politiche di miglioramento della qualità dell'aria si sono concentrati sul problema del traffico veicolare, dal momento che esso rappresenta la principale fonte di inquinamento a livello del suolo nelle aree urbane, contribuendo praticamente alla totalità della concentrazione atmosferica del CO, al 75% del NO₂ e a sostanziali frazioni di concentrazione delle altre sostanze inquinanti. La consapevolezza del contributo preponderante del traffico veicolare all'aumento della concentrazione degli inquinanti ha indotto organismi nazionali e sovranazionali a indicare come priorità nelle politiche ambientali provvedimenti di riduzione del volume del traffico. In accordo con queste linee guida molti paesi europei hanno introdotto varie forme di limitazione: in Italia, ad esempio, le leggi prescrivono il blocco del traffico quando la concentrazione atmosferica degli inquinanti eccede determinate soglie di allarme; in questo caso il rimedio consiste nell'impedire alle vetture la circolazione nelle strade più trafficate. Ad esempio Verona, città su cui si concentra l'attenzione di questo studio, ha adottato a più riprese provvedimenti di blocco del traffico che la hanno interessata a partire dall'anno 2003.

L'analisi dei risultati in termini di 'efficacia' collegati all'adozione dei provvedimenti di chiusura del traffico richiede un'accurata conoscenza del fenomeno sia da un punto di vista *statico-descrittivo* (attraverso il controllo quotidiano delle soglie d'attenzione) che da un punto di vista *dinamico-interpretativo* nella loro *evoluzione temporale*, tenuto conto delle manifestazioni di alcuni dati meteorologico-ambientali di fondamentale importanza nella spiegazione.

Partendo da questa premessa la tesi si pone l'obiettivo di analizzare l'efficacia dei provvedimenti di blocco del traffico adottati nella città di Verona nell'anno 2003 focalizzando l'attenzione sull'effettiva diminuzione della concentrazione di inquinanti atmosferici rilevata da apposite centraline gestite dall'ARPAV.

Dopo aver attentamente analizzato i più comuni agenti inquinanti originati dal traffico veicolare e i provvedimenti emanati dalle autorità europee e italiane per limitarne la concentrazione, si passerà all'analisi vera e propria. Per valutare adeguatamente l'impatto dell'intervento 'blocco del traffico' a Verona nel periodo oggetto del nostro studio si è scelto un lasso di tempo privo di interventi di questo tipo — individuato nel triennio 2000-2002, tale da fungere da 'controllo'. Stimati i parametri della serie temporale relativa a questo triennio si intende analizzare alla luce di questi dati il 2003, in modo da poter indagare la significatività statistica della variabile 'intervento'.

In altre parole esaminato l'andamento del triennio precedente, l'anno di interesse (il nostro 'caso') viene confrontato con esso per identificare eventuali picchi negativi di una qualche rilevanza in corrispondenza dei giorni di blocco del traffico.

In questo lavoro saranno scorporati dai valori della concentrazione degli inquinanti gli effetti delle variabili atmosferiche, e si studierà la serie storica dei residui in modo da calcolare la validità dei provvedimenti di blocco del traffico al netto dell'effetto confondente delle variabili ambientali. Non è stato possibile analizzare il contributo 'statistico' alla situazione esaminata imputabile alle caratteristiche del parco veicolare effettivamente circolante a Verona nel quadriennio considerato per difficoltà oggettive di reperimento di dati specifici.

Per le elaborazioni statistiche è stato utilizzato il pacchetto *R versione 1.8.0 - A Language and Environment* ©2003, scaricabile gratuitamente al sito www.r-project.org.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno sostenuto e aiutato a raggiungere questo importante obiettivo, soprattutto i miei familiari che hanno sempre creduto in me.

Colgo l'occasione per ringraziare per la loro cortesia e disponibilità:

- il prof. Francesco Lisi del Dipartimento di Scienze Statistiche di Padova, per gli utili suggerimenti riguardanti le serie storiche e la valutazione degli interventi;
- il sig. Andrea Salomoni dell'Azienda Regionale Protezione Ambientale di Verona, per la disponibilità dei dati;
- il sig. Riccardo Tardiani della sezione Ecologia del Comune di Verona e la dott.ssa Simona Barone dell'Ufficio Traffico.

Da ultimo ringrazio per il sostegno e la pazienza dimostratami tutti i miei amici e i miei compagni universitari, senza l'aiuto dei quali non è esagerato dire che questa opera non sarebbe mai stata portata a compimento.

Capitolo 2

Le sostanze inquinanti

L'aria è un miscuglio di gas e per questo è difficile definirne la composizione in termine di salubrità per tutti gli organismi viventi. Tuttavia in via teorica si è stabilito che si possa definire come aria pulita e secca quell'aria la cui composizione risulti pari al 78% d'azoto, al 21% di ossigeno e al restante 1% di altri gas quali argo, neon, metano, anidride carbonica, eccetera. L'uomo, con l'aumentare dell'industrializzazione e delle attività ad essa connesse, sta intaccando negli ultimi decenni tale composizione introducendo nell'aria nuovi componenti che derivano dalle varie attività umane. Relativamente al *traffico veicolare*, per esempio, la combustione non completa della benzina di un'automobile immette nell'atmosfera una quantità non trascurabile di sostanze tossiche quali l'ossido di carbonio e d'azoto.

Se l'organismo umano respira piccole quantità di aria inquinata, i polmoni sono in grado di liberarsi da queste contaminazioni mediante l'azione di corpuscoli che secernono il muco, espellendo così anche le sostanze inquinanti. Il problema sorge quando le mucose vengono intaccate e le particelle tossiche si accumulano provocando irritazioni e infezioni.

Questo capitolo è interamente dedicato a descrivere le sostanze presenti nell'aria accusate di causare danni alla salute dell'uomo, ovvero il monossido di carbonio, il biossido d'azoto, l'ozono, il particolato (o "polveri sospese") e il biossido di zolfo.

2.1 Il monossido di carbonio (CO)

Il monossido di carbonio è un gas incolore e inodore ed è uno dei più comuni inquinanti dell'aria. Esso si produce durante le combustioni, in difetto d'aria, dei combustibili e delle sostanze organiche in generale. Fra le fonti antropiche vanno ricordati tutti i processi di combustione degli idrocarburi. La fonte

più rilevante è costituita sicuramente dai veicoli a benzina (circa l'80% delle emissioni totali).

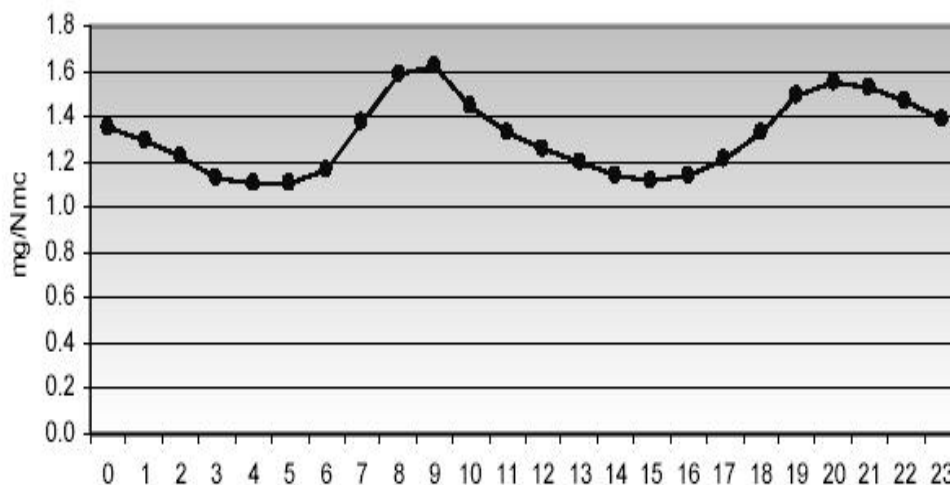


Figura 2.1: CO - "giorno tipo" (grafico 2002)

Va fatto presente che l'inquinamento da CO prodotto dagli autoveicoli varia soprattutto in funzione del regime di marcia.

I livelli naturali di CO oscillano tra 0,01 e 0,23 mg/m³ ed esso permane in atmosfera per circa 1/3 mesi.

Il monossido di carbonio è un gas molto tossico con effetto asfissiante. Una volta respirato, si lega all'emoglobina riducendo l'apporto dell'ossigeno ai tessuti e agli organi periferici e in particolare al cuore e al cervello. Le esposizioni a basse concentrazioni come quelle causate dal traffico veicolare coinvolgono tutta la popolazione e provocano una lenta intossicazione da CO che si manifesta con sintomi nervosi e respiratori. Sono stati osservati peggioramenti nei soggetti che soffrono di malattie cardiovascolari.

La normativa italiana riporta quanto segue:

- **28 marzo 1983:** il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri livello di attenzione e di allarme per il CO a 10 mg/m³ (valore medio di 8 ore) e 40 mg/m³ (media oraria) rispettivamente.
- **20 maggio 1991:** il Decreto Ministeriale indica la necessità di valutare il CO sia nelle reti di rilevamento relative ad aree urbane, sia in quelle relative ad aree industriali. Per il CO in undici grandi città sono stati stabiliti i livelli di attenzione pari a 15 mg/m³ e i livelli di allarme pari a 30 mg/m³ (valori medi per le 24 ore da non superarsi in almeno il 50% delle stazioni di misura)

- **25 novembre 1994:** nel Decreto Ministeriale vengono aggiornate, nelle aree urbane, le norme tecniche in materia di limiti di concentrazione, di livelli di attenzione e di allarme di cui al DM 15 aprile 1994 stabilendo il livello di attenzione a 15 mg/m³ (media oraria), e il livello di allarme a 30 mg/m³, questa volta su media oraria.
- **2 aprile 2002:** un nuovo Decreto Ministeriale (n.60) recepisce le direttive dell'Unione Europea fissando il massimo della media mobile giornaliera sulle 8 ore a 10 mg/m³.

2.2 Il biossido di azoto (NO₂)

Gli ossidi di azoto presenti nell'atmosfera sono l'ossido nitroso (N₂O), l'ossido nitrico o monossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO₂).

Mentre l'ossido nitroso non viene considerato come inquinante per la sua scarsa pericolosità, il monossido e il biossido d'azoto sono molto dannosi per la salute umana.

Il monossido di azoto (NO) è un gas incolore e inodore prodotto ad alte temperature dalla combinazione di azoto e ossigeno. Circa il 30% della quantità di NO emessa in atmosfera proviene da sorgenti antropiche. La concentrazione di fondo in atmosfera varia da 0,2 a 10 µg/m³, mentre il tempo di permanenza può essere di 2 o 5 giorni. Infatti questo inquinante viene rimosso in seguito a processi ossidativi che lo convertono in NO₂, e successivamente, in presenza di acqua, di acido nitrico (HNO₃).

La principale sorgente antropica di produzione del monossido di azoto è costituita da tutti i processi di combustione realizzati ad elevate temperature (superiori cioè a 1000°C). È proprio l'alta temperatura e il rapido raffreddamento dei gas prodotti nella combustione a favorire la reazione tra azoto e ossigeno. Quando vengono rilasciati fumi di combustione contenenti NO si mescolano con l'aria e una parte del monossido di azoto reagisce con l'ossigeno per formare il biossido di azoto.

Di particolare interesse è il *ciclo fotolitico del biossido di azoto* costituito da tre reazioni chimiche: la prima riguarda le radiazioni solari UV ($h\nu$) che irradia il biossido di azoto, trasformando quest'ultimo in monossido di azoto e ossigeno atomico O⁻ (un gas estremamente reattivo). Infatti, come viene indicato dalla seconda reazione, l'ossigeno atomico a contatto con l'ossigeno molecolare produce ozono. La terza reazione riguarda proprio l'ozono prodotto, che a sua volta reagisce con il monossido di azoto e genera di nuovo il biossido di azoto.

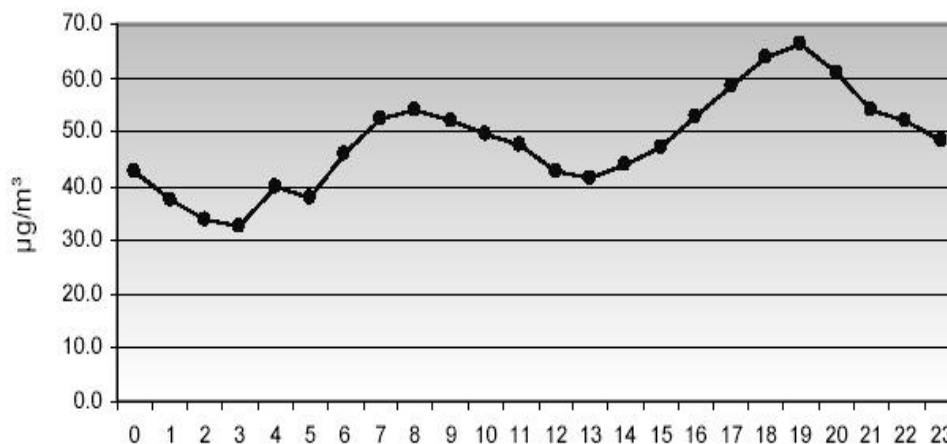
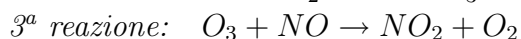
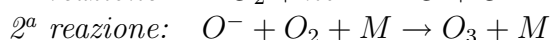
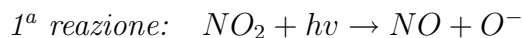


Figura 2.2: NO₂ - "giorno tipo" (grafico 2002)



Queste tre reazioni costituiscono un ciclo chiuso in cui le concentrazioni ambientali di NO, O₃ e NO₂ non subiscono piccole variazioni poiché si formano e si consumano in ugual misura.

L'NO₂ è un gas di colore rosso bruno con odore irritante; i suoi effetti sull'organismo umano riguardano principalmente l'apparato respiratorio. Può essere percepito in condizioni di concentrazioni maggiori a 0,2 µg/m³; tuttavia, essendo possibile assuefarsi all'odore, la soglia di percezione può salire fino a 50 µg/m³. Concentrazioni di biossido di azoto pari a 40-100 µg/m³ provocano irritazioni agli occhi, mentre concentrazioni pari a 300 µg/m³ possono provocare forti irritazioni all'apparato respiratorio. Il particolare danno causato dall'NO₂ è caratterizzato dal fatto che, dopo la fase preliminare di irritazione, segue un temporaneo miglioramento, e solo dopo 3-8 ore può manifestarsi un edema polmonare.

Per questi motivi la normativa italiana ha cercato di tutelare la salute pubblica emanando alcuni decreti allo scopo di limitare la concentrazione di questi pericolosi inquinanti.

- **25 novembre 1994:** un Decreto ministeriale ha aggiornato le norme tecniche in materia di limiti di concentrazione per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane precedentemente fissati dal DM del 15 aprile

1994 fissando le soglie dei livelli di attenzione e di allarme per l'NO₂ a 200 e 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ rispettivamente.

- **2 aprile 2002:** il DM n.60 ha aggiornato le norme tecniche in materia di limiti di concentrazione per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane precedentemente fissati dal DM del 15 aprile 1994 ribadisce il livello di allarme ai 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per tre ore consecutive. Impone inoltre che non sia superata la media oraria di 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e la media annuale di 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.3 L'ozono (O₃)

L'ozono è un gas formato da tre atomi di ossigeno (O₃). In natura si trova in concentrazioni elevate negli strati alti dell'atmosfera terrestre (da 15 a 60 km di altezza) dove costituisce una fascia che protegge dalla radiazione ultravioletta del sole, impedendo il passaggio di raggi pericolosi per la nostra salute. Negli strati bassi dell'atmosfera, invece, l'ozono è solitamente presente in basse concentrazioni, fatta eccezione per le aree in cui la presenza di alcuni inquinanti chimici, in concomitanza con determinati fattori meteo-climatici, può indurre la formazione e il conseguente aumento della concentrazione di questa sostanza.

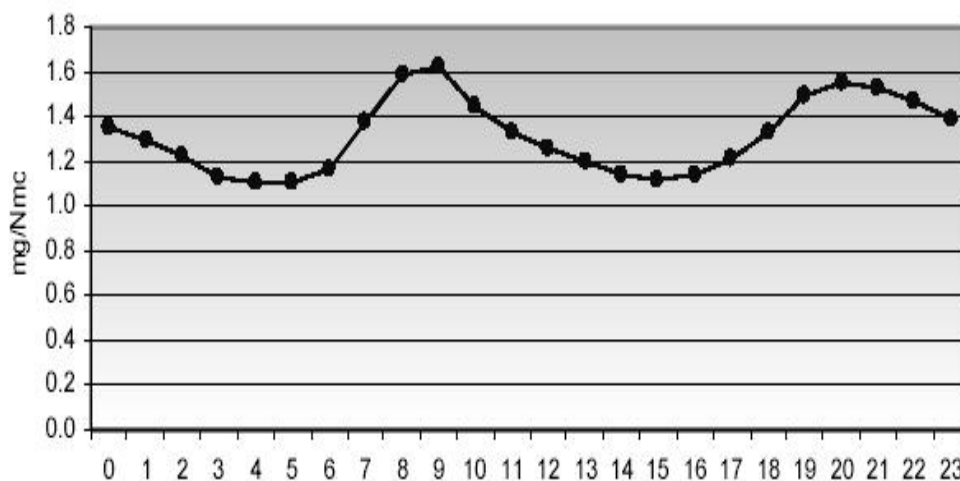


Figura 2.3: O₃ - "giorno tipo" (grafico 2002)

È importante specificare che, nella bassa atmosfera, l'ozono è un agente inquinante e non è prodotto direttamente dall'attività umana, ma è originato

dalle reazioni fotochimiche tra inquinanti primari innescate dai raggi del sole. Come si può osservare dalla realtà di tutti i giorni, la concentrazione di ozono è soggetta a sistematiche variazioni stagionali. Infatti, particolari condizioni di alta pressione, elevate temperature e scarsa ventilazione favoriscono il ristagno e l'accumulo degli inquinanti, mentre l'irraggiamento solare dà inizio alle reazioni fotochimiche che causano l'aumento della presenza di ozono. Al contrario, le concentrazioni più basse di questa sostanza si registrano in inverno.

Il livello con cui l'ozono si presenta in natura dovrebbe essere compreso tra i 20 e gli 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Contrariamente a quanto si è portati a credere secondo il senso comune, i valori più elevati di questo inquinante si raggiungono nelle zone meno interessate dalle attività umane. Vediamo, per esempio, come il monossido d'azoto (gas prodotto dal traffico veicolare e dai grandi impianti di combustione) a contatto con l'ozono produca biossido di azoto e O_2 :



Come si può dunque notare l'ozono viene significativamente trasformato nella reazione.

Gli effetti negativi dell'ozono sulla salute variano in base al tempo di esposizione e alla concentrazione presente nell'aria, provocando in ogni caso danni non trascurabili. Questi possono essere forti irritazioni alle mucose (al naso, alla gola, all'apparato respiratorio), nonché tosse e un senso di pressione al torace. Quelli appena elencati sono gli effetti acuti, mentre le conseguenze croniche non sono ancora ben note.

A causa degli effetti dell'ozono sull'uomo e sulla vegetazione, confermati da numerosi studi epidemiologici, la normativa ha posto negli anni diverse soglie alla concentrazione di O_3 :

- **28 marzo 1983:** il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri fornisce gli standard di qualità dell'aria per alcuni inquinanti. Per l'ozono la concentrazione media oraria di 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ non dev'essere superata più di una volta al mese.
- **15 aprile 1994:** il Decreto del Ministro dell'Ambiente n°107 definisce le soglie di attenzione e di allarme nella gestione di episodi acuti di inquinamento atmosferico, pari rispettivamente a 180 e 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- **16 maggio 1996:** il Decreto del Ministro dell'Ambiente indica i livelli di ozono accettabili per non danneggiare la salute e la vegetazione: 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il valore medio su 8 ore per la salute degli individui, 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il valore medio su un'ora e 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il valore medio su 24 ore per la protezione della vegetazione.

2.4 Le polveri atmosferiche (PTS, PM)

Le polveri atmosferiche sono una miscela di particelle solide e liquide, sospese in aria, che variano per caratteristiche dimensionali, composizione e provenienza. Le particelle che costituiscono le polveri atmosferiche derivano in parte da una serie di reazioni chimiche e fisiche che avvengono nell'atmosfera, e in parte vengono emesse da sorgenti antropiche; a seconda del loro processo di formazione possono variare sia per dimensioni che per composizione chimica. Per distinguere le varie tipologie di polveri vengono utilizzati acronimi che sintetizzano le loro caratteristiche, tra i quali i più usati sono PTS (polveri totali sospese) e PM (dall'inglese *particulate matter*, in italiano "particolato").

Le polveri totali sospese sono un insieme molto eterogeneo di particelle solide e liquide che restano appunto in sospensione nell'aria a causa delle ridotte dimensioni. Le polveri vengono suddivise per classi in base al diametro aerodinamico delle particelle, misurato in micrometri (μm), e se ne quantifica la presenza in aria in termini di concentrazione, misurata in microgrammi di particelle in sospensione per metro cubo d'aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Normalmente il diametro aerodinamico delle particelle può variare da un valore minimo di $0,005 \mu\text{m}$ fino ad un massimo di $100 \mu\text{m}$. Si possono pertanto distinguere le polveri $\text{PM}_{2.5}$ (dette polveri sottili) con diametro aerodinamico inferiore a $2,5 \mu\text{m}$, dalle polveri PM_{10} con diametro aerodinamico inferiore a $10 \mu\text{m}$.

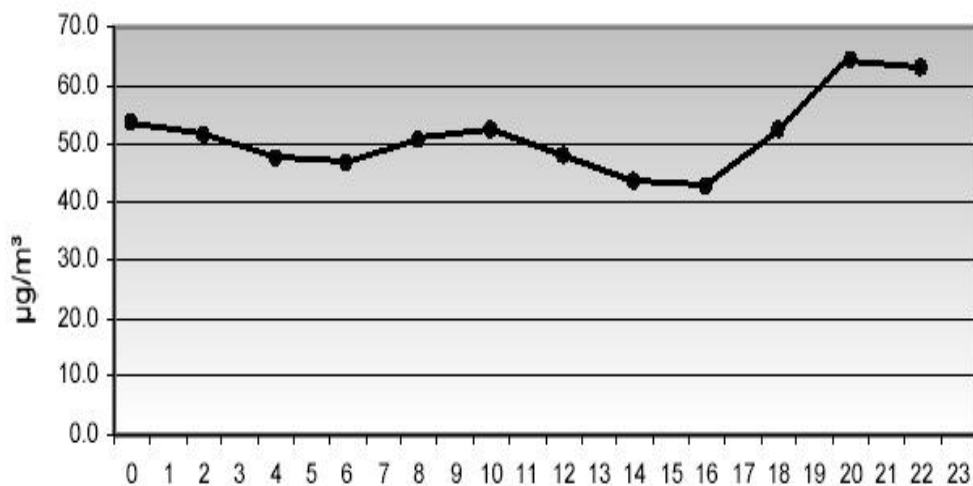


Figura 2.4: PTS - "giorno tipo" (grafico 2002)

Nelle numerose analisi svolte finora si è concentrata l'attenzione su questi

due tipi di polveri piuttosto che sul PTS poiché tanto più le dimensioni delle particelle sono ridotte, tanto più penetrano nei polmoni causando effetti dannosi sulla salute umana.

Le polveri PM_{2.5} e PM₁₀ sono prodotte da un'ampia varietà di sorgenti, soprattutto antropiche. Secondo l'Agenzia Nazionale per il Controllo dell'Ambiente (ANPA) il 78% dell'inquinamento da polveri sottili è attribuibile al traffico urbano, mentre l'Organizzazione Mondiale della Sanità ne attribuisce fino al 50%.

Per quanto concerne gli effetti sulla salute, studi clinico-epidemiologici dimostrano che elevati livelli di PM₁₀ possono incrementare il numero e la gravità degli attacchi d'asma, causano o aggravano bronchiti e altre malattie ai polmoni, riducono la capacità dell'organismo di combattere le infezioni e una prolungata esposizione a basse concentrazioni può indurre il cancro. Le polveri PM₁₀ sono dette anche polveri *inalabili* poiché sono in grado di penetrare nel tratto superiore dell'apparato respiratorio che va dal naso alla laringe, mentre le polveri PM_{2.5}, denominate anche *respirabili*, sono in grado di penetrare nel tratto inferiore dell'apparato respiratorio, dalla trachea fino agli alveoli polmonari.

Di seguito riportiamo quanto è stato finora imposto dalla normativa italiana per tutelare la salute pubblica riguardo le polveri PM:

- **25 novembre 1994:** il Decreto del Ministro dell'Ambiente ha identificato le aree urbane ove è obbligatorio il monitoraggio annuale delle polveri PM₁₀ e stabilisce che la concentrazione media annuale rilevata in almeno tre diversi siti di monitoraggio presenti in ciascun ambito urbano non debba superare l'obiettivo di qualità pari a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- **21 aprile 1999:** il Decreto del Ministro dell'Ambiente individua i criteri ambientali e sanitari in base ai quali i Sindaci possono approvare misure di limitazione della circolazione veicolare. Il superamento dell'obiettivo di qualità dell'aria per le polveri PM₁₀ in una o più aree del centro può far scattare la misura di limitazione della circolazione per i veicoli diesel.
- **2 aprile 2002:** il DM n.60 impone il valore limite di 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per la media sulle 24 ore e i 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per la media annuale, da ridurre a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a partire dal 1/1/2005.

Vista la gravità dei danni provocati nell'organismo umano, la normativa italiana ha dunque fissato un valore soglia annuale definito "obiettivo di qualità" per il PM₁₀ che indica un valore di concentrazione medio annuale a cui tendere progressivamente nel tempo attraverso politiche di contenimento.

2.5 Il biossido di zolfo (SO₂)

Lo zolfo è un elemento relativamente abbondante che ha un ruolo importante nel ciclo ambientale. Nell'atmosfera i composti principali dello zolfo sono l'anidride solforosa o biossido di zolfo (SO₂), l'acido solforico (H₂S) e i solfati (SO₄).

L'SO₂ è un gas incolore non infiammabile e di odore fortemente soffocante. L'emissione di questo inquinante proviene principalmente dai motori alimentati a gasolio.

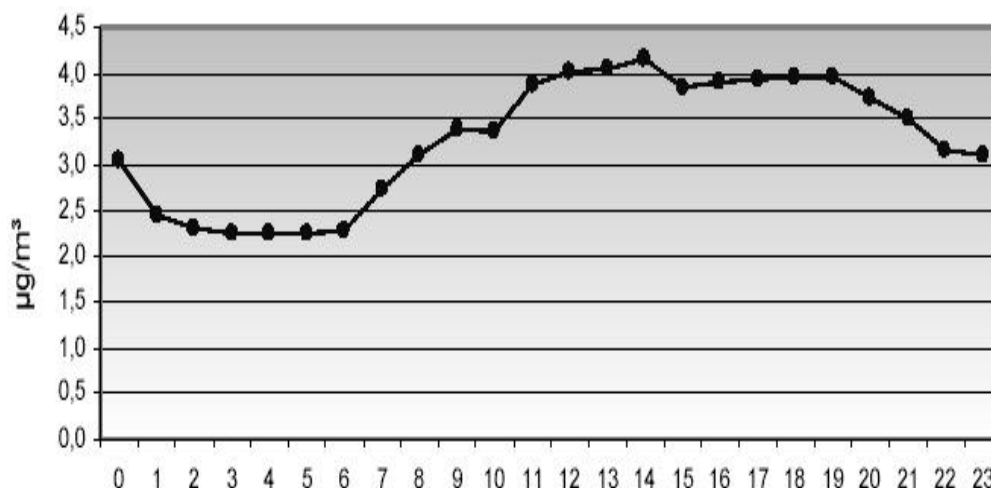


Figura 2.5: SO₂ - "giorno tipo" (grafico 2002)

I composti dello zolfo non si accumulano nell'atmosfera, ma vanno a depositarsi al suolo in quanto parte della formazione delle piogge acide. Questo pericoloso fenomeno ha effetti molto dannosi soprattutto la vegetazione in quanto contribuisce al degrado della clorofilla, riduce la fotosintesi, accelera il ritmo respiratorio e altera il metabolismo delle proteine con conseguenze dannose.

I danni provocati dal biossido di zolfo alla salute riguardano principalmente l'apparato respiratorio. Ha un effetto irritante sulle prime vie aeree e può causare costrizioni dei bronchi in soggetti predisposti anche in basse concentrazioni nell'ordine di poche centinaia di µg/m³. Particolarmente sensibili risultano essere le persone che soffrono di asma. Può inoltre aggravare le condizioni cardiovascolari di un individuo a causa della sua incidenza sulla funzione respiratoria.

Gli edifici stessi vengono notevolmente danneggiati da questo gas presente nell'atmosfera. I monumenti di pietra calcarea sono i più colpiti perché il

carbonato di calcio, di cui sono costituiti, reagisce con l'acido solforico e si trasforma in solfato di calcio il quale viene facilmente dilavato dalle acque piovane rendendo la superficie pronta per essere ulteriormente aggredita.

A seguito degli interventi operati sulla qualità dei combustibili (DPCM 8 marzo 2002), nelle aree urbane i livelli tipici di concentrazione di biossido di zolfo attualmente non superano qualche decina di $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Per quanto riguarda la normativa italiana, i livelli di allarme e attenzione sono stati stabiliti nel 1994 e modificati nel 2002.

- **15 aprile 1994:** il Decreto Ministeriale ha posto il livello di attenzione e di allarme rispettivamente pari a 125 e 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
- **2 aprile 2002:** il Decreto ministeriale n.20 impone che la media oraria non possa superare più di 24 volte l'anno il limite dei 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e la media giornaliera non possa superare più di tre volte il limite di 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Vengono inoltre stabiliti un "limite annuale" e un "limite invernale" di 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per la protezione degli ecosistemi. La soglia di allarme viene posta a 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ rilevati per tre ore consecutive.

Ai sensi del Decreto del Presidente della Repubblica 203/88 il limite di 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ non può essere superato per più del 2% delle misure valide su base annua e si devono prendere tutte le contromisure valide per evitare che questo valore sia superato per più di tre giorni consecutivi.

2.6 Direttive nazionali ed europee

La direttiva europea 1999/30/CE pubblicata dalla Gazzetta Ufficiale n°L 163/41 del 29 giugno 1999 sulla qualità dell'aria in termini di misurazione dell'inquinamento atmosferico definisce le modalità di osservazione di uso preferenziale di SO_2 , NO_2 , PM e CO come segue:

- per l' SO_2 si deve fare riferimento al massimo orario, alla media sulle 24 ore e alla media annuale;
- per l' NO_2 si considera il massimo orario e la media annuale;
- per il PM_{10} va rilevata la media sulle 24 ore e la media annuale;
- per il CO viene calcolata la media mobile su otto ore.

Quanto all'ozono il DM del 16 maggio 1996 (GU n°163 del 13 luglio 1996 - *Attivazione di un sistema di sorveglianza di inquinamento da ozono*) prevede che la concentrazione di O_3 nell'aria possa essere stimata dalla media mobile

riferita alle 8 ore. I valori soglia di concentrazione giornaliera e annuale riportati nella direttiva UE sono i seguenti:

Valore limite	Giornaliero	Annuale
SO ₂	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO ₂	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM ₁₀	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

I valori limite del monossido di carbonio e dell'ozono sono indicati nel DM del 16 maggio 1996 e nella direttiva 2000/69/CE del 16 novembre 2000 e sono i seguenti:

Valore limite	per 8 ore
CO	mg/m^3 10
O ₃	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 110

In seguito il Decreto Ministeriale n.60 del 2/4/2002 ha recepito le disposizioni ricevute dall'Unione Europea ratificandole nella normativa specificata in precedenza inquinante per inquinante e tuttora in vigore.

Capitolo 3

Analisi preliminare (Anno 2000-2002)

3.1 La città di Verona

Verona è una città capoluogo di provincia, situata ai piedi dei monti Lessini, allo sbocco della valle dell'Adige. Con i suoi 257.477 abitanti (dati ISTAT relativi all'1/1/2001) e 120 km² di superficie è un importante nodo viario, centro commerciale e di servizi, nonché sede di importanti industrie editoriali e metalmeccaniche. La provincia è attraversata da Nord a Sud e da Est a Ovest da due arterie di importanza nazionale: l'autostrada del Brennero, che rappresenta il collegamento principale fra il Sud della penisola e la Germania, e l'autostrada Brescia-Padova che è un tronco dell'asse di attraversamento della pianura Padana che collega l'Est Europeo con la Francia passando per centri di grande importanza economica quali Milano, Torino, e la stessa Verona. La viabilità principale della provincia comprende, inoltre, le strade statali con un'estensione pari a 326 Km, che attraversano 47 comuni della provincia e le strade provinciali con un'estensione di 1610 Km.

3.2 Le centraline di rilevazione

La rete comunale della qualità dell'aria della città di Verona è stata realizzata in base al DM 20/5/91 che stabilisce i criteri organizzativi e di gestione del sistema di monitoraggio della qualità dell'aria ed è strutturata come riportato di seguito:¹

¹La lettera fra parentesi che segue il nome della centralina serve a identificarla nella mappa riportata nella figura 3.1.

- **Torricelle santa Giuliana (A)** - *Stazione di tipo A*: postazione per la misura degli inquinanti primari e secondari e dei parametri meteorologici fondamentali. È una stazione di background posizionata in un'area non interessata direttamente da sorgenti di emissione urbana. È inoltre, dotata di sensori per la misura dei principali parametri meteorologici quali direzione e velocità del vento, temperatura, umidità relativa, pressione e radiazione solare, precipitazioni;
- **Piazza Bernardi (B)** e **Zai via Roveggia (C)** - *Stazioni di tipo B*: postazioni per la misura degli inquinanti primari e secondari situate in zone ad elevata densità abitativa.
- **via San Giacomo (D)** e **Corso Milano (E)** - *Stazioni di tipo C*: postazioni situate in zone ad elevato traffico ed alto rischio espositivo per la misura degli inquinanti emessi direttamente dal traffico veicolare. Sono dotate anche di sensori per la misura di direzione e velocità del vento e della radiazione solare.
- **Loc. Cason (F)** - *Stazione di tipo D*: postazione in area suburbana per la misura di inquinanti fotochimici. È dotata di sensori per la misura di parametri meteorologici come la stazione di Torricelle.

Le centraline di S. Giacomo, Corso Milano e Zai vengono definite "di traffico urbano" e sono utilizzate prevalentemente per la rilevazione di inquinanti veicolari (CO, NO, PM₁₀), mentre quelle di Cason, Torricelle e Piazza Bernardi vengono definite "di background" perché situate in un'area non direttamente influenzata dalle sorgenti di traffico primarie o da sorgenti di tipo industriale e sono utilizzate per la misura di tutti gli inquinanti con particolare attenzione rivolta alla concentrazione di ozono.

Dal 1° gennaio 2000 la rete di monitoraggio è gestita direttamente dal Dipartimento Provinciale ARPAV di Verona. A completamento della rete è inoltre presente una stazione meteorologica posizionata a Verona, in via Belluzzo, sulla torre di proprietà della **Telecom Italia (G)**. In questa postazione oltre ai sensori per la misura dei parametri meteorologici di base è stata installata una serie di 7 sensori di temperatura a diverse altezze, in modo da poter valutare il profilo di temperatura e quindi determinare il gradiente termico verticale nonché le classi di stabilità nei primi strati atmosferici fino ad una quota di 150 metri circa.

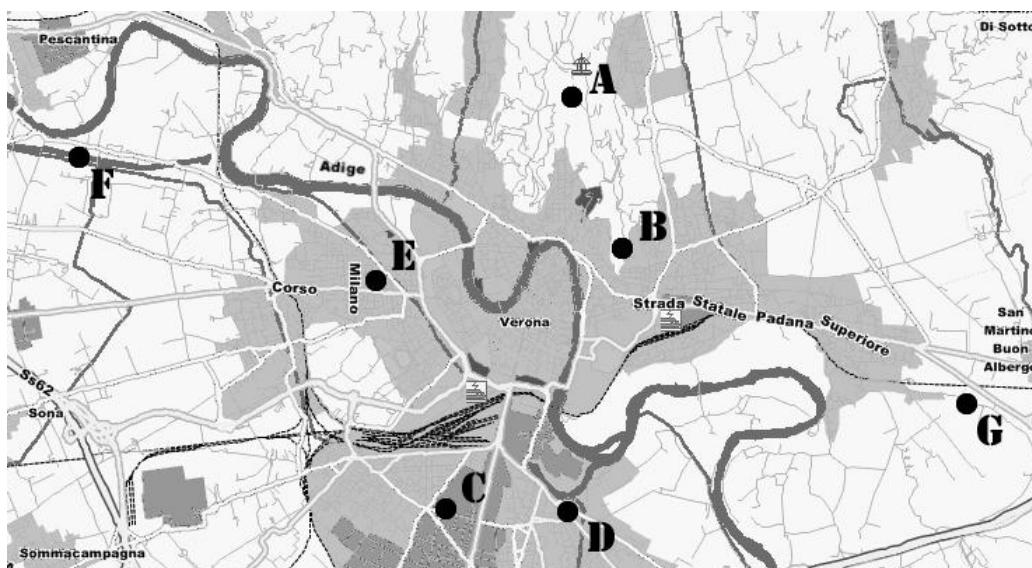


Figura 3.1: Collocazione delle centraline

3.3 La scelta dei dati

Questa la provenienza² dei dati orari dalle varie centraline:

	CO	NO ₂	O ₃	PTS	SO ₂	umid.	temp.
Torricelle santa Giuliana	X	X	X	X	X	X	X
Zai via Roveggia	X	X	X	X	X		
via San Giacomo	X	X		X	X		X
Corso Milano	X	X		X	X		
Loc. Cason		X	X	X		X	X
TELECOM						X	X

Tabella 3.1: Disponibilità dei dati nelle centraline

I dati messi a disposizione dall'ARPAV di Verona sono forniti in formato orario per tutte le variabili prese in considerazione tranne per i dati relativi al PTS, che vengono rilevati ogni due ore. Per ciascun dato è stata calcolata la media giornaliera, e successivamente si è passati a considerare la media di tutte le centraline in modo di avere a disposizione un livello per la concentrazione degli inquinanti che prendesse in considerazione tutta la città di Verona. Quest'ultimo dato è quello utilizzato per il nostro modello statistico.

²La centralina di Piazza Bernardi non è stata considerata perché installata in un periodo più recente

In questo lavoro si è scelto di prendere in considerazione un periodo piuttosto recente dal momento che la significatività dei dati precedenti (la cui rilevazione è iniziata nel 1996) è compromessa da una notevole percentuale di dati mancanti. La nostra attenzione si concentrerà quindi sul quadriennio 2000-2003, periodo che vede una quantità di dati mancanti inferiore all'1%. Di questo periodo e per ciascun inquinante (PTS escluso) disponiamo di una serie storica oraria di circa 35.000 dati, sintetizzati in una serie di 1.461 dati medi giornalieri (dal 1° gennaio 2000 al 31 dicembre 2003). I primi 1.096 (fino al 31 dicembre 2002) saranno utilizzati per stimare i parametri del nostro modello statistico.

3.4 Il modello statistico

Questo lavoro è diviso in due parti: la prima è un'analisi del triennio 2000-2002, periodo in cui nella zona di Verona non sono stati adottati provvedimenti sistematici di blocco del traffico. Esso sarà utilizzato come 'controllo' al fine di stimare i parametri indicativi dell'evoluzione temporale degli inquinanti in assenza di intervento. La seconda parte consisterà nello studio dell'anno 2003 (il nostro 'caso' oggetto di studio) le cui dinamiche si supporranno note in quanto identiche al triennio precedente tranne per quanto riguarda l'effetto della variabile *intervento*, variabile intesa linearmente dipendente da una *dummy* che indica i giorni di blocco del traffico.

Per quanto riguarda lo studio del triennio 2000-2002 i dati a disposizione per ciascuno degli inquinanti principali (CO, NO₂, O₃, PTS e SO₂) sono stati modellati secondo il seguente schema additivo³:

$${}_iY_t = f(X_t) + SARIMA + \varepsilon_t \quad (3.1)$$

Dove Y_t rappresenta la serie giornaliera dell' i -esimo inquinante al tempo t , $f(X_t)$ è una funzione lineare delle variabili meteorologiche X al tempo t da stimarsi con il metodo dei minimi quadrati ordinari, SARIMA rappresenta l'insieme dei parametri e delle variabili di un'appropriata serie storica⁴ e ε_t è il termine di errore, che si distribuisce come un *white noise* con media 0 e varianza σ^2 .

³L'additività degli effetti delle variabili meteorologiche, oltre che la linearità degli effetti del blocco del traffico, è un assunto estremamente forte che viene teorizzato in questo lavoro sia per necessità pratiche, sia per uniformità con altri lavori riportati nella Bibliografia

⁴Per la caratterizzazione matematica del modello SARIMA si veda l'Appendice

Questo modello permette dunque di "depurare" la serie storica dagli effetti delle variabili meteorologiche principali,⁵ dal momento che esse sono state ritenute in grado di modificare in modo determinante le dinamiche degli inquinanti (si pensi ad esempio al ruolo dell'umidità nella formazione delle cosiddette "camere di inversione", zone nelle quali viene impedita la diluizione degli inquinanti e la loro dispersione negli strati più alti dell'atmosfera) e quindi falsare una corretta valutazione dell'efficacia dell'intervento. Ottenuta la serie dei residui in questo modo:

$${}_iY_t^* = {}_iY_t - \widehat{f(X_t)} \quad (3.2)$$

il passo immediatamente successivo consiste nello stimare il modello di serie storiche generatore della variabile ${}_iY_t^*$:

$${}_iY_t^* \sim \text{SARIMA}(p, d, q) \times (P, D, Q)_S \quad (3.3)$$

Considerazioni di tipo pratico confortate da valutazioni di tipo statistico — come ad esempio l'osservazione del grafico dell'autocorrelazione parziale — a suggerirci per la scelta del modello statistico ottimale un'ARIMA a componenti stagionali: è infatti noto che la concentrazione degli inquinanti è conseguenza diretta del volume di traffico veicolare, il cui valore è fortissimamente correlato al giorno della settimana (con un massimo nei giorni centrali della settimana e un minimo nei weekend). Una volta calcolato il numero ottimale dei parametri θ_i e ϕ_j sia per la componente ordinaria che per la componente stagionale e la loro stima di massima verosimiglianza secondo il criterio asintotico di Akaike (AIC)⁶ si potrà passare alla valutazione dell'intervento-blocco del traffico con i dati relativi all'anno 2003.

Il modello che stima i valori del 2003 per l' i -esimo inquinante sarà il seguente:

$${}_iY_t^* = \widehat{f(X_t)} + \widehat{\text{SARIMA}} + \text{int} \quad (3.4)$$

Dove i primi due termini del secondo membro rappresentano le stime valide per il triennio 2000-2002 precedentemente calcolate e $\text{int} = a + bI_t$ è la *funzione intervento*, dipendente dalla variabile *dummy* I_t così caratterizzata:

$$I_t = \begin{cases} 1 & \text{se } t \in T \\ 0 & \text{se } t \notin T \end{cases} \quad (3.5)$$

⁵in accordo con altri studi compiuti sull'utilità di simili provvedimenti (vedi Bibliografia) e compatibilmente con la disponibilità di dati precisi le variabili prese in considerazione saranno l'umidità (in %) e la temperatura (in °C)

⁶Per una caratterizzazione dettagliata di questo criterio si veda l'Appendice

Dove T è l'insieme dei giorni di chiusura del traffico.

L'ultima parte del lavoro valuterà la significatività statistica di \hat{b} . Questo che segue

$$\begin{cases} H_0 : b = 0 \\ H_1 : b \neq 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

sarà dunque il test statistico utilizzato per stabilire se i provvedimenti di blocco del traffico hanno realmente inciso su una diminuzione della concentrazione degli inquinanti presi in esame.

3.5 Analisi descrittiva - triennio 2000-2002

Questo studio prende in considerazione le seguenti sostanze, le cui caratteristiche chimiche e gli effetti sulla salute umana sono state descritte nel capitolo 2:

- monossido di carbonio (CO)
- biossido di azoto (NO₂)
- ozono (O₃)
- polveri totali sospese (PTS)
- ossido di zolfo (SO₂)

Nella tabella 3.2 si riportano alcune statistiche descrittive sulla concentrazione dei sopraccitati inquinanti e delle variabili meteorologiche principali nell'arco dei 3 anni che rappresentano il nostro 'controllo'. Si ricorda che i valori degli inquinanti indicati hanno tutti come unità di misura il $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tranne il monossido di carbonio che è espresso in mg/m^3 . L'umidità è espressa in percentuale mentre la temperatura in gradi °C.

	CO	NO ₂	O ₃	PTS	SO ₂	umid.	temp.
Min	0.319	8.232	0.1819	13.65	0.3318	21.23	-2.201
1° q.	0.696	32.625	8.7369	26.77	2.0409	64.44	7.726
Mediana	0.960	40.587	26.0195	38.31	3.1716	77.03	14.524
Media	1.129	42.183	32.9503	44.54	3.5494	76.79	14.457
3° q.	1.377	49.299	52.7275	55.27	4.6464	91.13	21.088
Max	4.292	109.461	139.4550	162.94	18.3237	99.24	30.442

Tabella 3.2: Dati ambientali - analisi descrittiva (2000/2002)

	CO	NO ₂	O ₃	PTS	SO ₂	umid.	temp.
CO	1	0.688	-0.559	0.553	0.250	0.204	-0.690
NO ₂		1	-0.438	0.498	0.333	-0.019	-0.429
O ₃			1	-0.300	0.026	-0.458	0.734
PTS				1	0.260	0.224	-0.453
SO ₂					1	-0.267	-0.055
umid.						1	-0.378
temp.							1

Tabella 3.3: Matrice di correlazione per i dati ambientali (2000/2002)

Molto interessante al fine di analizzare le relazioni tra le variabili oggetto di studio la matrice di correlazione, riportata nella tabella 3.3.

Possiamo osservare coefficienti generalmente non molto alti in valore assoluto e quindi poco significativi. Di una qualche rilevanza sono invece i coefficienti di correlazione:

1. tra CO e NO₂, di segno *negativo*;
2. tra CO e temperatura, di segno *negativo*;
3. tra O₃ e temperatura, di segno *positivo* e di alto valore assoluto.

Mentre la (1) può essere spiegata più come un indizio di andamento storico simile che come una dipendenza diretta (e ciò è confermato sia dalla (2) che dalla correlazione NO₂-temperatura, come a indicare il maggior utilizzo del riscaldamento e dei veicoli nei periodi più freddi dell'anno) nella (3) è possibile riconoscere quel forte legame causale che era lecito aspettarsi dal momento che, come già anticipato nel capitolo 2 le reazioni fotochimiche che generano ozono sono generalmente favorite dalle alte temperature.

Nelle tabelle 3.2 e 3.3 sono riportati i grafici di umidità e temperatura. Nettissimo, nel secondo, l'effetto della stagionalità annua.

3.6 Il monossido di carbonio

Per ciascuno degli inquinanti in oggetto è stato riportato il grafico dell'andamento delle medie giornaliere nei 1096 giorni tra il 1° gennaio 2000 e il 31 dicembre 2002. L'unità di misura delle ordinate è intesa sempre in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tranne per il CO che utilizza il mg/m^3

La figura 3.4 evidenzia una netta configurazione stagionale con massimi ben definiti nei mesi invernali e minimi nei mesi estivi. È possibile notare

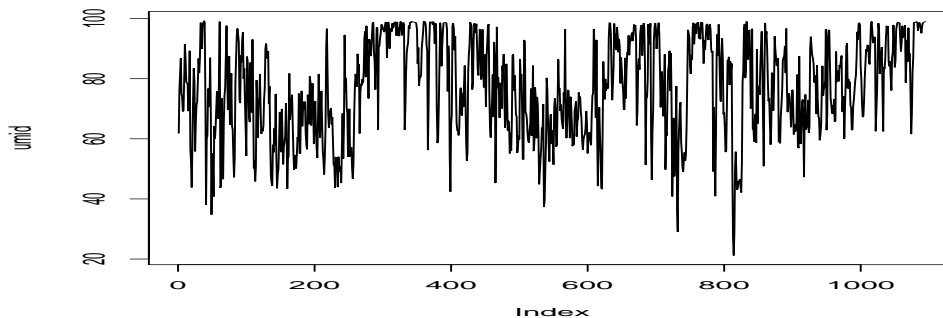


Figura 3.2: umidità - grafico 2000/2002

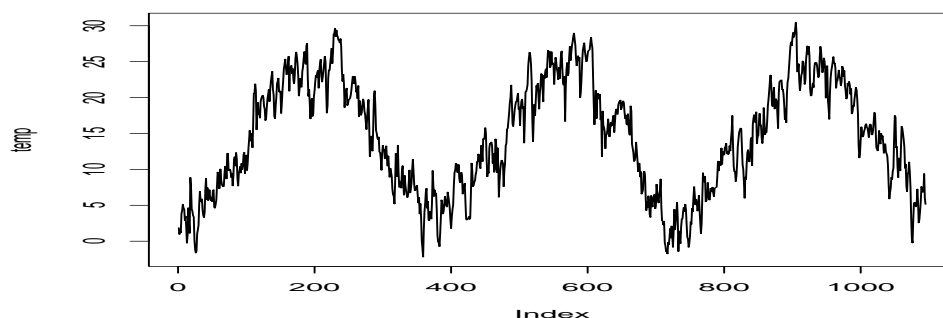


Figura 3.3: temperatura - grafico 2000/2002

la forte concentrazione registrata nell'inverno 2000 e un certo incremento riscontrabile nell'anno 2001 e poi di nuovo un lieve calo nell'anno successivo.

L'analisi di regressione sui dati relativi al CO condotta mediante il programma R⁷ utilizzando umidità e temperatura come variabili esplicative fornisce i risultati riportati qui di seguito:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.1525344	0.0854328	25.196	< 2e-16
umidita	-0.0025710	0.0009144	-2.812	0.00501
temperatura	-0.0571404	0.0018825	-30.354	< 2e-16

Residual standard error: 0.4465 on 1092 degrees of freedom

⁷Una spiegazione dettagliata dei valori riportati dall'output di R è riportata in Appendice

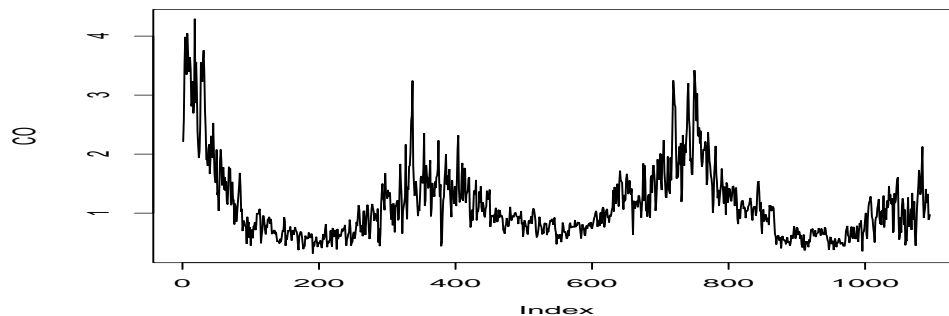


Figura 3.4: CO - grafico 2000/2002

Multiple R-Squared: 0.4803, Adjusted R-squared: 0.4793
 F-statistic: 504.5 on 2 and 1092 DF, p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	17.485	17.485	87.716	< 2.2e-16
temperatura	1	183.656	183.656	921.349	< 2.2e-16
residuals	1092	217.673	0.199		

Possiamo notare una relativamente buona esplicatività delle variabili meteorologiche, una delle quali (la temperatura) condivide con il CO il medesimo andamento temporale. Entrambe risultano significative nel modello e il modello stesso risulta significativo nella sua globalità. Inoltre per quanto riguarda il grafico dei residui non sembra mostrare un *trend* definito ed è dunque possibile ipotizzare la stazionarietà dei dati senza ricorrere ad una differenziazione preliminare.

Analizzando il grafico dell'autocorrelazione parziale dei residui (riportato in tabella 3.5) si può notare la marcata stagionalità settimanale dei dati osservabile dal picco in corrispondenza del *lag* pari a 7 in concomitanza di valori poco rilevanti agli altri ritardi. Sceglieremo pertanto il modello ottimale nella famiglia dei SARIMA con $S=7$.

Il criterio AIC suggerisce l'utilizzo di un SARIMA $(2, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$ per la stima dei residui di regressione. Questi sono i parametri stimati col metodo della massima verosimiglianza:

Coefficients:

ar1	ar2	ma1	sar1	sma1	intercept
-0.0697	0.7115	0.9109	0.9982	-0.9843	0.0000

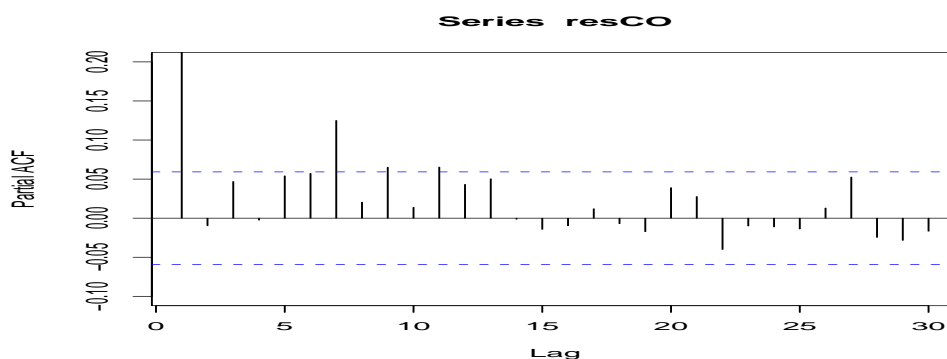


Figura 3.5: CO - PACF dei residui di regressione

s.e. 0.0226 0.0633 0.3622 0.0000 0.0003 0.1296

sigma² estimated as 0.0656: loglik. = -65.4, aic = 144.8

La diagnostica per i residui è abbastanza buona⁸. Di seguito, nella figura 3.6 è possibile analizzare il correlogramma dei residui.

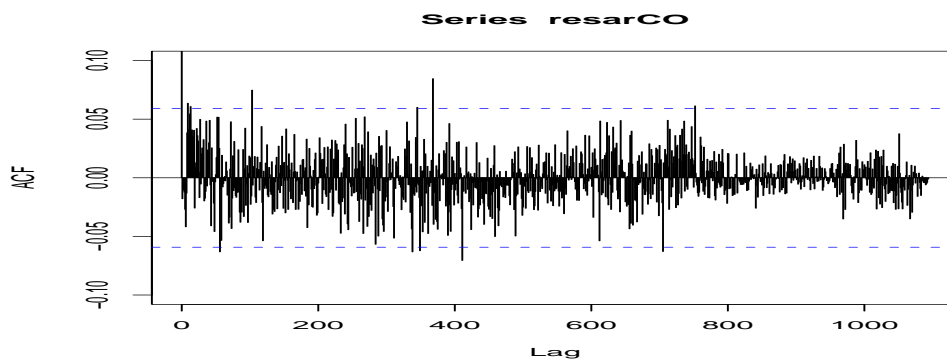
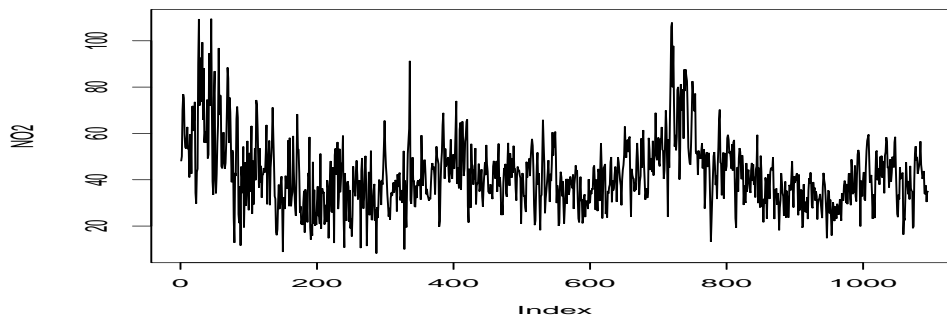


Figura 3.6: CO - diagnostica sui residui (ACF)

3.7 Il biossido di azoto

Anche il grafico riportato nella figura 3.7 evidenzia l'andamento annuale del grafico del NO₂ con tre concavità verso l'alto relative ai tre anni, anche se in modo meno marcato rispetto al grafico del CO.

⁸Per i criteri di adattamento di un modello alla serie e per una spiegazione del grafico ACF in R si veda l'Appendice

Figura 3.7: NO₂ - grafico 2000/2002

L'analisi di regressione sui dati relativi all'NO₂ utilizzando umidità e temperatura come variabili esplicative fornisce i risultati riportati qui di seguito:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	70.89959	2.46729	28.736	< 2e-16
umidita	-0.19328	0.02641	-7.319	4.82e-13
temperatura	-0.95971	0.05437	-17.653	< 2e-16

Residual standard error: 12.89 on 1092 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.2223, Adjusted R-squared: 0.2209
 F-statistic: 156.1 on 2 and 1092 DF, p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	80	80	0.4809	0.4882
temperatura	1	51808	51808	311.6201	<2e-16
Residuals	1092	181549	166		

I dati, seppur significativi, mostrano una scarsa correlazione con le variabili meteorologiche prese in esame. Il grafico dei residui sembra escludere la non-stazionarietà, per cui non si procederà a differenziazioni preliminari.

Se osserviamo il grafico dell'autocorrelazione parziale dei residui di regressione (figura 3.8) possiamo osservare un picco in corrispondenza del *lag* pari a 7 e altri valori tutto sommato non rilevanti se si eccettua il *lag* pari a 13. Come nel precedente caso è ipotizzabile la stagionalità settimanale dei dati, influenzata dall'andamento settimanale del traffico. Scegliremo pertanto il modello ottimale nella famiglia dei SARIMA con S=7.

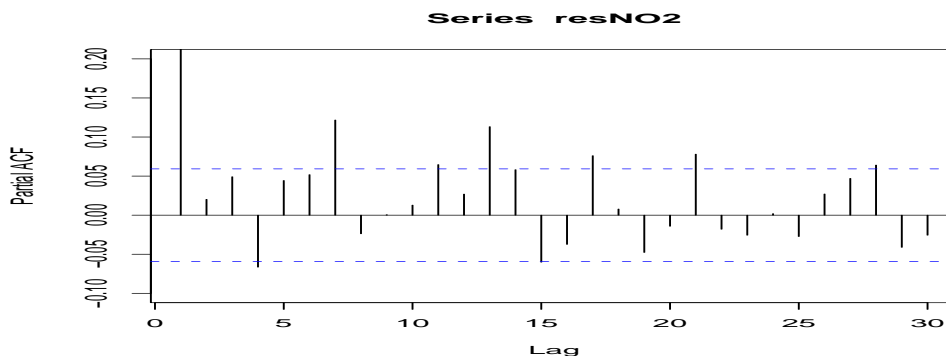


Figura 3.8: NO₂ - PACF dei residui di regressione

Il modello ottimale secondo il criterio AIC per descrivere la serie storica dei residui è un SARIMA $(3, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$. Questi sono i parametri stimati:

Coefficients:

	ar1	ar2	ar3	ma1	sar1	sma1	interc
	-0.3218	0.4525	0.1022	0.8383	0.9954	-0.9684	-0.0014
s.e.	0.0302	0.0591	0.0312	0.2990	0.0001	0.0068	2.7772

sigma² estimated as 108.7: loglik. = -4123.55, aic = 8263.1

La diagnostica per i residui è peggiore rispetto a quella per il CO ma in definitiva i valori delle autocorrelazioni che eccedono il valore soglia sono numerose ma poco rilevanti. Sarà dunque possibile ipotizzare l'incorrelazione seriale e perciò la bontà del modello complessivo. Di seguito, nella figura 3.9 è possibile analizzare il correlogramma dei residui:

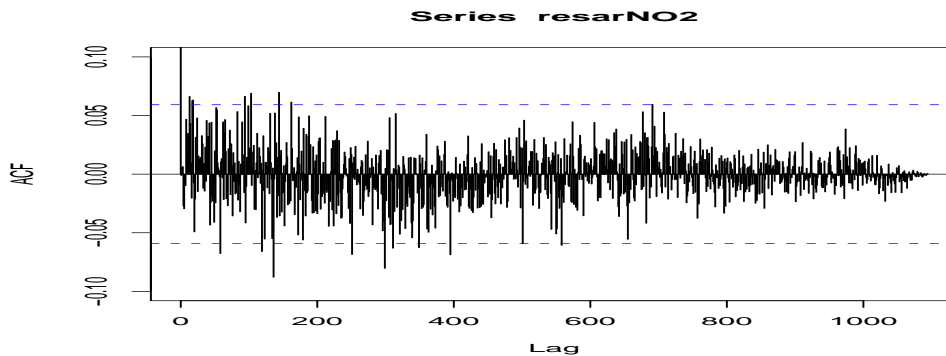


Figura 3.9: NO₂ - diagnostica sui residui (ACF)

3.8 L'ozono

Il grafico dell'O₃ assume un andamento differente rispetto ai precedenti due. Come già spiegato nel capitolo 2, le concentrazioni più alte di questo inquinante si raggiungono nei mesi estivi, quando le alte temperature favoriscono le reazioni fotoelettriche. La figura 3.10 mostra infatti dei picchi nelle fasi centrali dell'anno e dei minimi durante l'inverno, con una tendenza all'incremento nei mesi estivi dell'anno 2002.

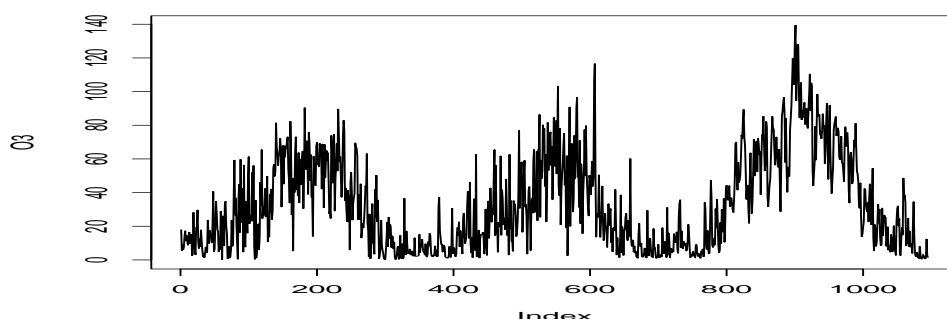


Figura 3.10: O₃ - grafico 2000/2002

L'analisi di regressione sui dati relativi all'O₃ utilizzando umidità e temperatura come variabili esplicative fornisce i risultati riportati qui di seguito:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	27.25212	3.43164	7.941	4.94e-15
umidita	-0.36327	0.03673	-9.891	< 2e-16
temperatura	2.32379	0.07562	30.732	< 2e-16

Residual standard error: 17.93 on 1092 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.5762, Adjusted R-squared: 0.5754
 F-statistic: 742.3 on 2 and 1092 DF, p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	173743	173743	540.22	< 2.2e-16
temperatura	1	303746	303746	944.44	< 2.2e-16
Residuals	1092	351203	322		

L' \bar{R}^2 indica un discreto adattamento ai dati da parte delle stime. Il diagramma dei residui — seppur estremamente irregolare — non lascia in-

travvedere una componente di *trend* ben definita. Per quanto riguarda la determinazione del modello per i residui la figura 3.11 possiamo osservare valori significativi di autocorrelazione parziale sia in corrispondenza del *lag* pari a 7 sia dei multipli di 7: sceglieremo pertanto il modello ottimale nella famiglia dei SARIMA con periodo=7.

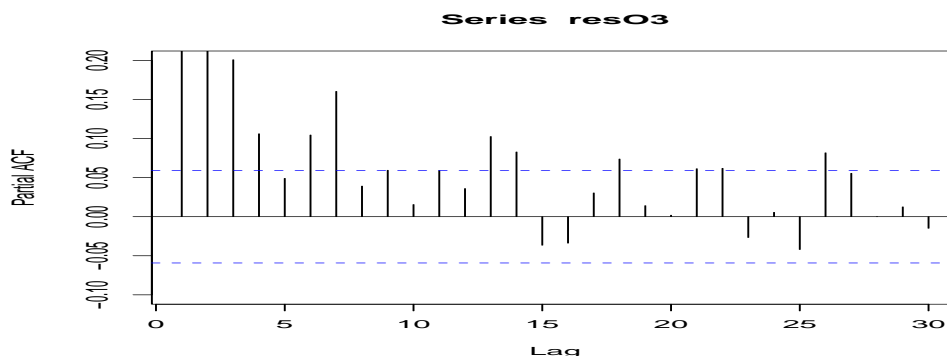


Figura 3.11: O_3 - PACF dei residui di regressione

Il modello ottimale secondo il criterio AIC per descrivere la serie storica dei residui è un SARIMA $(4, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$. Questi sono i parametri stimati:

Coefficients:

	ar1	ar2	ar3	ar4
	1.2755	-0.2128	0.0210	-0.0881
s.e.	0.0299	0.0489	0.0488	0.0317

	ma1	sar1	sma1	intercept
	-0.9550	0.8091	-0.722	0.0067
s.e.	0.0742	0	0	0

sigma² estimated as 177.4: loglik. = -4389.71, aic = 8797.41

La diagnostica per i residui è abbastanza buona. Di seguito, nelle figura 3.12 è possibile analizzare il correlogramma dei residui:

3.9 Il particolato totale sospeso

Il grafico dell'andamento del PTS nel triennio oggetto di studio (figura 3.9) è fortemente irregolare: oltre ad una stagionalità annuale che lo accomuna ai grafici dei primi due inquinanti presi in esame è riscontrabile un inconsueto

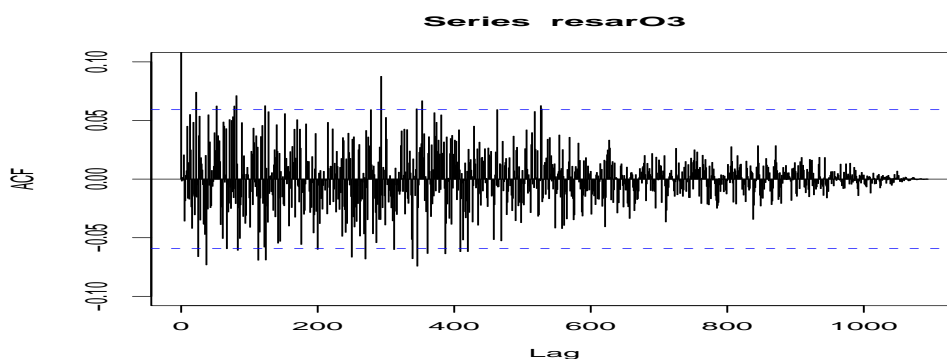


Figura 3.12: O₃ - diagnostica sui residui (ACF)

andamento dei minimi, soprattutto nei mesi caldi del 2000 e del 2002. La causa potrebbe essere addebitata al consistente numero di dati incompleti che in un certo senso hanno distorto il calcolo delle medie giornaliere e "di zona".

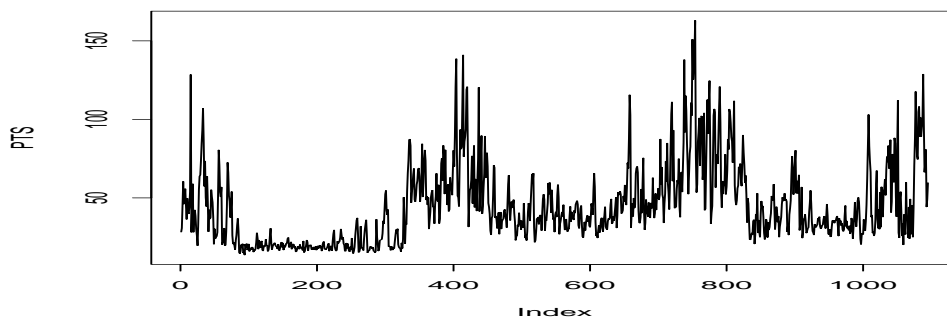


Figura 3.13: PTS - grafico 2000/2002

L'analisi di regressione sui dati relativi al PTS utilizzando umidità e temperatura come variabili esplicative fornisce i risultati riportati qui di seguito:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	56.89672	4.15506	13.693	<2e-16
umidita	0.09365	0.04447	2.106	0.0354
temperatura	-1.35196	0.09156	-14.767	<2e-16

Residual standard error: 21.71 on 1092 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.2082, Adjusted R-squared: 0.2067
 F-statistic: 143.5 on 2 and 1092 DF, p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	32552	32552	69.038	2.837e-16
temperatura	1	102813	102813	218.052	< 2.2e-16
Residuals	1092	514884	472		

L' \bar{R}^2 indica un adattamento mediocre seppur significativo ai dati da parte delle stime. Per quanto riguarda la determinazione del modello per i residui (che risultano privi di componenti di trend) la figura 3.14 rivela un picco in corrispondenza del *lag* pari a 7 e valori irrilevanti agli altri ritardi: sceglieremo pertanto il modello ottimale nella famiglia dei SARIMA con periodo=7.

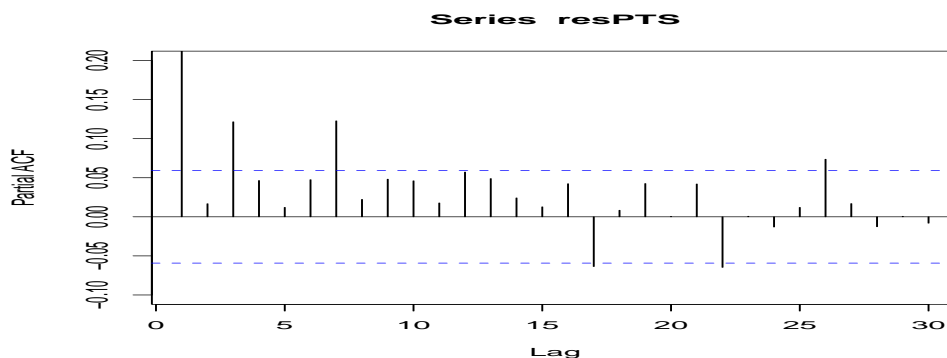


Figura 3.14: PTS - PACF dei residui di regressione

Il criterio AIC indica il SARIMA $(3, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$ come miglior modello per la descrizione della serie storica dei residui. Questi sono i parametri stimati:

Coefficients:

	ar1	ar2	ar3	ma1	sar1	sma1	interc
	1.6110	-0.6849	0.0600	-0.8947	0.9934	-0.9748	-0.0235
s.e.	0.0302	0.0582	0.0327	0.2188	0.0029	0.0110	7.5190

sigma² estimated as 183.3: loglik. = -4408.15, aic = 8832.31

La diagnostica per i residui dà risultati sostanzialmente significativi. Di seguito, nella figura 3.15 è possibile analizzare i correlogrammi dei residui:

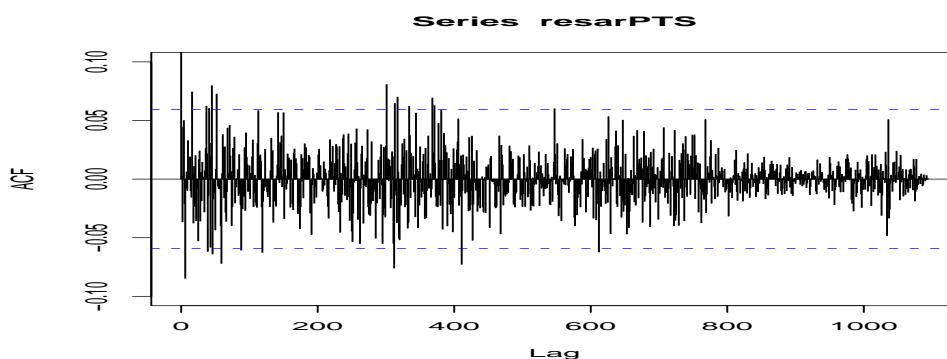


Figura 3.15: PTS - diagnostica sui residui (ACF)

3.10 Il biossido di zolfo

Il grafico del SO₂ (figura 3.16) è di tipo differente rispetto ai quattro finora analizzati, dal momento che non è riscontrabile alcun tipo apparente di stagionalità:

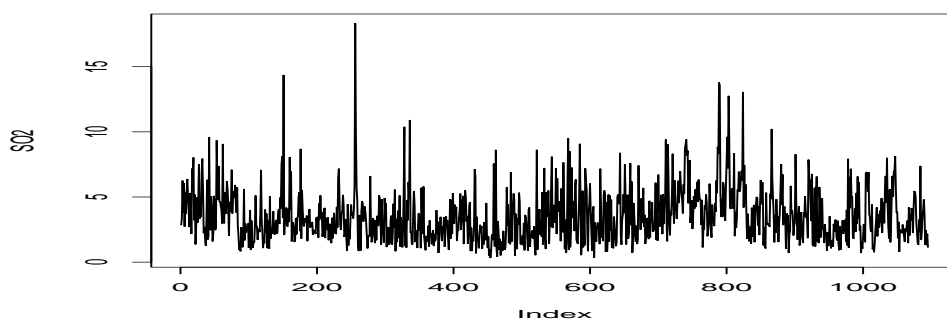


Figura 3.16: SO₂ - grafico 2000/2002

L'analisi di regressione sui dati relativi al PTS utilizzando umidità e temperatura come variabili esplicative fornisce i risultati riportati qui di seguito:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	7.592302	0.374765	20.259	< 2e-16
umidita	-0.043501	0.004011	-10.846	< 2e-16
temperatura	-0.048574	0.008258	-5.882	5.38e-09

Residual standard error: 1.959 on 1092 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.09999, Adjusted R-squared: 0.09834
 F-statistic: 60.66 on 2 and 1092 DF, p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	332.7	332.7	86.724	< 2.2e-16
temperatura	1	132.7	132.7	34.600	5.379e-09
Residuals	1092	4188.6	3.8		

L' \bar{R}^2 indica scarsissima dipendenza tra le variabili meteorologiche e il dato dell'inquinante. Per quanto riguarda la determinazione del modello per i residui la figura 3.17 presenta una particolarità che la differenzia di precedenti quattro grafici, ossia correlazione parziale quasi nulla al $lag=7$ ma notevole al $lag=14$: sceglieremo pertanto il modello ottimale nella famiglia dei SARIMA con $S=14$, e successivamente anche la famiglia dei modelli con $S=7$, in modo che il modello sia confrontabile con quelli per i precedenti inquinanti.

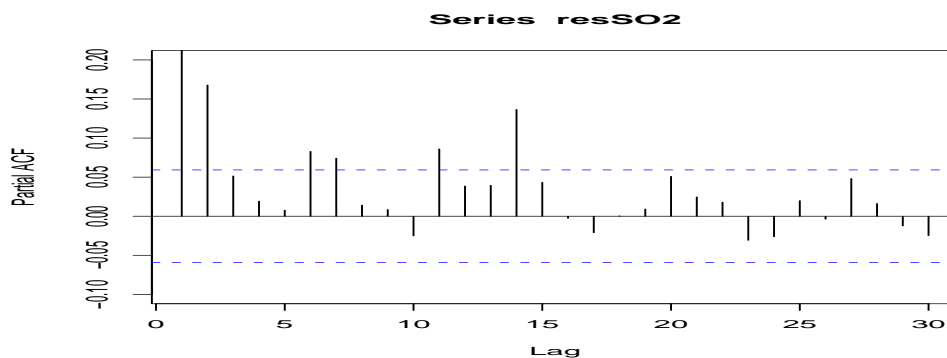


Figura 3.17: SO₂ - PACF dei residui di regressione

Una volta studiati i modelli ottimali per entrambe le famiglie il criterio AIC seleziona per come parametri quelli del SARIMA $(1, 0, 1) \times (3, 0, 1)_7$. Questa la tabella delle stime:

Coefficients:

	ar1	ma1	sar1	sar2	sar3	sma1	interc
	0.7764	-0.5901	0.9902	0.0924	-0.0891	-0.9709	-0.0009
s.e.	0.0244	0.0331	0	0.0072	0.0073	0.0004	0.2869

sigma² estimated as 3.308: loglik. = -2209.87, aic = 4435.74

La particolarità nella PACF dei residui di regressione del SO_2 si riflette dunque anche sulla stima del modello, che risulta essere il più complesso fra tutti per quanto riguarda la stagionalità. La diagnostica per i residui è abbastanza buona. Nella figura 3.18 è possibile analizzare il correlogramma dei residui.

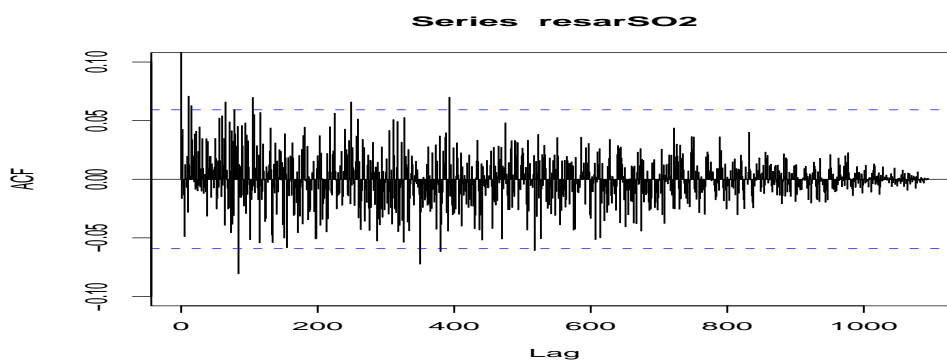


Figura 3.18: SO_2 - diagnostica sui residui (ACF)

3.11 Riepilogo degli inquinanti

Qui di seguito nella tabella 3.4 riportiamo un riassunto dei modelli di serie storica per descrivere l'andamento dei cinque inquinanti principali oggetto del nostro studio:

inquinante	modello stimato	$\hat{\sigma}^2$
CO	SARIMA $(2, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$	0,0656
NO_2	SARIMA $(3, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$	108,7
O_3	SARIMA $(4, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$	8797,1
PTS	SARIMA $(3, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$	183,3
SO_2	SARIMA $(1, 0, 1) \times (3, 0, 1)_7$	3,308

Tabella 3.4: Serie storiche per gli inquinanti - riepilogo (2000/2002)

Salvo nel caso particolare del SO_2 i modelli di serie storica che meglio descrivono l'andamento temporale degli inquinanti presi in esame hanno una struttura molto simile, variando solo nella parte autoregressiva della componente ordinaria.

Capitolo 4

Analisi dell'intervento - Anno 2003

4.1 Il blocco del traffico a Verona

Il comune di Verona ha iniziato ad emanare disposizioni riguardanti il blocco del traffico cittadino nei primi giorni del 2003. Il provvedimento adottato attraverso cinque successive ordinanze emanate dal Consiglio Comunale nel corso del primo trimestre del 2003 per far fronte all'emergenza causata dal superamento delle soglie di attenzione di alcuni inquinanti (in particolare del livello di PM₁₀) è quello che viene comunemente chiamato circolazione a *targhe alterne*. Generalmente questo tipo di provvedimento si estende in più giornate (ad esempio il giovedì e il venerdì) e comporta l'inibizione al traffico — oltre che a determinate tipologie di veicoli, più datati e senza dispositivi per la riduzione delle emissioni inquinanti¹ — ad una parte dei veicoli a seconda del numero (o della lettera) finale della targa.

Si tratta quindi di un provvedimento generalizzato che riguarda la quasi totalità del parco veicolare circolante nel territorio comunale escluse alcune specifiche categorie (in generale facenti parte dei servizi di pubblica utilità o riguardanti particolari tipologie di trasporti per emergenza o "cause di forza maggiore" come i veicoli della Polizia, gli scuolabus, i carri funebri) che ricevono una particolare esenzione.

L'area sottoposta alle limitazioni del traffico sopraelencate riguarda l'intero territorio comunale esclusi i seguenti tratti stradali:

- Tangenziale Est;

¹in questa suddivisione rientrano tutti i tipi di autovetture e autoveicoli alimentati a gasolio, diesel e benzina e i ciclomotori e i motoveicoli non catalizzati; in generale si tratta di veicoli di immatricolazione non recente.

- Tangenziale Sud;
- Tratti autostradali;
- Itinerario di indirizzo alla Fiera di Verona;
- Itinerario di indirizzo ai parcheggi dello Stadio "Bentegodi";
- Itinerario di indirizzo verso i parcheggi di Fondo Frugose;

Tutti questi provvedimenti hanno avuto due periodi giornalieri di chiusura del traffico: mattiniero (dalle 9.00 alle 12.30) e pomeridiano (dalle 14 alle 19.30).

Il nostro studio si propone di focalizzare l'attenzione sul periodo 1° gennaio-31 ottobre 2003, periodo interessato, nel suo primo trimestre, da numerosi provvedimenti simili tesi a limitare la circolazione dei veicoli nelle zone più trafficate della città. È stato invece trascurato il bimestre finale dal momento che una nuova ordinanza entrata in vigore in novembre e non direttamente assimilabile alle precedenti ha disposto nuovi provvedimenti volti alla limitazione del traffico.

La tabella 4.1 riporta il calendario dei giorni di 'blocco del traffico' a Verona.

Gennaio	dom 12 dom 19 lun 20, mar 21, mer 22, dom 26
Febbraio	dom 9 gio 13, dom 16 gio 20, dom 23 lun 24, mar 25, mer 26, gio 27
Marzo	dom 2 gio 6, dom 9 gio 13, sab 15, dom 16 gio 20, dom 23 gio 27, dom 30

Tabella 4.1: Calendario dei giorni di blocco della circolazione a Verona - anno 2003

	CO	NO2	O3	PTS	SO2	umid.	temp.
Min	0.1857	14.05	0.1562	18.53	0.9657	22.20	-2.264
1° q.	0.4714	31.81	12.0634	39.22	2.6109	63.07	7.239
Mediana	0.6301	41.72	28.2608	54.05	3.7245	74.94	14.226
Media	0.7667	44.79	35.2636	59.33	4.1976	75.44	15.145
3° q.	0.9369	56.72	57.0639	70.76	5.2105	89.11	23.480
Max	3.0226	94.65	139.8577	188.51	15.0172	99.14	31.830

Tabella 4.2: Dati ambientali - analisi descrittiva (2003)

4.2 Analisi descrittiva

La tabella 4.2, riporta i dati descrittivi relativi all'anno 2003.

Analizzando le differenze tra questa tabella e la 3.2, possiamo notare alcune sostanziali differenze che in qualche caso appaiono sorprendenti: la tabella 4.3 indica la variazione percentuale dell'anno 2003 rispetto ai tre precedenti.

	CO	NO2	O3	PTS	SO2
Min	-41,79%	+70,68%	-14,13%	+35,75%	+191,05%
1° q.	-32,27%	-2,50%	+38,07%	+46,51%	+27,93%
Mediana	-34,36%	+2,79%	+8,61%	+41,09%	+17,43%
Media	-32,09%	+6,18%	+7,02%	+33,21%	+18,26%
3° q.	-31,96%	+15,05%	+8,22%	+28,03%	+12,14%
Max	-29,58%	-13,53%	+0,29%	+15,69%	-18,04%

Tabella 4.3: Dati inquinanti ambientali - variazioni percentuali dal triennio 2000-2002 all'anno 2003

Ad una sensibile diminuzione della concentrazione di monossido di carbonio — ovvero l'inquinante che deriva principalmente dalle emissioni provenienti dal traffico veicolare — fa da contraltare un incremento generalizzato (in alcuni casi anche molto notevole) della concentrazione di tutte le altre sostanze.

La tabella 4.4 completa la tabella 3.5 con i dati relativi al 2003. Possiamo ritrovare i medesimi dati salienti che caratterizzano i legami fra le variabili oggetto di questo studio, e precisamente:

- la più alta correlazione in valore assoluto tra O₃ e temperatura, per i motivi già noti;

- una forte correlazione tra CO e NO₂, le due sostanze che mostrano in maniera più marcata un andamento stagionale;
- altre correlazioni di valore assoluto generalmente modesto.

	CO	NO ₂	O ₃	PTS	SO ₂	umid.	temp.
CO	1	0.676	-0.623	0.525	0.221	0.215	-0.566
NO ₂		1	-0.524	0.604	0.402	0.196	-0.490
O ₃			1	-0.394	-0.061	-0.399	0.803
PTS				1	0.366	0.133	-0.319
SO ₂					1	-0.218	-0.145
umid.						1	-0.274
temp.							1

Tabella 4.4: Matrice di correlazione per i dati ambientali (2003)

4.3 Il monossido di carbonio

La figura 4.1 riporta l'andamento della concentrazione di CO nell'anno 2003. E' possibile notare la consueta curva concava verso l'alto con un minimo nei mesi centrali dell'anno e un rialzo di notevole entità verso i mesi finali. Già dal grafico è possibile apprezzare una certa diminuzione nei primi mesi dell'anno, in concomitanza con i primi provvedimenti di riduzione del traffico. Cerchiamo ora di eliminare gli effetti delle variabili meteorologiche

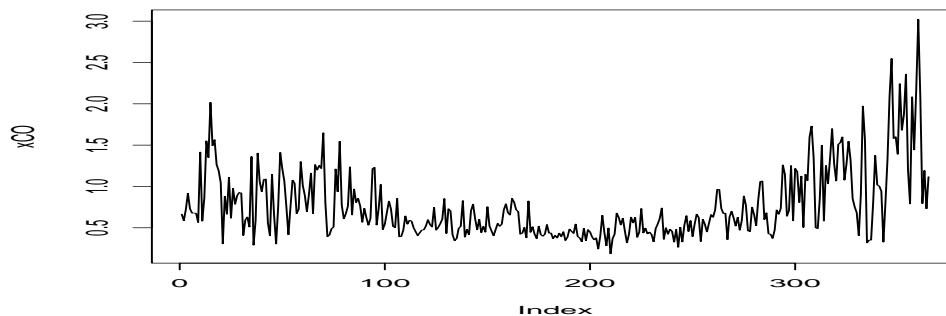


Figura 4.1: CO - grafico 2003

'temperatura' e 'umidità'. Questi sono i risultati della regressione:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.013998	0.107822	9.404	<2e-16
umidita	0.001792	0.001237	1.449	0.148
temperatura	-0.025258	0.002068	-12.212	<2e-16

Residual standard error: 0.3502 on 362 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.3246, Adjusted R-squared: 0.3209
 F-statistic: 86.98 on 2 and 362 DF, p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	3.045	3.045	24.833	9.71e-07
temperatura	1	18.290	18.290	149.135	< 2.2e-16
Residuals	362	44.395	0.123		

I dati indicano un calo di significatività di tutti i valori probabilmente dovuto alla minor numerosità campionaria. In particolare l'umidità secondo il test t non risulta statisticamente valida per spiegare la variabile y . Il modello è comunque globalmente significativo.

La figura 4.2 riporta l'andamento dei residui di regressione. La serie

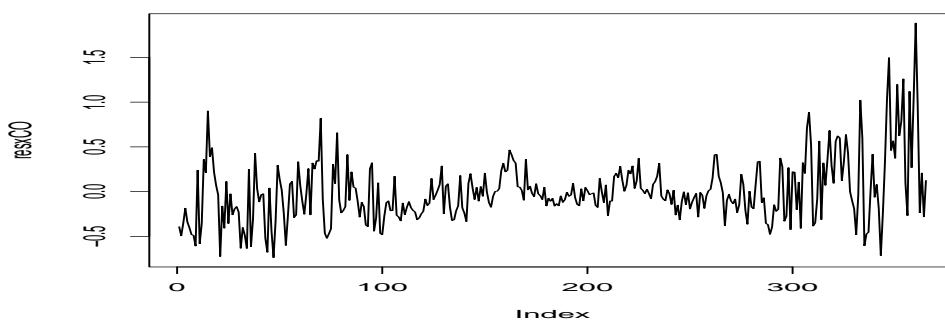


Figura 4.2: CO - residui di regressione (2003)

dei residui è stata successivamente analizzata alla luce dei risultati emersi dallo studio della serie storica riguardante il triennio 2000-2002. Il modello utilizzato è stato dunque un SARIMA $(2, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$ con i seguenti parametri:

Componente	Tipo	N°	Valore parametro
Ordinaria	AR	1	-0,070898117
		2	0,712898636
	MA	1	0,912320119
Stagionale	AR	1	0,999130649
	MA	1	-0,990046027
Intercetta			0,005111989

Il grafico dei residui del modello di serie storiche adottato è riportato nella figura 4.3. Possiamo notare una maggior fluttuazione nei mesi iniziali e finali dell'anno.

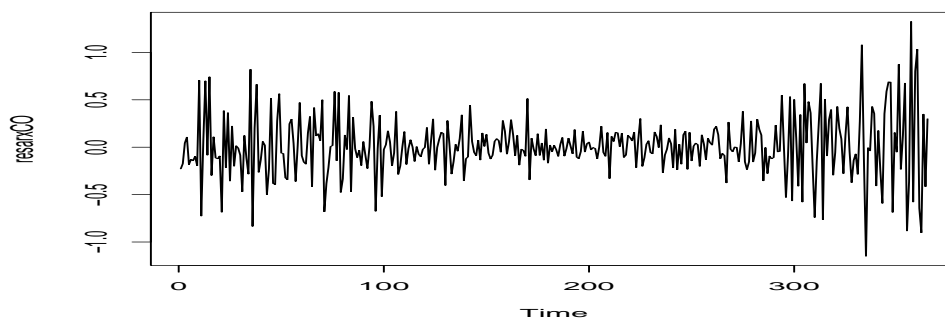


Figura 4.3: CO - residui modello serie storiche (2003)

A questo punto possiamo studiare la regressione dei residui sulla variabile *dummy* I_t^2 :

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.004708	0.015007	0.314	0.7540
It	-0.086868	0.050356	-1.725	0.0855

Residual standard error: 0.2498 on 302 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.009758, Adjusted R-squared: 0.006479
 F-statistic: 2.976 on 1 and 302 DF, p-value: 0.08554

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
It	1	0.1856	0.1856	2.9759	0.08554
Residuals	302	18.8399	0.0624		

²Di seguito nelle elaborazioni in R questa variabile sarà chiamata *It*. Per un richiamo del significato di questa variabile si veda la sezione 3.4

4.4 Il biossido di azoto

La figura 4.4 riporta l'andamento della concentrazione di NO_2 nell'anno 2003. L'andamento è quello già visto nella figura 3.7 con un consueta curva concava verso l'alto. Possiamo notare l'andamento irregolare dei primi mesi dell'anno, probabilmente causato dai provvedimenti di riduzione del traffico, che poi si regolarizza tornando ad assumere il decorso previsto. Analizziamo ora

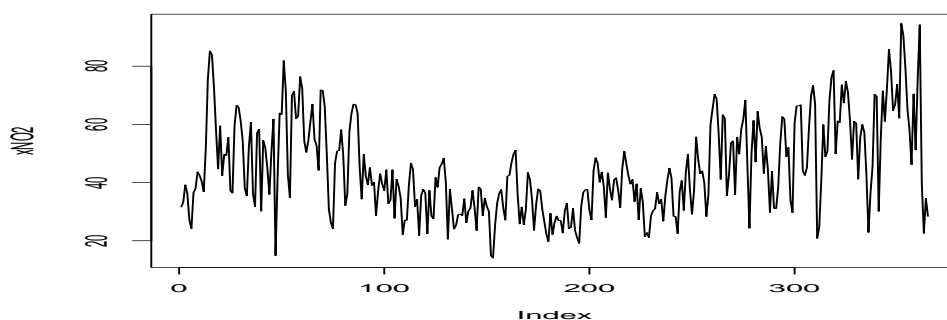


Figura 4.4: NO_2 - grafico 2003

l'influenza delle variabili meteorologiche:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	51.93555	4.30446	12.066	<2e-16
umidita	0.06968	0.04938	1.411	0.159
temperatura	-0.81898	0.08257	-9.919	<2e-16

Residual standard error: 13.98 on 362 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.2439, Adjusted R-squared: 0.2398

F-statistic: 58.4 on 2 and 362 DF, p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	3599	3599	18.413	2.286e-05
temperatura	1	19230	19230	98.384	< 2.2e-16
Residuals	362	70755	195		

Possiamo riscontrare la perdita di significatività della variabile 'umidità' come già rilevato per il CO, ma in generale il modello riproduce in maniera

piuttosto fedele i risultati della regressione per il triennio 2000-2002. Inoltre mantiene la propria significatività in senso globale.

La figura 4.5 riporta l'andamento dei residui di regressione. La serie dei

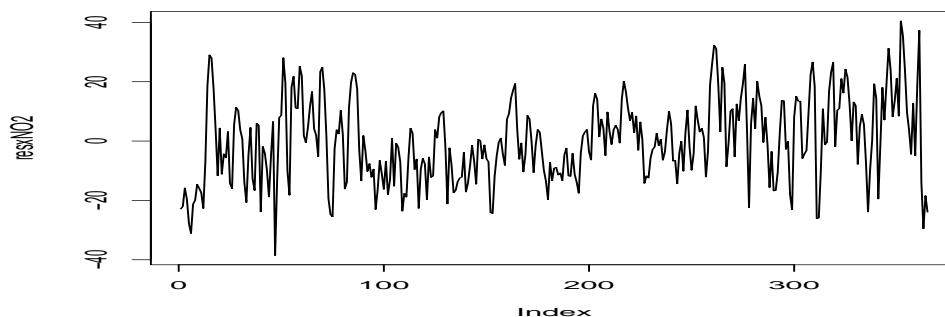


Figura 4.5: NO₂ - residui di regressione (2003)

residui è stata successivamente analizzata alla luce dei risultati emersi dallo studio della serie storica riguardante il triennio 2000-2002 tramite un modello SARIMA $(3, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$ con i seguenti parametri:

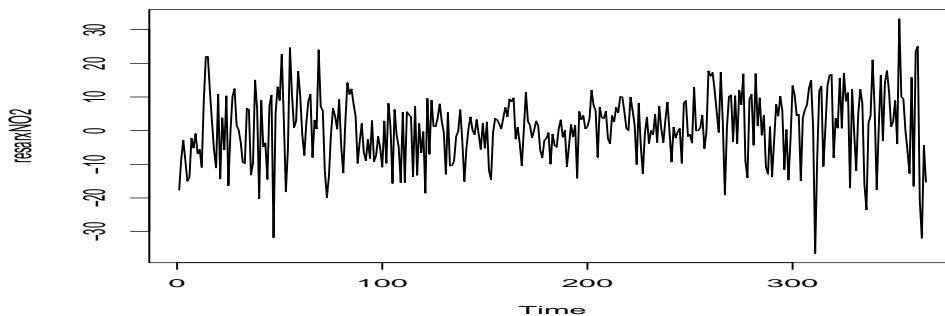
Componente	Tipo	N°	Valore parametro
Ordinaria	AR	1	-0,32036874
		2	0,45296091
		3	0,10608643
	MA	1	0,83583738
Stagionale	AR	1	0,99860187
	MA	1	-0,98249725
Intercetta			-0,00795152

Il grafico dei residui del modello di serie storiche adottato è riportato nella figura 4.6. Lo studio della regressione su I_t fornisce i seguenti risultati:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.5479	0.5285	1.037	0.301
It	-2.4620	1.7735	-1.388	0.166

Residual standard error: 8.797 on 302 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.006341, Adjusted R-squared: 0.003051
 F-statistic: 1.927 on 1 and 302 DF, p-value: 0.1661

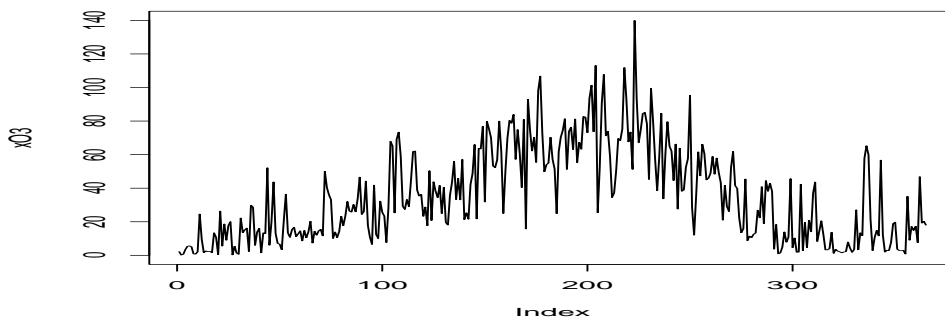
Figura 4.6: NO₂ - residui modello serie storiche (2003)

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
It	1	149.1	149.1	1.9273	0.1661
Residuals	302	23368.4	77.4		

4.5 L'ozono

La figura 4.7 riporta l'andamento della concentrazione di O₃ nell'anno 2003. L'andamento è quello già visto nella figura 3.10 con un consueta curva concava verso il basso. Possiamo notare l'andamento irregolare dei primi mesi dell'anno, probabilmente causato dai provvedimenti di riduzione del traffico, che poi si regolarizza tornando ad assumere il decorso previsto. Analizziamo

Figura 4.7: O₃ - grafico 2003

ora l'influenza delle variabili meteorologiche:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	66.58218	8.10896	8.211	3.92e-15
umidita	0.08850	0.09302	0.951	0.342
temperatura	-0.91986	0.15555	-5.914	7.74e-09

Residual standard error: 26.34 on 362 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.1042, Adjusted R-squared: 0.09927
 F-statistic: 21.06 on 2 and 362 DF, p-value: 2.232e-09

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	4955	4955	7.1438	0.007863
temperatura	1	24259	24259	34.9723	7.742e-09
Residuals	362	251101	694		

In questo caso possiamo ricondurre i nostri risultati agli studi relativi a CO e NO₂: la capacità esplicativa delle variabili 'temperatura' e 'umidità' diminuisce rispetto a quella del triennio precedente pur rimanendo significativo il modello nella sua globalità; in particolare l'umidità risulta non significativa nella spiegazione della variabile y .

La figura 4.8 riporta l'andamento dei residui di regressione. La serie dei

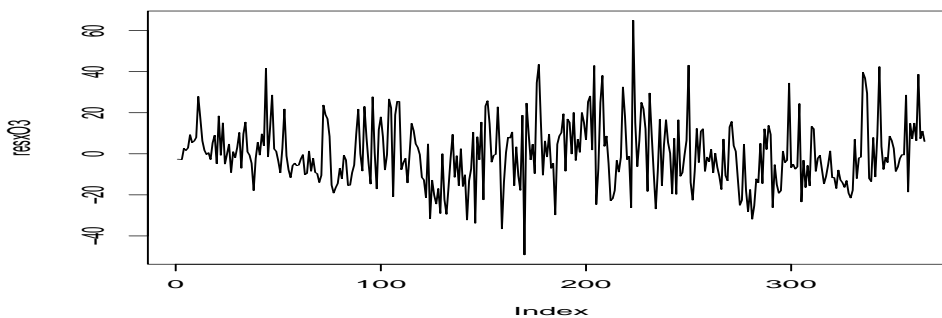


Figura 4.8: O₃ - residui di regressione (2003)

residui è stata successivamente analizzata alla luce dei risultati emersi dallo studio della serie storica riguardante il triennio 2000-2002 tramite un modello SARIMA $(4, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$ con i seguenti parametri:

Componente	Tipo	N°	Valore parametro
Ordinaria	AR	1	-0,29271632
		2	0,45296091
		3	0,44157687
		4	-0,01211781
	MA	1	0,80805930
Stagionale	AR	1	0,99815481
	MA	1	-0,97998008
Intercetta			0,14257858

Il grafico dei residui del modello di serie storiche adottato è riportato nella figura 4.9. Lo studio della regressione su I_t fornisce i seguenti risultati:

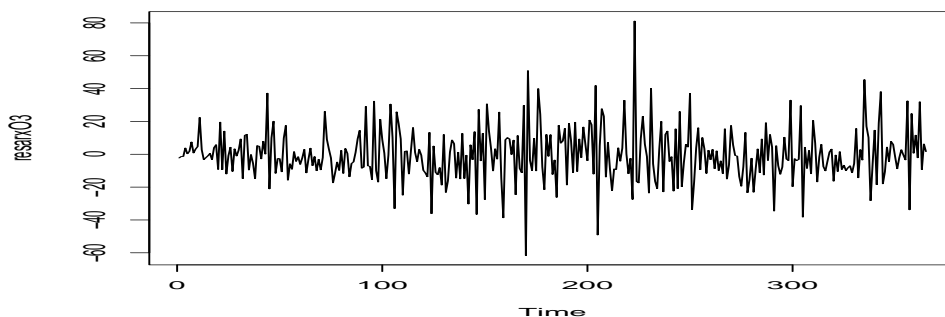


Figura 4.9: O₃ - residui modello serie storiche (2003)

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-0.4431	0.9729	-0.455	0.649
It	2.6622	3.2644	0.816	0.415

Residual standard error: 16.19 on 302 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.002197, Adjusted R-squared: -0.001107

F-statistic: 0.6651 on 1 and 302 DF, p-value: 0.4154

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
It	1	174	174	0.6651	0.4154
Residuals	302	79173	262		

4.6 Il particolato totale sospeso

La figura 4.10 riporta l'andamento della concentrazione del PTS nell'anno 2003. Il grafico dell'andamento mostra un picco nei primi mesi per poi ritornare a valori più contenuti. Di seguito analizziamo mediante il modello

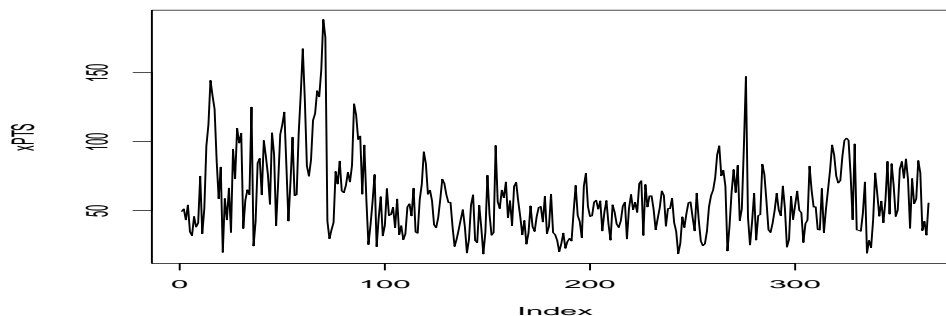


Figura 4.10: PTS - grafico 2003

lineare l'influenza delle variabili meteorologiche:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	27.35865	4.86043	5.629	3.64e-08
umidita	-0.34825	0.05576	-6.246	1.18e-09
temperatura	2.25680	0.09323	24.206	< 2e-16

Residual standard error: 15.79 on 362 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.6788, Adjusted R-squared: 0.677
 F-statistic: 382.5 on 2 and 362 DF, p-value: < 2.2e-16

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	44648	44648	179.16	< 2.2e-16
temperatura	1	146019	146019	585.94	< 2.2e-16
Residuals	362	90213	249		

In controtendenza rispetto ai due precedenti inquinanti il modello lineare che descrive l'andamento del PTS nell'anno 2003 rileva un incremento della capacità esplicativa (indicato dal coefficiente di determinazione multipla \bar{R}^2) rispetto al medesimo modello utilizzato per i dati relativi al triennio 2000-2002. Tutte le variabili e di conseguenza il modello complessivo risultano

significativi.

La figura 4.11 riporta l'andamento dei residui di regressione. La serie dei

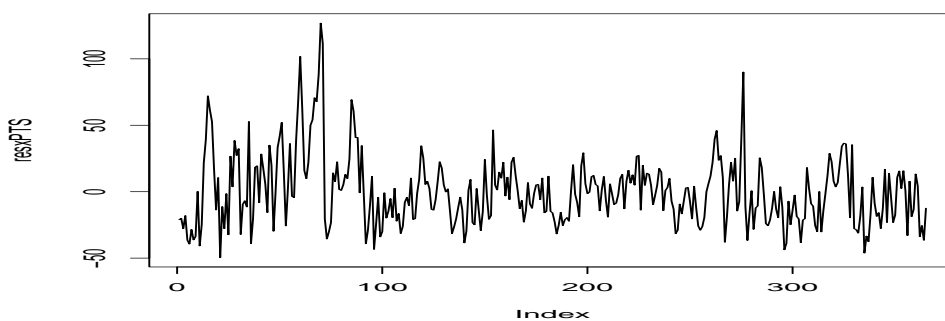


Figura 4.11: PTS - residui di regressione (2003)

residui è stata successivamente analizzata alla luce dei risultati emersi dallo studio della serie storica riguardante il triennio 2000-2002 tramite un modello SARIMA $(3, 0, 1) \times (1, 0, 1)_7$ con i seguenti parametri:

Componente	Tipo	N°	Valore parametro
Ordinaria	AR	1	0,8492824
		2	-0,1667502
		3	0,1144118
	MA	1	-0,1206032
Stagionale	AR	1	0,9873923
	MA	1	-0,9530974
Intercetta			-1,2001453

Il grafico dei residui del modello di serie storiche adottato è riportato nella figura 4.12. Notevoli alcuni picchi negativi in corrispondenza dei giorni di riduzione del volume del traffico. Lo studio della regressione su I_t fornisce i seguenti risultati:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.3206	1.3120	0.244	0.807
I_t	-3.4825	4.4023	-0.791	0.430

Residual standard error: 21.84 on 302 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.002068, Adjusted R-squared: -0.001237
 F-statistic: 0.6258 on 1 and 302 DF, p-value: 0.4295

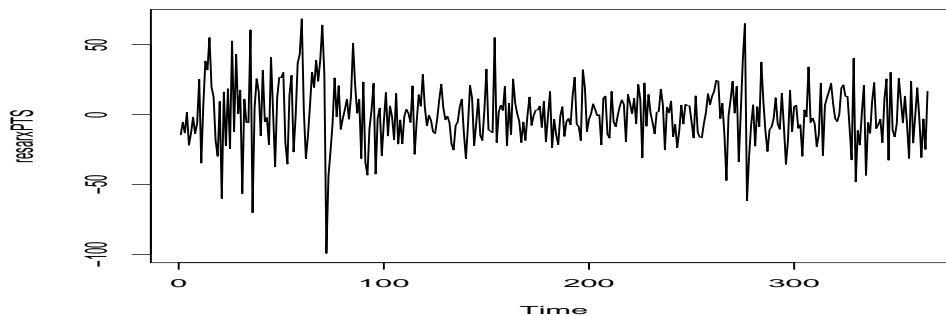


Figura 4.12: PTS - residui modello serie storiche (2003)

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
It	1	298	298	0.6258	0.4295
Residuals	302	143993	477		

4.7 Il biossido di zolfo

La figura 4.7 riporta la concentrazione del SO_2 nell'anno 2003. Il grafico mostra un andamento abbastanza particolare, dal momento che mostra tre piccole curve concave verso l'alto con altrettanti picchi, in corrispondenza di febbraio, ottobre e dicembre. Di seguito analizziamo mediante il modello

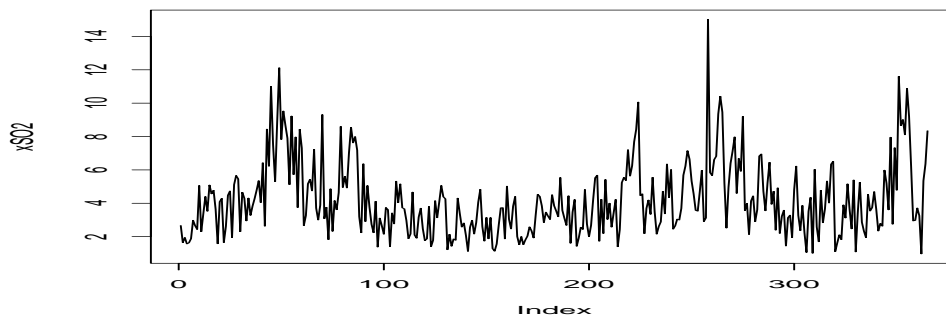


Figura 4.13: SO_2 - grafico 2003

lineare l'influenza delle variabili meteorologiche:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	7.97953	0.64506	12.370	< 2e-16
umidita	-0.03955	0.00740	-5.345	1.60e-07
temperatura	-0.05268	0.01237	-4.258	2.63e-05

Residual standard error: 2.095 on 362 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.09276, Adjusted R-squared: 0.08775
 F-statistic: 18.51 on 2 and 362 DF, p-value: 2.228e-08

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	82.89	82.89	18.883	1.808e-05
temperatura	1	79.57	79.57	18.128	2.635e-05
Residuals	362	1588.97	4.39		

Il modello — pur significativo — risulta essere poco esplicativo, come indicato da un valore irrilevante del coefficiente di determinazione multipla.

La figura 4.14 riporta l'andamento dei residui di regressione. La serie dei

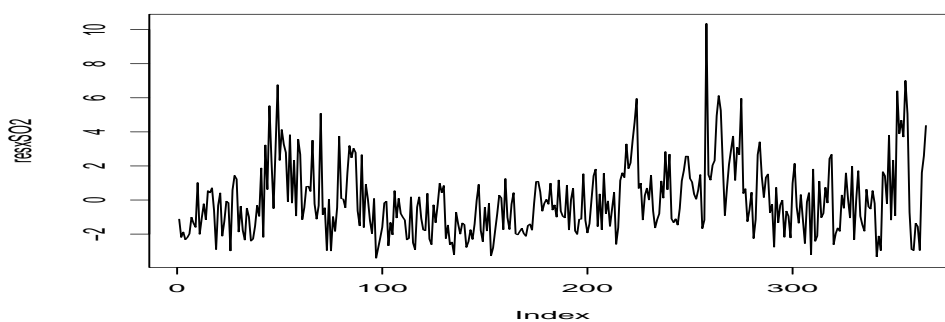


Figura 4.14: SO₂ - residui di regressione (2003)

residui è stata successivamente analizzata alla luce dei risultati emersi dallo studio della serie storica riguardante il triennio 2000-2002 tramite un modello SARIMA $(1, 0, 1) \times (1, 0, 3)_7$ con i seguenti parametri:

Componente	Tipo	N°	Valore parametro
Ordinaria	AR	1	0,78385019
	MA	1	-0,60003069
Stagionale	AR	1	0,98780337
		2	0,09337447
		3	-0,08906286
	MA	1	-0,96961571
Intercetta			0,01804022

Il grafico dei residui del modello di serie storiche adottato è riportato nella figura 4.15. Lo studio della regressione su I_t fornisce i seguenti risultati:

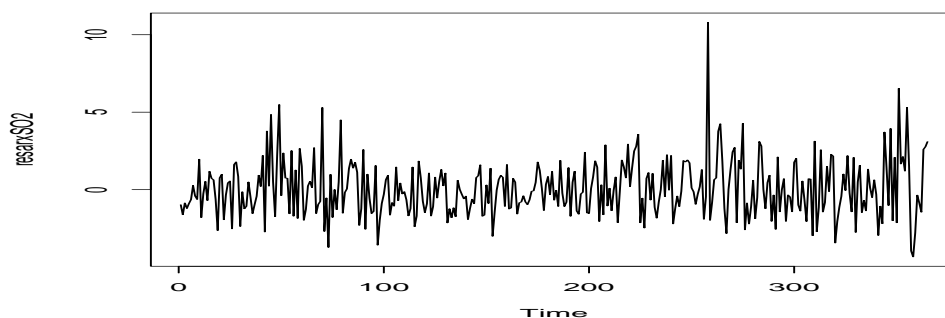


Figura 4.15: SO₂ - residui modello serie storiche (2003)

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.05777	0.10275	0.562	0.574
It	-0.31598	0.34478	-0.916	0.360

Residual standard error: 1.71 on 302 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.002773, Adjusted R-squared: -0.0005287
 F-statistic: 0.8399 on 1 and 302 DF, p-value: 0.3602

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
It	1	2.46	2.46	0.8399	0.3602
Residuals	302	883.22	2.92		

Capitolo 5

Risultati

5.1 I risultati della regressione

Riepiloghiamo nella tabella 5.1 i risultati osservati regredendo i residui di serie storiche con la variabile *dummy* I_t .

Inquinante	$\hat{\beta}$	p-value
CO	-0,086868	8,55%
NO ₂	-2,4620	16,6%
O ₃	2,6622	41,5%
PTS	-3.4825	43,0%
SO ₂	-0.31598	36,0%

Tabella 5.1: Riepilogo della significatività di I_t per gli inquinanti principali

Salvo nel caso particolare e "inaspettato" dell'ozono, che presenta un incremento medio della concentrazione nei giorni di chiusura al traffico, si tratta in generale di coefficienti che indicano diminuzioni di modesta entità, soprattutto se si valuta la variazione percentuale rispetto alle medie pre-intervento tratte dalla tabella 3.2 (-8% per il CO, -6% per il NO₂, -8% per il PTS, -2% per il SO₂).

In generale si tratta anche di coefficienti di modesta e a volte quasi irrilevante significatività statistica. Ad un livello del 95% si rifiutano tutte e cinque le ipotesi che la diminuzione (o la variazione, includendo anche il caso dell'ozono) nella concentrazione di ciascun inquinante dipenda linearmente dall'intervento adottato. Solo per quanto riguarda il *monossido di carbonio* un livello di significatività del 90% porta a rifiutare l'ipotesi nulla $H_0 : b = 0$ ¹.

¹per un richiamo al significato di questo test statistico si veda la descrizione del modello

5.2 Conclusioni

Eliminati gli effetti delle variabili meteorologici e della 'naturale' evoluzione delle concentrazioni descritta dai parametri della nostra serie storica sembrerebbe dunque dai risultati ottenuti che il provvedimento 'blocco del traffico' non abbia sortito gli effetti desiderati se non per una — modesta — diminuzione dei valori del monossido di carbonio.

Il risultato all'apparenza appare controintuitivo secondo il senso comune, anche se si potrebbe ipotizzare una maggior sensibilità del CO (come noto si tratta infatti di un gas prodotto quasi interamente dalle emissioni veicolari) alle variazioni del volume del traffico. Si tratta comunque di un risultato di "prima analisi", che potrebbe risentire di varie fonti di disturbo all'attendibilità dei risultati.

Nella prossima sezione saranno enumerate le probabili fonti di incertezza nella direzione di una stima maggiormente precisa.

5.3 Problemi metodologici

I problemi che potrebbero causare distorsioni nelle stime dei parametri e quindi creare una turbativa all'attendibilità dei risultati riguardano principalmente le fonti di produzione del dato e la qualità dello stesso.

Un primo ordine di incertezza potrebbe derivare dalla discrepanza tra i dati provenienti dalle varie centraline, a volte talmente marcata da non poter essere giustificata dalla sola dislocazione geografica, altre volte con andamenti in totale disaccordo tra una centralina e un'altra.

Altri problemi potrebbero provenire dall'indisponibilità di un set appropriato di variabili meteorologiche in grado di spiegare con maggior precisione i dati sugli inquinanti. La mancanza di dati precisi sulla velocità del vento (oltre all'impossibilità di stabilire nel nostro caso una "velocità media giornaliera" di fenomeni di movimento non assimilabili tra loro a causa della diversa direzione) e sulla presenza e l'entità delle precipitazioni, a causa di una notevole quantità di dati mancanti. È noto infatti il contributo decisivo delle piogge e del vento nell'abbattimento dei livelli di concentrazione degli inquinanti.

Da ultimo la scelta del modello lineare - che all'apparenza sembrerebbe giustificato dalla non rilevanza delle interazioni tra variabili - potrebbe essersi rivelata come un'ipotesi semplificativa per l'analisi, anche se la scelta di altre strade (ad esempio il trattamento dei dati log-trasformati) non ha portato a risultati significativi.

Appendice

Modelli statistici

Partiamo dal presupposto di avere a disposizione un insieme di variabili che chiameremo *esplicative* (X) e un gruppo di altre variabili che chiameremo *dipendenti* (y). L'assunto fondamentale è quello di considerare che vi sia una relazione che lega X a y e che dunque la variabile dipendente sia stata in qualche modo determinata da X . È tuttavia noto che le variabili dipendenti si distribuiscono secondo una determinata legge probabilistica: $y \sim F_0$.

Tipicamente vi sono più modelli probabilistici (F_0) che si ritengono compatibili con y e l'insieme di tali modelli è detto Modello Statistico e viene indicato con la lettera \mathcal{F} :

$$\mathcal{F} = \{F_0(\theta), \theta \in \Theta\}$$

ove Θ è lo spazio parametrico.

Esistono due tipi di modelli statistici: i modelli parametrici e i modelli non parametrici. Un modello statistico si dice *parametrico* se nella precedente relazione vi è una corrispondenza biunivoca tra $\Theta \subseteq \mathbb{R}^n$ (con $n \in \mathbb{N}$) e \mathcal{F} ; mentre se Θ non può essere posto in corrispondenza biunivoca il modello è un modello *non parametrico*.

Modello Lineare Generalizzato (GLM)

Un modello d'analisi è dunque un costrutto teorico scelto per rappresentare le proprietà e le relazioni assunte tra gli elementi che costituiscono i dati in esame.

Se queste relazioni sono di tipo lineare, il modello che si sceglie è un Modello Lineare Generalizzato del tipo:

$$y = \sum_j \beta_j x_j + \varepsilon = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \varepsilon$$

ove ε è il termine di errore indipendente con media 0 e varianza pari a σ^2 .

Solitamente per determinare gli stimatori ottimali β_j è utilizzato il metodo dei Minimi Quadrati, ovvero si cercano i β_j che rendono minimo il quadrato dello scarto tra il valore reale osservato della variabile dipendente e il valore approssimato dal modello:

$$\min \sum_j (y_i - \hat{y})^2 = \min \sum_j (y_i - \hat{\beta}_j x_j)^2$$

Se nel modello è stata inserita un'intercetta, la sua stima è uguale alla media aritmetica della variabile risposta y .

Il modello SARIMA

I normali processi ARIMA per lo studio delle serie storiche non consentono di modellare andamenti periodici di tipo stagionale. Box e Jenkins (1976) hanno esteso i processi ARIMA in modo da trattare anche una stazionarietà di tipo periodico. Nella sua forma più completa il generico processo $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_S$ (detto anche SARIMA, Da *Seasonal* ARIMA) si può scrivere come

$$\phi(B)\Phi(B^S)(1-B)^d(1-B^S)^DY_t = \theta(B)\Theta(B^S)\varepsilon_t$$

dove:

- S è il periodo stagionale
- $\phi(B)$ è l'operatore autoregressivo non stagionale di ordine p
- $\Phi(B^S)$ è l'operatore autoregressivo stagionale di ordine P
- $\theta(B)$ è l'operatore a media mobile non stagionale di ordine q
- $\Theta(B^S)$ è l'operatore a media mobile stagionale di ordine Q
- $(1-B)^d$ è l'operatore differenza non stagionale di ordine d
- $(1-B^S)^D$ è l'operatore differenza stagionale di ordine D

L'idea di base è che per una serie storica, osservazioni che distano S periodi come $y_t, y_{t-S}, y_{t-2S}, \dots$, dovrebbero essere 'simili' e fortemente correlate tra loro, a causa di una non stazionarietà di tipo periodico del processo che le ha generate.

Nella formula 5.3 questo tipo di non stazionarietà viene modellata secondo la logica dei processi ARIMA: eventuali non stazionarietà stagionali possono essere eliminate tramite $(1 - B^S)^D$, mentre gli operatori $\Phi(B^S)$ e $\Theta(B^S)$ modellano la dipendenza tra osservazioni distanti $S, 2S, 3S, \dots$ istanti temporali².

Il criterio AIC

Il criterio di Akaike o criterio AIC, acronimo di *Asymptotic Information Criterion* (Akaike, 1974) è un criterio di applicabilità generale utilizzato sia nello studio delle serie storiche sia nell'analisi di regressione per evitare il rischio di sovrapparametrizzazione (*overfitting*) di un modello. Un buon adattamento ai dati disponibili da parte di un modello poco parsimonioso, infatti, non corrisponde necessariamente ad una buona capacità previsiva del modello stesso.

Per ovviare a questo inconveniente il criterio AIC, che rappresenta una stima dell'indice di distanza tra modelli di Kullback-Leibler, come molti altri criteri basati sullo stesso principio assegna un 'costo' all'introduzione di ogni parametro addizionale. Questa la formulazione (Parpinel e Provasi, 1999) della quantità di informazione del criterio AIC, che dovrà essere minimizzata utilizzando nelle stime un appropriato numero di parametri:

$$AIC(k) = \frac{2}{n} \left(\log L(\hat{\delta}) - k \right)$$

k rappresenta il numero di parametri del modello (in un $ARMA(p, q)$, ad esempio, è pari a $p + q + 2$), $\hat{\delta}$ è il vettore ($k \times 1$) contenente i parametri stimati e $L(\hat{\delta})$ è la funzione di verosimiglianza calcolata in $\hat{\delta}$ ed in ipotesi di gaussianità del *white noise*.

La quantità $\frac{2k}{n}$ rappresenta una sorta di 'penalità', legata al numero di parametri del modello, che diminuisce al crescere di n , diventando del tutto trascurabile per valori elevati di n ; è dunque riscontrabile una certa tendenza

²Poiché $(1 - B^S) = (1 - B)(1 + B + B^2 + \dots + B^{S-1})$, l'operatore di differenziazione stagionale di una serie comporta una differenziazione del primo ordine, atta a rimuovere eventuali trend lineari.

alla sovrapparametrizzazione da parte di questo criterio. Si può inoltre dimostrare che le stime del criterio AIC, non sono consistenti e asintoticamente sovrastimano il vero ordine con una probabilità non nulla.

Il test di autocorrelazione dei residui

Il passo finale nella costruzione di un modello di serie storiche è quello di controllare l'adeguatezza del modello stesso facendo uso di test diagnostici. Alla base di tali test c'è la considerazione che se il modello è stato correttamente identificato e stimato allora sui residui $e_t = (y_t - \hat{y}_t)$ devono potersi riscontrare le ipotesi fatte, *a priori*, sui disturbi e_t . Uno dei test utilizzati per questo tipo di analisi diagnostiche è il test di autocorrelazione dei residui.

Questo test consiste nell'analizzare la serie dei residui stimati e_t come se fosse una serie storica a sé stante, della quale si può calcolare la funzione di autocorrelazione empirica $\hat{\rho}_k$ per verificare se è significativamente diversa da quella di un processo *white noise*, e cioè identicamente pari a 0. Poiché per un white noise la varianza di $\hat{\rho}_k$ è approssimativamente pari a $1/n$ per ogni k sotto ipotesi di normalità la regione di accettazione al livello di significatività α è data da $[-k_{\alpha/2}/\sqrt{n}, k_{\alpha/2}/\sqrt{n}]$.

Questo risultato è utile perché permette di studiare l'ipotesi di incorrelazione seriale, ad esempio per un livello di significatività del 5%, tracciando le due rette parallele all'asse delle ascisse in $-1.96/\sqrt{n}$ e $1.96/\sqrt{n}$ e osservando il comportamento della funzione di autocorrelazione empirica al variare di k .

Il comando utilizzato per il calcolo di questa funzione in R (`acf`) per default traccia il plot di questa funzione inserendo le due linee tratteggiate ad un livello di significatività del 95%

L'output di R

Nel corso di questo studio sono stati riportati i dati tratti dalle elaborazioni statistiche fornite dal programma R. Le prossime sezioni spiegheranno nel dettaglio il significato di ciascuna voce mostrata in *output*.

Il modello lineare

Per l'analisi dei risultati per il modello lineare R dispone di due comandi, che in questa trattazione sono stati accorpatisi: `summary(x)` e `anova(x)`, che si riferiscono al modello x e che sono utilizzati rispettivamente per il riepilogo dei parametri stimati e per l'analisi della varianza. Osserviamo un esempio del primo dei due:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	27.25212	3.43164	7.941	4.94e-15
umidita	-0.36327	0.03673	-9.891	< 2e-16
temperatura	2.32379	0.07562	30.732	< 2e-16

Residual standard error: 17.93 on 1092 degrees of freedom
 Multiple R-Squared: 0.5762, Adjusted R-squared: 0.5754
 F-statistic: 742.3 on 2 and 1092 DF, p-value: < 2.2e-16

Il primo blocco oltre a fornire una stima per i parametri che compongono il modello (intercetta e coefficienti delle variabili esplicative) aggiunge il valore dell'errore standard (seconda colonna), della statistica t di Student (terza colonna) e dell' α osservato (o p-value) nel test t. Quest'ultima colonna è importante per stabilire la significatività di ogni singola variabile nella spiegazione del modello: nel caso in cui tale livello fosse superiore a quello fissato in precedenza e ritenuto "soglia di sicurezza" per la bontà della nostra affermazione (ad esempio lo 0.05) si potrà ritenere trascurabile l'apporto della variabile dipendente nella determinazione della indipendente.

Il secondo blocco riguarda la bontà del modello nel suo complesso: la prima riga ne calcola l'errore standard, la seconda i coefficienti di determinazione multipla normale e corretto, la terza il risultato del test F di Snedecor (con indicati il numero di parametri stimati e i gradi di libertà), utilizzato per stabilire la significatività dell'incremento di varianza spiegata apportata dal modello lineare prescelto: anche in questo caso un p-value superiore a quello fissato in precedenza farà ritenere poco esplicativo il modello scelto nella sua globalità.

È da precisare che la potenza di calcolo di R non è adatta a calcolare cifre inferiori a $2 \cdot 10^{-16}$. Un α osservato inferiore sarà perciò riportato come <2e-16, valore comunque adeguato ai fini del nostro calcolo e delle elaborazioni statistiche in genere.

Passiamo ora ad osservare un esempio di tabella di analisi della varianza (ANOVA), utile a fornire, analogamente al comando precedente, informazioni sull'importanza di ciascuna variabile:

Analysis of Variance Table

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
umidita	1	332.7	332.7	86.724	< 2.2e-16
temperatura	1	132.7	132.7	34.600	5.379e-09
Residuals	1092	4188.6	3.8		

Le cinque colonne indicano nell'ordine:

- il numero di gradi di libertà (pari al numero dei parametri stimati)
- la somma dei quadrati, ovvero la varianza spiegata inserendo nel modello una variabile oltre all'intercetta;
- la media dei quadrati (che si ottiene dalla divisione della somma dei quadrati per il numero di gradi di libertà ed è utile per il calcolo della statistica test F di Snedecor)
- il valore della statistica F, che indica il rapporto tra la varianza spiegata inserendo nel modello una nuova variabile e quella ottenuta dal modello con la sola intercetta
- l' α osservato per il valore del test F.

Valori superiori ad un livello di soglia fissato a priori (ad esempio 0.05) indicano un guadagno non significativo nella spiegazione della y e quindi scarsa importanza della variabile esplicativa nel modello.

Le serie storiche

Una volta calcolati i parametri di un modello di serie storiche (tramite ad esempio il comando `arma(x,...)` R visualizza queste informazioni:

Coefficients:

	ar1	ar2	ar3	ma1	sar1	sma1	interc
	1.6110	-0.6849	0.0600	-0.8947	0.9934	-0.9748	-0.0235
s.e.	0.0302	0.0582	0.0327	0.2188	0.0029	0.0110	7.5190

sigma² estimated as 183.3: loglik. = -4408.15, aic = 8832.31

le intestazioni delle colonne indicano nel loro ordine i parametri del modello di serie storiche selezionato (ar e ma riguardano la parte ordinaria e sono i coefficienti della componente autoregressiva e a media mobile rispettivamente; allo stesso modo, sar e sma, che riguardano però la componente stagionale; l'ultimo parametro è l'intercetta del modello). Nella prima riga sono riportati i valori dei parametri stimati, mentre nella seconda il calcolo degli *standard error*.

Il blocco successivo visualizza il σ^2 stimato, la log-verosimiglianza e il valore del criterio AIC per i valori di quel modello in ipotesi di gaussianità del *white noise*.

Bibliografia

- [1] D. Mendola *Road traffic restrictions and air pollution in an urban area. A case study in Palermo..* Working paper GRASPA. (2002)
- [2] A. Maroso *Effetto a breve termine dell'inquinamento atmosferico sulla mortalità: Verona, luglio 1995 - giugno 1999.* Tesi di laurea, università di Padova, facoltà di Scienze Statistiche. (2002)
- [3] T. Di Fonzo, F. Lisi *Complementi di statistica economica: analisi delle serie storiche univariate* (2000)
- [4] ARPAV Regione Emilia, *Accordo di programma sulla qualità dell'aria "per la gestione dell'emergenza da PM₁₀ e per il progressivo allineamento ai valori fissati dalla UE al 2005 di cui al DM 02/04/2002, N. 60" - Valutazione dell'andamento degli interventi ottobre 2002 - marzo 2003* (Sintesi della relazione) (2002)
- [5] G. Accetta, M. Baccini, A. Biggeri, C. Lagazio e il gruppo Misa: "Stime degli effetti a breve termine degli inquinanti atmosferici in Italia" - *Epidemiologia e Prevenzione*, 26 (5) (Sett./Ott.2002)
- [6] DM 2 aprile 2002, n. 60, Recepimento della direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo e della direttiva 2000/69/CE relativa ai valori limite di qualità dell'aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio. *Suppl. n.77 alla Gazzetta Ufficiale n.87 del 13 aprile 2002*
- [7] A. Biggeri, P. Bellini, B. Terracini: "Metanalisi italiana degli studi sugli effetti a breve termine dell'inquinamento atmosferico" - *Epidemiologia e Prevenzione*, 25 (suppl.):1-72 (Marzo/Aprile 2001)
- [8] R. Boggiano: *Introduzione ad R - Versione 2.0* - (Aprile 2002)

-
- [9] Provincia di Verona - Assessorato all'ecologia, ARPAV - Dipartimento di Verona *Rapporto sullo stato dell'ambiente della provincia di Verona* - Prima edizione (Novembre 2002)
- [10] Provincia di Verona - Assessorato all'ecologia, ARPAV - Dipartimento di Verona *La qualità dell'aria. Comune e Provincia di Verona. Anno 2002-2003. Rapporto sullo stato dell'ambiente della provincia di Verona* - Versione PDF (Dicembre 2002)
- [11] Unione Europea: "Direttiva 1999/62/CE del Consiglio del 27 settembre 1996 in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria ambiente" *Gazzetta Ufficiale* n.L 296 (21 Novembre 1996)
- [12] Unione Europea: "Direttiva 1996/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo" *Gazzetta Ufficiale* n.L 163/41 (29 Giugno 1999)
- [13] Unione Europea: "Direttiva 2000/69/CE del Consiglio del 16 novembre 1996 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il benzene e il monossido di carbonio" *Gazzetta Ufficiale* n.L 313/12 (31 Dicembre 2000)
- [14] C.E.P. Box e C.M. Jenkins *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, San Francisco, Holden Day. (1976)
- [15] F. Parpinel e C. Provasi *Probabilità e statistica per le scienze economiche*, Torino, Giappichelli (1999)
- [16] A. Bardeschi, A. Colucci, V. Gianelle, M. Gnagnetti, M. Tamponi, G. Tebaldi "Analysis of the impact on air quality of motor vehicle traffic in the Milan urban area", *Atmos. Environ.*, 25B, 415-428 (1991)
- [17] M. Cammarota, F. Gallo, "Modelli stocastici per l'analisi dei dati di qualità dell'aria" *Annali di statistica*, ISTAT (1996)
- [18] G. Finzi, G. Brusasca, *La qualità dell'aria. Modelli previsionali e gestionali* Masson, Milano (1991)
- [19] <http://www.arpa.veneto.it>
- [20] <http://www.arpa.emr.it>
- [21] <http://www.comune.verona.it>
- [22] <http://www.gazzettaufficiale.it>