

4 LA QUALITÀ DELL'ARIA SU MACROSCALA

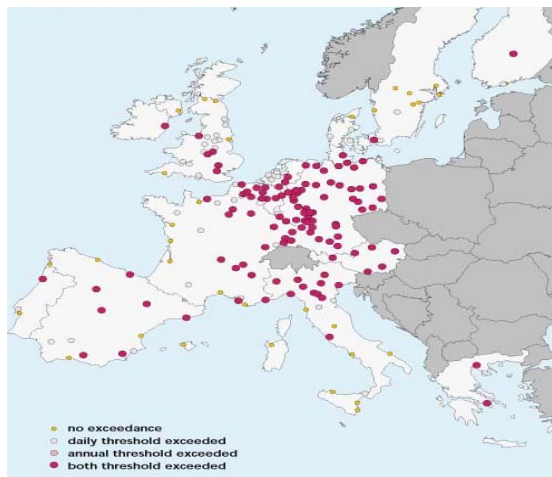
4.1 Introduzione

L'inquinamento atmosferico nelle zone urbanizzate è dovuto principalmente a sorgenti antropiche: traffico, emissioni industriali, consumi domestici. Il contributo delle sorgenti naturali quali gli incendi è solo marginale. In corrispondenza delle aree urbane i trasporti sono la principale fonte di emissione di inquinanti come ossidi d'azoto, benzene, monossido di carbonio e polveri fini. Possiamo affermare che nelle nostre città la qualità dell'aria risulta spesso critica, si osservano infatti superamenti degli attuali limiti previsti per ozono, PM10 e benzene. La stagnazione dell'aria è una caratteristica peculiare in Val Padana specie in condizioni meteorologiche di blocco; in tali situazioni vengono così favoriti tanto i processi di accumulo degli inquinanti quanto le reazioni chimiche con formazione di inquinanti secondari come l'ozono e la componente secondaria del PM10. In questo capitolo verranno pertanto analizzati sia la valutazione delle concentrazioni di questi due principali inquinanti sulla nostra provincia, sia la loro correlazione con le situazioni meteorologiche più critiche.

4.2 Le polveri sottili

Le polveri sottili sono particelle che provengono sia da fonti naturali (processi di erosione, eruzioni vulcaniche, nuclei di cloruro di sodio da mare ed oceani, etc.), sia da attività antropiche che implicano processi di combustione incompleta (fumi da traffico veicolare, riscaldamento, fonderie, etc.), abrasione di materiali solidi e uso di materiali in polvere (industria del marmo e del cemento, industria delle costruzioni in genere, lavorazione e stoccaggio del grano, etc.). Le particelle sospese sono classificate in PM10 e PM2.5 a seconda del loro diametro, rispettivamente inferiore a 10 μm e 2.5 μm . Il traffico urbano contribuisce all'emissione di particolati sia con la combustione, sia attraverso la polverizzazione della gomma sull'asfalto. I principali meccanismi di rimozione dall'atmosfera sono la sedimentazione, che però è lenta e riguarda solamente le particelle di dimensioni maggiori di 10 μm , e il dilavamento da parte delle piogge (*washout*), efficace per particelle maggiori di 2 μm ; particelle di dimensioni ancora minori vengono rimosse per coagulazione in particelle di dimensioni maggiori, che possono poi subire uno dei due processi precedenti. L'andamento meteorologico gioca un ruolo essenziale nell'andamento delle concentrazioni di particolato: la presenza di precipitazioni e il rimescolamento degli strati d'aria più vicini al suolo, operato da ventilazione di tipo termico (brezze) o dinamico (vento di gradiente), influiscono direttamente sui processi di rimozione. Situazioni di calma dovuta a situazioni di blocco anticiclonico, cioè un prolungato periodo anche oltre ai 30 giorni caratterizzato da alta pressione, determinano condizioni di scarso rimescolamento e conseguente progressivo accumulo delle polveri ed inquinanti in genere. A livello europeo (Figura 4-1), molte città presentano superamenti per ciò che riguarda i valori limite sia dell'esposizione cronica che di quella acuta, anche se la tendenza per il prossimo decennio indica una diminuzione.

Figura 4-1: superamenti degli standard per il PM10. Anno di riferimento: 1995. Valore degli standard: più di 7 superamenti della media giornaliera di 50 mg/m^3 , superamento della media annuale di 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (fonte: EEA Agenzia Europea per Ambiente, Centro Tematico europeo per la Qualità dell'Aria - ETC/AQ)



4.2.1 La normativa

Il decreto ministeriale n. 60 dell'aprile 2002 ha recepito la Direttiva CEE 69/2000 che fissa per il PM10 valori limiti per la protezione della salute umana. Si riportano nella tabella seguente (Tabella 4-1) i valori limite per l'esposizione acuta e cronica riferiti a due fasi: la prima che dopo un periodo transitorio raggiunge il regime al 1° gennaio 2005, la seconda che subentra dal 1° gennaio 2010.

Tabella 4-1: limiti di concentrazione di PM10 stabiliti dalla normativa vigente.

Esposizione acuta

Inquinante	Tipologia	Valore	Riferimento legislativo
PM ₁₀ Fase 1	Limite di 24 h da non superare più di 35 volte per anno civile	1 gennaio 2002: 65 µg/m ³ 1 gennaio 2003: 60 µg/m ³ 1 gennaio 2004: 55 µg/m ³ 1 gennaio 2005: 50 µg/m ³	DM 60/02
PM ₁₀ Fase 2**	Limite di 24 h da non superare più di 7 volte per anno civile	1 gennaio 2010: 50 µg/m ³	DM 60/02

Esposizione cronica

Inquinante	Tipologia	Valore	Riferimento legislativo
PM ₁₀ Fase 1	Valore limite annuale Anno civile	1 gennaio 2002: 44.8 µg/m ³ 1 gennaio 2003: 43.2 µg/m ³ 1 gennaio 2004: 41.6 µg/m ³ 1 gennaio 2005: 40.0 µg/m ³	DM 60/02
PM ₁₀ Fase 2**	Valore limite annuale Anno civile	1 gennaio 2005: 30 µg/m ³ 1 gennaio 2006: 28 µg/m ³ 1 gennaio 2007: 26 µg/m ³ 1 gennaio 2008: 24 µg/m ³ 1 gennaio 2009: 22 µg/m ³ 1 gennaio 2010: 20 µg/m ³	DM 60/02

4.2.2 Effetti sulla salute

Gli effetti nocivi sull'uomo si riscontrano essenzialmente nell'apparato respiratorio, la cui capacità di auto-difesa dalle polveri varia molto a seconda delle loro dimensioni. Particelle con dimensioni minori penetrano più facilmente in profondità. Le particelle più grosse (> 5 µm) sono in parte trattenute nelle cavità nasali e nella gola diversamente da quelle con diametro inferiore a 5 µm che possono sfuggire alle ciglia arrivando fino ai bronchi e da quelle di dimensioni 0.1-1.1 µm che raggiungono gli alveoli polmonari. Quest'ultima frazione può essere assorbita dal sangue e provocare intossicazione, mentre le precedenti possono provocare fenomeni irritativi nei tratti delle vie respiratorie dove si depositano. Gli effetti dell'esposizione nel lungo periodo comprendono tosse e catarro, diminuzione della capacità polmonare, bronchite, tumore polmonare, aggravamento di problemi respiratori e cardiaci, asma. La composizione chimica delle polveri PM10 comprende sostanze tossiche e/o cancerogene come metalli pesanti (piombo, cadmio, etc.) e idrocarburi policiclici aromatici.

Il diametro delle particelle in sospensione è indicativamente correlato anche alla fonte di provenienza come indicato nella Tabella 4-2.

Tabella 4-2: principali fonte di provenienza dei diversi particolati.

Diametro	Provenienza
> 10 µm	Processi meccanici (erosione, macinazione, etc.), polverizzazione di materiali da parte di autoveicoli
1-10 µm	Particolari tipi di terreno, polveri prodotte da industrie, sali marini
0.1-1 µm	Combustione e aerosol fotochimica
< 0.1 µm	Particelle non sempre identificabili chimicamente, originate quasi interamente da processi di combustione

4.2.3 Le misure

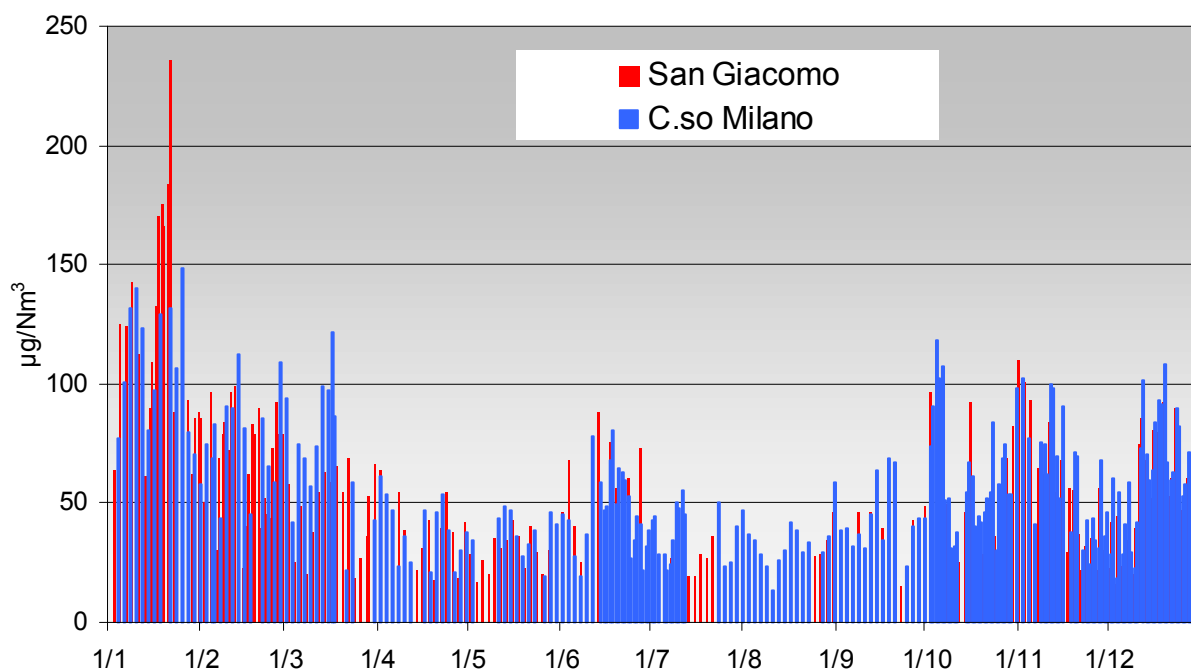
• Campionatori fissi

L'ARPAV di Verona si è dotata tre campionatori di particelle fini; 2 campionatori di PM10 rispettivamente nelle postazioni di San Giacomo e C.so Milano. Per i primi due campionatori si riportano nella Tabella 4-3 il numero di superamenti del valore limite di $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e la concentrazione media annua, mentre in Figura 4-2 si riporta il grafico dell'andamento annuo per le due postazioni di Corso Milano e San Giacomo. Da esso si evince come i valori più elevati si realizzino durante il periodo invernale (mesi da gennaio a marzo e da ottobre a dicembre) che vede un valore medio in via San Giacomo di $64.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ed un picco assoluto il 22 gennaio 2002 con $236 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre durante il periodo estivo (rimanenti mesi) il valore medio sempre in via San Giacomo risulta di $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabella 4-3: superamenti del valore limite e valore medio annuo del PM10 a San Giacomo e C.so Milano.

PM10		
Postazione	n° di superamenti limite 24h	concentrazione media annua
S.Giacomo	59	$53 \mu\text{g}/\text{m}^3$
C.so Milano	68	$57 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 4-2: andamento delle concentrazioni di PM10 rilevate nell'anno 2002 presso le postazioni di Corso Milano e via San Giacomo.



• Misure con mezzo mobile

Le postazioni e i periodi nell'ambito della programmazione dell'utilizzo del mezzo mobile nell'anno 2002 sono riportati nella Tabella 4-4. I campionamenti sono stati effettuati in vicinanza delle arterie principali più trafficate, per tutti i siti tranne Peschiera, Gazzo e Fumane. Sempre in tabella, accanto alle concentrazioni rilevate nelle diverse postazioni, viene riportato per lo stesso periodo anche la concentrazione rilevata a Verona (C.so Milano). Dal confronto emerge come solo Castelnuovo presenti in quel periodo di campionamento valori superiori alla città. In Figura 4-3 e Figura 4-4 sono illustrate le concentrazioni di PM10 rilevate dal mezzo mobile assieme a quelle di Verona sempre negli stessi periodi individuati dalla tabella.

Tabella 4-4: risultati delle misure di PM10 effettuate con l'unità mobile nell'anno 2002, i valori medi misurati sono messi a confronto con i valori medi rilevati nello stesso periodo nella stazione fissa di Verona Corso Milano.

Località e periodo	PM10 Mezzo Mobile ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 a Verona ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Caldiero (05.04 – 20.04.2002)	36	36
Castelnuovo (loc. Cavalcaselle) (01.05 – 14.05.2002)	37	27
Peschiera (06.06 – 18.06.2002)	41	55
Gazzo (19.08 – 03.09.2002)	43	38
Isola della Scala (06.09 – 21.09.2002)	34	47
Fumane (02.12 – 16.12.2002)	41	51
Castel d'Azzano (18.12.2002 – 04.01.2003)	50	64

Figura 4-3: monitoraggio del PM10 in provincia con il mezzo mobile nell'anno 2002: andamenti delle concentrazioni misurate (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e confronto con i valori registrati a Verona in via San Giacomo negli stessi periodi.

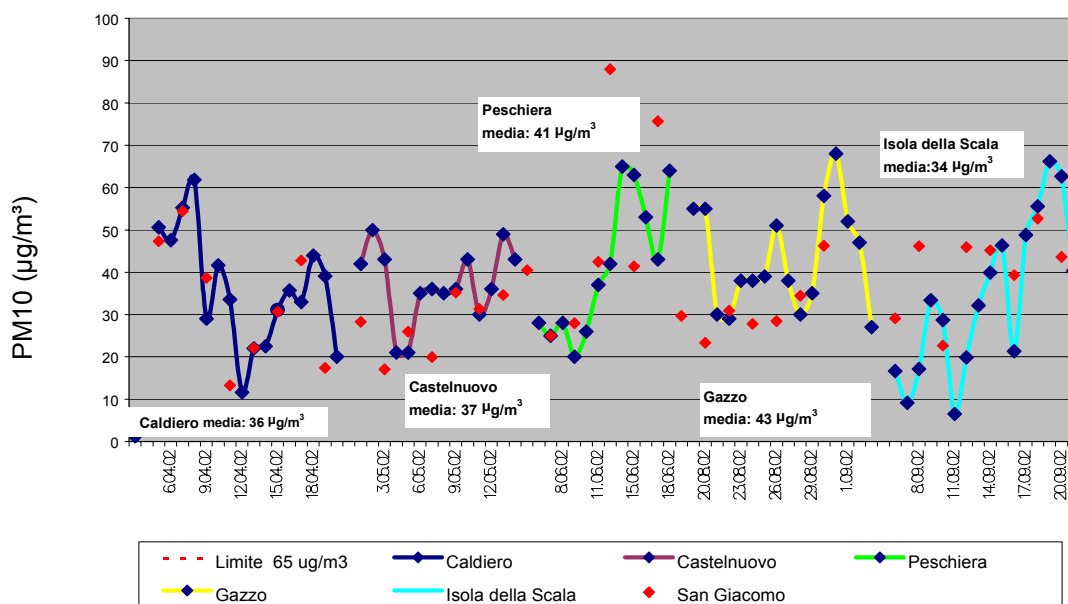
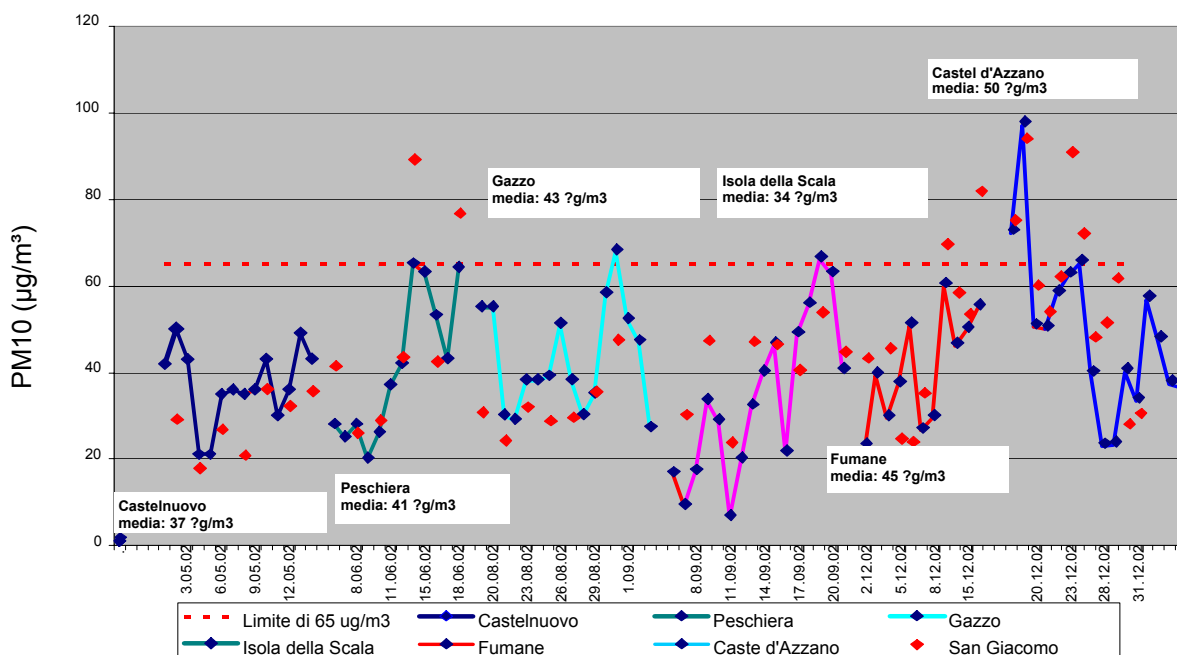


Figura 4-4: monitoraggio del PM10 in provincia con il mezzo mobile nell'anno 2002.



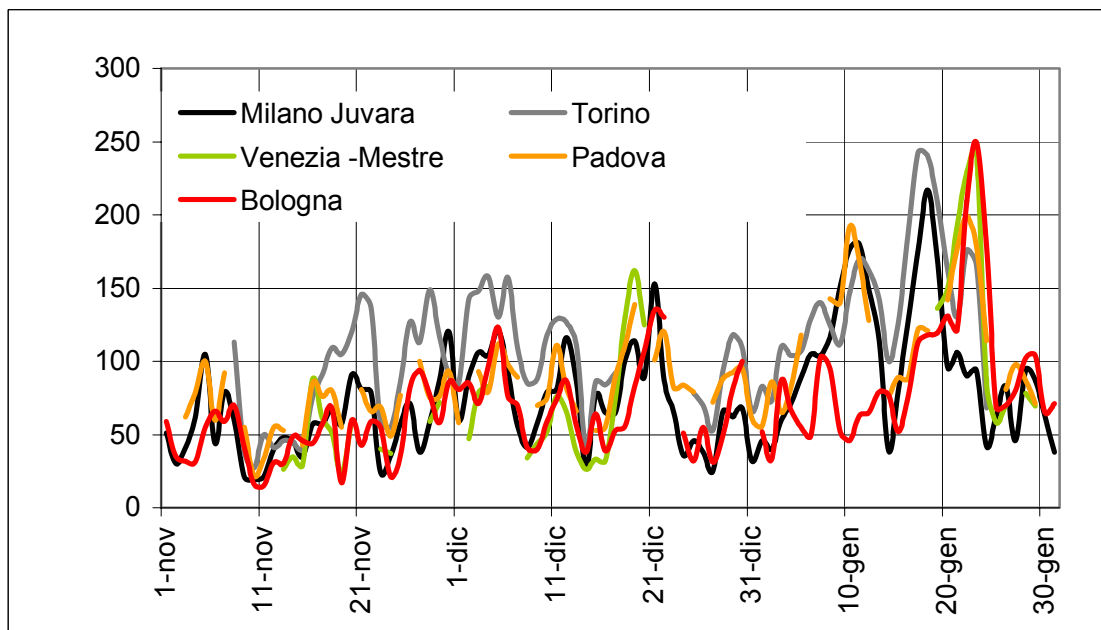
4.2.4 Correlazione PM10 - situazione meteorologica

L'inquinamento atmosferico nelle zone urbanizzate è dovuto principalmente a sorgenti antropiche: traffico, emissioni industriali, consumi domestici. La meteorologia, tuttavia, gioca un ruolo fondamentale nel determinare situazioni di accumulo o dispersione degli inquinanti in particolare in un territorio come la Pianura Padana che risulta chiuso nelle tre direzioni Nord, Ovest, Sud dai rilievi alpini ed appenninici. Tale peculiare conformazione, durante situazioni prolungate di stabilità atmosferica, determina la stagnazione di tutte le emissioni provenienti dalla superficie. Si crea pertanto quella che viene chiamata "massa d'aria chimica" che giorno dopo giorno aumenta il proprio carico di inquinanti finché non intervengono fattori di rimozione umida o secca. In questo capitolo, pertanto, si è cercato di evidenziare tali aspetti analizzando per gli inverni 2001-2002 e 2002-2003 le correlazioni più significative con i fattori meteorologici.

• Inverno 2001-2002

La particolare situazione sinottica del periodo novembre 2001-gennaio 2002, che specialmente a partire da dicembre 2001 ha visto un prevalere di sistemi anticlonici e assenza di precipitazioni significative, è risultata idonea al verificarsi di valori medi di polverosità alquanto elevati. Episodi acuti di concentrazioni di polveri si sono registrati su quasi tutta la Pianura Padana con valori che hanno raggiunto e superato i $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In Figura 4-5 si osservano gli andamenti di concentrazioni di PM10 in alcune stazioni della Pianura Padana tra cui due stazioni venete: Venezia e Padova. Durante il periodo in esame si notano molti picchi di concentrazione comuni a diverse località del Bacino Padano Orientale ed in ritardo di 3-4 giorni rispetto a quelli del settore occidentale (Piemonte e Lombardia). Tale aspetto ci consente di affermare che gran parte degli episodi acuti osservati nel Veneto sono contemporanei o di poco sfasati a quelli registrati in altre località della Pianura Padana. Si conferma, così, il carattere ubiquitario di tale inquinante che risulta essere da questo punto di vista molto simile all'ozono troposferico. In particolare si osservano per le stazioni del settore orientale massimi di concentrazione attorno al 19-20 Dicembre 2001 e al 22-23 Gennaio 2002.

Figura 4-5: andamento del PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante l'inverno 2001-2002 sulla Valpadana. L'andamento delle concentrazioni di PM10 a Verona è riportato in fig. 4.2 e 4.6.



- **Blocco anticiclonico**

Il valore della pressione atmosferica al suolo è un parametro meteorologico importante poiché è correlato agli episodi acuti di concentrazione da polveri. Essa può ritenersi un indicatore sintetico della presenza di un anticiclone di tipo dinamico e quindi ben strutturato anche alle quote superiori suscettibile perciò di durare a lungo. In Figura 4-6 abbiamo riportato l'andamento barico nella stazione di Cason evidenziando con frecce gialle i giorni di accumulo più critici. Ebbene questi ultimi sono connessi o di poco successivi ai picchi più elevati di pressione atmosferica. Possiamo quindi considerare che la valutazione della pressione atmosferica possa rivestire un ruolo predittivo per individuare e/o prevedere periodi di accumulo degli inquinanti.

- **Inverno 2002- 2003**

Anche tale inverno, come il precedente, è stato determinato dalla ricorrenza e persistenza di situazioni anticicloniche specie nei primi tre mesi del 2003. Sempre in tale inverno sono state applicati i provvedimenti di restrizione del traffico per il contenimento dell'inquinamento atmosferico in ambito urbano; nella elaborazione dei vari grafici si sono evidenziati anche i periodi di limitazione. Tornando alla valutazione delle concentrazioni dei vari inquinanti, i primi 10 giorni del mese di gennaio risultano caratterizzati da valori ancora inferiori al valore limite di $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 4-7). Le cause di tali livelli sono essenzialmente meteorologiche poiché si sono avuti due giorni di precipitazione (5 e 7 gennaio) accompagnate da presenza di vento. Segue un periodo di assenza di precipitazioni e calma di vento che vede le concentrazioni di PM10 aumentare fino al valore massimo di $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrato in Corso Milano, con una crescita costante di circa $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al giorno. Dal giorno 16 gennaio inizia una diminuzione costante delle concentrazioni fino al giorno 19 che risulta leggermente superiore al valore di riferimento, segue un aumento fin verso i $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ma limitato alla giornata del 20. I giorni 21 e 22 presentano una nuova temporanea diminuzione seguita da un aumento costante fin al giorno 24 in cui si raggiunge una concentrazione di $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I successivi due giorni presentano valori in diminuzione ed inferiori al limite, mentre dal 27 fino al 29 si attua una rapida crescita di circa $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al giorno; il massimo secondario dell'intero mese registrato il 29 non presenta, in termini di valore, sostanziali differenze tra le due stazioni. In totale si sono avuti in gennaio 20 giorni di superamento del valore limite di $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Come si vede dal grafico, la diminuzione della concentrazione di particolato si ha sempre in corrispondenza a modifiche delle condizioni meteorologiche: aumento della velocità del vento come nei giorni 17-22 e 25 gennaio o presenza di precipitazioni come il giorno 21 gennaio.

Figura 4-6: pressione atmosferica, media mobile e media con indicazione temporale (freccie gialle) dei periodi di massima concentrazione di PM10.

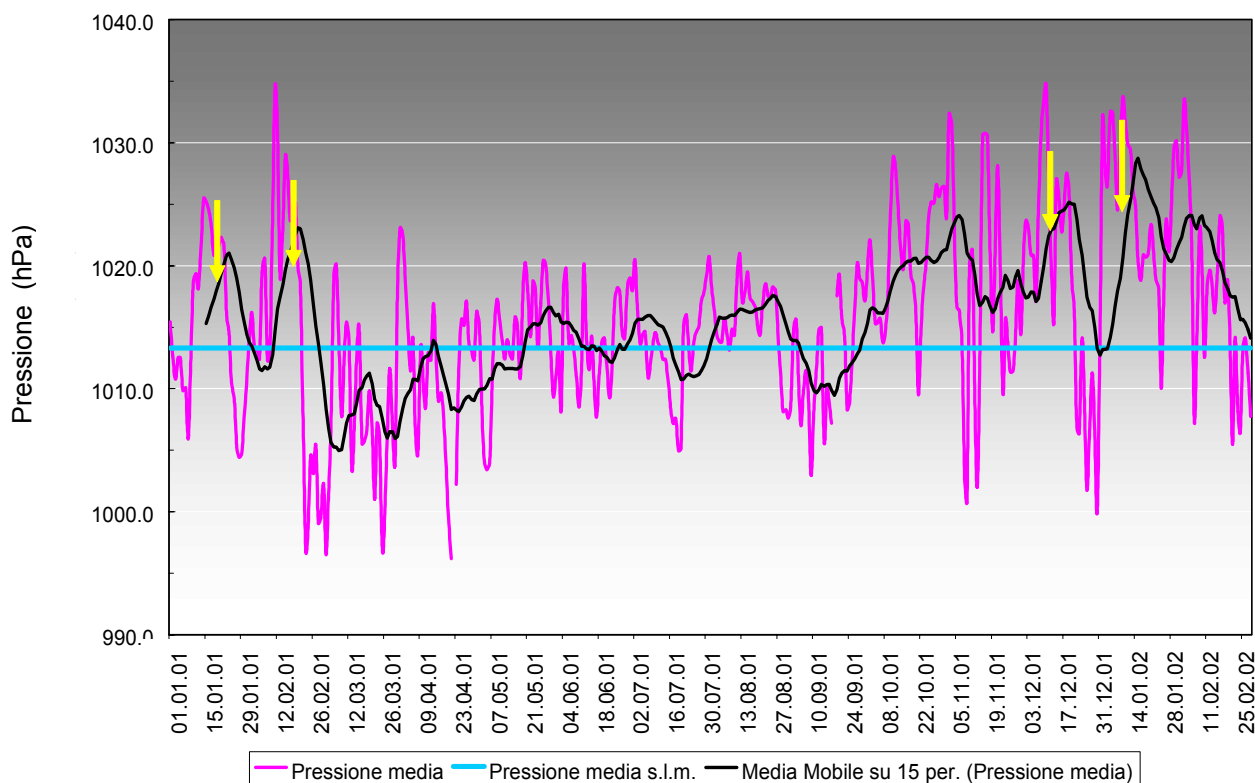
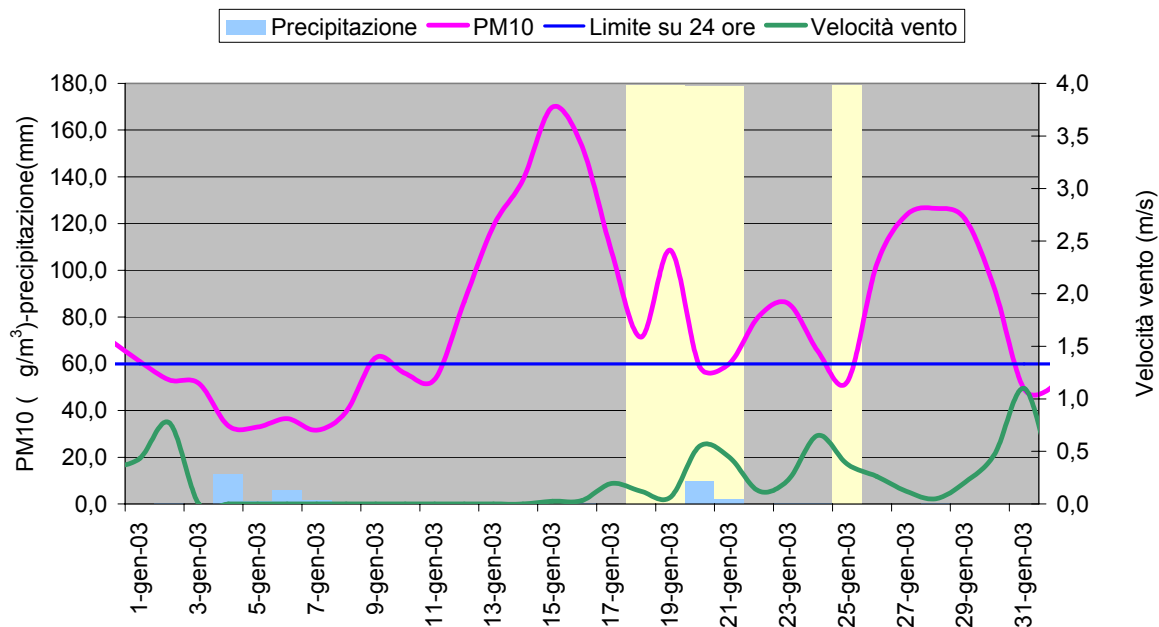


Figura 4-7: andamento della concentrazione di PM10 misurata nel mese di gennaio 2003 presso la stazione di Corso Milano, correlazione con le precipitazioni e la velocità del vento, in giallo sono evidenziati i giorni di limitazione del traffico.



I mesi di febbraio e marzo sono stati caratterizzati ancor più di gennaio dalla persistenza di anticloni di blocco che hanno direttamente influenzato gran parte della Pianura Padana centro-orientale (Figura 4-8). Ne è risultata una forte anomalia della pressione al suolo (Figura 4-9) determinando la presenza di calme di vento (velocità inferiore ad 1 m/s) e scarse precipitazioni. In tutto il mese di febbraio non è

piovuto mentre a marzo si sono totalizzati 21 mm: complessivamente il deficit pluviometrico nei tre mesi di gennaio, febbraio e marzo è stato di ben 114.7 mm
 La persistenza anticiclonica ha prodotto anche prolungati giorni con accentuate inversioni responsabili di valori medio-bassi dell'altezza di rimescolamento.

Figura 4-8: campo di pressione media in superficie in hPa sulla Pianura Padana nei mesi di febbraio-marzo 2003.¹

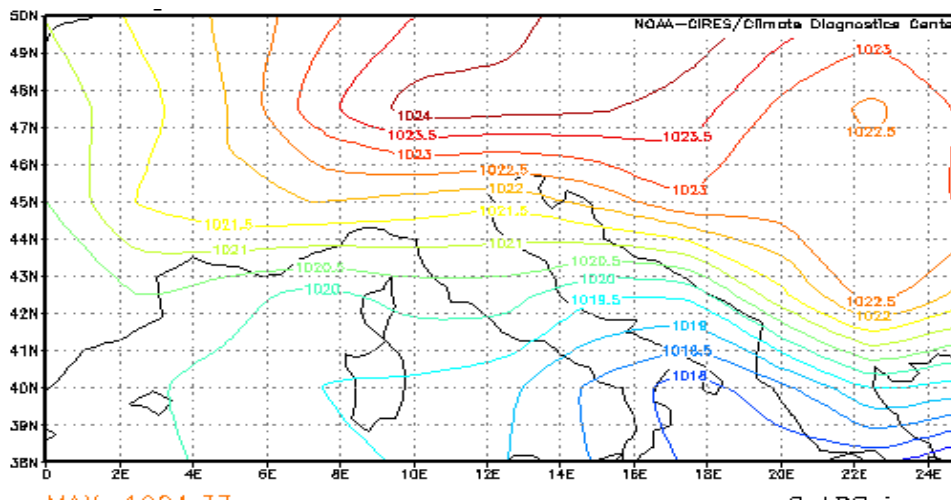
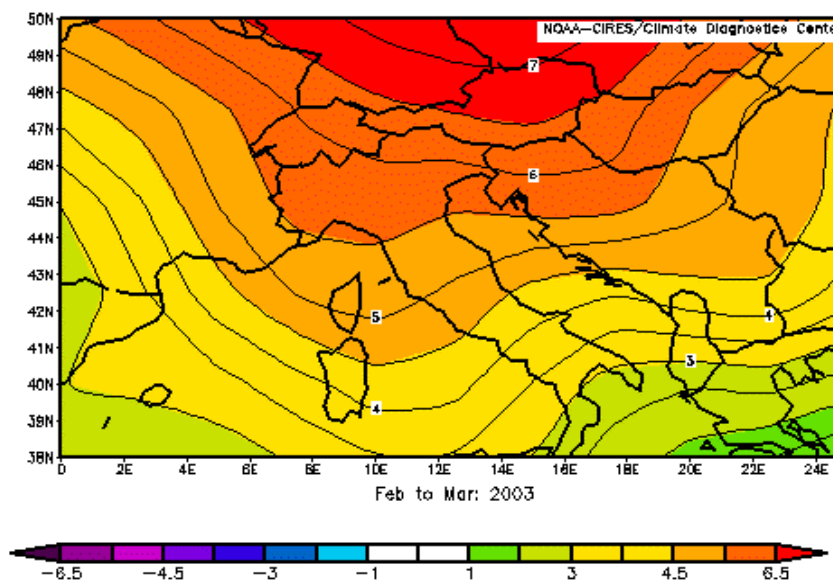


Figura 4-9: anomalie medie di pressione in superficie in hPa sulla Pianura Padana nei mesi di febbraio-marzo 2003 rispetto al periodo di riferimento 1968-1996. Nella legenda i colori dall'azzurro al viola indicano scostamenti negativi dal valore medio mentre i colori dal verde al rosso scostamenti positivi.¹



Il mese di febbraio 2003 è stato caratterizzato da valori elevati di concentrazione di PM10: il valore medio mensile è risultato pari a 74 µg/m³, il limite di 60 µg/m³ è stato superato per 18 giorni. Nel grafico di

Figura 4-10 sono riportati gli andamenti sia della concentrazione di PM10 misurata presso la stazione di Corso Milano sia della velocità del vento. Dal grafico emerge la forte correlazione fra velocità del vento e concentrazione di PM10: la diminuzione della concentrazione di questo inquinante avviene sempre in corrispondenza ad un aumento della velocità del vento. Anche nei periodi prolungati di limitazione della circolazione (10-14 febbraio) l'effetto dominante appare essere quello del vento. Singolare è l'andamento dei giorni 6-9-13-16 febbraio proprio in corrispondenza di quattro giornate di

¹ NOAA-CIRES/Climatic Diagnostic Center

targhe alterne, ove si osserva una diminuzione della concentrazione di PM10; tale diminuzione trova in buona parte giustificazione dall'aumento del vento medio con valori oltre 1 m/s specie durante il giorno 16.

Figura 4-10: concentrazioni di PM10 rilevate presso la stazione di Corso Milano nel mese di febbraio, correlazione con i principali parametri meteo. In giallo sono evidenziati i giorni di circolazione limitata.

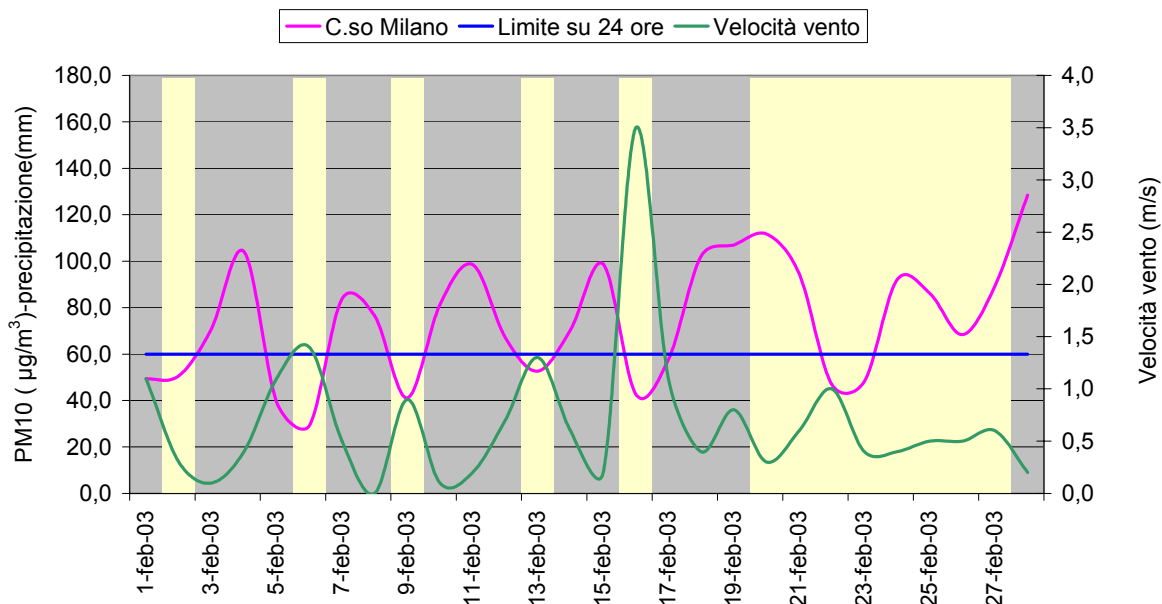
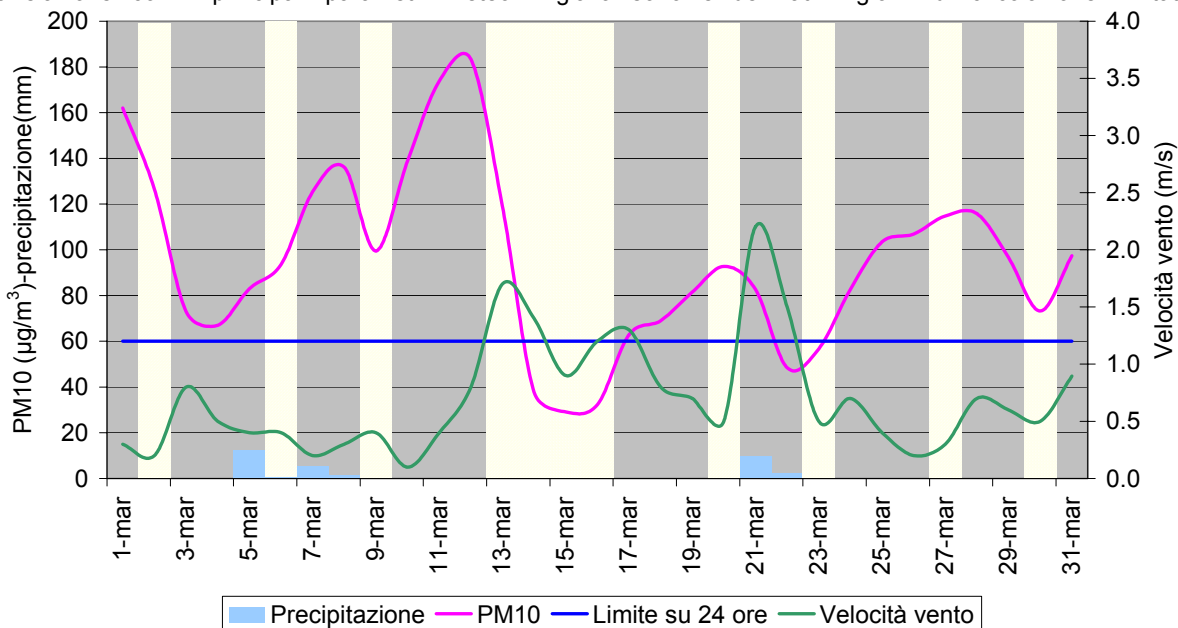


Figura 4-11: concentrazioni di PM10 rilevate presso la stazione di Corso Milano nel mese di marzo 2003, correlazione con i principali parametri meteo. In giallo sono evidenziati i giorni di circolazione limitata



Il mese di marzo (Figura 4-11) è risultato essere il più critico dal punto di vista dell'accumulo degli inquinanti nei bassi strati dell'atmosfera: la concentrazione media di PM10 è risultata essere pari a 84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e in ben 25 giorni su 31 si è superato il valore limite di 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il mese è stato caratterizzato da scarse precipitazioni nei giorni 2,3, 6 e 7 e da velocità del vento quasi sempre inferiori ad 1 m/s. Le temperature relativamente alte e la già efficace radiazione solare possono spiegare in parte le elevate concentrazioni di PM10 rilevate. Tali condizioni hanno indotto la formazione di PM10 secondario dovuto a reazioni fotochimiche fra i precursori NOx, CO e NH₃. L'influenza dei principali parametri meteorologici quali vento e precipitazioni è emersa nell'analisi dell'andamento delle concentrazioni di

PM10 mese per mese, effettuata nei paragrafi precedenti. Ora si vuole analizzare in modo più dettagliato tale l'influenza sulla concentrazione di particolato fine specialmente nel periodo gennaio-marzo 2003. La concentrazione di PM10 viene misurata da ARPAV in due stazioni, Corso Milano e San Giacomo, situate ambedue nei pressi di una strada di grande traffico di collegamento interquartiere. In Figura 4-12 si riporta anche la retta di correlazione fra le misure delle due stazioni riferite al periodo gennaio-febbraio-marzo 2003 che presenta un coefficiente di correlazione molto vicino ad 1 ($R^2 = 0.93$). Nel grafico di Figura 4-13 è riportato l'andamento delle concentrazioni di PM10 misurate presso le stazioni di Corso Milano e San Giacomo, l'intensità del vento, misurata presso la stazione di Cason e l'entità delle precipitazioni. Le concentrazioni misurate risultano molto simili in quanto influenzate dalla stessa sorgente emissiva di traffico veicolare. Nelle analisi successive verranno, quindi, utilizzati, i dati di una sola delle due stazioni, in quanto rappresentativi della situazione urbana, nei pressi delle strade di collegamento interquartiere

Figura 4-12: correlazione fra la concentrazione di PM10 misurata presso la stazione di San Giacomo e quella misurata presso la stazione di Corso Milano-periodo gennaio - marzo 2003

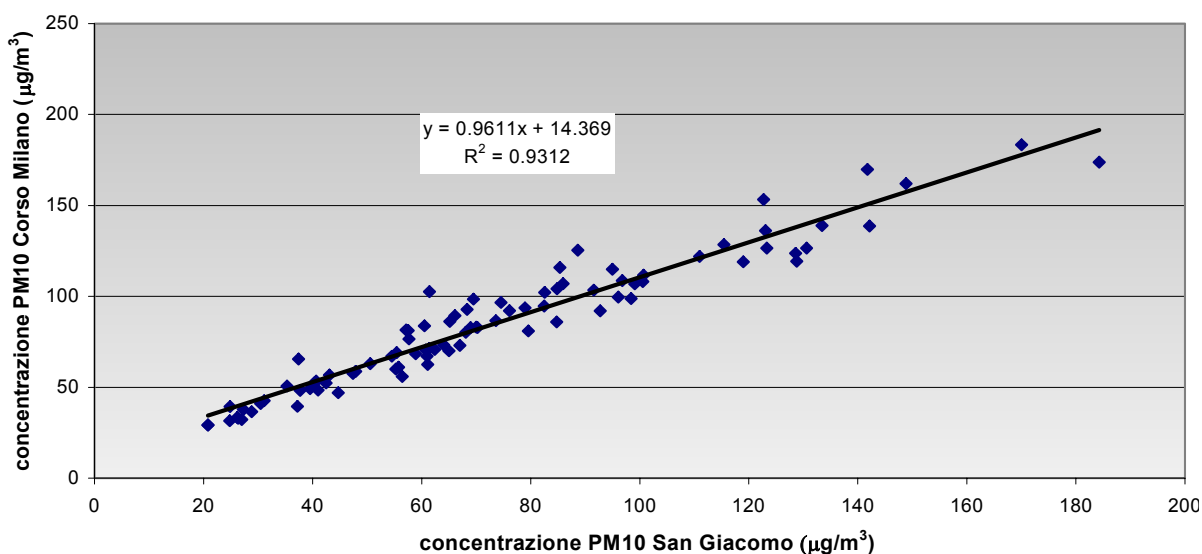
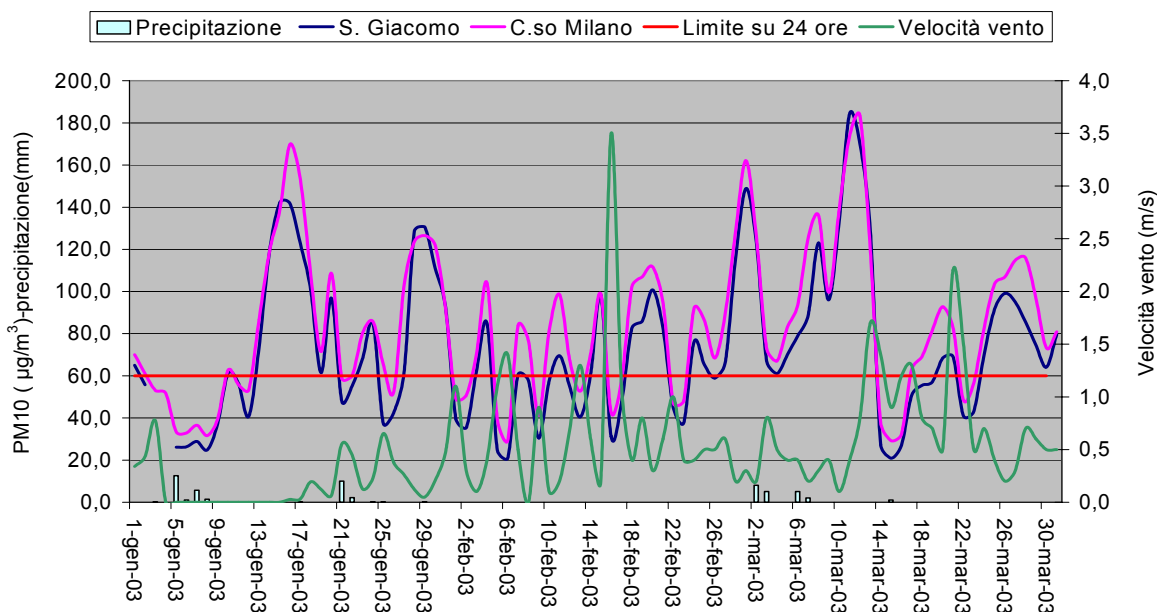


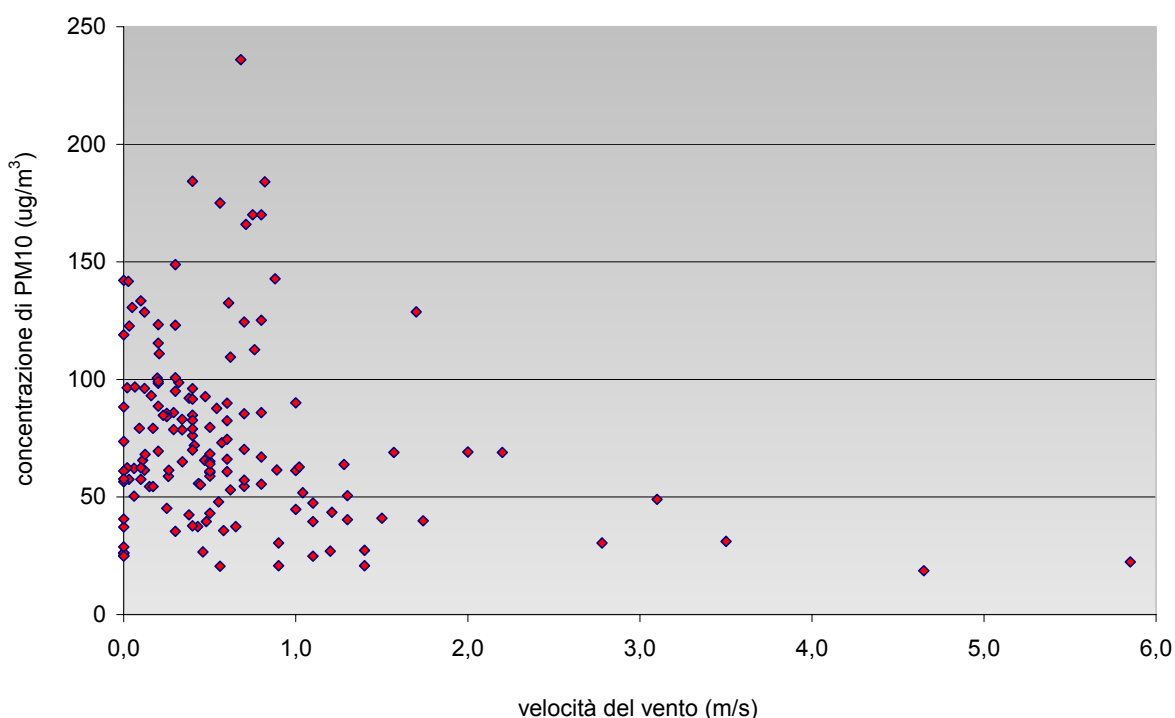
Figura 4-13: andamento delle concentrazioni di PM10 misurate nelle due stazioni di San Giacomo e Corso Milano, correlazione con l'intensità del vento e le precipitazioni



L'azione di turbolenza meccanica operata dal vento nei confronti delle polveri fini emerge dalla forte correlazione tra intensità del vento e concentrazioni (Figura 4-14). infatti, nella maggior parte dei giorni con PM10 maggiore di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ è stata misurata una velocità del vento inferiore ad 1 m/s. Tutti gli episodi acuti del periodo gennaio-marzo 2003 rientrano in questo intervallo anemometrico mentre per i valori di vento medio giornaliero oltre i 4 m/s i pochi punti che si trovano sul grafico sono associati a valori molto bassi di concentrazione di PM10.

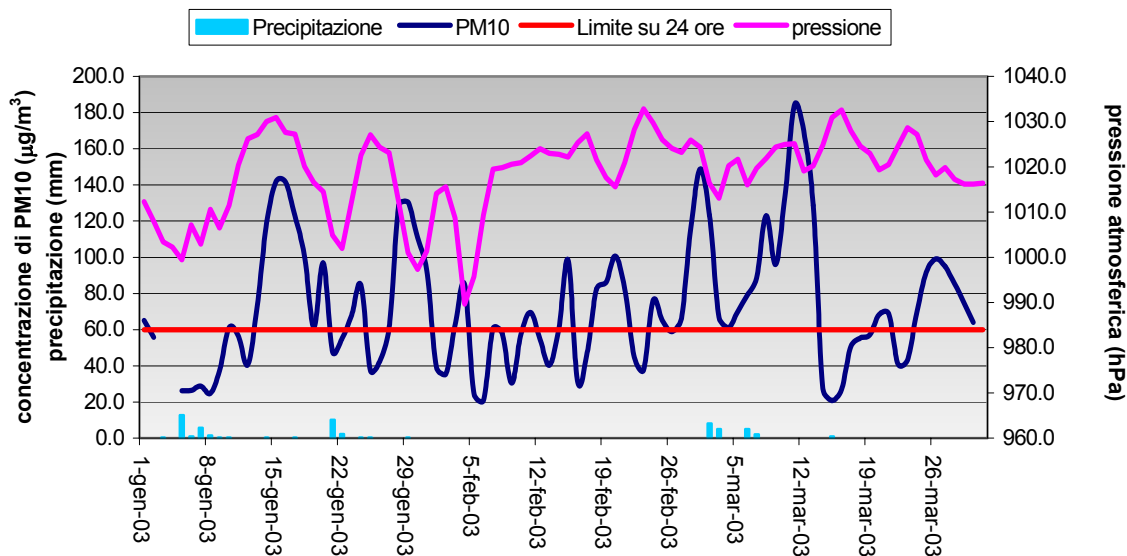
Nel grafico di Figura 4-15 è riportata la concentrazione di PM10, misurata presso la stazione di via San Giacomo, in funzione della velocità del vento e precipitazioni cumulate giornaliere nei primi tre mesi invernali rilevati a Cason. La scelta di utilizzare i parametri meteorologici osservati presso la stazione di Cason è dovuta alla sua collocazione in zona periferica urbana, che risulta essere la più rappresentativa delle caratteristiche dello strato di rimescolamento (boundary layer), specialmente per il vento che non è ostacolato dalla calotta (canopy) urbana.

Figura 4-14: concentrazione di PM10, rilevata a San Giacomo, in funzione della velocità del vento, rilevata a Cason.



E' stato già in precedenza osservato come la pressione atmosferica in certe situazioni rappresenti un buon indicatore di situazioni di accumulo. Dall'esame del grafico di Figura 4-15 si osserva come nel mese di gennaio vi sia una forte corrispondenza tra valori elevati di pressione e concentrazioni di PM10. Altrettanto non si può dire per il mese di febbraio: si sono verificate, infatti, configurazioni bariche che pur realizzando valori pressori elevati hanno presentato un forte gradiente barico favorendo un'accentuata ventilazione specialmente nei quadranti orientali.

Figura 4-15: confronto fra l'andamento della concentrazione di PM10 (stazione di via San Giacomo) e la pressione atmosferica (stazione di Cason) nei primi tre mesi del 2003.



4.3 L'ozono

L'ozono è un gas inodore ed incolore composto da 3 atomi di ossigeno. La sua presenza nell'alta atmosfera è importante per la sua azione schermante. L'ozono è un inquinante di tipo secondario, prodotto da reazioni fotochimiche di trasformazione degli inquinanti primari, quali composti organici volatili e ossidi di azoto. Anche in questo caso, le condizioni meteorologiche hanno un'enorme influenza sull'andamento delle concentrazioni. In particolare il verificarsi di intensa radiazione solare, temperatura mite o calda e venti moderati favorisce la formazione di smog fotochimico e l'aumento delle concentrazioni troposferiche di ozono; nell'arco della giornata, i livelli sono bassi al mattino (fase di innesco del processo fotochimico) raggiungono il massimo nel primo pomeriggio e si riducono progressivamente nelle ore serali con il diminuire della radiazione solare. Precursori sono i composti idrocarburici e gli ossidi di azoto presenti nell'aria, anche relativamente distanti dal punto di formazione dell'O₃. Dall'analisi dei dati effettuata l'inquinamento da ozono risulta particolarmente critico in tutta l'area pianeggiante del Veneto.

4.3.1 Effetti sulla salute

L'ozono a livello del suolo è tossico per l'uomo anche a concentrazioni relativamente basse essendo un potente agente ossidante, tanto che rappresenta, insieme al particolato, uno degli inquinanti più rilevanti dal punto di vista della salute. La presenza di elevati livelli di ozono danneggia la salute umana, quella degli animali e delle piante, deteriora i materiali e riduce la visibilità. Sull'uomo provoca irritazioni agli occhi, alle vie aeree profonde e può causare una riduzione della funzionalità polmonare, con sintomi quali tosse, dispnea e dolore toracico, oltre ad aggravare disturbi respiratori già esistenti, come l'asma. Gli effetti ambientali principali sono il rapido deterioramento di materiali per ossidazione e la diminuzione della produttività delle piante. L'ozono non viene emesso direttamente dalle attività umane, ma è un inquinante secondario che si forma nell'atmosfera in seguito a reazioni fotochimiche a carico degli inquinanti primari (NO_x, idrocarburi non metanici, aldeidi) prodotti dai processi di combustione. Le concentrazioni ambientali di O₃ tendono pertanto ad aumentare durante i periodi caldi e soleggiati dell'anno.

4.3.2 Normativa

Restano in vigore, per l'O₃, i livelli di attenzione e allarme (DM 25/11/94), i livelli per la protezione della salute e della vegetazione (DM 16/05/96) e la concentrazione media di 1 ora da non raggiungere più di 1 volta al mese (DPCM 28/03/83), nella Tabella 4-5 vengono riportati per esposizione acuta cronica i valori limite sia per la salute umana, sia per gli ecosistemi.

Tabella 4-5: limiti di concentrazione di ozono stabiliti dalla normativa vigente.

Esposizione acuta

Parametro	Tipo di limite	Periodo di mediazione	Valore limite	Periodo di validità dei limiti attualmente previsti
Ozono (O₃)	Livello di attenzione (DM 25/11/94)	Concentrazione media di 1 ora	180 µg/m³	Fino al recepimento della direttiva 2002/3/CE
	Livello di allarme (DM 25/11/94)	Concentrazione media di 1 ora	360 µg/m³	Fino al recepimento della direttiva 2002/3/CE previsto per il 09/09/2003
	Livello. Prot. Salute (DM 16/05/96)	Concentrazione media di 8 ore	110 µg/m³	Fino al recepimento della direttiva 2002/3/CE previsto per il 09/09/2003
	Valore limite (DPCM 28/03/83)	Concentrazione media di 1 ora da non raggiungere più di una volta al mese	200 µg/m³	Fino al recepimento della direttiva 2002/3/CE previsto per il 09/09/2003

<i>Protezione degli ecosistemi</i>				
Ozono (O₃)	Liv Prot. Veg. (DM 16/05/96)	Media oraria	200 µg/m³	Fino al recepimento della direttiva 2002/3/CE previsto per il 09/09/2003
	Liv Prot. Veg. (DM 16/05/96)	Media delle 24 ore	65 µg/m³	Fino al recepimento della direttiva 2002/3/CE previsto per il 09/09/2003

4.3.3 Le misure

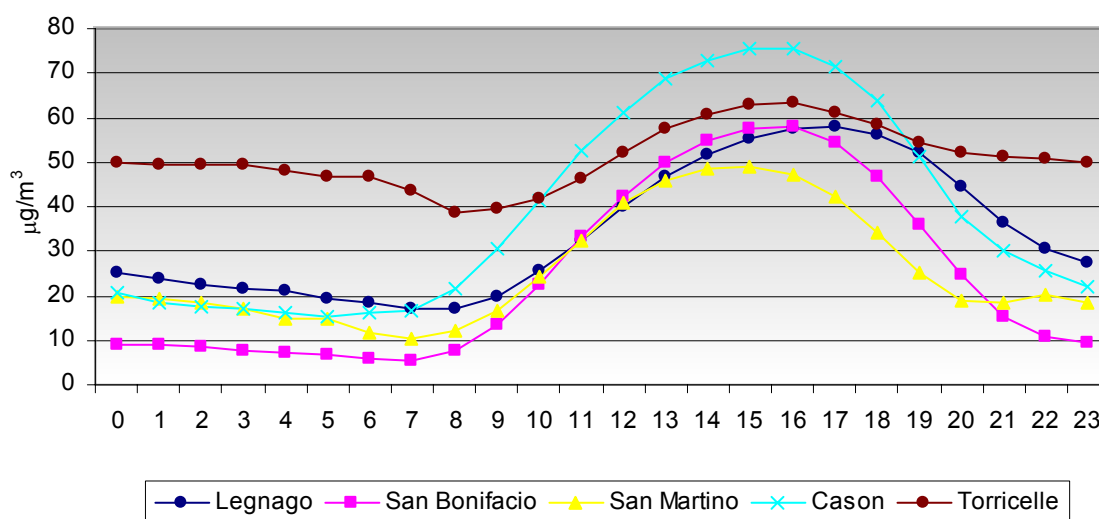
Le elaborazioni delle misure effettuate in postazioni di città e di provincia hanno permesso di sintetizzare nella Tabella 4-6 il numero di superamenti dei diversi livelli per la protezione della salute e degli ecosistemi. Si evincono i valori elevati di Cason e Torricelle, in questa ultima località, come spiegheremo meglio tra poco, l'elevazione gioca un ruolo determinante nel far registrare il maggior numero di superamenti.

Tabella 4-6: Numero di superamenti relativi ai vari livelli di protezione per l'uomo e gli ecosistemi. Periodo di riferimento: anno 2002.

Postazione	O₃				
	Superamenti del livello di attenzione	Superamenti del livello di allarme	Superamenti dei livelli protezione salute	Protezione ecosistemi: superamenti (media ora)	Protezione ecosistemi: superamenti (media 24h)
Torricelle	19	0	63	3	122
Cason	34	0	51	7	89
Legnago	5	0	14	0	54
S.Bonifacio	2	0	2	0	12
S. Martino.B.A.	1	0	8	0	35

In Figura 4-16 si riporta l'andamento del giorno tipo, cioè delle concentrazioni medie orarie calcolate per tutto l'anno in ognuna delle 24 ore del giorno, relativo alle stazioni di Cason, Torricelle, Legnago, S. Bonifacio; il grafico evidenzia la tipica forma a campana: infatti nell'arco della giornata, i livelli di ozono risultano bassi al mattino (fase di innesco del processo fotochimico), raggiungono il massimo di radiazione solare. I valori maggiori si osservano nelle zone suburbane di Verona (località Cason) e come valore medio giornaliero anche sulle Torricelle: l'ozono, infatti, una volta prodotto reagisce chimicamente con l'NO che risulta maggiormente presente nelle zone urbane ed in prossimità delle strade ad elevato traffico, esso quindi viene "consumato" proprio nelle zone maggiormente inquinate mentre persiste in quelle rurali. Interessante l'andamento di Torricelle che vede valori notturni più elevati rispetto alle altre località, ciò è dovuto alla cosiddetta "riserva d'ozono", cioè la tendenza dell'ozono ad accumularsi ad una altezza di rimescolamento che in estate è attorno ai 1500 metri nelle ore pomeridiane e di circa 200 metri in quelle notturne.

Figura 4-16: giorno tipo delle concentrazioni di Ozono rilevate nell'anno 2002 presso le postazioni di Torricelle, Cason, Legnago, San Bonifacio e San Martino.



4.3.4 Correlazione tra ozono , temperatura e radiazione solare

Abbiamo visto che l'ozono è un inquinante secondario che si forma in atmosfera a seguito di reazioni fotochimiche a carico degli inquinanti primari (NO_x, idrocarburi ecc.). Esiste una buona correlazione tra temperatura massima dell'aria e concentrazioni di ozono. In Figura 4-17 si riporta il grafico che correla i valori massimi di ozono nei periodi estivi dal 1 maggio al 30 settembre degli anni 2002-2003 e alla temperatura. Possiamo affermare che con oltre i 30°C di temperatura massima un grande numero di giorni presenta concentrazioni elevate di ozono, oltre la soglia di attenzione di 180 µg/m³.

Il parametro radiazione solare presenta una minore correlazione con le concentrazioni di ozono (Figura 4-18) ma con una minore linearità rispetto alla temperatura massima. Infatti troviamo che nella popolazione dei punti con valore superiore agli 8 kWh/m² solo un terzo presenta valori oltre il limite di attenzione, gli altri si collocano comunque nel range elevato 120-180 µg/m³.

Figura 4-17: correlazione tra temperatura massima giornaliera e concentrazione di ozono a Cason – periodo maggio – settembre anni 2002 – 2003.

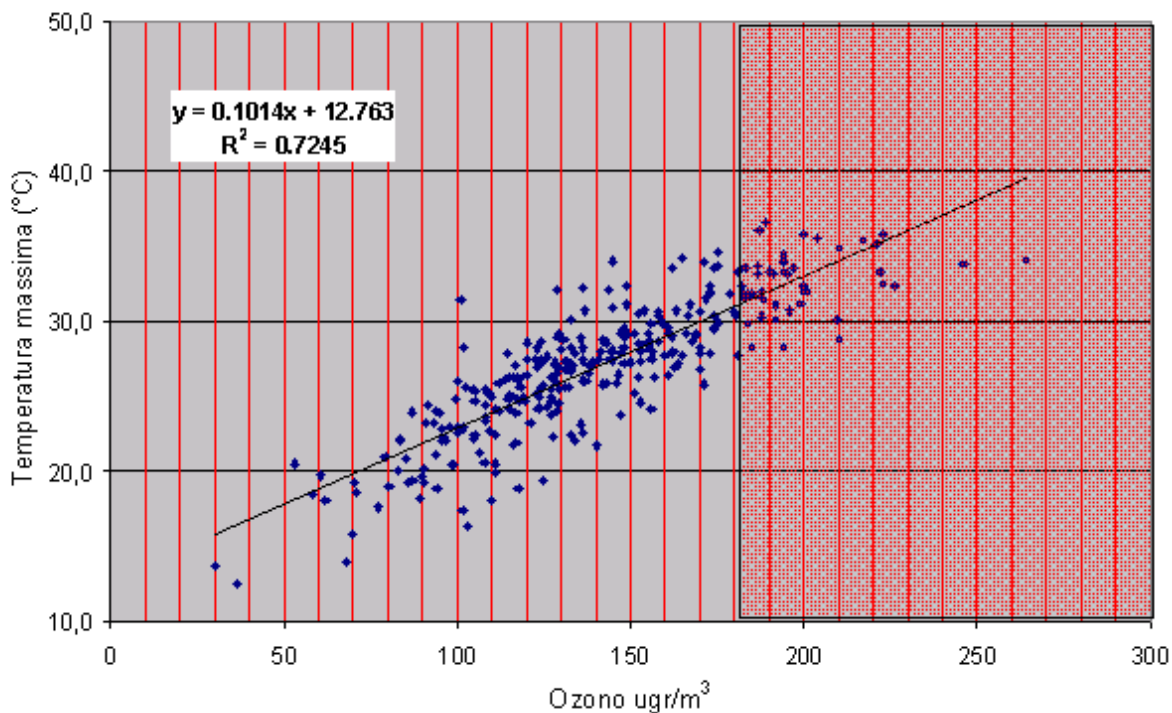
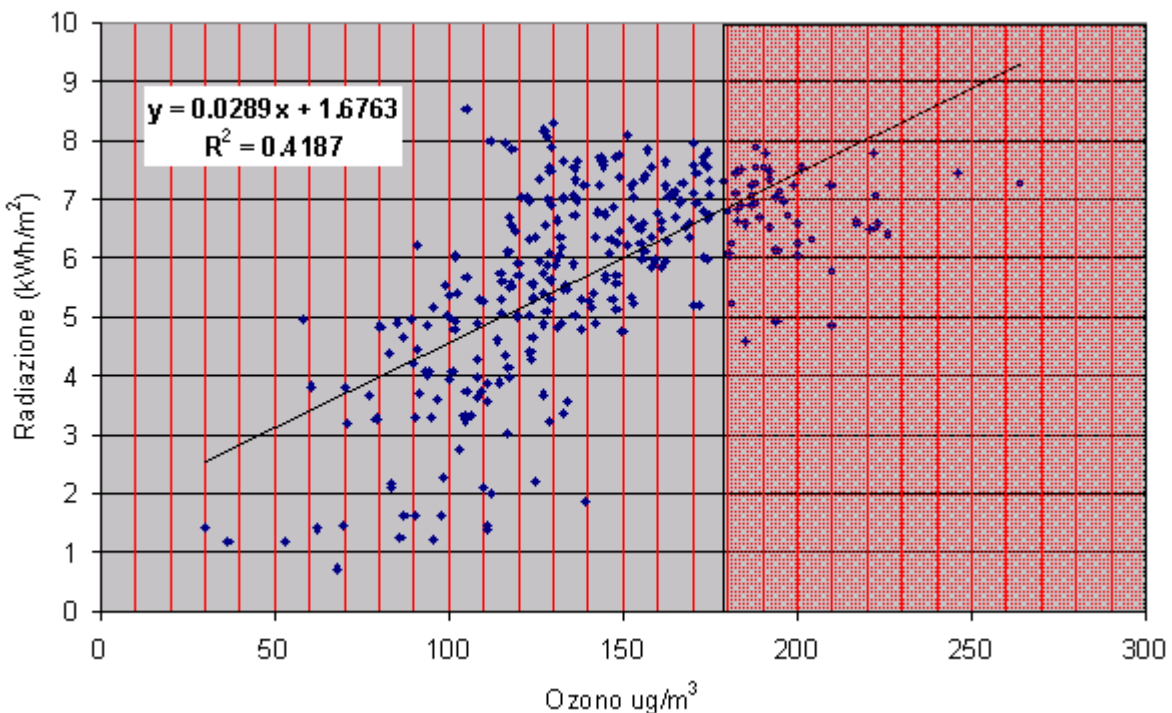


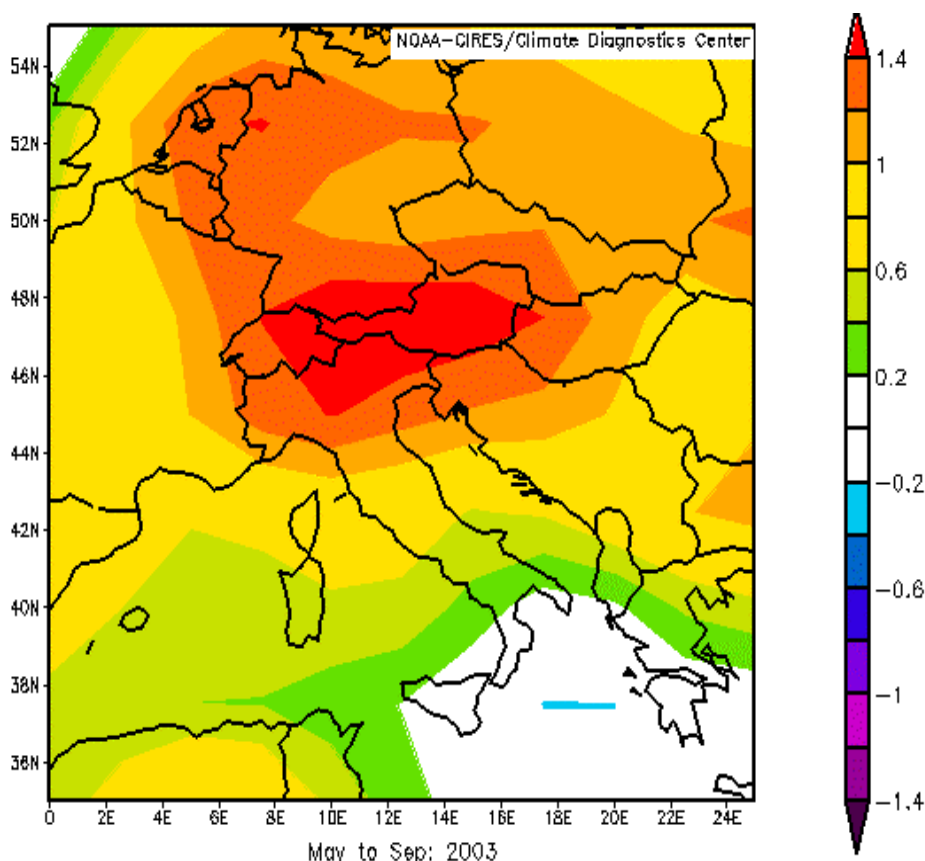
Figura 4-18: correlazione tra radiazione solare giornaliera e concentrazione di ozono a Cason – periodo maggio – settembre anni 2002 – 2003.



4.3.5 Caratterizzazione dell'estate 2003 episodi acuti di ozono

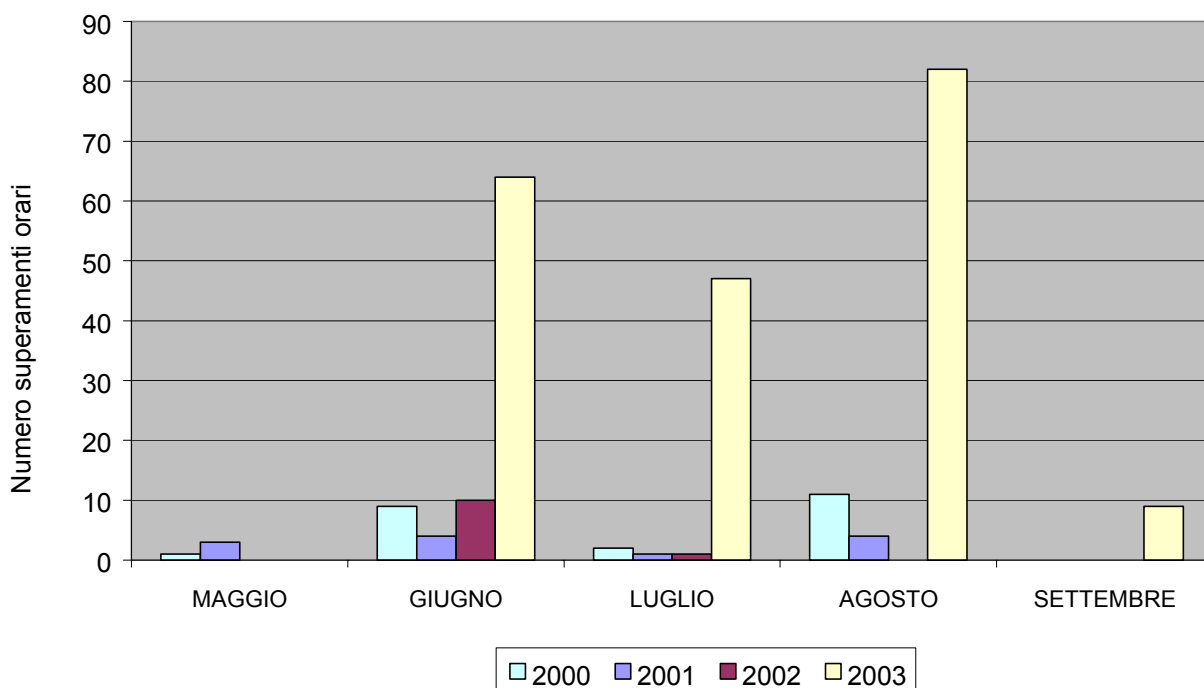
L'estate 2002 ha avuto un numero alquanto limitato di superamenti del limite di attenzione dovuto essenzialmente alla frequente copertura nuvolosa dei mesi di luglio ed agosto e quindi alle diminuite reazioni fitochimiche. Non altrettanto si può dire dell'estate 2003 che è risultata in molte località della Valpadana una delle più calde degli ultimi 250 anni. Le condizioni meteorologiche che hanno favorito tale anomalia sono da attribuire alla persistenza di anticicloni, spesso di tipo afro-mediterraneo, che hanno iniziato ad interessare le nostre zone fin dal mese di maggio prolungandosi fino a gran parte del mese di settembre e determinando nei bassi strati un continuo ed efficace riscaldamento da compressione adiabatica. Significativa risulta pertanto l'anomalia di pressione al livello medio mare (Figura 4-19) da cui emergono valori superiori ad 1.5 hPa su gran parte dell'area alpina e della pianura padana. Tali condizioni hanno quindi favorito sia lo scarso rimescolamento e ricambio dell'aria sia il massimo soleggiamento, condizioni ideali per l'instaurarsi di elevate concentrazioni di ozono. In Figura 4-20 è riportato il numero di superamenti orari del livello di attenzione di $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrati presso la stazione di Cason. Negli anni 2000-2003 emerge immediatamente l'elevatissimo numero di superi specie nei mesi di giugno, luglio ed agosto, nonché il non frequente superamento anche nel mese di settembre, complessivamente si sono registrati 202 superamenti orari del livello di attenzione.

Figura 4-19: campo di anomalie della pressione a livello medio mare in hPa nel periodo maggio settembre 2003 rispetto alla media di riferimento 1968-1996. Nella legenda i colori dall'azzurro al viola indicano scostamenti negativi dal valore medio mentre i colori dal verde al rosso scostamenti positivi².



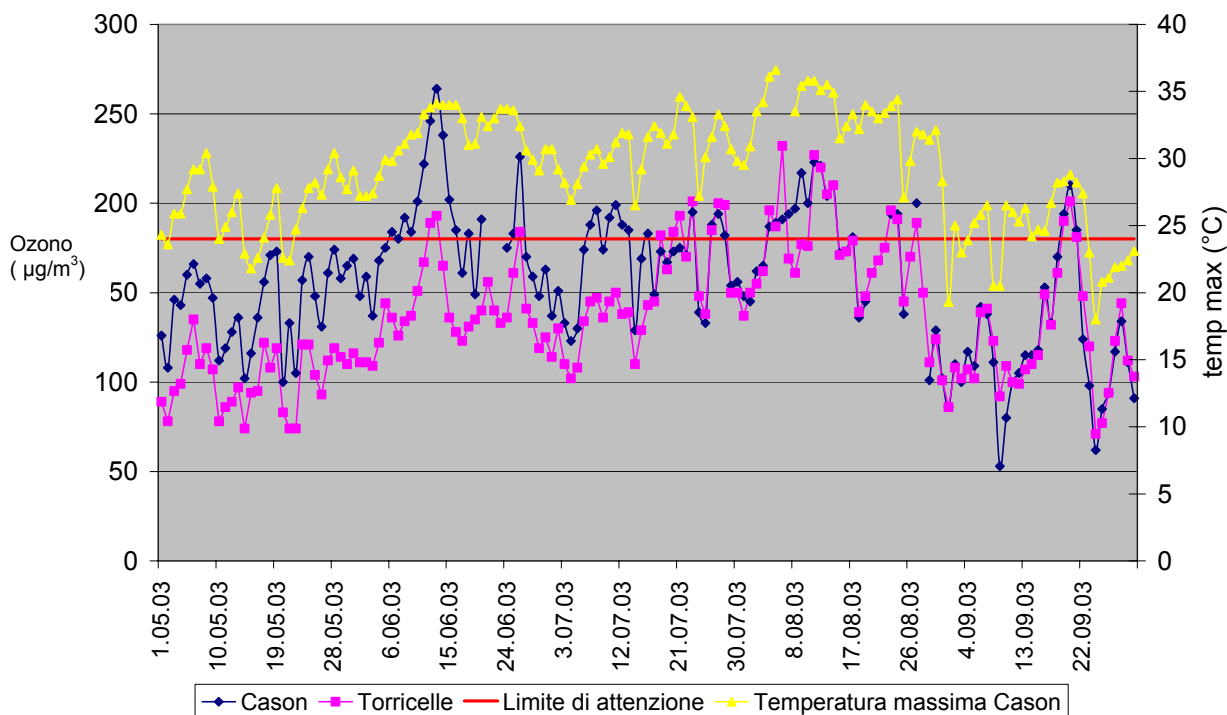
² NOAA-CIRES/Climatic Diagnostic Center

Figura 4-20: numero di superamenti del valore di attenzione ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) della concentrazione media oraria di ozono a Cason.



In Figura 4-21 è stato riportato tutto l'andamento dell'ozono a Cason e Torricelle nei mesi più critici fin da quando il fenomeno è iniziato con una certa intensità. Nel grafico è presente anche l'andamento della temperatura massima al Cason che conferma la forte correlazione con l'ozono.

Figura 4-21: andamento delle concentrazioni massime di ozono durante l'estate 2003.

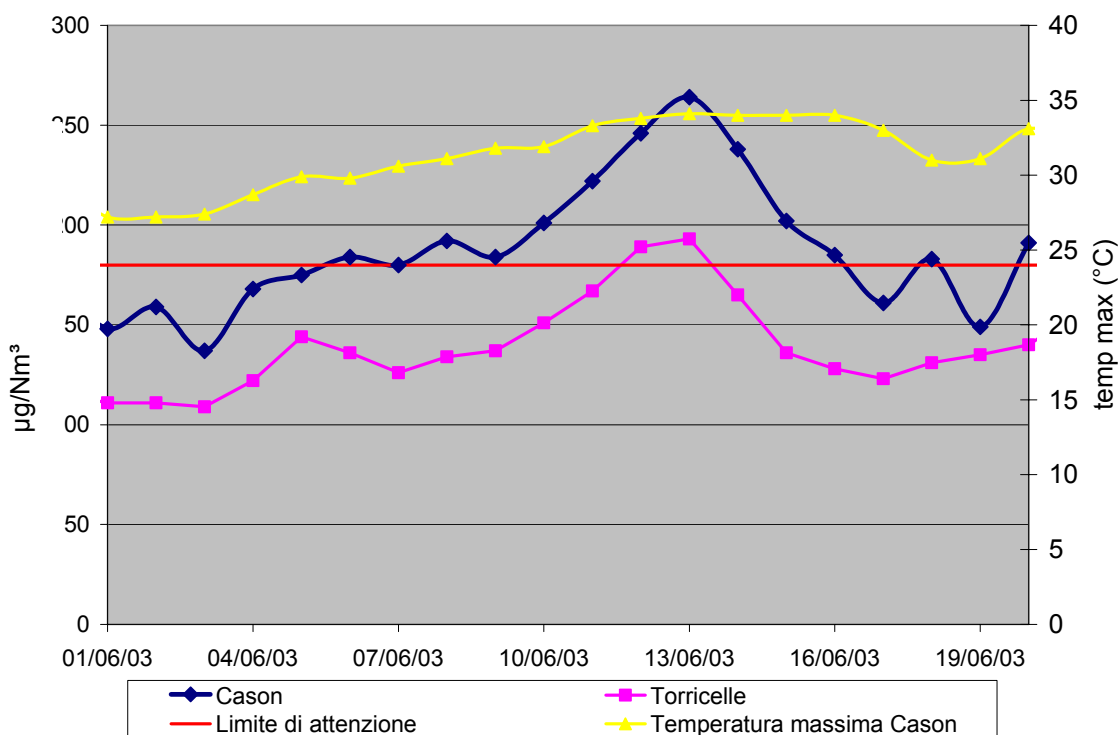


\

4.3.6 Il periodo acuto dal 4 al 13 Giugno 2003

In Figura 4-22 vengono analizzate le condizioni meteorologiche del periodo dal 4 al 13 giugno durante il quale vi è stato un continuo e rapido aumento delle concentrazioni di ozono. Il picco massimo assoluto dell'estate è stato raggiunto il giorno 13 giugno con un valore di $264 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dopo un tasso di crescita giornaliera di circa $12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 4-22: andamento ozono a Cason e Torricelle e temperatura massima a Cason durante la fase più acuta dell'estate 2003.



Il campo di alta pressione al suolo interessa fin dal giorno 4 con valori oltre 1020 hPa l'Europa centrale estendendo la sua influenza anche alla Valpadana ove determina un campo livellato. La circolazione risulta molto debole, ciò favorisce un surriscaldamento delle masse d'aria ed un aumento dei livelli di concentrazione di ozono. I valori più elevati si raggiungono il giorno 13 giugno (Figura 4-24) con valori massimi orari compresi tra 180 e $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ accompagnati da temperature massime comprese tra i 33 ed i 36 gradi. La circolazione nei bassi strati risulta debolmente occidentale (Figura 4-23).

In Figura 4-25 si riportano le traiettorie seguite da pacchetti di massa d'aria che partendo il giorno 11 giugno rispettivamente dalla quota di 500, 300 e 100 metri di altezza dal suolo, raggiungono la città di Verona il giorno 13 secondo il modello di dispersione HYSPLIT della NOAA; esse sono note negli ambienti scientifici come "back trajectory" e tale situazione evidenzia l'apporto di aria proveniente dalla bassa Lombardia ricca di precursori dell'ozono. Sempre dall'analisi delle traiettorie si ipotizza inoltre che l'ozono presente in Valpadana occidentale sia stato trasportato anche alle quote attorno ai 300-500 metri verso la nostra città contribuendo ad arricchire la "riserva d'ozono" come evidenziato dalle alte concentrazioni registrate nella stazione delle Torricelle

In Figura 4-26 si riporta la settimana tipo di alcune stazioni di provincia nonché della stessa città al fine di evidenziare l'effetto "week-end". Tale comportamento è la conseguenza dell'incremento dei livelli dell'ozono durante il sabato e la domenica dovuto al minor carico emissivo di NO_x . Infatti in aree molto inquinate l' NO appena emesso si combina velocemente con l'ozono riducendone pertanto la concentrazione. A causa di questo e di altre reazioni chimiche un calo degli NO_x può produrre aumenti dei livelli di ozono, ed è ciò che accade nei fine settimana in cui la circolazione è ridotta. Dal grafico si vede che tutte le stazioni esaminate presentano tale effetto anche se a San Martino si realizza la massima variazione percentuale con circa il 30% rispetto ai giorni feriali.

Figura 4-23: campo anemologico sull'Italia settentrionale il 13 giugno 2003 ore 12 GMT, valori riferiti a 10 m dal suolo in m/s, e campo termico, valori riferiti a 2m dal suolo in C°. La legenda a destra quantifica i valori del campo della temperatura³.

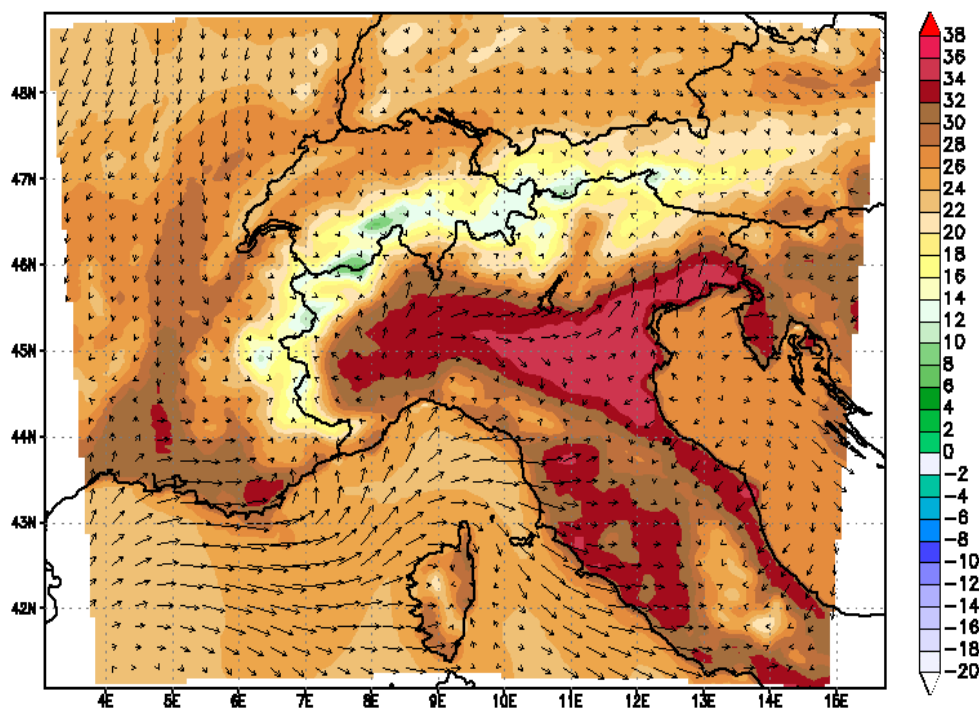
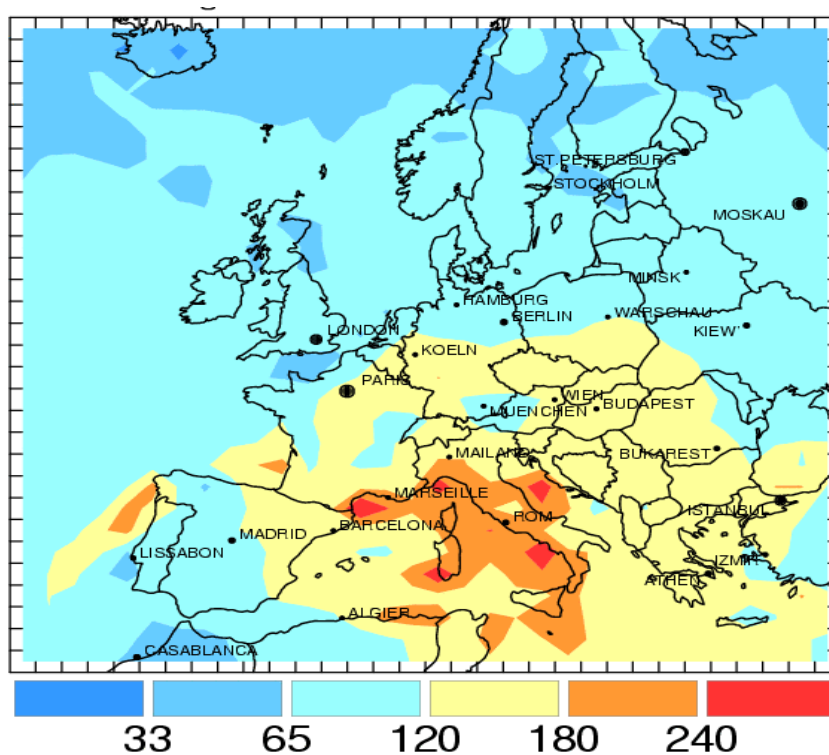


Figura 4-24: concentrazione d'ozono in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il 13 giugno 2003- Modello EURAD⁴.



³ ISAC-DIFI-ARPAL CMIRL

⁴ Università di Colonia

Figura 4-25: traiettorie lagrangiane a 100, 200, 300 m con arrivo a Verona alle 00 del 13 /06/03⁵.

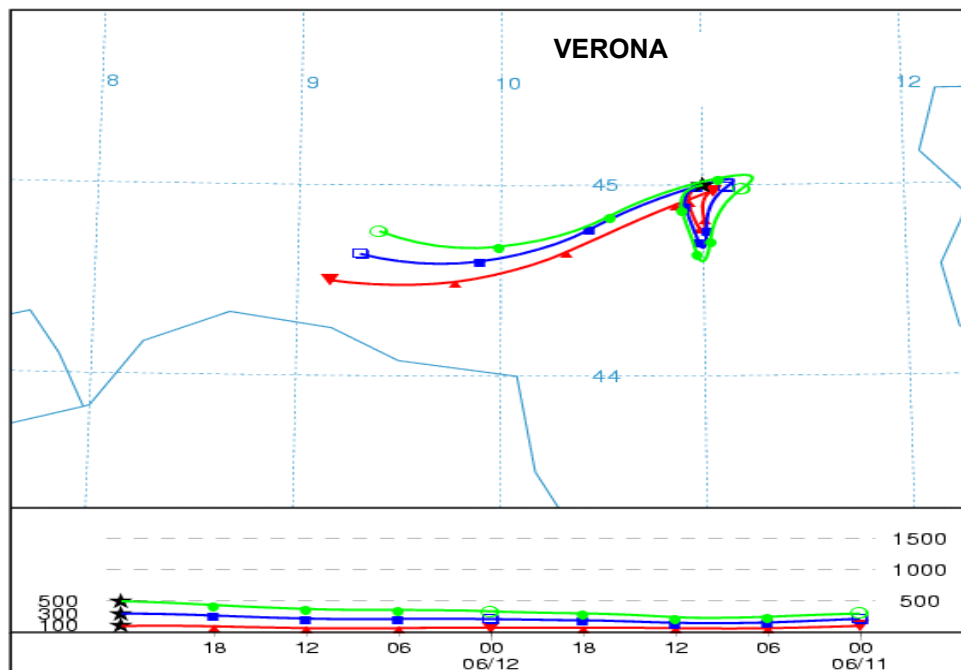
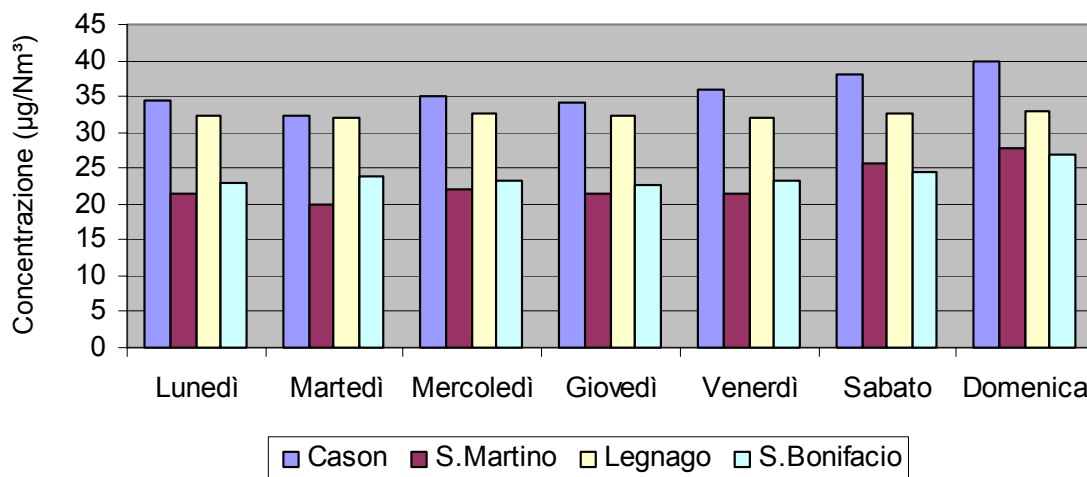


Figura 4-26: settimana tipo per l'anno 2002 a Cason , S.Bonifacio ,Legnago, S.Martino B.A.



⁵ NOAA Air Resources Laboratory