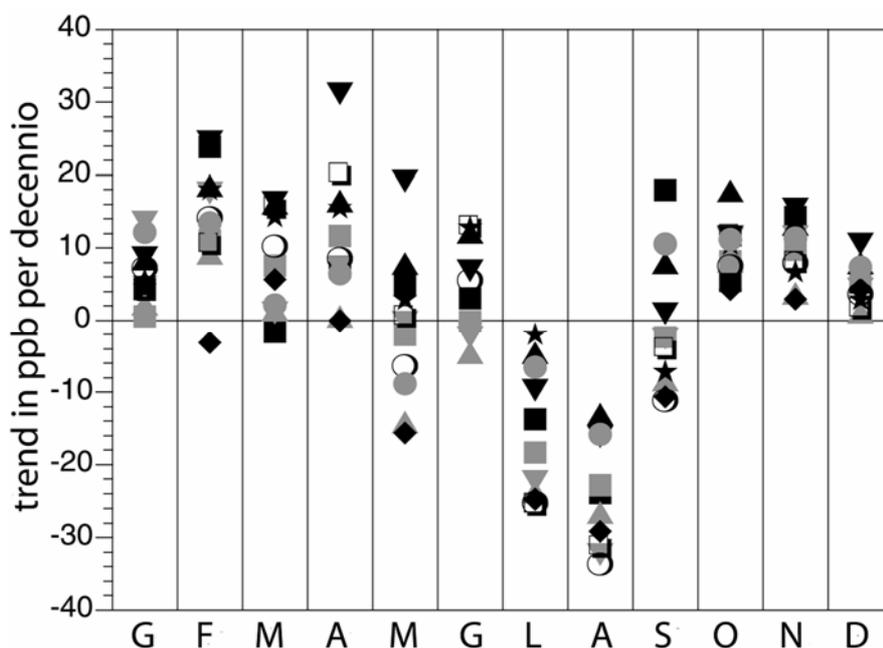


## Rapporto

# Trend dell'ozono al Sud delle Alpi

André S.H. Prévôt, Rudolf O. Weber, Markus Furger

Laboratorio di chimica atmosferica, Paul Scherrer Institut



su incarico

dell'Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del  
paesaggio (UFAP)

dell'Ufficio della protezione dell'aria (UPA/SPAAS),  
Canton Ticino

e dell'Ufficio per l'ambiente (UPA Gr), Canton Grigioni

## Indice

Sommario .....	1
1. Introduzione .....	5
2. Luoghi di misura .....	7
3. Elaborazione dei dati e metodi statistici .....	9
3.1. Verifica dei dati.....	9
3.2. Grandezze calcolate.....	9
3.3. Metodi statistici.....	10
4. Influssi meteorologici sulla concentrazione di ozono.....	10
4.1. Favonio da nord .....	10
4.2. Giorno della settimana .....	12
4.3. Sviluppo dei modelli .....	14
4.4. Trend dei parametri meteorologici.....	18
5. Medie dei massimi di ozono e valori AOT40 .....	20
6. Trend dei massimi di ozono .....	22
6.1. Medie mensili .....	22
6.2. Superamenti del limite.....	25
7. Trend dei massimi di O <sub>x</sub> .....	28
8. Trend dei valori AOT40 .....	31
8.1. Somme mensili.....	31
8.2. Somme stagionali.....	32
9. Indagine sull'influenza della Pianura padana .....	35
9.1. Influsso dei fronti d'aria inquinata ("plume") della regione di Milano	35
9.2. I massimi di ozono nel Sopraceneri e in Mesolcina.....	38
9.3. Stima della produzione locale svizzera .....	41

9.4. Influsso delle vacanze italiane di Ferragosto sulle concentrazioni di ozono al Sud delle Alpi.....	45
10. Possibili studi futuri.....	47
11. Ringraziamenti .....	50
12. Bibliografia .....	50
Allegati	

## Sommario

Negli anni '90, in Svizzera, le concentrazioni di ozono hanno chiaramente e ripetutamente superato i limiti prescritti dalla legge. In questo decennio - specialmente nella Svizzera meridionale e durante il periodo estivo - sono state rilevate quantità di O<sub>3</sub> elevate, malgrado nello stesso lasso di tempo le emissioni dei precursori di questo inquinante (in particolare ossidi di azoto e composti organici volatili) fossero diminuite.

Il presente studio ha permesso di precisare su base scientifica l'evoluzione delle concentrazioni di ozono a Sud delle Alpi negli anni '90 e di definire i vari fattori che ne influenzano la formazione. A questo scopo sono stati utilizzati i dati decennali di 11 stazioni di rilevamento situate nel Canton Ticino ed in Val Mesolcina (Canton Grigioni).

Una loro prima analisi ha rivelato che tra il 1990 ed il 1999 le massime giornaliere di O<sub>3</sub> di luglio e di agosto sono diminuite sensibilmente, mentre le stesse hanno subito nel periodo invernale un aumento considerevole, restando comunque molto al di sotto dei valori estivi.

Tuttavia, per individuare le tendenze reali dei suddetti valori, è stato necessario considerare tra l'altro l'influsso delle condizioni meteorologiche sulla formazione di O<sub>3</sub>. A tale scopo è stato definito un modello di correzione specifico per ogni mese (comprendente le due variabili "temperatura pomeridiana" e "giorno settimanale") che ha permesso di chiarire più dell'80% della varianza delle concentrazioni massime giornaliere.

Dopo questa procedura la diminuzione effettiva in estate è stata meno marcata, a causa di un'evoluzione decrescente delle temperature riscontrato nello stesso periodo. In luglio, per esempio, i trend nelle diverse stazioni prese in considerazione sono compresi tra 0 e 20 ppb/decennio invece dei 5-25 ppb/decennio riscontrati prima della correzione. L'aumento dei massimi giornalieri invernali è invece rimasto praticamente immutato, con valori fra 0 e 20 ppb/decennio, a seconda del mese e della stazione di rilevamento.

Le stazioni di rilevamento situate nel Ticino meridionale e quelle in altitudine del Ticino settentrionale e della Mesolcina hanno evidenziato in estate le tendenze

negative maggiori per i massimi di ozono. Nella prima parte degli anni '90, per esempio a Mendrisio, la quantità di O<sub>3</sub> ha superato in agosto i 90 ppb durante più di 10 giornate, mentre alla fine della stessa decade questo valore è stato oltrepassato soltanto in 5 giornate. Per contro il numero di giorni con superamento del limite fissato dalla legge svizzera a circa 60 ppb (120 µg/m<sup>3</sup>) è rimasto praticamente immutato nel corso del suddetto decennio. Va comunque sottolineato che il numero di giorni con concentrazioni molto elevate (maggiori a 80 ppb) è regredito notevolmente nel corso degli anni '90.

Generalmente l'evoluzione dei valori di O<sub>x</sub> (somma delle concentrazioni di O<sub>3</sub> e di NO<sub>2</sub>) consente di chiarire se un trend positivo dei massimi di ozono sia da attribuire direttamente ad una maggior produzione dell'inquinante oppure indirettamente ad una minor degradazione dello stesso da parte degli ossidi di azoto (NO e NO<sub>2</sub>), riconducibile ad una diminuzione delle emissioni locali di quest'ultimi. Nell'ambito di questo studio è stato osservato che la tendenza delle quantità di O<sub>x</sub> è stata per tutti i periodi dell'anno per lo più negativa. Questo significa che il trend positivo dei massimi di O<sub>3</sub> osservato nei mesi invernali è dovuto principalmente ad una riduzione della decomposizione dello stesso da parte del monossido di azoto (emesso localmente in quantità minore) e non ad un aumento primario della sua produzione.

I valori AOT40 rispecchiano adeguatamente la qualità dell'aria. Essi sono parecchio diminuiti in luglio ed agosto, e leggermente aumentati nei mesi primaverili. Ampliando le considerazioni a tutta la stagione, in particolare le stazioni di rilevamento del Ticino meridionale e quelle in altitudine situate nel Sopraceneri ed in Mesolcina rivelano trend negativi considerevoli.

È interessante notare che tutti questi luoghi di misura sono fortemente esposti alle emissioni della Pianura padana. È quindi lecito ipotizzare che le riduzioni delle stesse verificatesi nel Nord Italia abbiano comportato anche in Ticino, soprattutto in estate e in giorni con intenso irraggiamento solare, una diminuzione significativa delle concentrazioni massime di ozono. Va comunque sottolineato che queste continuano a rimanere ben al di sopra dei limiti previsti dalla legge svizzera e chiaramente superiori ai valori rilevati al Nord delle Alpi.

L'influsso della Pianura padana sulla concentrazione di  $O_3$  nelle regioni meridionali della Svizzera è notevole. I cosiddetti "fronti di ozono" causano a Sud delle Alpi aumenti dei tassi pomeridiani di ozono superiori ai 40 ppb. A Mendrisio, per esempio, questo fenomeno è stato osservato nei mesi di luglio dal 1990 al 1999 in quasi 50 giorni. Si è potuto inoltre dimostrare che le concentrazioni di  $O_3$  in Ticino e in Mesolcina sono tanto più elevate quanto più queste masse d'aria si sono caricate di inquinanti primari nelle province padane prima di essere convogliate verso il Sud delle Alpi.

In generale le concentrazioni di ozono estive sono più elevate nel Sottoceneri che nel Sopraceneri e in Mesolcina, dove i valori misurati, specialmente dalle stazioni a basse quote (per esempio Roveredo e Locarno), sono relativamente esigui. Sempre nel Sopraceneri ed in Mesolcina, tuttavia, i punti di rilevamento posti in altitudine registrano picchi di  $O_3$  (che spesso vengono raggiunti solo in tarda serata) quasi pari e qualche volta addirittura maggiori a quelli fatti segnare nel Sottoceneri. A conferma di tale fenomeno è stato stimato che la produzione di ozono in territorio svizzero corrisponde in media circa alla metà di quella della Pianura padana. Essa non può quindi essere trascurata. Questo aspetto dovrebbe essere comunque analizzato in futuro in maniera più approfondita.

Nei giorni con favonio da nord le concentrazioni di ozono del Ticino corrispondono a quelle misurate sulla Jungfraujoch. In estate, per esempio, i valori si aggirano in queste particolari giornate e a parità di temperatura attorno ai 60 ppb al massimo, invece dei normali 70-160 ppb. In inverno, invece, durante i suddetti giorni si raggiungono in media i 40 ppb al posto dei consueti quantitativi tra 0 e 40 ppb.

Nelle domeniche invernali i massimi di  $O_3$  sono di molto maggiori a quelli del resto della settimana, mentre in quelle d'estate essi risultano inferiori. Durante il periodo estivo poi le concentrazioni di ozono più elevate sono riscontrate frequentemente di giovedì e venerdì.

Un'analisi preliminare ha potuto accertare un effetto notevole del Ferragosto (periodo verso la metà di agosto in cui gran parte degli Italiani parte per le vacanze) sulle concentrazioni di ozono a Sud delle Alpi. A pari condizioni meteorologiche esse sono inferiori a quelle misurate in maggio, giugno e luglio

di 10-15 ppb. La riduzione delle emissioni della regione padana nel mese di agosto, stimata a 20-30% di quelle consuete, ha un'influenza non indifferente sulle concentrazioni di O<sub>3</sub> nel Ticino meridionale. Appare quindi evidente che una diminuzione duratura delle suddette emissioni potrebbe contribuire a ridurre ulteriormente le stesse concentrazioni massime, soprattutto nel Sottoceneri.

## 1. Introduzione

Da parecchi anni l'ozono rappresenta in Svizzera, così come in altre nazioni, una delle problematiche più rilevanti per la salute e l'igiene pubblica, e ogni estate regolarmente torna a far parlare di sé.

Nel nostro paese dal 1960 ad oggi le concentrazioni di O<sub>3</sub> negli strati bassi della stratosfera sono quasi raddoppiate (Staehelin et al., 1994). Dopo la progressiva introduzione del catalizzatore sulle automobili negli anni ottanta e novanta, tuttavia, le emissioni dei precursori dell'ozono sono in parte regredite. Sarebbe stato legittimo attendersi dunque una parallela diminuzione dei quantitativi del suddetto inquinante.

Due ricerche in particolare hanno cercato di evidenziare possibili tendenze delle concentrazioni di ozono in territorio elvetico. Avendo a disposizione quasi esclusivamente dati di stazioni a Nord delle Alpi, entrambe le indagini hanno focalizzato l'attenzione su tale regione. La prima, condotta dal BUWAL (1996), ha evidenziato che tra il 1987 e il 1993 le medie giornaliere di ozono nelle città svizzero-interne sono chiaramente aumentate. Per contro nella zona di Lugano e nel medesimo periodo le stesse non hanno praticamente subito variazioni di rilievo, mentre i massimi orari giornalieri sono incrementati sensibilmente. L'altra indagine effettuata da Stefan Brönnimann (BUWAL, 2001) è giunta alla conclusione che, in linea di massima, le medie giornaliere di tutte stazioni a Nord delle Alpi prese in considerazione sono aumentate, che i massimi giornalieri nelle zone rurali sono regrediti, mentre quelli in città incrementati.

Ciò nonostante Kübler et al. (2001) non hanno rilevato nel loro rapporto alcuna tendenza statisticamente significativa dei tassi di O<sub>3</sub>.

In Svizzera le concentrazioni di ozono più elevate sono registrate in Ticino. Come poc'anzi accennato tuttavia non è stato finora effettuato alcuno studio scientifico su vasta scala dei trend dell'O<sub>3</sub> di questa regione.

Il presente studio si concentra finalmente sul Meridione delle Alpi. Grazie ai valori misurati da circa 10 stazioni di rilevamento ticinesi e mesolcinesi tra il 1990 e il 1999, è stato possibile analizzare l'evoluzione delle concentrazioni di questo inquinante per tale decennio. Con l'ausilio di metodi statistici appropriati

si è potuto inoltre esaminare e distinguere gli influssi specifici che la meteorologia o le variazioni delle emissioni durante la settimana (dovute ad esempio al traffico del weekend) hanno sui valori di ozono.

I dati utilizzati provengono dalle stazioni della rete nazionale d'osservazione degli inquinanti atmosferici (NABEL) e dai numerosi punti di rilevamento presenti su territorio ticinese così come grigionese (Mesolcina). Una tale quantità e varietà di dati ha permesso un'analisi abbastanza approfondita.

Sono stati esaminati in primo luogo (capitoli 5-8) i massimi giornalieri, i superamenti di determinati limiti (per esempio numero di giorni con concentrazioni sopra i 60 ppb = 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e i valori AOT 40 (grandezza cumulativa che descrive la qualità dell'aria). In un secondo momento gli influssi del favonio da nord (capitolo 4.1) e del giorno della settimana (capitolo 4.2). Quest'ultimo, già trattato da Oekoscience (2001), è stato comunque ulteriormente approfondito in questo rapporto.

Rispetto a ricerche svolte in passato e secondo un nuovo concetto, gli influssi meteorologici sono stati analizzati mese per mese. Si è infatti constatato che nei diversi periodi dell'anno i singoli parametri meteorologici possono variare notevolmente sia nei coefficienti che nei segni.

Un altro punto saliente è l'esame delle diverse influenze esercitate dalla Pianura Padana sullo stato dell'inquinamento a Meridione delle Alpi (capitolo 9). Studi in passato hanno mostrato come l'aria inquinata che affluisce dall'Interland milanese contribuisca in maniera importante alle elevate concentrazioni di ozono riscontrate nel Sottoceneri (BUWAL, 1994, Prevot et al., 1997), che spesso superano di più del doppio il limite orario fissato in Svizzera a 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nei capitoli 9.1 e 9.2 si esamina la relazione tra le emissioni della regione industriale padana e le concentrazioni di  $\text{O}_3$  in Ticino e Mesolcina. Al punto 9.3 viene confrontata la produzione di ozono della vicina Penisola a quella svizzera. Infine viene analizzata l'influenza del Ferragosto "italiano" sui tassi di  $\text{O}_3$  a Sud delle Alpi (capitolo 9.4).

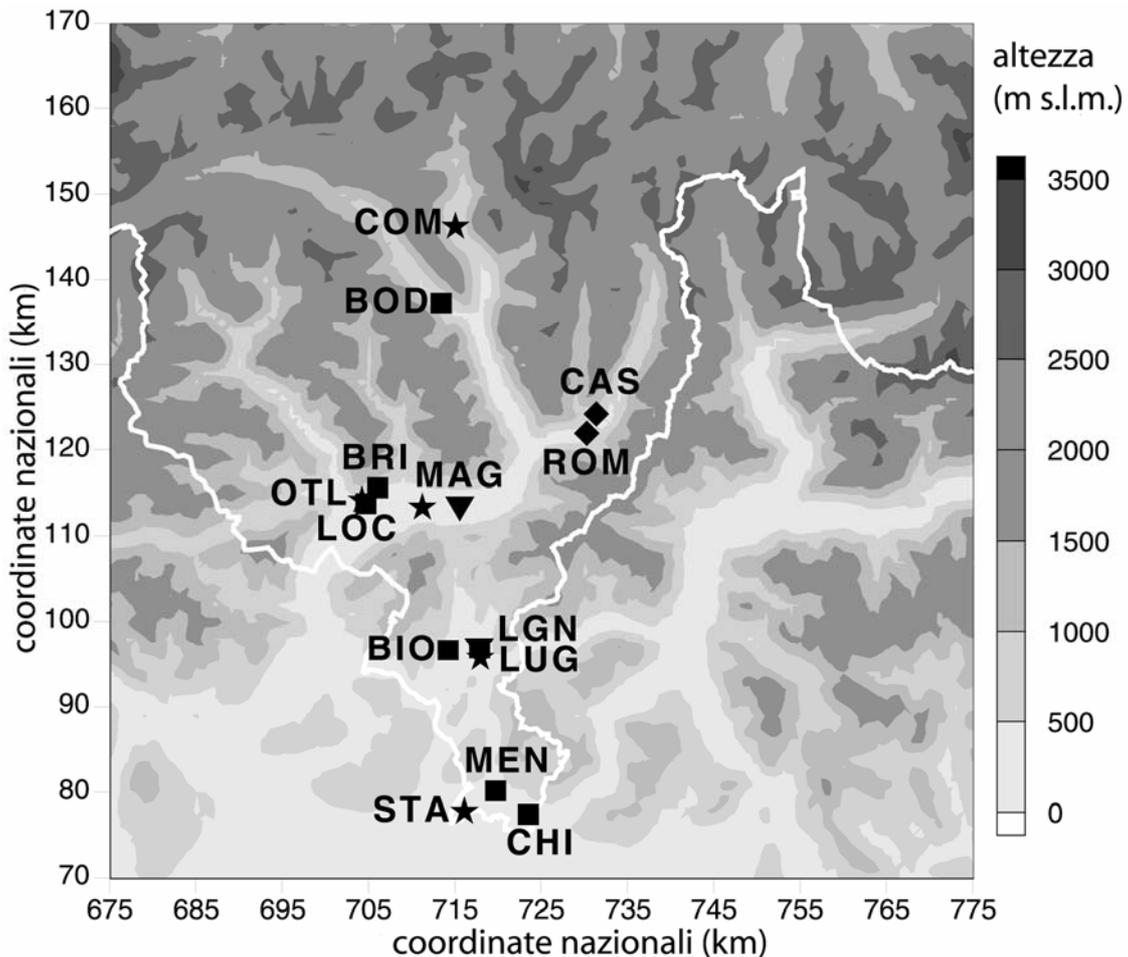
## 2. Luoghi di misura

In Ticino e Mesolcina parecchie stazioni di misura rilevano in continuo le componenti inquinanti dell'aria (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, ecc.) e anche alcuni parametri meteorologici. Più precisamente si tratta di due stazioni della rete NABEL, otto gestite dal Canton Ticino e tre dal Canton Grigioni. A causa della parziale disponibilità di dati alcune serie sono state tuttavia tralasciate. La stazione in altitudine di Cimetta, per esempio, ha più volte manifestato problemi di natura tecnica. Malgrado la posizione molto interessante si è quindi preferito non includerla nella valutazione. A causa del breve periodo di misurazione anche la postazione di Roveredo Stazione non è stata considerata.

**Tabella 1 Elenco delle stazioni di misura.**

<b>Codice</b>	<b>Nome</b>	<b>Cnx (km)</b>	<b>Cny (km)</b>	<b>Altezza m s. l. m.</b>	<b>Stazioni meteo corrispondenti</b>	<b>Codice meteo</b>	<b>Cnx</b>	<b>Cny</b>	<b>Altezza m s. l. m.</b>
<b>BIO</b>	Bioggio	714.15	96.65	290	Lugano	LUG	717.88	95.87	273
<b>BOD</b>	Bodio	713.35	137.30	320	Comprovasco	COM	714.99	146.44	575
<b>BRI</b>	Brione	706.00	115.65	480	Locarno-Monti	OTL	704.16	114.35	366
<b>CAS</b>	Castaneda	731.32	124.23	770	Locarno-Magadino	MAG	711.16	113.54	197
<b>CHI</b>	Chiasso	723.45	77.45	230	Stabio	STA	716.04	77.97	353
<b>LGN</b>	Lugano	717.80	96.85	290	Lugano	LUG	717.88	95.87	273
<b>LOC</b>	Locarno	704.63	113.80	200	Locarno-Monti	OTL	704.16	114.35	366
<b>LUG</b>	Lugano	717.75	96.64	280	Lugano	LUG	717.88	95.87	273
<b>MAG</b>	Magadino	715.50	113.20	200	Locarno-Magadino	MAG	711.16	113.54	197
<b>MEN</b>	Mendrisio	719.65	80.20	350	Stabio	STA	716.04	77.97	353
<b>ROM</b>	Roveredo Municipio	730.21	121.97	320	Locarno-Magadino	MAG	711.16	113.54	197

Anche se ogni punto di misura rileva alcuni parametri climatici, si è preferito caratterizzare il tempo meteorologico con le serie di dati complete e verificate della rete ANETZ di MeteoSvizzera (ex ISM). La tabella 1 descrive brevemente tutte le 11 stazioni, i cui dati sono stati utilizzati in questo studio. La figura 1 invece mostra la posizione geografica di tali stazioni così come dei 5 luoghi di rilevamento meteorologico ANETZ.



**Figura 1** Posizione geografica delle stazioni di rilevamento della chimica dell'aria e della meteorologia, i cui dati sono stati utilizzati in questo rapporto. I quadrati indicano le stazioni nel Canton Ticino, i rombi quelle del Canton Grigioni e i triangoli quelle della rete NABEL. Le stazioni-meteo ANETZ sono contrassegnate da stelle.

### **3. Elaborazione dei dati e metodi statistici**

#### **3.1 Verifica dei dati**

In questo studio sono state analizzate le serie delle medie semiorarie di ozono e di diossido di azoto per il periodo dal 1.1.1990 al 31.12.1999. Le concentrazioni di questi due inquinanti sono state convertite in ppb, come indicato in BUWAL (2001): per stazioni sotto i 1500 m s.l.m. 1 ppb O<sub>3</sub> equivale a 1.95 µg/m<sup>3</sup> mentre 1 ppb NO<sub>2</sub> a 1.86 µg/m<sup>3</sup>.

Allo scopo di escludere valori abnormi isolati (dovuti per esempio ad errori di misura) sono state considerate valide solo concentrazioni inferiori a 300 ppb. Ulteriori anomalie presenti nelle suddette serie sono state individuate grazie ad un controllo visivo e i relativi periodi con tali irregolarità non sono stati presi in considerazione nelle analisi.

A partire dalle medie semiorarie (quando almeno un valore semiorario era valido) sono poi state calcolate le medie orarie.

#### **3.2 Grandezze calcolate**

Il massimo di ozono pomeridiano è stato definito per ogni giorno dalle medie orarie, tra le 12 e le 24 CET (central european time), a condizione che almeno il 75% di queste fossero valide.

Il monossido di azoto emesso localmente reagisce spesso con l'ozono causando grandi oscillazioni nelle concentrazioni di questo inquinante. Per tenere presente questo effetto è stata calcolata la quantità di O<sub>x</sub> sommando i valori di ozono a quelli di diossido di azoto (entrambi in ppb).

Le medie orarie sono pure servite a calcolare in maniera molto meticolosa i valori AOT40, procedendo come segue. Prima di tutto sono state individuate per ogni giorno le ore durante le quali l'irradiazione solare globale fosse maggiore o uguale a 50 wattora per metro quadrato e che nel contempo presentassero misure di ozono valevoli. La somma di tutti i superamenti della soglia di 40 ppb - la relativa grandezza è stata chiamata "max (O<sub>3</sub>\_conc - 40, 0)" - corrisponde al valore AOT40.

Infine sono stati scelti per ogni giorno e a partire dai dati delle stazioni ANETZ i parametri meteorologici suscettibili di influire le quantità di O<sub>3</sub>, vale a dire la velocità del vento, la temperatura dell'aria, l'irraggiamento globale e l'umidità specifica. Per quest'ultimi sono state calcolate le medie mattutine (dalle 6:40 fino alle 12:40 CET) e quelle pomeridiane (dalle 12:40 fino alle 18:40 CET).

### **3.3 Metodi statistici**

L'idea di fondo dello studio consisteva nell'analizzare l'influsso di poche grandezze meteorologiche sulla concentrazione di ozono, in particolare sui massimi giornalieri. Nei calcoli statistici, oltre all'influenza di tali parametri registrati in maniera continua, è stata tenuta in considerazione anche quella della grandezza nominale "giorno settimanale". Per valutare contemporaneamente l'influsso di variabili nominali e continue non è stata perciò impiegata una semplice regressione multipla, bensì una cosiddetta "analisi della covarianza" anche detta „Analysis of Covariance (ANCOVA)".

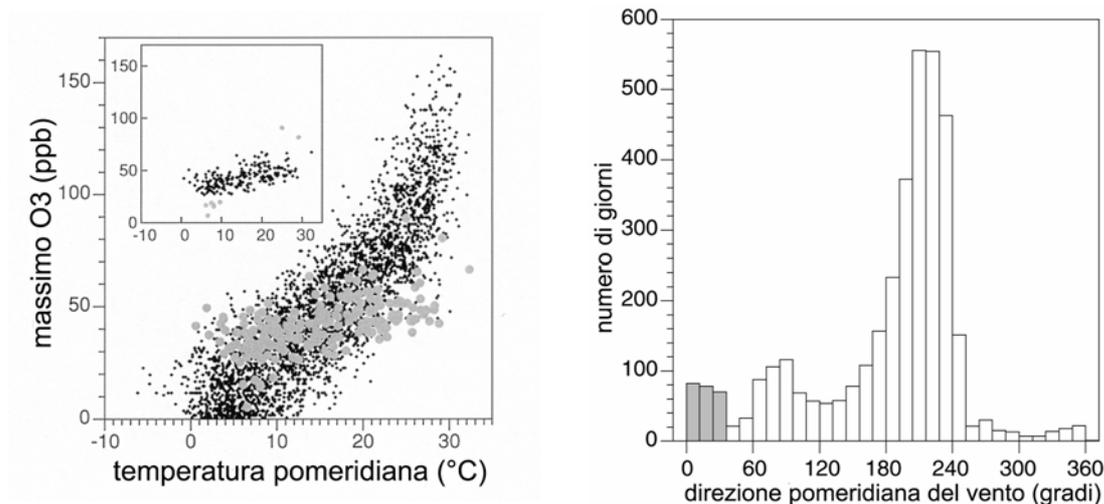
La presenza di eventuali trend nella concentrazione di O<sub>3</sub> (grandezza di riferimento) è stata esaminata con due differenti metodi. Da una parte con una regressione lineare parametrica, che fornisce tra l'altro indicazioni quantitative sull'intensità del trend (Draper and Smith, 1996), dall'altra con un metodo non parametrico che si basa sul coefficiente della correlazione del rango secondo Mann-Kendall (Gilbert, 1987). I risultati di entrambi in metodi concordavano molto bene fra di loro, così che nelle tabelle successive, per comodità, sono stati esposti solo quelli della regressione lineare.

## **4. Influssi meteorologici sulla concentrazione di ozono**

### **4.1 Favonio da nord**

Gli influssi del vento da nord sulle concentrazioni di ozono in Ticino sono già stati in gran parte studiati e definiti nell'ambito del progetto TOSS e quindi verranno qui di seguito solo accennati. I dettagli riguardanti tale tema possono essere approfonditi leggendo l'articolo di Weber und Prévôt (2002). La figura 2 rappresenta le concentrazioni massime di ozono pomeridiane in funzione delle temperature pomeridiane a Mendrisio. A livello qualitativo si può riconoscere una relazione significativa tra le due variabili. Se si considerano i valori delle

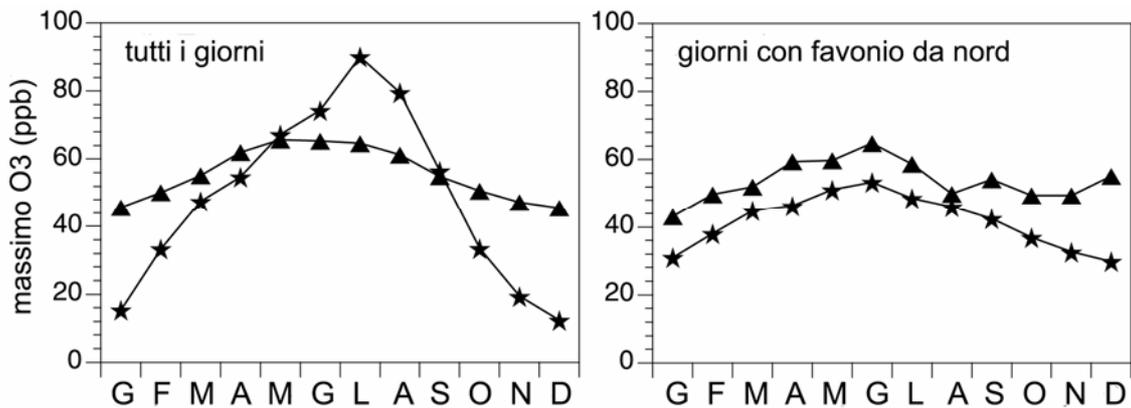
sole giornate con vento da nord tuttavia, il rapporto fra temperatura e massimo di O<sub>3</sub> cambia drasticamente (vedi sempre figura 2). Durante queste giornate al posto dei consueti valori tra 0 e 40 ppb si registrano in inverno concentrazioni tra 30 a 40 ppb, e in estate invece dei soliti 70-60 ppb quantitativi pari circa a solo 40-60 ppb.



**Figura 2** Grafico a sinistra: massimo giornaliero di ozono a Mendrisio in funzione della temperatura pomeridiana di Stabio. I tondini grigi evidenziano i giorni con vento da nord, che sono ulteriormente rappresentati nel riquadro in alto, dove alcuni valori abnormi sono poi marcati in grigio. Grafico a destra: frequenza (in giorni) della provenienza del vento; le colonne grigie indicano la direzione da nord.

I massimi di ozono misurati a Mendrisio durante le giornate con favonio da nord, anche se leggermente inferiori, sono simili a quelli fatti segnare sulla Jungfrauoch. Inoltre anche i rispettivi andamenti annuali risultano analoghi (vedi figura 3). La figura 3 mostra pure che quest'ultimi, in giornate con vento proveniente da altre direzioni, si distinguono marcatamente. La spiegazione di tutto ciò va ricercata nell'avvezione di masse d'aria che nei giorni con favonio da nord ha luogo dagli strati bassi della troposfera (o da altezze simili a quella della Jungfrauoch) fino al suolo. Questa teoria è confermata dai tassi molto bassi di umidità relativa che si riscontrano tipicamente nelle giornate con vento da nord in Ticino, e da una piccola differenza della temperatura potenziale della Jungfrauoch rispetto a quella di Stabio, anch'essa osservabile nei suddetti

giorni. La frequenza di tali giornate a Mendrisio/Stabio è di circa 8-10% in inverno, e 6-8% in estate. Quindi, malgrado le temperature elevate, nei giorni estivi di favonio da nord la produzione di O<sub>3</sub> nella Pianura padana e nel Ticino meridionale si arresta. L'aria di queste zone contiene di conseguenza quantità di ozono relativamente piccole, proprio come gli strati bassi della stratosfera che notoriamente sono poveri di questo gas. Il modello meteorologico dei massimi di O<sub>3</sub> per Mendrisio è stato di conseguenza calcolato considerando solo i giorni con direzioni del vento diverse da quella settentrionale.



**Figura 3** Grafico a sinistra: media mensile dei massimi giornalieri di ozono a Mendrisio (stelle) e sulla Jungfrauoch (triangoli) per tutti i giorni del periodo di osservazione. Grafico a destra: media mensile dei massimi giornalieri di ozono a Mendrisio (stelle) e sulla Jungfrauoch (triangoli) per i soli giorni con vento da nord.

## 4.2 Giorno della settimana

A completamento degli studi effettuati da Ökoscience (2002) e da Vecchi and Valli (1999), in questa indagine è stata analizzata l'influenza del giorno settimanale (da cui dipende indirettamente la situazione delle emissioni) sui massimi giornalieri di ozono, suddividendo i valori per giorno così come per mese.

A tale scopo è stato impiegato il test statistico ANOVA. I livelli di significatività (suddivisi per mese) di tutte le stazioni di rilevamento sono elencati nella tabella 3. In inverno l'influenza è piuttosto evidente ( $p < 0.05$ ). Nel periodo estivo invece le differenze tra i massimi di O<sub>3</sub> dei diversi giorni non sono statisticamente significative. Gli esempi di Chiasso e Roveredo illustrano bene

questo stato di cose (vedi figura 4; le rispettive figure per gli altri punti di misura si trovano negli allegati). Mentre nei mesi invernali i fine settimana fanno registrare massimi di ozono superiori a quelli dei giorni lavorativi, in estate si misurano i valori maggiori già di venerdì.

Sebbene solo in inverno si riscontri un'influenza statisticamente significativa del giorno della settimana sui massimi di ozono va rilevato che in estate i valori più elevati sono stati registrati in tutte le stazioni di misura appunto di venerdì. L'influsso del giorno settimanale è stato quindi tenuto in considerazione nell'intero processo di calcolo dei modelli.

**Tabella 2 Livelli di significatività (p) dell'influsso del giorno settimanale sui massimi giornalieri di ozono, raggruppati per mese. Grigio chiaro:  $p < 0.05$ ; Grigio scuro:  $p < 0.01$ .**

massimo	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
<b>BIO</b>	0.119	0.059	0.137	0.542	0.945	0.053	0.509	0.682	0.990	0.366	0.009	0.385
<b>BOD</b>	0.518	0.104	0.085	0.836	0.795	0.668	0.255	0.956	0.289	0.896	0.296	0.938
<b>BRI</b>	0.060	0.144	0.748	0.964	0.986	0.606	0.324	0.926	0.925	0.878	0.100	0.018
<b>CAS</b>	0.587	0.241	0.522	0.896	0.902	0.130	0.220	0.618	0.805	0.895	0.186	0.108
<b>CHI</b>	0.005	0.007	0.001	0.575	0.854	0.227	0.413	0.246	0.972	0.639	0.076	0.233
<b>LGN</b>	0.013	0.000	0.000	0.268	0.995	0.489	0.209	0.616	0.781	0.717	0.096	0.026
<b>LOC</b>	0.004	0.004	0.002	0.311	0.773	0.364	0.066	0.682	0.888	0.282	0.002	0.536
<b>LUG</b>	0.009	0.032	0.040	0.707	0.976	0.171	0.092	0.719	0.869	0.820	0.005	0.514
<b>MAG</b>	0.013	0.179	0.147	0.957	0.989	0.350	0.559	0.856	0.868	0.913	0.021	0.739
<b>MEN</b>	0.002	0.035	0.016	0.663	0.985	0.103	0.249	0.284	0.966	0.452	0.023	0.113
<b>ROMM</b>	0.679	0.749	0.149	0.929	0.955	0.462	0.666	0.819	0.852	0.830	0.048	0.515

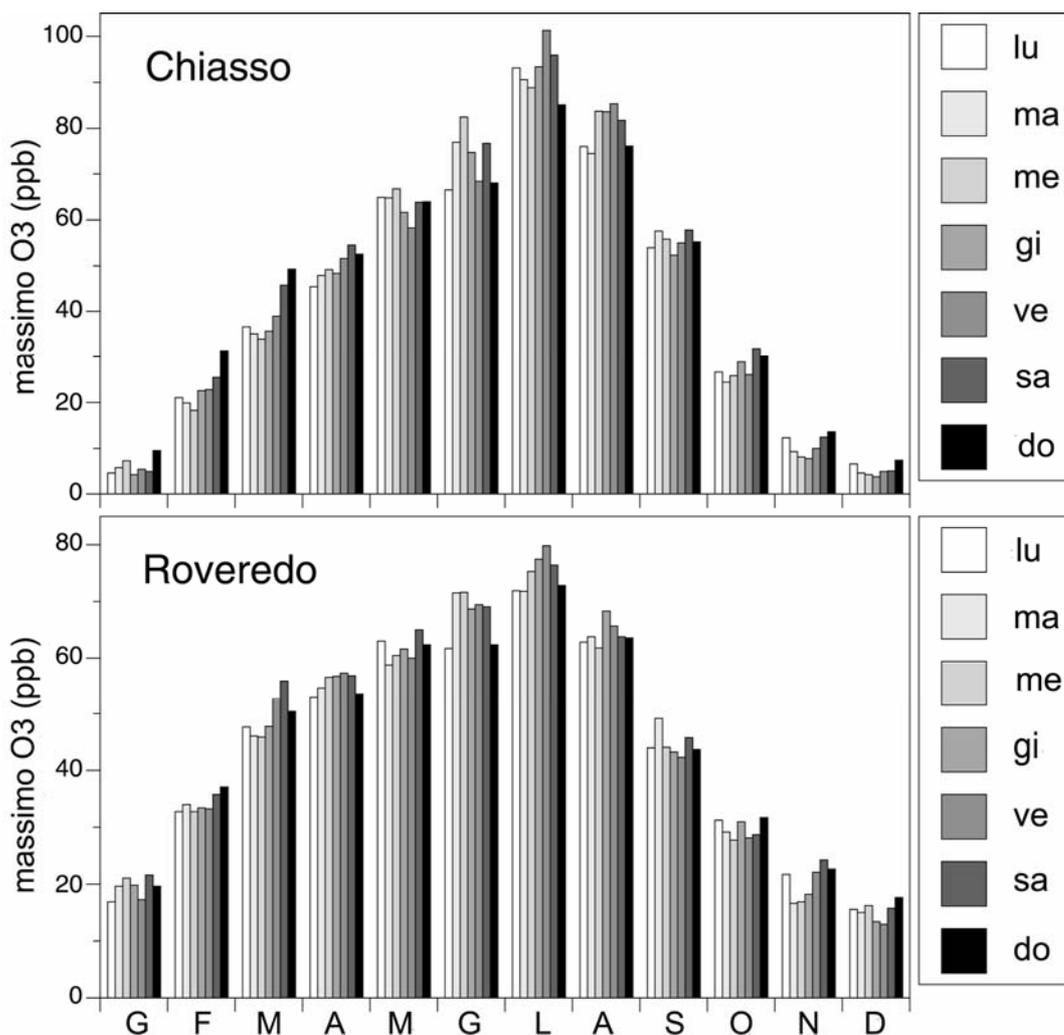


Figura 4 Media dei massimi giornalieri di ozono, suddivisi per giorno e per mese, a Chiasso e Roveredo.

### 4.3 Sviluppo dei modelli

Siccome durante i giorni con favonio da nord esiste una relazione tra massimi di ozono e temperatura che differisce di molto dal normale (vedi figura 2), si è deciso di scartare tali giornate dalle analisi.

Studi in passato hanno considerato contemporaneamente molti parametri meteorologici. In questa indagine si è invece deciso di definire un numero leggermente minore di fattori, e cioè le grandezze meteorologiche *temperatura mattutina e pomeridiana*, *irraggiamento globale mattutino e pomeridiano*, *velocità del vento mattutina e pomeridiana*, *umidità specifica mattutina e pomeridiana*. Tenuto conto del *giorno settimanale*, le variabili indipendenti sono quindi 9. Per ogni singolo mese è stato poi impostato un modello di correzione

specifico basato sia sull'andamento annuale della meteorologia che sulla chimica dell'aria. Nella tabella 3, a titolo d'esempio, è illustrato l'influsso di tali grandezze sul massimo giornaliero di ozono per le stazioni di Mendrisio e Castaneda.

**Tabella 3** Influsso delle variabili meteorologiche sui massimi giornalieri di ozono a Mendrisio (MEN) e a Castaneda (CAS). Oltre alla variabile “giorno settimanale” (wkd), le quattro grandezze meteorologiche prese in considerazione sono la temperatura (te), l'irraggiamento globale (gr), la velocità del vento (sp) e l'umidità specifica (sh); “a” indica la media mattutina dalle 6:40 fino alle 12:40 CET, “p” la media pomeridiana dalle 12:40 fino alle 18.40 CET. Se il livello di significatività è inferiore a 0.01 questo è marcato nella tabella con una x. I due fattori d'influenza maggiori di ogni mese sono contrassegnati da un tondino.

MEN	asp	psp	ate	pte	agr	pgr	ash	psh	wkd
GEN		⊗				⊗	x		x
FEB					⊗	⊗	x	x	x
MAR				⊗	⊗				
APR				⊗	⊗				
MAG				⊗	x	⊗			
GIU				⊗	⊗				
LUG	x			⊗	⊗	x			x
AGO				⊗	x	⊗			
SET				⊗	⊗				
OTT			x	⊗	⊗				
NOV						o		⊗	x
DIC		x	x			⊗		⊗	

CAS	asp	psp	ate	pte	agr	pgr	ash	psh	wkd
GEN		o			o				
FEB				⊗	⊗				
MAR					⊗			⊗	
APR				⊗					
MAG		o		⊗			x	⊗	
GIU				x			⊗	⊗	
LUG				x	⊗			⊗	
AGO		⊗		⊗		x			
SET		⊗		⊗			x	x	
OTT		⊗	x	⊗					
NOV			o		⊗				
DIC				⊗				o	

In ogni caso i fattori di influenza più rilevanti sono notoriamente (vedi a questo proposito per esempio Bloomfield et al. (1996)) *l'irraggiamento globale mattutino* (agr), la *velocità del vento pomeridiana* (psp), la *temperatura pomeridiana* (pte), *l'irraggiamento globale pomeridiano* (pdr), *l'umidità specifica pomeridiana* (psh) e al *giorno settimanale* (wkd). Con queste 6 variabili è stato impostato, in un primo momento, il seguente modello:

$$O_{3max} = c_1*agr + c_2*psp + c_3*pte + c_4*pgr + c_5*psh + c_6(wkd)$$

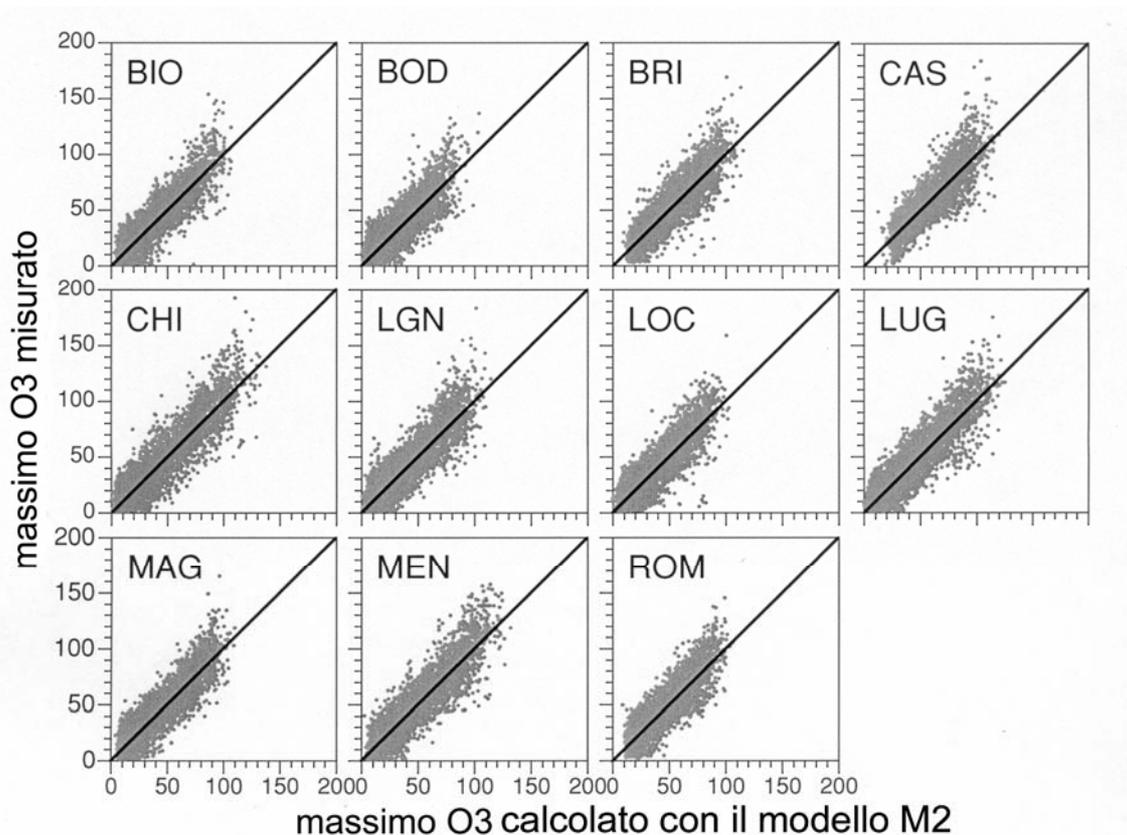
Tuttavia, applicando tale equazione, i coefficienti assumevano talvolta segni inconsueti, che nel caso specifico dell'irraggiamento globale alternavano a seconda del mese. È probabile che ciò non rispecchi la realtà, ma piuttosto una forma di adattamento sproporzionato del modello ad oscillazioni casuali. Inoltre va sottolineato che le diverse grandezze meteorologiche non sono indipendenti tra di loro.

Si è quindi tentato di semplificare tale modello, riducendo gradualmente il numero di variabili, al fine di evitare segni inverosimili. La tabella 4 riassume il grado di conformità medio (media di tutti i valori mensili) dei diversi modelli. Si può notare come il modello completo a sei variabili, rispetto ai modelli semplificati, chiarisca solo poco più della varianza dei massimi giornalieri di ozono.

**Tabella 4 Percentuali della varianza dei massimi di ozono, spiegata dai diversi modelli. Modello M1: temperatura pomeridiana (pte); Modello M2: pte e giorno settimanale (wkd); Modello M3: pte, wkd e irraggiamento globale mattutino (agr); Modello M4: pte, wkd, agr e velocità del vento pomeridiana (psp); Modello M6: pte, wkd, agr, psp e irraggiamento globale pomeridiano (pgr).**

stazione	M1	M2	M3	M4	M6
BIO	78	79	83	83	84
BOD	76	77	79	81	83
BRI	78	78	81	82	84
CAS	74	75	77	78	80
CHI	83	84	86	87	87
LGN	79	80	82	83	84
LOC	80	81	83	84	85
LUG	82	83	86	86	87
MAG	81	82	84	85	86
MEN	81	82	85	86	86
ROM	76	76	81	81	83

Perciò, tra tutti i modelli a disposizione, è stato preferito quello basato sulle due variabili *temperatura pomeridiana* e *giorno settimanale*; esso ha il pregio di precisare quasi lo stesso valore della varianza del modello M6 e soprattutto presenta, per tutte le stazioni di rilevamento e durante tutto l'anno, coefficienti consistenti e plausibili. La qualità dello stesso è rappresentata nei grafici della figura 5, che contrappone i massimi di ozono modellati con quelli misurati. Occorre tuttavia rilevare, che quest'ultimo sottovaluta alcuni valori molto elevati misurati in diverse stazioni di rilevamento.

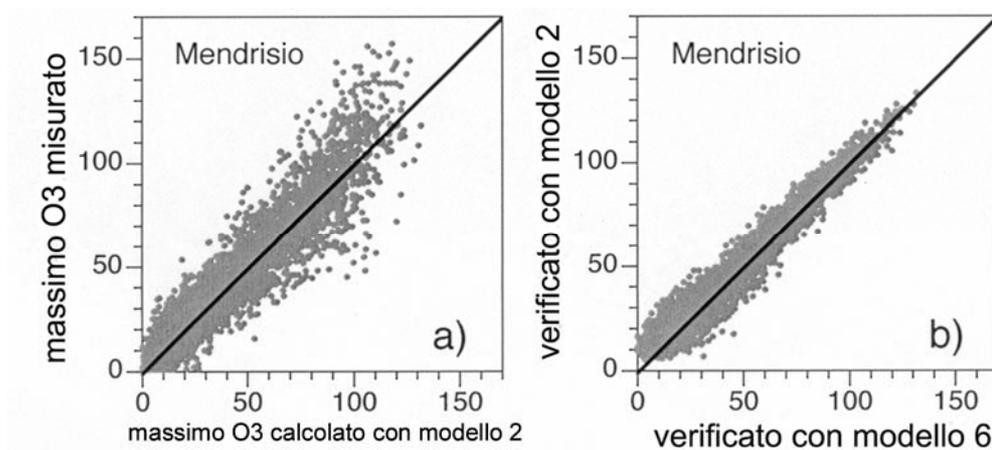


**Figura 5** Massimi giornalieri di ozono misurati in funzione dei massimi di ozono calcolati con il modello M2. La diagonale nera rappresenta un rapporto tra i valori misurati e quelli modellati di 1:1.

Confrontandolo poi con il modello M6 in un grafico equivalente per la stazione di misura di Mendrisio (vedi figura 6, grafico sinistro) non si denota alcuna differenza di rilievo. Questa impressione è confermata dal grafico destro della figura 6, che illustra l'eccellente correlazione ( $r = 0.98$ ,  $r^2 = 0.95$ ) dei due modelli contrapposti.

Per eliminare dai dati gli influssi meteorologici si è infine proceduto come segue:

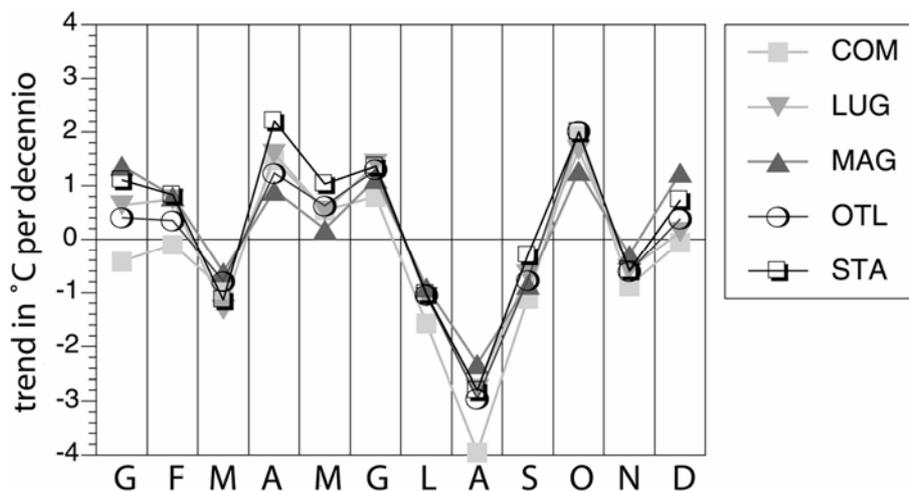
$$\text{conc (corretta)} = \text{media mensile} + (\text{conc (misurata)} - \text{conc (modellata)})$$



**Figura 6 Grafico a sinistra: massimi di ozono misurati in funzione dei massimi di ozono calcolati con il modello M6. Grafico a destra: massimi di ozono calcolati con il modello M2 in funzione di quelli calcolati con il modello M6.**

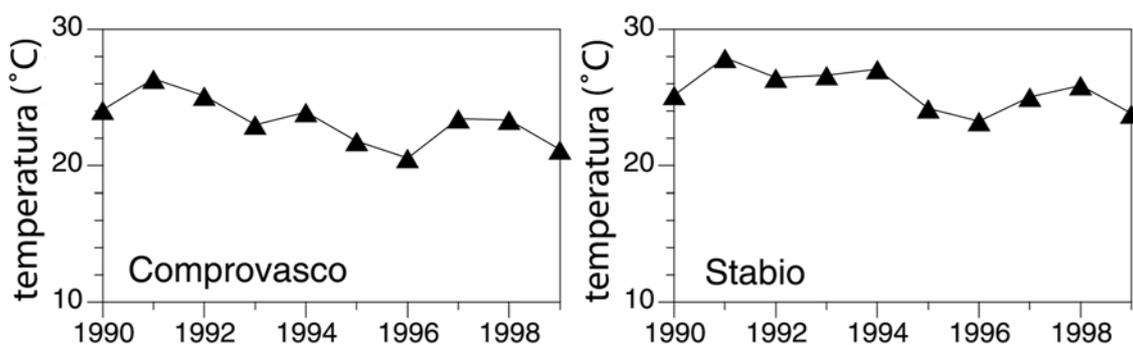
#### 4.4 Trend dei parametri meteorologici

La temperatura pomeridiana è il fattore meteorologico che più influenza le concentrazioni massime giornaliere di ozono. Per stabilire se ed eventualmente come tale grandezza sia variata nel corso del decennio '90 - '99, sono state esaminate le diverse serie delle medie mensili. I relativi trend lineari sono rappresentati nella figura 7.



**Figura 7** Trend lineari delle medie mensili della temperatura pomeridiana per le cinque stazioni ANETZ ticinesi.

Anche se solo per la stazione di Comprovasco il trend è significativamente diverso da zero ( $p < 0.05$ ), le tendenze negative del mese di agosto balzano subito all'occhio. Almeno in parte quindi, i trend decrescenti dei massimi di ozono sono riconducibili a queste tendenze della temperatura. La diminuzione termica maggiore si è avuta nella stazione ANETZ posta più a nord, e cioè quella di Comprovasco. L'andamento di quest'ultima è quasi parallelo a quello della stazione ANETZ (Stabio) sita più a sud (vedi figura 8). Questo dato conferma, che di regola su tutto il territorio ticinese vigono condizioni meteorologiche simili, almeno per quanto riguarda le medie mensili.

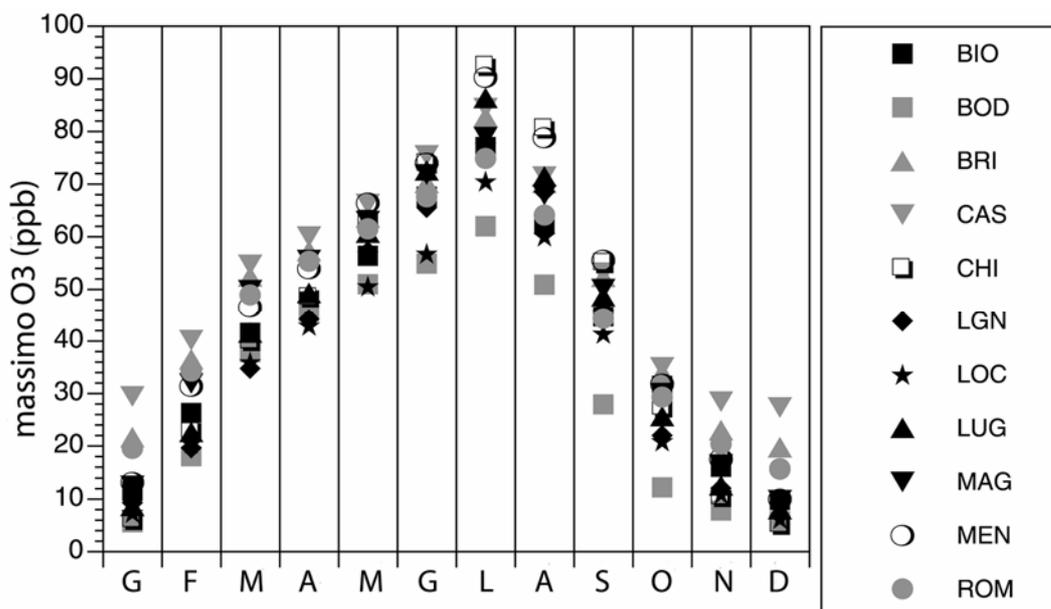


**Figura 8** Andamento della media mensile della temperatura pomeridiana nel mese di agosto a Comprovasco (grafico a sinistra) e a Stabio (grafico a destra), per il decennio '90-'99.

## 5. Medie dei massimi di ozono e valori AOT40

Il valore AOT40 è stato quantificato per tutti quei giorni, in cui le ore con irraggiamento globale sufficiente presentassero anche misurazioni di ozono vevolevoli. Eventuali valori mancanti sono stati calcolati in un secondo tempo con l'ausilio di un'interpolazione (vale a dire con un modello analogamente a come visto nei capitoli precedenti) e poi inseriti nel conteggio delle somme mensili. Tale procedimento è stato impiegato solo quando un mese presentasse almeno 20 giorni di misure valide; altrimenti al mese in questione non è stato assegnato alcun valore.

Per avere una prima idea sull'evoluzione delle concentrazioni di ozono in Ticino e in Mesolcina negli anni '90, sono state calcolate le medie, ripartite per mese, dei massimi giornalieri di O<sub>3</sub> di tale periodo. Gli andamenti annuali medi dei massimi di ozono, rappresentati nella figura 9, sono il risultato di tale procedura.



**Figura 9** Medie dei massimi giornalieri di ozono, suddivise per mese.

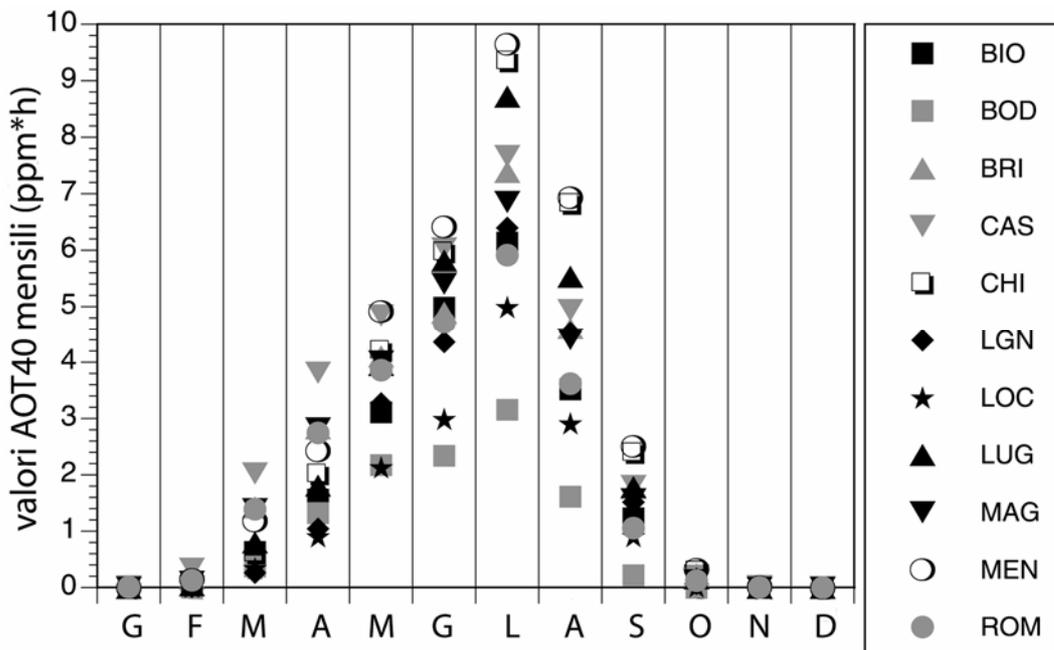
In estate, le quantità più elevate sono registrate nelle stazioni di rilevamento meridionali di Chiasso e Mendrisio, mentre in inverno a Castaneda.

I valori AOT40 hanno un andamento analogo, anche se i divari tra i diversi punti di misura sono maggiori (vedi figura 10). Nella tabella 5 sono stati sommati i valori AOT40 su 2 periodi (maggio-luglio e aprile-settembre) che notoriamente corrispondono alla fase di crescita della piante. Queste grandezze cumulative

sono molto importanti per la valutazione degli effetti dell'ozono sulla vegetazione. In generale si può notare che tendenzialmente i valori diminuiscono da sud verso nord. È comunque interessante evidenziare che Castaneda e Brione, due stazioni di misura poste a settentrione ed in altitudine, presentano dei valori elevati quasi quanto quelli del Sottoceneri.

**Tabella 5 Valori AOT40 medi (in ppm\*h) per i periodi da maggio a luglio (MGL) e da aprile a settembre (AMGLAS).**

stazione	MGL	AMGLAS
BIO	14.1	20.0
BOD	7.7	10.8
BRI	16.4	26.0
CAS	18.6	27.2
CHI	19.3	30.4
LGN	13.9	21.2
LOC	10.1	15.3
LUG	18.5	26.8
MAG	15.8	23.9
MEN	20.3	31.9
ROM	14.5	21.9



**Figura 10 Medie dei valori AOT40 mensili di tutte le stazioni di rilevamento.**

## 6. Trend dei massimi di ozono

### 6.1 Medie mensili

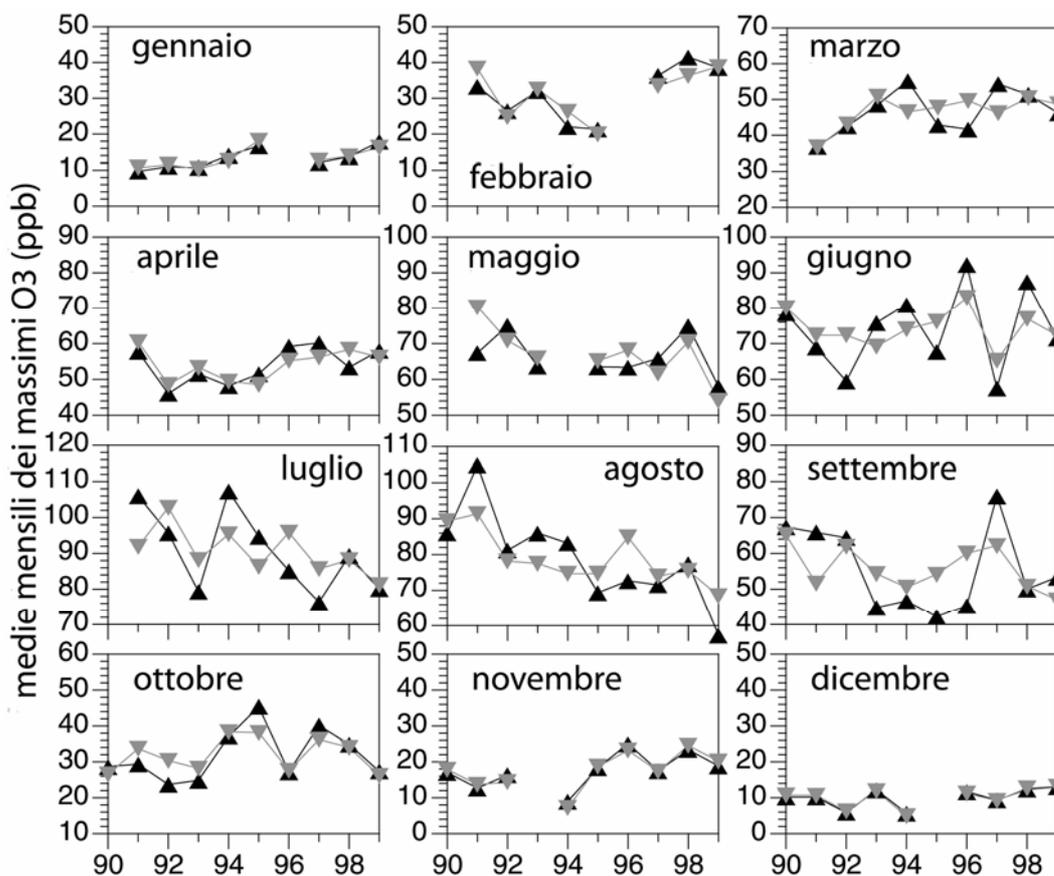
La figura 11 mostra, a mo' d'esempio, l'evoluzione della media mensile dei massimi di ozono negli anni '90 a Mendrisio (i grafici relativi alle altre stazioni si trovano nell'allegato A6.1). Nel borgo sottocenerino le concentrazioni massime pomeridiane nel periodo estivo sono tendenzialmente diminuite. I dati corretti con il modello-meteo M2 risultano poi un po' meno mutevoli di quelli grezzi.

I massimi di ozono sono regrediti maggiormente nel mese di agosto. Come discusso in precedenza questa riduzione può essere in parte spiegata con la variazione di alcuni parametri meteorologici. Infatti la tendenza riscontrata dopo la correzione dagli influssi "meteo" è minore rispetto a quella dei valori misurati.

Da una stima effettuata sulla base dei trend delle temperature pomeridiane tra il 1990 ed il 1999 (i relativi valori si trovano nell'allegato A4.3) risulta che per il mese d'agosto il solo sviluppo termico decrescente è responsabile di una diminuzione dei massimi di ozono pari a 17 ppb/decennio. Questo valore trova un buon riscontro nella differenza tra l'evoluzione dei massimi misurati (-34 ppb/decennio) e quello dei massimi corretti meteorologicamente (pari a -18 ppb/decennio). Questo dato tuttavia non sorprende, visto che la temperatura pomeridiana è, assieme al "giorno settimanale", una delle due variabili del modello M2.

Al contrario, nei periodi invernali dal 1990 al 1999, i massimi di ozono, sempre a Mendrisio, sono aumentati. Tra novembre ed aprile si sono osservati aumenti tra 3.7 e 14.2 ppb/decennio, rispettivamente tra 4 e 10.7 ppb/decennio dopo la correzione "meteorologica".

Nella figura 12 sono rappresentati sommariamente i trend di tutte le stazioni. I valori numerici di questi grafici possono essere ritrovati nelle tabelle A2 e A3 dell'allegato A6.1. La figura permette di constatare inoltre che quanto osservato per Mendrisio vale sostanzialmente anche per tutte le altre stazioni di misura: in luglio ed agosto gli sviluppi dei massimi di ozono misurati sono negativi, tra ottobre e gennaio per contro positivi.

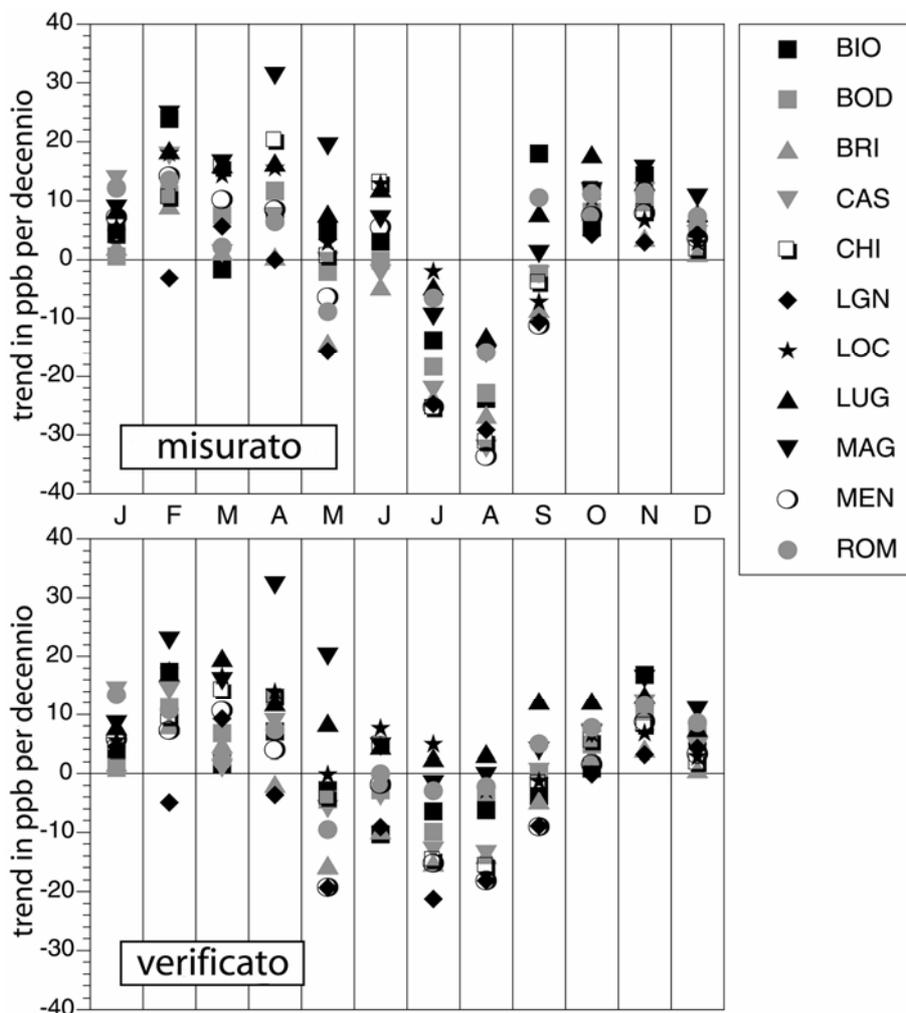


**Figura 11** Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Mendrisio nel periodo dal 1990 al 1999. I triangoli neri rappresentano i dati non corretti mentre i triangoli grigi quelli corretti con il modello-meteo 2 (temperatura pomeridiana e giorno settimanale).

I trend più negativi, con riduzioni di almeno 25 ppb/decennio per le misure non corrette, sono stati rilevati nei punti di misura di Mendrisio, Chiasso, Lugano, Brione e Castaneda. Le prime tre stazioni si trovano nel Sottoceneri, mentre le altre due sono quelle del Sopraceneri poste in altitudine. Il perché di queste analogie è approfondito nel capitolo 9.2. I trend decrescenti delle sopraccitate stazioni sono meno marcati nei dati corretti, ma comunque superiori a -10 ppb/decennio. Le altre stazioni di misura del Sopraceneri presentano invece nel periodo estivo trend decrescenti molto piccoli, se non addirittura parzialmente positivi.

Una particolarità, che merita di essere menzionata, è stata riscontrata a Lugano, dove le due stazioni di rilevamento locali hanno fatto registrare delle tendenze marcatamente differenti. Tale divario potrebbe essere spiegato con

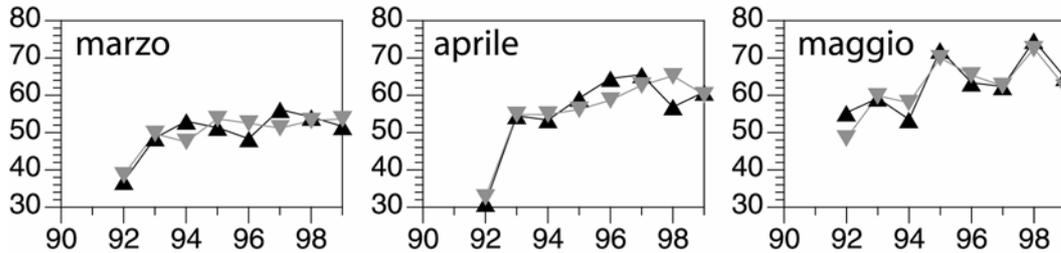
una modifica delle emissioni durante il periodo considerato. Anche gli interventi edili svolti nelle vicinanze di uno dei due punti potrebbero essere all'origine di tale differenza. In città, infatti, i processi micro-meteorologici giocano spesso un ruolo importante sulla situazione delle immissioni.



**Figura 12** Trend lineari delle medie mensili dei massimi di ozono giornalieri per i dati misurati (grafico sopra) e per quelli corretti con l'aiuto del modello M2 (grafico sotto). I valori numerici sono elencati nelle tabelle A2 e A3 dell'allegato 6.1.

In inverno i trend sono spesso significativamente positivi, anche dopo le correzioni dagli influssi meteorologici. Quelli più positivi sono stati osservati a Lugano e Locarno, dove comunque le emissioni sono molto consistenti, e sorprendentemente a Magadino. Nelle vicinanze di questa località tuttavia si sono susseguiti negli anni '90 parecchi cantieri stradali (per esempio sul tratto di

strada Locarno-Bellinzona). Nella figura 13 si può a questo proposito notare, che per lo meno nei mesi di marzo ed aprile dell'anno 1992 i valori di ozono sono stati ancora chiaramente inferiori rispetto a quelli degli anni successivi.

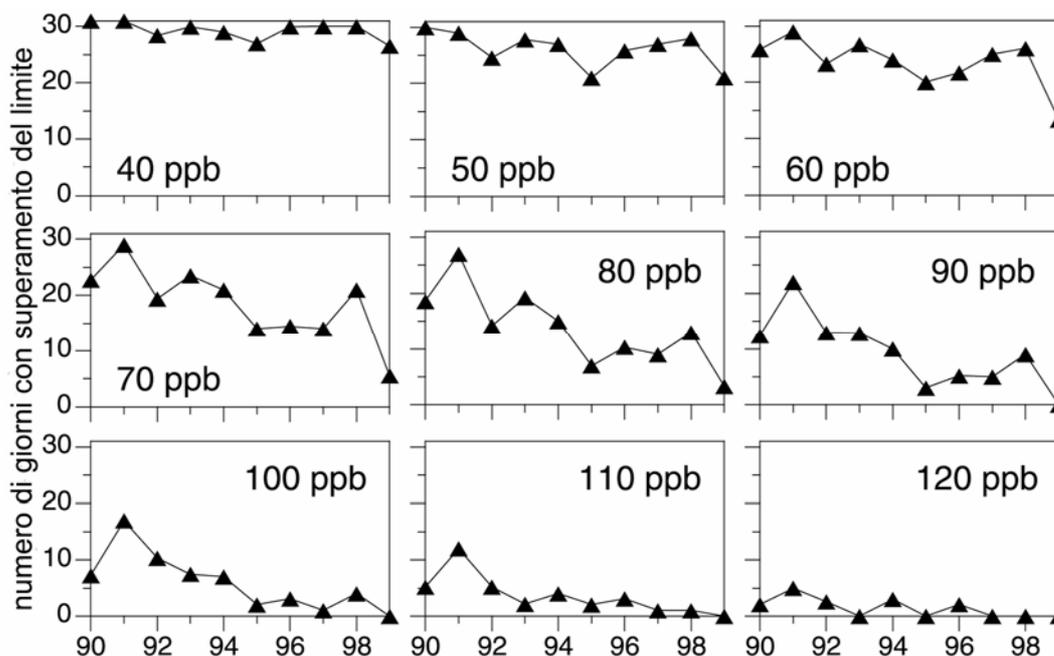


**Figura 13** Media mensile dei massimi giornalieri di ozono di marzo, aprile e maggio a Magadino per il decennio 1990-1999.

## 6.2 Superamenti del limite

Oltre all'evoluzione dei massimi di ozono discussa nel capitolo 6.1, questo capitolo tratta pure le tendenze della frequenza con cui una determinata concentrazione di  $O_3$  è stata superata. I diagrammi della figura 14 mostrano ad esempio il numero di giorni nel mese d'agosto in cui sono state oltrepassate specifiche concentrazioni-soglia (comprese tra 40 e 120 ppb) a Mendrisio nel corso dell'ultimo decennio. V'è da notare che 60 ppb corrispondono a circa  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , limite orario fissato dalla legge svizzera che ne permette inoltre un solo superamento all'anno.

Le giornate con misure non valide non sono state prese in considerazione. Per i mesi incompleti, il numero di superamenti totale è stato comunque calcolato in modo proporzionale a partire dai dati dei giorni valevoli. Il numero di superamenti annui è stato poi calcolato sommando le grandezze mensili.



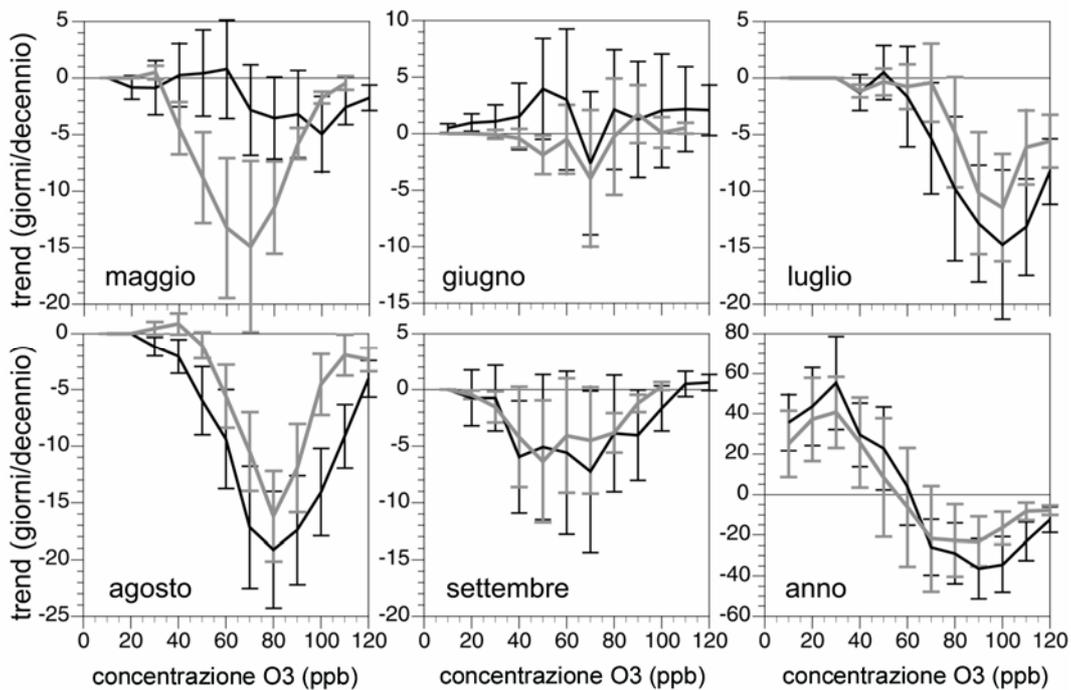
**Figura 14** Numero di giorni in cui un dato valore limite è stato superato in agosto, a Mendrisio.

Dalla figura 14 si può inoltre constatare che il limite di 40 ppb è stato superato praticamente ogni giorno e che il numero di superamenti negli anni '90, per le soglie comprese tra 70 e 90 ppb, è chiaramente regredito. Per esempio, all'inizio del decennio, in più di 10 giorni all'anno sono stati superati i 90 ppb, mentre alla fine dello stesso solo in circa 5 giornate. Gli episodi con concentrazioni sopra i 100 ppb poi sono divenuti sporadici. Tuttavia il limite di un solo superamento annuo di  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (circa 60 ppb) concesso dalla legislazione svizzera è tuttora ampiamente oltrepassato.

I diagrammi della figura 15 illustrano i trend del numero di superamenti giornalieri di specifici valori-soglia nei singoli mesi estivi (da maggio a settembre) e sommariamente in tutto l'anno a Mendrisio per il decennio '90-'99. Le riduzioni maggiori (più di 10 giorni per decennio) si sono verificate per le concentrazioni-limite tra 80 e 100 ppb.

Le differenze di tendenza tra i diversi mesi sono notevoli. Il mese di maggio presenta grandi disuguaglianze tra i dati corretti meteorologicamente e quelli misurati. Quello di giugno invece, come già nel caso dei massimi di ozono, evidenzia ampie oscillazioni dei valori tra un anno e l'altro, che non svaniscono neanche dopo la correzione dagli influssi meteo, non permettendo quindi di

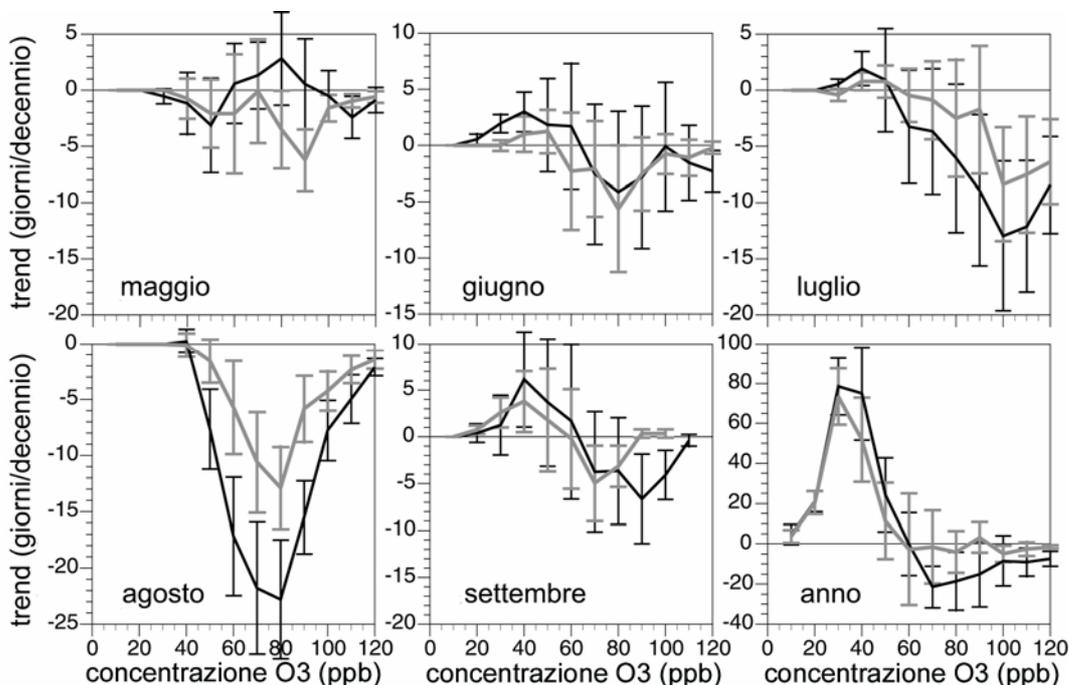
definire certezza alcun trend. Per luglio ed agosto invece gli sviluppi negativi sono molto chiari. Nel mese di settembre, per concludere, si osservano diminuzioni di circa 5 giorni/decennio per le concentrazioni comprese tra 40 ed 80 ppb. Nell'ultimo decennio c'è stata una regressione di 20-40 giorni all'anno per le concentrazioni sopra i 70-100 ppb. Ciò nonostante si è verificato un aumento netto pari a 20-30 giorni/anno per i valori tra 20 e 50 ppb. Va inoltre sottolineato che sempre negli anni '90 il numero di giorni nell'arco di un anno in cui sono stati oltrepassati i 60 ppb è rimasto praticamente immutato.



**Figura 15** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Mendrisio. In grigio sono rappresentati i dati corretti dagli influssi meteorologici.

Un ulteriore esempio è riportato dalla figura 16, dove, analogamente alla figura 15, sono rappresentati i trend del numero di superamenti di limiti specifici per la stazione di rilevamento di Castaneda in Mesolcina. In generale si può affermare che tali tendenze sono simili a quelle di Mendrisio, anche se quelle negative risultano un po' meno evidenti. Pure in questo caso, durante tutto l'anno, la soglia di 60 ppb (che come già più volte ricordato corrisponde pressappoco al limite orario svizzero) divide i trend negativi da quelli positivi. Inoltre nel periodo

considerato e per tutte e due le stazioni di misura la frequenza di giorni con superamento di tale soglia non si è praticamente modificata (come già visto sopra).



**Figura 16** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Castaneda. In grigio sono rappresentati i dati corretti dagli influssi meteorologici.

## 7. Trend dei massimi di $O_x$

In ogni analisi sull'ozono è di grande utilità considerare gli influssi delle emissioni di monossido di azoto sulle concentrazioni di  $O_3$ . Localmente infatti la reazione dell' $NO$  con l'ozono a formare diossido di azoto (vedi schema sotto) riveste un'importanza notevole.



Tuttavia durante il giorno l' $NO_2$  si scompone fotochimicamente di nuovo in  $NO$  e  $O_3$ , e tra i tre tipi di molecole s'instaura una sorta di equilibrio. Quindi la titolazione di ozono da parte del monossido di azoto è per lo più temporanea e

locale, e lontano dalle fonti di NO l'O<sub>3</sub> tende a riformarsi. Per questo motivo, spesso, invece dell'ozono viene esaminato l'O<sub>x</sub> (vedi schema sotto), che chiaramente non è influenzato dalla reazione locale dell'O<sub>3</sub> con il monossido di azoto.



L'analisi di O<sub>x</sub> permette di accertare se le fonti d'emissioni locali influiscano o meno sui trend delle concentrazioni di ozono. Ad esempio se le quantità di O<sub>3</sub> presentano una tendenza positiva mentre quelle di O<sub>x</sub> no, significa che molto probabilmente sono le emissioni locali di NO (e con esse le concentrazioni di diossido di azoto) ad avere subito delle variazioni, e non quelle primarie di O<sub>3</sub>. I valori di O<sub>x</sub> infatti, al contrario dell'ozono, rispecchiano la situazione dell'inquinamento a livello regionale. A completamento di quanto detto nell'introduzione bisogna infine ricordare che le apparecchiature usate convenzionalmente per la misura di NO e NO<sub>x</sub> non sono ottimali per determinare le concentrazioni di diossido di azoto, il che limita notevolmente tale metodo. I convertitori in acciaio e molibdeno normalmente usati per le misure rilevano infatti anche PAN (perossi acetil nitrato) e altri prodotti di ossidazione. Tuttavia queste sostanze giocano un ruolo marginale, perlomeno in regioni cittadine e in prossimità di fonti di emissione.

Nella figura 17 sono rappresentati sommariamente i trend dei massimi giornalieri di O<sub>x</sub> per tutte quelle stazioni in cui sono stati misurati contemporaneamente sia ozono che diossido di azoto. Paragonandola alla figura 12 (trend dei massimi di ozono) si può notare che non esistono grandi differenze nell'evoluzione negativa dei rispettivi mesi estivi. Le tendenze dei massimi di O<sub>x</sub> nei mesi invernali invece (quelle dei massimi di O<sub>3</sub> erano in parte molto positive) sono generalmente e chiaramente più piccole e hanno pure spesso cambiato di segno. Soprattutto i dati corretti meteorologicamente presentano nei mesi invernali dei trend negativi. Questo significa che l'evoluzione positiva dei massimi di ozono in inverno è da imputare principalmente ad una diminuzione nel tempo delle emissioni locali e regionali di monossido di azoto, piuttosto che ad una avvenuta maggior produzione di O<sub>x</sub>

( $O_3$  e  $NO_2$ ). In altre parole la tendenza positiva dei massimi di ozono negli inverni del decennio 1990-1999 è da ricondurre ad un trend negativo delle emissioni di  $NO$  piuttosto che ad un'evoluzione positiva della produzione primaria di  $O_3$ .

Infine questa grande variabilità può essere attribuita in una certa misura al sopraccitato problema analitico nella misurazione di  $NO_2$ , e in parte alle emissioni dirette di diossido di azoto (tipicamente 5% delle emissioni totali di  $NO_x$ ) che in vicinanza di strade trafficate possono causare fluttuazioni locali delle concentrazioni di  $O_x$ .

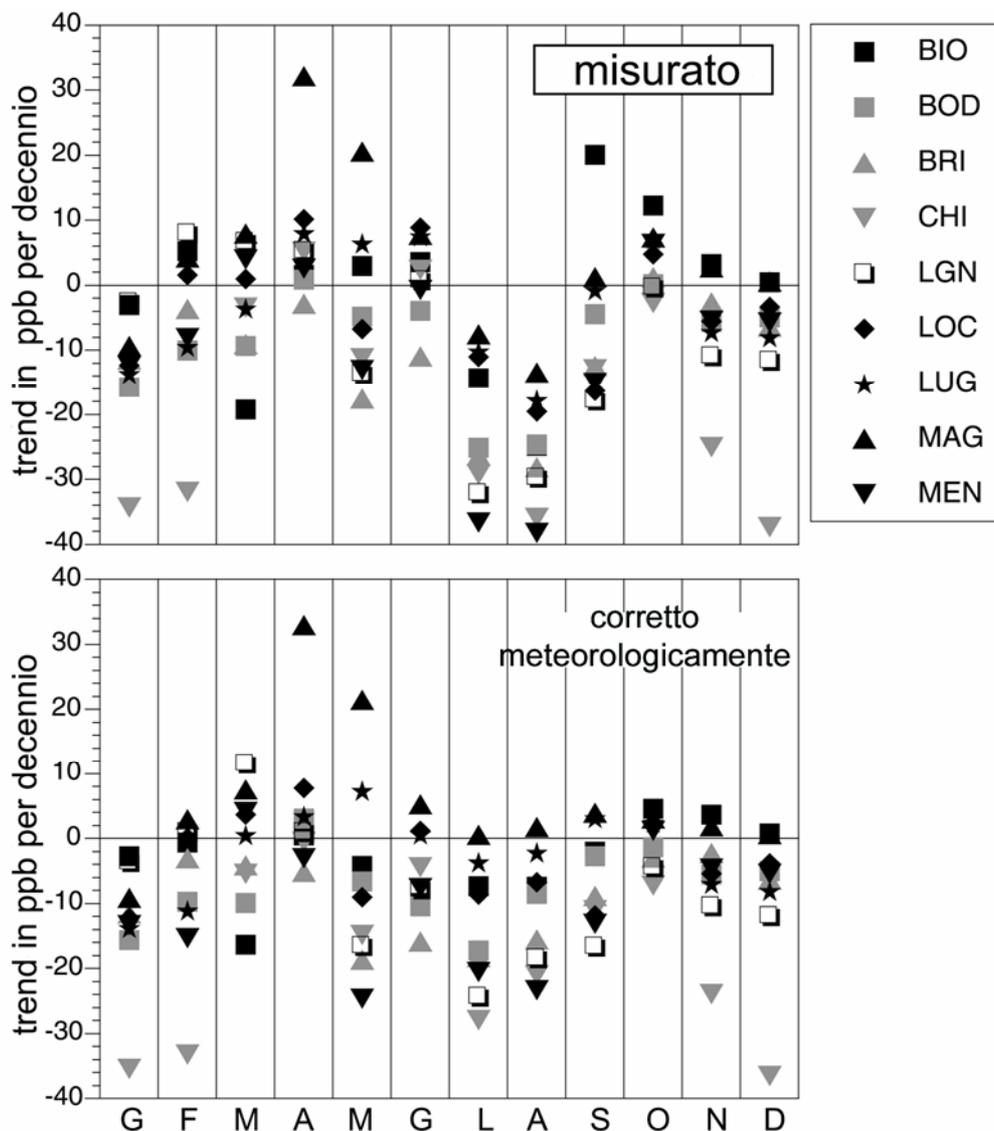


Figura 17 Trend lineari delle medie mensili dei massimi giornalieri di  $O_x$  per i dati misurati (grafico sopra) e per quelli corretti meteorologicamente con l'aiuto del

**modello M2 (grafico sotto). I valori numerici sono elencati nelle tabelle A4 e A5 nell'allegato 7.**

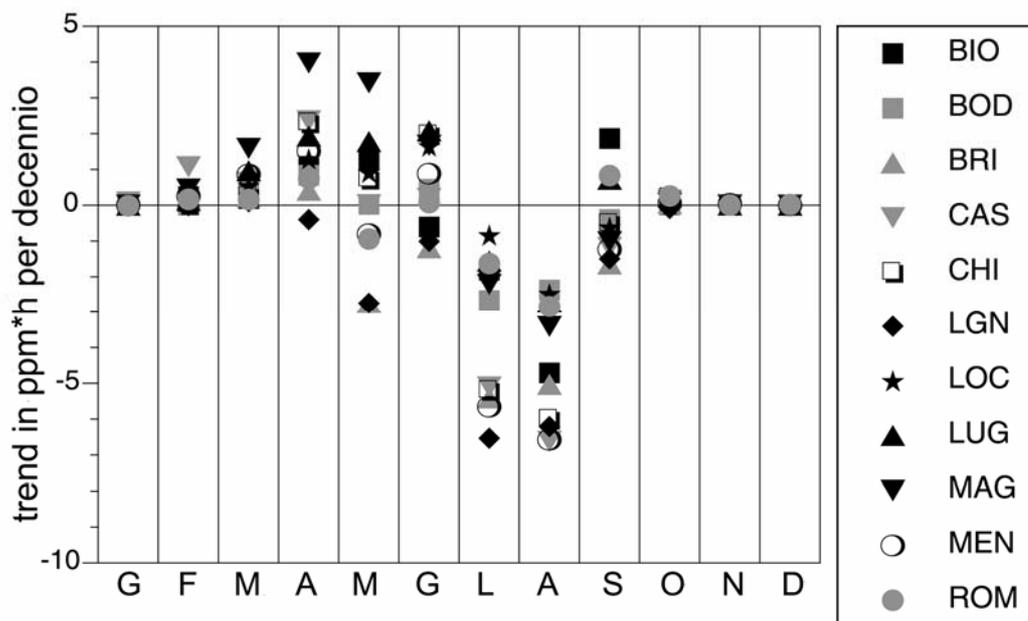
## 8. Trend dei valori AOT40

### 8.1 Somme mensili

Gli effetti dell'ozono sugli esseri viventi sono definiti e classificati secondo il principio delle dosi cumulate, e non su quello delle concentrazioni massime. In questo studio sono stati perciò presi in considerazione anche i valori AOT40. I grafici della figura 18 ne mostrano sommariamente i trend mensili per tutte le stazioni di rilevamento. I valori numerici sono elencati nella tabella A6 dell'allegato 8.

Evidenti tendenze negative sono state osservate in luglio ed in agosto. I punti di misura di Chiasso, Mendrisio e Lugano (Sottoceneri) e quelli posti in altitudine di Brione e Castaneda (Sopraceneri e Mesolcina) presentano trend chiaramente più negativi rispetto alle altre stazioni. Infatti tutte queste risentono fortemente degli influssi delle emissioni della Pianura padana e quindi anche delle loro variazioni. Nel Nord Italia, in particolare negli anni '90, sempre più persone hanno installato sulla loro vettura il catalizzatore, modificando così radicalmente il quadro globale dell'inquinamento. Questa situazione verrà comunque ulteriormente approfondita nella sezione 9.2.

Le tendenze negative di luglio e di agosto registrate dalle suddette stazioni, e pari a 5 ppm\*h per decennio, sono notevoli, considerando che i valori AOT40 per il periodo maggio-luglio ammontano a circa 16-20 ppm\*h (vedi tabella 5 nel capitolo 5). Questo significa che in questi due mesi i valori AOT40 sono calati, il più delle volte, di oltre il 50%.



**Figura 18 Trend dei valori AOT40 mensili.**

I trend degli altri mesi sono invece molto inferiori. A questo proposito c'è da dire che i 40 ppb non sono stati superati sovente in maniera significativa. Tuttavia non va dimenticato che le riduzioni delle concentrazioni di ozono sono in parte "mascherate" dalla sua minor degradazione locale da parte dell'NO (vedi a questo proposito anche quanto discusso nel capitolo 7).

Nei mesi iniziali dell'anno sono stati riscontrati trend molto positivi anche a Magadino, il che però è da ricondurre a particolari e transitorie modifiche delle emissioni nella regione, già discusse al capitolo 6.1.

## 8.2 Somme stagionali

È possibile considerare il periodo vegetativo di un intero anno, sommando i valori AOT40 dei diversi mesi estivi (= valori AOT40 stagionali). La figura 19 rappresenta il loro sviluppo (in ppm\*h) per il periodo da maggio a luglio, e per il periodo da aprile a settembre del decennio 1990-1999.

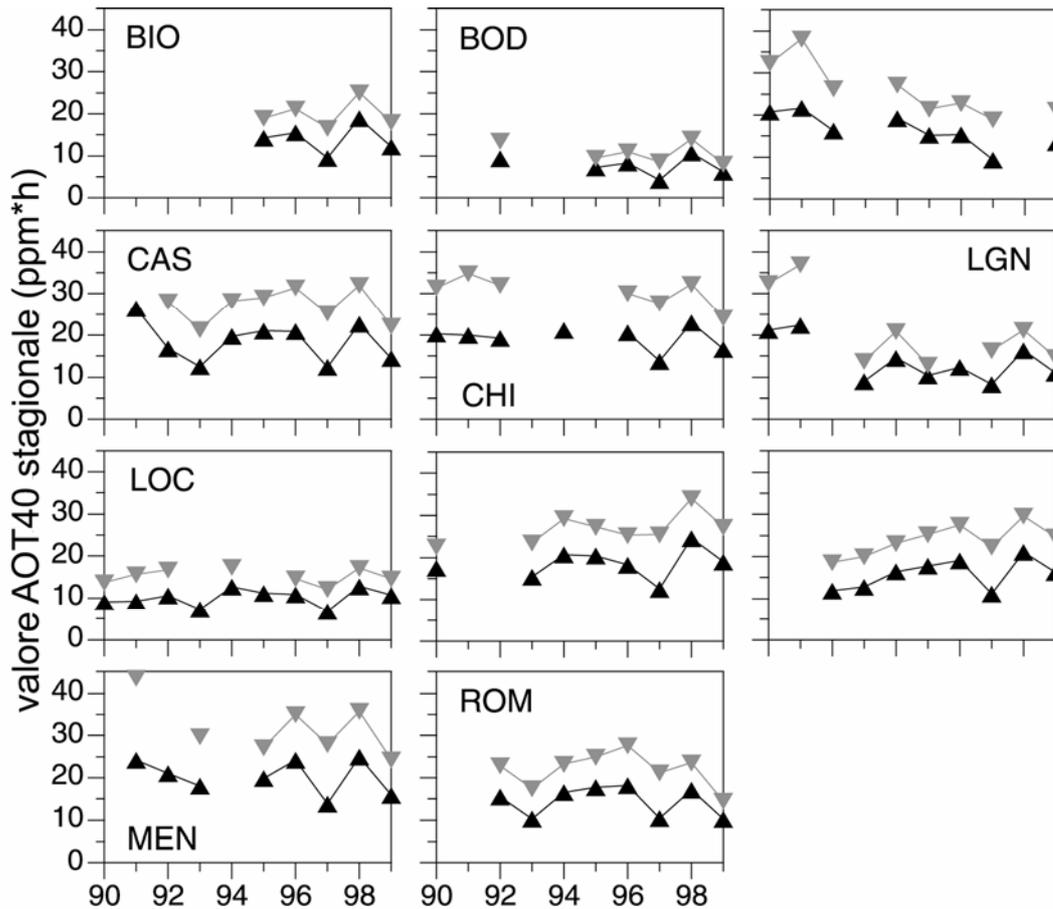


Figura 19 Evoluzione dei valori AOT40 stagionali per il periodo da maggio a luglio (in nero) e per quello da aprile a settembre (in grigio), nel decennio 1990-1999.

La figura 20 invece illustra i trend dei due suddetti periodi per tutte le stazioni di misura (in  $\text{ppm}\cdot\text{h}/\text{decennio}$ ). Complessivamente tali tendenze sono poco significative. Inoltre alcuni valori mancano a causa dell'insufficienza di dati. Le stazioni di misura con trend molto decrescenti nei mesi luglio ed agosto hanno denotato tendenze negative anche per le somme stagionali.

La stazione di Lugano, infine, ha evidenziato uno scarto palese tra i valori dei primi due anni e quelli degli ultimi due. Tuttavia il trend di questa stazione, come già sottolineato al punto 6.1, è molto probabilmente falsato dalle modifiche di varia natura verificatesi nei suoi paraggi.

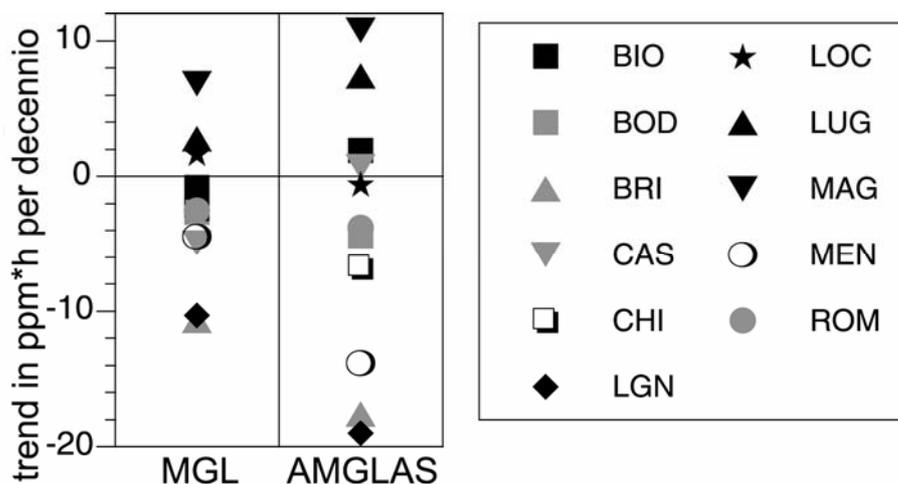


Figura 20 Trend dei valori AOT40 stagionali per il periodo da maggio a luglio (MGL) e per quello da aprile a settembre (AMGLAS).

## 9. Indagine sull'influenza della Pianura padana

Oltre alle varie tendenze riguardanti l'ozono, in questo studio si è cercato di quantificare l'influsso che il carico inquinante della Pianura padana, ed in particolare quello dell'Interland milanese, ha sulle concentrazioni di  $O_3$  registrate al Sud delle Alpi. Studi in passato hanno riscontrato che veri e propri "fronti di ozono" di origine italiana raggiungono spesso la Svizzera meridionale (BUWAL, 1994 e Prévôt et al., 1997). Essi hanno inoltre dimostrato che gli elevati tassi di ozono registrati in Ticino e in Mesolcina durante questi episodi sono determinati dalle notevoli emissioni di Milano e dintorni.

Uno degli obiettivi di questo studio era quello di elaborare un modello atmosferico e meteorologico che chiarisse come le sopraccitate emissioni influenzano la formazione di  $O_3$  a Sud delle Alpi. I dettagli di tale procedura sono esposti nel capitolo 9.1. Non è stato tuttavia possibile definire alcun criterio oggettivo che permetta di stabilire con certezza la provenienza dei "fronti di ozono". Le sezioni 9.2, 9.3 e 9.4 presentano i risultati parziali di indagini tuttora in corso riguardanti in particolare i massimi di ozono nel Sopraceneri e in Mesolcina, la produzione locale di ozono in Svizzera italiana e l'influsso del Ferragosto "italiano" sulle concentrazioni di ozono a Meridione delle Alpi.

## **9.1 Influsso dei fronti d'aria inquinata („Plume“) della regione di Milano**

Come noto da studi precedenti l'avvezione di masse d'aria dalla zona di Milano determina notevoli e repentini aumenti delle concentrazioni di ozono a Sud delle Alpi. Nella figura 21 sono stati evidenziati i giorni per i quali a Mendrisio la differenza tra la concentrazione di  $O_3$  misurata a mezzogiorno e quella massima pomeridiana era superiore a 40 ppb. Durante tali giornate si verifica un aumento notevole dei tassi in breve tempo, il che non può essere evidentemente determinato solo dalla produzione locale. Questo fenomeno è da ricondurre piuttosto ad un afflusso di masse d'aria dalla regione del capoluogo lombardo contenenti sostanze fotochimicamente attive. Alcuni esempi di andamenti tipici in questi particolari giorni sono illustrati nella figura 22.

A parità di temperatura, e di condizioni meteorologiche quindi, le concentrazioni di ozono riscontrate in tali giornate sono di gran lunga superiori a quelle degli altri giorni. Con temperature al di sopra di 25 °C possono raggiungere i 121 ppb, nelle giornate con vento da nord si assestano sui 52 ppb e altrimenti s'aggirano attorno ai 95 ppb.

La quantità degli inquinanti trasportati è legata alla loro provenienza e questo incide indirettamente sulla formazione di  $O_3$  a Sud delle Alpi. La frequenza di giorni caratterizzati da un aumento pomeridiano di ozono superiore a 40 ppb è rappresentata nella figura 23. Essa ammonta in un anno mediamente al 4%, con delle punte tra giugno ed agosto. In luglio infatti si verifica un giorno-plume ogni cinque circa. Tuttavia la soglia di 40 ppb è stata scelta arbitrariamente e questo metodo non può quindi garantire una chiara ed obiettiva distinzione tra giorni-plume (cioè con influenze "milanesi") e non.

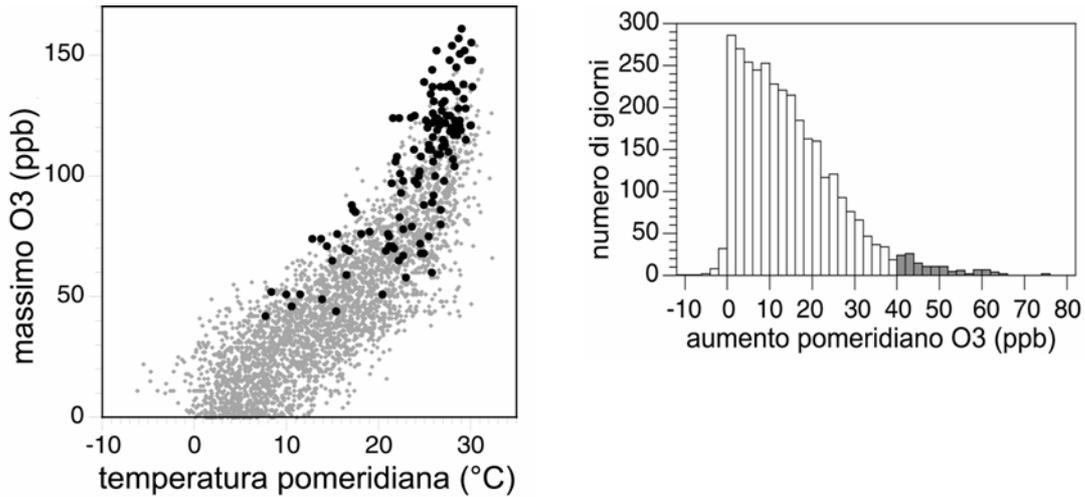


Figura 21 **Grafico a sinistra:** massimo giornaliero di ozono in funzione della temperatura pomeridiana a Mendrisio. I valori dei giorni in cui la differenza tra la concentrazione massima giornaliera (nel pomeriggio) e quella misurata a mezzogiorno è superiore a 40 ppb sono evidenziati in nero. **Grafico a destra:** distribuzione della frequenza delle suddette differenze; segnate in grigio le differenze maggiori a 40 ppb.

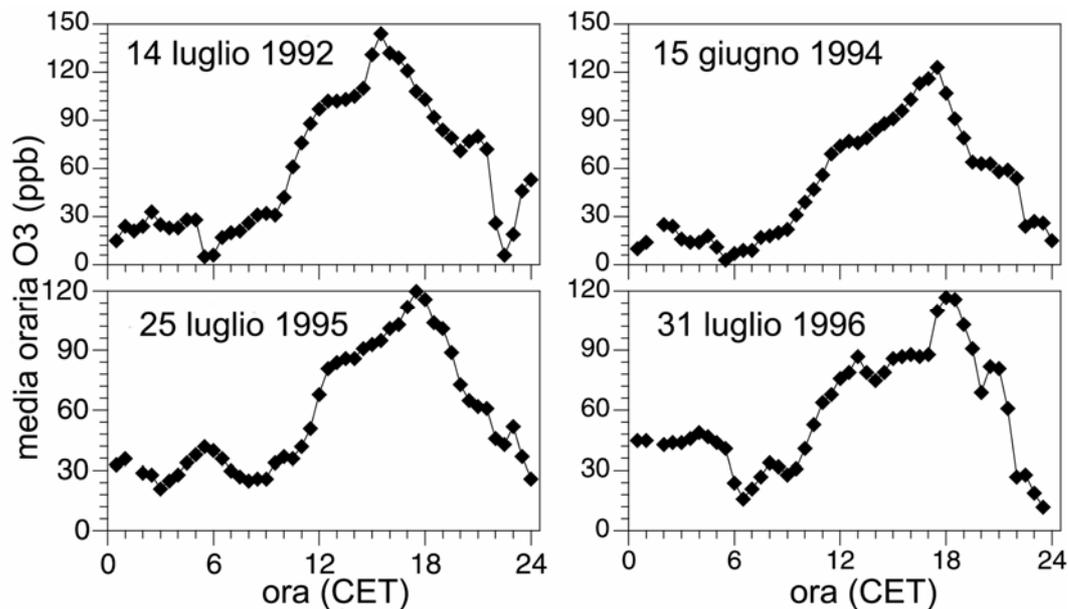
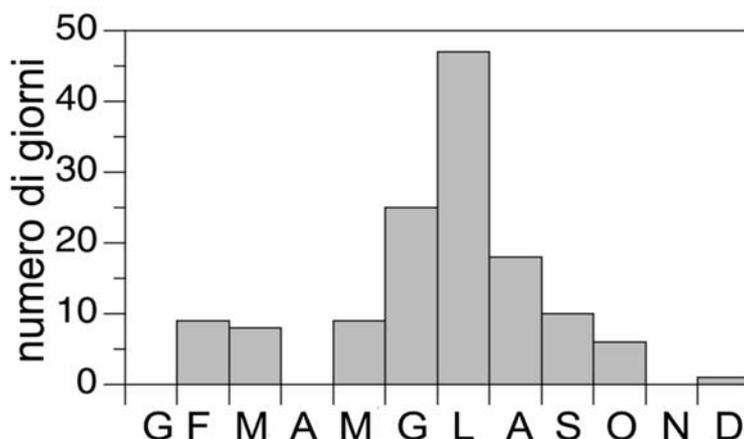


Figura 22 Andamenti giornalieri tipici della concentrazione di ozono nelle giornate, in cui la stessa, dopo mezzogiorno, è aumentata di almeno 40 ppb, a Mendrisio.

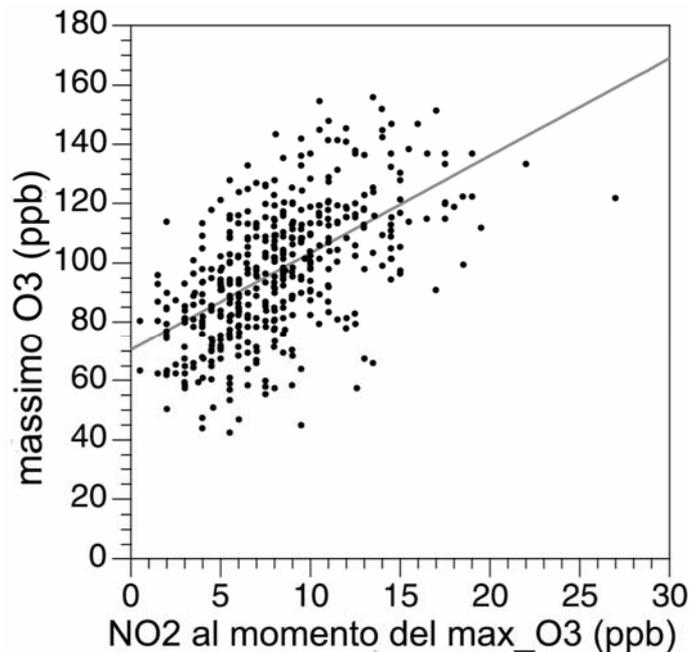


**Figura 23** Distribuzione della frequenza mensile dei cosiddetti “giorni-plume-milanesi”.

Per potere distinguere i cosiddetti “giorni-plume-milanesi”, sono state analizzate le caratteristiche del vento al suolo in territorio svizzero-meridionale e in quello lombardo. Come supposto, durante i giorni con elevate concentrazioni di ozono il vento al suolo spirava a Meridione delle Alpi principalmente da sud, con una variabilità tale tuttavia da impedire una distinzione chiara ed obiettiva dei giorni-plume-milanesi. Una procedura simile è già stata applicata con più successo nell’ambito del progetto LOOP. I “dati-windprofiler” della stazione di Verzago (comune nelle vicinanze di Milano) hanno permesso una valutazione delle caratteristiche dei venti per tutta la zona di confine (Neftel et al., 2002).

Infine si è tentato di stabilire se la misurazione della concentrazione di alcune sostanze inquinanti primarie a Sud delle Alpi potesse in qualche modo chiarirne l’origine (Milano-Città oppure Interland milanese). A questo scopo sono stati analizzati i dati pomeridiani di diossido di azoto rilevati in concomitanza con il massimo di ozono. Infatti in questo momento della giornata i valori di  $\text{NO}_2$  non sono influenzati solo dalle emissioni locali (come al mattino e di notte), ma anche da quelle della Pianura padana. Come visto nei capitoli precedenti, comunque, il rilevamento dell’ $\text{NO}_2$  può essere in parte falsato dal principio di misura delle apparecchiature impiegate abitualmente nelle stazioni. Infatti queste, oltre agli ossidi di azoto, rilevano anche altre sostanze, tra cui, per esempio, il perossi acetil nitrato. La figura 24 rappresenta la correlazione tra le concentrazioni di diossido di azoto ed i massimi di ozono. Generalmente

all'aumento delle quantità di  $\text{NO}_2$  corrisponde un incremento graduale delle concentrazioni massime di  $\text{O}_3$ . Rimanendo tale rapporto simile per tutto l'intervallo di misura non è stato quindi possibile neanche in questo caso precisare in modo inconfutabile la provenienza delle masse d'aria e di conseguenza neanche di differenziare i giorni-plume-milanesi dalle altre giornate.

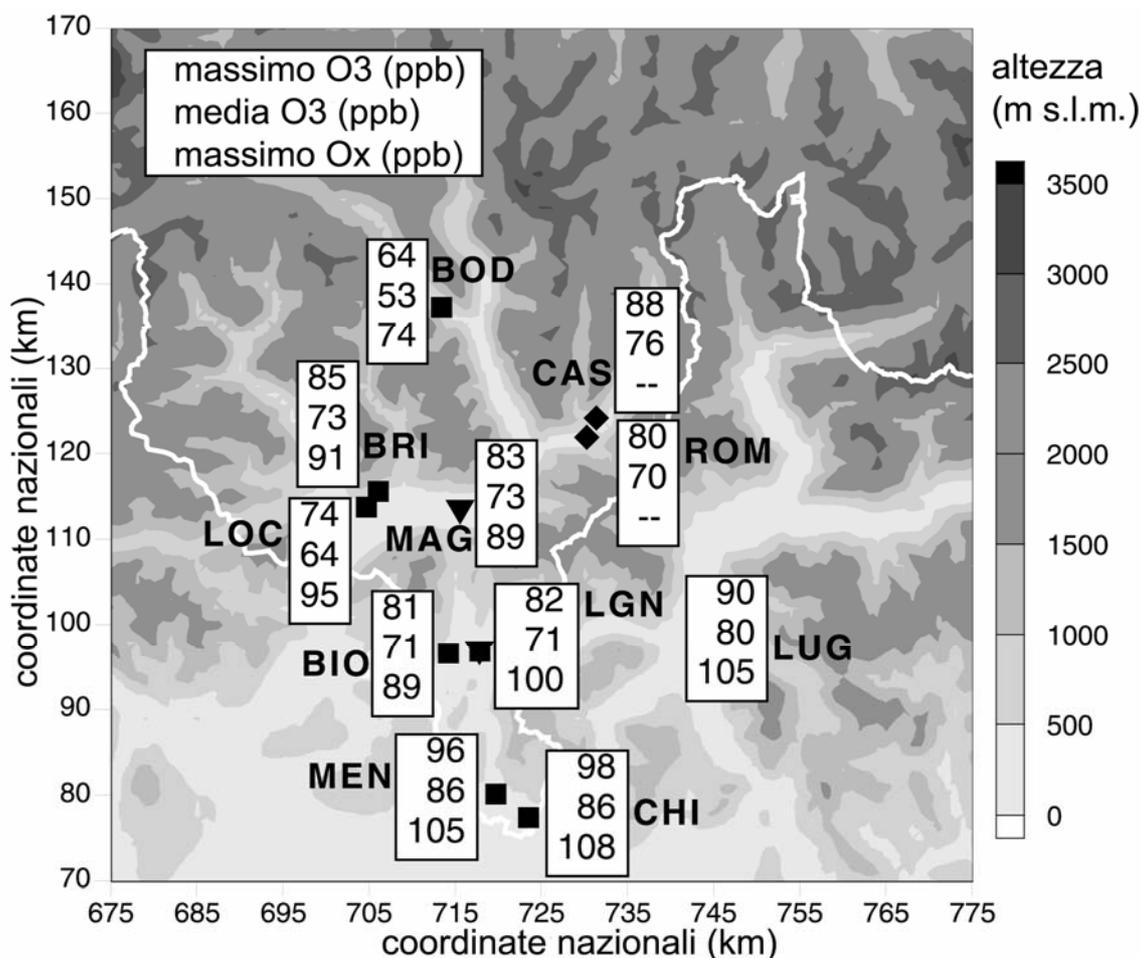


**Figura 24** Concentrazione massima di  $\text{O}_3$  in funzione della concentrazione di diossido di azoto (rilevata in concomitanza del massimo di ozono), a Mendrisio.

## 9.2 I massimi di ozono nel Sopraceneri e in Mesolcina

Durante la valutazione dei dati si è constatato che nelle stazioni in altitudine del Sopraceneri, Brione e Castaneda, sono state registrate per diverse giornate concentrazioni maggiori che in quelle di pianura, e cioè Locarno, Magadino e Roveredo. La figura 25 rappresenta le medie dei massimi di ozono, le concentrazioni pomeridiane medie di  $\text{O}_3$  e le medie dei massimi di  $\text{O}_x$  di tutte le stazioni di rilevamento al Sud della Svizzera. Visto che a Castaneda e Roveredo il diossido di azoto e l'ozono non sono misurati nello stesso luogo, i valori di  $\text{O}_x$  di queste due postazioni mancano. Come già spiegato in precedenza, tali grandezze (somma delle quantità di ozono e di diossido di azoto) permettono un confronto più dettagliato tra le diverse regioni per quel

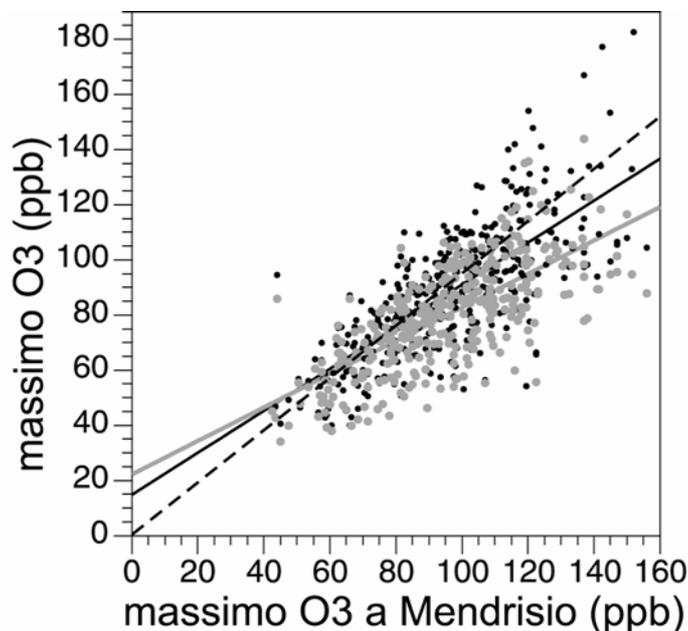
che attiene l'ozono e le sue problematiche. Infatti queste, al contrario delle concentrazioni di  $O_3$ , non subiscono le influenze delle emissioni locali di  $NO_2$ . Ad esempio i quantitativi di  $O_x$  a Lugano sono chiaramente superiori a quelli di Magadino, mentre le concentrazioni di ozono delle due località non si differenziano di molto. Il confronto tra Brione e Locarno denota addirittura un'inversione di tendenza tra le concentrazioni di  $O_x$  rispetto a quelle di  $O_3$ .



**Figura 25** Media dei massimi giornalieri di ozono, della media pomeridiana di ozono e dei massimi giornalieri di  $O_x$  su tutto il periodo di osservazione e di tutte le stazioni di rilevamento.

In generale si osserva per le diverse grandezze riguardanti l'ozono un manifesto gradiente sud-nord (dalle regioni del Sottoceneri, passando dal Sopraceneri ed in Mesolcina, fino a Bodio in Leventina). Le concentrazioni di Bodio sono poi sorprendentemente basse, anche se in questo caso i processi di diluizione verticale che caratterizzano questa regione giocano un ruolo

importante. Questi ultimi sono attualmente studiati dal Paul Scherrer Institut nell'ambito del progetto CHAPOP (Characterization of High Alpine Pollution Plumes).



**Figura 26** Massimo di ozono a Castaneda (in nero) e a Roveredo (in grigio) in funzione di quello a Mendrisio.

La figura 26 mostra il rapporto tra i massimi di ozono misurati in giornate con temperature elevate (25-30 °C) (e di conseguenza “fotochimicamente attive”) a Mendrisio, Castaneda e Roveredo. In questo intervallo termico infatti la produzione di ozono è considerevole. I valori di Castaneda correlano molto bene con quelli di Mendrisio su tutto il periodo considerato. In media i massimi sono leggermente inferiori a Castaneda, anche se molte sono le giornate in cui essi sono superiori. Questo significa che la produzione locale di ozono tra Mendrisio e Castaneda non è indifferente e che le concentrazioni di O<sub>3</sub> registrate a Sud delle Alpi non sono solo determinate dall’avvezione d’aria dalla Pianura padana. Questo punto verrà ulteriormente approfondito nel capitolo 9.3. Le concentrazioni di ozono misurate a Castaneda sono invece per lo più superiori a quelle di Roveredo, dove però molto probabilmente le emissioni locali di NO<sub>x</sub> sono più elevate.

A Castaneda giungono spesso dalla Pianura Padana masse d’aria con carichi inquinanti considerevoli. La tabella 6 elenca l’orario del massimo giornaliero

d'ozono per tutte le stazioni di misura. A Castaneda esso è spesso registrato dopo le 18. A quest'ora tale zona non è più interessata da alcun rimescolamento verticale (come invece succede nel pomeriggio). Le masse d'aria a livello del suolo ristagnano quasi immobili e non si associano quindi a quelle che si trovano in altitudine. Verosimilmente in questi frangenti grandi quantità di ozono sono convogliate in quota da sud. Per quanto appena detto questo fenomeno è tuttavia osservabile solo in luoghi situati più in alto, come Castaneda o Brione.

In caso di vento da meridione va infine sottolineato che tanto più tardi si verifica il massimo d'ozono e tanto più questo sarà elevato. Infatti, se i tempi di trasporto si allungano (e quindi anche il "tempo di contatto"), le masse d'aria si caricheranno in maggior misura di sostanze inquinanti emesse dall'agglomerazione di Milano.

**Tabella 6 Mediani degli orari (CET), in cui si ha il massimo di ozono.**

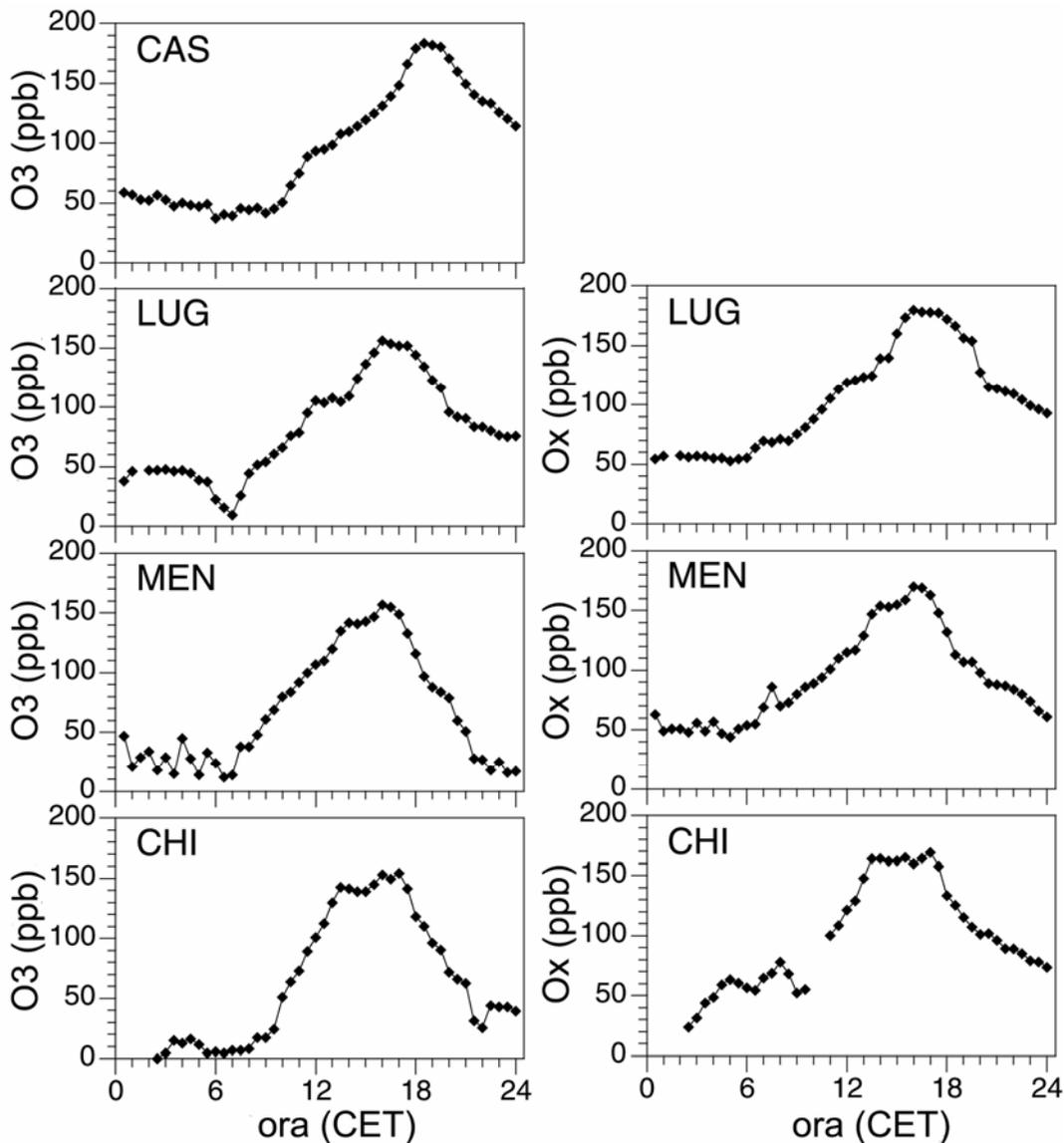
Stazione	BIO	BOD	BRI	CAS	CHI	LGN	LOC	LUG	MAG	MEN	ROM
Mediano	17 h	16 h	16 h	18 h	17 h	16 h	16 h	16.5 h	17 h	16 h	17 h

### 9.3 Stima della produzione locale svizzera

Come sottolineato nel capitolo precedente, a Castaneda si registrano di tanto in tanto massimi di ozono più elevati che a Mendrisio. Questo significa che la produzione di O<sub>3</sub> in territorio svizzero non va sottovalutata.

Per stimare tale produzione tra Mendrisio e Castaneda, ad esempio, occorre prima di tutto conoscere il cosiddetto tempo di trasporto tra le due località, il periodo cioè che un fronte di O<sub>3</sub> impiega per spostarsi dal primo luogo al secondo. Le velocità pomeridiane del vento, al contrario di quelle notturne, rispecchiano adeguatamente le brezze della fascia di confine (come risulta dalle ricerche svolte in Mesolcina da Furger et al. nel 2000). Per questo motivo il sopraccitato intervallo può essere ricavato, nelle classiche "giornate-plume-milanesi", dai successivi aumenti delle concentrazioni di ozono da sud verso nord. Con queste premesse e sulla base di misurazioni diurne al suolo, il tempo di trasporto tra Mendrisio e Castaneda corrisponde normalmente a circa 5 ore.

Tuttavia questo valore può variare di molto. Il 19.7.1991, per esempio, sono state rilevate a Castaneda le quantità di  $O_3$  più elevate in assoluto del periodo d'osservazione (vedi figura 27). La sequenza degli aumenti da sud verso nord durante quella giornata è stata la seguente: a Chiasso e a Mendrisio il rialzo della concentrazione è stato osservato tra le 13:00 e le 13:30, a Lugano verso le 15 e a Castaneda infine tra le 17:00 e le 17:30. In questo caso il tempo di trasporto è stato alquanto inferiore alle consuete 5 ore.



**Figura 27** Andamento giornaliero delle concentrazioni di ozono e di  $O_x$  per alcune stazioni, il 19 luglio 1991.

Bisogna comunque sottolineare che l'approccio usato in questo studio per stimare la produzione di ozono in territorio sud-alpino è alquanto

approssimativo. Esso si basa infatti sulle seguenti semplificazioni. In primo luogo sono stati considerati solo giorni caratterizzati da temperature (tra 20 e 25 °C e tra 25 e 30 °C) e concentrazioni di O<sub>3</sub> elevate, così come da venti caldi che convogliano masse d'aria dalla Pianura padana verso le Prealpi svizzere. Secondariamente si è ammesso che un ipotetico fronte di ozono impiega dalle 4 alle 5 ore circa da Mendrisio a Castaneda, e questo senza subire alcun processo di diluizione.

Indagini precedenti hanno mostrato che sul Piano di Magadino, di giorno e nei primi 300 m dal suolo, predomina il vento da ovest, ma che in gran parte della zona di confine, solitamente fino ad un'altitudine di 2 km, il vento spira da sud (Furger et al., 2000). Una gran parte dell'aria convogliata al Sud delle Alpi proviene quindi da meridione. Si potrebbe d'altra parte ipotizzare che alcune masse d'aria giungano a Castaneda dal Lago di Como, oltrepassando la catena alpina. Le cime più alte superano tuttavia i 2000 m d'altezza, quota corrispondente allo strato limite planetario. Perciò questa via di trasporto è abbastanza improbabile.

Nella tabella 7 sono elencati i risultati della stima per due classi di temperature (tra 20 e 25 °C e tra 25 e 30 °C), supponendo che il fronte di O<sub>3</sub> parta da Mendrisio, o alle 13 o alle 14, e che il massimo di ozono venga raggiunto a Castaneda mediamente verso le 18. A mo' d'esempio verrà commentato di seguito un ipotetico scenario calcolato per il secondo intervallo termico (tra 25 e 30 gradi centigradi) e le ore 13 come orario di partenza.

La concentrazione massima media di ozono a Castaneda è di 88.3 ppb, mentre quella di Mendrisio 78.9 ppb. La differenza (*produzione netta*) di 9.4 ppb corrisponde al 10.6% del valore di Castaneda, e ad oltre la metà dell'incremento della concentrazione di ozono a Mendrisio, pari a 17.1 ppb (= massimo di O<sub>3</sub> – concentrazione di ozono alle 13). Considerando il fenomeno della deposizione secca, la *produzione lorda* ammonta a circa 16.8 ppb. Inoltre in un caso su dieci tale produzione equivale a più del 30% della concentrazione di O<sub>3</sub> massima. Se si considera infine che in Svizzera il carico di base di ozono in estate è pari a circa 60 ppb, la produzione netta in Ticino (9.4 ppb), se paragonata al totale di 28.3 ppb (concentrazione massima media di Castaneda – carico di base estivo), è davvero considerevole. V'è da notare comunque che

se i calcoli sono eseguiti sostituendo la concentrazione iniziale delle 13 a Mendrisio con quella delle 14, la produzione netta stimata si riduce di molto, rimanendo tuttavia in molti casi rilevante.

**Tabella 7 Stima della produzione locale di ozono in Svizzera.**

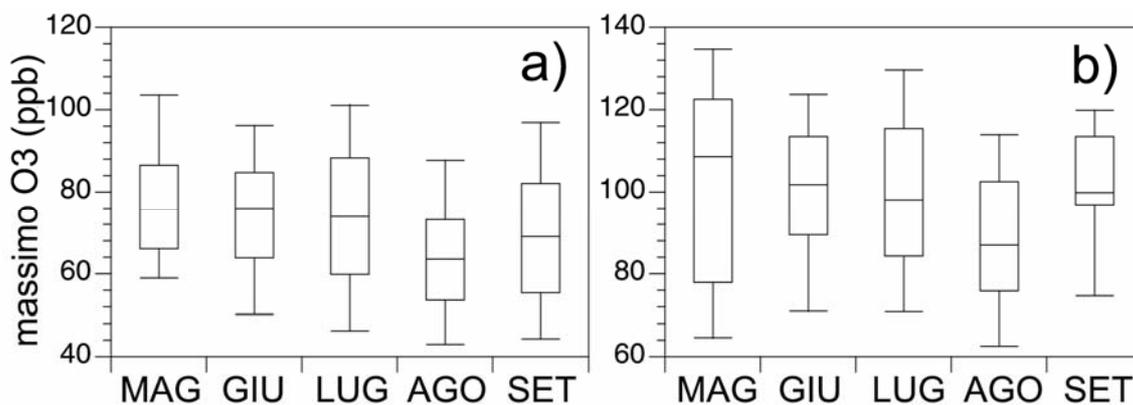
	<b>Temperatura (25-30 °C)</b>	<b>Temperatura (20-25 °C)</b>
Media dei massimi di O <sub>3</sub> a Castaneda (in ppb)	88.3	68.5
<b>a) partenza del fronte di ozono da Mendrisio alle 13:00</b>		
Concentrazione media di O <sub>3</sub> alle 13:00 a Mendrisio (in ppb)	78.9	57.6
Produzione netta di ozono in Ticino (in ppb)	9.4	10.9
Produzione netta di ozono in Ticino (in %)	10.6	15.9
Produzione lorda di ozono (in ppb) in Ticino, tenendo conto della deposizione secca (0.7 cm/s)	16.8	16.7
<b>b) partenza del fronte di ozono da Mendrisio alle 14:00</b>		
Concentrazione media di O <sub>3</sub> alle 14:00 a Mendrisio (in ppb)	83.7	62.9
Produzione netta di ozono in Ticino (in ppb)	4.6	5.6
Produzione netta di ozono in Ticino (in %)	5.2	8.2
Produzione lorda di ozono (in ppb) in Ticino, tenendo conto della deposizione secca (0.7 cm/s)	11.7	11.3
Aumento della concentrazione di ozono a Mendrisio (O <sub>3</sub> max-O <sub>3</sub> (13:00) (in ppb)	17.1	13.9
Aumento della concentrazione di ozono a Mendrisio (O <sub>3</sub> max-O <sub>3</sub> (14:00) (in ppb)	12.3	8.7

In conclusione si può senza dubbio affermare che i risultati scaturiti dalla stima della produzione di ozono in Ticino e Mesolcina hanno quanto meno sorpreso gli autori. Essendo a conoscenza dei notevoli processi di rimescolamento e di diluizione, e delle quote relativamente elevate di deposizione secca al Sud delle Alpi, si poteva pensare che la produzione di O<sub>3</sub> locale equivalesse al massimo ai valori di tali fenomeni, compensandoli quindi, ma non che causasse addirittura un aumento netto.

Valutando i sopraccitati risultati comunque, una domanda sorge spontanea. E cioè, se la produzione di ozono in territorio ticinese è da ricondurre solo alle emissioni locali, o se è determinata anche e soprattutto da quelle della Pianura padana (in particolare ossidi di azoto e composti organici volatili) che persistono nelle masse d'aria convogliate verso il Meridione delle Alpi. A questa, senza il conforto di ulteriori studi, non può essere data una risposta certa e definitiva. Tuttavia rilevamenti effettuati nei dintorni di Milano nell'ambito della campagna di misurazione LOOP hanno evidenziato che nella parte settentrionale della Pianura padana dopo mezzogiorno una gran parte degli ossidi d'azoto è già stata degradata. Ciò significa che gli NO<sub>x</sub> e, anche se in modo minore, pure i COV emessi nel Nord Italia contribuiscono alla formazione di ozono in Ticino.

#### **9.4 Influsso delle vacanze italiane di Ferragosto sulle concentrazioni di ozono al Sud della Svizzera**

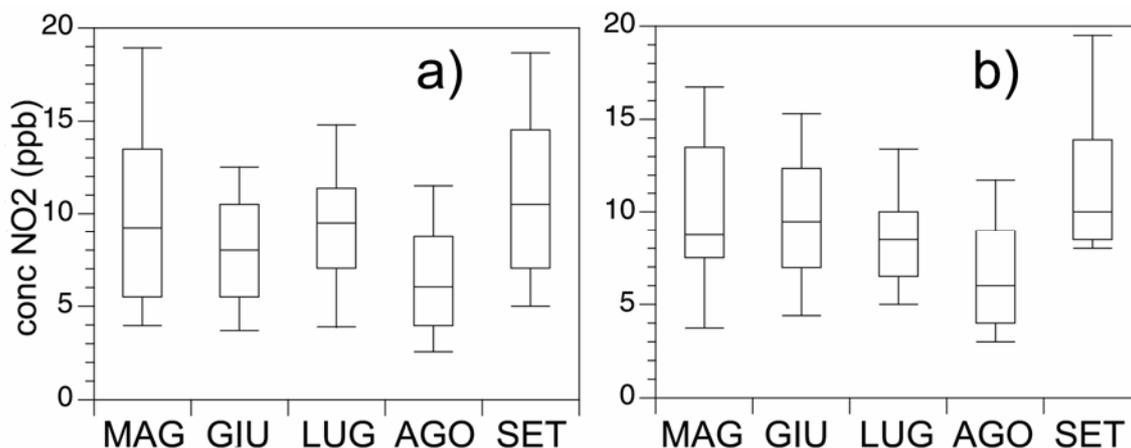
Un turista che visita Milano d'agosto non può certo fare a meno di notare che molti negozi, piccole ditte, ristoranti ed alberghi sono chiusi per le consuete vacanze di Ferragosto. Quindi, il fatto che molti italiani del nord durante il suddetto mese siano in vacanza e lontani dalla città dovrebbe comportare una diminuzione delle emissioni nella Pianura padana, ed una conseguente riduzione delle concentrazioni di ozono nel Nord Italia e anche a Meridione delle Alpi.



**Figura 28** Box-plots dei massimi giornalieri di ozono a Mendrisio: a) per temperature pomeridiane tra 20 e 25° C e b) tra 25 e 30° C. Sono indicati il 10, 25, 50, 75 e 90 percentile.

La figura 28 riporta le distribuzioni delle concentrazioni massime di ozono a Mendrisio, per i mesi da maggio a settembre, e per due intervalli di temperatura (tra 20 e 25 gradi centigradi e tra 25 e 30 gradi centigradi). Una differenziazione termica dei valori permette di considerare in maniera ottimale l'influsso dei fattori atmosferici (come già visto al capitolo 4 la temperatura è la variabile meteorologica che più influenza la formazione di O<sub>3</sub>). Il grafico mostra pure che in agosto i massimi di ozono sono chiaramente inferiori agli altri mesi, con differenze in media pari a circa 15 ppb.

La figura 29 mostra tra l'altro che a Mendrisio, sull'arco del decennio '90-'99, anche le concentrazioni di NO<sub>2</sub> rilevate nel pomeriggio in concomitanza del massimo di O<sub>3</sub> in agosto sono chiaramente inferiori a quelle degli altri mesi. I valori misurati includono, oltre alle ovvie quantità di diossido di azoto, anche quelle di alcuni prodotti secondari, come per esempio i nitrati organici. Si può dunque presumere che le concentrazioni di ozono misurate nel Sottoceneri (soprattutto nel pomeriggio) non siano determinate tanto dalle emissioni locali quanto da quelle della Pianura padana. Dalla figura 29 si può anche dedurre che le masse d'aria provenienti dal Nord Italia contengono meno ossidi di azoto, all'incirca 20-30%, degli altri mesi.



**Figura 29** Box-plots delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> in concomitanza del massimo di ozono giornaliero a Mendrisio: a) per temperature pomeridiane tra 20 e 25° C e b) tra 25 e 30° C. Sono indicati il 10, 25, 50, 75 e 90 percentile.

È stato dunque mostrato che una riduzione delle emissioni nella Pianura padana pari a 20-30% crea i presupposti per una diminuzione significativa delle concentrazioni di ozono a Meridione delle Alpi.

Uno studio condotto ad Heilbronn ha analizzato tra l'altro gli eventuali effetti di una riduzione del carico inquinante sulla formazione di O<sub>3</sub>. È risultato che, in una regione così piccola, una diminuzione delle emissioni non è sufficiente per ridurre i tassi di ozono in maniera consistente. Viceversa il calo delle emissioni che ogni estate ha luogo nel Nord Italia è tale da determinare un calo sensibile dei quantitativi di O<sub>3</sub> a Sud delle Alpi.

Una stima più precisa di quanto le emissioni della Pianura padana diminuiscano effettivamente in tal periodo comporterebbe tuttavia un'analisi dettagliata dei dati riguardanti il traffico e le immissioni d'inquinanti primari.

## 10. Possibili studi futuri

In quest'indagine sono stati calcolate ed analizzate le diverse tendenze mensili dell'ozono a Sud delle Alpi. Tuttavia la scelta di impiegare un modello-meteo relativamente semplice ha fatto sì che i valori e i trend estivi corretti risaltassero più di quelli invernali. Un eventuale studio che si volesse concentrare sul periodo invernale dovrà tenere in maggior considerazione ad esempio la variabile *velocità del vento*.

Sarebbe inoltre interessante includere nelle analisi temperature registrate ad altitudini diverse. A questo proposito è da poco stata avviata in Ticino una campagna di misura che si prefigge di rilevare con l'aiuto di sonde termiche e in maniera continua diversi profili verticali della temperatura. I dati ottenuti completeranno quelli già esistenti, permettendo tra l'altro il calcolo di parametri di stabilità anche per i valori atmosferico-climatici.

Queste analisi saranno anche di grande utilità per studiare l'impatto d'inquinanti primari, come ad esempio gli aerosol, che lo scorso inverno hanno fatto parlare molto di sé in Ticino e Lombardia. Il persistere di tassi elevati di queste sostanze ha addirittura persuaso le autorità ticinesi a indire delle giornate in cui i trasporti pubblici erano gratuiti, e quelle lombarde a limitare la circolazione stradale.

L'elevata variabilità dei dati corretti dei mesi di maggio e giugno fa presumere che nel processo d'impostazione dei modelli siano stati tralasciati alcuni influssi meteorologici importanti. Eventuali ricerche future potrebbero considerare per esempio il perdurare di situazioni di alta pressione.

La produzione di ozono in Ticino e Mesolcina, stimata in questo studio, è notevole. Questo significa che i quantitativi di O<sub>3</sub> rilevati al Sud delle Alpi non sono solo "d'importazione". In quest'ottica si potrebbe pianificare uno studio su vasta scala che determini in maniera precisa le percentuali di ozono importate rispetto a quelle prodotte localmente. Per far ciò occorrono dati pluridimensionali di un numero sufficiente di parametri rilevati in modo continuo e durante alcuni giorni. A questo scopo si potrebbe impiegare l'aeroplano della MetAir e/o la Stazione mobile d'analisi del PSI. Sarebbe inoltre sensato restringere l'area d'indagine, limitandosi per esempio alla sola zona tra Chiasso e Castaneda.

Nella Svizzera italiana le problematiche d'igiene dell'aria sono rilevanti durante tutto l'anno e quindi più che mai attuali. La scottante situazione politica venutasi a creare in Ticino lo scorso inverno potrebbe sicuramente agevolare l'organizzazione di uno studio del genere (analogo per esempio a POLLUMET agli inizi degli anni '90), in cui si potrebbero sfruttare le competenze specializzate di diversi gruppi di lavoro in collaborazione con cantoni e

confederazione. Inoltre i diversi metodi di misura e di calcolo sono progrediti di molto negli ultimi anni.

A Sud delle Alpi andrebbe inoltre approfondita l'importanza del trasporto verticale in rapporto ai tassi di ozono registrati. Durante le analisi si è infatti osservato che a Bodio, in Val Leventina, le concentrazioni di ozono estive sono nettamente più basse che altrove, e che questo è dovuto a notevoli processi di diluizione verticali che si verificano in questa zona. Il Paul Scherrer Institut si sta attualmente occupando dell'analisi di tali fenomeni nell'ambito del progetto CHAPOP (Characterization of High Alpine Pollution Plumes).

Anche il trasporto orizzontale non è stato finora approfondito con la dovuta cura. È vero che i vari modelli meteorologici sono stati impostati tenendo conto tra l'altro delle caratteristiche dei venti locali. Tuttavia raramente ci si è preoccupati di analizzare in dettaglio l'origine e la circolazione delle masse d'aria. Le tecnologie nel campo delle risoluzioni topografiche sono in continuo progresso e consentono un'esame delle traiettorie e dei percorsi sempre più preciso e dettagliato. L'analisi combinata di traiettorie e mappe d'esposizione permetterebbe inoltre (secondo il principio della cumolazione delle immissioni lungo un percorso) di determinare quali regioni (e le loro emissioni primarie) influenzano in maniera significativa le diverse zone del Sud della Svizzera.

Si potrebbe infine descrivere il trasporto di sostanze inquinanti dal Sud verso il Nord delle Alpi. È noto infatti che i quantitativi di inquinanti dell'aria sono leggermente superiori nella Svizzera italiana e che questi possono, in condizioni meteorologiche favorevoli, influenzare anche il versante nord-alpino.

## 11. Ringraziamenti

Vorremmo ringraziare cordialmente l'UFAFP e gli uffici ambientali dell'amministrazione cantonale ticinese e grigionese per averci messo a disposizione i dati ed aver finanziato questo studio.

## 12. Bibliografia

- Bloomfield, P., J.A. Royle, L.J. Steinberg and Q. Yang (1996). Accounting for meteorological effects in measuring urban ozone levels and trends. *Atmos. Environ.*, 30, 3067-3077.
- BUWAL (1994). Sommersmog-Messflüge 1990-1992. *Umwelt-Materialien*, 24 Luft.
- BUWAL (1996). Trendanalyse schweizerischer Luftschadstoffimmissionsdaten. *Umwelt-Materialien*, 53 Luft.
- BUWAL (2001). NABEL Luftbelastung 2000.
- BUWAL (2002). Zeitreihenanalyse des bodennahen Ozons in der Schweiz.
- Draper, N.R., H. Smith (1981). Applied regression analysis (2<sup>nd</sup> ed.). Wiley, New York.
- Gilbert, R.O. (1987). Statistical methods for environmental pollution monitoring. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Kuebler, J., H. van den Bergh, and A.G. Russell (2001). Long-term trends of primary and secondary pollutant concentrations in Switzerland and their response to emission controls and economic changes. *Atmos. Environ.*, 35, 1351-1363.
- Neftel, A., A.S.H. Prévôt, M. Furger, B. Vogel, and J. Hjorth (2002). Sensitivity of photooxidant production in the Milan Basin. Results from a EUROTRAC-2 LOOP field experiment. *J. Geophys. Res.*, in press.
- Ökoscience (2001). Wochentagsabhängigkeit der Ozonwerte im Misox und Tessin im Vergleich zu den Emissionen auf der Autobahn A2.

- Prévôt A.S.H., J. Staehelin, G.L. Kok, R.D. Schillawski, B. Neininger, T. Staffelbach, A. Neftel, H. Wernli and J. Dommen (1997). The Milan photooxidant plume. *102*, 23375-23388.
- Staehelin, J., J. Thudium, R. Bühler, A. Volz-Thomas and W. Graber (1994) Trends in surface ozone concentrations at Arosa (Switzerland). *Atmos. Environ.*, 28, 75-87.
- Vecchi, R. and G. Valli (1999) Ozone assessment in the southern part of the Alps. *Atmos. Environ.*, 33, 97-109.
- Weber, R.O. and A.S.H. Prévôt (2002). Climatology of ozone transport from the free troposphere into the boundary layer south of the Alps during North Foehn. *J. Geophys. Res.*, in press.

## **Allegati**

I diversi allegati sono pensati come supplemento di alcuni capitoli e paragrafi del rapporto. La numerazione degli stessi rispecchia perciò quella del testo principale. Per esempio l'allegato A6.1 completa quanto esposto nella sezione 6.1.

### **A4.2 Giorno della settimana**

I diagrammi delle pagine seguenti rappresentano le medie dei massimi giornalieri di ozono per il decennio 1990-1999, suddivise sia per giorno che per mese, delle stazioni di misura di Bioggio, Bodio, Brione, Castaneda, Chiasso, Lugano TI, Locarno, Lugano NABEL, Magadino, Mendrisio e Roveredo Municipio. I dettagli si trovano al capitolo 4.2.

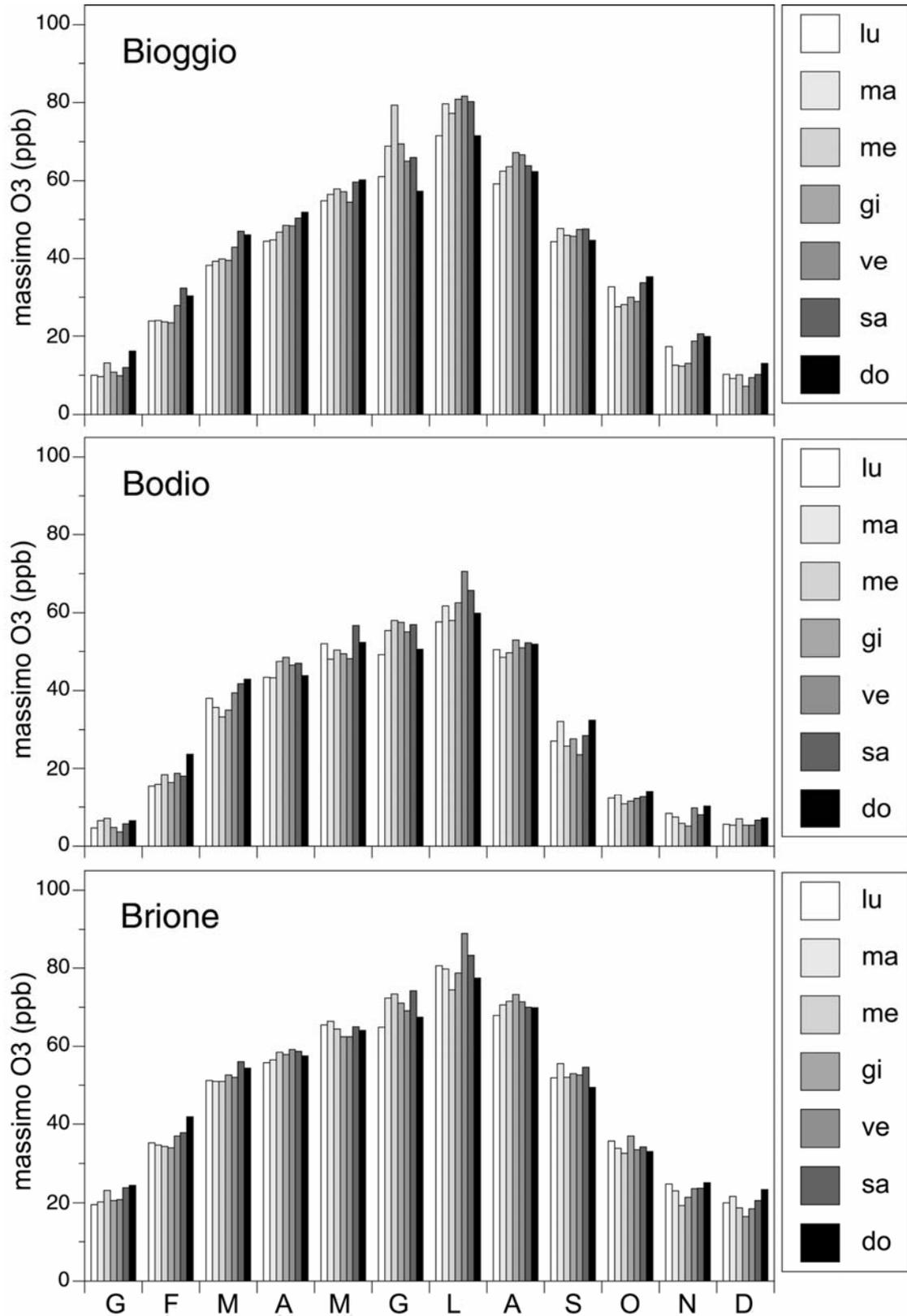


Figura A1 Medie dei massimi giornalieri di ozono a Bioggio, Bodio e Brione, suddivise per giorno e mese.

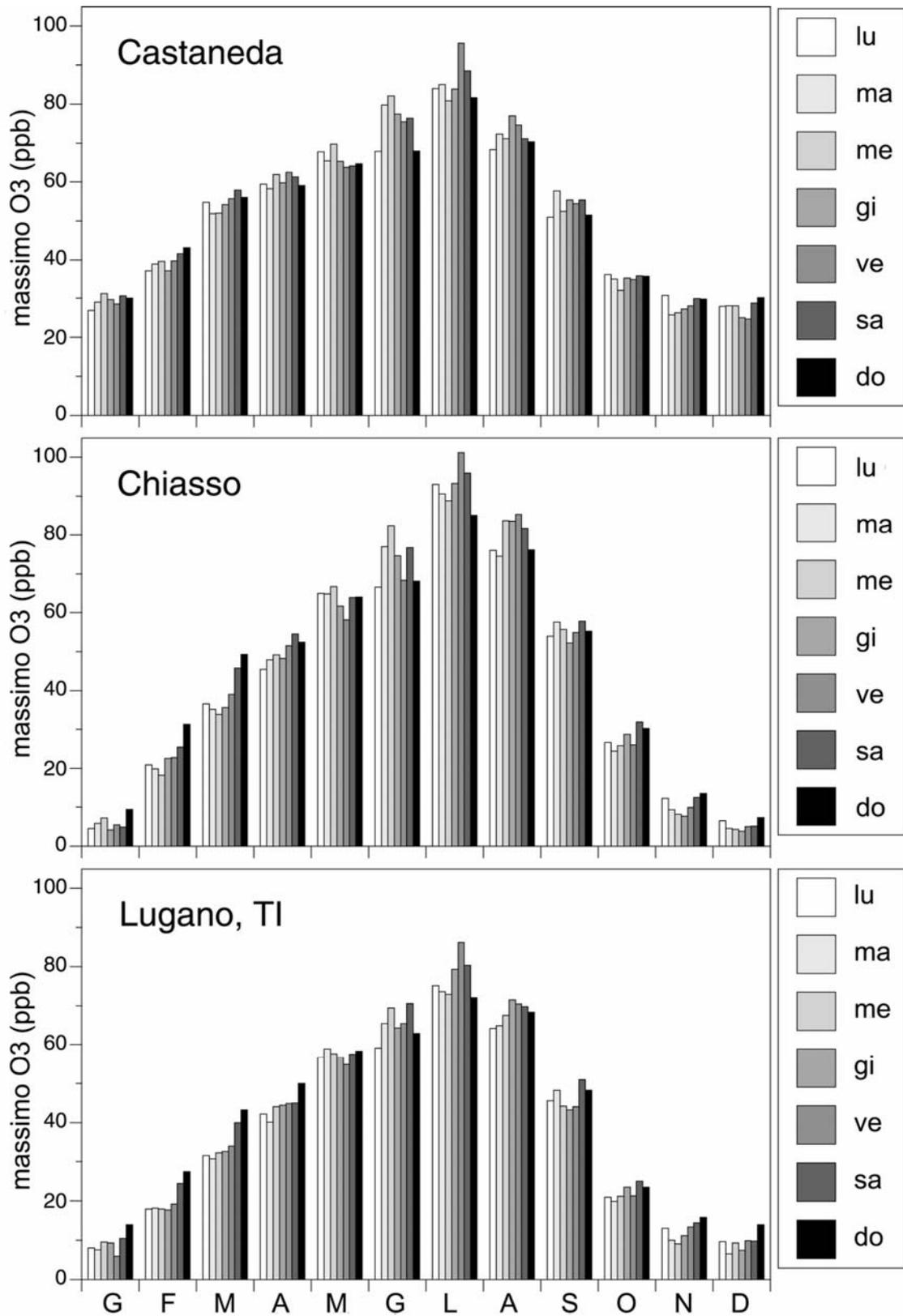


Figura A2 Medie dei massimi giornalieri di ozono a Castaneda, Chiasso e Lugano, suddivise per giorno e mese.

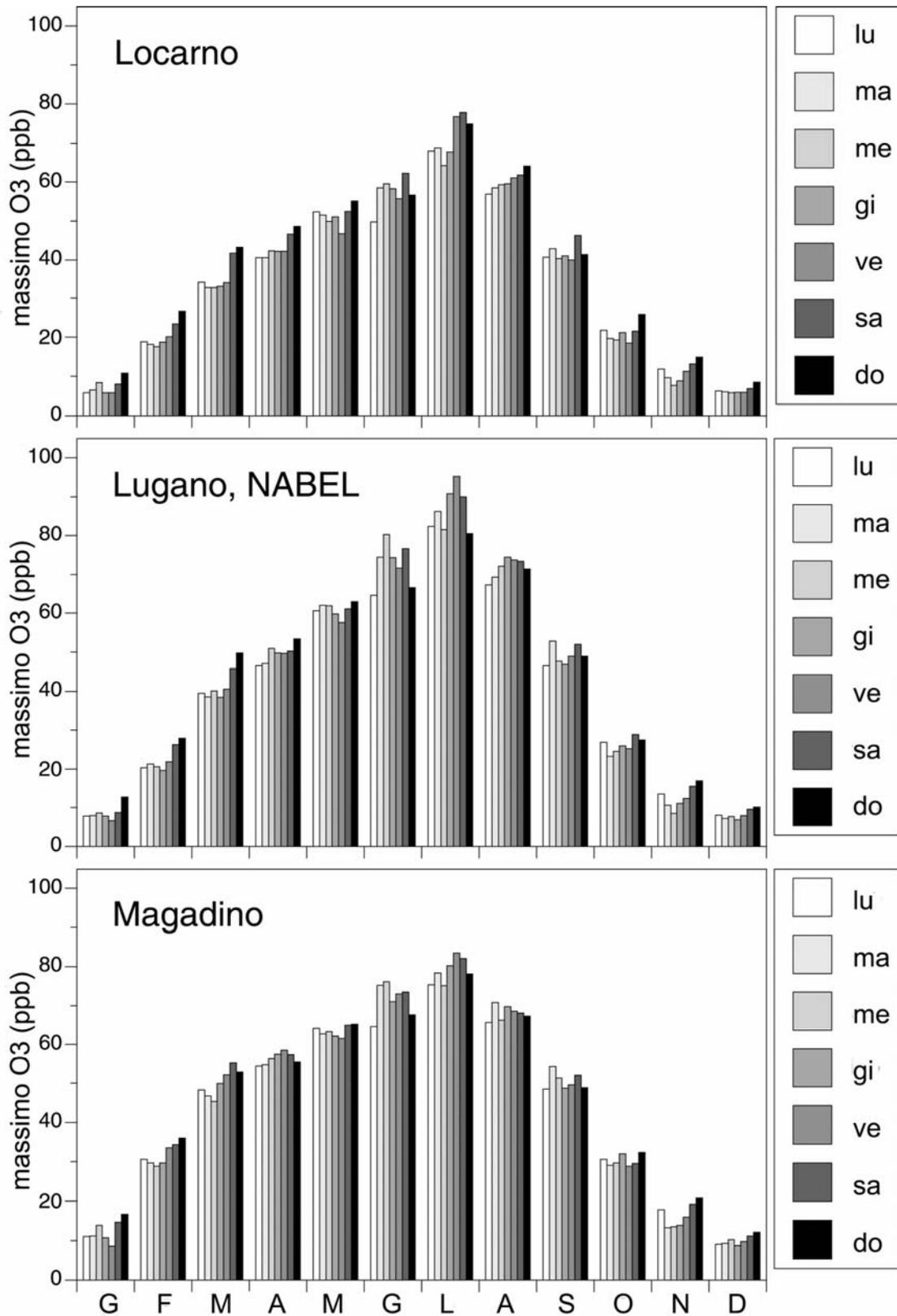


Figura A3 Medie dei massimi giornalieri di ozono a Locarno, Lugano (Nabel) e Magadino, suddivise per giorno e mese.

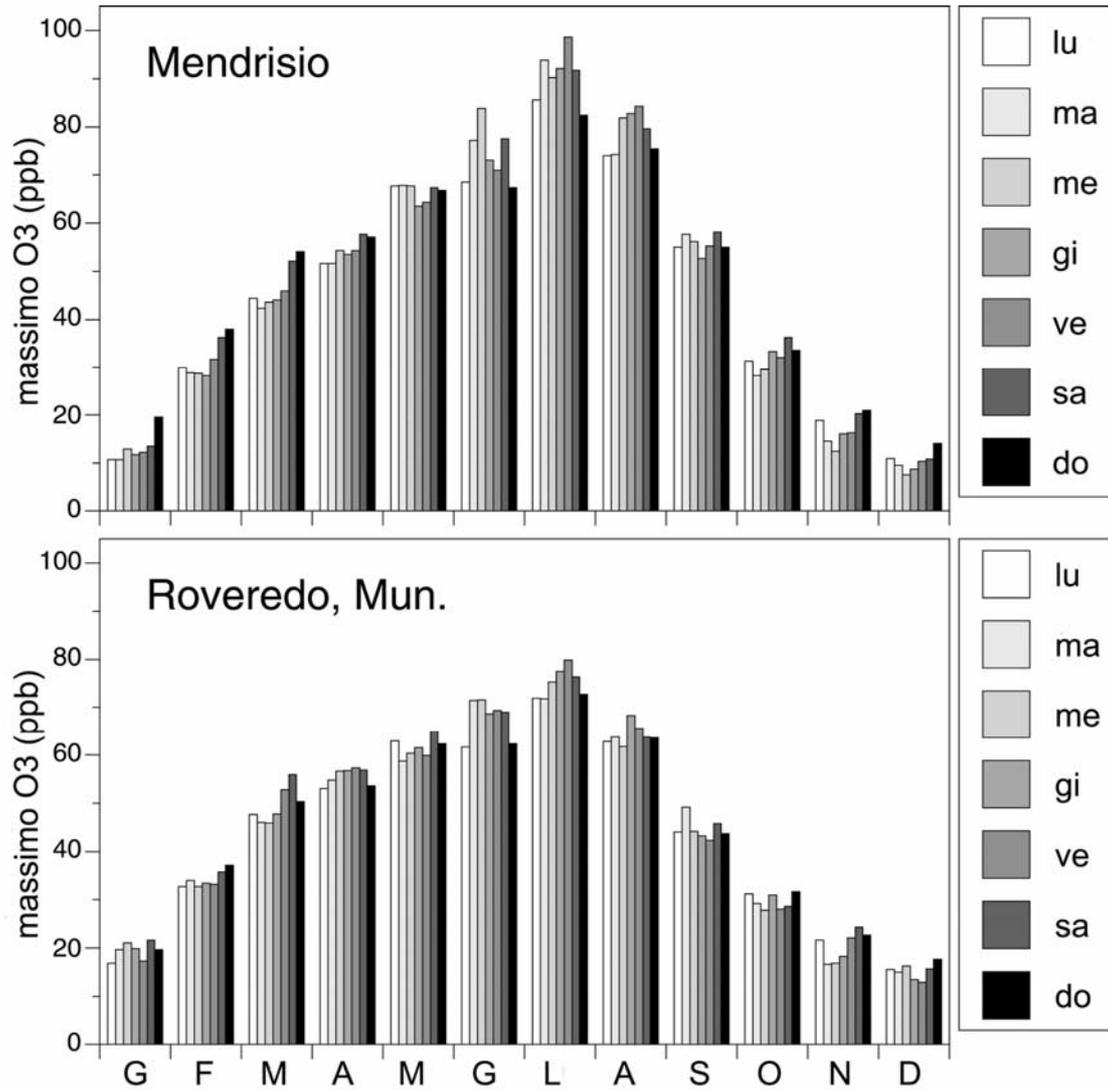


Figura A4 Medie dei massimi giornalieri di ozono a Mendrisio e Roveredo, suddivise per giorno e mese.

### A4.3 Parametri dei modelli

Tabella A1 Pendenze dei grafici dei massimi di ozono (in ppb/°C), calcolati con il modello M2 (a 2 variabili: temperatura pomeridiana e giorno settimanale), in funzione della stessa temperatura pomeridiana.

staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
<b>BIO</b>	1.171	1.895	1.830	3.343	4.934	5.115	5.172	4.904	4.807	2.777	1.159	0.627
<b>BOD</b>	0.445	0.514	1.084	2.456	3.952	4.033	5.036	4.013	3.123	1.043	0.462	0.741
<b>BRI</b>	1.037	1.662	1.917	2.876	4.354	4.578	5.516	4.529	4.769	2.726	1.027	0.874
<b>CAS</b>	0.479	1.715	1.323	2.512	4.051	4.979	5.552	5.298	4.619	2.081	0.051	0.284
<b>CHI</b>	0.196	1.511	2.020	3.919	5.295	5.979	6.787	5.777	6.431	3.409	0.834	0.095
<b>LGN</b>	0.863	1.450	1.864	3.034	5.194	5.367	5.685	4.848	6.096	2.781	0.918	0.603
<b>LOC</b>	0.252	0.978	1.683	2.728	4.297	4.275	5.233	4.285	4.282	2.305	0.654	0.260
<b>LUG</b>	0.695	1.759	2.437	3.705	5.174	6.197	6.238	5.668	5.974	3.137	0.997	0.691
<b>MAG</b>	0.816	1.722	1.988	2.902	3.919	4.846	4.647	4.623	4.794	2.415	0.761	0.566
<b>MEN</b>	0.934	1.724	2.413	3.395	4.799	5.438	6.124	5.681	6.036	2.969	1.186	0.400
<b>ROM</b>	0.776	1.604	1.796	2.883	4.544	4.727	4.625	4.788	4.586	1.589	0.171	0.504

## A6.1 Trend delle medie mensili dei massimi giornalieri di ozono

I diagrammi seguenti rappresentano le medie mensili dei massimi giornalieri di ozono per il periodo dal 1990 al 1999. I triangolini neri indicano i dati non corretti, quelli grigi i dati corretti con il modello meteo 2 (impostato con le variabili temperatura pomeridiana e giorno settimanale).

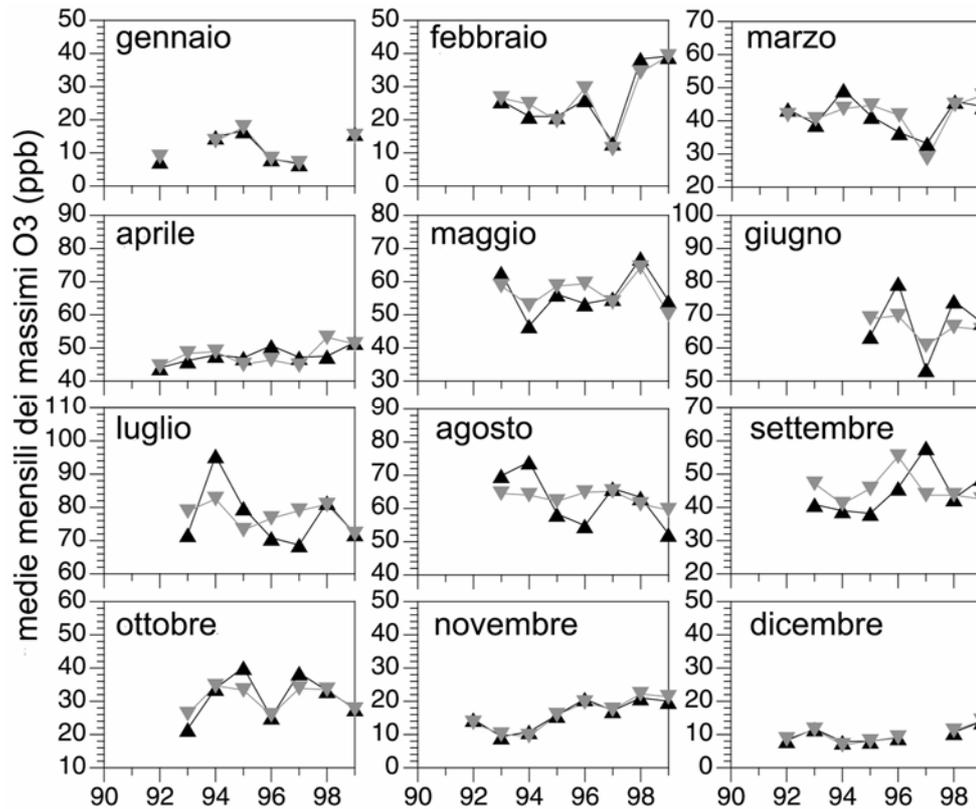


Figura A5 Medie mensili dei massimi giornalieri a ozono a Bioggio (nero: non corretto / grigio: corretto).

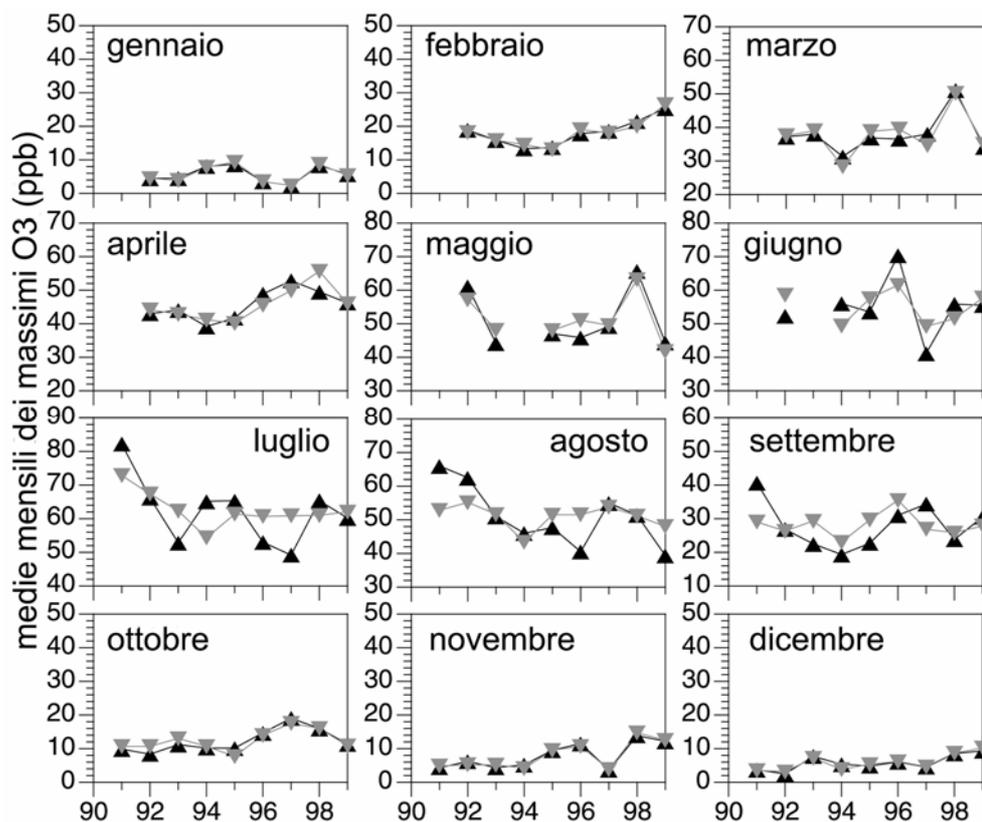


Figura A6 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Bodio (nero: non corretto / grigio: corretto).

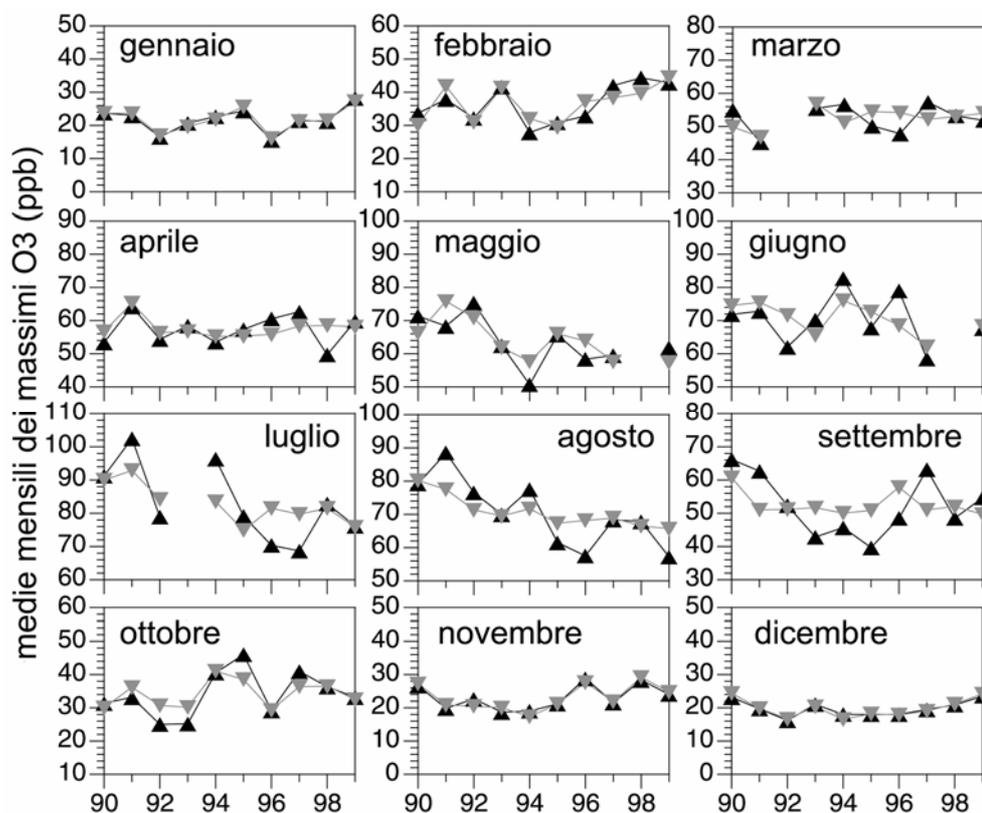


Figura A7 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Brione (nero: non corretto / grigio: corretto).

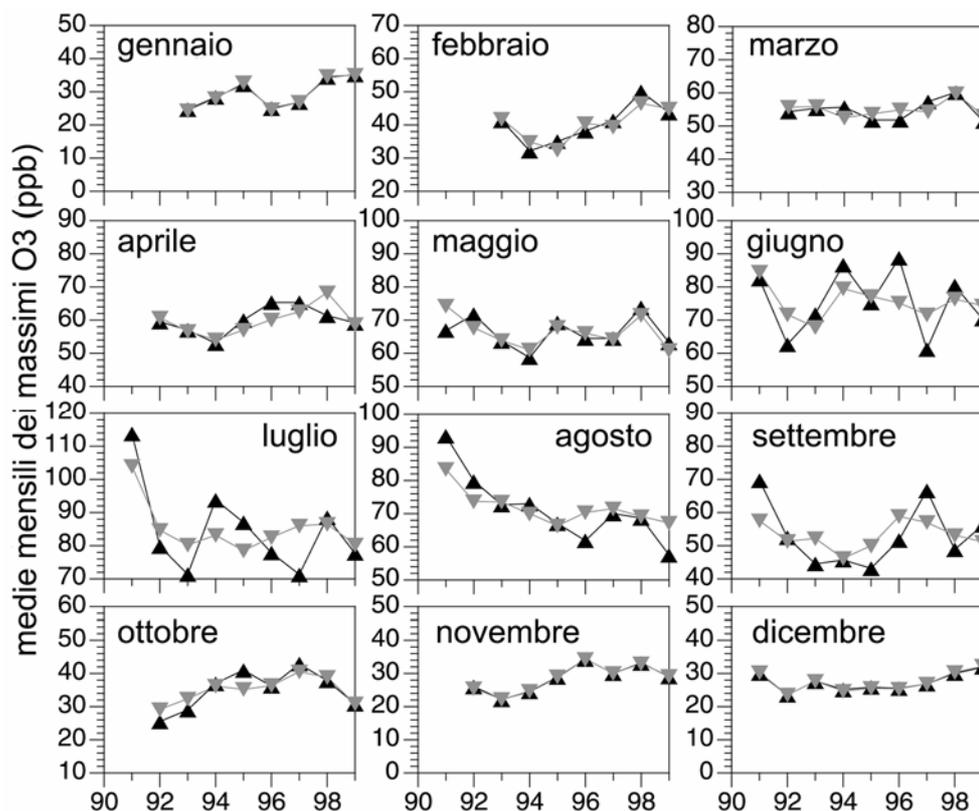


Figura A8 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Castaneda (nero: non corretto / grigio: corretto).

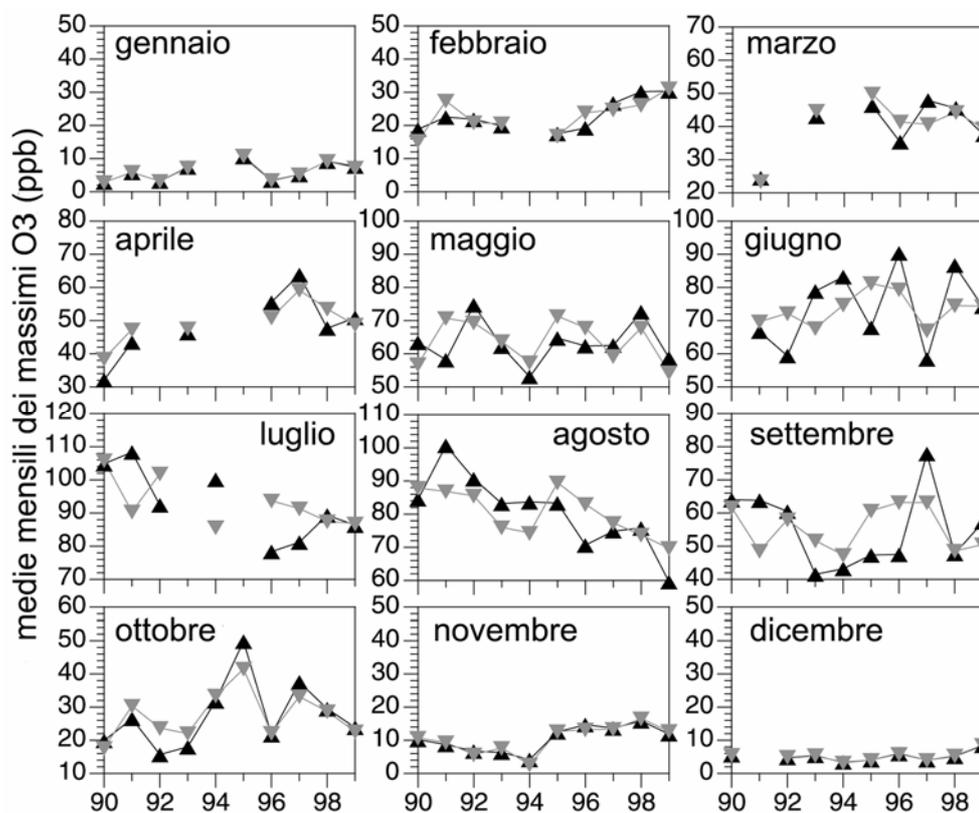


Figura A9 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Chiasso (nero: non corretto / grigio: corretto).

A10

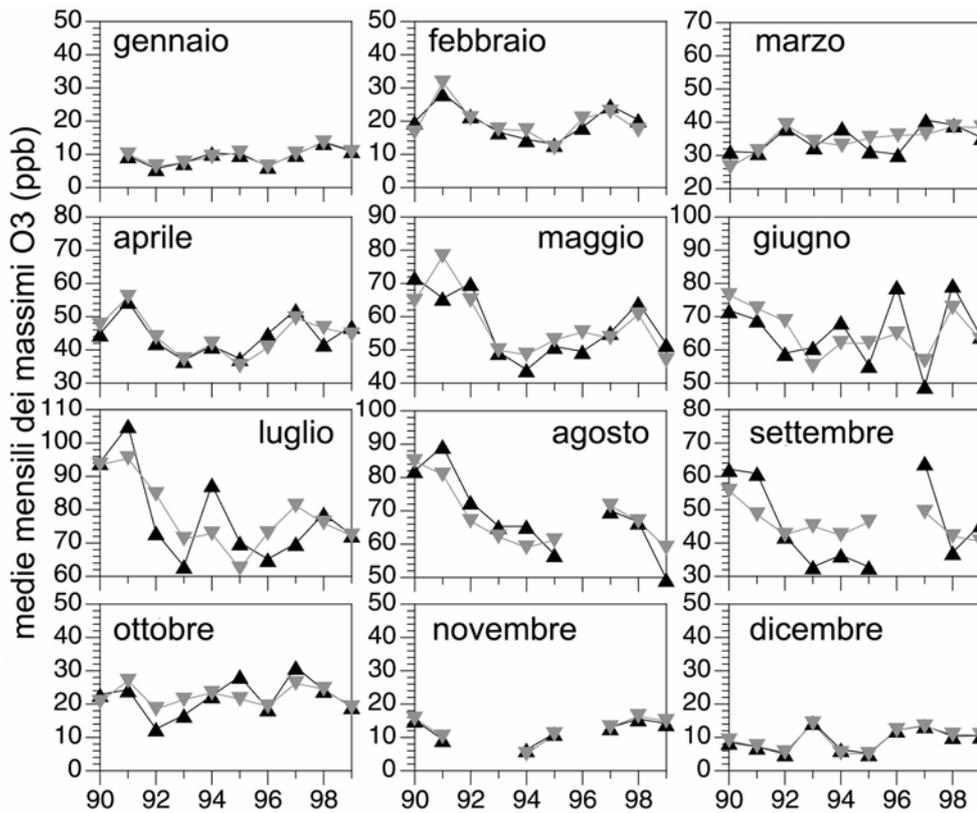


Figura A10 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Lugano TI (nero: non corretto / grigio: corretto).

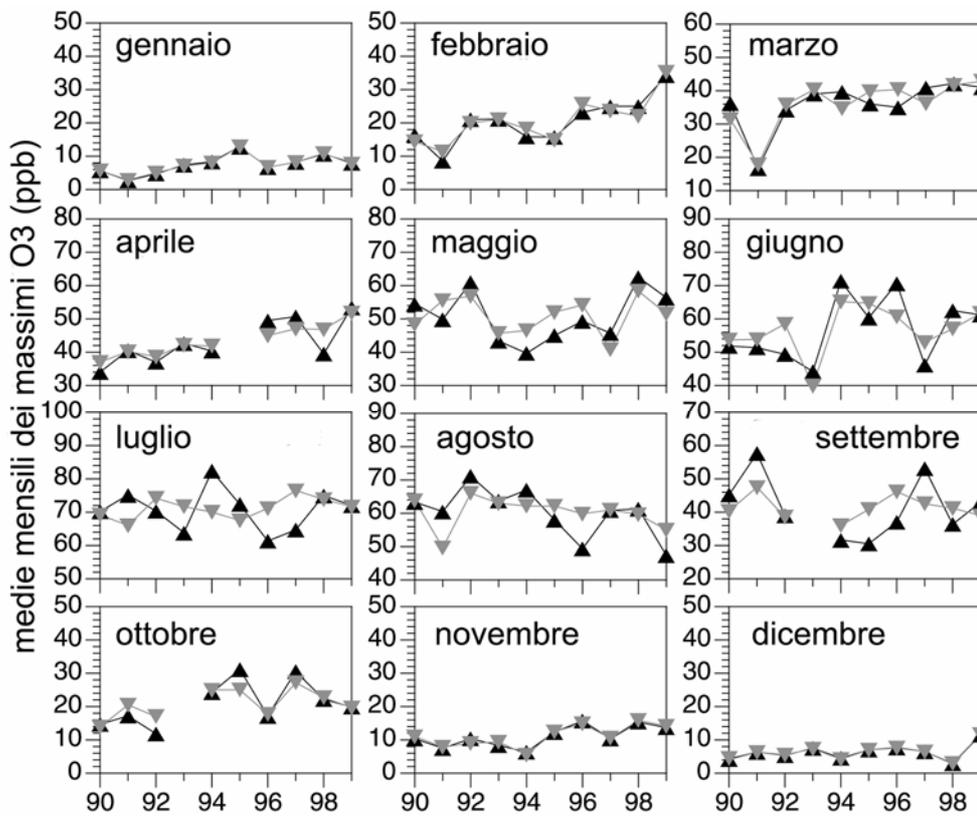


Figura A11 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Locarno (nero: non corretto / grigio: corretto).

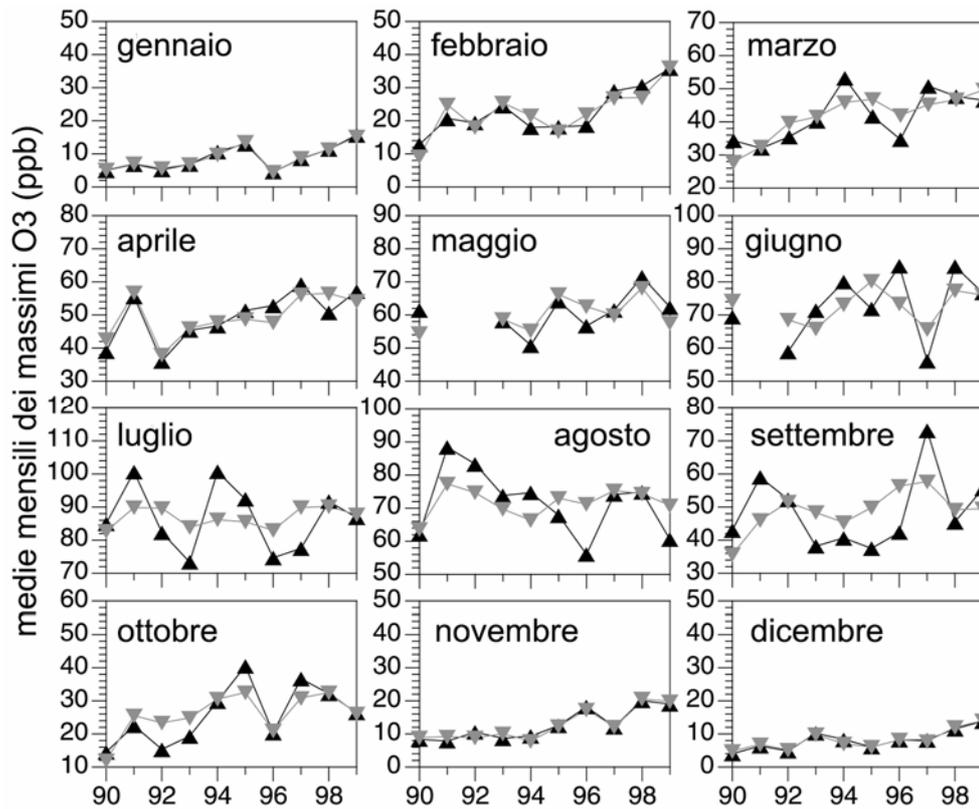


Figura A12 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Lugano NABEL (nero: non corretto / grigio: corretto).

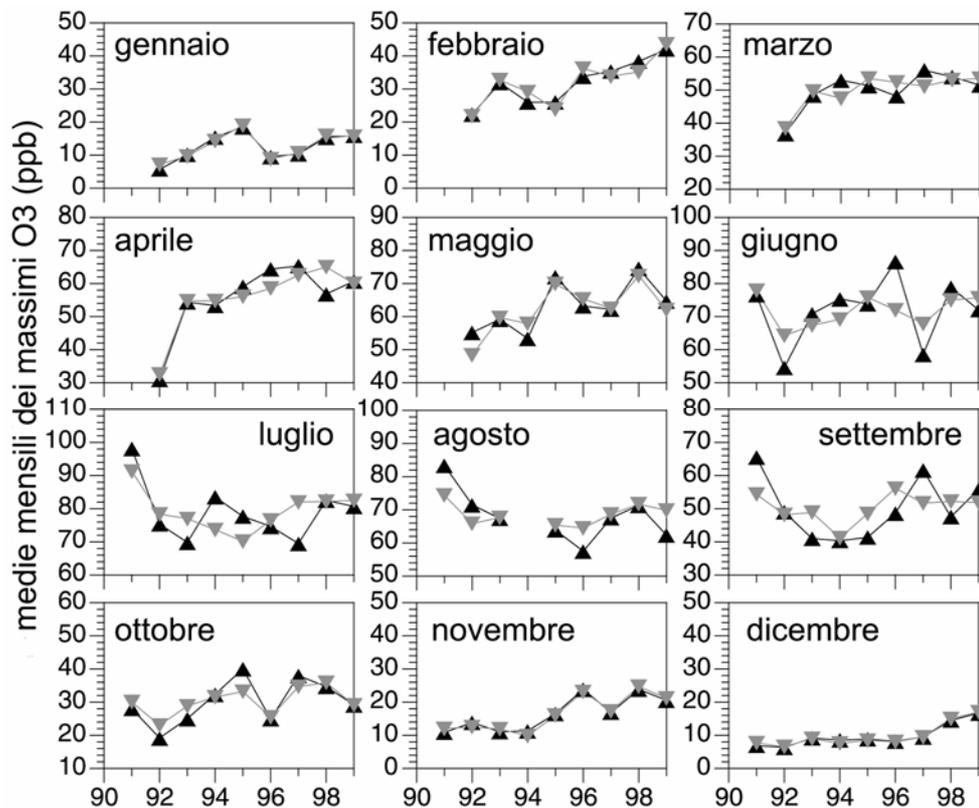


Figura A13 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Magadino (nero: non corretto / grigio: corretto).

A12

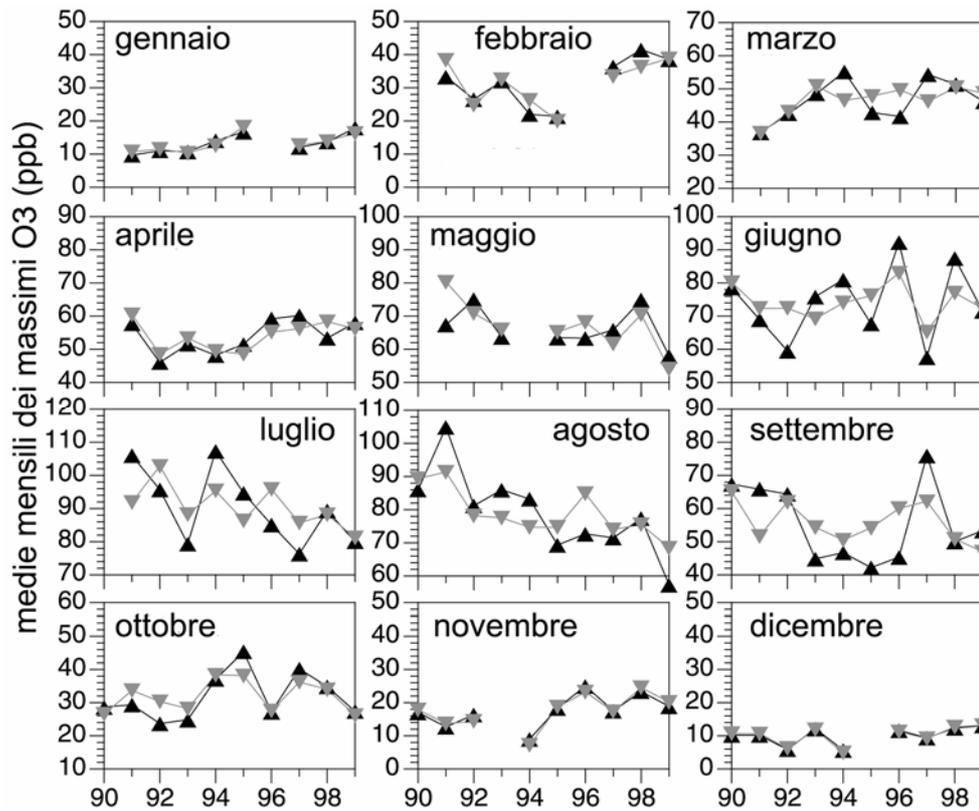


Figura A14 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Mendrisio (nero: non corretto / grigio: corretto).

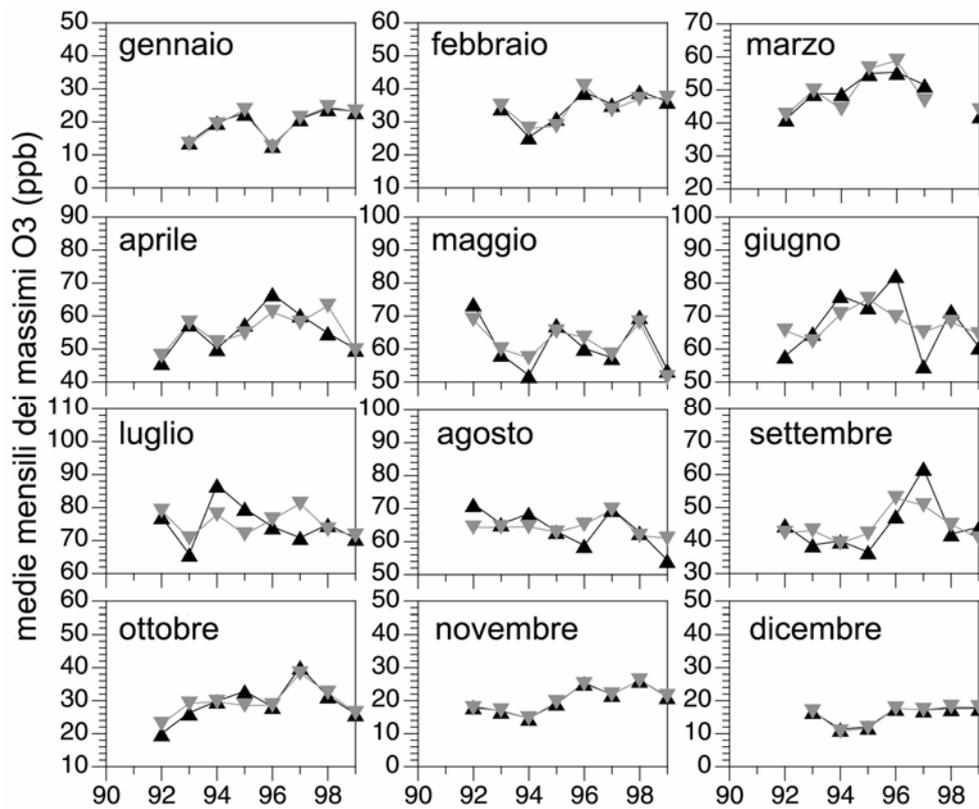


Figura A15 Medie mensili dei massimi giornalieri di ozono a Roveredo (nero: non corretto / grigio: corretto).

Tabella A2 Trend dei massimi di ozono (in ppb/decennio) corretti dagli influssi meteorologici con il modello M2 (temperatura pomeridiana e giorno settimanale). In grigio scuro sono marcati i trend per i quali il livello di significatività (p) è inferiore a 0.01, in grigio chiaro quelli con un livello di significatività inferiore a 0.05.

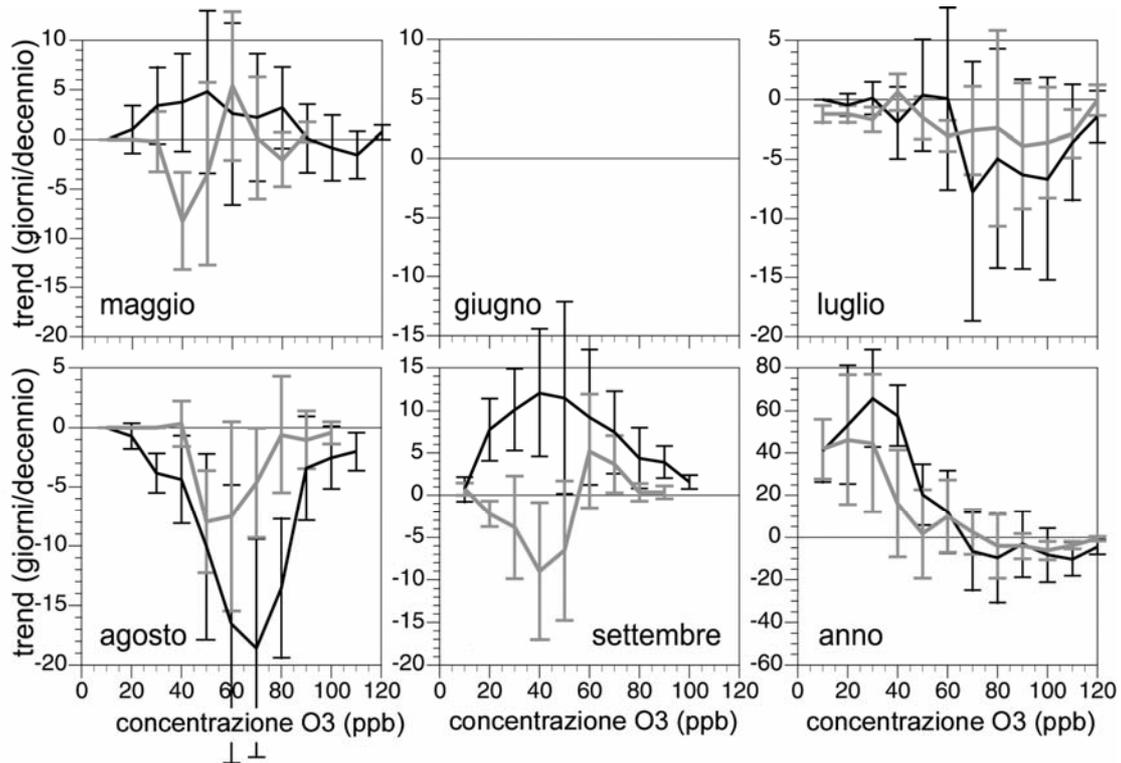
staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
BIO	2.5	17.4	1.7	7.1	-2.8	-10.3	-6.4	-6.2	-3.8	0.9	16.9	6.1
BOD	1	11.4	6.8	13	-4.4	-2.8	-9.9	-3.1	0.3	4.9	10.5	6.8
BRI	1.9	8.2	4.9	-1.7	-15.5	-9.6	-15.1	-13.8	-4.5	3	4.2	0.8
CAS	14.2	14.1	0.9	8.7	-6	-3.9	-13.1	-13.7	0.3	7	12	4.5
CHI	4	9.5	14.2	13.1	-4.1	4.8	-14.7	-15.7	-1.6	5.4	8.1	1.8
LGN	4.5	-4.9	9.3	-3.6	-19.3	-9.1	-21.2	-18.1	-8.9	-0.1	3.2	4.3
LOC	5.7	17.7	16.8	14.1	0	7.8	5.1	-2.7	-1.1	6.8	7	3
LUG	8	17.3	19.8	12.1	8.6	4.7	2.7	3.4	12.4	12.4	13.4	7.7
MAG	8.3	22.7	15.8	32.1	20	4.5	-1.8	-0.4	3.8	6.7	16.2	10.7
MEN	5.8	7.3	10.7	4	-19.2	-1.8	-15.2	-18.1	-9	1.6	8.8	3.3
ROM	13.4	10.8	2.2	7.4	-9.5	0	-2.9	-2.2	5	7.8	11.7	8.6

Tabella A3 Trend dei massimi di ozono misurati (in ppb/decennio). In grigio scuro sono marcati i trend per i quali il livello di significatività (p) è inferiore a 0.01, in grigio chiaro quelli con un livello di significatività inferiore a 0.05.

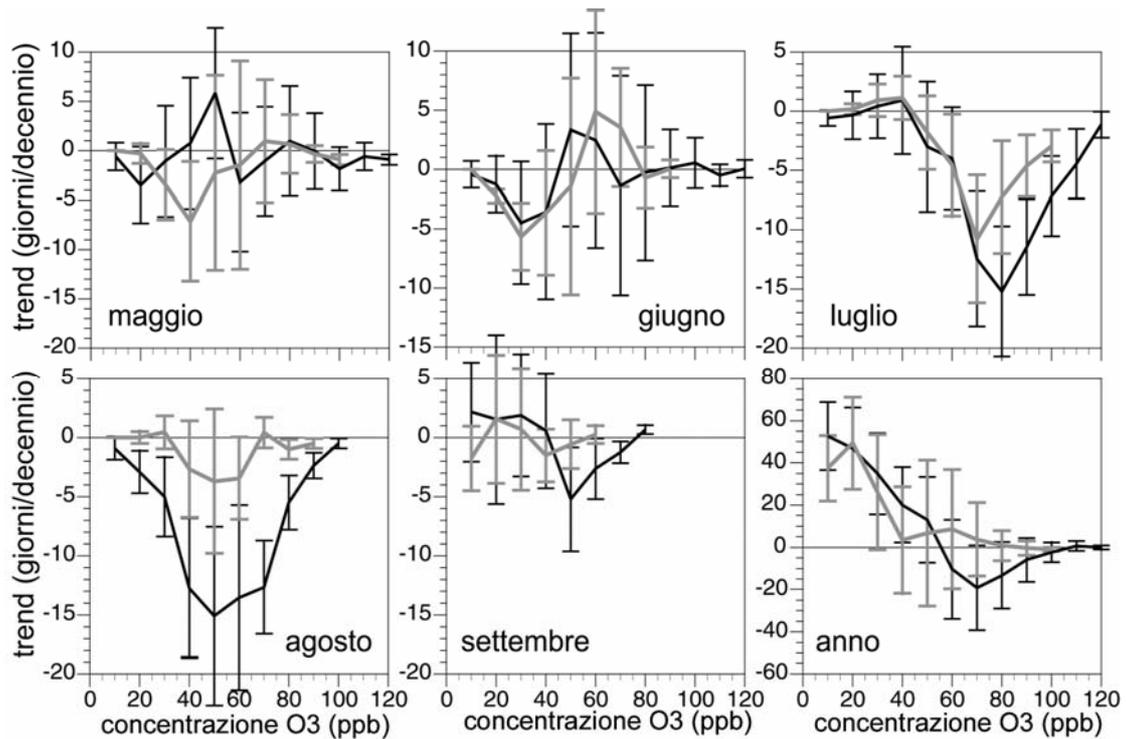
staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
BIO	4.4	23.9	-1.6	7.4	5	3.1	-13.7	-23.8	18	5.5	14.3	5.3
BOD	0.6	11.1	7.6	11.7	-2	-0.1	-18.3	-22.8	-2.3	8.2	9.8	5.8
BRI	2.3	9.3	1.5	0.6	-14.1	-4.5	-23.7	-26.5	-8.3	8.2	3.8	1.2
CAS	13.6	17.6	1.1	7.3	-0.2	-2.3	-22.3	-32.3	-2.5	11.3	11.6	4.4
CHI	4.3	10.6	15.6	20.2	0.6	13	-25.4	-31.2	-3.9	11.8	8.1	1.7
LGN	5.1	-3.1	5.7	0	-15.6	-0.2	-24.7	-29.1	-10.6	4.3	3	4.4
LOC	5.8	18.2	14.5	15.7	3.1	13	-1.8	-14.6	-7	10.7	6.9	3.1
LUG	8.5	18.6	16.2	16.5	7.9	12.2	-4.5	-13	8	17.9	13.3	8
MAG	8.7	24.6	16.3	31.2	19.2	6.9	-9.7	-16.1	1	11.6	15.4	10.6
MEN	7.3	14.2	10.3	8.6	-6.3	5.6	-25.2	-33.6	-11.1	7.6	8	3.7
ROM	12.2	13.5	2.2	6.5	-8.8	-0.2	-6.5	-15.8	10.6	11.2	11.4	7.4

## A6.2 Trend del numero di superamenti del limite

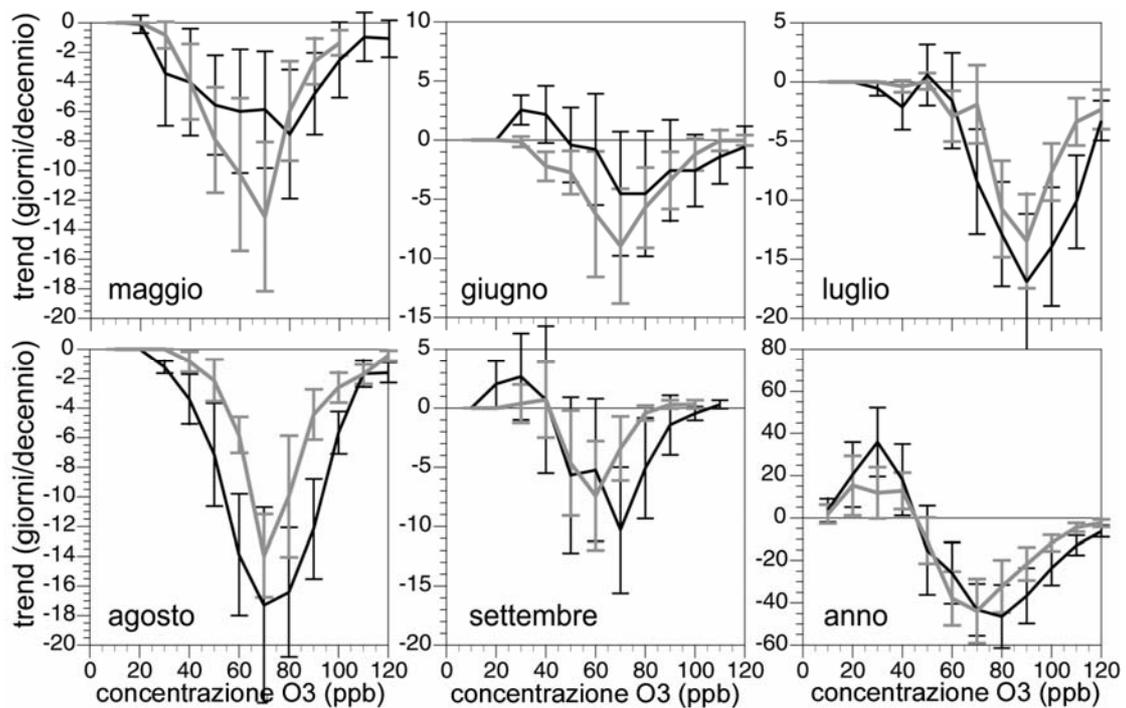
Di seguito sono riportati i diagrammi dei trend del numero di superamenti di un determinato limite, descritti in dettaglio nella sezione 6.2, delle stazioni di Bioggio, Bodio, Brione, Castaneda, Chiasso, Lugano TI, Locarno, Lugano NABEL, Magadino, Mendrisio e Roveredo Municipio. Il periodo considerato è il decennio 1990-1999.



**Figura A16** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Bioggio.

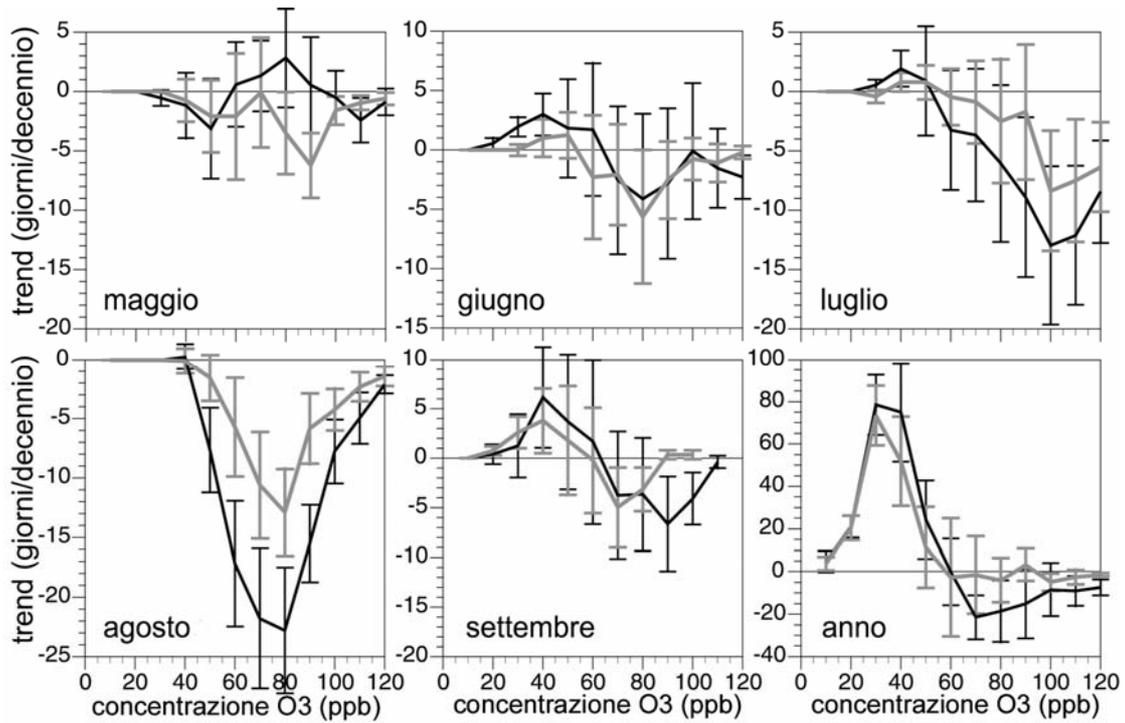


**Figura A17** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Bodio.

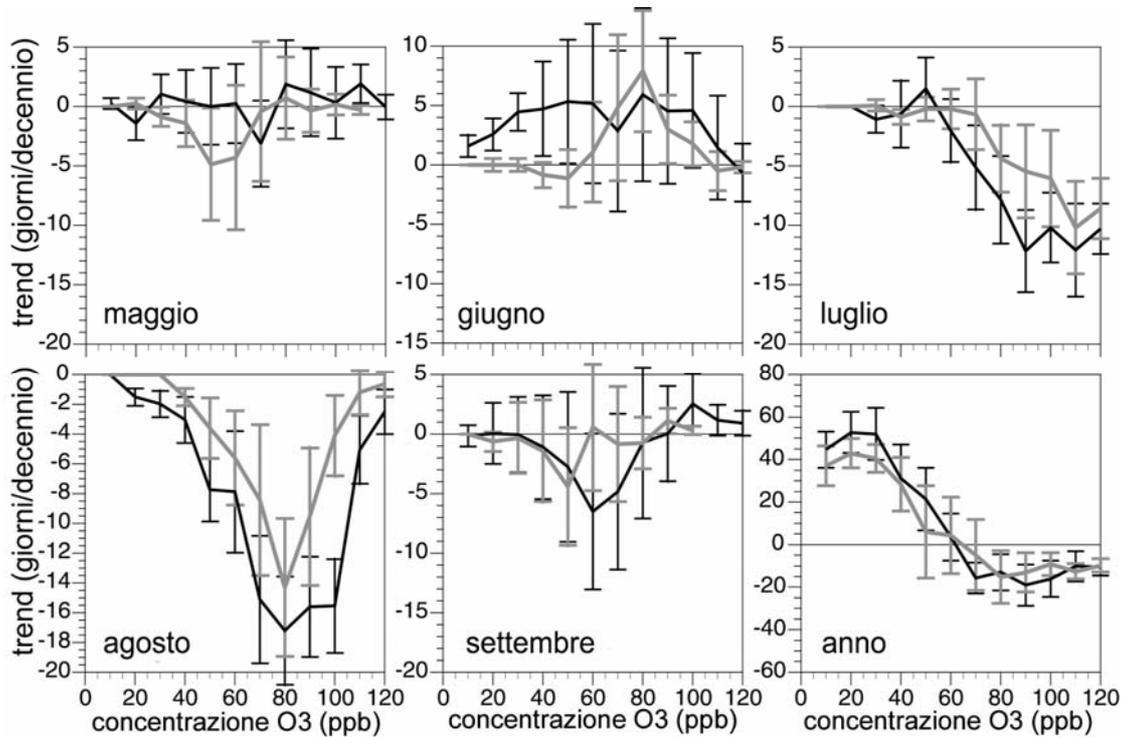


**Figura A18** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Brione.

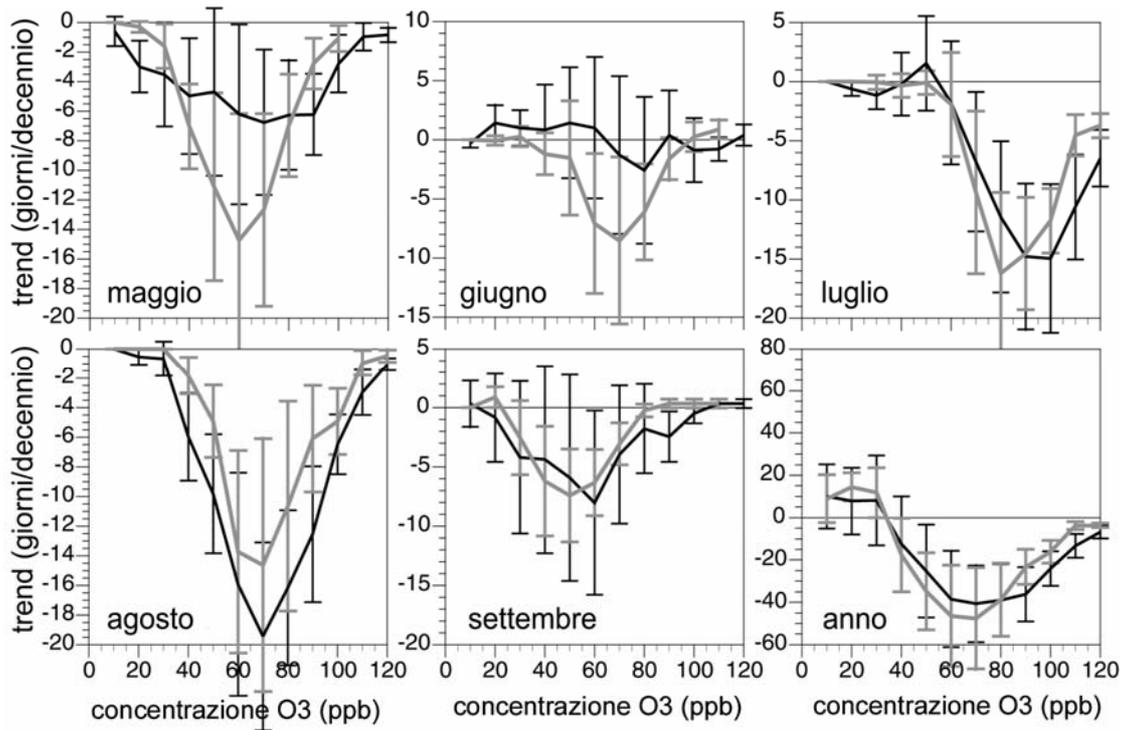
A16



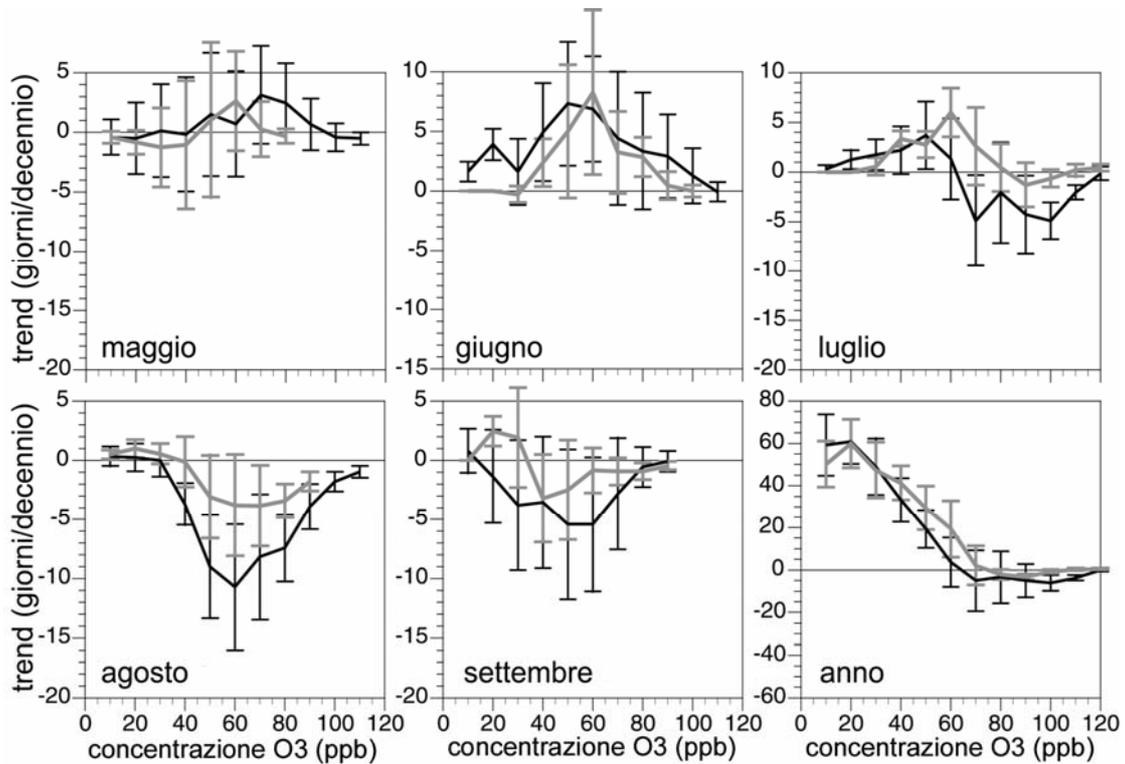
**Figura A19** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Castaneda.



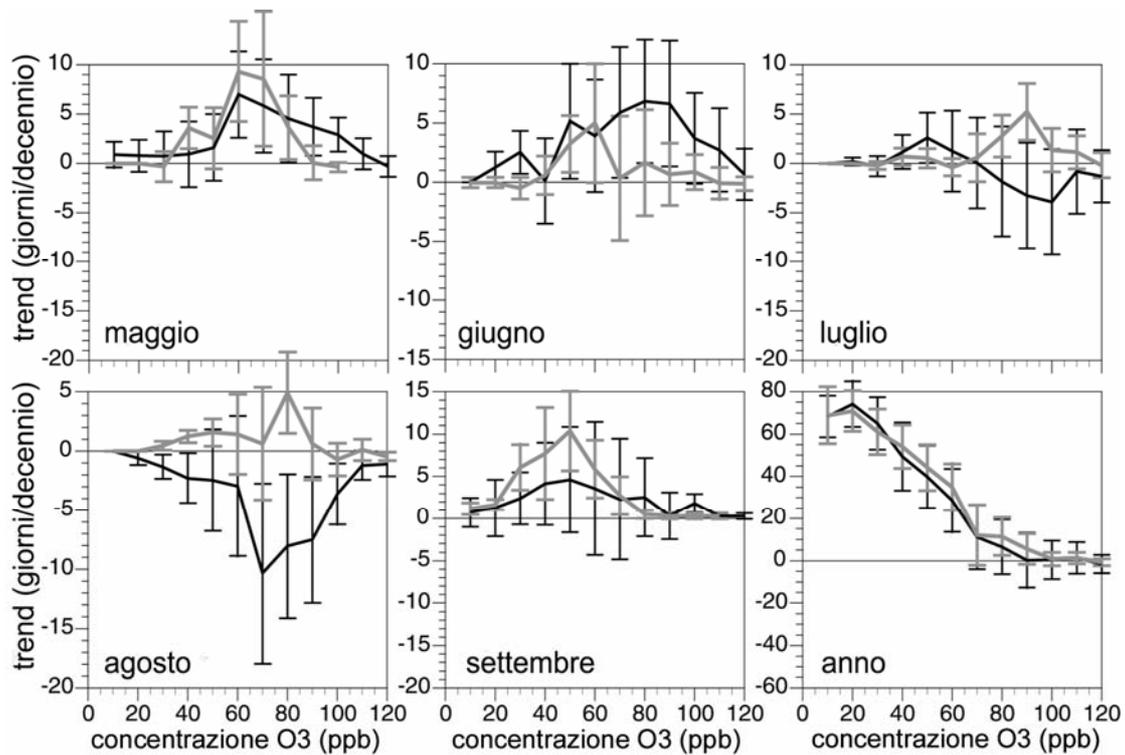
**Figura A20** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Chiasso.



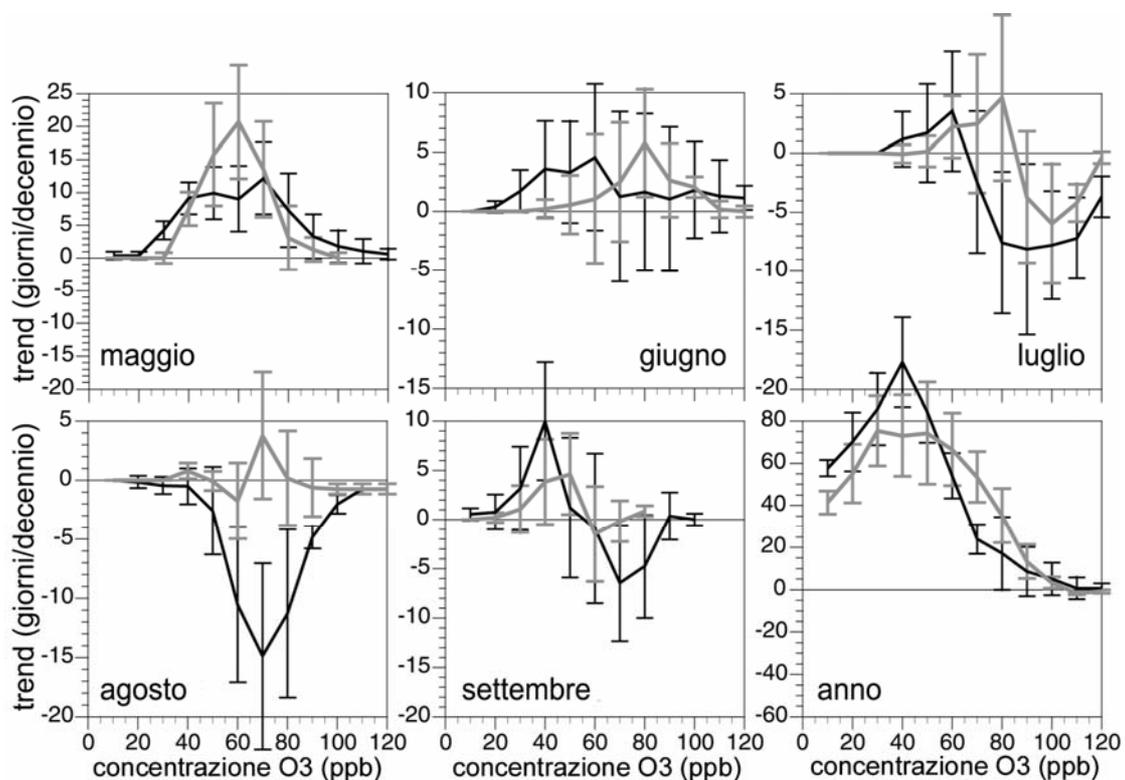
**Figura A21** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Lugano TI.



**Figura A22** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Locarno.

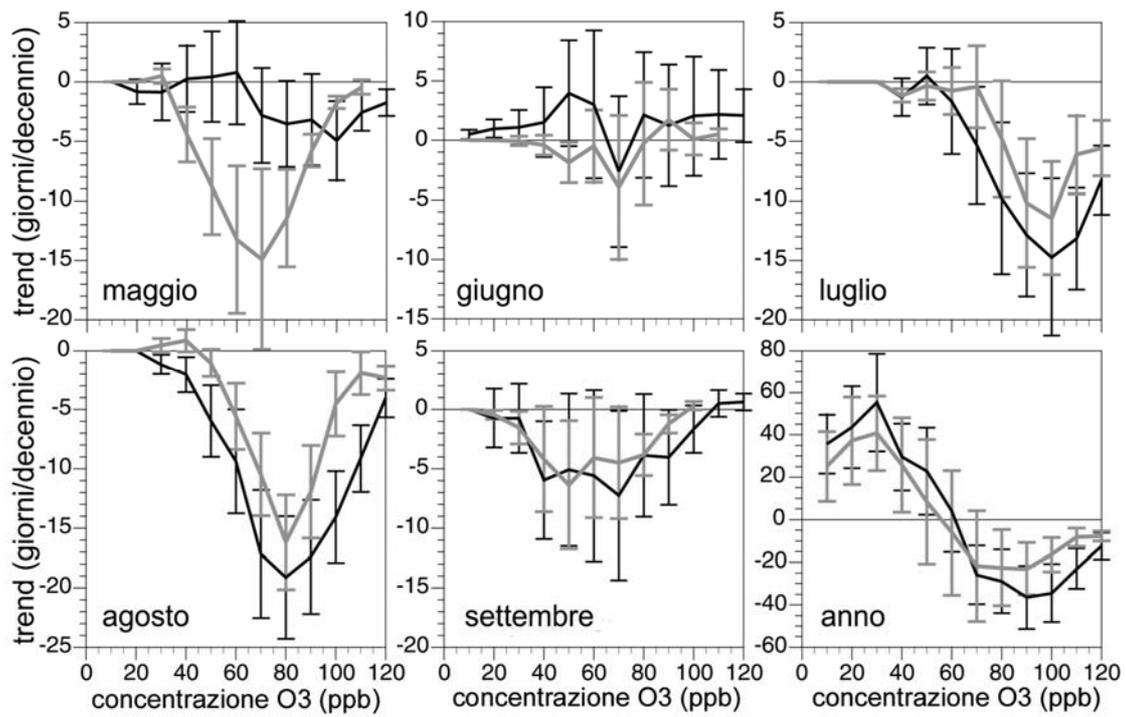


**Figura A23** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Lugano NABEL.

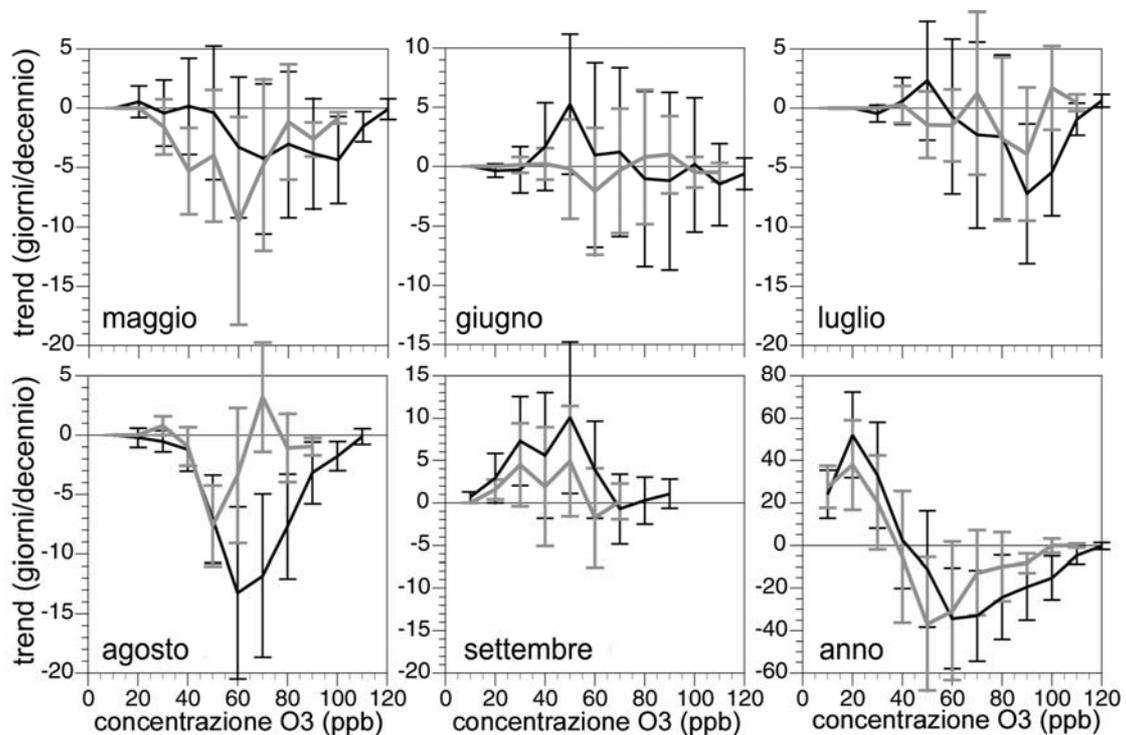


**Figura A24** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Magadino.

A19



**Figura A25** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Mendrisio.



**Figura A26** Trend del numero di superamenti mensili di una determinata concentrazione di ozono in funzione della concentrazione di ozono a Roveredo Municipio.

## A7 Trend dei massimi di $O_x$

Tabella A4 Trend dei massimi di  $O_x$  (in ppb/decennio) corretti meteorologicamente con il modello M2 (temperatura pomeridiana e giorno settimanale). In grigio scuro sono marcati i trend per i quali il livello di significatività ( $p$ ) è inferiore a 0.01, in grigio chiaro quelli con un livello di significatività inferiore a 0.05.

staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
BIO	-2.7	-0.6	-16.3	0.5	-4.2	-9.9	-7.3	-7.4	-2	4.6	3.7	0.8
BOD	-15.6	-9.7	-9.9	3.1	-6.6	-10.4	-17.2	-8.5	-2.7	-1.3	-5.5	-5
BRI	-11.5	-3	-4.1	-5.1	-18.6	-15.8	-18.2	-15.5	-8.8	-2.9	-2.2	-6.3
CHI	-35.4	-33.2	-5.4	-0.5	-14.8	-4.4	-27.9	-21	-11	-7.2	-23.9	-36.5
LGN	-3.6	1	11.6	1	-16.5	-7.8	-24.3	-18.4	-16.6	-4.4	-10.4	-11.9
LOC	-12.2	0.1	3.7	7.8	-9	1.2	-8.6	-6.7	-11.8	2.3	-5.4	-3.8
LUG	-13.7	-11	0.6	3.5	7.4	0.7	-3.6	-2.1	3.2	2.5	-6.9	-8
MAG	-9.1	3	7.6	33	21.5	5.3	0.6	1.8	4	3.1	1.9	0.7
MEN	-13.3	-15.3	4.1	-3	-24.6	-7.6	-20.5	-23.3	-13.1	1.2	-4.6	-5.4

Tabella A5 Trend dei massimi di  $O_x$  misurati (in ppb/decennio). In grigio chiaro sono marcati i trend con un livello di significatività inferiore a 0.05.

staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
BIO	-3	5.3	-19.2	1.6	3	3.6	-14.3	-24.8	20.1	12.3	3.3	0.5
BOD	-15.7	-10	-9.3	0.9	-4.8	-3.9	-25.1	-24.6	-4.4	0.2	-5.6	-4.9
BRI	-11.4	-3.6	-9	-2.8	-17.5	-10.9	-26.3	-28.1	-12.4	1.3	-2.6	-6.3
CHI	-34.3	-31.9	-3.4	5.2	-11.2	2.4	-29.2	-35.9	-12.9	-2.7	-25	-37.3
LGN	-2.6	8	6.7	5.3	-13.6	0.8	-32.1	-29.7	-17.8	-0.3	-10.9	-11.6
LOC	-12.3	1.6	1	10.2	-6.7	8.9	-11	-19.5	-16.3	4.8	-5.5	-3.3
LUG	-13.6	-9.4	-3.5	8.1	6.5	7.6	-10.1	-17.7	-0.7	7.2	-7.1	-7.9
MAG	-9.3	4.3	8	32.2	20.6	7.8	-7.5	-13.4	1.3	7.4	2.8	0.6
MEN	-12.4	-8.1	4	2.6	-13	-0.7	-36.6	-38.2	-15	6.4	-5.4	-5.7

## A8 Trend dei valori AOT40

Tabella A6 Trend dei valori AOT40. Sono stati presi in considerazione solo i mesi con almeno 20 giorni aventi misure valide. Eventuali valori mancanti sono stati calcolati in un secondo tempo con il modello M2 (temperatura pomeridiana e giorno settimanale) e poi integrati nelle somme. **In grigio scuro** sono marcati i trend per i quali il livello di significatività (p) è inferiore a 0.01, **in grigio chiaro** quelli con un livello di significatività inferiore a 0.05.

staz	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
BIO	0.045	0.241	0.187	1.03	1.263	-0.607	-1.812	-4.708	1.864	0.123	0.012	0
BOD	0	0	0.645	0.837	0.025	0.449	-2.666	-2.37	-0.398	0.002	0	0
BRI	0	0.209	0.234	0.418	-2.738	-1.187	-5.407	-5.03	-1.64	0.051	0.008	0.001
CAS	0.094	1.074	0.645	2.358	0.013	0.194	-5.103	-6.621	-1.175	0.144	0.023	0.005
CHI	0	0.02	0.245	2.3	0.731	1.966	-5.201	-6.006	-0.512	0.205	0.004	0
LGN	0.003	-0.01	0.101	-0.402	-2.743	-1.008	-6.535	-6.209	-1.498	-0.089	0	0.001
LOC	0	0.087	0.544	1.297	0.923	1.657	-0.831	-2.468	-0.61	0.033	0	0
LUG	0	0.136	0.962	1.929	1.779	2.08	-1.559	-2.72	0.725	0.23	0.004	0
MAG	0.009	0.456	1.587	3.978	3.421	1.675	-2.212	-3.409	-1.021	0.064	0.001	0.004
MEN	0.006	0.253	0.859	1.514	-0.807	0.882	-5.654	-6.576	-1.231	0.061	0.041	0
ROM	-0.014	0.166	0.16	0.749	-0.942	0.072	-1.627	-2.838	0.83	0.26	0.005	0.021