

Francesca Bruno Daniela Cocchi

Sulla costruzione di indici per la qualità
dell'aria

Serie Ricerche 2000, n.4



Dipartimento di Scienze Statistiche "Paolo Fortunati"
Università degli studi di Bologna



Gruppo di Ricerca per le Applicazioni
della Statistica ai Problemi Ambientali

Working paper GRASPA n. 1

Francesca Bruno Daniela Cocchi

Sulla costruzione di indici per la qualità dell'aria

Il lavoro è frutto della collaborazione tra i due autori. Per quanto riguarda la stesura, Francesca Bruno ha curato i paragrafi 2.3, 2.4 del capitolo 2 ed i capitoli 3 e 4; Daniela Cocchi ha curato il capitolo 1 e i paragrafi 2.1, 2.2 e 2.5 del capitolo 2.

Il lavoro è stato realizzato nell'ambito del progetto "Metodi statistici per l'analisi dell'ambiente e delle interazioni ambiente-salute", finanziato con il contributo 1998 per ricerche di interesse nazionale del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica.

Finito di stampare nel mese di Maggio 2000
presso le Officine Grafiche Tecnoprint
Via del Legatore 3, Bologna

SULLA COSTRUZIONE DI INDICI PER LA QUALITÀ DELL'ARIA

Indice

1	Introduzione	Pag	5
2	La riduzione di dimensionalità tramite processi di aggregazione	Pag	7
	2.1	Pag	7
	2.2	Pag	8
	2.2.1	Pag	9
	2.2.2	Pag	11
	2.3	Pag	13
	2.4	Pag	14
	2.4.1	Pag	14
	2.4.2	Pag	16
	2.5	Pag	18
3	La considerazione della dispersione	Pag	22
	3.1	Pag	24
4	Conclusioni	Pag	31

1. Introduzione

L'interesse nei confronti della costruzione di indici per la qualità dell'aria è testimoniato da molti anni di dibattito, a partire dai lavori fondamentali di Ott e Hunt (1976) e Ott (1978), fino ai contributi più recenti di Hamekoski (1998), Swamee e Tyagi (1999), Kassomenos *et al.* (1999).

La costruzione di un indice sintetico si articola secondo i seguenti passi. Devono essere definiti indici elementari di partenza, si deve proporre l'ordine con cui aggregarli, si devono scegliere sia una funzione di aggregazione sia i procedimenti per togliere l'unità di misura (Fraire, 1989; Agostinelli *et al.*, 1996).

La copiosa normativa relativa alla definizione di linee guida e all'indicazione di soglie di attenzione e di allarme relative a situazioni acute di inquinamento (D.M. 15/04/1994, D.M. 16/5/1996) ha fatto sì che le diverse istituzioni che sorvegliano la qualità dell'aria pubblicino valori sintetici ispirati da criteri di base diversi. Le istituzioni che hanno l'obbligo di raccogliere e fornire ai cittadini informazioni sulla qualità dell'aria usano metodi e strategie difformi, seppure tutte con l'obiettivo comune di offrire valutazioni sulla qualità dell'aria legate agli effetti sulla salute (Colombo, 1996).

Le differenze negli indici che vengono proposti sono dovute al fatto che, per la loro costruzione, debba essere trovato un criterio sia per la standardizzazione che per l'aggregazione. La standardizzazione è richiesta dalla diversa unità di misura, o dal diverso ordine di grandezza, degli inquinanti e dalla loro diversa pericolosità. L'aggregazione è dovuta alla molteplicità degli inquinanti, al numero delle postazioni in cui sono rilevati e al ripetersi delle rilevazioni nel tempo. Aggregazione e standardizzazione sono due processi che si intersecano a seconda di quale sia la scelta dell'ordine di aggregazione rispetto alle dimensioni dei dati.

In letteratura, gli orientamenti per la definizione degli indici sono quello delle medie analitiche, ponderate ed eventualmente potenziate (Swamee e Tyagi, 1999) o quello delle medie di posizione (Thomas, 1972; Attanasio e Capursi, 1997). In questa occasione si privilegiano le medie di posizione. Le ragioni di tale scelta risiedono nelle proprietà di tali medie, più robuste di quelle analitiche in caso di dati con qualità non sempre sotto controllo, e nella difficoltà di proporre elevamenti a potenza e ponderazione con rilevanza non solo matematica, ma anche sostanziale e interpretativa.

In questo lavoro viene proposta una descrizione unificante del processo di aggregazione dei dati per costruire gli indici di qualità dell'aria. Il processo, che si svolge attraverso fasi successive di aggregazione, può richiedere l'eliminazione dell'unità di misura del fenomeno e permette di mettere in rilievo quando siano possibili scelte alternative, di verificare in quali casi l'ordine di aggregazione influenzi il risultato finale, di apprezzare a che punto sia necessaria una standardizzazione.

Per la standardizzazione la proposta formulata utilizza, per ogni inquinante considerato, una classificazione in base a soglie di rischio per la salute. La classificazione è, in genere, dovuta al contributo di esperti, ed è esterna e precedente alla costruzione dell'indice. La scelta di una particolare classificazione delle concentrazioni degli inquinanti in base a soglie "critiche" di inquinamento influenza il comportamento dell'indice e l'interpretazione dei suoi risultati. Se si usano in modo flessibile le informazioni raccolte calcolando diverse sintesi, si traggono comunque indicazioni utili anche subordinatamente alla scelta effettuata.

Accettando la descrizione suddetta, è possibile assegnare un indice di qualità dell'aria ad un punto specifico della descrizione stessa, facilitando il confronto tra soluzioni alternative. Poiché il procedimento di aggregazione non è unico, può essere utile presentare l'indice finale affiancandolo con l'indicazione della postazione o dell'inquinante che l'hanno determinato.

Ai vari passi del processo di aggregazione può essere proposta più di una sintesi. Sfruttando questa opportunità, si possono calcolare simultaneamente indici che controllano il comportamento dei valori più alti e dei valori medio bassi. Il comportamento dell'indice (ed eventualmente di più indici congiuntamente) può essere studiato, in particolare, in corrispondenza di valori medio-bassi, per verificare la presenza di innalzamenti dei valori di fondo degli inquinanti.

L'utilizzazione contemporanea di più indici permette inoltre di dare risalto aspetti complementari dell'inquinamento. In particolare un certo tipo di sintesi mette in evidenza la presenza di episodi acuti di inquinamento isolati nel territorio, mentre la sintesi complementare dà rilievo all'eventualità della diffusione spaziale di valori elevati di inquinamento.

A fianco della proposta di impiegare più di una sintesi, suggeriamo di utilizzare le informazioni in modo da tenere conto della dispersione dei valori rilevati in fasi particolari del processo di aggregazione, in quanto, nella presentazione degli indici sintetici sulla qualità dell'aria, solitamente non si considera la variabilità dei valori che vengono sintetizzati.

Proponendo l'uso simultaneo di più indicatori, ci sembra di avere trovato una via che permetta di seguire in modo continuo l'evoluzione dell'inquinamento, anche in presenza di spostamenti delle postazioni.

2. La riduzione di dimensionalità tramite processi di aggregazione

Il dato elementare consiste nella misurazione effettuata con uno strumento automatico che rileva quasi nel continuo e che fornisce solitamente medie orarie.

Il periodo di tempo di riferimento viene fissato ex ante (costruzione di un indice orario, giornaliero, settimanale, mensile...).

L'aggregazione, dai dati elementari all'indice finale, si interseca con la standardizzazione in momenti diversi, secondo quanto illustrato in seguito.

Consideriamo il caso in cui il dato elementare X_{ijh} è espresso in unità di misura (non necessariamente uguale per ogni inquinante) ed è riferito a tre dimensioni, dove $i=1,\dots,I$ è un indice che scorre sulle postazioni, $j=1,\dots,J$ è un indice che scorre sugli inquinanti, $h=1,\dots,H$ è un indice che scorre sul numero di misurazioni effettuate nel periodo di tempo di riferimento (ad esempio $H=24$ nel caso di un indice giornaliero).

L'aggregazione è compiuta eliminando (integrando, sommando o scegliendo un valore medio di posizione) tali dimensioni, ma distinguendo l'ordine con cui l'aggregazione avviene.

2.1 Aggregazione temporale

Essa avviene applicando una funzione ai dati elementari:

$$X_{ij} = f(X_{ijh}) \quad (1)$$

Spesso, l'applicazione della funzione di aggregazione (1) ricava un valore giornaliero a partire da valori orari. Per ciascun inquinante, esistono norme di legge (D.M. 15.04.94), o comunque direttive impartite da organi competenti, che consigliano un tipo di sintesi giornaliera, non necessariamente uguale per ognuno. Nel prospetto seguente riportiamo la misura sintetica giornaliera suggerita per 5 inquinanti fondamentali, richiamati costantemente dalla normativa italiana.

Inquinante	Funzione (1) suggerita per la sintesi giornaliera
Biossido di Zolfo SO ₂	Media su 24 ore (μg / m ³)
Biossido di Azoto NO ₂	Max oraria (μg / m ³)
Monossido di Carbonio CO	Max oraria (mg / m ³)
Ozono O ₃	Max oraria (μg / m ³)
Particelle sospese PTS	Media su 24 ore (μg / m ³)

Fonte: D.M. 15.04.94.

I confronti devono quindi essere tanto più prudenti se la funzione che viene utilizzata per ottenere la sintesi (1) non corrisponde a quella tradizionalmente consigliata dalle leggi.

Di solito, la presentazione delle (1) consiste nella serie storica di ciascun inquinante per postazione, più adatta per confronti analitici che per considerazioni sintetiche.

Tramite la funzione (1), si ottiene, per ogni unità temporale, una tabella di dimensione $I \times J$ che, letta secondo le righe, contiene, per una postazione, la sintesi relativa a tutti gli inquinanti e, letta secondo le colonne, contiene le sintesi di un inquinante per le diverse postazioni. Ad esempio, la presentazione quotidiana dell'A.R.P.A. regionale dell'Emilia Romagna contiene le sintesi (1).

Le celle della tabella possono essere nulle. Ciò avviene in modo strutturale nel caso di inquinanti non rilevati in tutte le postazioni. Il caso tipico riguarda l'ozono, rilevato di solito soltanto nelle postazioni di tipo A o D, situate in giardini o parchi. Avviene invece in modo saltuario quando la sintesi (1) non è disponibile.

La funzione (1) può anche essere la funzione identità e in tal caso si calcolano successivamente indici sintetici orari.

2.2 Eliminazione delle altre dimensioni

L'ordine con cui vengono eliminate le due ulteriori dimensioni può influenzare il risultato. Consideriamo infatti distintamente i due percorsi in cui l'ordine di aggregazione riguarda, rispettivamente, prima la dimensione spaziale e poi la dimensione degli inquinanti, oppure prima la dimensione degli inquinanti e poi la dimensione spaziale.

2.2.1 Aggregazione postazione-inquinante

a) In questo percorso viene in primo luogo eliminata la dimensione spaziale. Questo avviene applicando un'ulteriore funzione alle (1). La funzione proposta è una media di posizione. Tra esse, percorrendo la matrice per colonne, può essere scelto il massimo

$$X_{\max(j)} = \max_i \{X_{ij}\} \quad (2)$$

o un valore di sintesi centrale, come la mediana

$$X_{\text{med}(j)} = \text{med}_i \{X_{ij}\} \quad (3)$$

La scelta di funzioni di aggregazione che selezionano valori medi di posizione è indicata perché è abbastanza robusta da fronteggiare la presenza di dati mancanti occasionalmente.

La (3) è più giustificata della (2) quando non si intende selezionare i valori estremi nelle diverse postazioni, ma valori di tendenza centrale. Corrisponde anche, in linea di massima, al dettato della legge del '94 (D.M. Ambiente, 1994), che disponeva misure restrittive del traffico quando si fosse osservato che il 50% più una delle postazioni superasse la soglia di attenzione o di allarme per alcuni inquinanti.

L'aggregazione spaziale non richiede la standardizzazione, in quanto ciascuna sintesi riguarda valori espressi nella stessa unità di misura, o nello stesso ordine di grandezza.

L'eliminazione della dimensione spaziale ha come risultato, per ogni unità temporale, un vettore riga di sintesi dei diversi inquinanti, di dimensione J , ciascuno espresso nella propria unità di misura, riferito ad una postazione "media".

Se si interrompe a questo punto il processo di aggregazione, si dispone delle serie storiche dei diversi inquinanti secondo la dimensione temporale scelta con la (1). Possono essere presenti differenze nelle scale.

b) Per poter ulteriormente aggregare valutazioni sintetiche di inquinanti diversi si deve eliminare l'effetto dell'ordine di grandezza, o dell'unità di misura. Per la standardizzazione, le diverse proposte si servono, per ciascun inquinante considerato, di classificazioni delle concentrazioni di inquinanti secondo l'appartenenza ad una classe identificata da soglie di rischio per la salute.

La determinazione delle classi è, in genere, dovuta al contributo di esperti ed è esogena e precedente alla costruzione dell'indice. Il comportamento dell'indice e l'interpretazione dei risultati sono condizionati da questa scelta iniziale.

Si segue l'impostazione del più diffuso indice che dà luogo ad una sintesi tra inquinanti, effettuando una standardizzazione attraverso una funzione lineare a tratti. La funzione lineare a tratti proposta per l'indice PSI (*Pollution Standard Index*) di Ott e Hunt (1976) si traduce, nel nostro caso, in:

$$f(y_j) = \begin{cases} \frac{b_{k+1} - b_k}{a_{(k+1)j} - a_{kj}} (y_j - a_{kj}) + b_k & \text{per } a_{kj} < y_j \leq a_{(k+1)j}, \\ & k = 1, \dots, K; \forall j = 1, \dots, J \end{cases} \quad (4)$$

dove a_{kj} sono le soglie¹ che delimitano le diverse classi di qualità dell'aria per ciascun inquinante e b_k i valori trasformati delle concentrazioni riportate in una scala unica da 0 ad un valore massimo.

Nella sua formulazione originaria, il PSI sintetizza i valori rilevati in una sola postazione (ad esempio, ciò avviene anche nella recente proposta di Hamekoski, 1998). In questa occasione si propone che la sintesi venga effettuata su di un vettore che rappresenta un'aggregazione rispetto alle postazioni.

A seconda del tipo di sintesi scelta in precedenza, nella (4) il valore y può essere scelto alternativamente come massimo o mediana, secondo la (2) o la (3):

$$y = \{\max, \text{med}\} \quad (5)$$

La funzione (4), a seconda che si parta da un vettore di massimi (2) o di mediane (3), dà comunque luogo ad un vettore di dimensione J .

L'ulteriore aggregazione in un valore unico avviene con la scelta (5) di un valore di posizione, massimo o mediana, a partire dalla (2) o dalla (3) trasformati con la (4). Si ottengono quindi, rispettivamente, dalla (2), tramite la (4):

$$I1_{MM} = \max_j f(X_{\max(j)}) \quad (6)$$

¹ Le soglie utilizzate nella trasformazione si trovano nella Tabella A.1 in Appendice

e, dalla (3), tramite la (4):

$$I1_{mm} = \max_j f(X_{\text{med}(j)}) \quad (7)$$

Si noti che la (6) corrisponde al PSI di Ott e Hunt (1976) con riferimento non alla singola postazione, ma alla situazione più complessa in cui si è effettuata una sintesi relativa alle postazioni.

Allo scopo di proporre valori di indici che mettono in risalto situazioni non estreme, partendo sempre dalla (2) e dalla (3), passando dalla trasformazione (4), invece di selezionare i massimi si selezionano le mediane:

$$I1_{mM} = \text{med}_j f(X_{\max(j)}) \quad (8)$$

$$I1_{mm} = \text{med}_j f(X_{\text{med}(j)}) \quad (9)$$

2.2.2 Aggregazione inquinanti-postazioni

a) Per eliminare la dimensione degli inquinanti, si deve in primo luogo eliminare l'effetto dell'ordine di grandezza attraverso la standardizzazione dei valori registrati nella postazione. Percorrendo la matrice dei valori (1) per riga, ogni cella infatti contiene grandezze che possono essere espresse in scale diverse.

La funzione lineare proposta da Ott e Hunt (1976) e applicata alle (1) è quindi:

$$f(X_{ij}) = \begin{cases} \frac{b_{k+1} - b_k}{a_{(k+1)j} - a_{kj}} (X_{ij} - a_{kj}) + b_k & \text{per } a_{kj} < X_{ij} \leq a_{(k+1)j}, \\ & k = 1, \dots, K; \forall i, j \end{cases} \quad (10)$$

in cui a_{kj} sono le soglie² che delimitano le diverse classi di qualità dell'aria per ciascun inquinante, e b_k i valori trasformati delle concentrazioni riportate in una scala unica da 0 a un valore massimo.

² Le soglie utilizzate nella trasformazione si trovano nella Tabella A.1 in Appendice

La funzione (10) effettua una standardizzazione della matrice che ha come elementi i valori (1) per J volte, separatamente per ciascun vettore colonna di dimensione I . Dopo la standardizzazione, le sintesi analoghe alla (2) e alla (3), compiute sui dati trasformati con la (10), sono

$$I(\max_i) = \max_j f(X_{ij}) \quad (11)$$

$$I(\text{med}_i) = \text{med}_j f(X_{ij}) \quad (12)$$

In questo modo si ottiene un vettore colonna di valori standardizzati di sintesi rispetto agli inquinanti e di dimensione I , pari al numero delle postazioni. La presentazione quotidiana dell'A.R.P.A. regionale dell'Emilia Romagna contiene le sintesi (11).

b) L'aggregazione in un solo valore delle sintesi standardizzate sugli inquinanti avviene, anche in questo caso, selezionando massimi o mediane. La selezione del massimo dalla colonna (11) dà luogo a:

$$I2_{MM} = \max_i I(\max_i) \quad (13)$$

mentre la stessa funzione applicata alla (12) dà:

$$I2_{Mm} = \max_i I(\text{med}_i) \quad (14)$$

L'indice (13) coincide con il (6): se si ragiona in un'ottica strutturalmente simile al PSI di Ott e Hunt (1976), il percorso di aggregazione non ha rilevanza perché la selezione del massimo tra i massimi prescinde dalla gerarchia stessa.

Allo scopo di seguire l'andamento di indici che mettono in risalto situazioni non estreme, partendo sempre dalla (11) e dalla (12), si selezionano le mediane piuttosto che i massimi.

$$I2_{mi} = \text{med}_i I(\max_i) \quad (15)$$

$$I2_{mm} = \text{med}_i I(\text{med}_i) \quad (16)$$

Gli indici (8), (9), (15) e (16) che, al terzo passo di aggregazione, selezionano il valore mediano della distribuzione ottenuta precedentemente, non saranno usate direttamente come indici di qualità dell'aria. Essi costituiscono il punto di partenza per la costruzione di misure di dispersione collegate agli indici (6), (7), (13) e (14) che si basano su valori massimi.

Gli indici $I1_{MM}(=I2_{MM})$, $I1_{Mm}$ e $I2_{Mm}$ considerati insieme, costituiscono invece proposte complementari per la valutazione della qualità dell'aria.

2.3 Interpretazione degli indici

L'ordinamento descritto nel paragrafo 2.2.1, che considera per ultima l'aggregazione degli inquinanti, permette di ritardare la standardizzazione. Se si propone l'altro ordinamento, presentato nel paragrafo 2.2.2, che considera per ultima l'aggregazione spaziale, è necessario calcolare prima un vettore standardizzato per ciascuna postazione, ottenendo un indice sintetico di postazione su tutti gli inquinanti.

La letteratura non sembra tenere conto esplicitamente delle tre fasi e parla, senza distinzioni, di calcolo di sub-indici, dando rilievo quasi esclusivamente all'aggregazione dei dati relativi ad una singola postazione. Invece le sintesi intermedie hanno significati molto diversi e il valore finale (7) o (14), proposto a partire da (3) o da (12), varia al variare dell'ordine di aggregazione, così come non sono uguali le sintesi finali ottenute tramite il calcolo di mediane. I valori standardizzati degli indici di qualità dell'aria possono essere sia risultato di aggregazioni intermedie sia sintesi finali. La qualità dell'aria può essere infatti valutata nell'ambito di un'aggregazione parziale o al momento della sintesi in un unico valore.

I valori soglia dell'indice standardizzato che definiscono le classi di qualità dell'aria costituiscono i punti di riferimento più importanti. Nelle applicazioni che verranno proposte, il valore 100 discrimina tra qualità buona e accettabile, il valore 200 discrimina tra qualità accettabile e scadente e il valore 300 tra scadente e pessima.

Quando il giudizio sulla qualità dell'aria è basato, come si vedrà, sull'impiego contemporaneo di più indici, non consiste soltanto nell'attribuzione del livello di qualità ad una classe, ma nella valutazione della posizione relativa dei diversi indici.

L'utilizzazione contemporanea di più indici finali che seguono i due percorsi di aggregazione permette di mettere in evidenza aspetti complementari dell'inquinamento. In particolare la sintesi postazioni-inquinanti dà risalto alla

presenza di episodi acuti di inquinamento isolati nel territorio, mentre la sintesi complementare, prima per inquinanti e poi per postazioni dà rilievo all'eventualità della diffusione spaziale di valori elevati di inquinamento.

2.4 Presentazione degli indici con informazioni sull'origine del valore

Indici aggregati come quelli proposti nel paragrafo precedente costituiscono valori riassuntivi molto sintetici, che nascondono qualche aspetto del fenomeno in esame. Presentazioni grafiche che utilizzano colori, o simboli diversi, permettono facilmente di tenere sotto controllo rispettivamente a quale inquinante o a quale postazione sia dovuto ciascun valore dell'indice. L'utilizzazione simultanea di colori e simboli permetterebbe una presentazione congiunta per inquinante e postazione.

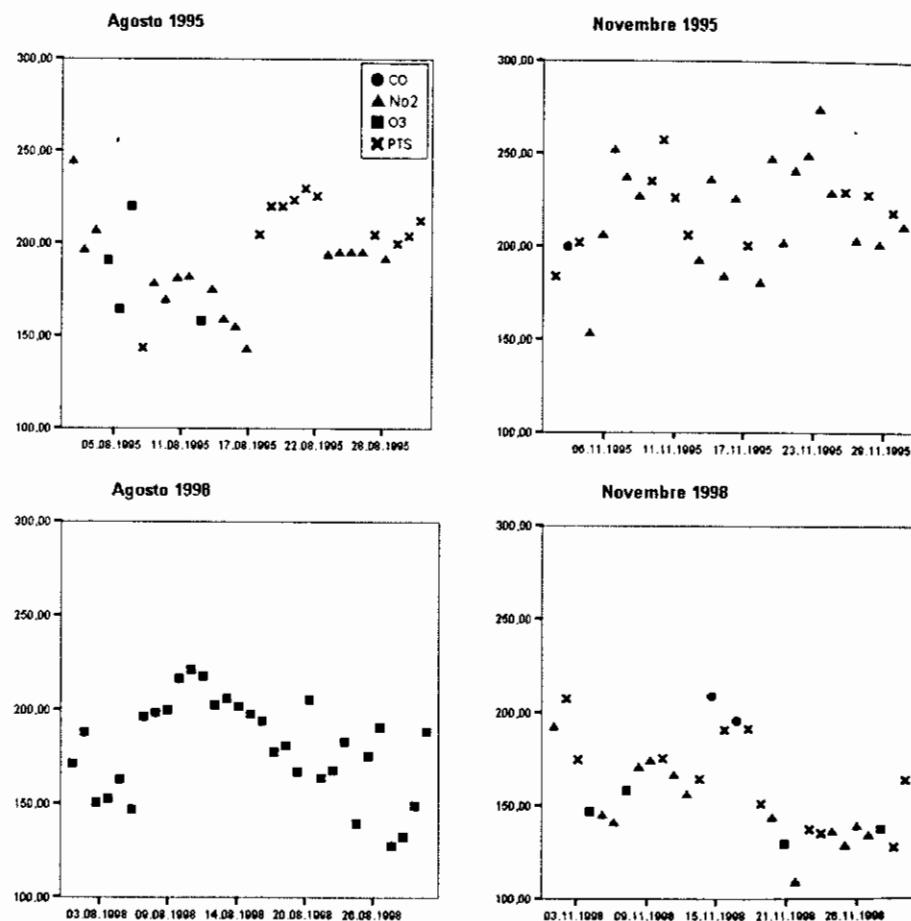
A titolo esemplificativo vengono presentati alcuni grafici costruiti sui dati della rete S.A.R.A. della città di Bologna per due mesi, relativi a due situazioni meteorologiche e di inquinamento molto diverse: agosto e novembre. Sono stati scelti due anni (1995 e 1998) per poter studiare l'evoluzione e i cambiamenti del fenomeno nel tempo. Il 1995 può essere considerato un anno rappresentativo, in quanto l'attivazione delle postazioni della rete di monitoraggio è ormai consolidata a partire dall'anno iniziale 1993; il 1998 è utile per il confronto in quanto la rete di monitoraggio è stata modificata proprio in quell'anno.

L'indice descritto è il massimo dei massimi, che può essere ottenuto indifferentemente con la (6) e con la (13).

2.4.1 Presentazione per inquinante di I_{MM}

I grafici seguenti rappresentano l'indice (6) mostrando anche quale sia l'inquinante che lo determina. In tal modo è possibile rilevare se vi siano inquinanti che più frequentemente presentano valori elevati per i periodi dell'anno considerati.

Grafico 1: Andamento dell'indice I_{MM} per inquinante rilevante



Dall'analisi del Grafico 1, si vede che gli inquinanti maggiormente pericolosi, nell'agosto 1995, risultano PTS e NO₂, anche se si manifesta anche qualche caso sporadico dovuto a O₃.

Nell'agosto 1998 si osserva come l'unico inquinante rilevante sia l'ozono, tipico dell'inquinamento estivo. Il numero dei giorni "critici" (con valori dell'indice superiori a 200), è inferiore rispetto allo stesso mese del 1995.

Il mese di novembre 1995 presenta una frequenza elevata di valori dell'indice determinati da biossido di azoto e da particolato sospeso totale e nessun caso di ozono. La situazione di inquinamento è in generale piuttosto critica. Sono pochi i giorni in cui l'indice è inferiore a 200.

Nei giorni del novembre 1998 il valore dell'indice è determinato da tutti gli inquinanti, tranne il biossido di zolfo (che non compare mai come inquinante più rilevante). La qualità dell'aria sembra migliore rispetto all'anno di confronto, essendo pochi i giorni con indice superiore a 200.

2.4.2 Presentazione per postazione di I_{2,MM}

La presentazione per postazione mira ad introdurre informazioni sulla distribuzione "spaziale" del fenomeno in esame.

Osservando il Grafico 2, le postazioni che determinano il valore dell'indice per l'agosto del 1995 sono prevalentemente Piazza dei Martiri e San Felice.

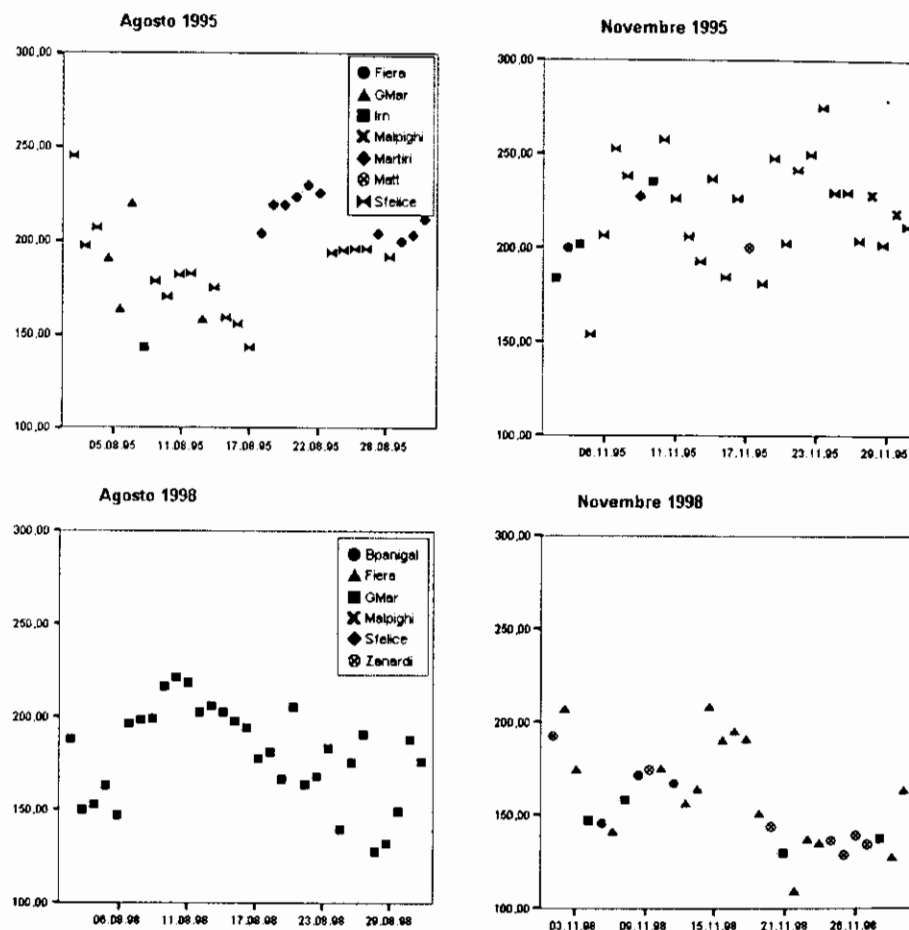
La distribuzione spaziale dell'indice di qualità dell'aria per il mese di agosto 1998 presenta una unica modalità, la postazione di Giardini Margherita. Ciò era prevedibile, sulla base del Grafico 1, poiché la sostanza inquinante rilevante era l'ozono. Tale sostanza, per la città di Bologna, viene rilevata unicamente nella stazione di monitoraggio indicata.

La presenza frequente della postazione San Felice per il novembre 1995 ne mostra la criticità. Negli anni passati tale postazione è stata fonte di diverse polemiche.

Per il novembre 1998 la postazione San Felice, spostata rispetto al periodo precedente, non risulta mai quella da cui deriva l'indice. E' invece di fondamentale importanza la postazione Fiera, con una frequenza pari a 15 giorni su 30.

I valori dell'indice per tutto il 1998 sono molto più bassi di quelli ottenuti per il 1995.

Grafico 2: Andamento dell'indice I_{2,MM} per postazione rilevante



2.5 I vantaggi della considerazione simultanea dei diversi ordini di aggregazione

Quando interessa un'informazione sintetica riguardante la manifestazione di valori acuti, si utilizzerà la sintesi (6), peraltro uguale alla (13). Nel caso in cui interessi rilevare una tendenza di fondo, si preferiranno la (7) o la (14) che selezionano il massimo in una distribuzione di valori mediani. L'esame contestuale dei diversi indici può dare informazioni utili.

La presentazione contemporanea delle serie storiche dei diversi indici mostra come i casi in cui la loro distanza è grande testimonino una situazione, dal punto di vista dell'inquinamento, più felice di quella in cui tale distanza è piccola. Si può avere un fraintendimento nell'interpretazione dell'andamento simultaneo degli indici quando l'inquinante che viene selezionato per il suo valore, rispettivamente massimo e mediano tra i massimi, viene rilevato in una sola postazione: in questo caso i valori coincidono. Tale fatto si verifica anche negli esempi qui presentati, quando il valore dell'indice deriva dal valore di un inquinante rilevato in una sola postazione. E' il caso tipico dell'ozono, rilevato generalmente nelle postazioni situate in parchi urbani e giardini per misurare l'inquinamento di fondo.

Vengono ora riportati a titolo esemplificativo gli andamenti degli indici I_{MM} (6) e I_{Mm} (7), rispettivamente massimo dei massimi e massimo delle mediane, ottenuti aggregando per postazione e poi per inquinante. A tali rappresentazioni grafiche si aggiungono anche gli andamenti degli indici I_{MM} e I_{Mm} , corrispondenti all'aggregazione secondo l'ordine inquinante-postazione, sintetizzati dalle (13) e (14). Poiché i valori dei massimi tra i massimi sono gli stessi per i due tipi di aggregazione, la (6) e la (13) assumono gli stessi valori.

L'andamento tipico è quello del Grafico 3: l'indice I_{MM} ($=I_{MM}$) è sempre superiore agli altri. I massimi delle mediane secondo i due diversi ordini di aggregazione danno luogo a grafici che possono intersecarsi. Le situazioni più preoccupanti si manifestano quando a valori alti di I_{MM} ($=I_{MM}$) corrispondono anche valori alti di almeno uno degli altri due indici.

Quando il massimo delle mediane per postazione è più alto del massimo della mediana per inquinante, ciò significa che i valori elevati di inquinamento sono concentrati in punti particolari della città. Valori particolarmente elevati di I_{Mm} e tendenti al massimo dei massimi possono dare idea di una situazione preoccupante, ma circoscritta nel territorio, e al limite riguardante una sola centralina.

Quando il massimo delle mediane per inquinante è più alto del massimo delle mediane per postazione, i valori elevati di inquinamento sono diffusi spazialmente. Quindi, valori dell'indice I_{Mm} che si avvicinano al massimo I_{MM} indicano una situazione di inquinamento elevato spazialmente omogeneo.

In particolare, per il Grafico 3, la situazione nel periodo finale del mese di agosto 1995 è più favorevole di quella dei primi giorni, nonostante il valore dell'indice I_{MM} sia alto in entrambi i casi.

Nel Grafico 4, riguardante il mese di agosto 1998, l'indice I_{Mm} coincide con I_{MM} ($=I_{MM}$), perché l'inquinante che determina il valore degli indici in cui l'aggregazione avviene prima per postazione è l'ozono, che, nel caso di Bologna, è rilevato in una sola centralina. La distribuzione dell'ozono per postazione è quindi degenere. L'informazione fornita da I_{Mm} è quindi molto importante, perché dà idea della distribuzione degli altri inquinanti, oltre l'ozono. Si può verificare come la distanza tra i grafici I_{MM} ($=I_{MM} = I_{Mm}$) e I_{Mm} sia elevata, e che i valori alti dell'indice I_{MM} siano determinati dal comportamento anomalo di un solo inquinante. Il massimo delle mediane delle distribuzioni degli inquinanti non supera quasi mai il valore 100: i valori bassi di questo indice, per i giorni in cui I_{MM} assume valori particolarmente elevati, evidenziano una situazione non allarmante.

L'analisi del Grafico 5, relativo al novembre 1995, mostra che i massimi delle mediane sono abbastanza vicini alla distribuzione del massimo tra i massimi. La situazione è preoccupante perché l'indice I_{MM} assume quasi sempre valori elevati. L'indice I_{Mm} è spesso più alto di I_{Mm} , in particolare nell'ultima settimana. Questa situazione indica l'elevata omogeneità spaziale di valori elevati di inquinamento. In questo mese, gli indici I_{MM} e I_{Mm} hanno distribuzioni che non sono mai sovrapposte, l'ozono, infatti, non compare mai come inquinante rilevante.

L'analisi del Grafico 6 per il novembre 1998 mostra ancora che i massimi delle mediane sono tendenzialmente vicini al massimo dei massimi, ma in questo caso l'indice I_{Mm} è spesso più basso di I_{Mm} . Per questo periodo, la situazione descritta è quella di riscontro di valori elevati di inquinamento in zone particolari, piuttosto che come situazione diffusa. Il periodo più critico appare quello intorno alla metà del

Il mese di novembre 1998 è caratterizzato da andamenti simili a quelli dell'agosto 1995, in cui le due distribuzioni di $I1_{MM}$ e $I1_{Mm}$ sono generalmente disgiunte tranne in rari episodi di elevato inquinamento da ozono.

Grafico 3: Andamento degli indici $I1_{MM}$, $I1_{Mm}$, $I2_{MM}$ e $I2_{Mm}$: Agosto 1995

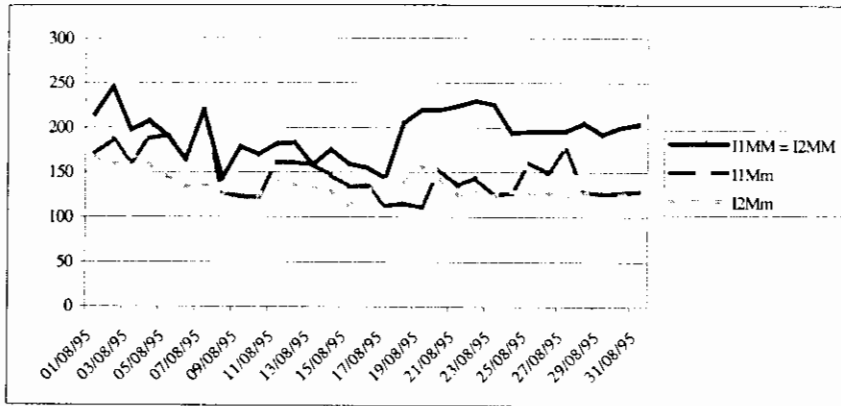


Grafico 4: Andamento degli indici $I1_{MM}$, $I1_{Mm}$, $I2_{MM}$ e $I2_{Mm}$: Agosto 1998

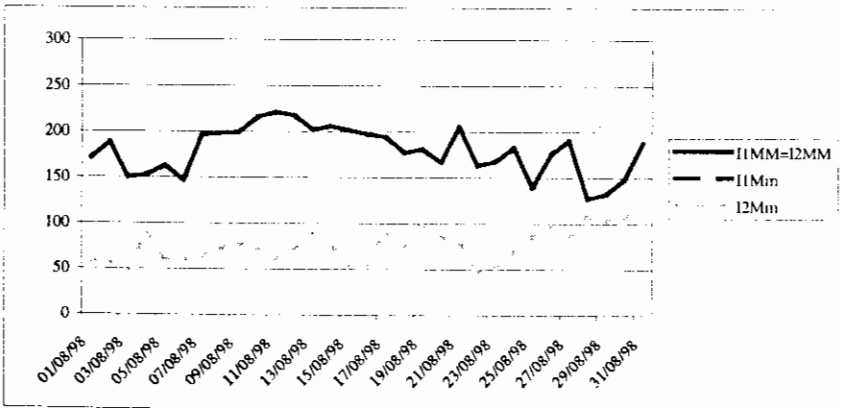


Grafico 5: Andamento degli indici $I1_{MM}$, $I1_{Mm}$, $I2_{MM}$ e $I2_{Mm}$: Novembre 1995

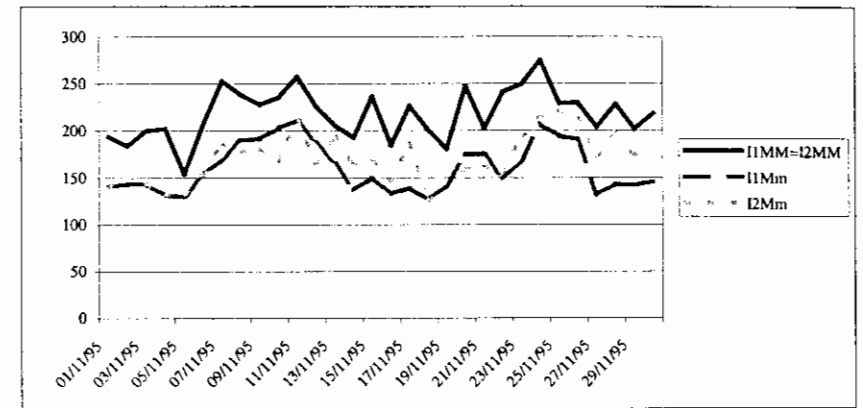
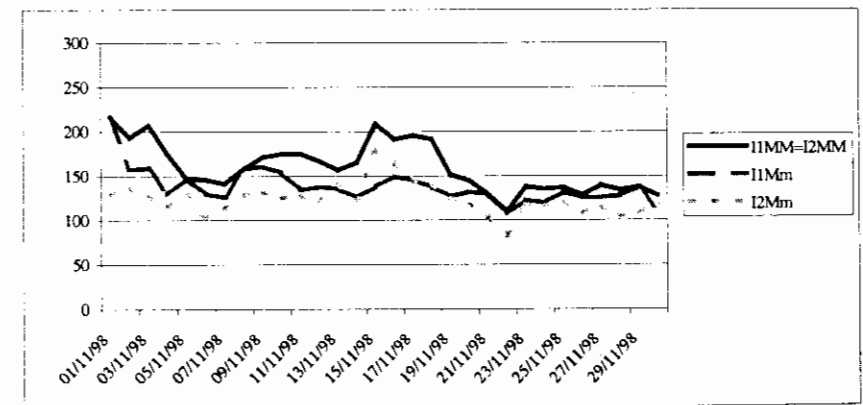


Grafico 6: Andamento degli indici $I1_{MM}$, $I1_{Mm}$, $I2_{MM}$ e $I2_{Mm}$: Novembre 1998



3 La considerazione della dispersione

La variabilità dei dati rilevati sull'inquinamento e successivamente aggregati può essere attribuita, ad ogni passo, a una diversa componente. La prima fonte di variabilità riguarda l'ambito della giornata, una sua misura dovrebbe essere affiancata all'indicatore che viene calcolato al punto (1).

A seconda del percorso di aggregazione scelto, dopo aver eliminato la componente temporale, si riscontra, nel caso di percorso del tipo postazione-inquinante, variabilità entro gli inquinanti al passo a) e tra gli inquinanti al passo b). Analogamente, nel caso di percorso del tipo inquinante-postazione, si riscontra variabilità entro le postazioni al passo a) e tra le postazioni al passo b). Gli indici $I1_{mm}$, $I2_{mm}$, $I1_{MM}$ e $I2_{MM}$, che, al terzo passo di aggregazione, selezionano il valore mediano della distribuzione ottenuta precedentemente, si prestano alla costruzione di indici di dispersione di facile interpretazione, che variano tra 0 e 1. Si tratta dei rapporti tra il valore di tale indice mediano, e dell'indice massimo corrispondente $I1_{mm}$, $I2_{mm}$, $I1_{MM}$ e $I2_{MM}$.

La variabilità dei dati rilevati sull'inquinamento e successivamente aggregati può essere attribuita, ad ogni passo di aggregazione, a una diversa componente.

La scelta di effettuare sintesi con valori di posizione impedisce di seguire la via più semplice di scomposizione additiva della variabilità in termini di varianza. Lo schema di selezione di valori di posizione proposto precedentemente permette tuttavia il calcolo di un semplice indicatore da affiancare a ciascuno degli indici sintetici (6), (7), (13) e (14). Infatti, prima delle sintesi ai passi b) dei due tipi di aggregazione, i valori dei vettori (2), (3), (11) e (12), sono ancora distinti e ordinabili. A ciascuno di essi può essere associata la mediana (8), (9), (15) e (16). A ogni indice sintetico prescelto (con il criterio della mediana o del massimo) si può associare il rapporto tra la mediana e il massimo della distribuzione che, alla fase precedente di aggregazione, non era stata ancora sintetizzata. Ciascuno dei rapporti può variare tra 0 e 1.

Si propongono quindi indici di dispersione per le distribuzioni dei vettori (2) e (3), standardizzati secondo la (4). In particolare, con l'aggregazione di tipo 2.2.1, utilizzando la (6) assieme alla mediana (8) della distribuzione (2), si propone:

$$V1_M = \frac{I1_{mM}}{I1_{MM}} \quad (17)$$

Utilizzando la (7), assieme alla mediana (9) della distribuzione (3), si propone:

$$V1_m = \frac{I1_{mm}}{I1_{Mm}} \quad (18)$$

Se la (17) o la (18) tendono a 0, la distribuzione delle trasformate standardizzate dei massimi o delle mediane è costituita da valori molto più bassi del massimo; se tende a 1, i sub-indici normalizzati secondo gli inquinanti tendono ad essere concentrati verso il massimo.

Parallelamente si propongono indici di omogeneità della distribuzione dei vettori (11) e (12). Con l'aggregazione di tipo 2.2.2, utilizzando la (13) assieme alla mediana (15) della distribuzione (11), si propone:

$$V2_M = \frac{I2_{mM}}{I2_{MM}} \quad (19)$$

e, utilizzando la (14), assieme alla mediana (16) della distribuzione (12), si propone:

$$V2_m = \frac{I2_{mm}}{I2_{Mm}} \quad (20)$$

Se la (19) o la (20) tendono a 0, la distribuzione delle trasformate standardizzate dei massimi o delle mediane è costituita da valori molto più bassi del massimo; se tende a 1, i sub-indici normalizzati secondo le postazioni tendono ad essere concentrati verso il massimo.

Gli indici (17)-(20) si riferiscono all'ultimo livello di aggregazione nella gerarchia di eliminazione delle dimensioni. La (17) e la (18) danno un'indicazione della dispersione tra inquinanti, dopo aver aggregato per postazione, e la (19) e la (20) danno un'indicazione della dispersione tra postazioni, dopo aver aggregato per inquinante. Associando agli indici basati sul massimo (6), (7), (13) e (14) i rispettivi indici di dispersione (17)-(20), si ottiene una valutazione rapida dell'asimmetria verso valori non auspicabili dell'indice.

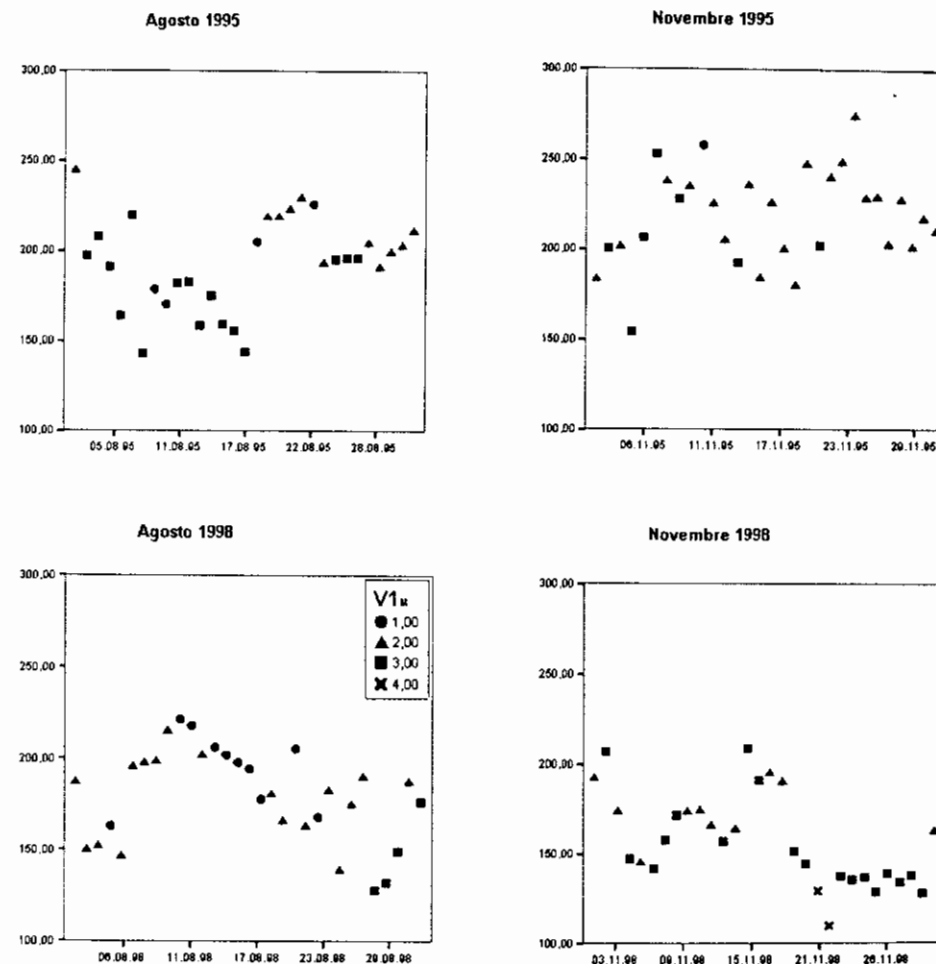
3.1 La rappresentazione degli indici di qualità dell'aria con riferimento alla loro dispersione

Una rappresentazione grafica sintetica dei valori degli indici (6), (7), (13) e (14) può essere fatta utilizzando una classificazione degli indici di dispersione a seconda della concentrazione delle distribuzioni per inquinante o per postazione, a seconda del percorso scelto. Proponiamo, a fini esemplificativi, la seguente classificazione; che assegna simboli diversi alle classi in cui ricade il valore della misura di dispersione:

Valore dell'indice di dispersione	Classe	Simbolo
0 - 0.5	1	Cerchio
0.5 - 0.75	2	Triangolo
0.75 - 0.97	3	Quadrato
0.97 - 1	4	Croce

La rappresentazione nel piano dei diversi indici di qualità dell'aria è associata ad una valutazione della dispersione della distribuzione dei massimi. Valori alti degli indici di qualità dell'aria, associati a simboli che indicano valori alti dell'indice di dispersione (quadrato o croce), esprimono una valutazione più preoccupante di quella di valori ugualmente alti, associati a simboli che indicano valori bassi dell'indice. Una rappresentazione grafica che utilizzi i colori si potrebbero riportare gli indici di dispersione secondo una scala continua.

Grafico 7: Distribuzione dell'indice di qualità I_{MM} e dell'indice $V1_M$



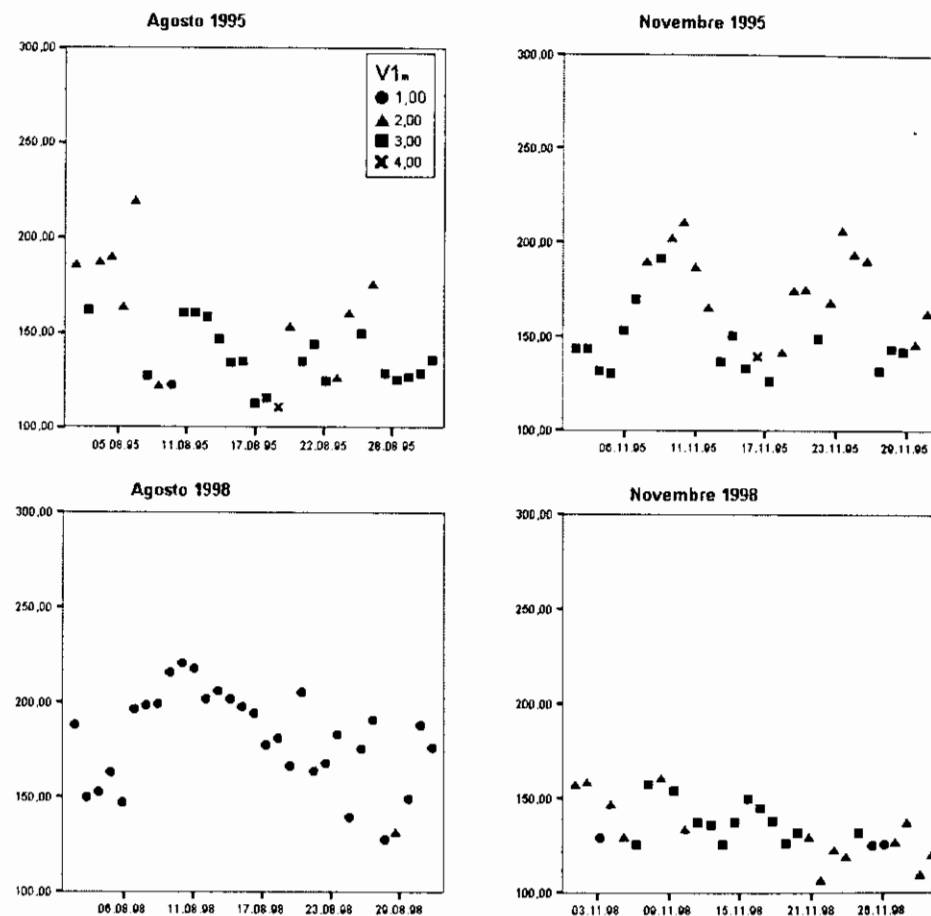
Per quanto riguarda l'indice I_{MM} proposto nel Grafico 7, un episodio critico è il 6 agosto 1995, giorno in cui il valore dell'indice di qualità dell'aria è piuttosto elevato e la misura della dispersione si colloca nella classe oltre 0,75. Ciò significa che la posizione mediana tra gli inquinati tende ad avvicinarsi "pericolosamente" al valore massimo.

Al contrario, i giorni migliori sono quelli in cui il valore dell'indice I_{MM} è basso e l'indice di dispersione si colloca nella classe 3 o 4. Le situazioni giornaliere dell'agosto 1998 non sono allarmanti, infatti ai casi in cui il valore dell'indice è elevato, corrispondono valori dell'indice di dispersione bassi.

I giorni da considerare "critici" si presentano nel mese di novembre, sia durante il 1995 che il 1998; la situazione è più grave nel 1995 poiché in quell'anno si riscontrano valori dell'indice di qualità più alti. Nel 1995, dei 3 giorni che superano il valore 250 dell'indice di qualità, il più preoccupante risulta l'8 novembre. Nonostante i valori dell'indice I_{MM} si siano abbassati nel novembre 1998 rispetto all'altro anno, i due valori dell'indice superiori a 200 sono da considerare preoccupanti.

Nel Grafico 8 sono riportati i valori dell'indice I_{MM} , che, quando assume valori elevati, denota il manifestarsi di concentrazioni elevate per un numero consistente di inquinanti. Questo indice, che dovrebbe mettere in risalto una tendenza di fondo, assume spesso valori superiori a 200. Ciò dipende, come è stato detto più volte, dal fatto che un inquinante che sovente determina il valore dell'indice, viene rilevato su una sola postazione. La valutazione negativa per la giornata dell'8 novembre 1995 viene confermata, assieme al fatto che i valori alti dell'agosto 1998 derivano dal comportamento di un solo inquinante. Nelle 4 figure del grafico, si nota peraltro che, in generale, i valori più alti dell'indice di dispersione sono associati a valori bassi dell'indice di qualità dell'aria.

Grafico 8: Distribuzione dell'indice di qualità I_{MM} e dell'indice $V1_m$



Nel Grafico 9 i valori dell'indice $I2_{MM}$, uguali a $I1_{MM}$, sono associati a una diversa misura di dispersione, che si richiama alla diffusione spaziale dell'inquinamento. Visto come segnale di diffusione spaziale dell'inquinamento, $I2_{MM}$ mostra, per i mesi di novembre dei due anni, una dispersione relativa più elevata rispetto a quella di $I1_{MM}$. E' in particolare da tenere presente il risultato del 1998, da comparare con quello corrispondente del Grafico 7. Per i mesi di agosto, la situazione del Grafico 9 è migliore di quella del Grafico 7, a riprova del fatto che i valori elevati dell'indice per tali mesi non sono legati a dispersione spaziale, ma a concentrazioni elevate rilevate in punti particolari della città.

L'esame del Grafico 10 mette in luce come la distribuzione dei massimi delle mediane, che riassumono spazialmente la situazione di inquinamento, associ sovente, a valori alti dell'indice, un valore alto della misura di dispersione. Nei mesi di novembre dei due anni, l'indice $I2_{Mm}$ tende ad esser più alto del massimo della mediana calcolata per inquinante, $I1_{Mm}$, e a mostrare, più frequentemente di tale indice, valori alti della misura di dispersione.

Dall'esame congiunto del comportamento dei 4 indici associati alle rispettive misure di dispersione si può notare come l'apparente abbattimento dell'inquinamento sulla città, causato dallo spostamento di una parte delle centraline nel 1998 risulti ridimensionato dalla presenza di una situazione di inquinamento pur sempre elevata e diffusa spazialmente, messa in luce principalmente dal Grafico 10.

Grafico 9: Distribuzione dell'indice di qualità $I2_{MM}$ e dell'indice $V2_M$

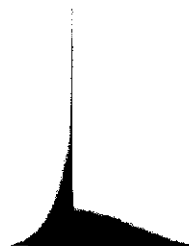
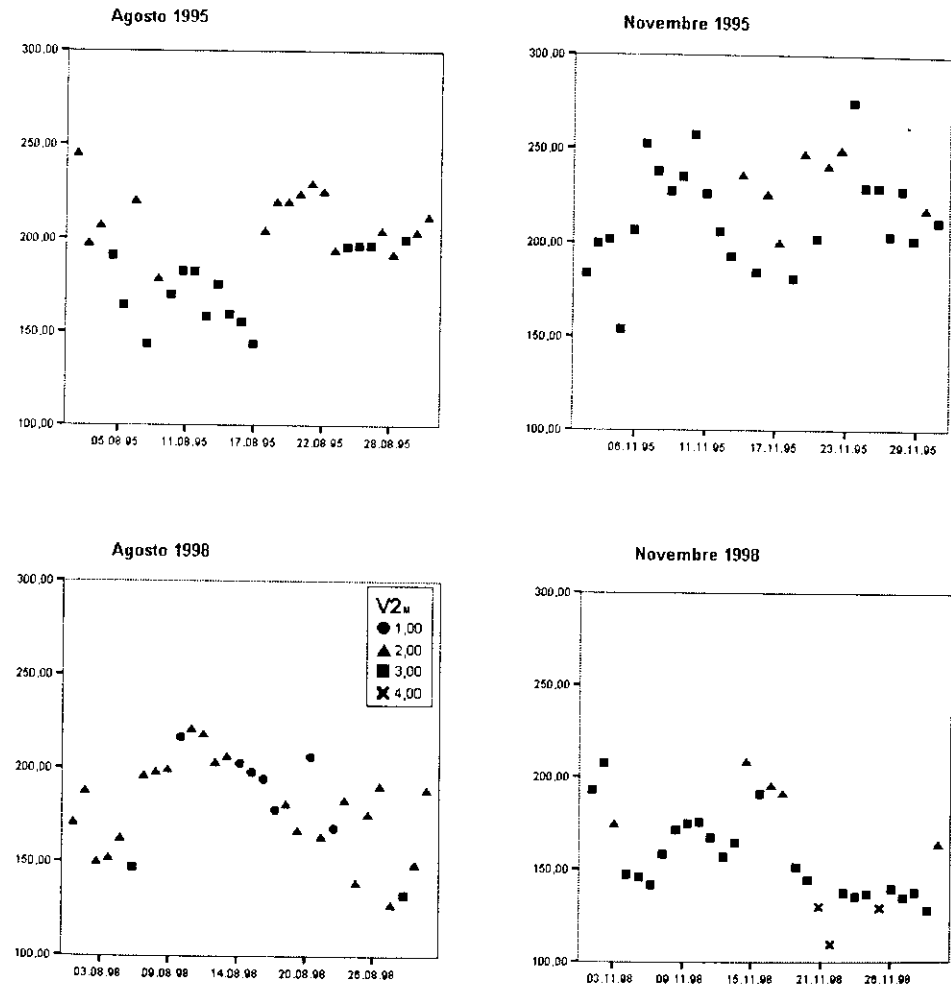
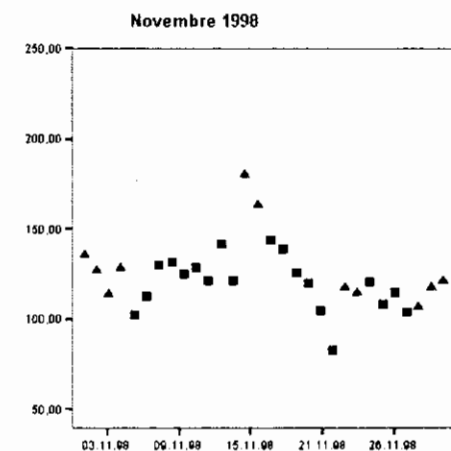
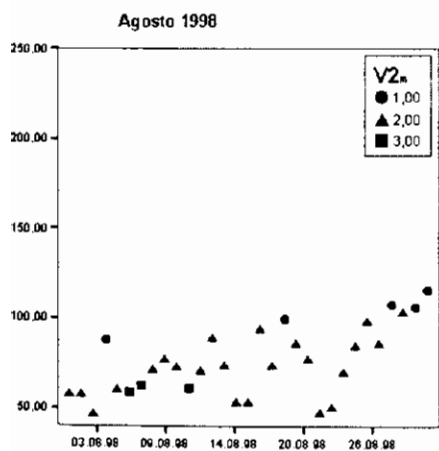
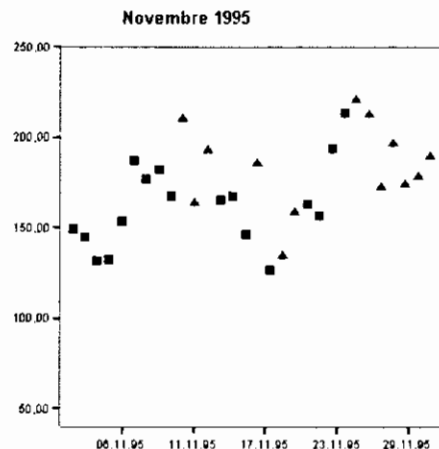
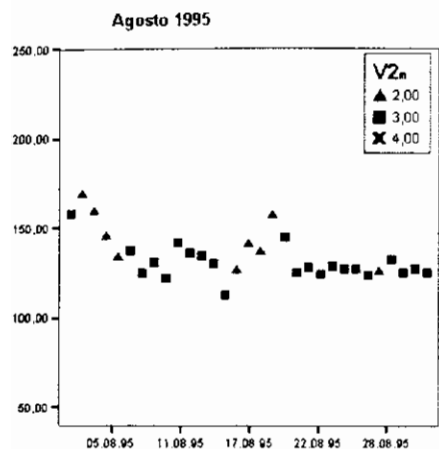


Grafico 10: Distribuzione dell'indice di qualità $I2_{Mm}$ e dell'indice $V2_m$



4 Conclusioni

Proponendo l'uso simultaneo di più indicatori, si è trovata una via per seguire in modo continuo l'evoluzione dell'inquinamento anche in presenza di spostamenti delle postazioni di rilevazione.

La scelta tra i diversi indicatori è governata dall'obiettivo finale, che va dalla più tradizionale segnalazione di episodi acuti all'individuazione di tendenze di fondo. Il comportamento congiunto degli indici proposti può evidenziare se si stiano verificando innalzamenti dei valori di fondo degli inquinanti. La scelta di una particolare classificazione in base a soglie "critiche" di inquinamento influenza le valutazioni complessive. Tuttavia, se si usano le informazioni raccolte in modo flessibile calcolando sintesi diverse, si traggono comunque informazioni utili anche subordinatamente alla scelta effettuata.

L'utilizzazione contemporanea di indici che seguono i due percorsi di aggregazione permette di mettere in evidenza aspetti complementari dell'inquinamento. In particolare la sintesi postazioni-inquinanti dà risalto alla presenza di episodi acuti di inquinamento isolati nel territorio, mentre la sintesi inquinanti-postazioni dà rilievo all'eventualità della diffusione spaziale di valori elevati di inquinamento.

L'esame congiunto degli indici di qualità dell'aria ottenuti secondo i diversi procedimenti di aggregazione e delle corrispondenti misure di dispersione fornisce un quadro completo che può essere usato per confronti nel tempo e nello spazio.

Appendice

Tabella A.1: Valori soglia (a_{ij}) delle concentrazioni dei diversi inquinanti per le diverse classi di qualità dell'aria e corrispondenti valori soglia (b_i) dell'indice standardizzato.

Qualità dell'aria	$a_{k1} - a_{(k+1)1}$	$a_{k2} - a_{(k+1)2}$	$a_{k3} - a_{(k+1)3}$	$a_{k4} - a_{(k+1)4}$	$a_{k5} - a_{(k+1)5}$	$b_k - b_{k+1}$
	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PTS	I
Buona	0-50	0-50	0-2.5	0-60	0-40	0-100
Accettabile	51-125	51-200	2.6-15	61-180	41-150	101-200
Scadente ³	126-250	201-400	15.1-30	181-360	151-300	201-300
Pessima ⁴	>250	>400	>30	>360	>300	300-500

Fonte: A.R.P.A. dell'Emilia Romagna

Pagina web: <http://www.smr.arpa.emr.it/Frames/ari/ambienteframe.html>

³ Il giudizio "scadente" corrisponde al superamento del "livello di attenzione" per i singoli inquinanti

⁴ Il giudizio "pessima" corrisponde al superamento del "livello di allarme" per i singoli inquinanti

Riferimenti bibliografici

AGOSTINELLI C., CAPILUPPI C., FABBRIS L. (1996), "Indici sintetici di qualità di una risorsa ambientale", *Annali di Statistica*, 10, pp.239-256.

ATTANASIO M., CAPURSI V. (1997), "Graduatorie sulla qualità della vita: prime analisi di sensibilità delle tecniche adottate", *Atti della XXXV Riunione Scientifica della SIEDS Politiche e tecniche di valutazione dell'attività della Pubblica Amministrazione e degli interventi sociali, Alghero*.

COLOMBO A. (1996), "Indicatori per la valutazione di impatto ambientale", *Annali di Statistica*, 10, pp.147-154.

D.M. AMBIENTE 15/4/1994, "Norme tecniche in materia di livelli e di stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane ai sensi degli articoli 3 e 4 del D.P.R. 24 Maggio 1988 n. 203, e dell'art. 9 del D.M. 20 Maggio 1991", *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana* n. 107 del 10/05/1994.

D.M. AMBIENTE 16/5/1996, "Attivazione di un sistema di sorveglianza di inquinamento da ozono", *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana* n. 163 del 13/07/1996.

FRAIRE M. (1989), "Problemi e metodologie statistiche di misurazione di fenomeni complessi tramite indicatori e indici sintetici", *Statistica*, anno XLIX, n. 2, 1989, pp. 245-263.

HAMEKOSKI K. (1998), "The use of a simple air quality index in the Helsinki Area, Finland", *Environmental Management*, vol. 22 n.4, pp.517-520.

KASSOMENOS P., SKOULODIS A.N., LYKOUDIS S., FLOCAS H.A. (1999), "'Air quality indicators' for uniform indexing of atmospheric pollution over large metropolitan areas", *Atmospheric Environment*, 33, pp.1861-1879.

OTT W.R. (1978), *Environmental indices: theory and practice*, Ann Arbor Science, Michigan.

OTT W.R., HUNT W.F. (1976), "A quantitative evaluation of the pollutant standards index", *Journal of the Air Pollution Control Association*, 26, pp. 1051-1054.

SWAMEE P.K, TYAGI A. (1999), "Formation of an air pollution index", *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49, pp. 88-91.

THOMAS W.A. (Ed.) (1972), "Indicators of environmental quality", Plenum Press, New York.