

STABILITÀ ATMOSFERICA

e inquinamento da materiale particolato

Il problema dell'inquinamento da materiale particolato nelle aree urbane può essere affrontato in modo efficace solo se si tiene conto dell'influenza che i processi di diluizione dell'atmosfera esercitano sulla concentrazione degli inquinanti. Mediante la misura della radioattività naturale e del suo andamento nel tempo è stato possibile ottenere una buona stima dell'altezza dello strato rimescolato e mettere a punto degli Indici di Stabilità

Atmosferica che si sono rivelati molto efficaci nella comprensione della genesi degli eventi di inquinamento atmosferico primario. In questo lavoro viene discusso il ruolo della stabilità atmosferica nel determinare gli eventi di inquinamento atmosferico da materiale particolato e la possibilità di mettere a punto analoghi Indici, specifici per questi inquinanti.

ITA! FERICA

articolare nelle aree urbane

Cinzia Perrino, Antonio Febo e Ivo Allegrini

Comprendere l'origine del materiale particolato sospeso in atmosfera ed individuare i meccanismi che sono alla base delle variazioni della sua concentrazione nelle nostre aree urbane costituiscono una delle sfide ambientali di maggior interesse ed urgenza, che richiedono un rapido e consistente impegno delle risorse della comunità scientifica.

Uno dei parametri che gioca un ruolo chiave nel determinare la concentrazione del materiale particolato in atmosfera, così come degli altri inquinanti, è l'altezza dello strato atmosferico rimescolato. La variazione nel tempo della concentrazione degli inquinanti atmosferici è infatti in generale determinata da tre classi principali di fattori: le variazioni nei flussi di emissione, le trasformazioni chimico-fisiche, la possibilità di diluizione nell'atmosfera. Nel caso degli inquinanti primari a bassa reattività, ossia di quelli direttamente emessi dalle sorgenti e che non subiscono trasformazioni chimico-fisiche di rilievo (ad esempio il benzene, l'ossido di carbonio ed una parte del materiale particolato), il secondo fattore può essere trascurato e la concentrazione viene a dipendere esclusivamente dalla quantità di inquinante riversata nell'atmosfera nell'unità di tempo (flusso emissivo) e dalla capacità di dispersione dell'atmosfera stessa. Nel caso degli inquinanti secondari, cioè di quelli prodotti da trasformazioni in atmosfera a partire dagli inquinanti primari, i processi di rimozione e di produzione dovuti alle trasformazioni chimico-fisiche che l'inquinante subisce sono un fattore dominante e l'influenza del potere di diluizione dell'atmosfera sulla concentrazione della specie inquinante è più articolata e complessa.

Nel caso specifico del materiale particolato, che è una miscela di specie inquinanti di origine sia primaria che secondaria, il rimescolamento degli strati inferiori dell'atmosfera gioca comunque un ruolo di primaria importanza nel determinare la concentrazione delle particelle all'altezza del suolo, e le condizioni di rimescolamento della bassa atmosfera, opportunamente interpretate, possono costituire

**C. Perrino, A. Febo, I. Allegrini,
CNR - Istituto Inquinamento
Atmosferico Monterotondo
Stazione (Roma)**

un potente mezzo non solo per l'interpretazione delle variazioni della concentrazione, ma anche per l'identificazione della natura primaria o secondaria delle particelle.

Gli eventi durante i quali l'inquinamento atmosferico assume una particolare intensità sono il risultato della coincidenza di più fattori sfavorevoli. Per l'inquinamento primario questi fattori sono sostanzialmente limitati a un elevato tasso di emissione degli inquinanti che si sovrappone temporalmente a condizioni di scarso rimescolamento degli strati inferiori dell'atmosfera. Per l'inquinamento secondario fotochimico, invece, condizioni necessarie per il verificarsi degli episodi sono le condizioni di bel tempo (buona insolazione e assenza di venti forti) e l'intensità dei processi emissivi, ma l'elemento che determina l'intensità di ogni episodio è la scarsità del rimescolamento verticale durante le ore centrali della giornata. L'instaurarsi di fasce di inversione termica a quote relativamente basse (200-500 metri) durante le ore diurne limita, infatti, il rimescolamento verticale delle masse d'aria e impedisce la proiezione degli inquinanti ad alta quota proprio nel periodo della giornata in cui, in virtù dell'elevata insolazione, il motore fotochimico diviene più attivo e produce la maggiore quantità di inquinanti secondari.

Per tutti gli inquinanti, quindi, la meteorologia e le condizioni di rimescolamento dello strato limite svolgono un ruolo centrale nella genesi degli episodi di inquinamento intenso, e lo studio dell'evoluzione temporale dell'altezza dello strato rimescolato costituisce una chiave interpretativa di grande interesse sia scientifico che pratico.

VALUTAZIONE DEL RIMESCOLAMENTO DELLA BASSA ATMOSFERA

L'altezza dello strato rimescolato può essere determinata direttamente, tramite radiosondaggi, o per via indiretta, tramite LIDAR o SODAR. Un ulteriore metodo per la valutazione indiretta del grado di rimescolamento della bassa atmosfera consiste nel determinare la radioattività naturale dovuta ai prodotti di decadimento a vita breve del Radon associati al materiale particellare sospeso in atmosfera. I principali fattori che deter-

minano il valore della concentrazione atmosferica del Radon sono il fattore di emissione e quello di diluizione. Poiché il Radon viene emesso dal sottosuolo con un tasso emissivo che può essere considerato costante nella scala spazio-temporale di qualche chilometro e di qualche giorno, e poiché esso non subisce altre trasformazioni oltre al decadimento radioattivo, la sua concentrazione atmosferica viene a dipendere essenzialmente dal fattore di diluizione (principalmente dovuto alla diffusione turbolenta). Ciò significa che il Radon e i suoi prodotti di decadimento possono essere considerati ottimi traccianti naturali delle proprietà di rimescolamento dello strato limite: la radioattività naturale si mantiene su valori costantemente bassi in caso di avvezione o di rimescolamento convettivo ed aumenta quando la stabilità atmosferica consente l'accumulo del Radon. In particolare, le derivate positive della radioattività naturale indicano un rapido stabilizzarsi degli strati inferiori dell'atmosfera, mentre le derivate negative indicano un incremento del rimescolamento nello strato limite.

La validità della radioattività naturale come indice delle proprietà di rimescolamento della bassa atmosfera è esemplificato dagli andamenti temporali riportati in figura 1, che si riferiscono ai mesi di agosto e dicembre 2001. La misura della radioattività naturale è stata effettuata mediante uno strumento automatico dedicato, sviluppato presso l'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del CNR. Lo strumento campiona a successivi intervalli di 120 minuti il materiale particellare atmosferico, ove si fissa la progenie del Radon, e tramite un contatore Geiger-Muller ne determina la radioattività. Le caratteristiche costruttive dello strumento, che opera su una coppia di membrane di cui l'una è in fase di misura mentre l'altra è in fase di campionamento, rendono possibile ottenere dodici valori medi biorari di radioattività naturale che coprono l'intero arco della giornata.

Dai grafici della figura 1 appare evidente che il mese di agosto, come in generale tutti i mesi estivi, è caratterizzato dall'alternanza di massimi notturni e minimi diurni della radioattività naturale, con andamento giornaliero ben modulato e piccole differenze fra un giorno e l'altro. Ciò corrisponde all'alternanza di stabilità atmosferica notturna e di rimescolamento diurno di

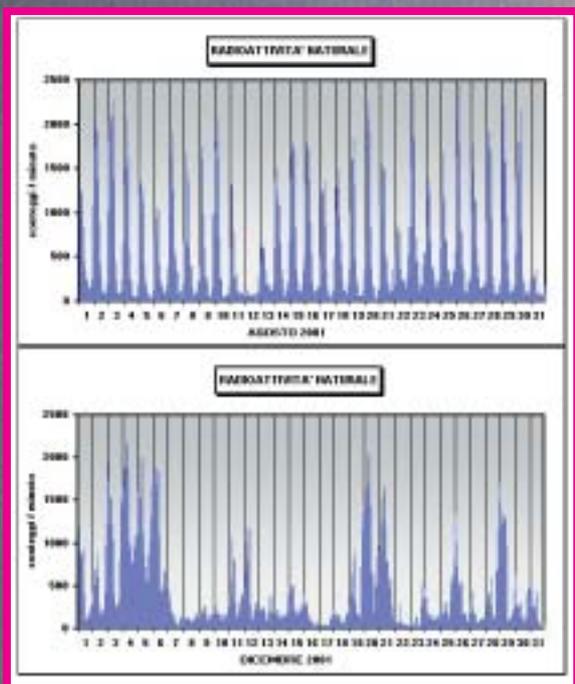


Figura 1
Andamento temporale della radioattività naturale nella città di Roma durante un mese estivo (agosto 2001) ed uno invernale (dicembre 2001).

tipo convettivo, alternanza che caratterizza i periodi di alta pressione persistente. Le condizioni di stabilità atmosferica notturna generano, infatti, accumulo di Radon (derivata positiva della radioattività naturale subito dopo il tramonto), mentre il rimescolamento convettivo diurno causa la sua dispersione (derivata negativa poco dopo l'alba); questa condizione costituisce, in genere, la situazione dominante nell'area mediterranea durante i mesi caldi.

Durante il mese di dicembre così come in generale durante i mesi invernali, al contrario, i periodi di alta pressione sono più rari e si alternano a frequenti episodi di avvezione (in cui gli inquinanti subiscono trasporto orizzontale dovuto al vento) della durata di più giorni, durante i quali la radioattività naturale assume un andamento scarsamente modulato e si mantiene su valori costantemente bassi.

Un'altra importante differenza nell'andamento della radioattività naturale durante i mesi estivi ed invernali è costituita dalla diversa ampiezza della finestra temporale di rimescolamento, che nel primo caso (mese di agosto) va dalle 8 del mattino alle 22 o anche alle 24, mentre nel secondo caso (mese di dicembre) è limitata al periodo compreso fra le 12 e le 18. È da notare, inoltre, come i valori assunti dalla radioattività naturale nei periodi diurni siano estremamente bassi nel caso del mese di agosto (inferiori alle 100 conte al minuto per parecchie ore della giornata, il che indica un ottimo rimescolamento degli strati atmosferici inferiori), mentre nel secondo caso i valori minimi si mantengono molto più alti, il che indica un'altezza ridotta dello strato rimescolato anche durante le ore diurne. Durante i mesi più caldi del periodo estivo, infatti, la forte spinta convettiva dovuta all'intenso irraggiamento solare (riscaldamento delle masse d'aria inferiori) ha l'effetto di incrementare notevolmente l'ampiezza dello strato rimescolato, mentre nel periodo invernale questo effetto è limitato ed il rimescolamento diurno è spesso limitato ad altezze modeste (poche centinaia di metri).

RIMESCOLAMENTO ATMOSFERICO E INQUINAMENTO DA MATERIALE PARTICELLARE

Un interessante episodio che mostra chiaramente la dipendenza della concentrazione del materiale particellare dalle condizioni meteo-climatiche dell'atmosfera è riportato in figura 2. L'episodio è relativo all'atmosfera urbana di Milano ed è stato registrato nel settembre 1990. Gli andamenti temporali della concentrazione di alcune specie in fase particellare (solfati, nitrati ed ammonio), determinati mediante linee di diffusione (denuders di diffusione a geometria anulare seguiti da un ciclone e da un filter pack) e quindi esenti da fenomeni di interferenza delle specie gassose e di rilascio dei sali volatili, mostrano che la concentrazione di questi inquinanti ha avuto un andamento sostanzialmente crescente dall'inizio del periodo fino al giorno 18 settembre. Questo andamento è particolarmente evidente per il solfato, che è certamente la specie caratterizzata dalla maggior stabilità in atmosfera.

L'esame dell'andamento della radioattività naturale, anch'essa riportata in figura 2, mostra che il periodo 12 - 18 settembre è stato caratterizzato da scarso rimescolamento degli strati atmosferici inferiori sia durante la notte che, in particolar modo, durante le ore diurne. Nel corso del periodo in esame, l'intensità del rimescolamento convettivo diurno è andata scemando, fino a raggiungere, il giorno 17, una situazione di sostanziale stabilità atmosferica, con minimi diurni superiori agli 800 conteggi per minuto e massimi notturni superiori ai 2700 conteggi per minuto. Queste condizioni, che hanno favorito l'accumulo degli inquinanti atmosferici, ed in particolare di quelli ad alta stabilità come il solfato, si sono bruscamente interrotte a metà del giorno 18, quando si è osservato il rapido transito di una massa d'aria pulita, calda e secca, proveniente da nord-ovest (evento di Fohn) che si è sostituita alla massa d'aria che persisteva nell'area milanese da diversi giorni, provocando una brusca riduzione della concentrazione degli inquinanti in fase particellare. Come mostrato dall'andamento della radioattività naturale, alla mezzanotte dello stesso giorno il transito della massa d'aria pulita si è esaurito, consentendo il ritorno delle masse d'aria inquinate e il sostanziale ripristino

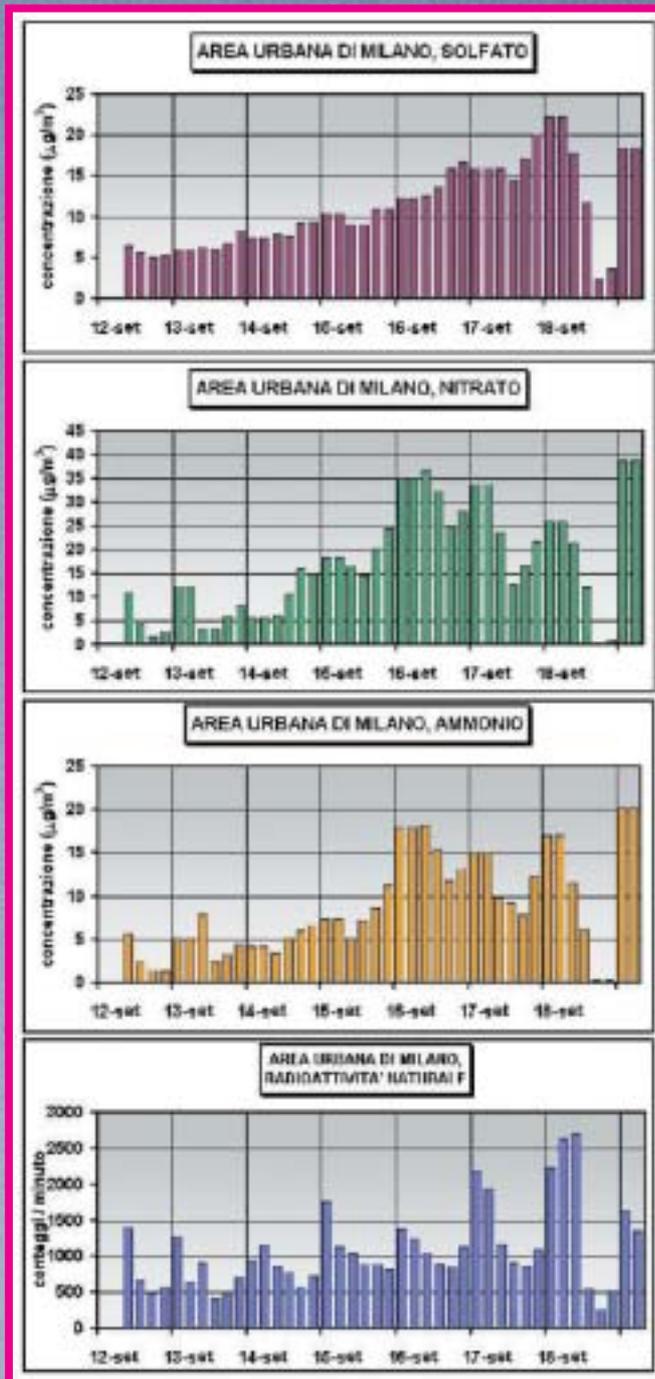


Figura 2
Andamento temporale della concentrazione atmosferica di alcune specie inorganiche in fase particellare e della radioattività naturale nell'area urbana di Milano durante un evento di Fohn (autunno 1990).

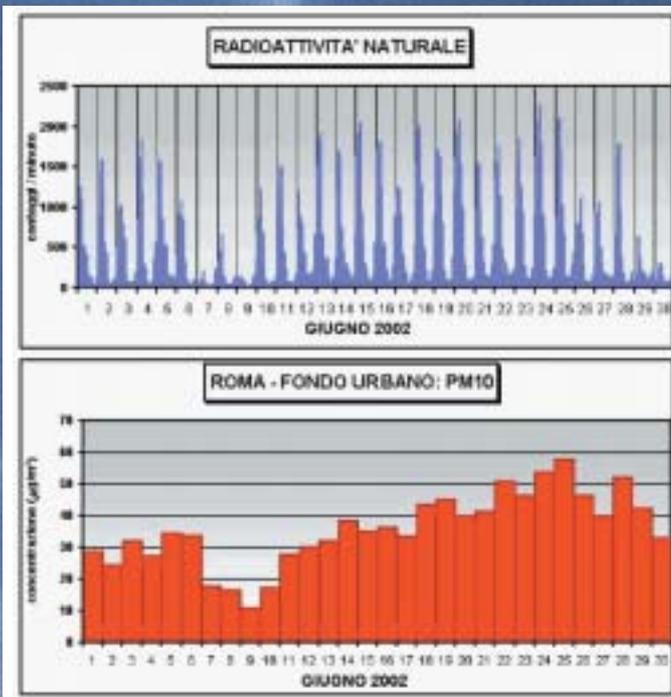


Figura 3
Andamento temporale della radioattività naturale nell'area urbana di Roma durante il mese di giugno 2002 e concentrazione atmosferica del materiale particolato (PM10) misurata durante lo stesso periodo presso la stazione di fondo urbano di Villa Ada.

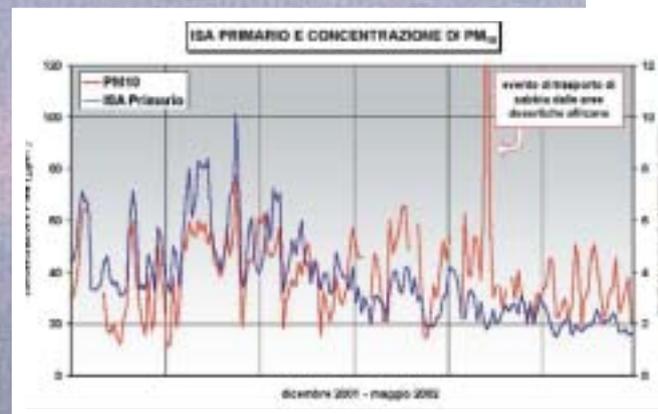
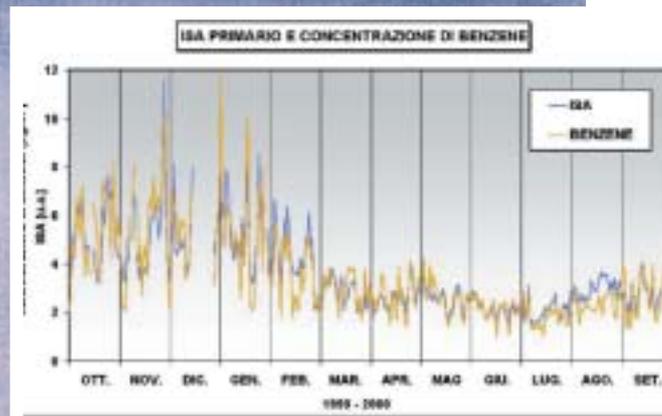


Figura 4
Confronto fra i valori degli Indici di Stabilità Atmosferica (ISA) relativi agli inquinanti primari e la concentrazione di benzene misurata presso la stazione di fondo urbano di Villa Ada (Roma).

Figura 5
Confronto fra i valori degli Indici di Stabilità Atmosferica (ISA) relativi agli inquinanti primari e la concentrazione di PM10 misurata presso la stazione di fondo urbano di Villa Ada (Roma) durante la stagione invernale e primaverile.

dei livelli di concentrazione della notte precedente.

L'importanza del rimescolamento diurno (facilmente deducibile sulla base dei valori assunti dalla radioattività naturale durante le ore centrali della giornata) ai fini di un possibile accumulo del materiale particolato in atmosfera, è mostrato anche dai dati riportati nella figura 3, che si riferiscono a misure effettuate nella stazione di fondo urbano della città di Roma durante il mese di giugno 2002. I dati mostrano che durante questo periodo si sono succeduti quattro periodi caratterizzati da diverse intensità di rimescolamento della base atmosfera. Il primo periodo, dall'inizio del mese fino al giorno 6, è stato caratterizzato dall'alternanza di condizioni di discreta stabilità notturna e buon rimescolamento convettivo diurno; il secondo periodo, invece, è stato caratterizzato da avvezione, che è durata per tutto il giorno 7 e dal pomeriggio del giorno 8 fino alla sera del giorno 9 (valori costantemente bassi della radioattività naturale). Durante il terzo periodo, dal giorno 10 fino al 28, si è ripresentata una situazione di stabilità atmosferica, più intensa che nel caso del primo periodo, caratterizzata da massimi notturni piuttosto elevati e minimi diurni che talvolta indicano un incompleto rimescolamento dell'atmosfera anche durante le ore del giorno (ad esempio i giorni 12, 21, 22, 25). Durante gli ultimi due giorni del mese (quarto periodo), un nuovo processo di avvezione ha ripristinato un buon rimescolamento dell'atmosfera.

I dati di concentrazione di massa del PM10 registrati presso la stessa stazione durante lo stesso mese (anch'essi riportati in figura 3) mostrano che la concentrazione media giornaliera si è mantenuta fra i 25 ed i 35 mg/m³ durante il primo periodo e tra gli 11 ed i 18 mg/m³ durante il secondo, per poi mostrare un andamento gradualmente crescente a partire dal giorno 10, fino a raggiungere il valore massimo del periodo il giorno 25 (57.8 mg/m³) e un nuovo massimo relativo il giorno 28 (52.2 mg/m³). Durante gli ultimi due giorni del mese la concentrazione di PM10 è nuovamente scesa fino a poco più di 30 mg/m³. In particolare, il periodo 10-28 mostra che in condizioni di stabilità atmosferica prolungata, quando il rimescolamento diurno dovuto ai moti convettivi non è abbastanza intenso da assicurare la dispersione del materiale particolato emesso e formato, si assiste a un processo di accumulo progressivo delle particelle, processo che può essere interrotto solo quando le mutate condizioni meteo-climatiche assicurano un drastico rimescolamento dell'atmosfera.

INDICI DI STABILITÀ ATMOSFERICA

Sulla base delle misure di radioattività naturale, sono stati recentemente sviluppati degli Indici di Stabilità Atmosferica (ISA Primari) specificatamente finalizzati all'interpretazione degli episodi di inquinamento primario. Questi Indici, che sono in grado di caratterizzare ogni giorno di misura in termini della sua predisposizione meteorologica all'instaurarsi di un evento di inquinamento, sono stati calcolati sulla base dei valori di radioattività naturale e delle loro derivate prime durante periodi della giornata particolarmente significativi. Il confronto dei valori degli ISA con la concentrazione di un inquinante primario non reattivo (benzene) relativo al periodo ottobre 1999 - settembre 2000, riportato in figura 4, ha fornito buoni valori di correlazione ($R = 0,89$), mostrando le ottime potenzialità della radioattività naturale nell'interpretazione degli eventi di inquinamento atmosferico primario. È da notare che una correlazione perfetta tra valori degli ISA e concentrazione degli inquinanti primari, non è da attendersi, essendo quest'ultima dovuta non soltanto ai fattori meteorologici descritti dagli ISA (variazioni dell'altezza dello strato rimescolato) ma anche alle variazioni nei flussi di emissione (intensità del traffico). Una correlazione perfetta sarebbe osservabile, cioè, solo in caso di flusso emissivo costante. Al contrario, gli scostamenti dei valori di concentrazione degli inquinanti primari da quelli previsti in base agli ISA indicano una variazione nei flussi di emissione che può essere di interesse identificare ed interpretare (es.: diminuzione dei flussi di traffico dovuta a festività o a provvedimenti di limitazione della circolazione). Dall'esame della figura 4 risulta evidente, ad esempio, che durante il mese di agosto i valori di benzene sono stati inferiori rispetto a quanto ipotizzabile in base

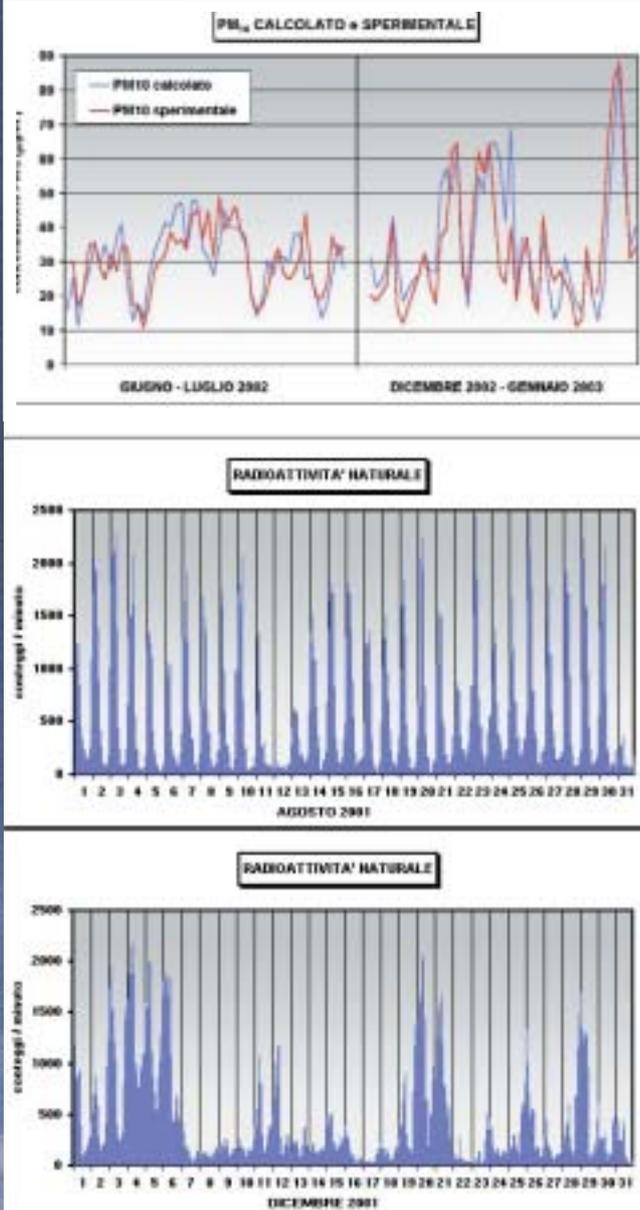


Figura 6
Confronto fra i valori di PM10 misurati presso la stazione di fondo urbano di Villa Ada (Roma) e quelli calcolati sulla base di Indici di Stabilità Atmosferica specifici per il materiale particellare.

all'indice ISA, proprio a causa del minore flusso emissivo che caratterizza questo periodo dell'anno.

Per quanto riguarda il materiale particellare, la situazione è notevolmente più complessa poiché alla componente primaria, che ha un comportamento assimilabile a quello degli inquinanti primari in fase gassosa, si aggiunge una componente secondaria che, soprattutto nelle frazioni granulometriche più piccole, può essere predominante. Per questo motivo, durante il periodo estivo e soprattutto durante quello primaverile, in cui gli eventi di inquinamento fotochimico-ossidativo hanno un ruolo importante nel definire la concentrazione del particolato, gli ISA Primari risultano, a priori, inadeguati ad effettuare una buona caratterizzazione della qualità dell'aria in relazione all'inquinamento da particelle. In figura 5, i valori degli ISA sono paragonati con la concentrazione di PM10 misurata nella stazione di fondo urbano di Roma nel periodo dicembre 2001 – maggio 2002. Il confronto mostra che nel periodo invernale, durante il quale il rimescolamento della bassa atmosfera è notevolmente ridotto e la componente di origine primaria del materiale particellare è percentualmente maggiore, gli ISA Primari sono in grado di descrivere con discreta approssimazione la concentrazione di particelle nell'atmosfera presa in esame (durante il periodo dicembre 2001 – febbraio 2002 il coefficiente di correlazione raggiunge il valore di 0,75), mentre nel periodo primaverile le concentrazioni di PM10 ipotizzate in base agli ISA primari risultano notevolmente sottostimate.

Gli studi attualmente in corso sono diretti alla messa a punto di Indici di Stabilità Atmosferica capaci di una migliore interpretazione del ruolo svolto dal rimescolamento degli strati inferiori dell'atmosfera nel determinare la concentrazione di materiale particellare. I primi risultati sono incoraggianti ed i nuovi Indici, calcolati con un diverso algoritmo in cui i valori assunti dalla radioattività naturale durante le ore centrali della giornata hanno un peso determinante, sono in grado di descrivere con soddisfacente approssimazione le probabilità di accumulo del materiale particellare nell'atmosfera. I risultati riportati in figura 6, relativi a due campagne di misura della concentrazione di PM10 svolte presso la stazione di fondo urbano di Roma, mostrano infatti che i nuovi Indici forniscono buone prestazioni nel descrivere l'influenza dei fattori meteorologici sull'andamento della concentrazione di materiale particellare, sia nel periodo invernale che in quello estivo.

Questi buoni risultati dimostrano le altissime potenzialità della tecnica che si basa sulla misura della radioattività naturale per la valutazione del rimescolamento degli strati inferiori dell'atmosfera, e la concreta possibilità di ottenere, a breve, degli strumenti interpretativi semplici ed accurati che siano di ausilio alle Amministrazioni per la comprensione dei fenomeni che regolano l'inquinamento da materiale particellare nelle aree urbane, per la gestione delle emergenze e per la valutazione dell'efficacia dei provvedimenti.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano ringraziare il Comune di Roma (Dipartimento Politiche Ambientali ed Agricole, Servizio Inquinamento Atmosferico) che ha finanziato, nell'ambito del progetto AUGUSTO, il lavoro relativo alla messa a punto degli Indici di Stabilità Atmosferica per gli inquinanti primari. Gli Autori sono inoltre riconoscenti al dr. Alessandro di Menno, alla sig.ra Tiziana Sargolini e al sig. Salvatore Pareti, che hanno effettuato le misure di radioattività naturale e di concentrazione di PM10, e ai sigg. Marco Giusto e Mauro Montagnoli per la loro preziosa assistenza tecnica.

Bibliografia

Allegrini I., Febo A., Pasini A. and Schiarini S.: *Monitoring of the nocturnal mixed layer by means of particulate radon progeny measurement* - J. Geophys. Res. 99, 765-777, 1994.

Duenas C., Perez. M., Fernandez M.C., Carretero J.: *Radon concentration in the surface air and vertical atmospheric stability in the lower atmosphere* - Journal of Environmental Radioactivity 31, 87-102, 1996.

Febo A., Perrino C., Giliberti C. and Allegrini I.: *Use of proper variables to describe some aspects of urban pollution* - Urban Air Pollution, I. Allegrini and F. De Santis Eds., Springer-Verlag, Berlin, 295-315, 1996.

Febo A., Perrino C. and Allegrini I.: *Selective gas and particle sampling: diffusion denuders*. In: Gas and particle phase measurements of atmospheric organic compounds - Gordon and Breach, 127 – 175, 1999.

Perrino C., Pietrodangelo A. and Febo A.: *An atmospheric stability index based on radon progeny measurements for the evaluation of primary urban pollution* - Atmos. Environ.. 35, 5235-5244, 2001.

Porstendorfer J., Butterweck G., Reineking A.: *Diurnal variation of the concentrations of Radon and its short-lived daughters in the atmosphere near the ground* - Atmos. Environ. 25, 709-713, 1991.