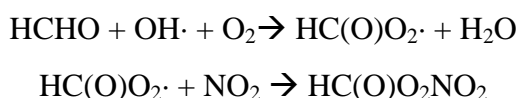


Negli ultimi tempi, un altro indicatore di smog fotochimico, più specifico dell'ozono, è stato individuato nel PAN. Il perossiacetilnitrato, infatti, possiede il vantaggio, rispetto all'ozono, di non essere prodotto in quantità significative da sorgenti naturali.

Il PAN proviene dalla reazione tra biossido d'azoto e l'acetilperossido, a sua volta derivato dalla reazione dell'acetaldeide con il radicale OH·:



La pericolosità ambientale del PAN è associata alla sua persistenza: esso tende ad accumularsi nelle zone più alte e fredde della troposfera da dove diffonde verso le zone sottostanti più calde, dissociandosi termicamente con produzione di radicali e NO₂. Tale comportamento è dovuto al fatto che la costante di dissociazione del PAN dipende fortemente dalla temperatura e che i processi di rimozione del PAN, alternativi alla decomposizione termica, sono molto lenti. Pertanto il PAN costituisce una riserva stabile negli strati più freddi della media e alta troposfera sia di NO_x, sia di radicali iniziatori di reazioni secondarie (Mohnen *et al.*, 1993).

2.3. La meteorologia dell'inquinamento atmosferico

Pressoché la totalità dei fenomeni di inquinamento atmosferico avviene nella porzione più bassa dell'atmosfera chiamata “*Planetary Boundary Layer*” (Strato Limite Planetario), o PBL. Il PBL comprende la parte di troposfera nella quale la struttura del campo anemologico risente dell'influenza della superficie terrestre e si estende fino a oltre 1 Km di altezza.

I più importanti fattori meteorologici che interessano i fenomeni di inquinamento atmosferico sono (Zannetti, 1990):

- il vento orizzontale (velocità e direzione), generato dalla componente geostrofica e modificato dal contributo delle forze d'attrito del terreno e da effetti meteorologici locali, come brezze marine, di monte e di valle, circolazioni urbano-rurali, ecc.;
- la stabilità atmosferica, che è un indicatore della turbolenza atmosferica alla quale si devono i rimescolamenti dell'aria e quindi il processo di diluizione degli inquinanti;

- la quota sul livello del mare;
- le inversioni termiche che determinano l'altezza del PBL;
- i movimenti atmosferici verticali dovuti a sistemi baroclini od orografici.

L'importante ruolo assunto dalla **stabilità atmosferica** nella dispersione degli inquinanti induce alcuni cenni su questo concetto.

Nella troposfera la temperatura normalmente decresce all'aumentare dell'altitudine. Il profilo di temperatura di riferimento per valutare il comportamento delle masse d'aria è quello osservato per una particella d'aria che si innalza espandendosi adiabaticamente. Quando il profilo reale coincide con quello di riferimento, una particella d'aria - a qualsiasi altezza venga portata - si trova in equilibrio indifferente, cioè non ha alcuna tendenza né a salire né a scendere (*atmosfera neutra*). Quando la temperatura decresce con l'altezza più velocemente del profilo di riferimento, le particelle d'aria ad ogni quota si trovano in una condizione *instabile* perché se vengono spostate sia verso il basso che verso l'alto continuano il loro movimento nella medesima direzione allontanandosi dalla posizione di partenza. Se, invece, la temperatura decresce con l'altezza più lentamente del profilo adiabatico, o addirittura aumenta (situazione detta di 'inversione termica'), le particelle d'aria sono inibite sia nei movimenti verso l'alto che verso il basso e la situazione è detta *stabile*.

Condizioni neutre sono dunque caratterizzate dalla presenza di un gradiente di temperatura adiabatico ($|\Delta T/\Delta z| \approx 9.86 \text{ }^\circ\text{C/Km}$) e si verificano tipicamente durante le transizioni notte-giorno, in presenza di copertura nuvolosa, o con forte vento.

Condizioni instabili si verificano quando il trasporto di calore dal suolo verso l'alto è notevole, come accade nelle giornate assolate.

Le condizioni stabili, che si verificano tipicamente nelle limpide notti continentali con vento debole, sono le più favorevoli ad un ristagno ed accumulo degli inquinanti.

I più gravi episodi di inquinamento si verificano in condizioni di inversione termica; in questi casi, infatti, gli inquinanti emessi al di sotto della quota dell'inversione (a meno di possedere un'energia meccanica sufficiente a forare l'inversione), non riescono ad innalzarsi poiché risalendo si trovano ad essere comunque più freddi e dunque più pesanti dell'aria circostante.

Concetto connesso a quello di stabilità atmosferica, e di diretto interesse nella previsione degli inquinanti atmosferici, è la **diffusione turbolenta**. Il rapido ed irregolare movimento di macroscopiche porzioni di fluido che caratterizza questo fenomeno avviene a scale molto più grandi di quelle coinvolte nella diffusione molecolare, e perciò il contributo di quest'ultima nella dispersione di inquinanti è trascurabile. Il livello di turbolenza nel *Planetary Boundary Layer* cresce al crescere della velocità del vento, della rugosità della superficie terrestre e dell'instabilità atmosferica. La turbolenza, infatti, è indotta sia da componenti meccaniche che da componenti termiche (forze di galleggiamento dovute alla differenza tra la forza gravitazionale e la spinta di Archimede).

2.4. Parametri meteorologici e loro misure

La determinazione del tipo di clima fornisce importanti indicazioni sul tipo di inquinamento a cui può essere soggetta un'area geografica. A tal fine è necessario studiare il campo di temperature, il campo anemologico, la turbolenza atmosferica nonché la frequenza delle precipitazioni e delle nebbie.

Questi fenomeni meteorologici vengono usualmente definiti tramite la caratterizzazione dei seguenti parametri: temperatura, pressione, umidità, piovosità, radiazione solare, direzione e velocità del vento.

La **temperatura** dell'aria viene espressa in °C; secondo le norme dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale il sensore si deve collocare tra 1.25 e 2 m dal suolo (WMO, 1983).

Per stimare l'altezza dello strato di rimescolamento e per verificare la presenza o meno di strati di inversione termica, valutandone lo spessore e l'altezza dal suolo, è necessario rilevare il profilo verticale di temperatura. La misura del gradiente verticale della temperatura può essere condotta in continuo mediante sensori situati su 'torri meteorologiche', o in maniera discontinua con lanci di palloni a perdere, o ancora con sensori al suolo per il telerilevamento, come il *Radio Acoustic Sounding System* (RASS).³

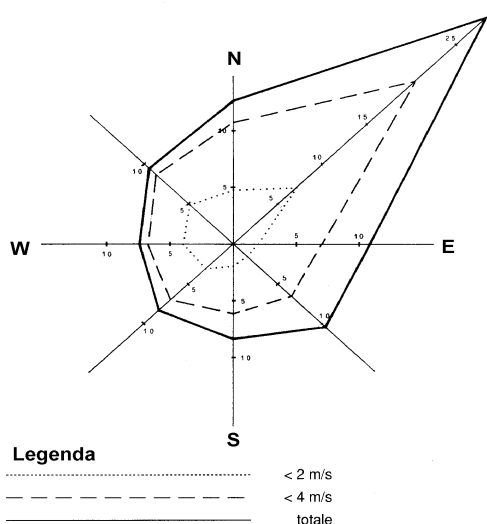
³ Il RASS è costituito da un generatore di onde acustiche e da un ricetrasmittitore radio. Il generatore acustico invia verso l'atmosfera un treno di onde sinusoidali (*burst*) ed il trasmettitore radio invia in

La **velocità** e **direzione del vento** sono misurate rispettivamente in metri/secondo e in gradi sessagesimali rispetto al Nord. La quota standard per le misure al suolo è 10 m (WMO, 1983). Per il calcolo della direzione di provenienza del vento vengono utilizzati prevalentemente tre metodi:

1. la direzione prevalente, cioè il settore nel quale si verifica la massima frequenza di eventi durante l'intervallo di tempo dell'osservazione;
2. la media vettoriale della velocità vento;
3. la media aritmetica della direzione del vento.

Condizioni di *calma* e di *vento variabile* vengono attribuite rispettivamente quando l'intensità del vento è molto bassa e quando la deviazione standard della direzione del vento risulta molto elevata.

Fig. 2.1. *Rosa dei venti a Porto Marghera: media anni 1975-1991.*



Le distribuzioni congiunte del valor medio della direzione e della velocità del vento vengono sintetizzate nei caratteristici diagrammi della 'rosa dei venti', di cui in figura 2.1 si riporta un esempio.

Per il rilevamento del profilo del vento in quota è possibile utilizzare sistemi di telerilevamento, come il *Sound Detection System And Ranging (SODAR)*⁴.

continuo un'onda elettromagnetica nella banda VHF. La pressione dell'onda acustica produce una variazione dell'indice di rifrazione dell'aria che genera una riflessione parziale dell'onda radio verso il radiorecettore. Per effetto Doppler, la frequenza radio di ritorno è spostata rispetto a quella inviata di una quantità che è proporzionale alla velocità dell'onda acustica. La misura della frequenza radio di ritorno, eseguita in successione dal radar Doppler in corrispondenza ad ogni pacchetto di impulsi audio, permette di tracciare il diagramma delle velocità di propagazione dell'onda acustica alle diverse quote. Poiché tale velocità è funzione della radice quadrata della temperatura dell'aria, il RASS fornisce, in definitiva, il profilo della temperatura in quota.

⁴ Il funzionamento del SODAR è basato su di un generatore di onde acustiche che emette nell'atmosfera un treno d'onde sinusoidali (*burst*), con frequenze di 1-2 kHz. L'interazione con l'atmosfera produce una diffusione delle onde. Una parte dell'energia ritorna al trasduttore che l'ha generata, il quale la trasforma in segnale elettrico. Per effetto Doppler, il segnale di ritorno ha frequenza diversa dal segnale di partenza. La differenza di frequenza fra impulso emesso ed impulso ricevuto dà la velocità della massa d'aria che l'ha

La **stabilità atmosferica** può essere caratterizzata con diversi metodi, fra questi in particolare quelli basati su :

- il numero di Richardson dei flussi, R_f , ovvero il rapporto tra il tasso di dissipazione (o produzione) di turbolenza termica e il tasso di turbolenza dovuta a sforzi tangenziali di scorrimento (rispettivamente $R_f < 0$, $= 0$ e > 0 per condizioni instabili, neutre e stabili);
- la lunghezza di Monin-Obukhov, L che può definirsi come l'altezza sopra il livello del suolo per cui la produzione di turbolenza meccanica eguaglia quella termica ($1/L < 0$, $= 0$ e > 0 rispettivamente per condizioni instabili, neutre e stabili);
- metodi empirici, tra cui il più famoso è lo schema di Pasquill, presentato nella tabella 2.2, i cui parametri di riferimento sono l'intensità del vento al suolo, la radiazione solare e la copertura del cielo.

Tab. 2.2. *Definizione delle classi di stabilità di Pasquill.*

Velocità del vento al suolo (m/s)	Insolazione (W/m^2)			Stato del cielo notturno	
	Forte > 700	media 350 - 700	debole < 350	copertura > 4/8	copertura < 4/8
< 2	A	A - B	B		
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

A = INSTABILITÀ FORTE, B = INSTABILITÀ MEDIA, C = INSTABILITÀ DEBOLE,
D = NEUTRALITÀ, E = STABILITÀ DEBOLE, F = STABILITÀ FORTE

Metodi alternativi a quello di Pasquill utilizzano il valore della deviazione standard σ della direzione orizzontale del vento, il cosiddetto 'sbandieramento', oppure la valutazione del gradiente termico verticale, $\frac{\partial T}{\partial z}$, grandezza direttamente connessa al significato fisico di stabilità atmosferica (tab. 2.3).

riflesso, mentre il tempo di ritardo dell'eco fornisce la quota alla quale è avvenuta la riflessione. Operando con trasmettitori acustici in tre direzioni si ricostruisce il vettore velocità del vento.

Tab. 2.3. *Definizione delle categorie di stabilità in funzione della fluttuazione della direzione orizzontale del vento e del gradiente termico verticale*

<i>Grado di stabilità</i>	<i>Categoria di Pasquill</i>	<i>Deviazione standard s(q)</i>	<i>Gradiente termico verticale $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ (°C/100 m)</i>
INSTABILITÀ FORTE	A	$\geq 22.5^\circ$	< -1.9
INSTABILITÀ MEDIA	B	da 17.5° a 22.5°	da -1.9 a -1.7
INSTABILITÀ DEBOLE	C	da 12.5° a 17.5°	da -1.7 a -1.5
NEUTRALITÀ	D	da 7.5° a 12.5°	da -1.5 a -0.5
STABILITÀ DEBOLE	E	da 3.75° a 7.5°	da -0.5 a $+1.5$
STABILITÀ FORTE	F	$< 3.75^\circ$	$> +1.5$

Le diverse definizioni, in effetti, non sono del tutto coincidenti (soprattutto perché le grandezze che individuano le classi hanno significati diversi) per cui può accadere che la medesima situazione atmosferica venga attribuita, a seconda del metodo utilizzato, a due classi di stabilità distinte.

2.5. L'ambiente urbano

Il problema dell'inquinamento atmosferico desta particolari preoccupazioni nelle aree urbane dove è elevata la produzione di inquinanti e maggiore è la popolazione esposta al rischio di danni alla salute.

Le fonti diffuse, soprattutto autoveicolari, rappresentano dal punto di vista sanitario il rischio principale. Infatti, mentre i grandi impianti termoelettrici ed industriali sono generalmente localizzati alla periferia delle città o lontano da esse, e le loro emissioni avvengono attraverso alti camini che ne facilitano la diluizione, le emissioni diffuse dei piccoli impianti e degli scarichi del traffico autoveicolare avvengono all'interno dei centri urbani e spesso nelle condizioni peggiori (stati di inversione termica in bassa quota, funzionamento non a regime dei motori nel traffico congestionato e nei *canyon* cittadini, ecc.).

Il grado di esposizione della popolazione è pertanto assai elevato, soprattutto perché gli inquinanti vengono rilasciati al livello del suolo (autoveicoli), o del primo piano delle abitazioni (autobus) o dei tetti (riscaldamento domestico).