

## **ANALISI METEOROLOGICA E METEO-DIFFUSA**

La descrizione delle condizioni meteorologiche è fondamentale per comprendere i meccanismi di dispersione degli inquinanti in atmosfera e le relative ricadute al suolo. A parità di emissioni è, infatti, soltanto la meteorologia che determina i livelli di inquinamento a cui siamo esposti. In particolare la meteorologia agisce da abbattitore degli inquinanti in atmosfera per 'dilavamento', attraverso le precipitazioni, tra cui la forma più efficace è la neve, e per 'dispersione', in condizioni di vento o di elevata turbolenza. Configurazioni meteorologiche caratterizzate dalla presenza di anticicloni o promontori di alta pressione determinano condizioni di stabilità atmosferica riducendo le capacità di dispersione. Tali configurazioni, a causa delle caratteristiche di stazionarietà, spesso determinano il perdurare delle condizioni di stabilità, favorendo valori crescenti di concentrazione degli inquinanti in aria. Lo stato di inquinamento in un'area è fortemente determinato, oltre che dalle sorgenti emissive e dalle caratteristiche morfologiche della zona, dalle caratteristiche della porzione di atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre (il Planetary Boundary Layer, lo strato limite planetario) in cui hanno luogo l'emissione, il trasporto e la dispersione degli inquinanti. L'analisi meteo-diffusiva intende descrivere, attraverso parametri di sintesi, le principali caratteristiche della turbolenza del PBL ai fini di individuare le situazioni sfavorevoli (o favorevoli) alla dispersione degli inquinanti e di quelle favorevoli (o non favorevoli) alla formazione di inquinanti secondari. Tale analisi può essere condotta con l'ausilio di un processore meteorologico diagnostico che, a partire dai dati meteorologici misurati dalla rete di rilevamento meteo-idrografica, ricostruisce i principali parametri che caratterizzano la turbolenza atmosferica sulla base di relazioni derivate dalla teoria di similarità di Monin-Obukhov e sul bilancio energetico superficiale. Di solito le stazioni di monitoraggio vengono collocate in prossimità dei capoluoghi provinciali, con un'adeguata dotazione strumentale. Tale scelta è motivata dal fatto che le grandi aree urbane risultano essere le più critiche nei confronti delle situazioni di accumulo degli inquinanti atmosferici.

### **Strato limite planetario (PBL, Planetary Boundary Layer)**

Il PBL si estende entro i primi 100-3000 metri dell'atmosfera e descrive quella parte di atmosfera che viene direttamente influenzata da quello che accade sulla superficie terrestre e risponde ai cambiamenti indotti dalla superficie terrestre stessa in breve tempo (circa un'ora o meno). L'interazione fra atmosfera e superficie può avvenire attraverso diversi meccanismi, quali l'attrito meccanico, l'evaporazione e la traspirazione, il trasferimento di calore, l'emissione di sostanze inquinanti e la variazioni della circolazione atmosferica dovuta alla conformazione del terreno. Il PBL urbano è lo strato limite planetario al di sopra di un'area urbana. La sua struttura, almeno nello strato inferiore, è condizionata dall'elevato attrito superficiale e dalle specificità dei meccanismi di trasferimento del calore al di sopra dell'area urbana, specialmente dalla loro forte disomogeneità spaziale. Con PBL convettivo si indica lo strato limite in condizioni di forte insolazione, in questo PBL si formano vortici d'aria di natura convettiva (si pensi ad una pentola posta sopra una fonte di calore, contenente acqua in ebollizione) con un aumento della produzione di turbolenza (al contrario di quanto avviene per il PBL stabile) e di conseguenza un forte rimescolamento dell'atmosfera. In condizioni di raffreddamento

della superficie terrestre, la creazione di vortici di natura convettiva è inibita e la turbolenza è sostenuta solo dal vento. La turbolenza e il rimescolamento atmosferico sono deboli. Il PBL stabilmente stratificato è in genere la parte inferiore di una inversione superficiale di temperatura (ovvero la superficie terrestre è più fredda dell'aria che sta appena al di sopra di essa). L'altezza di rimescolamento è la quota dello strato in prossimità del suolo all'interno del quale gli inquinanti o ogni altra sostanza emessa all'interno di questo strato, o contenuta in esso, si disperde verticalmente a causa della convezione o della turbolenza meccanica in un tempo di scala di circa mezz'ora. È necessario considerare quattro tipi di processi di dispersione collegati fra loro per descrivere il comportamento degli inquinanti emessi dal traffico, la loro misura in prossimità delle strade e i loro flussi in atmosfera. Dopo il rilascio delle sostanze dalle marmitte, gli inquinanti sono inglobati nelle onde turbolente generate dai veicoli, che possono accelerarne così il rimescolamento. La circolazione parzialmente canalizzata in senso orizzontale nello strato d'aria più vicino al suolo, trasporta gli inquinanti da una strada alle strade vicine. La circolazione dell'aria all'interno delle strade causa il trasporto di inquinanti verso l'alto: dal livello più inquinato dei pedoni o dei veicoli ai livelli meno inquinati verso i tetti ed eventualmente anche sopra, ma causa anche un trasporto in senso contrario (verso il basso) del livello di inquinamento residuo già presente ai livelli superiori verso il suolo. L'interazione della circolazione turbolenta negli strati più bassi dell'atmosfera, ovvero appena sopra i tetti, con le strutture turbolente di circolazione dell'aria all'interno delle strade determina l'entità dei flussi di sostanze inquinanti che si verificano a livello dei tetti. Inoltre, la struttura turbolenta del movimento atmosferico all'interno del PBL gioca un ruolo fondamentale nel rimescolamento degli inquinanti emessi da sorgenti differenti in diversi quartieri e per la loro successiva interazione con il livello di inquinamento residuo, ovvero già presente in atmosfera. Esistono nella letteratura scientifica numerosi metodi di stima dell'estensione verticale dello strato limite planetario. Il Servizio Meteorologico Regionale di ARPA Lombardia utilizza misure di profili verticali delle variabili atmosferiche più comuni (pressione, temperatura, umidità, velocità del vento) effettuate due volte al giorno (mezzanotte e mezzogiorno circa) al CMR<sup>1</sup> di Linate dall'Aeronautica militare. Questa misura si realizza lanciando un pallone galleggiante adeguatamente attrezzato verso l'alto, gli strumenti inviano poi alla stazione al suolo una misura ogni 10 secondi. In pratica si ha a disposizione una 'fotografia' istantanea dello stato dell'atmosfera di una colonna d'aria posta al di sopra della zona di lancio.

### **Classe di stabilità atmosferica**

La classe di stabilità Atmosferica è un parametro sintetico che rappresenta globalmente lo stato turbolento del PBL (Planetary Boundary Layer), raggruppando in 6 classi tutte le possibili configurazioni meteorologiche e micrometeorologiche che influenzano la dispersione degli inquinanti in atmosfera. Tradizionalmente, le 6 categorie di stabilità atmosferica sono le seguenti:

- sono previste tre categorie, denominate A, B, C che rappresentano le situazioni convettive, favorevoli alla dispersione degli inquinanti. La categoria A rappresenta

---

<sup>1</sup> Centro meteorologico regionale

situazioni molto convettive, con velocità del vento bassa e forte insolazione. La categoria B è una situazione che si presenta quando o la radiazione solare è relativamente poco elevata o la velocità del vento (e quindi la turbolenza di origine meccanica) è elevata. La categoria C ha luogo quando la velocità del vento è elevata e la radiazione solare è ridotta.

- è stata prevista una situazione che rappresenta tutte quelle situazioni (stabili o convettive) prossime all'adiabaticità, denominata categoria D che quindi rappresenta situazioni diurne o notturne con cielo coperto e vento.

- infine sono state previste due situazioni stabili (relative esclusivamente a situazioni notturne) indicate come categoria E e categoria F, la prima relativa a situazioni con vento abbastanza elevato e cielo poco nuvoloso, mentre l'ultima relativa a situazioni con cielo sereno e velocità del vento bassa.

Per ogni stazione sono state calcolate su base mensile le distribuzioni di frequenza delle occorrenze orarie delle classi di stabilità.

### **Altezza dello strato rimescolato**

Con altezza dello strato rimescolato si intende l'altezza dello strato adiacente alla superficie terrestre all'interno del quale un composto, introdotto a livello del suolo, viene disperso verticalmente per turbolenza meccanica o convettiva e diluito a concentrazione uniforme (generalmente bassa). L'altezza di rimescolamento è uno dei parametri più utilizzati ai fini delle valutazioni di qualità dell'aria in quanto permette di quantificare le dimensioni della porzione di atmosfera interessata dai fenomeni turbolenti. L'altezza dello strato rimescolato, essendo legata alla radiazione solare, presenta sia un marcato ciclo diurno, passando dai valori minimi notturni ai valori massimi diurni nelle ore di maggiore insolazione, sia un marcato ciclo stagionale, con valori minimi (e quindi più critici per l'accumulo degli inquinanti) invernali e valori massimi (e quindi più favorevoli alla dispersione) estivi. Per ogni stazione si sono analizzati, su base mensile, gli andamenti del massimo giornaliero e della media giornaliera dell'altezza dello strato rimescolato e la distribuzione dei valori orari, condizionatamente ad ogni mese, nell'arco dell'anno.

### **Intensità del vento**

Il vento influisce in modo rilevante sulle dinamiche di dispersione in atmosfera: venti intensi favoriscono l'allontanamento delle sostanze emesse dalla sorgente costituendo, insieme alle precipitazioni, uno dei principali sistemi di abbattimento delle concentrazioni (si pensi ad esempio ai venti di caduta tipici delle regioni alpine), mentre venti molto deboli (la "calma di vento" tipica della pianura padana), spesso associati a perduranti condizioni anticicloniche, favoriscono l'accumulo degli inquinanti. Inoltre l'interazione del campo di vento con la superficie terrestre (rilievi e rugosità del terreno) genera turbolenza di origine meccanica. Infine, l'esistenza di complessità e disomogeneità del terreno induce lo sviluppo di dinamiche locali che si sovrappongono alla struttura generale della circolazione atmosferica, influenzando in modo significativo la dispersione (si pensi alle brezze di monte-valle, terra-mare o anche all'isola di calore urbana). Per ogni stazione sono state calcolate su base mensile le distribuzioni di frequenza dell'intensità oraria della

velocità del vento e la distribuzione dei valori orari, condizionatamente ad ogni mese, nell'arco dell'anno.

### **Le caratteristiche climatiche della Pianura Padana**

Le principali caratteristiche fisiche del contesto lombardo sono la spiccata continentalità dell'area e il debole regime del vento. La situazione meteorologica della pianura padana, con la presenza delle Alpi e dell'Appennino è particolarmente svantaggiata: la Lombardia si trova infatti nella parte centrale della Pianura Padana, in un contesto che presenta caratteristiche uniche, dal punto di vista climatologico, determinate in gran parte dalla conformazione orografica dell'area. Si tratta di una vasta pianura circondata a Nord, Ovest e Sud da catene montuose che si estendono fino a quote elevate, determinando così peculiarità climatologiche sia dal punto di vista fisico sia da quello dinamico. Le principali caratteristiche fisiche sono la spiccata continentalità dell'area, il debole regime del vento e la persistenza di condizioni di stabilità atmosferica. Dal punto di vista dinamico, la presenza della barriera alpina influenza in modo determinante l'evoluzione delle perturbazioni di origine atlantica, determinando la prevalenza di situazioni di occlusione e un generale disaccoppiamento tra le circolazioni nei bassissimi strati e quelle degli strati superiori. Tutti questi fattori influenzano in modo determinante le capacità dispersive dell'atmosfera, e quindi le condizioni di accumulo degli inquinanti, soprattutto nel periodo invernale, ma anche la presenza di fenomeni fotochimici nel periodo estivo. Il clima della pianura padana è, pertanto, di tipo continentale, ovvero caratterizzato da inverni piuttosto rigidi ed estati calde. Le precipitazioni di norma sono poco frequenti e concentrate in primavera ed autunno. La ventilazione è scarsa in tutti i mesi dell'anno. La continentalità del clima è meno accentuata in prossimità delle grandi aree lacustri e in prossimità delle coste dell'alto Adriatico. Durante l'inverno il fenomeno di accumulo degli inquinanti è più accentuato, a causa della scarsa circolazione di masse d'aria al suolo. La temperatura media è piuttosto bassa e l'umidità relativa è generalmente molto elevata. La presenza della nebbia è particolarmente accentuata durante i mesi più freddi. Lo strato d'aria fredda, che determina la nebbia, persiste spesso tutto il giorno nel cuore dell'inverno, ma di regola si assottiglia in modo evidente durante le ore pomeridiane. La zona centro-occidentale della pianura Padana, specie in prossimità delle Prealpi, è interessata dalla presenza di un vento particolare, il foehn, corrente di aria secca che si riscalda scendendo dai rilievi. La frequenza di questo fenomeno è elevata nel periodo compreso tra dicembre e maggio, raggiungendo generalmente il massimo in marzo. Il fenomeno del foehn, che ha effetti positivi sul ricambio della massa d'aria quando giunge fino al suolo, può invece determinare intensi fenomeni di accumulo degli inquinanti quando permane in quota e comprime gli strati d'aria sottostanti, formando un'inversione di temperatura in quota. In generale, si ha il fenomeno dell'inversione termica quando la temperatura dell'aria diminuisce avvicinandosi al suolo oppure aumenta con la quota invece di diminuire: se l'aumento di temperatura parte dal suolo, per irraggiamento notturno in condizioni di cielo sereno o poco nuvoloso e di calma di vento o di vento debole, si ha l'inversione da irraggiamento con base al suolo, se l'aumento di temperatura lo si incontra a partire da una certa quota sul suolo, si ha l'inversione con base in quota, come nel caso di subsidenza anticiclonica. Nei mesi invernali si hanno spesso combinazioni di inversione con base al suolo con

inversioni da subsidenza, in questo caso lo spessore totale può essere assai superiore a quello della semplice inversione da irraggiamento con base al suolo. Dopo l'alba, per effetto del riscaldamento del suolo da parte del sole, si creano dei moti turbolenti che tendono a distruggere l'inversione iniziando dalla sua parte inferiore, mentre al tramonto si riforma l'inversione al suolo.