

ING. DIEGO CAPOBIANCO

**METEOROLOGIA
ED
INQUINAMENTO ATMOSFERICO**

**Le relazioni fra i fenomeni meteorologici ed
i principali inquinanti atmosferici**

Concetti fondamentali per lo studio dell'inquinamento atmosferico su scala urbana

2.1 Concetti di meteorologia

La meteorologia riveste un ruolo determinante e al tempo stesso complesso nell'interpretazione di molti fenomeni di inquinamento atmosferico. Le forzanti meteorologiche interferiscono in modo sostanziale e non sempre facilmente comprensibile sul rapporto di causa - effetto tra emissioni di sostanze inquinanti e le relative concentrazioni misurate, rendendo la valutazione e la gestione della qualità dell'aria alquanto impegnativa. L'aleatorietà ed imprevedibilità della variabile meteorologica, ostacola, in parte, una valutazione del tutto obbiettiva dei risultati sulle politiche e sugli interventi per la qualità dell'aria, analogamente a come una variazione delle condizioni al contorno di pressione, temperatura e umidità possono influenzare e falsare una campagna di misure di laboratorio nell'ambito della chimica e delle fisica sperimentale.

Nella sua breve esperienza, chi scrive ha talvolta constatato che alcuni "addetti ai lavori" sottovalutano l'importanza della meteorologia in questo settore e talvolta ne danno un'interpretazione, non sempre esatta.

Ad aumentare le difficoltà di interpretazione dei fenomeni meteorologici a supporto dello studio dell'inquinamento atmosferico, vi è la difficoltà ad avere dati completi, esaustivi ed attendibili sia per la complessità delle misure necessarie a fornire una visione completa a chiara del fenomeno, sia perché tali misure necessitano di strumenti molto costosi e di procedure ed analisi laboriose.

E' ovviamente impossibile ed inadeguato in questa sede esporre in maniera esaustiva una materia così complessa, quindi verranno trattate una serie di concetti utili alla comprensione delle scelte fatte e delle metodologie usate nei prossimi capitoli, dove nel particolare sarà trattata la fase di monitoraggio preliminare dell'area di un comune della pianura pontina.

Le scale caratteristiche dei fenomeni meteorologici

Il tipo di informazioni riguardanti le condizioni meteorologiche che vengono messi di continuo a disposizione dai vari mezzi di comunicazione, solo in alcuni casi potrebbero rivelarsi utili per comprendere ed anche prevedere una situazione critica dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico. Ciò è dovuto al fatto che le scale spaziali e temporali sulle

quali si sviluppano fenomeni che contribuiscono a giornate di pioggia o di sole sono talvolta diverse da quelle che determinano la dispersione o il ristagno degli inquinanti nella troposfera. In meteorologia si usa distinguere e classificare i fenomeni in base alla loro scala spaziale e rispettiva scala temporale, quelli che agiscono su scale spaziali più grandi hanno anche tempi di azione più lunghi e viceversa. Anche l'inquinamento atmosferico è classificabile in base a scale spaziali e temporali diverse che ne differenziano anche la metodologia di studio da adottare.

In meteorologia i fenomeni caratteristici delle scale spaziali e temporali più grandi possono influenzare o meglio interferire con quelli che avvengono a scale più piccole, costituendone in qualche modo le forzanti esterne; ovviamente il fenomeno inverso è presente ma molto meno evidente al livello fenomenologico globale.

Di seguito viene elencata la divisione classica che viene adottata in campo meteorologico:

- **scala planetaria**

E' la scala più estesa dal punto di vista spaziale e temporale: vi rientrano le celle generali di circolazione dipendenti in particolare dal raggio terrestre e dalla velocità angolare del pianeta e le onde planetarie (onde di Rossby); queste ultime sono in parte responsabili della velocità di propagazione delle grandi perturbazioni o della persistenza di alcuni regimi su scala inferiore. La lunghezza d'onda di tali strutture è tipicamente di circa 6000Km; per una lunghezza d'onda di circa 700 Km si possono avere onde tendenti alla stazionarietà. Tali fenomeni hanno un impatto ovviamente molto indiretto sui fenomeni di inquinamento delle aree urbane, ma talvolta non trascurabile; a livello operativo sarebbe necessario un trasferimento di informazioni talmente importante che di fatto questi fenomeni non vengono mai presi in considerazione per questo tipo di studi.

I fenomeni che avvengono su scala planetaria hanno scale spaziali caratteristiche di 3000 – 40000 Km e scale temporali che vanno da settimane a mesi.

- **scala sinottica**

E' la scala alla quale si sviluppano i fenomeni meteorologici conosciuti con il nome di cicloni e anticicloni; i gradienti di pressione (differenze di pressione tra due punti rapportata alla loro distanza spaziale) causa di ogni movimento di masse fluide, sono in questo caso generati dalla complessa interazione di vari fenomeni, quali scambi termici su larga scala e i suddetti fenomeni su scala planetaria. Il moto rotatorio caratteristico di tali strutture è dovuto all' accelerazione di Coriolis, "osservabile" in un sistema rotante (come ad esempio il nostro pianeta) su qualsiasi elemento di massa che si sposta lungo tale sistema in punti che

ruotano a velocità tangenziale diversa, (ciò avviene ad esempio spostandosi lungo i meridiani terrestri).

Ai fini della comprensione di alcuni fenomeni di inquinamento su scala regionale e urbana è importante sapere che (di ciò è possibile dare anche una dimostrazione matematica) in situazioni di alta pressione (anticicloni – rotazione in senso orario nell'emisfero Nord) sono associati gradienti di pressione molto bassi, “*pressione alta e livellata*” e vi può essere persistenza di situazioni di quasi calma di vento, condizioni che nel gergo delle previsioni meteorologiche sono dette “stabili”. Nelle situazioni di bassa pressione (cicloni – rotazione in senso antiorario nell'emisfero Nord) invece si possono verificare forti gradienti di pressione, condizioni a cui sono associati i fenomeni più energici, la cosiddetta “instabilità”; in gergo meteorologico i venti originati da tali condizioni sono detti “*venti di gradiente*”.

Altri fenomeni che avvengono su scala sinottica in alcune zone del pianeta sono i venti termici stagionali, come gli alisei e i monsoni.

Le attuali previsioni meteorologiche raggiungono la loro massima efficienza e accuratezza proprio verso il limite inferiore di questa scala, sia per motivazioni operative che di mercato.

I fenomeni che avvengono su scala sinottica hanno scale spaziali caratteristiche di 500 – 5000 Km e scale temporali che vanno da giorni a settimane.

- **mesoscala**

E' la scala alla quale si sviluppano fenomeni quali le brezze di mare e di terra. Queste sono dovute alla formazione di piccoli gradienti di pressione su scala spaziale ridotta, conseguenti alla formazione di gradienti termici aventi origine dalla differente capacità termica tra terra e mare. Altri fenomeni che si studiano su tali scale sono i venti catabatici e anabatici e che si sviluppano tra fondovalle e aree in quota nelle zone ad orografia complessa, i quali traggono sempre origine da gradienti termici orizzontali.

Nel limite inferiore di tale scala si collocano anche gli eventi temporaleschi di grande estensione.

A livello fenomenologico le dinamiche delle masse fluide su tale scala possono essere profondamente influenzate dalle condizioni a scala sinottica.

I fenomeni meteorologici che avvengono a tale scala influenzano in maniera spesso importante la qualità dell'aria in ambiente urbano e le condizioni di inquinamento a livello regionale. A tale scala spaziale, detta anche “*scala regionale*” sono studiati i livelli e le dinamiche particolarmente complesse di alcuni inquinanti come l'Ozono.

I fenomeni che avvengono a mesoscala hanno scale spaziali caratteristiche di 10 – 500 Km e scale temporali che vanno da ore a qualche giorno.

- **scala locale – microscala**

I fenomeni osservabili a tale scala sono il risultato dell'interazione diretta di forzanti esterne con la superficie terrestre; i fenomeni tipici sono le piccole celle temporalesche e le termiche, cioè moti convettivi di particelle fluide dovute a scambi termici tra aria e suolo. A tale scala la dimensione verticale diventa confrontabile con quella orizzontale ed acquistano particolare importanza gli spostamenti d'aria in verticale. In ambiente urbano, dove a causa della presenza degli edifici aumenta notevolmente la superficie specifica soggetta alla radiazione solare, tali fenomeni acquistano ancora maggiore importanza e tendono ad avere una maggiore "resistenza" rispetto alle sollecitazioni dovute alle circolazioni che avvengono su mesoscala, dando origine alla cosiddetta "*isola urbana di calore*". Rientrano nella microscala anche le particolari circolazioni dovute ai moti d'aria orizzontale quando incontrano ostacoli quali alberi ma soprattutto edifici, dando luogo alle situazioni di "*canyon urbano*".

A tale scala assume un ruolo fondamentale un fenomeno difficilmente rilevabile ai più comuni strumenti meteorologici presenti nelle centraline di monitoraggio, *la turbolenza*, di cui si accennerà in seguito.

Tutto ciò che avviene a scala locale costituisce di fatto la principale forzante alle condizioni di inquinamento nelle aree urbane oltre a quella dovuta alle sorgenti emmissive. Anche per tale motivo ciò che condiziona la diffusione degli inquinati nella troposfera è studiato dalla cosiddetta "*micrometeorologia*".

I fenomeni che avvengono a scala locale - microscala hanno scale spaziali caratteristiche inferiori a 10 Km e scale temporali che vanno da pochi secondi a un ora.

La classificazione sopraesposta non è da considerarsi solo dal punto di vista logico -formale ma ha un' importanza anche operativa: basti pensare che i sistemi di equazioni che studiano la meteorologia a vari livelli subiscono varie semplificazioni a seconda di quali termini risultano trascurabili rispetto ad altri all'interno delle stesse, inoltre i modelli di previsione meteorologica funzionano con un meccanismo di elaborazione e trasferimento dell'informazione a cascata che segue proprio questa classificazione.

Si parte da un modello planetario che lavora in pochi centri al mondo altamente specializzati che effettua una previsione ed inoltra poi tali risultati ad altri centri che utilizzano questi dati

come condizioni iniziali e al contorno per effettuare previsioni su scala sinottica e così fino ad domini dell'ordine dei 1000 Km. Durante il trasferimento di tali informazioni i risultati delle previsioni su scale più grandi vengono talvolta corretti o interpolati con quelli provenienti dalle stazioni di misura e osservazione.

In ambito europeo il centro ECMWF di Reading (UK) (*European Centre for Medium-range Weather Forecast*) effettua previsioni su scala sinottica ricevendo a sua volta dati in ingresso da un modello a scala planetaria. Tale centro fornisce in esclusiva alle Aeronautiche militari dei vari stati europei i dati in uscita dal modello, per le rispettive previsioni del tempo nazionali.

Si sottolinea ciò perché questo meccanismo, elaborazione da parte del modello e trasferimento delle informazioni ad una scala più piccola, che può effettuare elaborazioni più accurate su domini più piccoli, è un processo che avviene anche per i modelli di previsione della diffusione di inquinanti atmosferici di tipo Euleriano; tale processo, trasferimento di dati che costituiscono le condizioni iniziali e al contorno per modelli a scala più piccola, costituisce forse il principale limite attuale a questo tipo di modelli. Si sottolinea inoltre, che in questo ambito, il modello meteorologico è parte fondamentale ed in certi casi integrante, del modello di dispersione.

Molto utile allo studio della meteorologia e della dinamica degli inquinanti atmosferici è anche la caratterizzazione di scala nella direzione verticale. All'interno della *troposfera*, la fascia di atmosfera più vicina alla superficie terrestre, che si estende fino a quote di 8 – 12 Km, dove avviene la quasi totalità dei fenomeni meteorologici e dove è presente gran parte della massa gassosa di tutta l'atmosfera, è possibile distinguere la zona più prossima al suolo, *lo strato limite atmosferico o strato limite planetario planetario* (*ABL- Atmospheric Boundary Layer o PBL - Planetary Boundary Layer*), di cui si parlerà in seguito e dove sono molto importanti i moti lungo la verticale e lo strato *geostrofico* coincidente in parte con l'estremità superiore dello strato limite atmosferico nel quale invece i gradienti nella direzione verticale della velocità delle masse d'aria in orizzontale sono trascurabili e dove le forzanti significative sono quelle dovute all'accelerazione di Coriolis.

La turbolenza

Questo argomento tra i più delicati e complessi della fisica moderna, viene in questa sede appena definito, in maniera non rigorosa, ai soli fini di rendere comprensibile la sua fondata-

tale importanza nel campo della micrometeorologia e della dispersione degli inquinanti su scala urbana.

Quando un fluido, gassoso o liquido, assume un regime turbolento, ciò avviene quasi sempre in ambito atmosferico, si osserva un moto irregolare nella quale le grandezze fisiche che lo descrivono subiscono delle *fluttuazioni* che assumono un carattere aleatorio nello spazio e nel tempo. Sull'importanza di tali fluttuazioni per la dinamica degli inquinanti a scala urbana si tornerà in seguito.

Importanti caratteristiche del regime turbolento sono la non esatta ripetitività sperimentale dei fenomeni, la altissima sensibilità alle condizioni iniziali e al contorno; tali aspetti uniti alla non linearità delle equazioni di bilancio che descrivono il moto dei fluidi, rendono la descrizione rigorosa e deterministica di tali fenomeni di fatto impossibili.

Il parametro fondamentale per identificare i regimi turbolenti è il numero dimensionale di Reynolds, dato dal rapporto tra grandezze caratteristiche dell'inerzia e grandezze rappresentative degli sforzi viscosi; è così definito:

$$\text{Re} = \frac{uD}{\nu}$$

Dove u è la velocità caratteristica del fenomeno, D è un parametro descrittivo delle dimensioni spaziali nelle quali si sviluppa il fenomeno e ν rappresenta la viscosità cinematica del mezzo; Re indicano regimi di moto laminare caratterizzati da regolarità del flusso, Re alti indicano regimi turbolenti.

In campo atmosferico, vista la viscosità cinematica dell'aria (dell'ordine di $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) e le dimensioni relativamente estese su cui avvengono i fenomeni, è presente sempre un certo grado di turbolenza.

Nello studio delle dinamiche degli inquinanti atmosferici su scala urbana la turbolenza costituisce una delle forzanti principali e può avere due origini ben distinte:

- 1) turbolenza di tipo meccanico dovuta all'azione dei venti e dei moti orizzontali specie in prossimità di ostacoli come il suolo, alberi ed edifici.
- 2) turbolenza dovuta a moti verticali causati dalla spinta di galleggiamento dovuta agli scambi termici che si sviluppano tra aria e suolo.

Nella descrizione dei moti turbolenti è presente un termine spesso parametrizzato o modellizzato, (come verrà accennato tra breve), chiamato diffusività turbolenta. A livello macroscopico, la turbolenza produce degli effetti simili a quelli della diffusione molecolare, dovuti proprio alle fluttuazioni turbolente: E' appena il caso di sottolineare che in quasi tutti i feno-

meni di dispersione degli inquinanti in atmosfera, la diffusione turbolenta è dominante rispetto a quella molecolare e pertanto la prima costituisce in questi casi la forzante principale; in alcuni casi dunque, il fenomeno della diffusione molecolare può essere addirittura trascurato. A livello di modellistica numerica la descrizione completa di tali fenomeni può avvenire per limiti legati alle risorse di calcolo solo per casi di studio di geometrie semplici e numeri di Re relativamente bassi. Si ricorre pertanto all'uso di analoghe equazioni di bilancio in cui ciascuna variabile, presente in ciascun termine di esse, viene scomposta in una parte media (rappresentativa del moto medio) e una parte fluttuante, rappresentativa del fenomeno turbolento appunto: tutto ciò introduce un maggior numero di incognite rispetto alle equazioni, pertanto alcuni termini vanno necessariamente modellizzati; tale processo oltre ad essere molto dispendioso dal punto di vista del calcolo, è spesso fonte di errori e imprecisioni nelle simulazioni e nelle previsioni, sia a livello meteorologico che di diffusione degli inquinanti in atmosfera. Altri approcci usati per la descrizione della turbolenza che in parte si ricollegano a quanto già descritto sono quello statistico, (maggiore è il numero di momenti statistici che si prendono in considerazione, maggiore è l'accuratezza con cui si riesce a descrivere il fenomeno) e quello spettrale.

La stabilità termica

Il concetto di stabilità termica statica è utile per interpretare alcune situazioni legate alla dispersione o al ristagno di sostanze inquinanti in atmosfera. Ovviamente si procede ad esporre una schematizzazione molto semplice, ma efficace per inquadrare il problema. Si immagini un'atmosfera priva di umidità, adiabatica, cioè tale che le particelle fluide non scambino calore tra loro e non ne ricevono dal suolo o da altre sorgenti; si supponga inoltre che tale atmosfera sia in quiete. In questo modo si avrà una distribuzione delle pressioni di tipo idrostatico in cui in ogni punto la pressione dipende dalla quantità d'aria sovrastante. In tali condizioni si creerà una stratificazione termica *neutra* in cui la temperatura dipende in ogni strato dalla quota, ovvero dalla pressione presente, in tal caso attraverso la legge idrostatica appunto; come nella generalità delle situazioni in ciascun punto dell'atmosfera è possibile conoscere il valore di temperatura partendo dal valore di pressione e viceversa, attraverso l'equazione di stato dei gas, $PV = nRT$.

Per tale motivo, nelle ipotesi fatte, il gradiente verticale di temperatura in condizioni adiabatiche in assenza di umidità Γ_a vale:

$$\Gamma_a = -\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{g}{C_p} = 0.0098 \text{ K / m}$$

Dove T è la temperatura z indica la variabile spaziale verticale, g è l'accelerazione di gravità e C_p è il calore specifico dell'aria secca a pressione costante.

Nella realtà oltre alla presenza dell'umidità, di moti dell'aria ecc., accade ovviamente che l'intensità degli scambi termici tra aria e suolo e tra vari strati d'aria sia tale per cui la stratificazione termica che si viene a creare, (variazione di temperatura con la quota) indicata dal gradiente termico verticale $\frac{\partial T}{\partial z}$ possa essere maggiore o minore della stratificazione neutra che si ha in condizioni adiabatiche e di aria in quiete.

Si parla di instabilità termica statica quando il gradiente verticale di temperatura dell'atmosfera è maggiore rispetto al gradiente che si avrebbe in condizioni adiabatiche,

cioè se $\Gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} > \Gamma_{ad}$ in tal caso si parla di andamento (gradiente) *superadiabatico*.

Quando al contrario il gradiente verticale di temperatura è minore rispetto al gradiente che si avrebbe in condizioni adiabatiche (gradiente *subadiabatico*), cioè se $\Gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} < \Gamma_{ad}$, si parla di stabilità termica statica .

Se invece $\Gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} = \Gamma_{ad}$ si hanno condizioni di stabilità neutre.

vediamo perchè si parla di instabilità o stabilità termica a seconda dell'esistenza di un gradiente superadiabatico o subadiabatico rispettivamente.

Nel caso in cui una particella subisca una variazione di quota in seguito ad una perturbazione, o ad una fluttuazione turbolenta, si può ipotizzare che vari la sua temperatura secondo una trasformazione adiabatica (cioè solo per variazioni di pressione dovute alle diverse quote in cui si trova durante il loro moto), ipotesi accettabile considerando che tale fenomeno avviene abbastanza rapidamente rispetto alle scale temporali caratteristiche della trasmissione del calore; allora in condizioni superadiabatiche, una particella che si muove in verticale verso l'alto sarà più calda delle particelle circostanti e dunque meno densa continuerà a salire per spinta di galleggiamento, viceversa per una particella che scende risulterà più fredda delle particelle circostanti e seguirà a scendere; per tali motivi si dice che si ha instabilità termica essendo ogni moto lungo la verticale ampliato. Facendo un ragionamento analogo si spiega perchè si parla di stabilità quando il gradiente è subadiabatico.

L'instabilità termica, nel caso in cui l'emissione avvenga al suolo, come nel caso del monitoraggio i cui dati saranno presentati nei capitoli successivi, (dovuta a traffico veicolare) favorisce la dispersione, favorendo il mescolamento lungo la verticale. In condizioni stabili, viceversa, se l'emissione è al suolo, è favorito l'accumulo degli inquinanti primari essendo ostacolato ogni moto lungo la verticale.

Quando invece l'inquinante è emesso a quote più elevate, come nel caso di emissione da camini molto alti, la situazione è parzialmente capovolta, nel senso che per scale temporali non molto lunghe un'emissione in quota in condizioni stabili mantiene gli inquinanti prossimi alla quota di emissione, o a quote più alte se l'emissione avviene a temperatura dei fumi più alta di quella ambiente. Viceversa, in condizioni di instabilità, sarà favorito il mescolamento lungo la verticale e gli inquinanti emessi in quota raggiungono più facilmente, una volta raffreddati, quote prossime al suolo. Il caso in esame, dove si deve in qualche modo studiare gli effetti combinati dell'inquinamento urbano di Aprilia, essenzialmente dovuto ad emissioni veicolari e da riscaldamento prossime al suolo, le emissioni di una centrale Turbogas a ciclo combinato di futura costruzione con emissione dei fumi in quota, (per la verità non molto elevata) si presenta senza dubbio complesso da questo punto di vista.

Spesso è comodo introdurre il concetto di temperatura potenziale: è la temperatura che assume una particella fluida portata ad una pressione di riferimento attraverso una trasformazione adiabatica:

$$\Theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

La temperatura potenziale permette in qualche modo di svincolare la temperatura misurata in un punto dalla sua quota, nel senso che la temperatura potenziale per una stratificazione neutra assumerà valori costanti al variare della quota, la temperatura reale in questo caso, come già detto in precedenza subirà delle variazioni con la quota deducibili attraverso la legge di variazione della pressione con la quota.

Per una stratificazione di tipo adiabatico si ha dunque: $\frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0$ (condizioni neutre)

dunque in caso di condizioni superadiabatiche (instabili) si ha $\frac{\partial \Theta}{\partial z} < 0$

in condizioni subadiabatiche (stabili) si ha $\frac{\partial \Theta}{\partial z} > 0$

Utilizzando tale variabile è dunque molto più semplice distinguere varie caratteristiche dell'atmosfera tra cui appunto quelle di stabilità o instabilità termica statica, proprio dall'andamento crescente o decrescente con la quota. La quota in cui avviene l'*inversione* di tale andamento costituisce un parametro fondamentale per lo studio della dispersione atmosferica, in quanto esso costituisce una sorta di "tappo" al trasporto verticale degli inquinanti. Spesso la condizione di stabilità o instabilità termica statica può essere annullata da effetti dinamici, campi di moto, turbolenza, ecc. Un modo per tenere in considerazione anche questi effetti è quello di studiare la variazione nel tempo dell'energia cinetica turbolenta: si ha instabilità quando essa tende a crescere, si ha stabilità in caso contrario, cioè quando tende a diminuire.

Un'informazione sintetica ma efficace si può ottenere attraverso il calcolo del Numero di Richardson dato dal rapporto del termine (della variazione dell'energia cinetica turbolenta) dovuto al galleggiamento, che tende ad aumentare o attenuare la componente turbolenta del moto a seconda dei casi, e il termine legato agli sforzi turbolenti (sempre instabilizzante).

$$Ri = \frac{\overline{\Theta' w'} g}{\overline{\Theta} \left(\overline{u' w'} \frac{\partial u}{\partial z} + \overline{v' w'} \frac{\partial v}{\partial z} \right)}$$

I termini con l'apice rappresentano le fluttuazioni (di tipo turbolento) il segno di sopra - segnato rappresenta il valore opportunamente mediato nello spazio e/o nel tempo.

per

$Ri < 0$ si hanno condizioni instabili. (entrambi i contributi sono instabilizzanti)

$0 < Ri < 1$ condizioni debolmente stabili: il contributo di galleggiamento è stabilizzante ma inferiore a quello degli sforzi turbolenti, instabilizzanti

$Ri > 1$ condizioni stabili; prevale il termine di galleggiamento, stabilizzante.

In altre parole, tale espressione indica il prevalere o meno del contributo stabilizzante o instabilizzante dovuto alle forzanti di origine termica ad esempio riscaldamento - raffreddamento del suolo) rispetto alle forzanti di origine meccanica (vento, ed azioni del vento su ostacoli e superfici orizzontali).

Il concetto di stabilità statica dunque, pur costituendo un' utile riferimento, da solo non è sufficiente a descrivere quello che avviene nell'atmosfera a scala locale, (cioè come si vedrà in seguito nello *strato limite atmosferico*) principalmente a causa della turbolenza che rappresenta l'elemento più importante e caratterizzante a questo livello.

Esempi in tal senso sono le condizioni vicine alla neutralità che si vengono ad instaurare in presenza di venti consistenti oppure le condizioni prossime alla omogeneità lungo la direzione verticale delle grandezze fisiche tra cui la temperatura potenziale, e quindi prossime ad un profilo neutro, in condizioni di forte irraggiamento solare e quindi di instabilità termica.

Oltre alla temperatura potenziale e al suo profilo verticale, una grandezza fisica molto importante è il flusso cinematico di calore, dato dal prodotto della temperatura potenziale di una particella fluida per la sua velocità verticale; (espressione già presente nella definizione del numero di Richardson) tale grandezza dà un'indicazione sull'entità degli scambi di calore tra i vari strati della troposfera.

Lo Strato Limite Atmosferico

Lo strato limite atmosferico (il cui sinonimo, nonché l'equivalente inglese è stato indicato nel sottoparagrafo precedente) è un concetto completamente diverso dallo strato limite inteso in senso fluidodinamico, ma come accennato in precedenza fa riferimento alla zona più prossima al suolo della troposfera; si può dare più di una definizione operativa di strato limite atmosferico, di seguito è riportata la definizione data da Stull:

si intende per strato limite atmosferico quella parte di atmosfera direttamente influenzata dalla presenza della superficie terrestre e che risente delle variazioni delle condizioni al suolo con un tempo caratteristico non superiore ad un'ora .

Da ciò si evince che lo strato limite è quella parte dell'atmosfera che risente direttamente delle variazioni dovute al ciclo giorno-notte, attraverso gli scambi termici tra aria e suolo.

L'evoluzione dello strato limite atmosferico nelle ventiquattro ore è il risultato degli effetti della radiazione solare diurna e della differenza di capacità termica tra aria e terra; durante questo periodo si possono distinguere varie situazioni:

- strato stabile: a partire dal tramonto la superficie terrestre non più riscaldata dal sole tende a raffreddarsi più rapidamente dell'aria sovrastante; a causa di ciò si ha un raffreddamento a partire dal basso con conseguente flusso di calore negativo e lo sviluppo a partire dal basso di uno strato a stratificazione stabile che tende a smorzare la turbolenza preesistente; per questi motivi lo strato stabile cresce durante tutta la notte fino all'alba.
- strato convettivo: a partire dall'alba il sole comincia a riscaldare il suolo generando uno strato dominato dalla convezione, cioè da moti verticali dovuti a spinta di galleggiamento che subiscono le particelle fluide più calde e quindi meno dense e più leggere. Tale strato cresce

durante il giorno erodendo progressivamente il sovrastante strato stabile. In tale strato possono distinguersi varie zone:

-strato superficiale: è la zona che è direttamente a contatto con il suolo e che per questo è caratterizzata spesso da forti gradienti di temperatura potenziale.

-strato di mescolamento: al di sopra dello strato superficiale, è caratterizzata da un profilo di temperatura potenziale costante. In questa zona l'intensità della convezione è tale da produrre intensi fenomeni di mescolamento che rendono costanti con la quota tutti i valori delle principali grandezze meteorologiche.

-strato di transizione (*entrainment*): è la zona in cui il profilo di temperatura potenziale inizia a crescere: è la zona dove avviene la crescita dello strato limite convettivo che erode il sovrastante strato stabile.

- strato residuo: è la zona che si viene a formare a partire dal tramonto al di sopra dello strato stabile dal quale viene progressivamente sostituita; si viene a creare quando l'energia cinetica turbolenta, propria dello strato convettivo, prodotta durante il giorno non viene più alimentata e la turbolenza tende a smorzarsi in conseguenza degli effetti della dissipazione viscosa. Questa zona è caratterizzata dunque da valori limitati di turbolenza e si riscontra un gradiente verticale di temperatura neutro.

Come accennato in precedenza, al di sopra di tali strati è costantemente presente una zona di *inversione termica* che limita gli scambi di materia con l'atmosfera libera; la quota in cui è presente tale zona può variare nel tempo in base all'ora del giorno ed alle condizioni presenti a mesoscala ed a scala sinottica e costituisce un parametro fondamentale, purtroppo di non facile individuazione con semplici strumenti di misura, per lo studio della dispersione atmosferica, costituendo come detto una barriera ai moti verticali dell'aria.

Strumenti per misurare tale parametro sono i radiosondaggi della temperatura effettuati con palloni sonda, oppure strumenti molto costosi e sofisticati di telerilevamento basati sui principi della propagazione delle onde elettromagnetiche ed acustiche in aria.

Le condizioni ora descritte corrispondono ad una situazione ideale di assenza di nubi e forzanti su scala sinottica; tale evoluzione temporale è illustrata in maniera schematica in fig.2.1 (Stull).

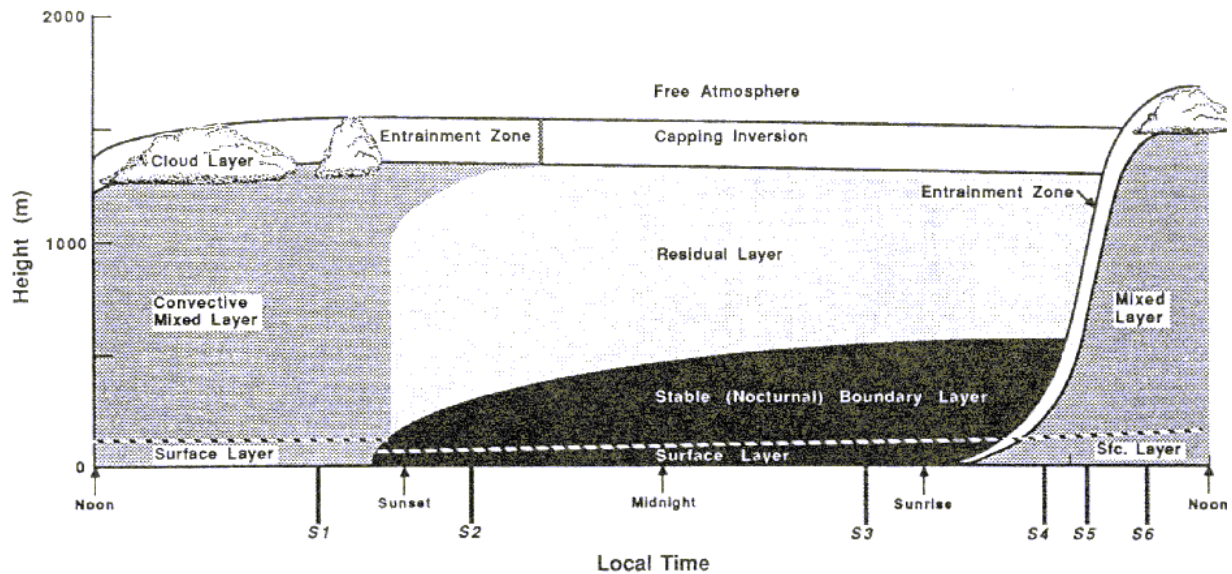


Figura2. 1 Schema dell'evoluzione temporale dello strato limite atmosferico in assenza di forzanti su scala sinottica.

A conclusione di tale paragrafo si può dunque spiegare perché in inverno si creano le situazioni più critiche per il ristagno degli inquinanti negli strati bassi dell'atmosfera; allo stesso modo si può spiegare come in assenza di forzanti esterne il periodo serale e notturno è più critico all'interno della singola giornata. Essendo fondamentale il ruolo degli scambi termici con il suolo si introducono due parametri fondamentali per la caratterizzazione dello stesso: l'*albedo* che indica la frazione di radiazione solare riflessa la *rugosità superficiale* utile per caratterizzare l'interazione meccanica tra aria e suolo. Sempre in questo campo è di fondamentale importanza il parametro dell'umidità relativa, dal quale si può valutare quanto calore emesso dal suolo sia effettivamente presente in forma di calore sensibile e quindi abbia un ruolo importante nel moto dell'aria in direzione verticale.

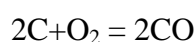
2.2 Inquinanti atmosferici

Monossido di carbonio

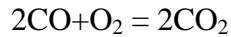
Il monossido di carbonio sopra ai $-192\text{ }^{\circ}\text{C}$ è un gas inodore incolore ed insapore è praticamente insolubile in acqua.

Formazione

Combustione incompleta di C e di composti contenenti C

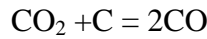


Il CO può essere rimosso da quest'altra reazione qualora ci sia una sufficiente quantità di O_2



Qualora ciò non succeda, nelle combustione in carenza di O_2 ci sarà rilascio di CO

Reazione ad elevata temperatura tra CO_2 e C



Avviene negli altiforni ed il CO prodotto può sfuggire in atmosfera.

Equilibrio di dissociazione ad elevate temperature fra CO_2 e $\text{CO} + \text{O}$

La reazione



Si sposta a destra a temperatura molto alte dell'ordine dei 2000°C . Se quindi avviene la formazione di CO e il sistema si raffredda velocemente il CO non torna più a CO_2 e quindi può sfuggire in atmosfera.

Fonti

La maggior parte del CO (intorno al 70% del totale) quindi, viste le reazioni su esposte, avviene nei motori a combustione interna, ciò dipende da

- *Reazione di Combustione incompleta* quando c'è il Rapporto di combustibile/aria ALTO-cioè quando abbiamo la miscela più ricca. Ciò spiega perché nei motori diesel miscela povera c'è meno produzione di CO dei motori a benzina.
- *reazione di dissociazione di CO_2* Quando durante lo scoppio viene prodotta CO_2 a temperature molto alte, questa si dissocia in $\text{CO} + \text{O}$ e venendo subito dopo raffreddata dell'acqua di raffreddamento che si trova a temperatura bassa, non torna più a CO_2 .
- Caratteristiche camera di combustione ed usura del motore
- Condizioni di marcia: meno velocità e temperatura, più produzione di CO

Altre fonti: trattamento rifiuti 17%. Altre fonti industriali (metallurgica, raffinerie acciaierie legno e carta) e riscaldamento (carbone olio combustibile e legno) per il resto.

Ci sono poi le fonti naturali che però sono relativamente modeste rispetto a quelle antropiche precedentemente descritte: Vulcani, emissioni di gas, scariche elettriche, fonti biologiche.

L'inquinante CO, soprattutto negli anni passati, è stato uno dei più critici nelle aree urbane; l'introduzione delle marmitte catalitiche a tre vie (abbattimento del CO, degli idrocarburi in-

combusti e dell' NO_x) e il rinnovamento del parco auto ha ridotto notevolmente i livelli di tale inquinante in Europa.

Rimozione

Si ipotizza una efficiente rimozione da microrganismi presenti nel suolo.

Inoltre c'è una rimozione dovuta alle piante ed una rimozione per i processi chimici in presenza di O_2 in atmosfera.

Parrebbe che la rimozione da microrganismi del suolo sia più veloce.

Effetti Nocivi

Sulle piante potrebbe avere, a grande concentrazione, un effetto di diminuzione dell'efficienza dei batteri fissatori di azoto, tuttavia tali concentrazioni non si raggiungono normalmente.

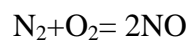
Viceversa sugli uomini e sugli animali ha un' effetto devastante sull'emoglobina, in caso di eventi acuti.

Il monossido di carbonio come è risaputo avvelena il sangue bloccando l'emoglobina in un composto la carbossiemoglobina COHb stabile che non consente più all'emoglobina Hb degli efficienti scambi di $\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$

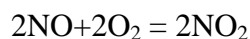
Il monossido di carbonio è una delle cause di morte dell'uomo quando è in alte concentrazioni, ma anche quando è in concentrazioni al di sotto di quelle letali crea effetti negativi.

Ossidi di azoto

La reazione fra N_2 ed O_2 , normali componenti dell'aria, avviene solo al di sopra della temperatura di 1210°C . In questo caso si forma principalmente monossido di azoto.



Il monossido, ossidandosi a sua volta, forma il biossido di azoto



Nelle combustioni la temperatura di 1210°C si supera facilmente.

In condizioni non limitanti di O_2 , più è alta la temperatura più ossido di azoto si forma. Quindi NO si forma in grande quantità nelle emissioni dei motori. Infatti in queste combustioni c'è sempre un eccesso di O_2 oltre a quello consumato nella normale reazione di combustione dai combustibili idrocarburici. Si potrebbe diminuire questo eccesso rendendo la miscela più "povera", ma ciò aumenterebbe la produzione di CO .

L'NO, se il raffreddamento avvenisse lentamente, potrebbe dissociarsi in N_2 ed O_2 , ma ciò non avviene in un flusso veloce di gas proveniente da un motore a combustione interna. L'NO₂ invece si forma da NO in condizioni di raffreddamento è proporzionale alla concentrazione di O_2 ed al quadrato di NO. Quindi alla fine otteniamo una miscela dei due. Dalle emissioni veicolari proviene una quantità di NO₂ stimata in circa il 10% della quantità di NO. Ma una parte di NO si trasforma successivamente per effetto *fotochimico* in NO₂.

Oltre alle combustioni, gli ossidi di azoto vengono prodotti in misura maggiore dai batteri. Però a differenza di questi ultimi, gli ossidi di azoto da combustione sono prodotti in zone fortemente antropizzate e quindi più significative per l'inquinamento urbano. L'abbattimento degli ossidi di azoto nelle marmitte catalitiche può risultare spesso poco efficiente; anche per questo l'inquinamento da ossidi di azoto rappresenta ancora un problema serio nelle città italiane.

Altre fonti oltre alle combustioni da motori sono le combustioni da centrali per la produzione di energia ed impianti di combustione non industriale. Inoltre ci sono impianti per la produzione di HNO₃ che possono immettere notevoli quantità localizzate di NO_x.

Rimozione degli ossidi di azoto.

Gli ossidi di azoto vengono rimossi dall'atmosfera principalmente per dilavamento come acido nitrico e nitrati.

Effetti su piante uomini e materiali

La pericolosità su piante e materiali è dovuta principalmente all'effetto di acidificare le piogge con conseguente acidificazione del terreno e danno alle radici nel caso delle piante ed azione corrosiva nel caso dei materiali.

Sugli uomini l'NO₂ dovrebbe avere un effetto tossico quattro volte maggiore dell'NO, ma alle concentrazioni usuali, il pericolo maggiore sembra essere il coinvolgimento degli ossidi nella formazione delle molecole dello smog fotochimico.

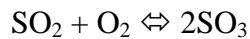
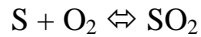
Ossidi di zolfo

Fonti

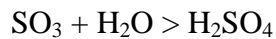
Gli ossidi di zolfo presenti in atmosfera provengono da fonti naturali per circa il 60% (vulcani) e per il 40% dalla combustione di combustibili inquinati da zolfo ed alle fonderie che per produrre i metalli utilizzano minerali contenenti metalli sottoforma di Solfuri e solfati.

Produzione per combustione

Le reazioni di riferimento sono:



La prima reazione è quella che produce la maggior quantità di ossido, la seconda reazione diminuisce la concentrazione di SO_2 ed aumenterebbe quella di SO_3 in atmosfera. Ma la concentrazione di SO_3 è sempre bassa in quanto con l'umidità atmosferica SO_3 produce H_2SO_4



Questa reazione fa in modo che in atmosfera ci sia una maggior concentrazione di H_2SO_4 che SO_3

Anche perché questa ultima reazione è influenzata dall'umidità dell'aria, dal tipo ed intensità della luce e dalla presenza di catalizzatori.

In linea di massima, di giorno e con scarsa umidità si ha una maggior presenza in atmosfera di ossidi. Di notte in assenza di luce ed in presenza di acqua si ha una minore concentrazioni di Ossidi in quanto si formano goccioline con presenza di solfato di calcio e ammonio ed acido solforico. L'aerosol che così si forma è frequentemente associato a scarsa visibilità.

Effetti sulle piante

Gli effetti sulle piante sono notevoli. Vanno dall'acidificazione dei terreni dovute alle piogge acide e quindi alla sofferenza delle stesse dall'assorbimento dell'acido da parte delle radici con conseguente malattia cronica con ingiallimento (per blocco della funzione clorofilliana) e caduta delle foglie. Il concentrarsi di goccioline contenenti ossidi sulle foglie stesse, inoltre, fa in modo che si formino delle zone di necrosi dovute al formarsi di acidi.

Sull'uomo

L'SO₂ già a 0.3 ppm è avvertito dall'uomo per l'odore pungente del gas. Gli effetti irritanti sono maggiormente sentiti nel tratto superiore dell'apparato respiratorio. A concentrazione maggiori di 1.6 ppm, si può avere bronco costrizione. Anche occhi e sistema nervoso sono colpiti. L'effetto irritante del gas mette in allarme e protegge l'uomo da ulteriore esposizione. Gli effetti maggiori comunque sono dovuti agli effetti del particolato che porta con se nei punti più profondi gli effetti negativi degli ossidi.

Sui materiali

Gli effetti maggiori avvengono sulle vernici quando queste sono essiccate in presenza di Ossidi di zolfo in quanto si hanno allungamenti di tempi di essiccamento ed di indurimento con conseguente fragilità e mollezza delle vernici.

Sui materiali metallici per aumento della capacità di corrosione dovuta agli acidi.

Sui materiali lapidei contenenti il carbonato di calcio (il marmo, l'ardesia, e le malte).

In questo caso la reazione di riferimento è questa:



I solfati sono più solubili dei carbonati in H₂O e di conseguenza si ha indebolimento generale della struttura.

Carta e cuoio si alterano e si disintegrano a lunga esposizione.

Benzene

Caratteristiche del benzene

Il benzene C₆H₆ a temperatura ambiente è un liquido molto volatile. I suoi vapori hanno un caratteristico odore aromatico molto pungente. Pressoché insolubile in H₂O solubile invece in solventi organici.

È utilizzato come antidetonante nelle benzine e come solvente per prodotti chimici.

Fonti

- Dalla produzione di prodotti chimici
- Dalla produzione, movimentazione ed uso di combustibili, in particolare benzine

I produttori di benzine, da quando è stato vietato l'uso come antidetonante di piombo tetraetile, hanno aumentato, nei loro processi di raffinazione, la produzione di benzine contenenti una maggiore quantità di benzene che poteva in qualche maniera sostituire, nell'effetto antideto-

nante, il composto a base di piombo. Questo fatto ha imposto, quindi, di prendere provvedimenti prescrittivi per le concentrazioni di benzene nelle benzine.

Ciononostante nelle benzine si deve pur tollerare una certa concentrazione di benzene che è la fonte principale del benzene in atmosfera.

Il benzene sfugge per due motivi principali: Una parte di esso (si stima l'85%) può sfuggire alla reazione di combustione nei motori a scoppio ed una parte (il 15%) può evaporare dai serbatoi degli autoveicoli.

In ambiente chiuso (domestico) la maggior fonte di benzene è il fumo delle sigarette.

Accumulo e dispersione

In aree urbane, l'accumulo e la dispersione di benzene (composto molto stabile) sono modulati da particolari condizioni meteorologiche (assenza di venti, inversione termica), da particolari condizioni di traffico (intasamenti veicolari e frequenza di circolazione), da particolari condizioni urbanistiche (concentrazioni di assi stradali) e dalla presenza di attività di produzione e movimentazione degli idrocarburi e dei combustibili liquidi.

Effetti sull'uomo

La principale via di assunzione è, considerata l'alta volatilità, la via inalatoria .

Il benzene è lipofilo e quindi si trova nei tessuti più grassi. procura danni ematologici (anemie, ecc.) e genetici (alterazioni geniche e cromosomiche). E' cancerogeno.

Ozono

Lo studio dell' ozono in atmosfera va considerato sotto due aspetti a secondo del luogo dove si intende studiarlo.

Nell'alta atmosfera e più precisamente nella stratosfera l'ozono viene considerato una sostanza positiva per l'uomo e per l'ambiente in quanto limita i danni delle radiazioni ultraviolette provenienti dal sole.

Qui intendiamo, viceversa, studiare l'ozono negli strati bassi dell'atmosfera come *inquinante secondario* cioè non prodotto direttamente da emissioni antropiche ma da reazione con *inquinanti primari* ed ambiente esterno: l'aumento della sua concentrazione avviene per la presenza di altri inquinanti (come i *Composti Organici Volatili - COV*) prodotti dall'uomo o da fonti naturali, che interferiscono nel normale ciclo di reazioni fotolitiche con gli ossidi di azoto (vedi più avanti).

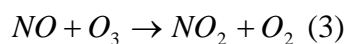
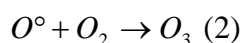
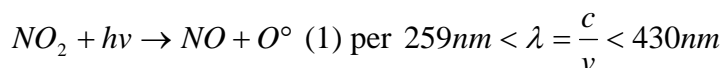
Effetti sull'uomo

I disturbi principali sono riferiti all'irritazione ed all'infiammazione degli occhi e delle prime vie respiratorie con lacrimazione, tosse, fatica a respirare e affanno. L'ozono, specie in associazione con altri inquinanti, può essere responsabile della diminuita resistenza alle infezioni batteriche polmonari e dell'aggravamento di bronchiti croniche, di forme asmatiche e di ischemie cardiache. In genere questi effetti sono dipendenti da esposizione di breve durata e cessano abbastanza rapidamente con il cessare dell'esposizione. L'esposizione prolungata per mesi ed anni a livelli elevati di ozono può provocare effetti irreversibili sulla salute in particolare sulla struttura del sistema respiratorio e cardiovascolare. Per esempio, ripetute esposizioni all'ozono dei polmoni in fase di sviluppo dei bambini possono portare ad una riduzione permanente della funzione polmonare.

Breve descrizione del ciclo fotochimico dell'ozono e degli ossidi di azoto

In presenza della radiazione solare (principalmente quella ultravioletta), NO_2 e ossigeno (O_2) reagiscono producendo ozono (O_3) che ha un tempo di vita molto breve poiché viene consumato dall' NO ; dunque **in condizioni di equilibrio dinamico** avvengono nel **periodo diurno** le seguenti reazioni che, ipotizzando la preesistenza dei reagenti NO , NO_2 e O_2 , hanno come risultato una **produzione netta nulla** di tutte le specie chimiche coinvolte:

Ciclo fotolitico



Queste tre reazioni sono tutte molto veloci e di giorno, in presenza di raggi ultravioletti, ed in eccesso di O_2 , ci dovrebbe essere un sostanziale equilibrio e quindi le produzioni di NO_2 , NO ed Ozono si auto controllerebbero e le specie in atmosfera sarebbero pressoché costanti più o meno nelle concentrazioni che si ottengono alla fine dei processi di combustione.

Di notte non ci sarebbe la prima reazione e quindi la quantità di NO_2 aumenterebbe lentamente sia perché non c'è la (1), sia perché la quantità sarebbe alimentata dalla 3. Le quantità di NO e di O_3 diminuirebbero lentamente fino al giorno dopo. Quindi di notte ci sarebbero sostanzialmente altre concentrazioni. Anche se globalmente la somma di $\text{NO} + \text{NO}_2$ sarebbe sempre uguale.

In tali condizioni (di equilibrio) si può ricavare la seguente espressione della concentrazione di ozono:

$$[O_3] = \frac{K_1[NO_2]}{K_3[NO]} \quad (4)$$

dove K_1 e K_3 ¹ sono le costanti cinetiche della prima e terza reazione (indicate sopra) rispettivamente;

tale espressione è valida nelle ore diurne in cui può ritenersi non limitante la radiazione solare e in condizioni di equilibrio.

La (4) si ottiene imponendo uguale a zero la (4') ed eliminando $[hv]$ (o meglio ponendola uguale ad uno), poiché di giorno essa non è limitante:

$$\frac{d[O_3]}{dt} = K_1[NO_2][hv] - K_3[NO][O_3] \quad (4')$$

Nell'ipotesi che la (2) sia molto veloce e che l'O₂ sia in eccesso (non limitante),

dunque considerando la reazione semplificata: $NO_2 + hv \xrightarrow{O_2} NO + O_3$ (2')

la (4') è ottenuta per differenza tra le velocità di formazione di O₃ dalla (2'): $K_1[NO_2][hv]$ e la velocità di consumo dalla (3): $K_3[NO][O_3]$

Si nota che le precedenti reazioni (1) (2) (3) sono molto più rapide di tutte le altre che avvengono in atmosfera.

Tuttavia a seguito di emissioni antropiche e quindi della presenza in aria di altri tipi di inquinanti primari hanno luogo tutta una serie di numerose altre reazioni che hanno come risultato quello di sottrarre molecole di NO al ciclo prima illustrato; in tal caso si riduce il consumo di O₃ che pertanto si accumula nella troposfera, divenendo, in virtù delle sue caratteristiche altamente ossidanti, (e quindi dannoso) un inquinante *secondario* (poiché non è prodotto direttamente in seguito ad emissioni antropiche).

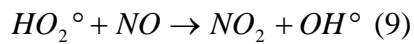
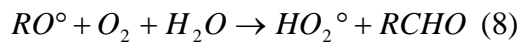
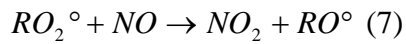
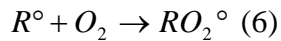
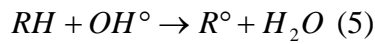
Più precisamente qualsiasi reazione che ossidi NO ad NO₂ per una via diversa dalla (3) comporta, nel bilancio del ciclo fotolitico, la produzione netta di una molecola di O₃ (che non viene consumata attraverso la reazione (3)).

¹ $K_1 = 5,57 \cdot 10^{-1}$ (ppm/min)
 $K_3 = 4,30 \cdot 10^{-1}$ (ppm/min)

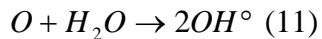
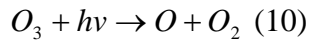
Di seguito sono riportate alcune tra le più importanti reazioni che alterano il ciclo fotolitico nel modo suddetto, ciò avviene principalmente ad opera degli idrocarburi, detti anche composti organici volatili (COV)

Inquinanti primari che alterano il ciclo fotolitico

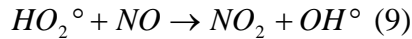
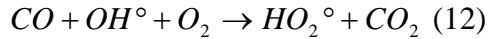
Una volta attaccati dal radicale attivo ossidrile OH° i composti organici (indicati in partenza con il simbolo RH), si spezzano in una serie di radicali attivi .



il bilancio netto di tali serie di reazioni vede la produzione di due molecole di NO_2 da altrettante di NO (senza consumo di ozono) mentre il bilancio dell' OH° che innesca la prima reazione è complessivamente nullo, essendo prodotta una molecola nell'ultima reazione (9); è importante sottolineare quest'ultimo aspetto perché il consumo di OH° presupporrebbe un consumo di O_3 poiché viene prodotto principalmente in base alle seguenti reazioni:



Altre reazioni che alterano il ciclo fotolitico si ottengono a partire dal monossido di carbonio.



Caratterizzazione fotochimica di un' area

Vista la complessità del fenomeno, non sempre una stessa strategia di controllo delle emissioni può produrre effetti positivi sulle concentrazioni di ozono. Molti studi (Sillman) hanno messo in evidenza che l'andamento dei livelli di ozono possono variare in maniera diversa in base al rapporto tra i suoi precursori. Si distinguono zone caratterizzate da un rapporto COV/NO_x basso, tipico delle aree urbane con alti valori di emissioni di NO_x e zone caratterizzate da un rapporto COV/NO_x alto, tipico delle aree agricole con emissioni biogeniche di COV.

Nel primo caso (regime COV limitante) gli NO_x inibiscono la formazione di O₃; la formazione di O₃ è limitata dalla quantità di COV presenti. Nel caso di regime NO_x limitante, un aumento di tale specie chimica può provocare un aumento di O₃.

Particelle in atmosfera

Nell'atmosfera sono presenti oltre ai gas ed ai vapori diversi tipi di particelle solide e liquide.

Queste particelle si possono distinguere fra di loro in varie maniere, le più significative sono a secondo:

dello stato fisico: solido o liquido

delle sorgenti

delle caratteristiche chimiche e fisiche

delle dimensioni

degli effetti sulla salute delle piante

degli effetti sulla salute dell'uomo

1. Stato fisico: solido o liquido

- Le **polveri solide** sono tutte le particelle che stazionano in atmosfera sottoforma solida per un certo periodo di tempo.
- gli **aerosol** sono tutte le particelle che stazionano in atmosfera sotto forma liquida per un certo periodo di tempo

Nel loro complesso queste particelle, a prescindere dallo stato fisico, dalle sorgenti, dalle caratteristiche chimiche e fisiche, dalle dimensioni, dalla genesi, dagli effetti sulla salute di animali e piante, vengono chiamate PTS cioè Particolato Totale Sospeso.

2. Sorgenti

Le sorgenti delle polveri possono essere **naturali ed artificiali**

A) sorgenti naturali

- sorgenti naturali di polveri e fumi
- Le **sorgenti naturali** di polveri sono quelle dovute ad esempio all'evaporazione delle goccioline di acqua marina che, portata dal vento, oltre a formare piccolissime particelle solide di Sali, le può portare a grande distanza.
- Dall'evaporazione di nebbie ed aerosol contenenti sostanze comunque disciolte che, una volta evaporata la soluzione, producono piccolissime particelle solide
- Dai **fumi** generati dai vulcani
- Dalle **polveri** alzate dai venti incidenti in zone particolarmente produttrici come i deserti o in zone comunque produttrici di polveri come quelle soggette ad erosione
- Da polline, spore e microrganismi
- Da incendi
- Sorgenti naturali di Aereosol

Sorgenti di aereosol sono il frangersi delle onde, le cadute d'acqua, i soffioni.

Inoltre, i vapori che sono nell'atmosfera sono sorgenti naturali di aereosol che, subendo un fenomeno di abbassamento termico, condensano in particelle di liquido e generano le nebbie. In natura, il più importante vapore che può subire questo fenomeno è il **vapor d'acqua**.

Per il vapor d'acqua si ha:

Nebbia da irraggiamento Vapor d'acqua che di sera a contatto con il terreno più freddo condensa

Nebbia di Avvezione quando aria e vapore caldi passano sopra a terreno gelato o mare freddo

Nebbia da inversione termica è una nebbia di avvezione fra uno strato caldo superiore ed uno strato freddo inferiore

Nebbia da evaporazione: aria fredda che passa su acqua più calda che emette vapori in autunno /inverno sui grandi laghi

Oltre all'acqua, anche altre sostanze chimiche (anche di origine artificiale), comunque giunte in atmosfera, sotto forma di vapore, possono condensare e successivamente coagulare.

La coagulazione è il fenomeno per cui delle particelle primarie (sia solide che liquide) condensate da vapori si uniscono per dare luogo ad una nuova particella più grande che, raggiunte certe dimensioni, può precipitare.

B) sorgenti artificiali

Oltre alle sorgenti naturali, ci sono sorgenti di particelle di origine antropica.

Combustioni

Queste combustioni possono avere vari scopi e utilizzare vari tipi di combustibile:

- Per produrre energia di tipo PV motori con combustibile solido (carbone, legna) liquido (benzine, gasolio, cherosene) o gassoso (gas naturale o GPL).

- Per produrre energia da riscaldamento; anche qui combustibili solidi, liquidi, gassosi.

Qui si ha, per lo più, la formazione di gas ad alta temperatura che, una volta raffreddatisi, diventano vapori e quindi possono diventare particelle liquide o solide. Oppure, dai gas, si possono formare, per reazione chimica, delle particelle di sostanze particolarmente pericolose (I-PA).

- Per diminuire l'impatto dei rifiuti (inceneritori, termovalorizzatori, cogeneratori)

- Per produrre particolari prodotti (cementi)

In questi ultimi due casi, oltre agli effetti delle combustioni, si ha anche la produzione di particelle finemente suddivise di materiale vario.

Erosioni

Si possono formare particelle di materiale vario da erosioni su manufatti vari (polvere da freni e da pneumatici) e strutture (usura di strade, usura di abitazioni, crollo di abitazioni).

3) Caratteristiche chimiche e fisiche

Particolati da combustione

Le caratteristiche chimiche e fisiche dei particolati da combustione sono determinate

- dai combustibili impiegati
- dalle condizioni di combustione
- dai particolari dispositivi per ridurre l'impatto.

Fuligine (nero fumo)

Una combustione, oltre ai gas come CO₂ ed H₂O, produce del particolato (fuligine o nero fumo) che si può evidenziare osservando qualsiasi punto freddo di uno scarico (ciminiera o marmitta). La polvere nera è carbonio amorfo di dimensioni al massimo di circa un micron. All'interno di questa struttura ci sono delle strutture a base di policiclici aromatici di dimensioni fino a 2 nm amorfe (soot).

In linea generale più la combustione è in carenza di O₂ e più i prodotti sono ricchi di particolato, più la fiamma è fredda, più i prodotti sono ricchi di particolato. Se si ha una **fiamma premiscelata**, il rapporto C/O soglia al disotto del quale non si dovrebbe avere particolato, va da 0.5 a 1

Per una **fiamma a diffusione** la situazione è più complessa perché in ogni punto della fiamma ci può essere un valore diverso di tale rapporto.

In linea generale i combustibili gassosi come il GN o il GPL producono meno particolato delle molecole più pesanti. Per questo sono da preferirsi per il riscaldamento e per l'autotrazione agli altri combustibili, ai fini della minore quantità di particolato formato ,.

Per quanto riguarda i combustibili liquidi, la formazione di particolato dipende dalle loro proprietà fisiche e chimiche.

Fisiche: Viscosità ed evaporazione. Più è viscoso il liquido, più è grande il diametro delle goccioline, più è volatile e più è rapida l'evaporazione. La presenza di particelle liquide aumenta la probabilità di trovare punti con maggiore presenza di carbonio e quindi aumento di particolato.

Chimiche: nella stessa classe di combustibile l'aumento di particolato dipende dal rapporto C/H

Per **fiamme premiscelate** la presenza di soot diminuisce da aromatici> alcani> alcheni> alchini

Per **fiamme a diffusione** da Aromatici> alchini> alcheni> alcani

Ovviamente anche la turbolenza è importante per variare la produzione di soot

Per quanto riguarda la produzione di particolato da carbone la situazione peggiora fortemente.

Tutti i combustibili ovviamente portano nei fumi e nel particolato le sostanze dalle quali non sono stati liberati . Quindi solfo, metalli ecc Inoltre essi sono ricchi di ossidi di azoto nelle varie forme prodotti nella fase di combustione con l'aria.

La formazione di particolato carbonioso si può schematizzare in tre parti:

Nucleazione: si ha la decomposizione delle molecole di combustibile (in ambiente ossidante e ad alta temperatura). Si formano radicali e specie molecolari tra cui principalmente acetilene C_2H_2 . Da questi si ha la formazione di anelli aromatici ed attraverso l'aggiunta di ulteriori C_2H_2 si ha la formazione di maggiori strutture aromatiche. Se queste strutture non sono ossidate possono costituire i nuclei per la susseguente formazione di particolato. La nucleazione dipende molto dal tipo di combustibile, dalle condizioni operative ed essendo la fase più lenta del processo è quella più importante.

Crescita superficiale su questi nuclei tende ad addensarsi carbonio dalla fase gassosa ed a uscire idrogeno e quindi si ha un fenomeno di crescita del particolato

Coagulazione queste particelle si coagulano fra di loro diminuendo di numero ed aumentando di volume

Infine le particelle formate nella camera di combustione, prima di uscire, si possono bruciare con l'ossigeno e questo permette una diminuzione finale del fenomeno che altrimenti sarebbe più imponente.

Altri Particolati di provenienza antropica

Per quanto riguarda gli altri particolati essi possono essere prodotti durante una combustione senza far parte del processo di combustione vero e proprio.

Ad esempio **negli inceneritori** si possono formare dei particolati contenenti particelle ricche di sostanze presenti nei rifiuti come **metalli** oppure che si sono formati ad alte temperature come **ossidi di metalli**.

Nelle esplosioni e nelle lavorazioni metallurgiche si possono formare delle particelle contenenti metalli e/o metalli in **Leghe** che si sono formate fra i metalli che formavano gli elementi da saldare o contenuti nelle ogive esplosive dei proiettili esplosi ad altissima temperatura e/o nei loro bersagli (esempio Proiettili ad Uranio impoverito). Questo ultimo tipo di particolato, oltre alle leghe, ovviamente possiede anche un **carico radioattivo** non indifferente dal punto di vista sanitario.

Altri produttori di particolato sono le fonderie, le industrie delle costruzioni, le industrie delle pietre e del cemento.

Inoltre altri particolati (non da combustione) possono essere presenti nei **crolli** accidentali o indotti per recupero area da costruzione o determinati da azioni militari e/o terroristiche.

In questi casi il particolato è formato principalmente da particelle di materiale inorganico.

Particolare pericolosità hanno le particelle di amianto usato in tempi passati nelle costruzioni per le sue proprietà isolanti.

4) **Dimensioni**

Le dimensioni delle particelle sono molto importanti sia , come vedremo, per motivi sanitari, sia per possibilità di abbattimento e spostamento.

- 10 micron processi meccanici (erosione, macinazione, diffusione), polverizzazione di materiali da parte di veicoli, particelle di origine vegetale
- Tra 1 micron e 10 micron provenienza da particolari terreni, da polveri e prodotti della combustione industriali e da Sali marini
- Tra 0.1 micron e 1 micron da combustione ed aerosol fotochimici
- Sotto a 0.1 micron particelle non sempre identificabili chimicamente originate apparentemente da processi di combustione

- Le polveri al di sotto dei 10 micron si chiamano PM10 e su questi si è accentrata l'attenzione del legislatore, anche se in termini scientifici e sanitari l'attenzione si sta spostando sulle particelle ben al di sotto dei PM10

- Al di sotto di 2.5 micron si parla di particolato fine e si indica come PM2.5

- il particolato fine si suddivide in una classe che va da 0.005 micron e 0.1 micron. Questa classe contribuisce ben poco, come peso, alla massa totale delle polveri, ma numericamente è molto alta. Queste particelle sono prodotte per condensazione dei vapori prodotti durante la combustione, e dall'aggregazione di specie in atmosfera.

- le particelle di diametro compreso tra 0.1 e 2.5 micron sono prodotte per aggregazione di particelle primarie e per condensazione di vapori.

5) **Effetti sulle piante**

Gli effetti della polvere sulle piante sono dovute alla adesività di questa. In particolari casi, come nel caso delle piante situate intorno ai cementifici il danno è ben più grave. Infatti in questo caso si forma una vera e propria crosta non dilavabile che inibisce la funzione clorofil-

liana e che rende la pianta più debole. Inoltre c'è anche un effetto meccanico di raschiamento delle foglie che le rende più soggetti agli attacchi di insetti e crittogame.

Le polveri inoltre possono fungere da nuclei aggreganti l'umidità dell'aria dove sono sciolti inquinanti pericolosi per le piante come gli ossidi di azoto e zolfo che tendono ad acidificare le soluzioni.

6) Effetti sull'uomo

Gli effetti del particolato sull'uomo dipendono molto dalla chimica del particolato, cioè da cosa è costituito il particolato.

Ma dipendono ancor di più dalle dimensioni del particolato.

Infatti queste determinano i siti raggiungibili dalle particelle stesse.

In linea di massima si è scoperto che più le particelle sono piccole e più queste possono raggiungere e penetrare in siti finora impensabili.

Il sistema più esposto è ovviamente l'apparato respiratorio. Le barriere naturali dell'apparato respiratorio sono i peli delle narici che agiscono da filtro per le particelle più grosse. Le mucose del naso e della gola a cui le particelle aderiscono e vengono rimosse per deglutizione. Le particelle di dimensioni superiori a 5 micron sono bloccate nel naso e nella gola. Le particelle fino a 0.5 micron arrivano ai bronchioli e da qui vengono rimosse nel giro di alcune ore. Le particelle più piccole raggiungono gli alveoli e queste non vengono rimosse facilmente e possono essere immesse nel circolo sanguigno.

Ultimamente si è incominciato a parlare di nano particelle cioè di particelle delle dimensioni di qualche nanometro quindi da 0.2 micron e ciò è motivo di grave apprensione sull'opinione pubblica. Si è cominciato a studiare alcune di queste particelle, esclusivamente quelle di origine inorganica, che non vengono metabolizzate nel corpo umano.

Tuttavia, nonostante la presenza di alcune ricerche significative, si può affermare che gli studi epidemiologici che richiedono per loro natura molti anni, sono ancora in una fase embrionale.

Tempi di permanenza in atmosfera

Il particolato, una volta prodotto, può rimanere in atmosfera per un certo periodo, ma anche dopo la sua precipitazione può essere rimesso in circolo da eventi successivi come l'alzarsi di vento o il passaggio di automobili. C'è da notare che i particolati molto fini hanno la possibilità, rimanendo in atmosfera per molto tempo, di essere trasportati dai venti molto lontano dai luoghi di produzione primaria.

Abbattimento dei particolati.

I **sistemi di auto abbattimento** dei particolati in atmosfera in linea di massima sono di due tipi:

la **sedimentazione** per le particelle più grandi dei PM10, per i PM10 e fino ai PM2.5. Quindi l'aggregazione che tende ad ingrandire le particelle è un fenomeno positivo. In un certo senso il fenomeno dei particolati si può considerare un fenomeno colloidale e come tale l'aggregazione e la coagulazione tendono a far precipitare quanto sospeso.

Il **dilavamento** Il particolato fine e le nano polveri tendono invece a stazionare nell'aria e quindi non precipitano, inoltre, stazionando in aria sono soggette maggiormente all'azione dei venti e quindi non cadono se non con l'azione del dilavamento delle piogge.

Le particelle maggiori di 0.1 micron tendono col tempo a sedimentare per gravità, quelle minori non sono influenzate da questa forzante e sono soggetti a trascinamento dovuto a turbolenza, movimento d'aria e moti browniani.

I dispositivi per contenere i particolati sono numerosi. In linea di massima si parla di filtri di contenimento del particolato.

Per i motori diesel, produttori di una maggiore quantità di particolato, si usa un dispositivo che trattiene il particolato: il FAP filtro antiparticolato.

Il FAP funziona aggiungendo ossido di Cerio al gasolio. Questo fa da collante fra le particelle generate e le ingrandisce per aggregazione senza un legame chimico vero e proprio. Queste particelle aggregate risultano maggiormente filtrabili dai filtri ad alveare presenti nel FAP. L'aumento di particelle, però, intasa il filtro. Per cui ogni 300 o 400 km deve essere pulito bruciando il particolato con l'aggiunta automatica di gasolio (post iniezione) che rende più caldi i gas di scarico. Questo dovrebbe avvenire nei percorsi extraurbani quando le condizioni di marcia individuano automaticamente il momento della post iniezione.