

PROCESSI DI TRASPORTO E RIMOZIONE DI INQUINANTI ATMOSFERICI



Inquinanti atmosferici



TRASPORTO E DISPERSIONE DI INQUINANTI ATMOSFERICI



Trasporto e dispersione

Una volta emesso in atmosfera, un inquinante può impattare i vari recettori potenziali (uomini, animali, piante, materiali) in funzione del tempo di residenza in atmosfera (processi di rimozione) e dei fenomeni di trasporto e dispersione.

I fenomeni di trasporto e dispersione sono influenzati dalle variabili meteorologiche e dalla fisica della bassa troposfera.

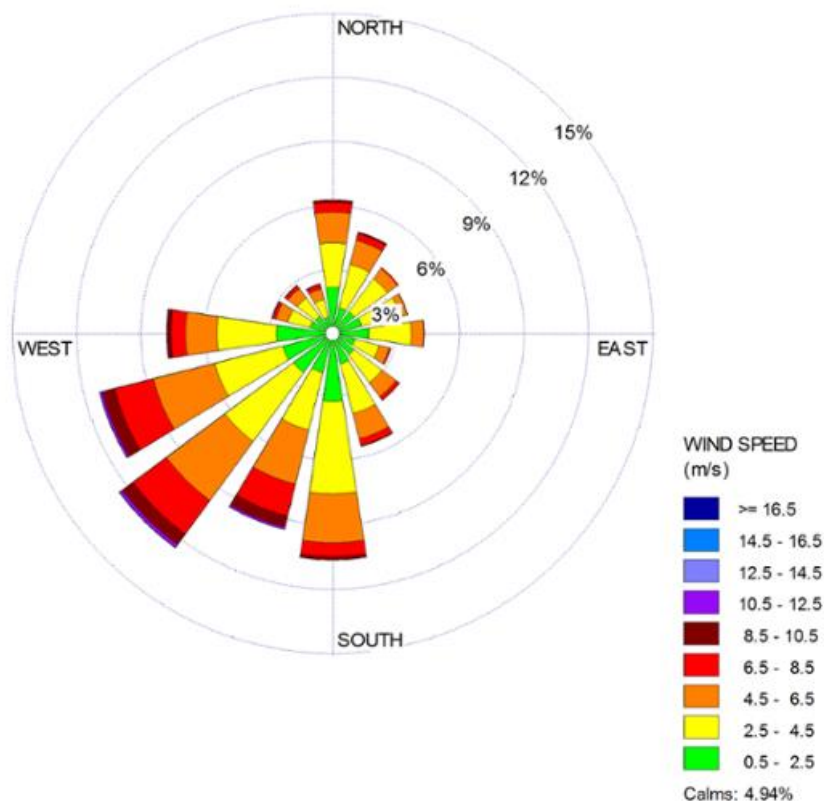
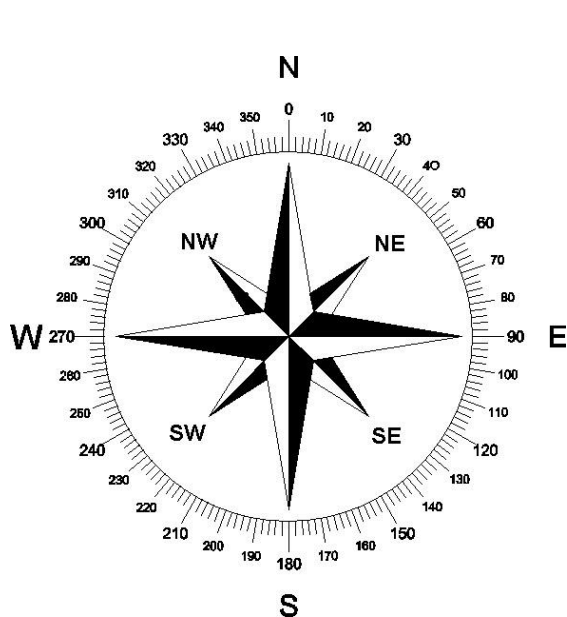
I principali fattori meteorologici che influenzano la dispersione degli inquinanti sono:

- direzione del vento
- velocità del vento
- turbolenza atmosferica (stabilità atmosferica)

Trasporto e dispersione

Direzione del vento

Indica la direzione di provenienza del vento.

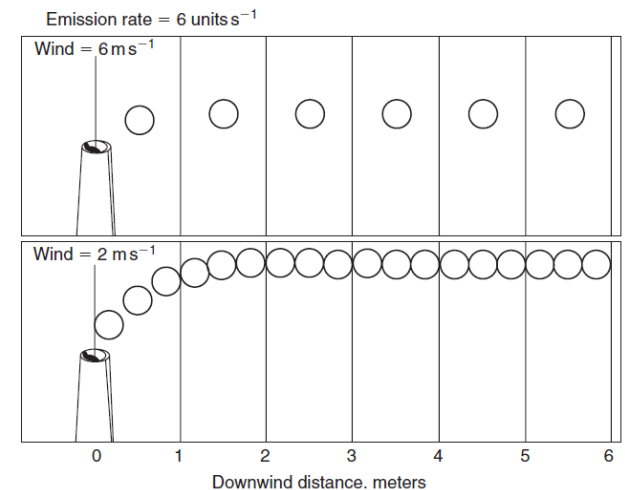


Trasporto e dispersione

Velocità del vento

Si misura in m/s.

1. Qualsiasi emissione è diluita di un fattore proporzionale alla velocità del vento
2. La turbolenza meccanica, che aumenta mixing e diluizione, è creata dal vento
3. Maggiori velocità del vento mantengono le masse d'aria (calde o fredde) nell'intorno della loro altezza di rilascio.



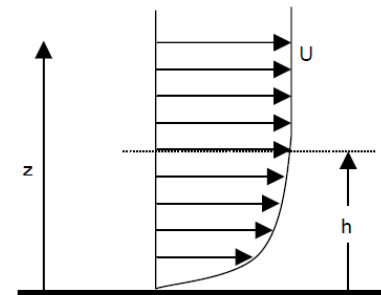
La frizione con la superficie del terreno riduce la velocità del vento.

Velocità del vento ← $u(z) = u_0(z/z_0)^p$

alla quota z

Velocità del vento misurata alla quota z_0

Esponente (tra 0.1 e 0.4) che varia con stabilità atmosferica, rugosità superficiale e struttura del PBL



Trasporto e dispersione

Turbolenza atmosferica

= movimento altamente irregolare del vento

L'atmosfera presenta moti erratici, apparentemente casuali, che variano rapidamente: vortici o **eddies**.

È generata da 2 fenomeni distinti:

- **TURBOLENZA MECCANICA:** causata dalla presenza di ostruzioni fisiche al normale flusso di aria
- **TURBOLENZA CONVETTIVA:** causata dalle differenze nel riscaldamento/raffreddamento delle superfici e delle masse d'aria.



De sterrennacht - Notte stellata
Vincent van Gogh, 1889



Trasporto e dispersione

Eddy diffusion

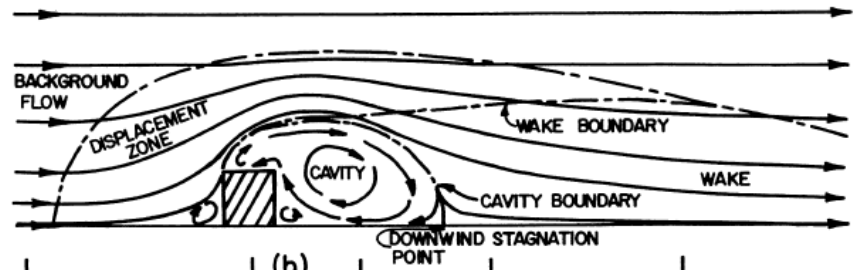
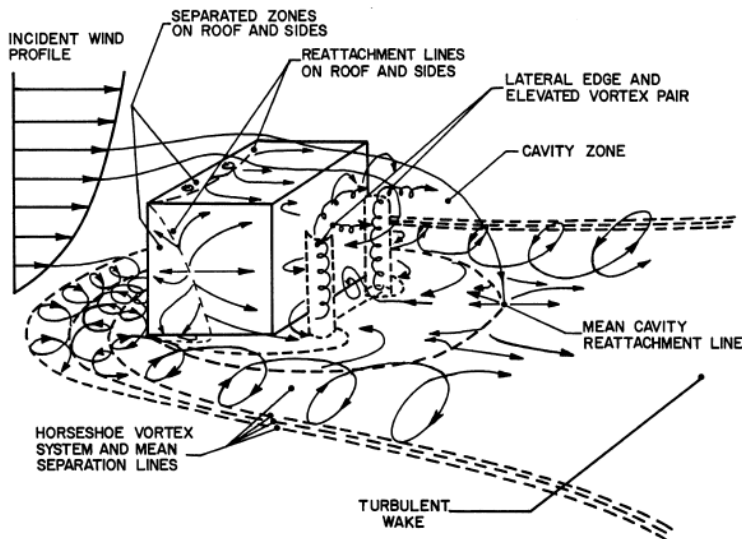
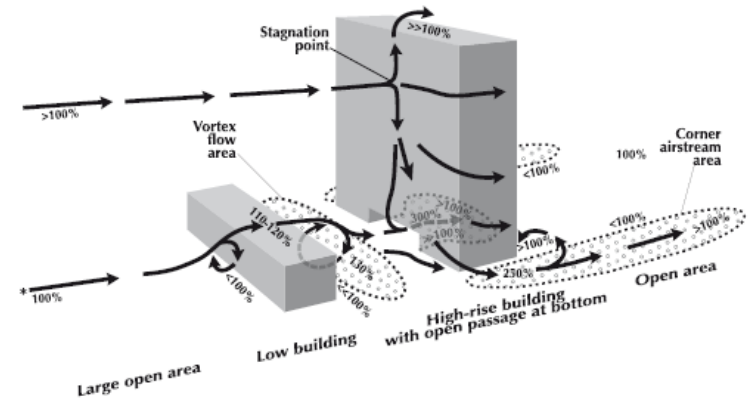
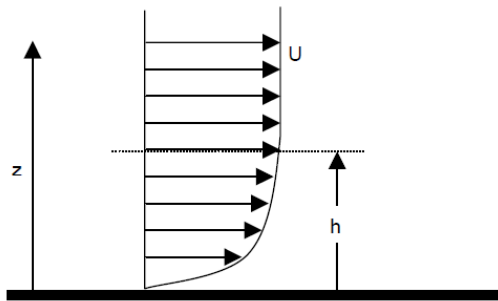
È il più importante processo di mixing in atmosfera che causa la dispersione di inquinanti atmosferici.

Le eddies atmosferiche causano una separazione delle particelle atmosferiche che mescola aria inquinata con aria relativamente pulita facendo sì che l'aria inquinata, a concentrazioni via via più basse, occupi volumi d'aria progressivamente maggiori.



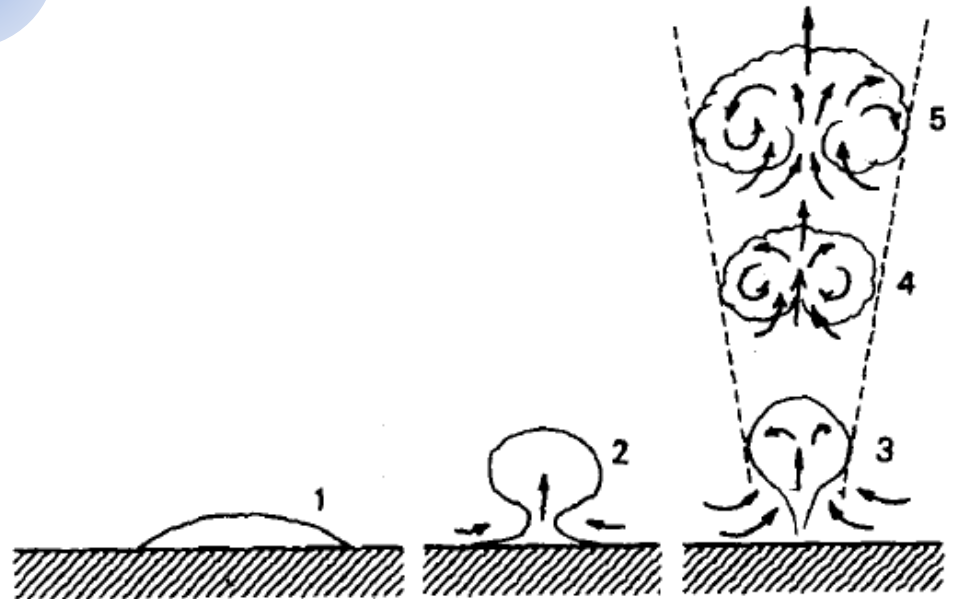
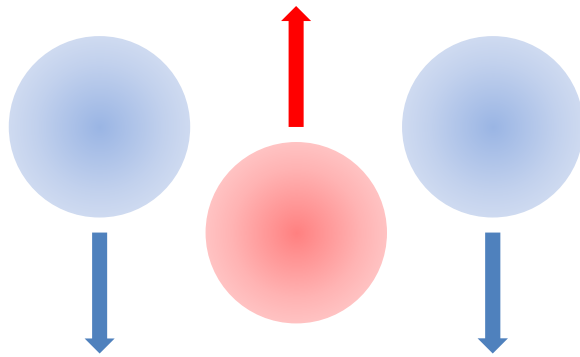
Trasporto e dispersione

Turbolenza meccanica



Trasporto e dispersione

Turbolenza convettiva

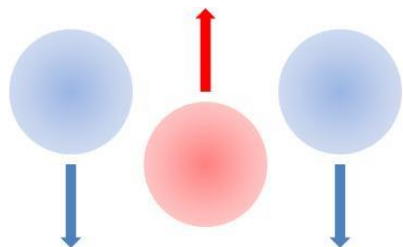


Modello semplificato dello sviluppo dei vortici convettivi (o *thermals*): meccanismo a bolle

Trasporto e dispersione

Stabilità atmosferica

= tendenza a resistere a moti verticali o a sopprimere la turbolenza esistente.



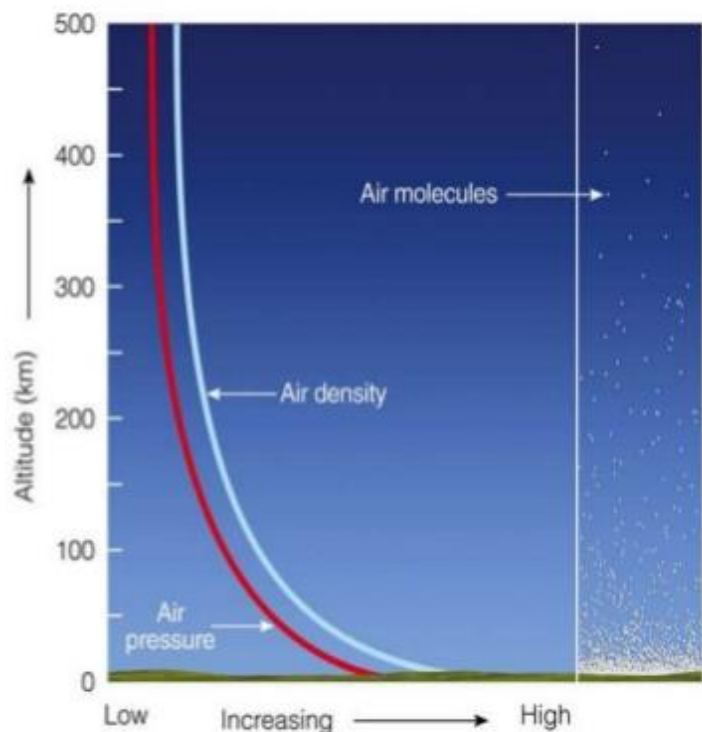
Il movimento verticale di una particella d'aria dipende dalla relazione tra la sua temperatura e quella dell'aria circostante e influenza il grado di stabilità atmosferica.

L'aria è un cattivo conduttore termico, quindi gli scambi di calore sono trascurabili. Una massa d'aria modifica la sua temperatura cedendo o assorbendo energia sotto forma di lavoro con l'espansione o la compressione:

- se la massa d'aria si espande, si raffredda
- Se la massa d'aria di comprime, si scalda

Trasporto e dispersione

Stabilità atmosferica

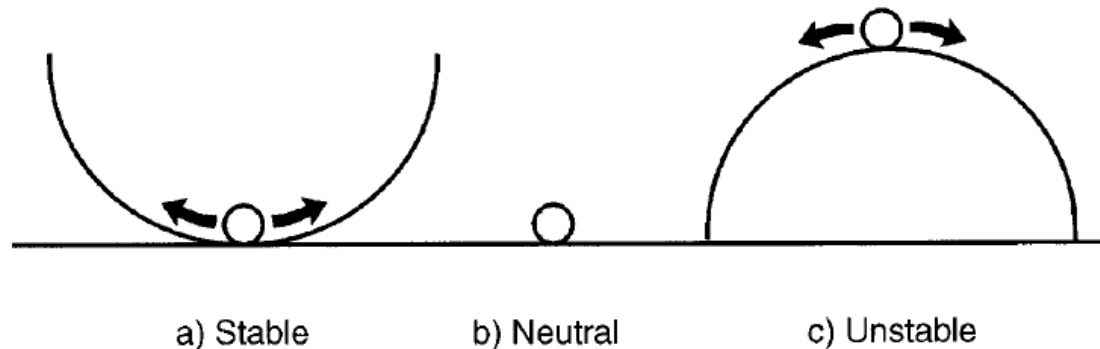


- La pressione atmosferica diminuisce esponenzialmente con la quota. Quindi, una particella d'aria che si muove verso l'alto si espande e quindi si raffredda.
- Una massa d'aria secca che sale diminuisce quindi la sua T di circa $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni 100 m , valore detto **gradiente termico adiabatico secco** (dry adiabatic lapse rate; **DALR**).
- Il DALR descrive quindi le variazioni di T attese in una particella d'aria che viene dislocata verticalmente.

Trasporto e dispersione

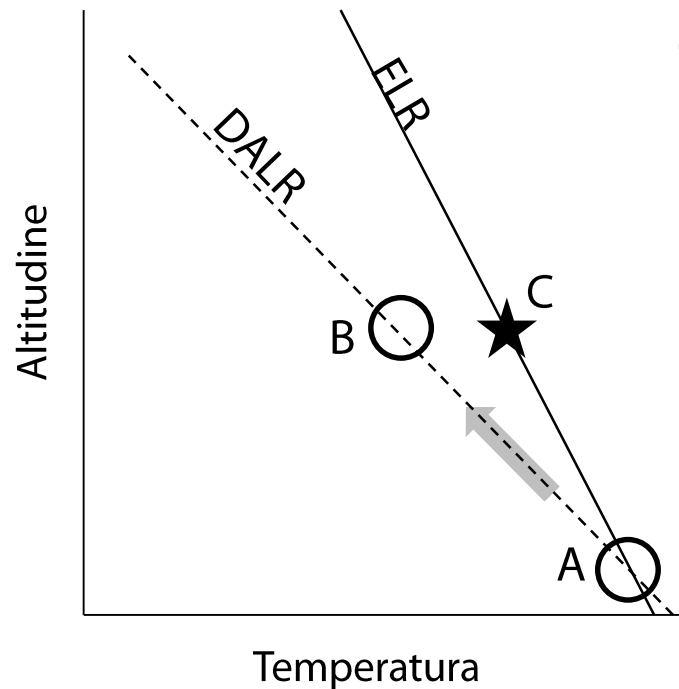
Stabilità atmosferica

- La variazione di T con la quota misurata, in un dato momento e in un determinato sito, è detto **gradiente termico ambientale** (environmental lapse rate; ELR).
- Il grado di stabilità atmosferica può essere determinato confrontando il DALR con l'ELR.



Trasporto e dispersione

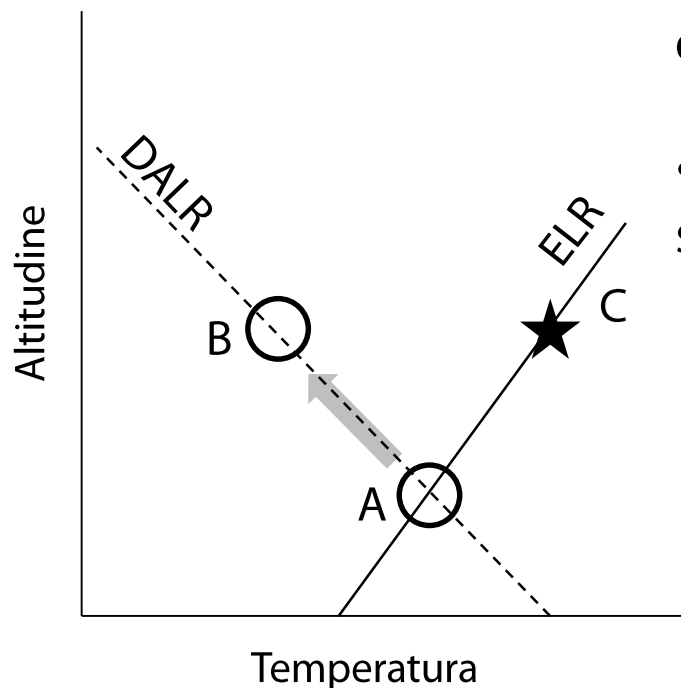
Stabilità atmosferica



- Se $DALR > ELR$, l'atmosfera è **stabile**, ovvero resiste al movimento verticale.
- Un ELR inferiore al DALR è detto subadiabatico.

Trasporto e dispersione

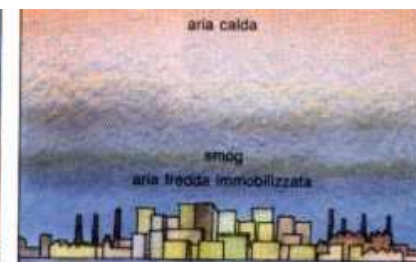
Stabilità atmosferica



- Se **DALR > ELR**, l'atmosfera è **stabile**, ovvero resiste al movimento verticale.

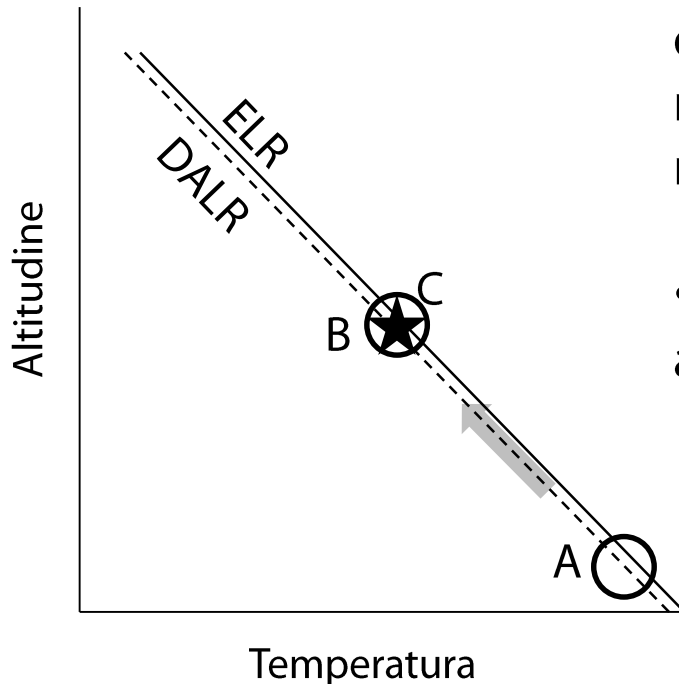
- Un ELR inferiore al DALR è detto subadiabatico.

- Un caso particolare è quello dell'**inversione termica** (aumento della T atmosferica con la quota) che genera condizioni atmosferiche particolarmente stabili.



Trasporto e dispersione

Stabilità atmosferica

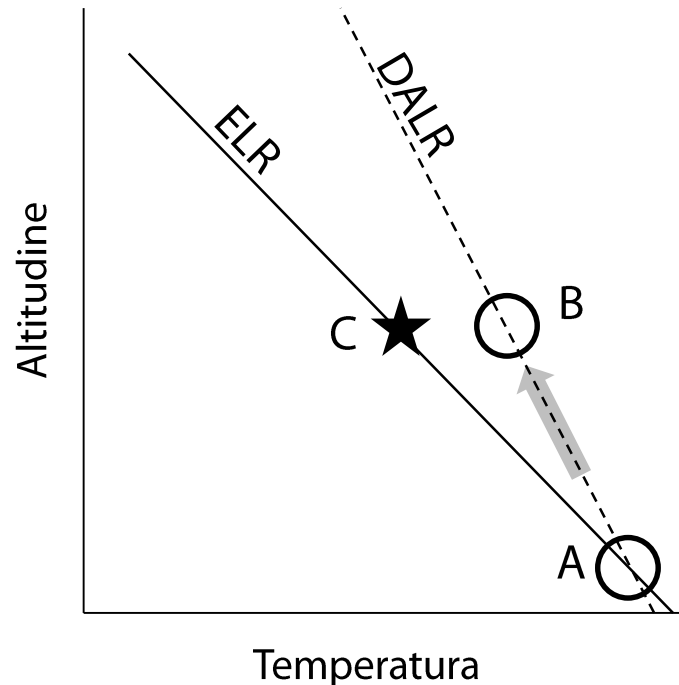


- Se **DALR=ELR**, l'atmosfera è in **condizioni neutre**, ovvero il movimento verticale non è né favorito né ostacolato.

- Un ELR uguale al DALR è detto **adiabatico**.

Trasporto e dispersione

Stabilità atmosferica



- Se **DALR < ELR**, l'atmosfera è **instabile**, ovvero favorisce il movimento verticale.
- Un ELR inferiore al DALR è detto superadiabatico.

Trasporto e dispersione

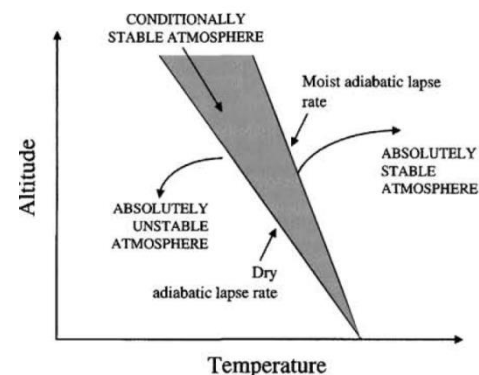
Stabilità atmosferica

In base al profilo verticale di temperatura atmosferica, si distinguono quindi 3 condizioni di stabilità:

- CONDIZIONI STABILI ($ELR < DALR$): si verificano soprattutto di notte con venti deboli o assenti; ~~TURBOLENZA MECCANICA + CONVETTIVA~~

- CONDIZIONI NEUTRE ($ELR = DALR$): si verificano in giorni ventosi o con copertura nuvolosa tale per cui non si verifica un forte riscaldamento o raffreddamento della superficie terrestre; TURBOLENZA MECCANICA

- CONDIZIONI INSTABILI ($ELR > DALR$): si sviluppano in giorni soleggiati con venti deboli; TURBOLENZA MECCANICA + CONVETTIVA



Trasporto e dispersione

Stabilità atmosferica

Dipendenza da parametri meteorologici:

<i>Stability class</i>	<i>Occurrence in UK/%</i>	<i>ELR °C (100 m)⁻¹</i>	<i>u at 10 m ms⁻¹</i>	<i>Weather</i>		
A: Very unstable	1	< -1.9	1.0-2.5	Very sunny		
B: Moderately unstable	5	-1.9--1.7	1.0-5.0	Sunny		
C: Slightly unstable	15	-1.7--1.5	2.0-6.0	Part cloud (day)		
D: Neutral	65	-1.5--0.5	2.0->10.0	Overcast		
E: Stable	6	-0.5- +1.5	2.0-5.0	Part cloud (night)		
F: Very stable	6	+1.5- +4.0	2.0-3.0	Clear night		
G: Even more stable than F	2		Calm			

<i>Surface windspeed ms⁻¹</i>	<i>Day time sun (flux density in W m⁻²)</i>			<i>Night time (cloud amount in oktas)</i>		
	<i>Strong (>590)</i>	<i>Moderate (300-590)</i>	<i>Weak (<290)</i>	<i>8</i>	<i>4-7</i>	<i>0-3</i>
<2	A	A-B	B	D	G	G
2-3	A-B	B	C	D	E	F
3-5	B	B-C	C	D	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

Trasporto e dispersione

Stabilità atmosferica

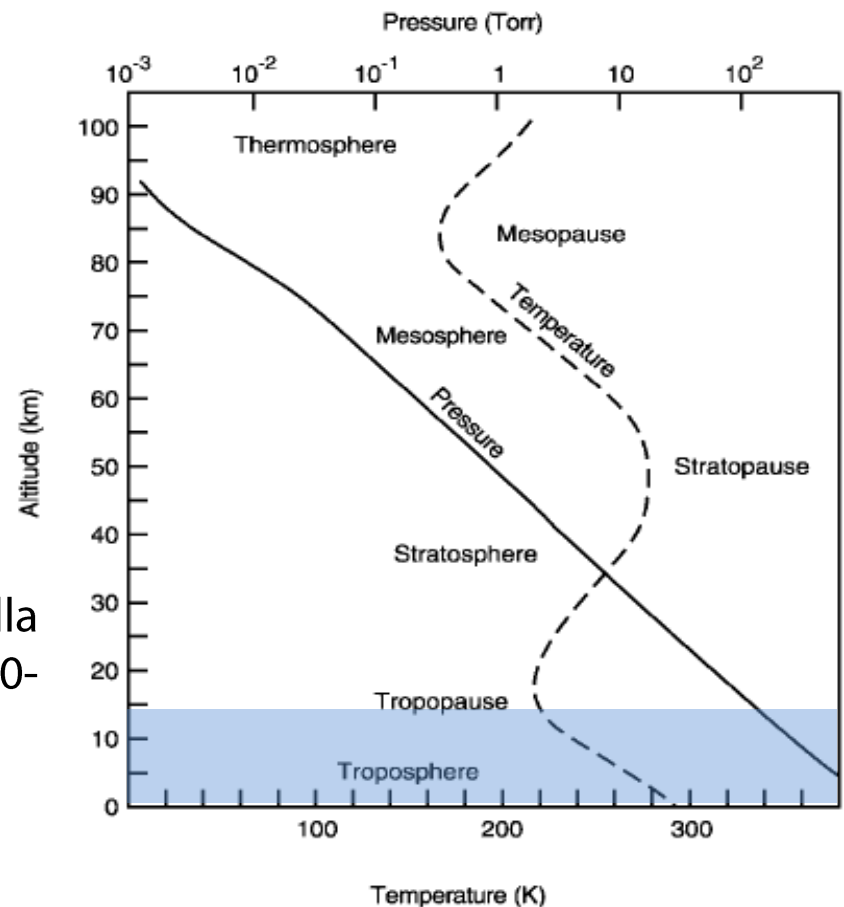


Fig. 22.2. Example of neutrally buoyant smoke released from the WTC physical model, showing flow from left to right is displayed; natural light is illuminating the smoke and a vertical laser sheet is additionally illuminating the plume near the centerline of source. *Source:* US Environmental Protection Agency. Perry, S., and Heath, D., *Fluid Modeling Facility*. Research Triangle Park, NC, 2006.

Troposfera

Dal greco τροπή (trópos) = rivolgimento, mutazione

- Regione di turbolenza e mixing continuo
- Contiene ~80 % della massa atmosferica e praticamente tutto il vapor d'acqua.
- Sede del trasporto e dispersione di inquinanti emessi dalla superficie terrestre.
- Parte più bassa dell'atmosfera, dalla superficie terrestre fino alla tropopausa (10-15 km).
- T decrescente all'aumentare dell'altitudine.
- Intenso mixing verticale.
- Composizione omogenea.

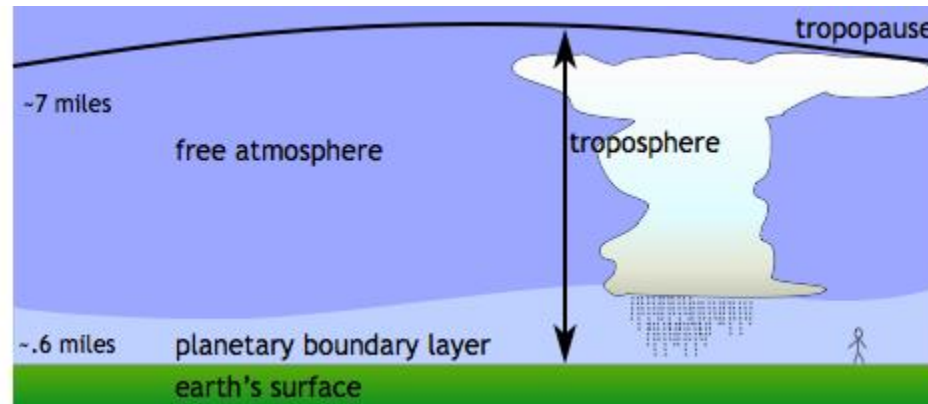


Troposfera

Presenta caratteristiche chimico-fisiche molto diverse da quelle delle parti più elevate dell'atmosfera, fortemente influenzate dal contatto diretto con la superficie terrestre e variabili con la quota.

Può essere distinta in:

- **TROPOSFERA LIBERA:** da circa 1 km fino alla tropopausa
- **PLANETARY BOUNDARY LAYER (PBL;** o strato limite planetario): dalla superficie terrestre fino a circa 1 km



PBL

Il PBL (o anche ABL, atmospheric boundary layer) è definito come:

porzione di Troposfera direttamente influenzata dalla superficie terrestre, che risponde all'immissione di energia da essa proveniente con scale temporali dell'ordine dell'ora (Stull, 1989).

All'interno del PBL si realizzano i fenomeni di:

- emissione
- trasporto
- diffusione
- parziale eliminazione
- trasformazione chimica

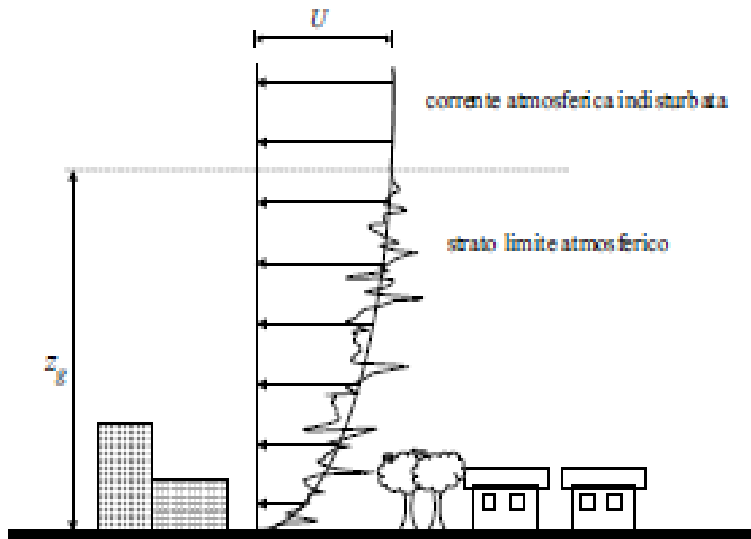
} di sostanze inquinanti

Il PBL si estende dal suolo fino ad una quota variabile nello spazio e nel tempo (1-2 km nelle ore diurne di giorni soleggiati).

MICROMETEOROLOGIA
= disciplina che studia le proprietà e l'evoluzione del PBL.

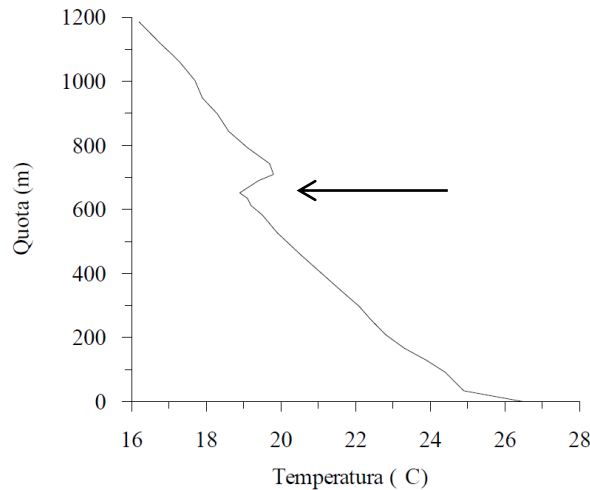
PBL

Le masse d'aria in movimento, così come ciascun fluido che scorre in corrispondenza di una superficie solida, sono rallentate in corrispondenza della superficie terrestre per effetto della sua **rugosità**. In particolare, la velocità delle particelle fluide al suolo è praticamente nulla, mentre lontano dalla superficie terrestre la velocità delle masse d'aria tende a quella della corrente indisturbata. Gli strati fluidi tra il suolo e la corrente indisturbata costituiscono il PBL.



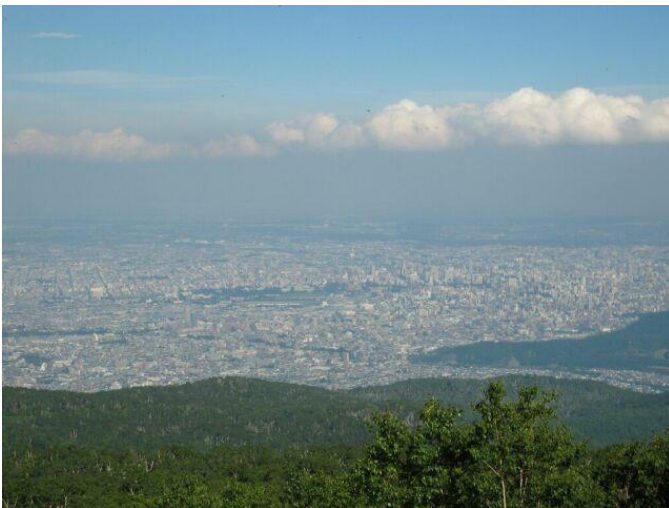
L'altezza del PBL aumenta all'aumentare della rugosità della superficie.

PBL



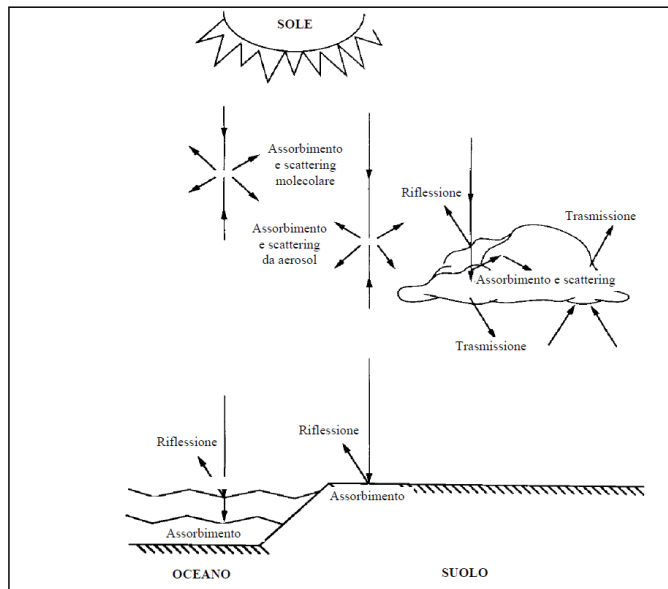
Il limite superiore del PBL è rappresentato da un'inversione termica in quota, una barriera difficilmente penetrabile da parte degli inquinanti emessi in atmosfera al livello del suolo.

L'altezza del PBL è quindi determinante sulla dinamica atmosferica e sulla capacità diluente dell'atmosfera nei confronti degli inquinanti.



PBL

Il PBL possiede caratteristiche fisiche e chimiche nettamente diverse dal resto della troposfera e sviluppa al suo interno una struttura variabile nell'arco della giornata.



Della radiazione solare in ingresso:

- ~7%: assorbita dai gas atmosferici
- ~27%: assorbita e riflessa dalle nubi
- ~17%: riflessa dalle particelle sospese
- ~6%: riflessa dalla superficie terrestre (albedo)
- ~43%: raggiunge la superficie terrestre

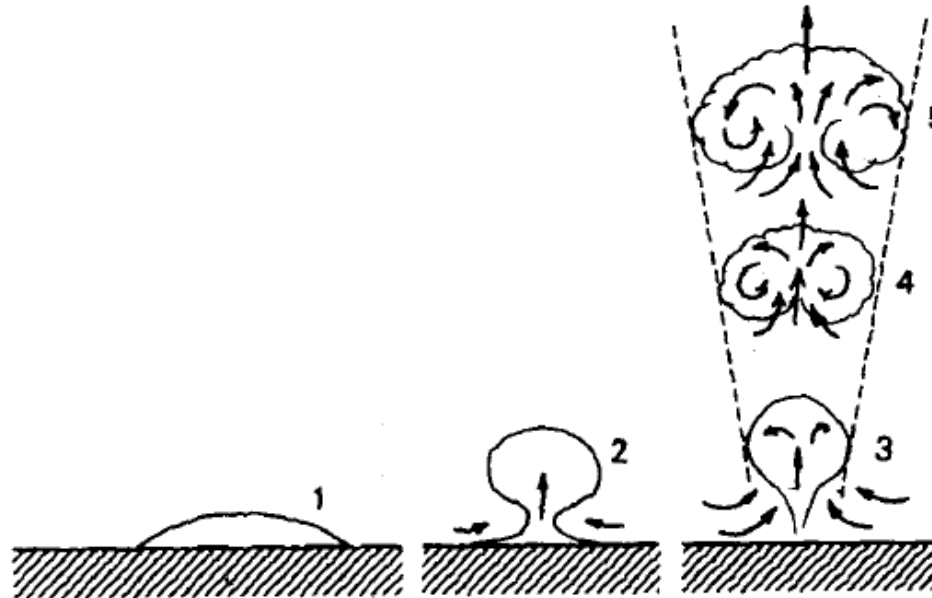
L'atmosfera si trova quindi nelle condizioni di una enorme pentola piena di aria posta al di sopra di una intensa fonte di calore.

Il PBL è una gigantesca *macchina termica* che trasforma l'energia solare in movimento delle masse d'aria.

PBL

Il PBL è una gigantesca *macchina termica* che trasforma l'energia solare in movimento delle masse d'aria.

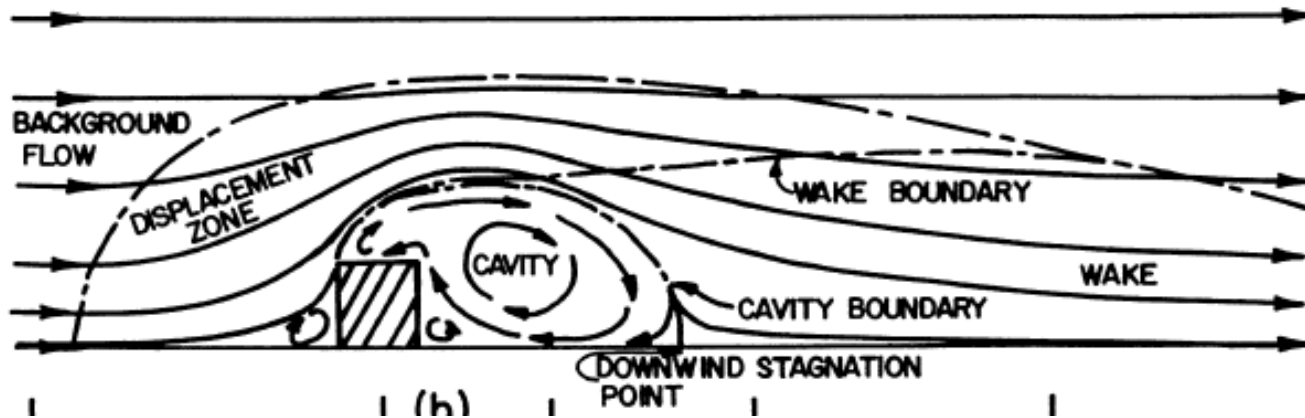
Durante il giorno, lo sviluppo dei *thermals* genera una **TURBOLENZA CONVETTIVA**.



Modello semplificato dello sviluppo dei vortici convettivi (o *thermals*): meccanismo a bolle

PBL

A causa della rugosità della superficie, le masse d'aria in movimento perdono energia per attrito : **TURBOLENZA MECCANICA**.

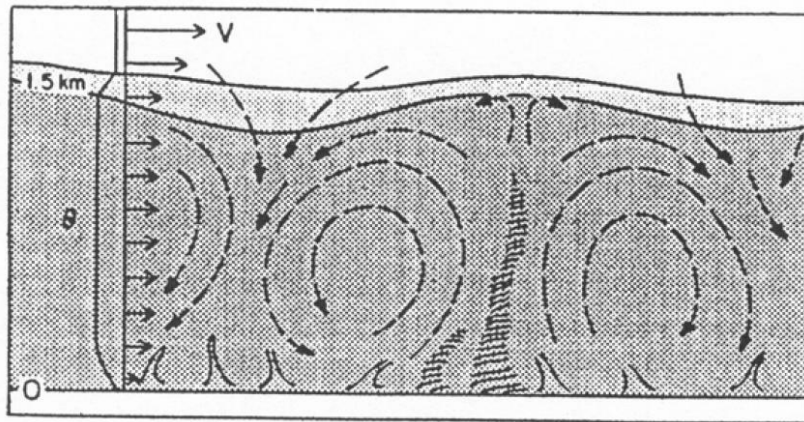


Nelle ore diurne, l'energia persa per attrito è quasi sempre inferiore rispetto a quella acquisita per convezione.

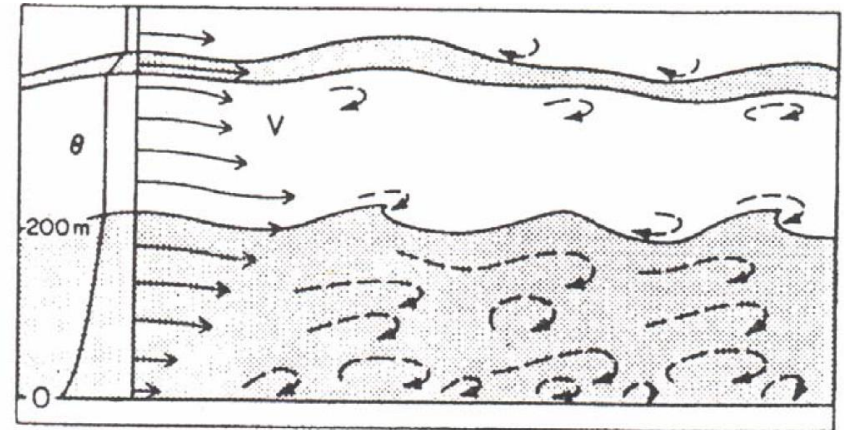
PBL

- Variazione della radiazione solare incidente al suolo durante il giorno
- Variazione di energia trasferita dalla superficie terrestre alle masse d'aria del PBL
- Variazione delle condizioni fisiche di moto delle masse d'aria del PBL

Si distinguono due regimi completamente differenti:



PBL convettivo (diurno)

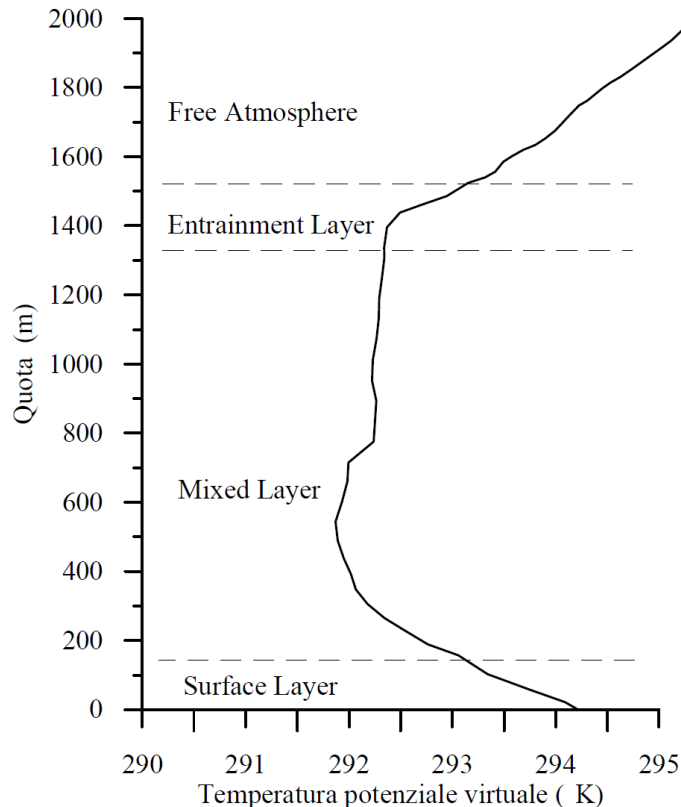


PBL stabile (notturno)

Anche le modalità di dispersione degli inquinanti sono diverse tra giorno e notte.

PBL convettivo

Durante giorni soleggiati, la generazione dei thermals ed il loro innalzamento nel PBL genera un profilo verticale della temperatura atmosferica caratteristico, in cui si possono distinguere 3 strati corrispondenti a zone con gradienti verticali di temperatura diversi:

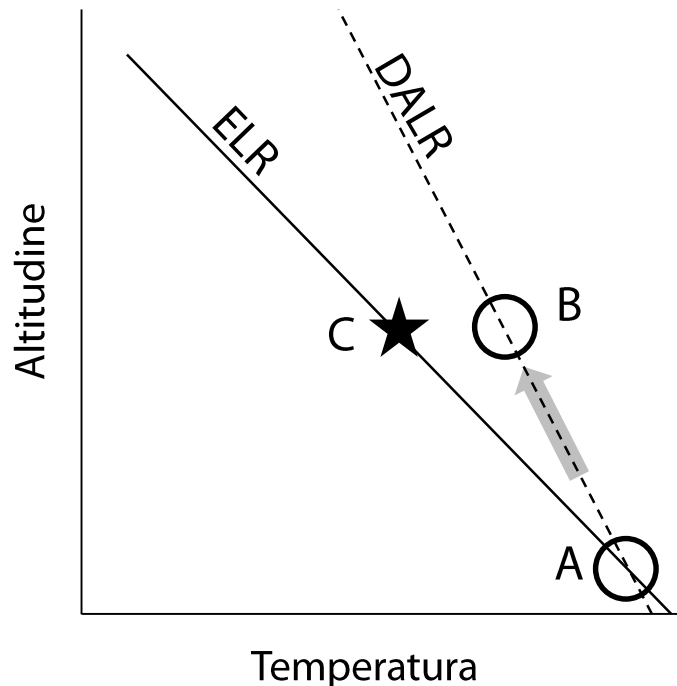
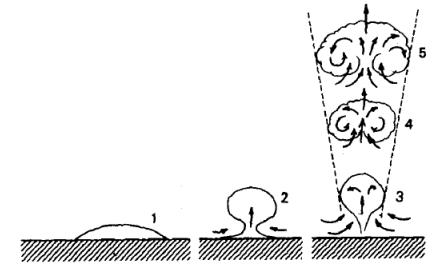


- **SURFACE LAYER (SL;** strato superficiale): dal suolo fino a ~100m, con gradiente di T negativo.
- **MIXED LAYER (ML;** strato rimescolato): gradiente di T circa nullo.
- **ENTRAINMENT LAYER (EL):** alla sommità del ML, zona di transizione verso la troposfera libera, gradiente di T molto positivo.

PBL convettivo

SURFACE LAYER (SL):

- circa 10% del ML
- direttamente a contatto con la superficie
- gradiente di temperatura negativo (**instabilità**)

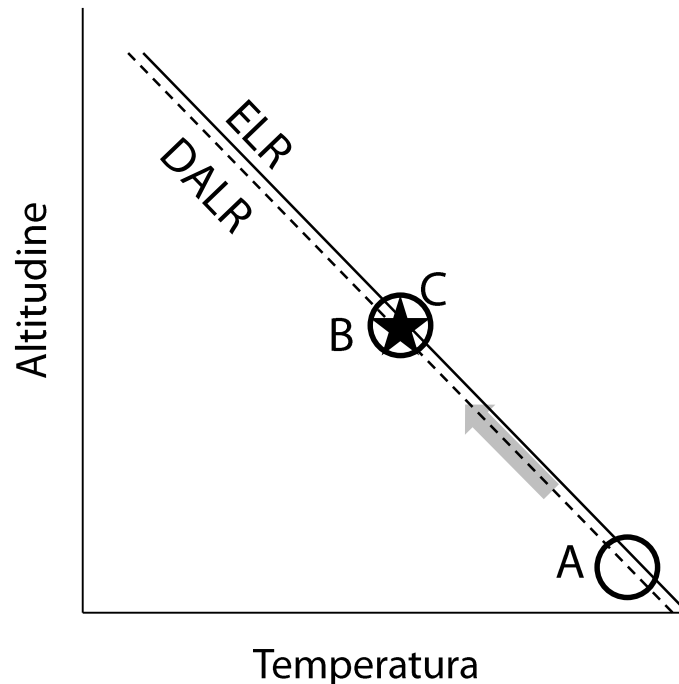


Il gradiente negativo di T fa sì che thermals liberate nei pressi del suolo con una data velocità iniziale abbandonino la propria posizione iniziale acquisendo un moto ascensionale sempre più veloce.

PBL convettivo

MIXED LAYER (ML):

- Turbolenza guidata da convezione (thermals o eddies di grandi dimensioni)
- gradiente di temperatura circa nullo (**neutralità**)
- cresce per intrappolamento di aria dalla sovrastante atmosfera libera

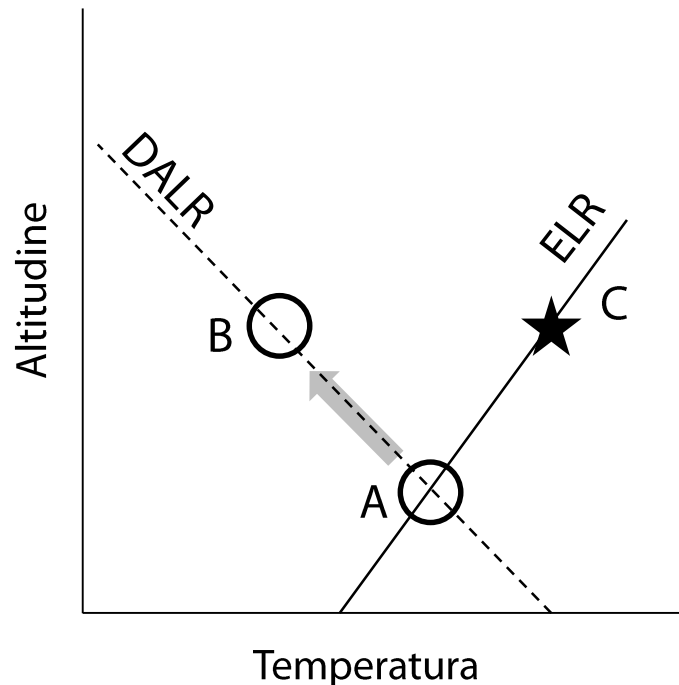


Il gradiente di T nullo fa sì che le masse d'aria in risalita dal SL continuino il proprio moto ascensionale indisturbate.

PBL convettivo

ENTRAINMENT LAYER (EL):

- zona di transizione tra ML e troposfera libera.
- gradiente di temperatura molto positivo (**stabilità**)
- cresce per intrappolamento di aria dalla sovrastante atmosfera libera
- costituisce una barriera nei confronti dei thermals in risalita



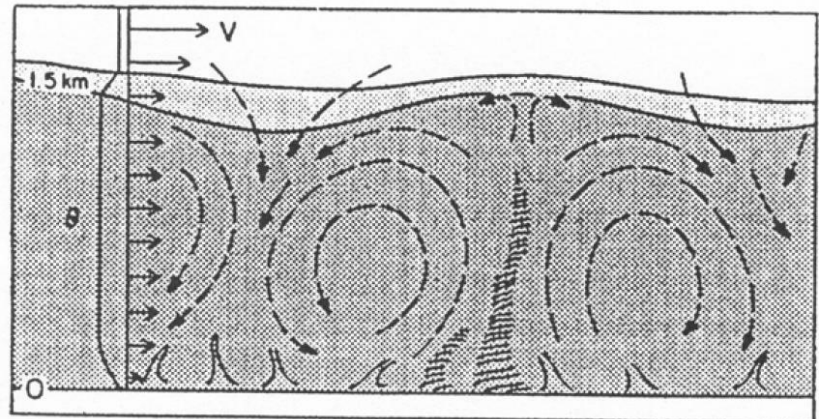
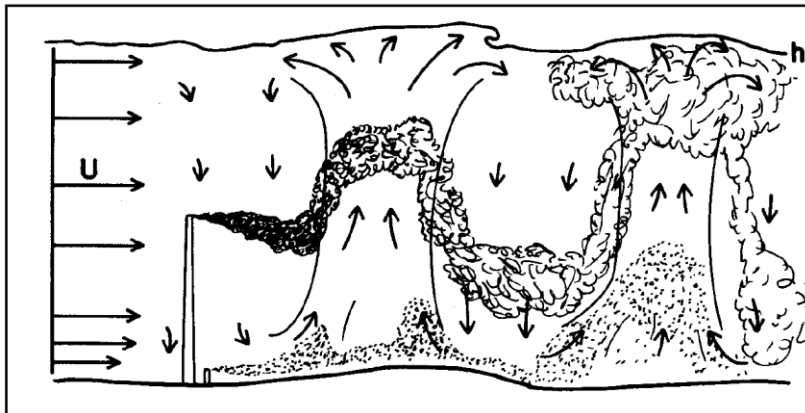
Il gradiente di T positivo fa sì che il moto ascensionale delle masse d'aria in risalita dal ML venga frenato ed interrotto.

Le masse d'aria in risalita dal ML si mescolano con una parte d'aria dell'atmosfera libera e raffreddandosi scendono verso il basso.

PBL convettivo

Nel PBL convettivo si instaurano quindi:

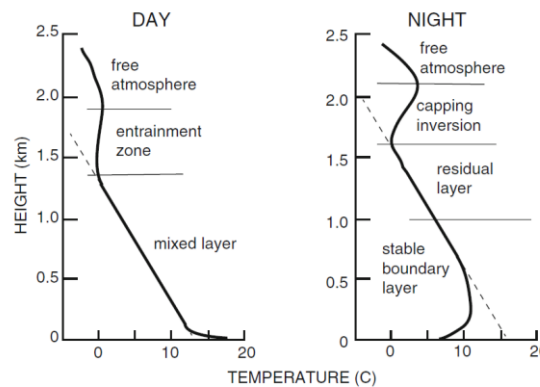
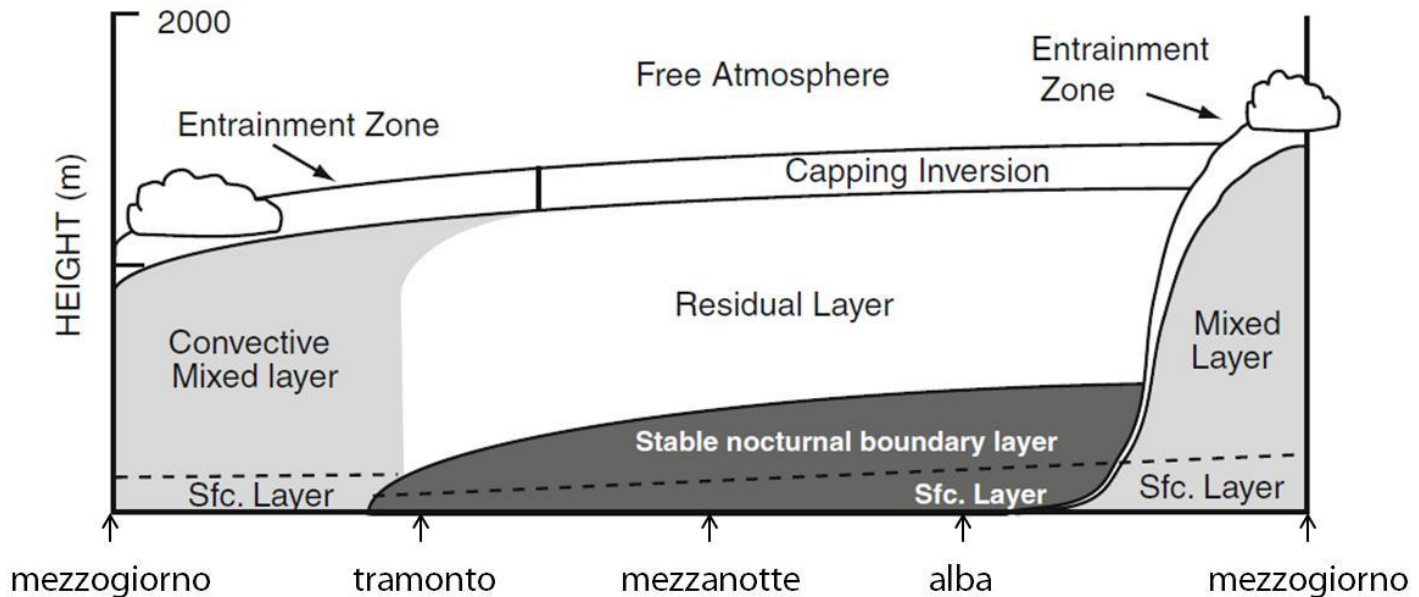
- **FLUSSI ASCENDENTI:** vortici di grandi dimensioni che hanno origine nei pressi del suolo, salgono nel SL e nel ML arrivando fino allo strato di intrappolamento (entrainment) dove si mescolano con una parte di aria dell'atmosfera libera.
- **FLUSSI DISCENDENTI:** le masse d'aria raffreddate lentamente scende verso il suolo.



Gli inquinanti emessi in prossimità della superficie terrestre vengono catturati da questi flussi ascendenti e discendenti rimanendo in larga parte intrappolati all'interno del PBL.

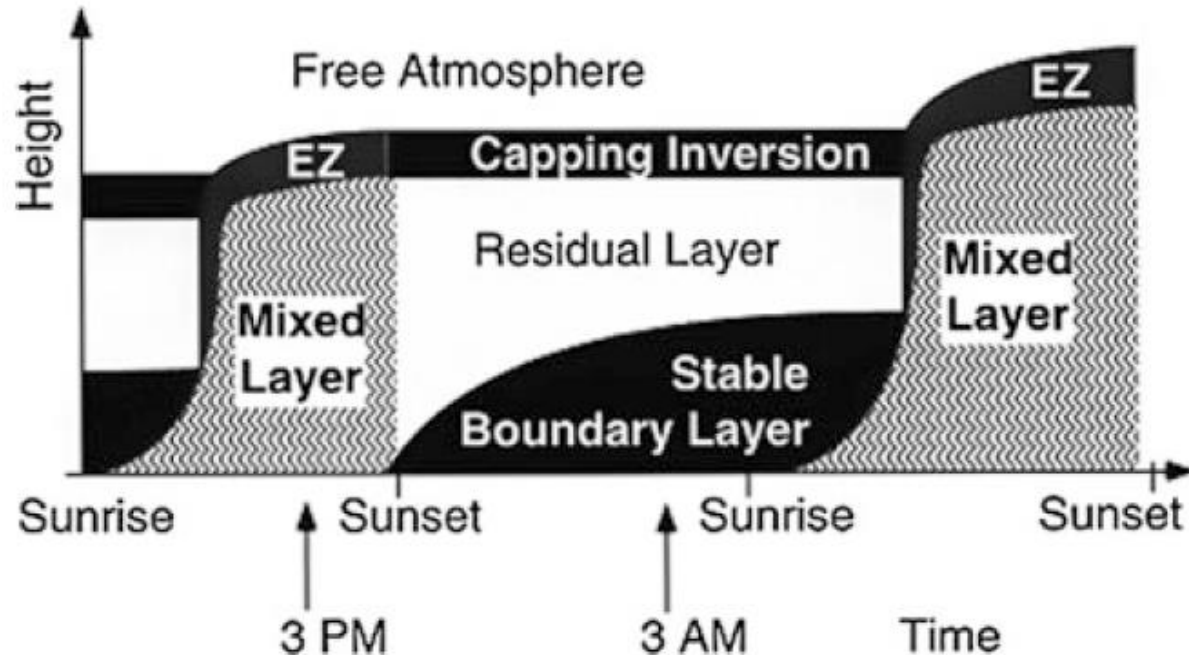
Ciclo giornaliero del PBL

La variazione col tempo dell'altezza del PBL ha un tipico andamento giornaliero legato al ciclo giorno-notte.



Ciclo giornaliero del PBL

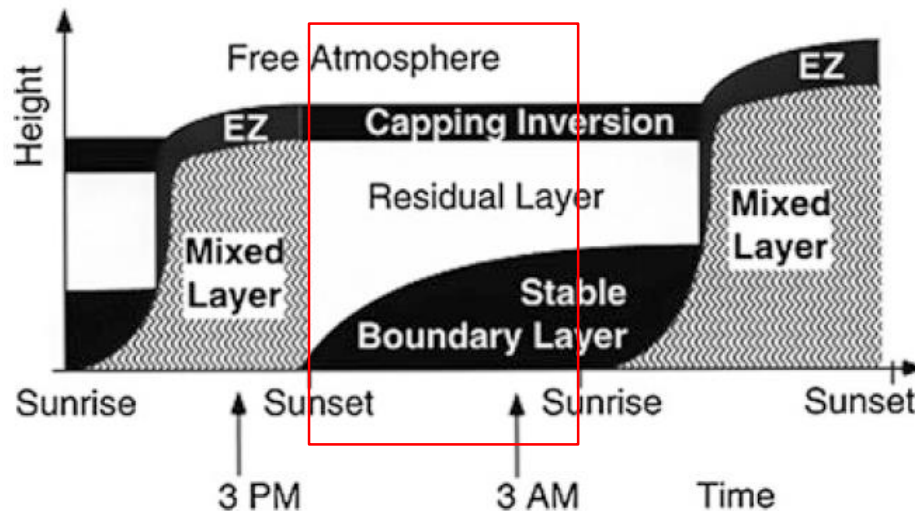
In condizioni di cielo sereno, la crescita del ML è legata al riscaldamento del suolo operato dalla radiazione solare. A partire da circa mezzora dopo l'alba, lo spessore del ML comincia a crescere raggiungendo un massimo nel tardo pomeriggio.



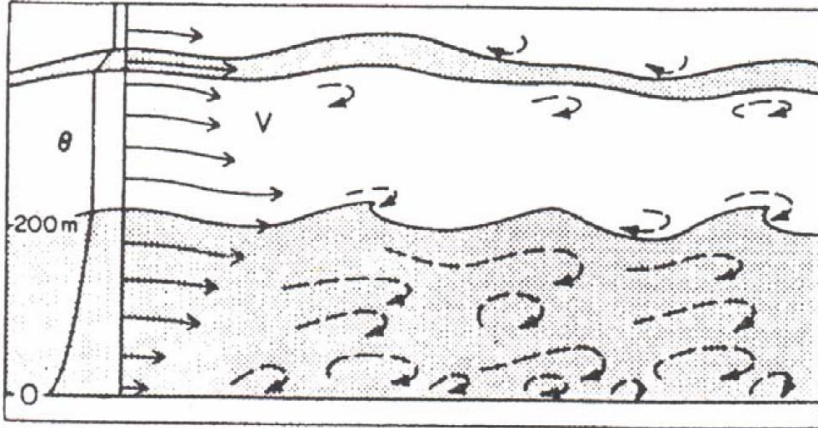
Ciclo giornaliero del PBL

Durante la notte si distinguono:

- **STABLE BOUNDARY LAYER (SBL)**: gradiente di temperatura positivo, caratterizzato da stabilità atmosferica (inversione termica) che tende a sopprimere la turbolenza meccanica (poco rimescolato e molto stabile).
- **RESIDUAL LAYER (RL)**: separato dalla superficie terrestre dallo SBL, caratterizzato da condizioni di stabilità neutre, con turbolenza bassa e uguale in tutte le direzioni, contenente i contaminanti accumulatisi nel PBL del giorno precedente.

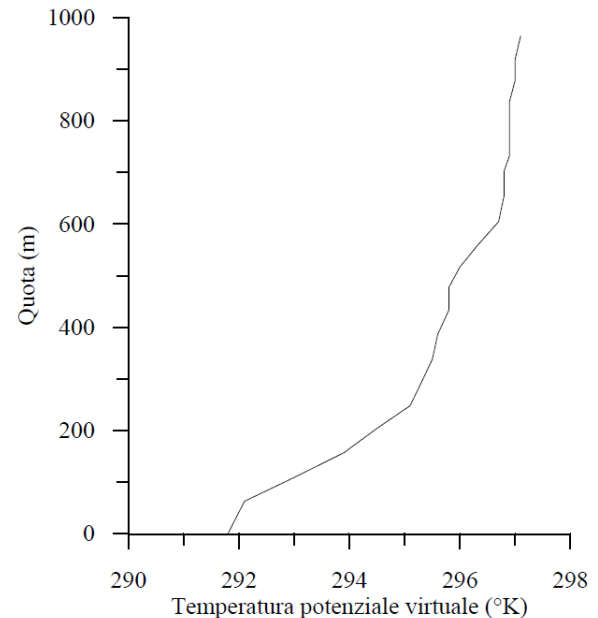


PBL stabile (SBL)



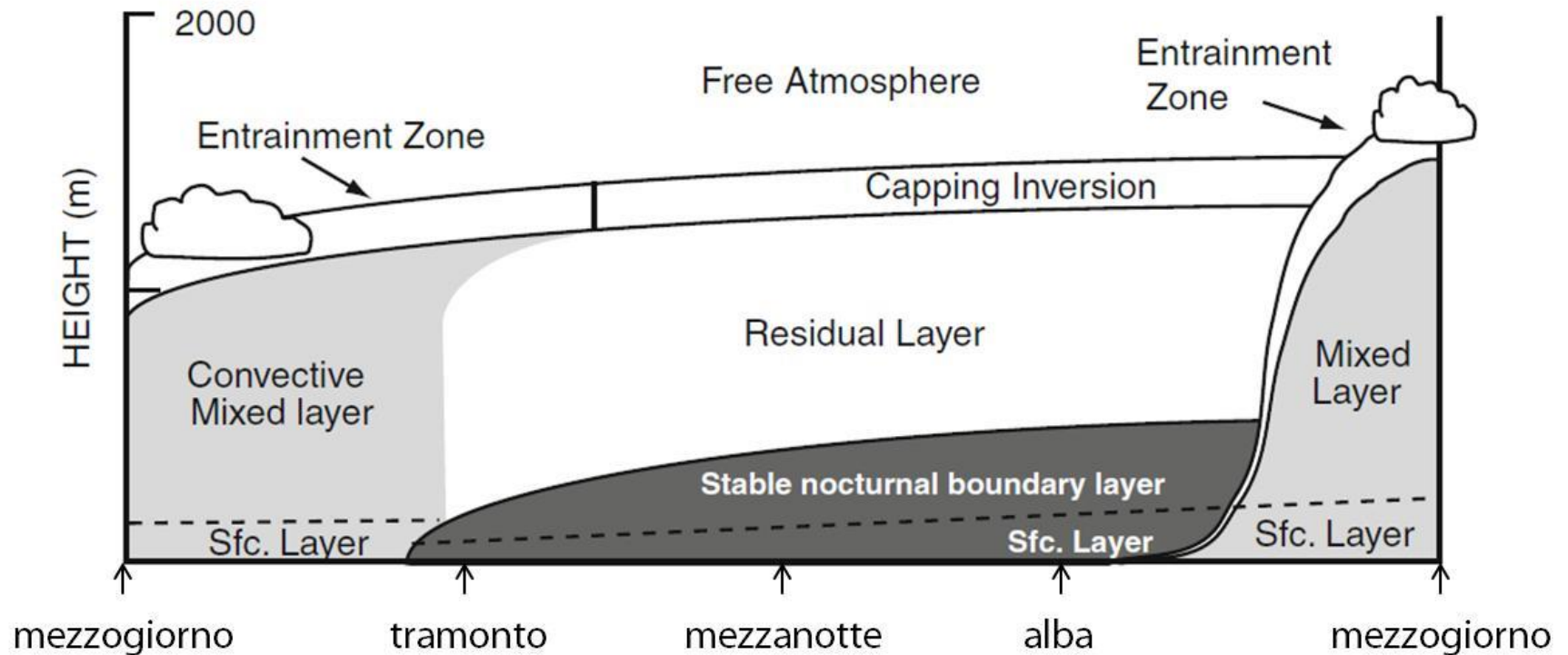
Il PBL notturno è sede di una turbolenza (di tipo meccanico) caratterizzata da vortici di piccole dimensioni localizzati nelle immediate vicinanze del suolo.

In un tipico profilo di temperatura in una situazione notturna, il PBL può essere individuato, in prima approssimazione, nello strato più vicino al suolo sede di un profilo termico a maggior gradiente termico.



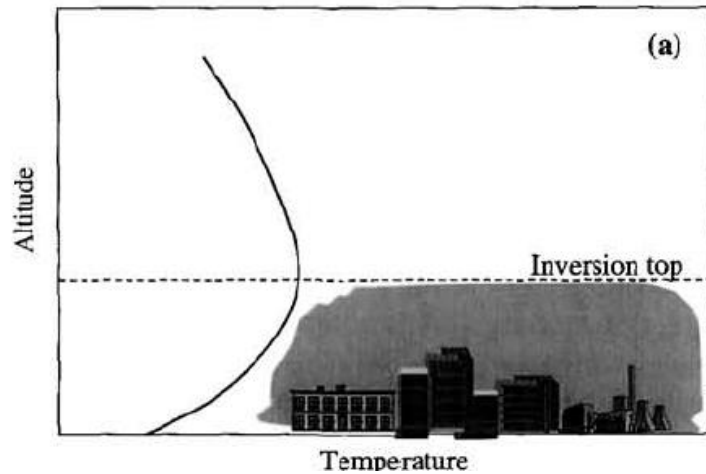
Ciclo giornaliero del PBL

Riassumendo...

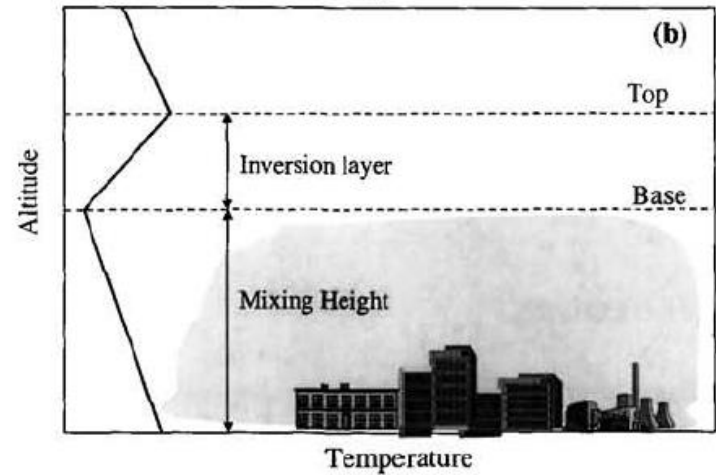


Il cambiamento nella stabilità atmosferica, da stabile nel primo mattino a instabile nel pomeriggio, ha un impatto rilevante sulle concentrazioni degli inquinanti.

PBL e inquinanti



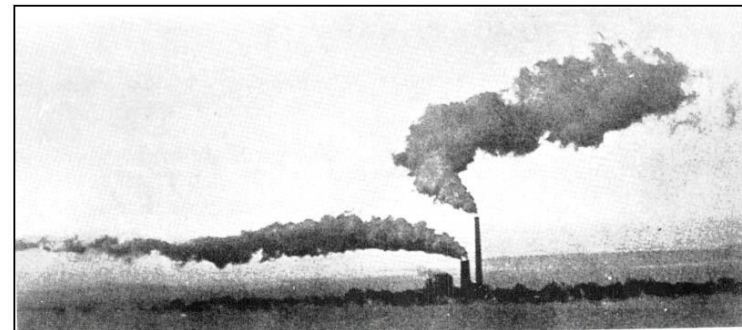
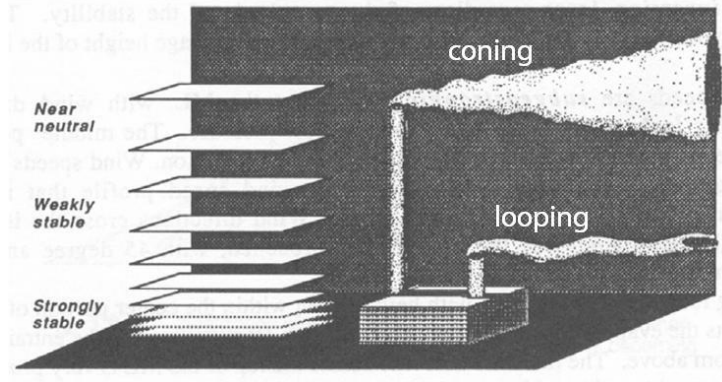
SBL (notte)



ML (giorno)

Dispersione degli inquinanti

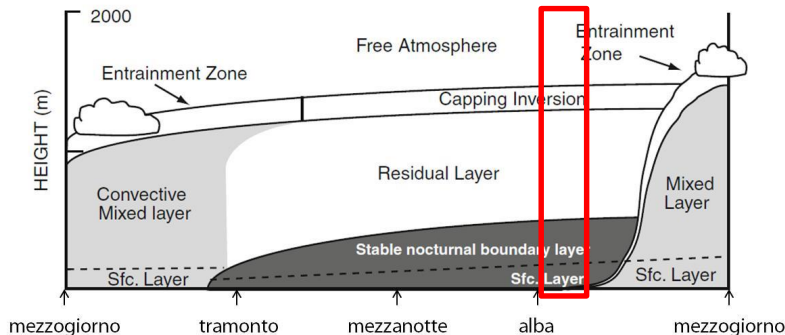
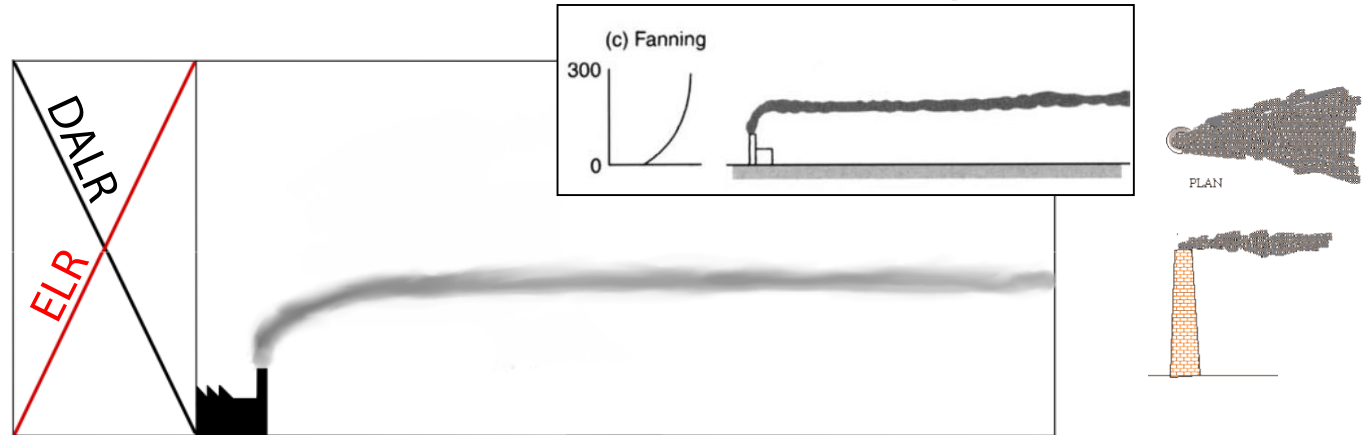
Turbolenza e stabilità atmosferica esercitano un controllo fondamentale sulle modalità di dispersione degli inquinanti e quindi sull'intensità e l'estensione dell'impatto delle sorgenti di emissione sulla qualità dell'aria.



Dispersione degli inquinanti

Prima mattina:

- venti deboli
- inversione termica che si estende dalla superficie fin sopra alla ciminiera (stabilità atmosferica)
- scarso movimento verticale, movimento orizzontale prevalente



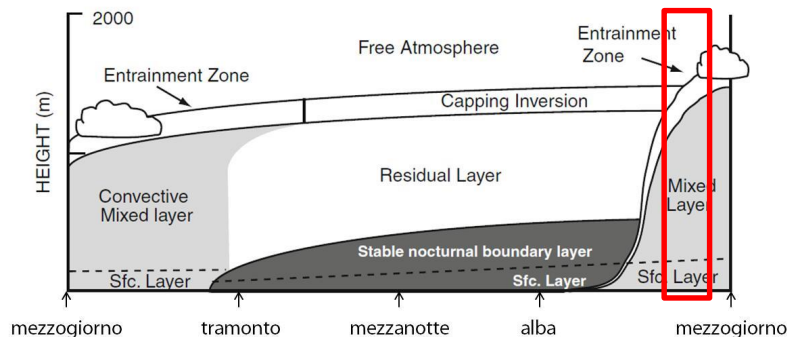
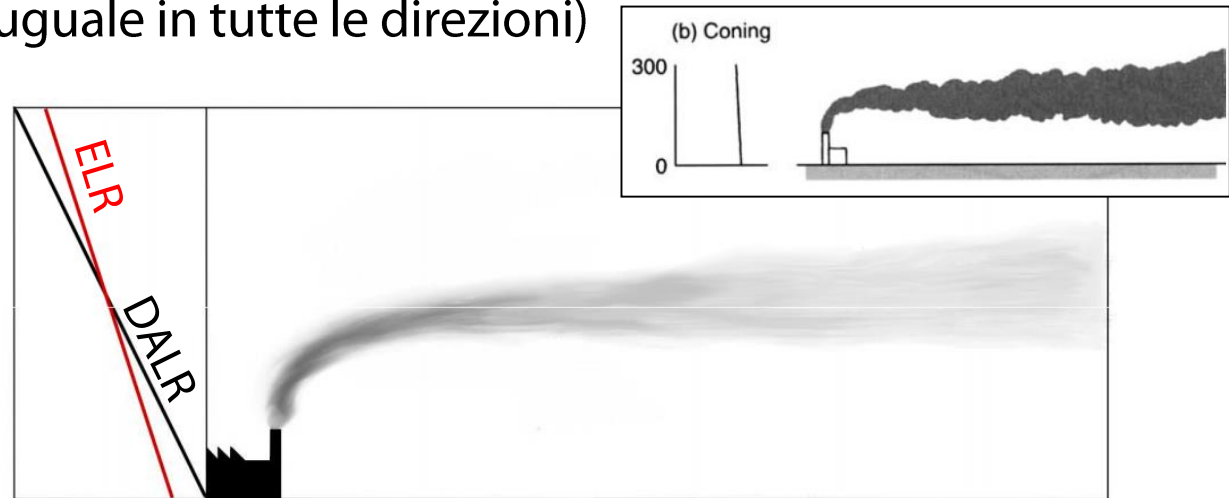
Il plume assume una forma a ventaglio: FANNING



Dispersione degli inquinanti

Tarda mattina:

- l'aria a contatto col suolo si scalda velocemente
- l'inversione termica gradualmente sparisce
- si instaurano condizioni atmosferiche neutre (la turbolenza è bassa e circa uguale in tutte le direzioni)



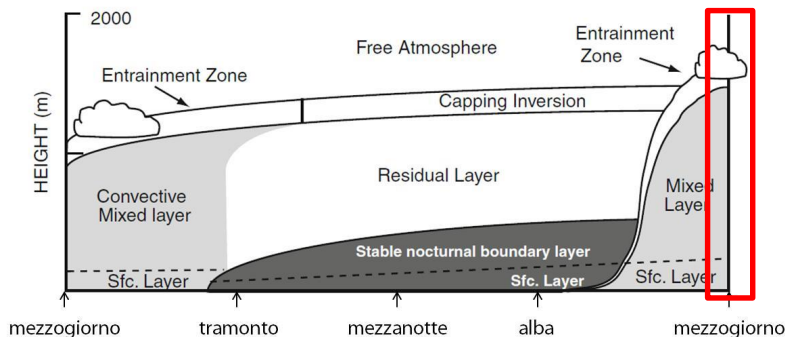
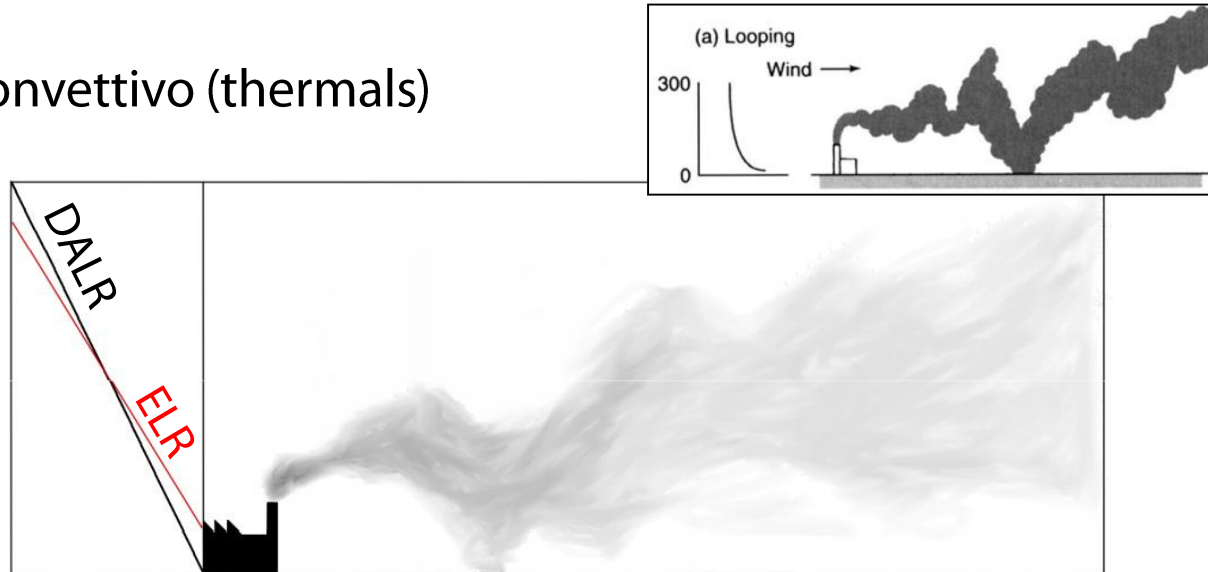
Il plume assume una forma conica: CONING



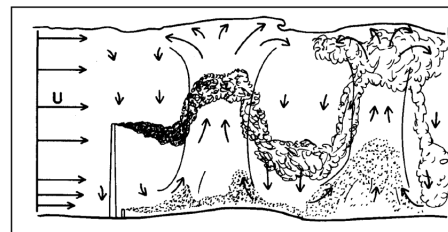
Dispersione degli inquinanti

Mezzogiorno:

- lo spessore del ML aumenta raggiungendo il suo massimo sviluppo
- regime convettivo (thermals)



Il plume assume una forma a onda: LOOPING



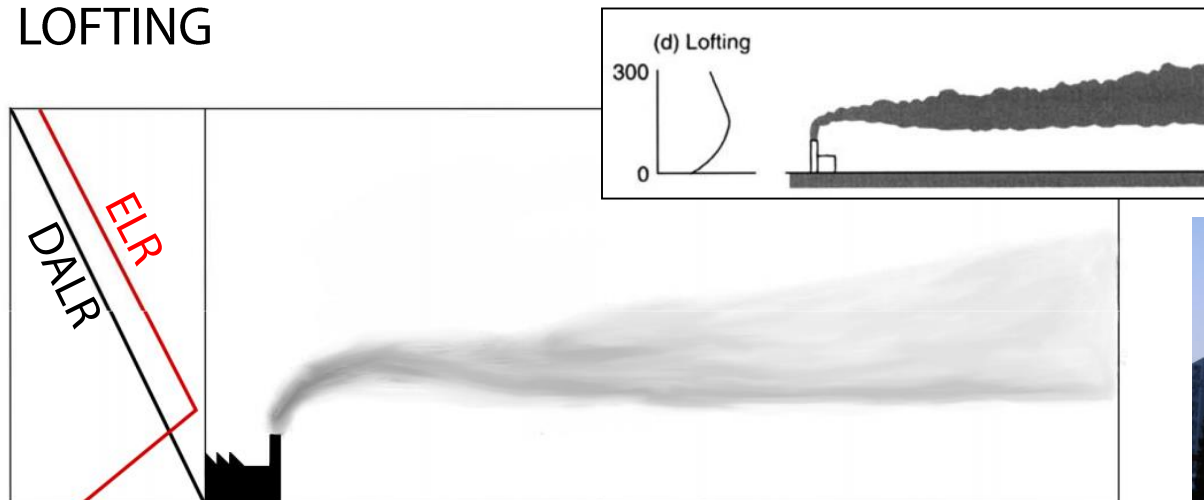
Dispersione degli inquinanti

Mentre condizioni instabili sono in genere favorevoli alla dispersione di inquinanti, livelli di concentrazione elevati possono essere registrati nel caso di inversioni termiche, cioè in presenza di condizioni atmosferiche stabili.

L'altezza della sorgente di emissione rispetto allo strato di inversione termica influenza le concentrazioni di inquinanti al suolo.

- Se il plume viene emesso al di sopra di uno strato di inversione in presenza di condizioni instabili, non si osservano variazioni apprezzabili delle concentrazioni degli inquinanti al suolo:

LOFTING

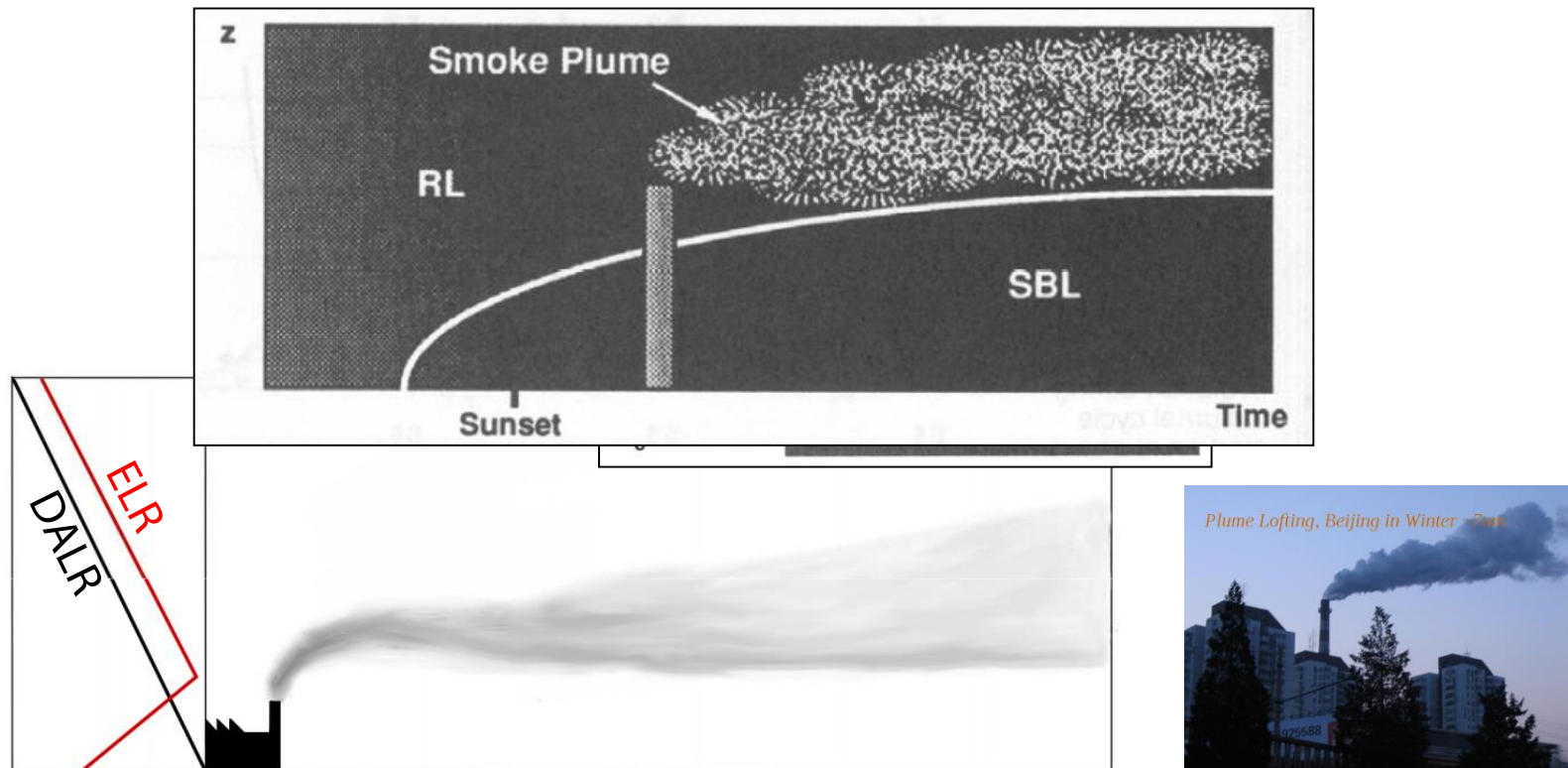


Dispersione degli inquinanti

Il fenomeno del LOFTING si verifica di notte, nel caso di plume emessi al di sopra dello SBL.

Il pennacchio, raggiunta la base del RL, non riesce ad entrare nello SBL e gli galleggia sopra.

Pennacchi emessi nello SBL o nel RL raramente raggiungono il suolo durante la notte per la limitata turbolenza.

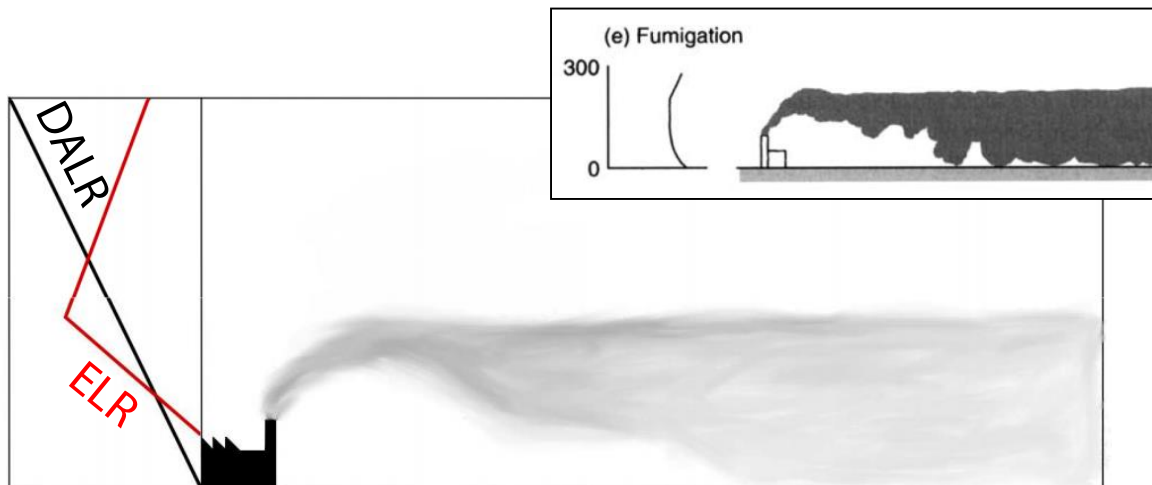


Dispersione degli inquinanti

Mentre condizioni instabili sono in genere favorevoli alla dispersione di inquinanti, livelli di concentrazione elevati possono essere registrati nel caso di inversioni termiche, cioè in presenza di condizioni atmosferiche stabili.

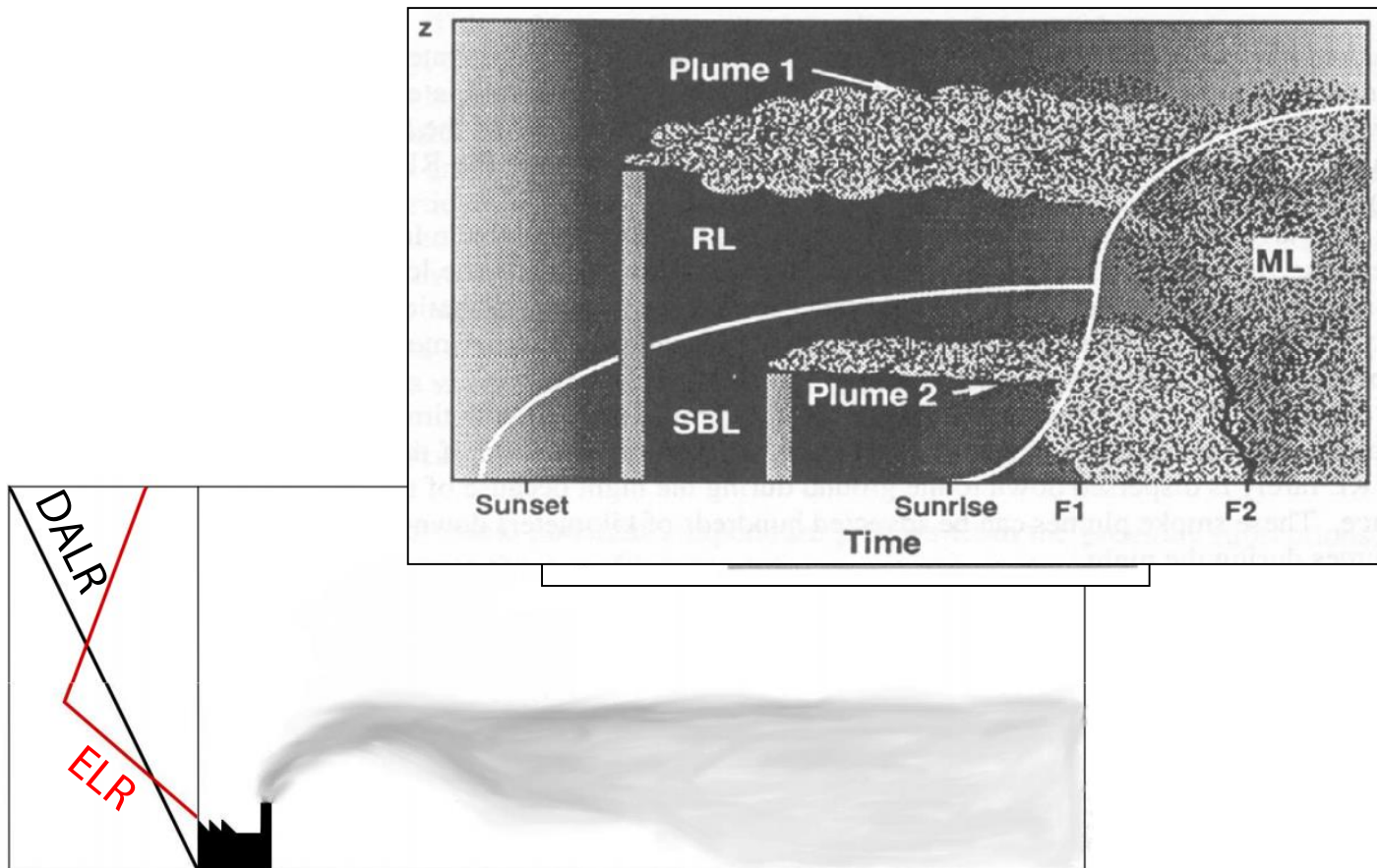
L'altezza della sorgente di emissione rispetto allo strato di inversione termica influenza le concentrazioni di inquinanti al suolo.

- Se il plume viene emesso al di sotto di uno strato di inversione, in presenza di condizioni instabili, gli inquinanti possono essere trasportati rapidamente al livello del suolo: FUMIGATION



Dispersion degli inquinanti

Il fenomeno del FUMIGATION si verifica dopo l'alba. Il ML cresce rapidamente e raggiunge il livello del pennacchio. A questo punto l'inquinante viene trascinato verso il basso.

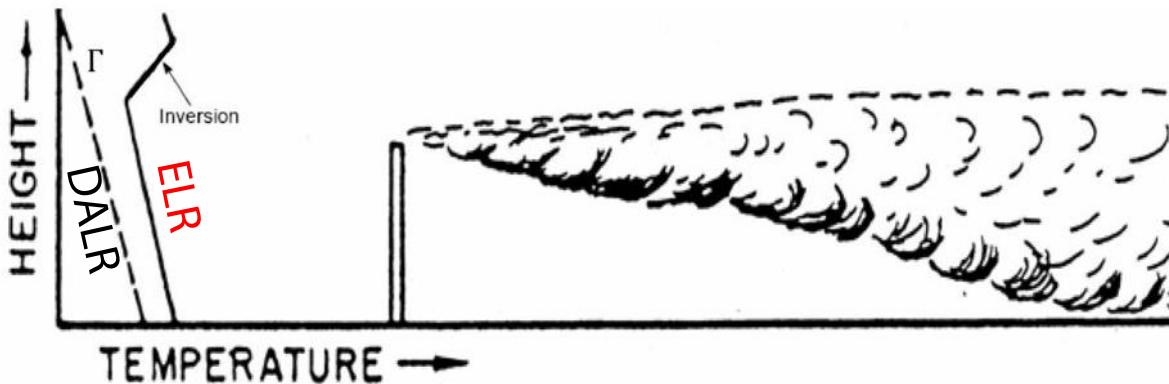


Dispersione degli inquinanti

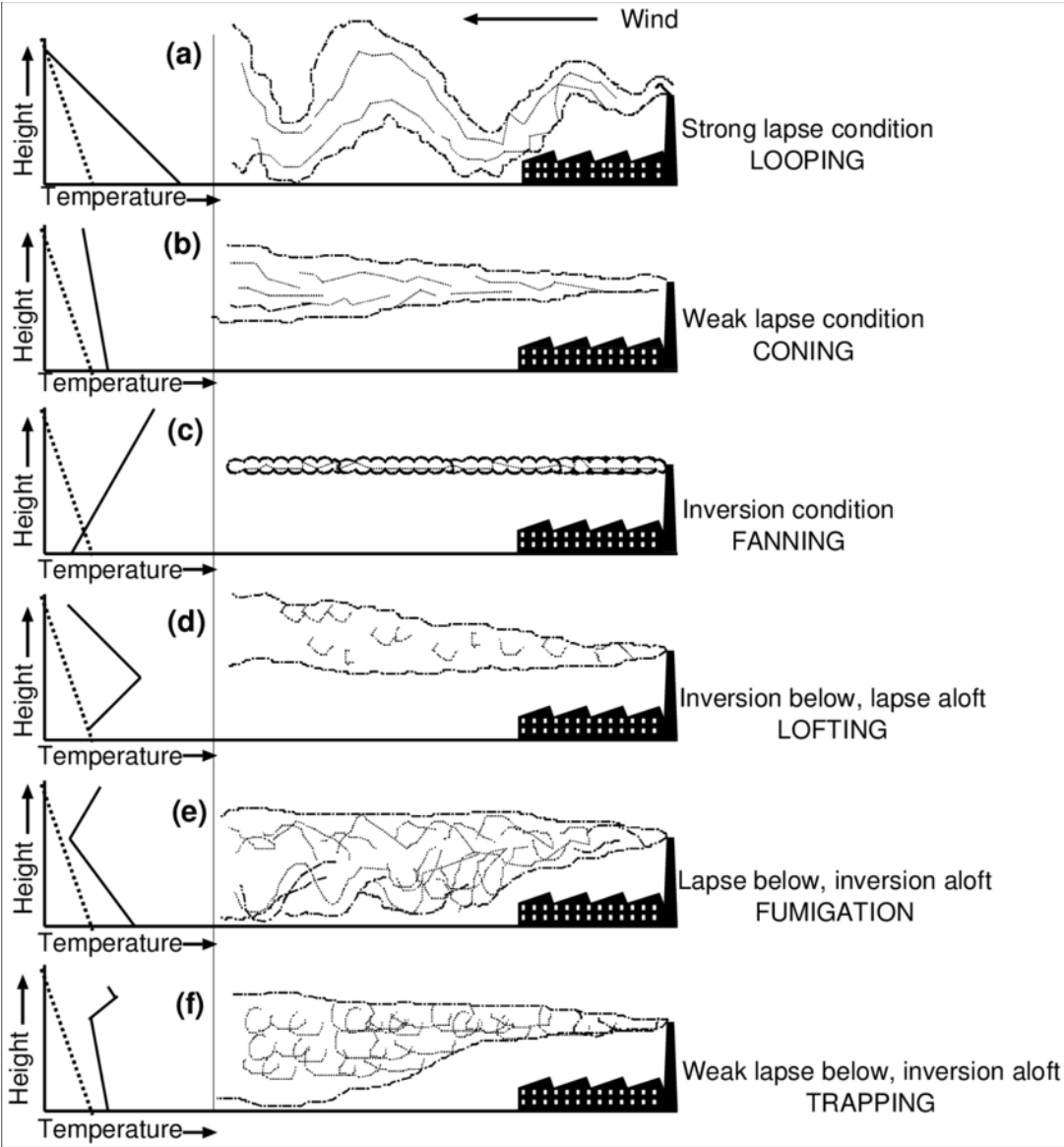
Mentre condizioni instabili sono in genere favorevoli alla dispersione di inquinanti, livelli di concentrazione elevati possono essere registrati nel caso di inversioni termiche, cioè in presenza di condizioni atmosferiche stabili.

L'altezza della sorgente di emissione rispetto allo strato di inversione termica influenza le concentrazioni di inquinanti al suolo.

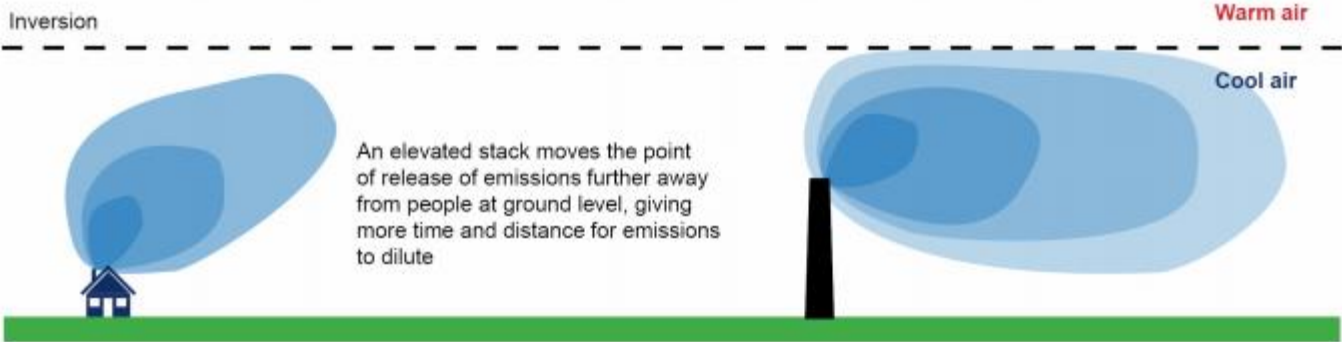
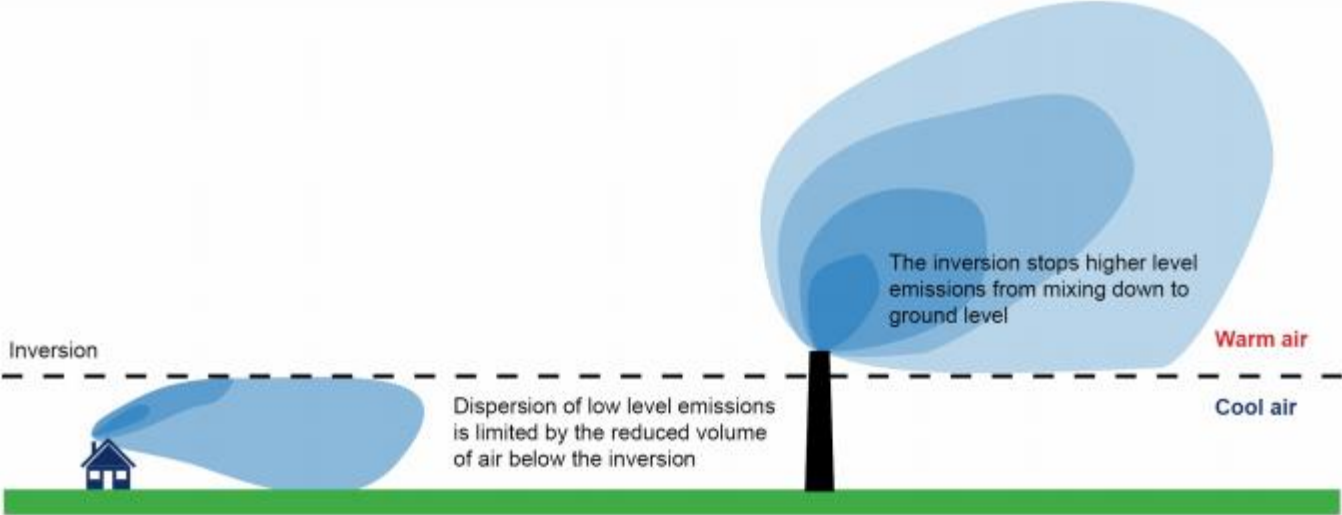
- Se il plume viene emesso al di sotto di uno strato di inversione, in presenza di condizioni neutre, il plume resta bloccato sotto lo strato di inversione: TRAPPING



Dispersion degli inquinanti



Dispersion degli inquinanti



Modelli di dispersione

La modellizzazione della dispersione degli inquinanti in atmosfera consiste nella simulazione matematica di trasporto, dispersione e rimozione dei contaminanti in aria.

I modelli matematici per la qualità dell'aria usano tecniche numeriche per simulare i processi fisici e chimici che interessano i contaminanti atmosferici durante la dispersione in atmosfera.

È effettuata tramite programmi informatici che risolvono equazioni matematiche e algoritmi che descrivono la dispersione degli inquinanti, per predire o stimare le concentrazioni degli inquinanti a distanze diverse dalla sorgente di emissione e a condizioni variabili.

Modelli di dispersione

I dati di input dei modelli di dispersione includono:

1. Condizioni meteorologiche (es. velocità e direzione del vento, turbolenza, stabilità atmosferica, temperatura, altezza dello strato di inversione termica)
2. Parametri di emissione (es. posizione e altezza della sorgente, tipologia e geometria della sorgente, velocità di emissione, T di emissione, flusso di massa)
3. Orografia, posizione e geometria di eventuali ostacoli tra la sorgente e il recettore
4. Posizione, altezza, larghezza di qualsiasi ostacolo (alberi, edifici, altre strutture)

Esempi di software: CALMET, CALPUFF, AERMOD

PECULIARITÀ DELL'AMBIENTE URBANO



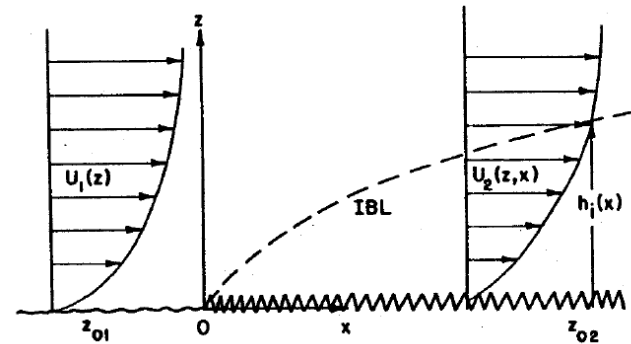
Peculiarità dell'ambiente urbano

Il processo di urbanizzazione ha prodotto radicali cambiamenti nella natura della superficie e delle proprietà atmosferiche dell'ambiente urbano rispetto alle aree rurali :

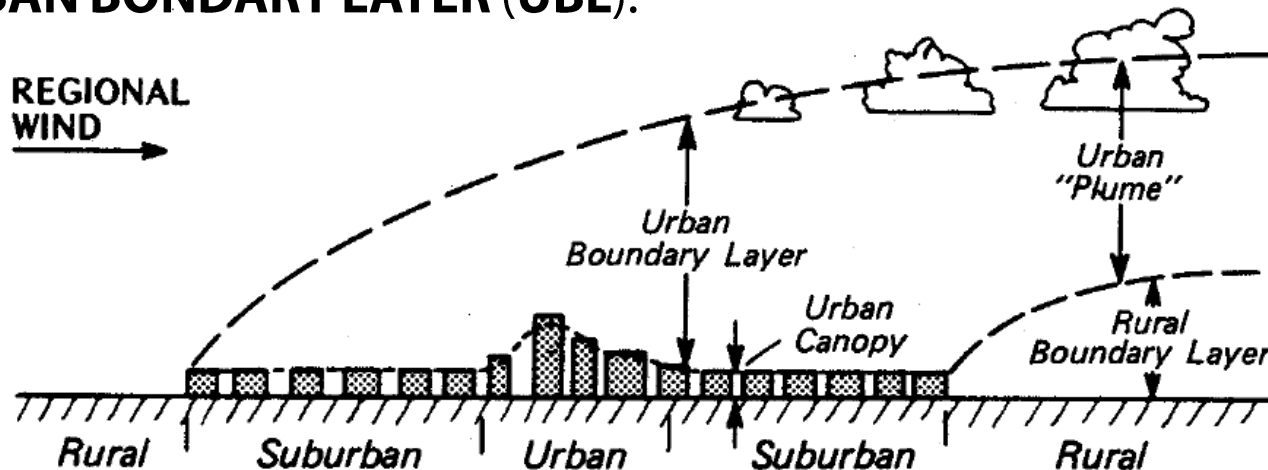
- **rugosità superficiale:** influenza la turbolenza verticale e il campo di venti;
- **bilancio di radiazione:** minore radiazione UV (25-90%), minore radiazione solare (1-25%), maggiore input di IR (5-40%)
- **bilancio di calore e temperatura:** T media annuale maggiore (1-3°C, con picchi fino a 12°C), flusso di calore maggiore (50%), maggiore accumulo di calore (200%)
- **umidità:** minor evapotraspirazione (50%), minore umidità,
- **visibilità:** visibilità ridotta, maggiore foschia, maggiore copertura nuvolosa

Urban Boundary Layer (UBL)

Quando una massa d'aria transita tra aree a rugosità diversa, si genera un **INTERNAL BOUNDARY LAYER (IBL)** che si sviluppa sottovento rispetto alla linea di discontinuità tra le due aree.



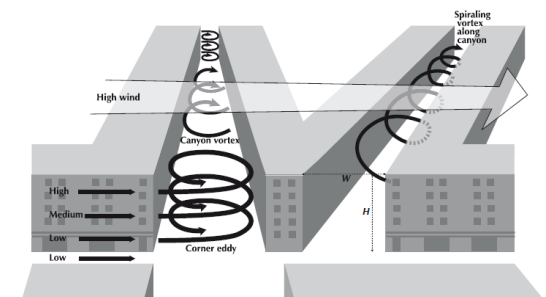
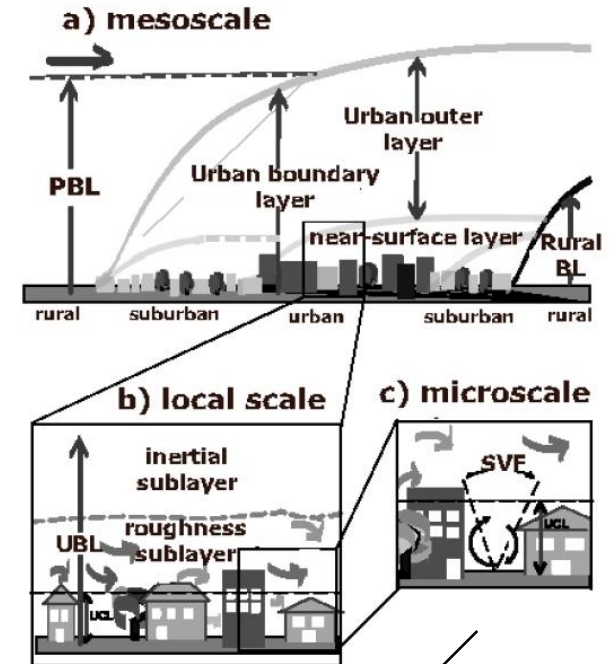
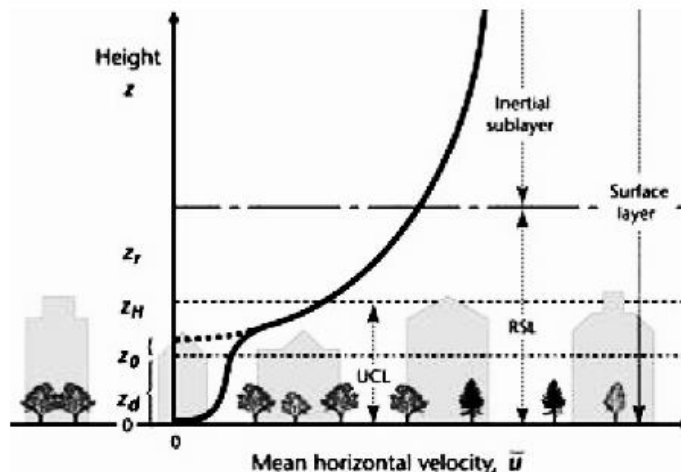
L'IBL che si sviluppa in corrispondenza delle aree urbane è detto **URBAN BOUNDARY LAYER (UBL)**.



Al di sotto dell'UBL, si sviluppa la **Canopy Urbana**, un microclima completamente distinto e determinato dalla forma e dalla geometria degli edifici.

Urban Boundary Layer (UBL)

1. **Urban canopy layer (UCL;** strato di copertura urbana): elemento strutturale caratteristico di questo strato sono i cosiddetti canyon urbani;
2. **Roughness sublayer (RSL;** substrato di rugosità): include l'UCL, flussi d'aria e turbolenza influenzati direttamente dalla presenza di ostacoli;
3. **Inertial sublayer (ISL;** substrato inerziale): i flussi turbolenti non risentono dell'effetto locale dei singoli edifici, e sono quindi omogenei



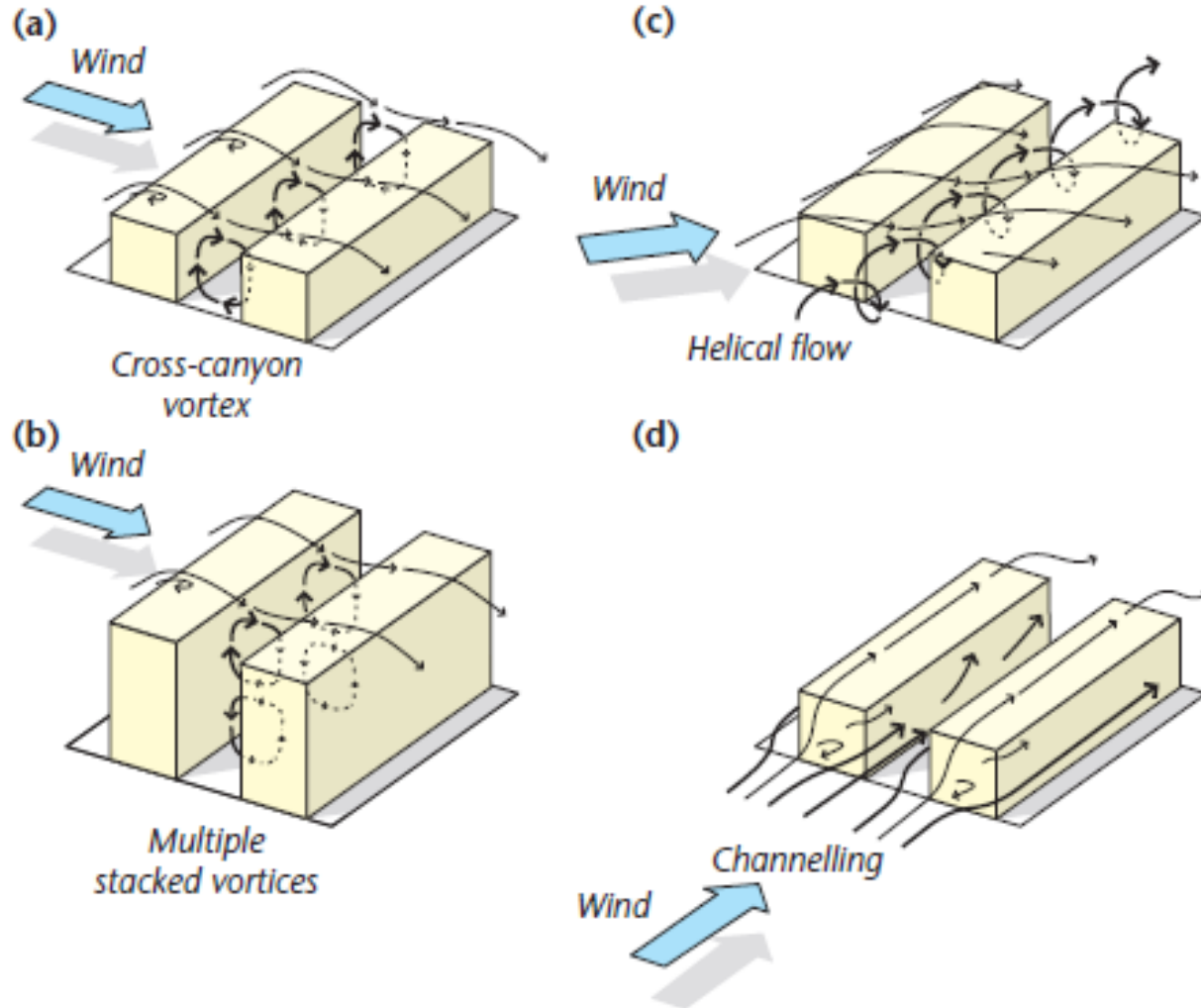
Sviluppo di vortici in un canyon urbano

Urban Boundary Layer (UBL)



Effetto degli edifici a Panama City (USA) sul dislocamento delle nuvole. Il vento proviene dall'oceano.

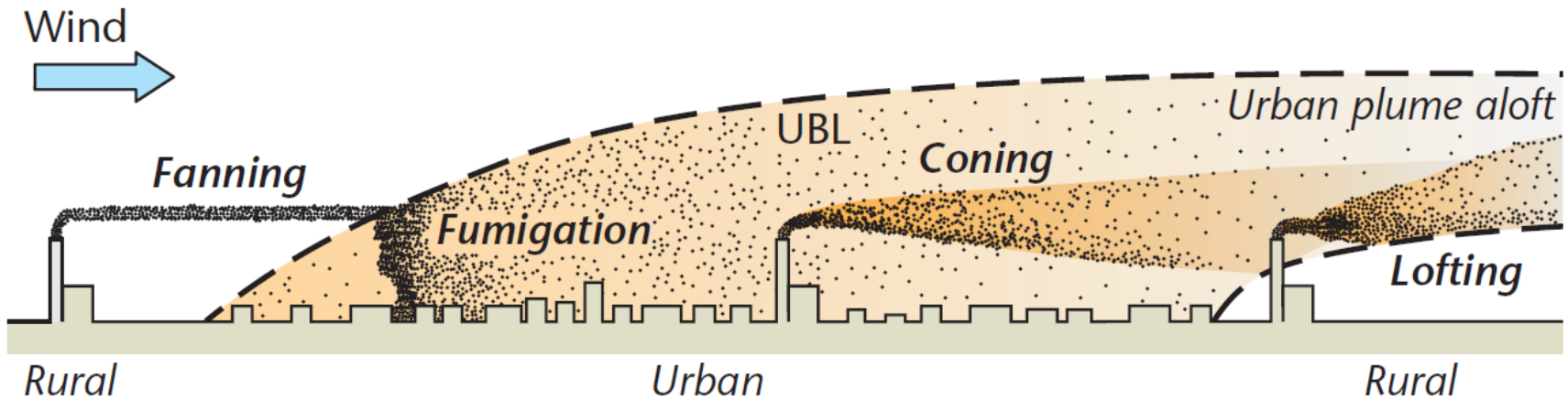
Urban Boundary Layer (UBL)



Urban Boundary Layer (UBL)



Urban Boundary Layer (UBL)

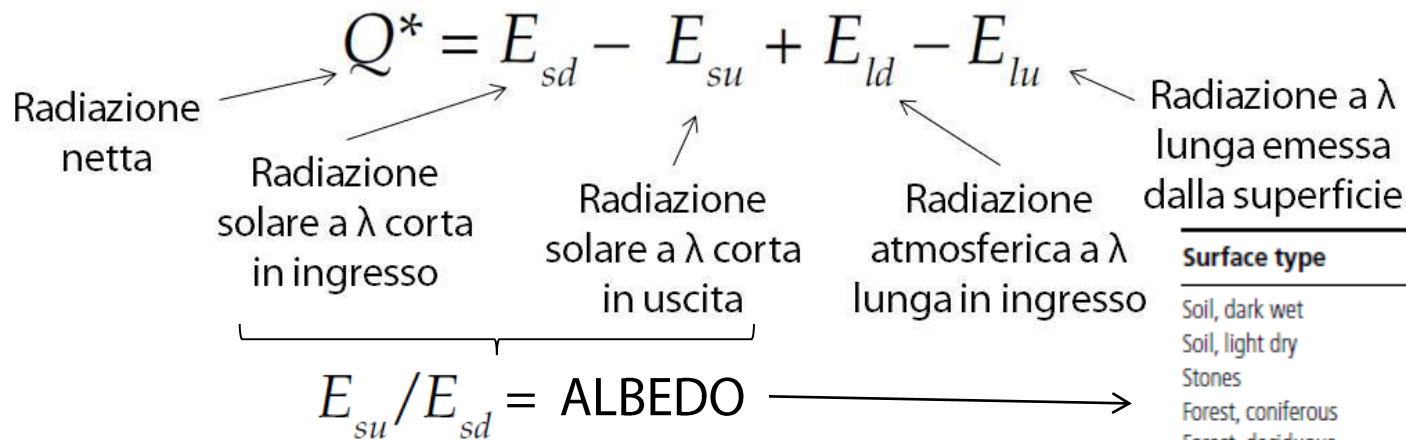


Urban Heat Island effect

L'urban heat island effect (o effetto isola di calore urbana, ICU) è sicuramente il più noto degli effetti dell'urbanizzazione sul clima locale. In generale con questo termine si identificano le differenze di temperatura tra un'area urbana (più calda) e le aree non urbane che la circondano.

Le cause dell'isola di calore sono da ricercare nelle differenze del bilancio energetico.

Il **budget di radiazione** di un'area può essere scritto come:



Surface type	Albedo
Soil, dark wet	0.06–0.08
Soil, light dry	0.16–0.18
Stones	0.2–0.3
Forest, coniferous	0.05–0.15
Forest, deciduous	0.10–0.25
Grass, green	0.26
Rock, granite	0.12–0.18
Road, asphalt	0.05–0.15
Buildings	0.09
Concrete	0.15–0.37
Urban, mean	0.15

Urban Heat Island effect

$$Q^* = E_{sd} - E_{su} + E_{ld} - E_{lu}$$

In base alla legge di Stefan-Boltzman, è direttamente dipendente dalla temperatura superficiale:

$$E_{lu} = \sigma \varepsilon T_0$$

σ : Stefan-Boltzman-constant ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$),

ε : emissivity,

T_0 : surface temperature in Kelvin.

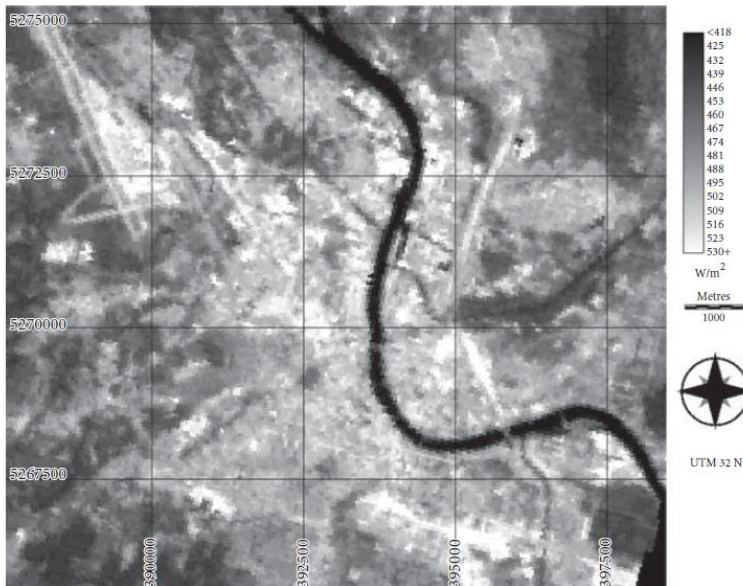


Table 1.2.2 Thermal properties of materials used in rural and urban environment (Oke 1987)

Material	Heat capacity $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1} \times 10^6$	Thermal conductivity $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Sandy soil, dry	1.28	0.30
Sandy soil, saturated	2.96	2.20
Clay soil, dry	1.42	0.25
Clay soil, saturated	3.10	1.58
Asphalt	1.94	0.75
Concrete, dense	2.11	1.51
Stone	2.25	2.19
Brick	1.37	0.83
Clay tiles	1.77	0.84
Wood, dense	1.52	0.19
Water, still	4.18	0.57

Emissione di radiazione terrestre a λ lunga dalla città di Basel (Svizzera).

Urban Heat Island effect

Il **budget di calore** in un ambiente urbano descrive come l'energia ottenuta dalla radiazione netta viene ripartita nei vari flussi di calore. Può essere scritto come:

$$Q^* + Q_H + Q_E + Q_S + Q_F = 0$$

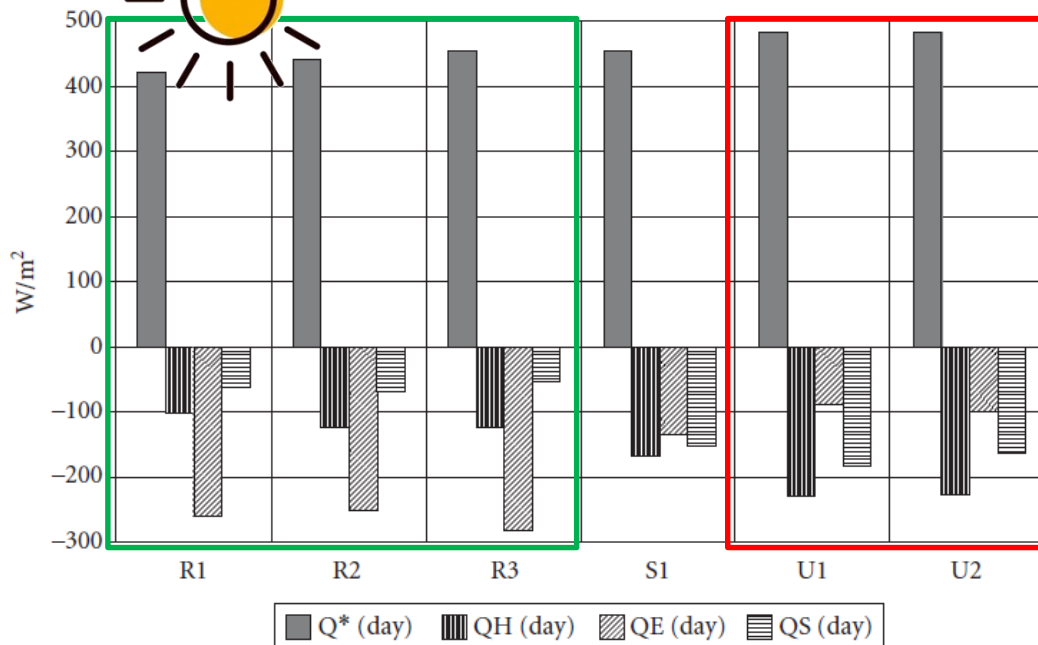
Radiazione netta

Flusso di calore sensibile

Flusso di calore latente

Flusso di calore immagazzinato

Flusso di calore antropogenico



Q_E : Componente dominante in aree rurali

Q_S e Q_H : Componenti dominanti in aree urbane. Q_S rappresenta fino al 50% di Q^* in aree urbane (anche 4 volte maggiore rispetto ad aree rurali)

Urban Heat Island effect

Il **budget di calore** in un ambiente urbano descrive come l'energia ottenuta dalla radiazione netta viene ripartita nei vari flussi di calore. Può essere scritto come:

$$Q^* + Q_H + Q_E + Q_S + Q_F = 0$$

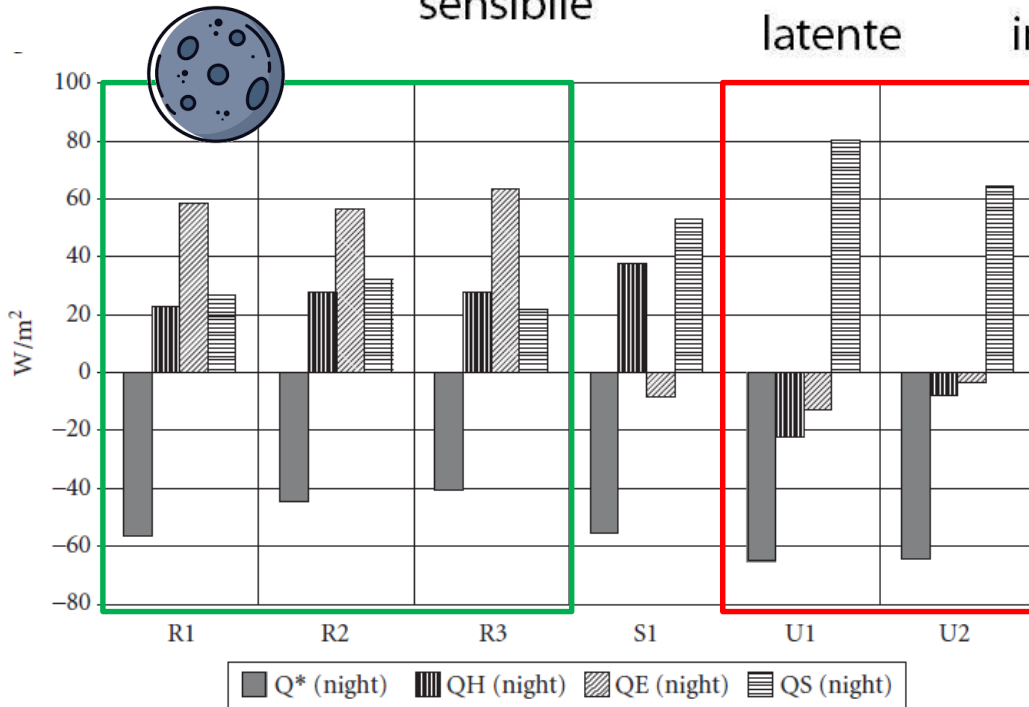
Radiazione netta

Flusso di calore sensibile

Flusso di calore latente

Flusso di calore immagazzinato

Flusso di calore antropogenico



- Q^* compensata da tutte le componenti di flusso in aree rurali (diminuzione T, condensazione, diminuzione T del suolo).

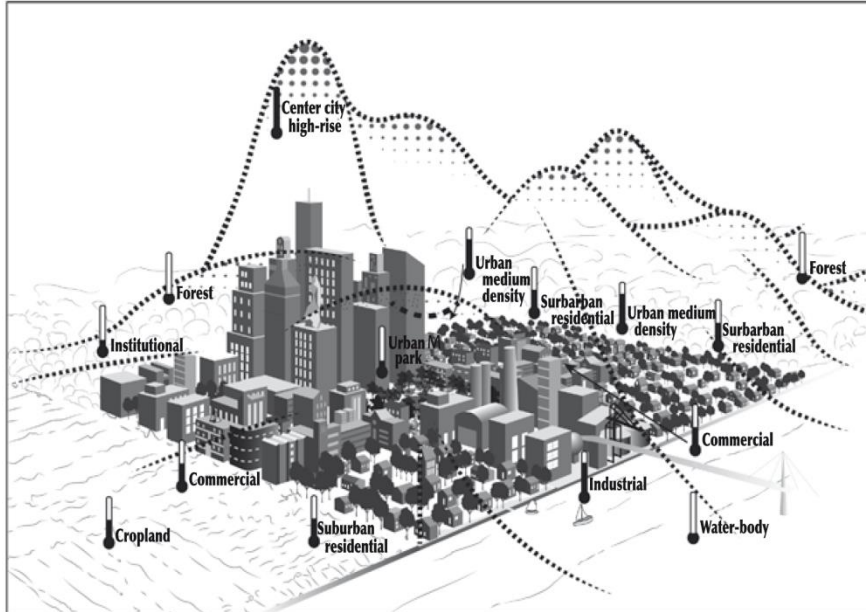
- Q^* compensata principalmente da Q_S in aree urbane, con eventuale sovracompensazione ($Q_S > Q^*$)

diminuzione di T aria
aree urbane < aree rurali

Urban Heat Island effect

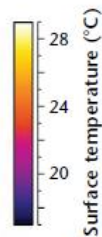
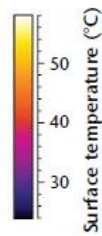
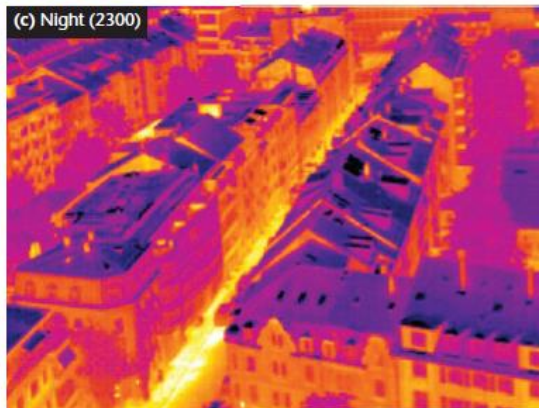
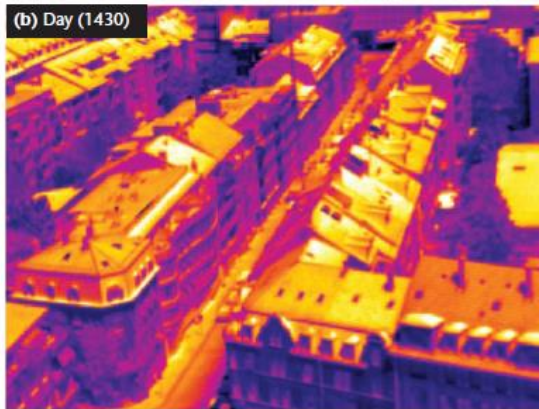
Le cause dell'isola di calore sono sostanzialmente le seguenti:

1. Di giorno, la prevalenza del flusso di calore sensibile sul flusso di calore latente (dovuta all'impermeabilità delle superfici e alla scarsa vegetazione) riscalda la temperatura dell'aria in città;
2. Nel pomeriggio, il flusso di calore sensibile dalla superficie all'aria cala più gradualmente rispetto alle aree rurali e addirittura di notte spesso resta positivo.

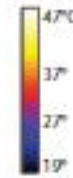


3. Nel tardo pomeriggio e di sera, la superficie urbana rilascia una quantità significativa di calore immagazzinato durante la giornata.
4. Il flusso di calore antropogenico costituisce una sorgente aggiuntiva di energia.

Urban Heat Island effect

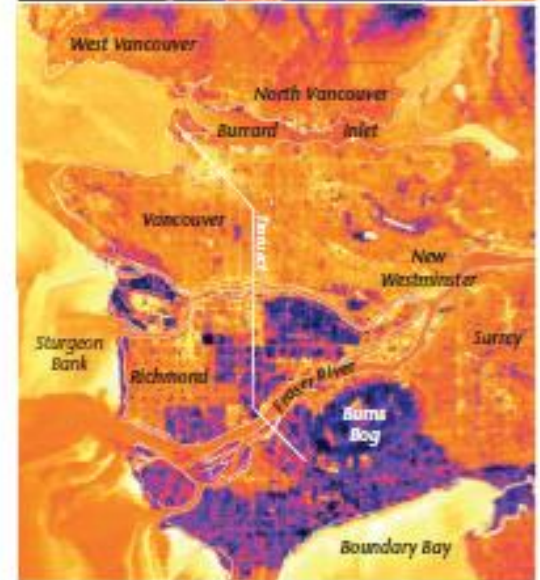
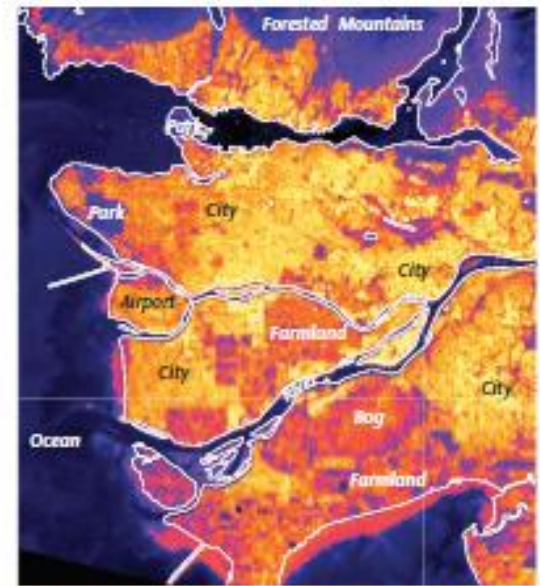
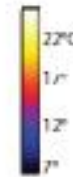


(a) Day
Sept 3 2010
12:24 PDT



5 km

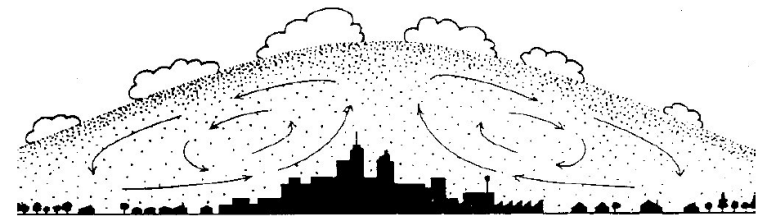
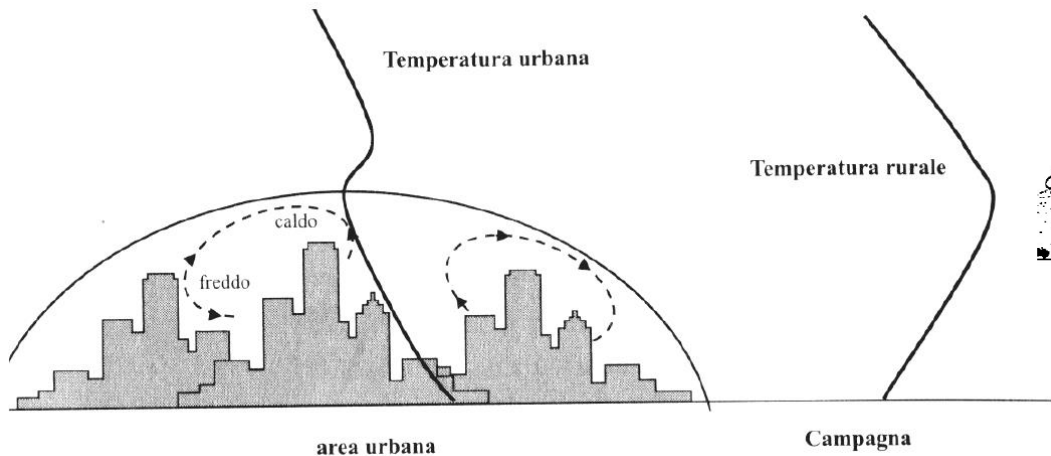
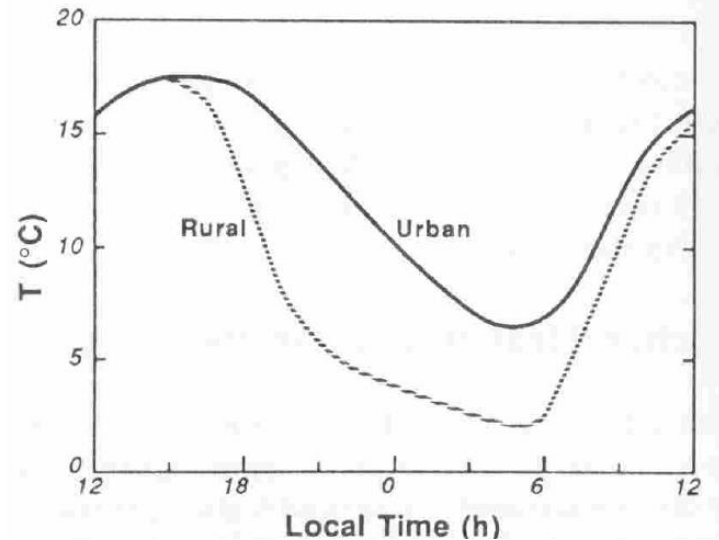
(b) Night
Jul 15 2008
23:10 PDT



Urban Heat Island effect

Mentre di giorno le differenze di temperatura tra città e aree rurali circostanti è in genere di 1-2 °C, l'isola di calore risulta più intensa durante la notte (>10 °C nella canopy urbana).

Le differenze termiche tra aree urbane e rurali si traducono in diverse caratteristiche di turbolenza.

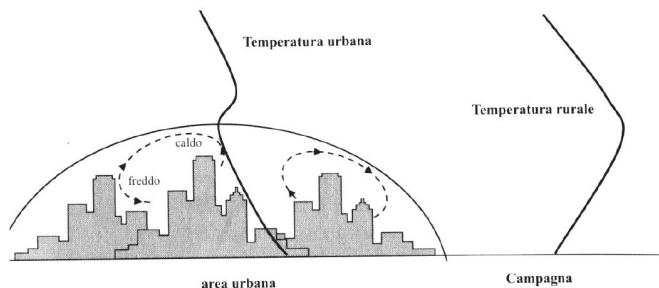


Circolazioni indotte dall'isola di calore.

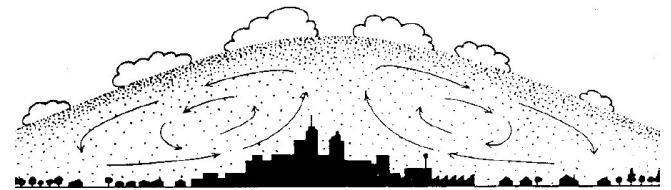
Profili termici notturni nell'isola di calore urbana e nell'area rurale circostante.

Urban Heat Island effect

- La presenza di uno strato turbolento rimescolato notturno diluisce le emissioni inquinanti locali distribuendole in tutta l'area urbana, ma può così favorire le reazioni chimiche che danno luogo alla formazione di inquinanti e particolato secondari.
- Quando di notte il pennacchio emesso dal camino di un'industria raggiunge lo strato turbolento della città, rapidamente i fumi, che fino a quel momento rimanevano confinati in quota, vengono rimescolati fino alla superficie (fumigazione).
- Le circolazioni indotte dall'isola di calore possono richiamare dalla campagna aria più pulita, ma possono anche far convergere verso il centro l'aria inquinata di aree industriali o arterie stradali periferiche.

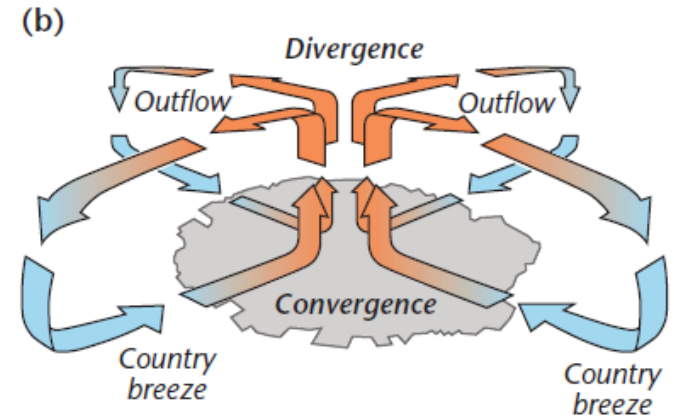
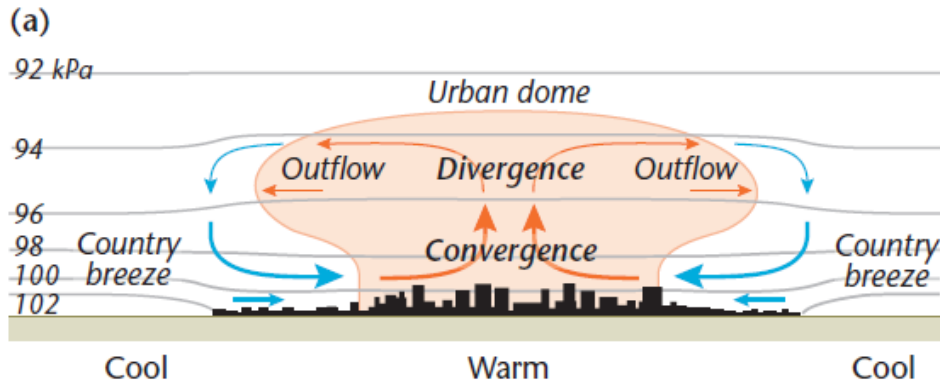


Profili termici notturni nell'isola di calore urbana e nell'area rurale circostante.



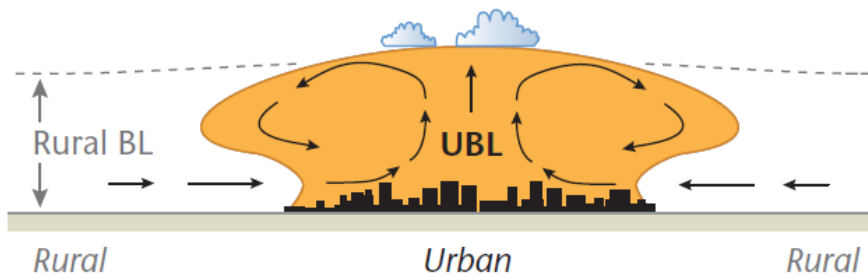
Circolazioni indotte dall'isola di calore.

Urban Heat Island circulation



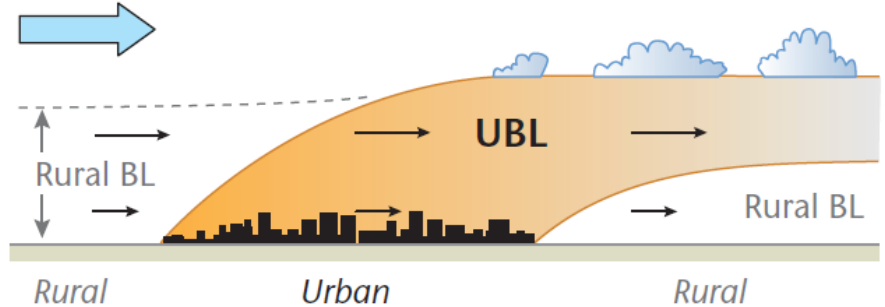
(a) Urban 'dome'

No ambient wind

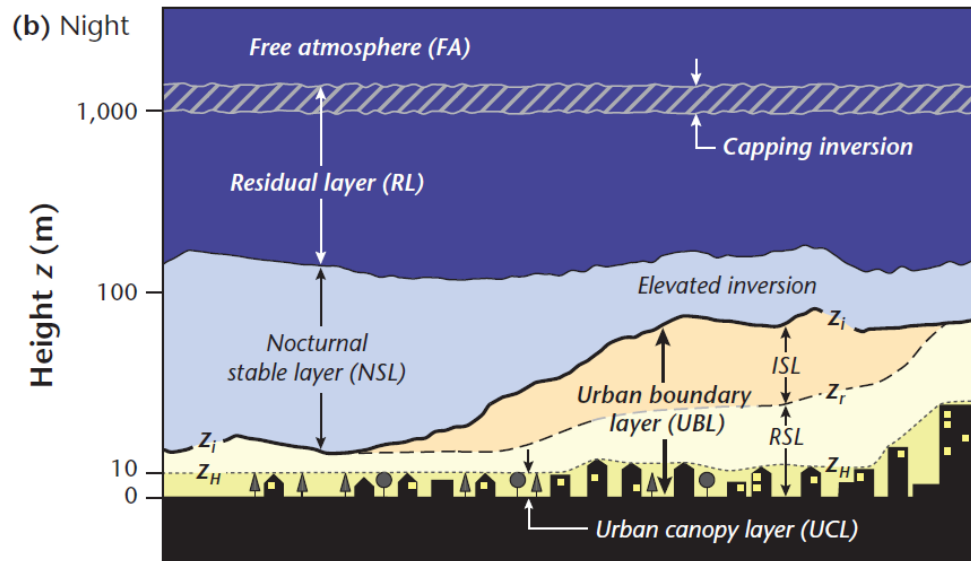
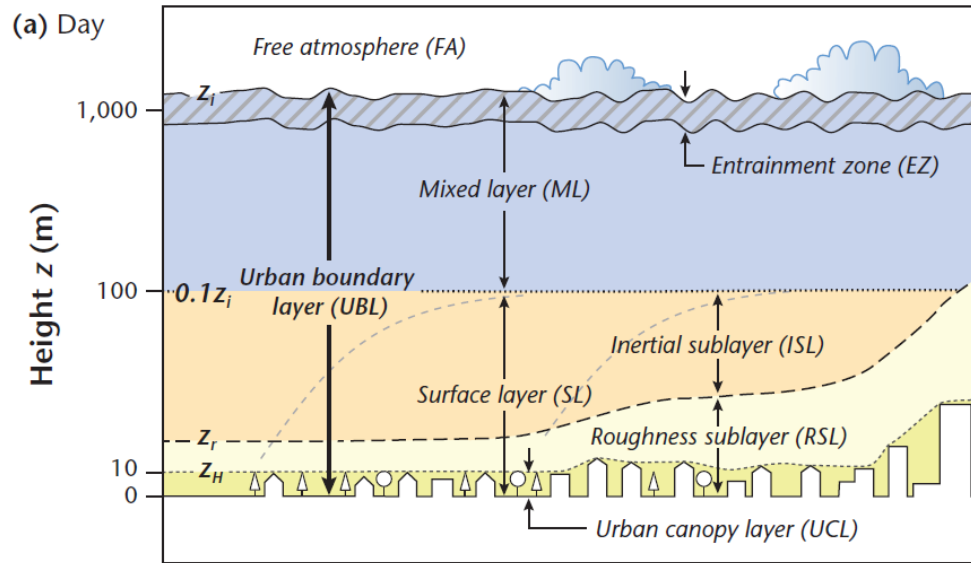


(b) Urban 'plume'

Ambient wind



Urban Boundary Layer (UBL)



RIMOZIONE DI INQUINANTI ATMOSFERICI



Processi di rimozione

La maggior parte degli inquinanti atmosferici gassosi viene rimossa dall'atmosfera tramite:

- ✓ trasformazione chimica
- ✓ deposizione secca
- ✓ deposizione umida

Processi di deposizione

La deposizione degli inquinanti è uno dei più importanti meccanismi di **autodepurazione** di cui dispone il PBL.

Il fenomeno di deposizione produce un **flusso verticale negativo** (verso il basso) di inquinante in corrispondenza dell'interfaccia aria-suolo (e di ciò che gli sta sopra).

Se il processo di deposizione ha luogo in assenza di precipitazioni, l'inquinante, venendo a contatto con gli elementi presenti al suolo (suolo nudo, vegetazione, specchi d'acqua, ecc), innesca una complessa serie di fenomeni chimico-fisici e biochimici che da un lato impoveriscono l'aria ma dall'altra alterano la vegetazione, la composizione dei suoli e delle acque superficiali.

Quando sono presenti precipitazioni, il fenomeno diventa più complesso. L'inquinante viene catturato dalle acque meteoriche, con esse può interagire chimicamente e da esse viene convogliato al suolo interagendo con tutto ciò che si trova sopra la superficie terrestre.

Deposizione secca

= insieme di tutti quei processi di varia natura (micrometeorologica, chimica, biochimica, biologica, ecc) che, senza coinvolgere l'acqua presente in atmosfera, determinano un flusso non nullo e negativo (verso il basso) di inquinante all'interfaccia aria-suolo.

Anche se in termini assoluti il flusso di inquinante al suolo derivante da questo processo è relativamente limitato, la sua costante presenza ne fa un elemento estremamente efficace per l'autodepurazione dell'atmosfera.

Deposizione secca

L'entità della deposizione secca di un inquinante è influenzata da vari fattori:

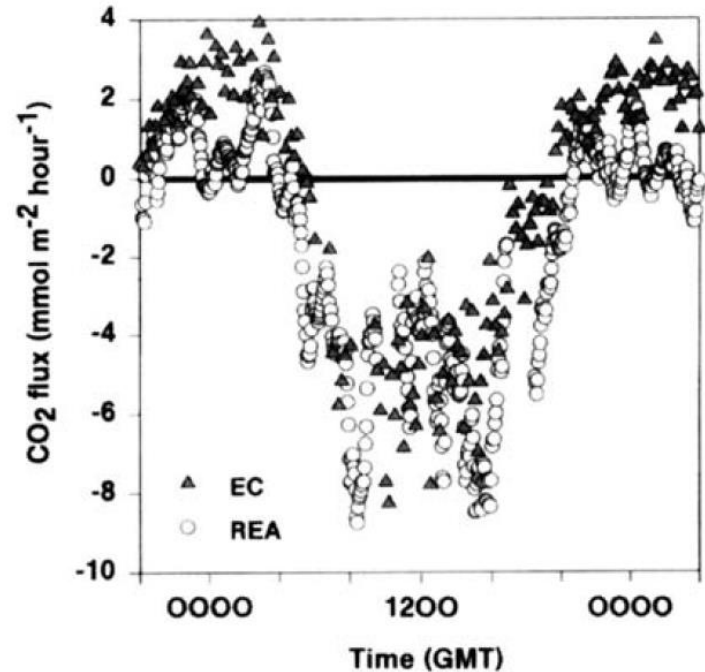
- livello di turbolenza dello strato di PBL più vicino alla superficie terrestre;
- proprietà chimico-fisiche dell'inquinante;
- natura della superficie

Deposizione secca

Il processo di deposizione secca è governato dal gradiente di concentrazione tra atmosfera e superficie terrestre.

3 processi contribuiscono al movimento del gas secondo il gradiente:

1. Diffusione turbolenta che porta il gas vicino alla superficie (entro pochi mm)
2. Diffusione molecolare che porta il gas attraverso il boundary layer laminare adiacente alla superficie
3. Interazione con la superficie (molecole di gas devono aderire, disciogliersi o reagire con la superficie)



Deposizione secca

Il processo di deposizione secca si compone di 3 stadi successivi:

1. **STADIO AERODINAMICO:** trasporto dell'inquinante entro il SL a causa della turbolenza atmosferica (diffusione turbolenta)
2. **STADIO SUPERFICIALE:** diffusione dell'inquinante entro il sottile strato d'aria (circa 1 mm) che sovrasta l'interfaccia aria-suolo (quasi-laminar sublayer) (diffusione molecolare)
3. **STADIO DI TRASFERIMENTO SUPERFICIALE:** trasferimento al suolo dell'inquinante.

Deposizione umida

= tutti quei processi di autodepurazione dell'aria del PBL dovuti all'interazione degli inquinanti con l'acqua in fase liquida o solida presente entro il PBL.

La presenza di precipitazioni meteoriche esalta i processi di deposizione (il flusso di inquinante è di circa 2 ordini di grandezza superiore rispetto a quanto osservato nel caso della deposizione secca).

Deposizione umida

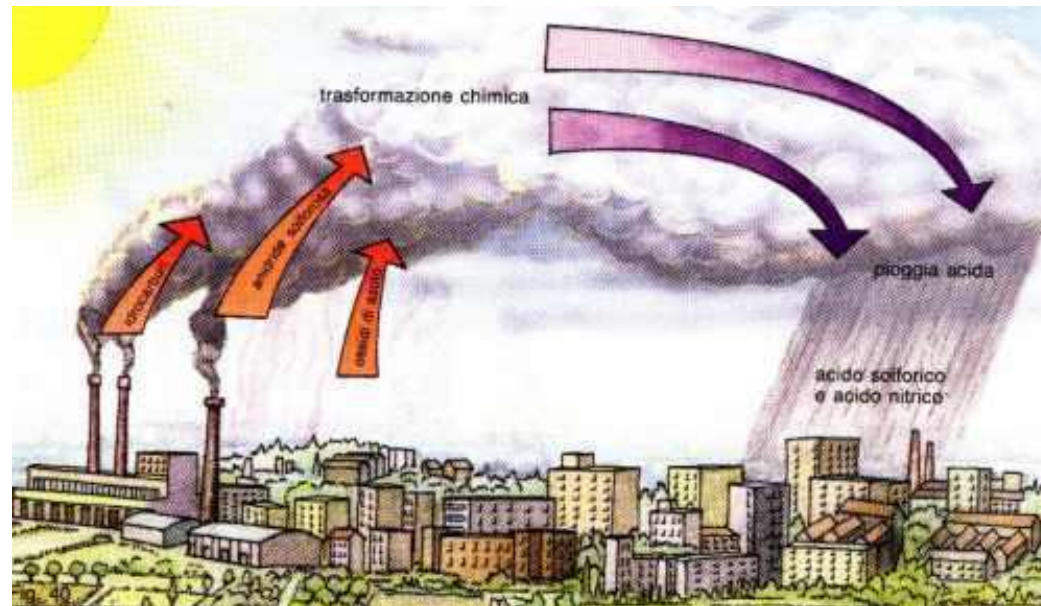
La deposizione umida degli inquinanti atmosferici gassosi consta di due fenomeni principali:

- **RAINOUT:** dilavamento degli inquinanti che, emessi in atmosfera, sono stati catturati direttamente dalle nuvole
- **WASHOUT:** dilavamento degli inquinanti per interazione diretta con le precipitazioni (pioggia, neve, ecc) al di sotto delle nuvole.

Deposizione acida

La deposizione acida può essere definita come qualsiasi forma di deposizione, secca o umida, che coinvolga alti livelli di acido nitrico e acido solforico.

Nel caso di deposizione umida si parla di **pioggia acida**.



Pioggia acida

La pioggia acida è definita come acqua meteorica con $\text{pH} < 5-6$.

Per $P_{\text{CO}_2} = 10^{-3.5}$ atm, possiamo calcolare il pH dell'acqua meteorica in equilibrio con la CO_2 atmosferica:

$$[\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}] = K_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2} = 10^{-1.47} \times 10^{-3.5} = 10^{-4.97} \quad K_{\text{CO}_2} = \text{Costante di Henry a } 25^\circ\text{C}$$

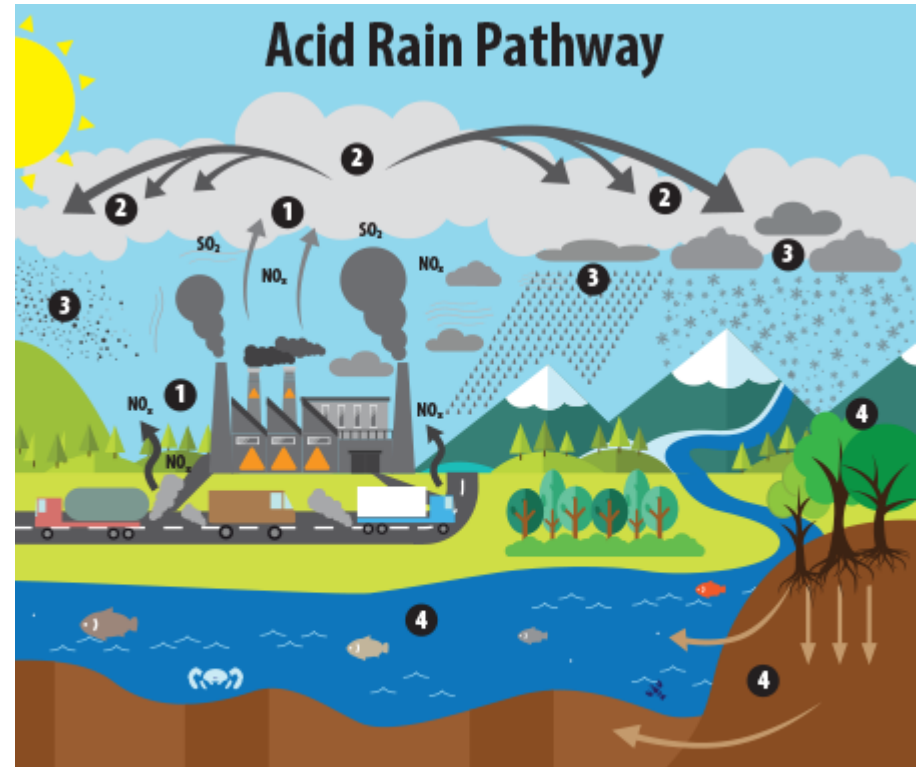
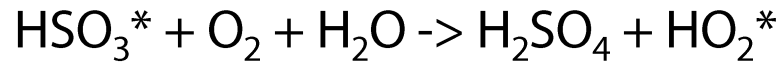
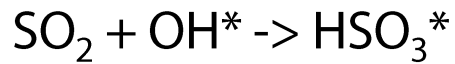
$$[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-] = [\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}] \times K_{\text{a}1} = 10^{-4.97} \times 10^{-6.35} = 10^{-11.32} \quad K_{\text{a}1} = \text{Costante di dissociazione di } \text{H}_2\text{CO}_3 \text{ a } 25^\circ\text{C}$$

Assumendo $[\text{H}^+] = [\text{HCO}_3^-]$, $[\text{H}^+] = 10^{-5.66}$ e quindi $\text{pH} = -\log[\text{H}^+] = 5.66$



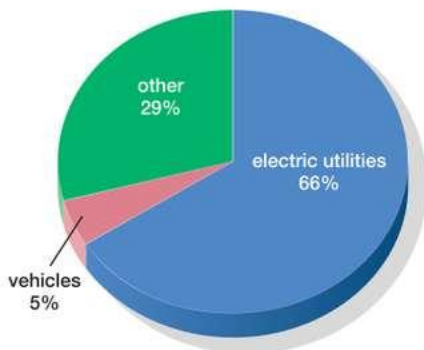
Pioggia acida

Le piogge sono il risultato della deposizione umida di SO_2 e NO_x

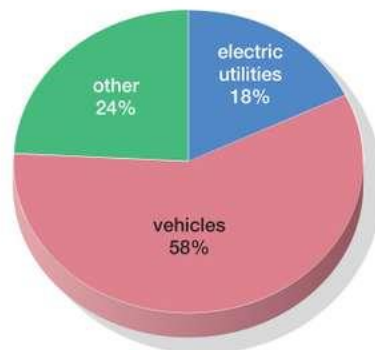


This image illustrates the pathway for acid rain in our environment: (1) Emissions of SO_2 and NO_x are released into the air, where (2) the pollutants are transformed into acid particles that may be transported long distances. (3) These acid particles then fall to the earth as wet and dry deposition (dust, rain, snow, etc.) and (4) may cause harmful effects on soil, forests, streams and lakes.

SO_2 10.4 million metric tons



NO_x 14.8 million metric tons



Effetti sugli ecosistemi

Ecosistemi acquatici:

- diminuzione pH
- mobilizzazione metalli (es. Al)
- conversione di mercurio elementare in metilmercurio
- eutrofizzazione

Ecosistemi terrestri:

- diminuzione del pH del suolo
- alterazione della chimica del suolo
- mobilizzazione metalli (es. Al)
- effetti diretti sulle piante
- compromissione di processi biologici (es. azotofissazione)

Ecosistemi antropici:

- corrosione di edifici, monumenti e opere d'arte (marmo, pietra calcarea)

