

What is the level of my exposure to these emissions? Is my family safe? Where is safe? How about the adverse impact on the environment (plants, animals, buildings)? How to predict the impact of emissions resulting from population growth?

Air Quality Models (US - EPA, Environmental Protection Agency)

Air quality models use mathematical and numerical techniques to simulate the physical and chemical processes that affect air pollutants as they disperse and react in the atmosphere.

Based on:

inputs of meteorological data

source information (emission rates and stack height)

➡ designed to characterize primary pollutants that are emitted directly into the atmosphere and, in some cases, secondary pollutants that are formed as a result of complex chemical reactions within the atmosphere.

Widely used by agencies tasked with controlling air pollution to both identify **source contributions** to air quality problems and **assist in the design** of effective strategies to reduce harmful air pollutants.

Air Quality Models (US - EPA, Environmental Protection Agency)

Air quality models can be used:

- during the permitting process to verify that a new source will not exceed ambient air quality standards or, if necessary, determine appropriate additional control requirements;
- to predict future pollutant concentrations from multiple sources after the implementation of a new regulatory program, in order to estimate the effectiveness of the program in reducing harmful exposures to humans and the environment.

Modelli di qualità dell'aria

<http://www.arpalazio.net/main/aria/didattica/>

<https://www.epa.gov/scram/air-quality-models>

Air Quality Models (US - EPA, Environmental Protection Agency)

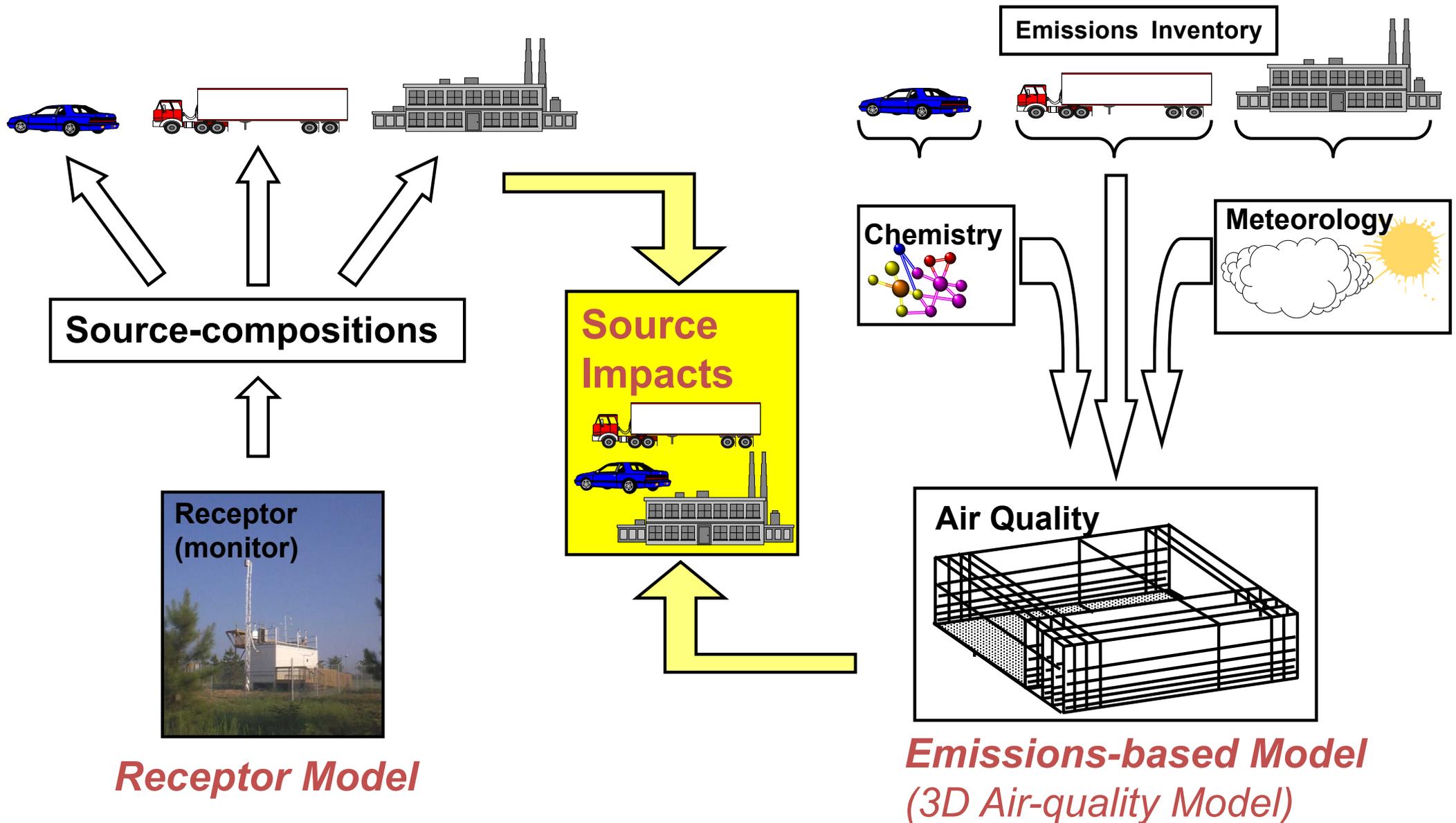
The most commonly used air quality models include the following:

Dispersion Modeling - These models are typically used in the permitting process to estimate the concentration of pollutants at specified ground-level receptors surrounding an emissions source.

Photochemical Modeling - These models are typically used in regulatory or policy assessments to simulate the impacts from all sources by estimating pollutant concentrations and deposition of both inert and chemically reactive pollutants over large spatial scales.

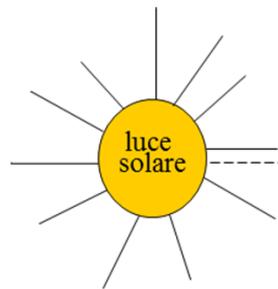
Receptor Modeling - These models are observational techniques which use the chemical and physical characteristics of gases and particles measured at source and receptor to both identify the presence of and to quantify source contributions to receptor concentrations.

Receptor vs. Emissions-Based Models



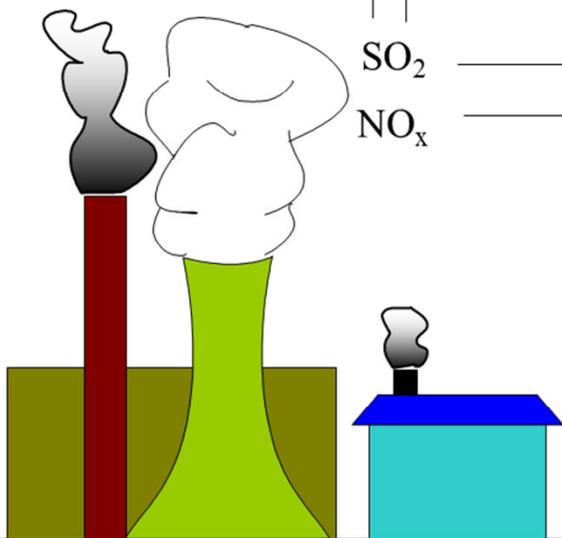
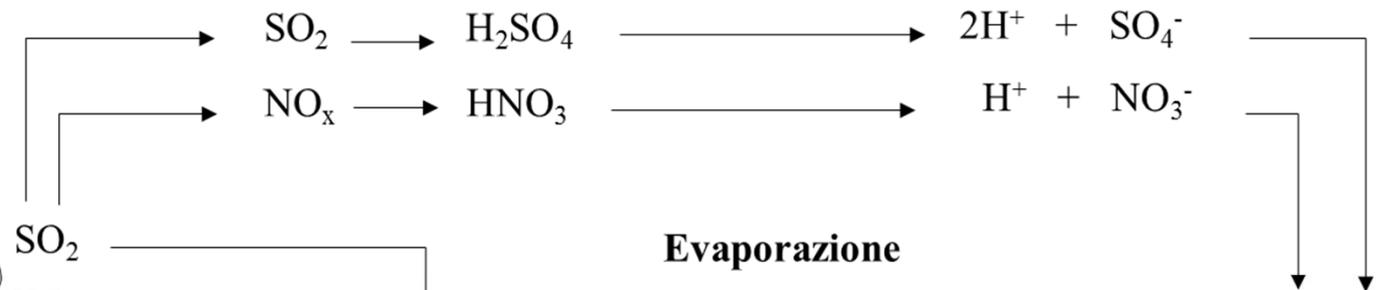
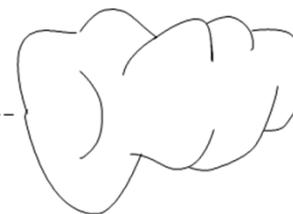
Receptor Model

*Emissions-based Model
(3D Air-quality Model)*



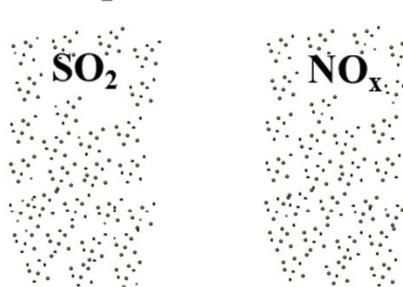
O₃
Ossidazione

H₂O
Dissoluzione



Sorgenti di emissioni

Deposizione secca



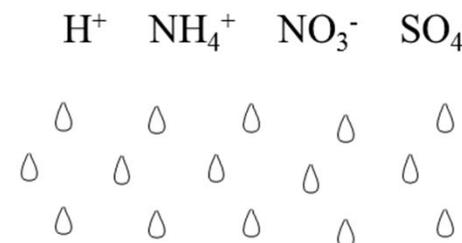
Evaporazione

Risospensione polvere



strato di polvere

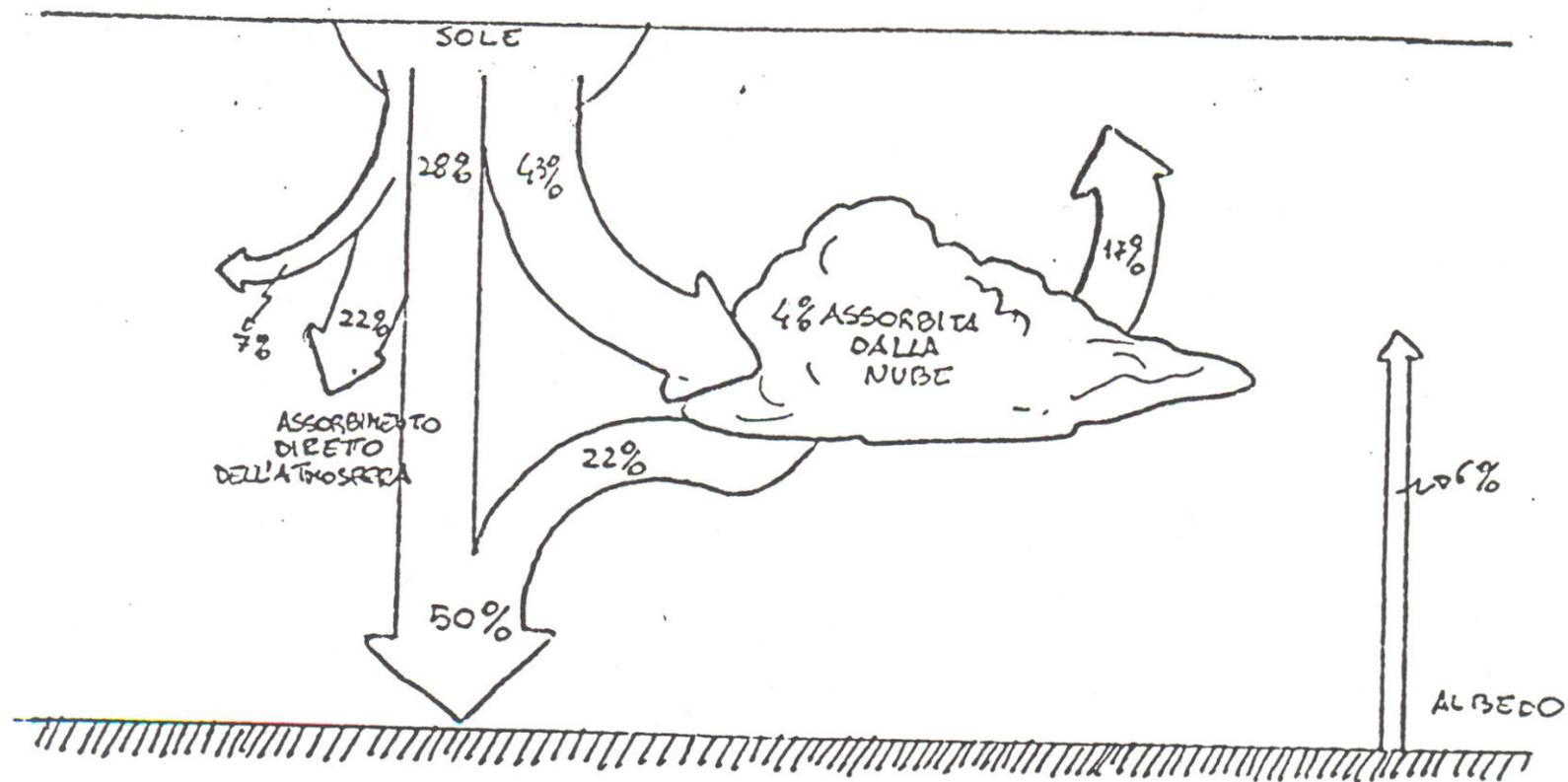
Deposizione umida



Reazioni al suolo con la luce

Run-off

Ripartizione della radiazione solare

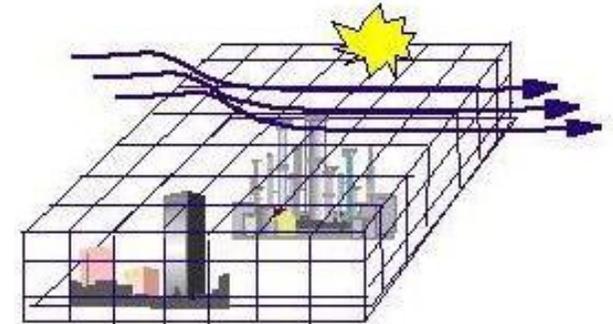


Classifications of AQ Models

- Developed for a number of pollutant types and time periods
 - **Short-term** models – for a few hours to a few days; worst case episode conditions
 - **Long-term** models – to predict seasonal or annual average concentrations; health effects due to exposure
- Classified by
 - **Non-reactive** models – pollutants such as SO₂ and CO
 - **Reactive** models – pollutants such as O₃, NO₂, etc.

AQ Models

- Classified by coordinate system used
 - **Grid-based**
 - Region divided into an array of cells
 - Used to determine compliance with National Ambient Air Quality Standards
 - **Trajectory**
 - Follow plume as it moves downwind



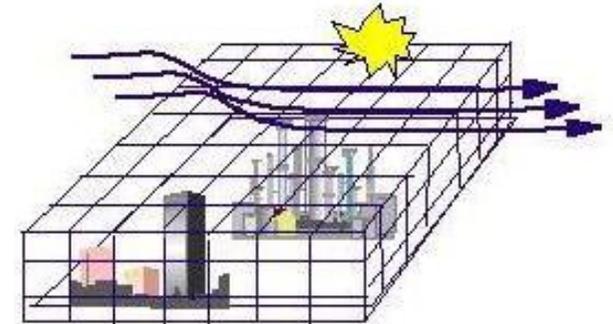
<http://www.epa.gov/scram001/images/grid4.jpg>



<http://www.epa.gov/scram001/images/smokestacks.jpg>

AQ Models

- Classified by level of sophistication
 - **Screening**: simple estimation use preset, worst-case meteorological conditions to provide conservative estimates.
 - **Refined**: more detailed treatment of physical and chemical atmospheric processes; require more detailed and precise input data.



<http://www.epa.gov/scram001/images/grid4.jpg>

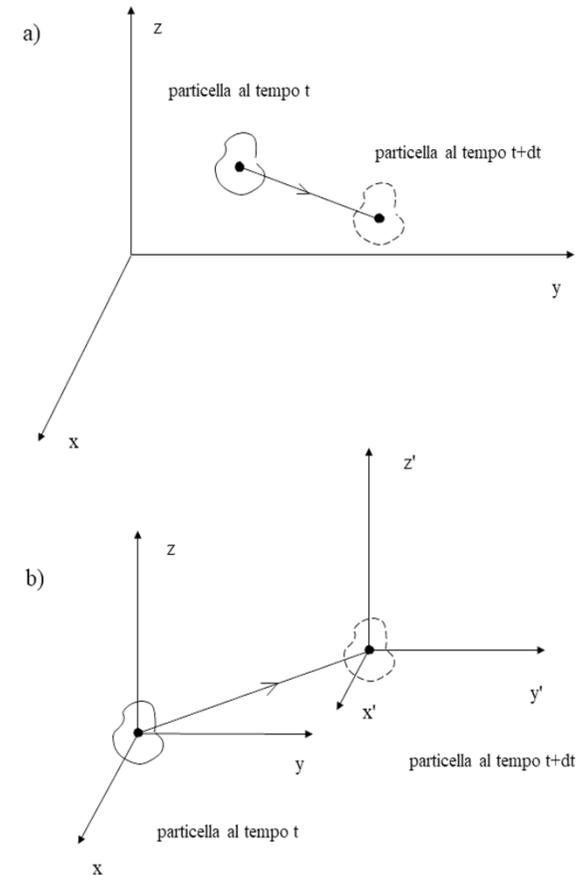


<http://www.epa.gov/scram001/images/smokestacks.jpg>

Si possono fare 2 scelte:

- i) adottare un approccio di tipo Euleriano, nel quale si ha un sistema di riferimento fisso al suolo
- ii) adottare un approccio di tipo Lagrangiano, nel quale si segue la particella di inquinante in balia del moto delle masse d'aria e si prende come sistema di riferimento principale quello che segue i moti dell'atmosfera.

I modelli che si basano sull'approccio Euleriano sono quelli che fanno uso delle principali equazioni della fluidodinamica. Le due tipologie principali sono i modelli Gaussiani Plume e Gaussiani Puff. Quest'ultimi in realtà costituiscono una 'classe' intermedia tra questo tipo di modelli e quelli che si basano su un approccio Lagrangiano, cioè i modelli a particelle, di più recente concezione e più adatti per simulare i moti in un fluido turbolento.



IL MODELLO GAUSSIANO PLUME

Il modello Gaussiano Plume è il modello di dispersione di inquinanti in atmosfera più semplice e più usato. Esso venne formulato per la prima volta nel 1953 da Sutton che, adottando diverse ipotesi restrittive, ottenne una soluzione analitica formale dell'equazione di diffusione ricavata dalla legge di Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(C \cdot u)}{\partial x} - \frac{\partial(C \cdot v)}{\partial y} - \frac{\partial(C \cdot w)}{\partial z} + D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + q + R$$

C = concentrazione in kg/m³

D = coefficiente di diffusione molecolare

q = termine di sorgente

R = termine di reazione chimica, espressi in kg·m⁻³·s⁻¹

Questa equazione, che in forma vettoriale è scritta:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla(C \cdot \underline{v}) + D \cdot \nabla^2 C + q + R$$

descrive in modo completo i processi ai quali una certa sostanza può andare soggetta una volta immessa in un fluido.

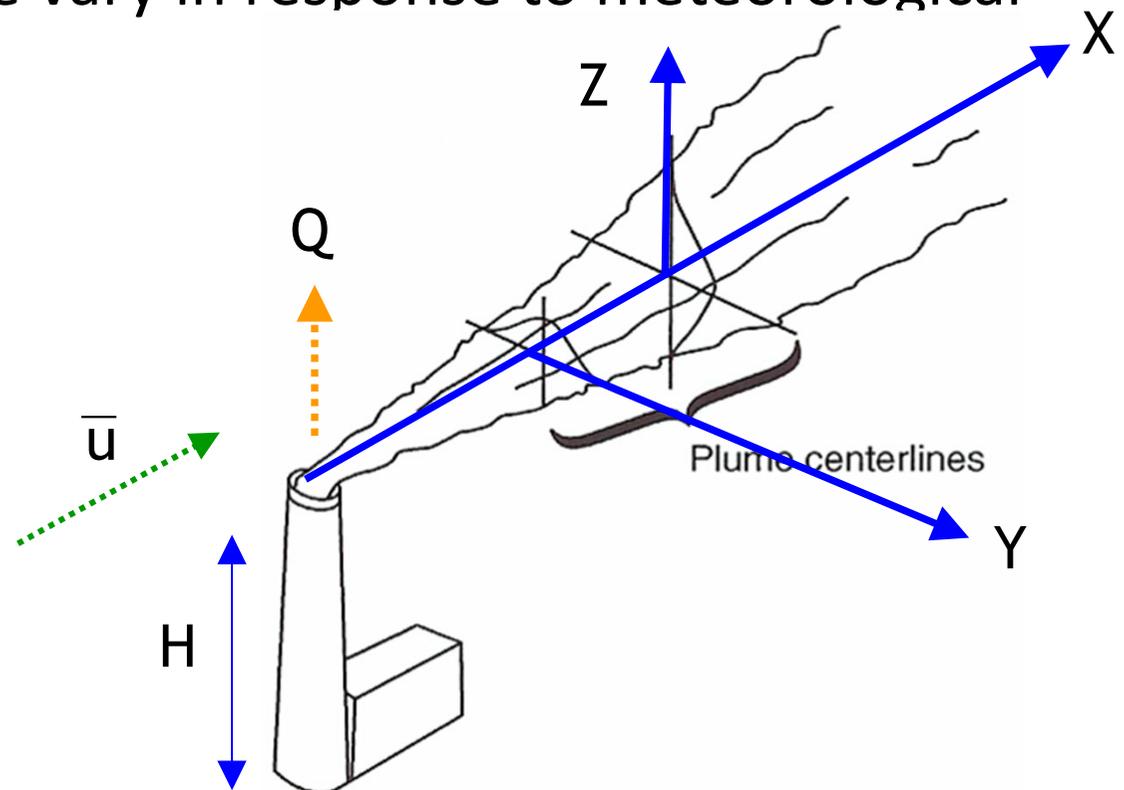
L'equazione non è applicabile in questa forma, in quanto contiene solo valori istantanei (dei quali non possiamo disporre) e perché implicitamente include nel termine di sinistra gli effetti legati alla turbolenza, che introducono caoticità nel sistema.

Operando però una serie di semplificazioni, è possibile ricavare una soluzione; le assunzioni fondamentali sono:

- sorgente puntiforme posta in $(x = 0, y = 0, z = h)$;
- vento medio costante nell'intero dominio di calcolo;
- asse x orientato come il vento medio;
- situazione semistazionaria $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$
- quantità costante Q (g/s) di sostanza immessa dalla sorgente.

Gaussian Dispersion Models

- Most widely used
- Based on the assumption
 - plume spread results primarily by **molecular diffusion**
 - horizontal and vertical pollutant concentrations in the plume are normally distributed (double Gaussian distribution)
- Plume spread and shape vary in response to meteorological conditions



Gaussian Dispersion Equation

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right)\right]$$

Atmospheric Stability Classes

Wind Speed, 10 m (m/sec)	Day			Night	
	Incoming Solar Radiation			Thinly Overcast	
	Strong	Moderate	Slight	>4/8 Cloud	<3/8 Cloud
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	D	E
3-5	B	B-C	C	D	D
>6	C	D	D	D	D

Considerazioni sull'applicabilità reale del modello.

È necessario che:

- il territorio che si sta considerando sia privo di orografia significativa e sia morfologicamente uniforme;
- le sorgenti che emettono inquinanti siano costituite da ciminiere sufficientemente elevate;
- tali sorgenti emettano inquinanti chimicamente non reattivi con continuità;
- le condizioni meteorologiche varino il meno possibile.

Limitazioni restrittive



ma



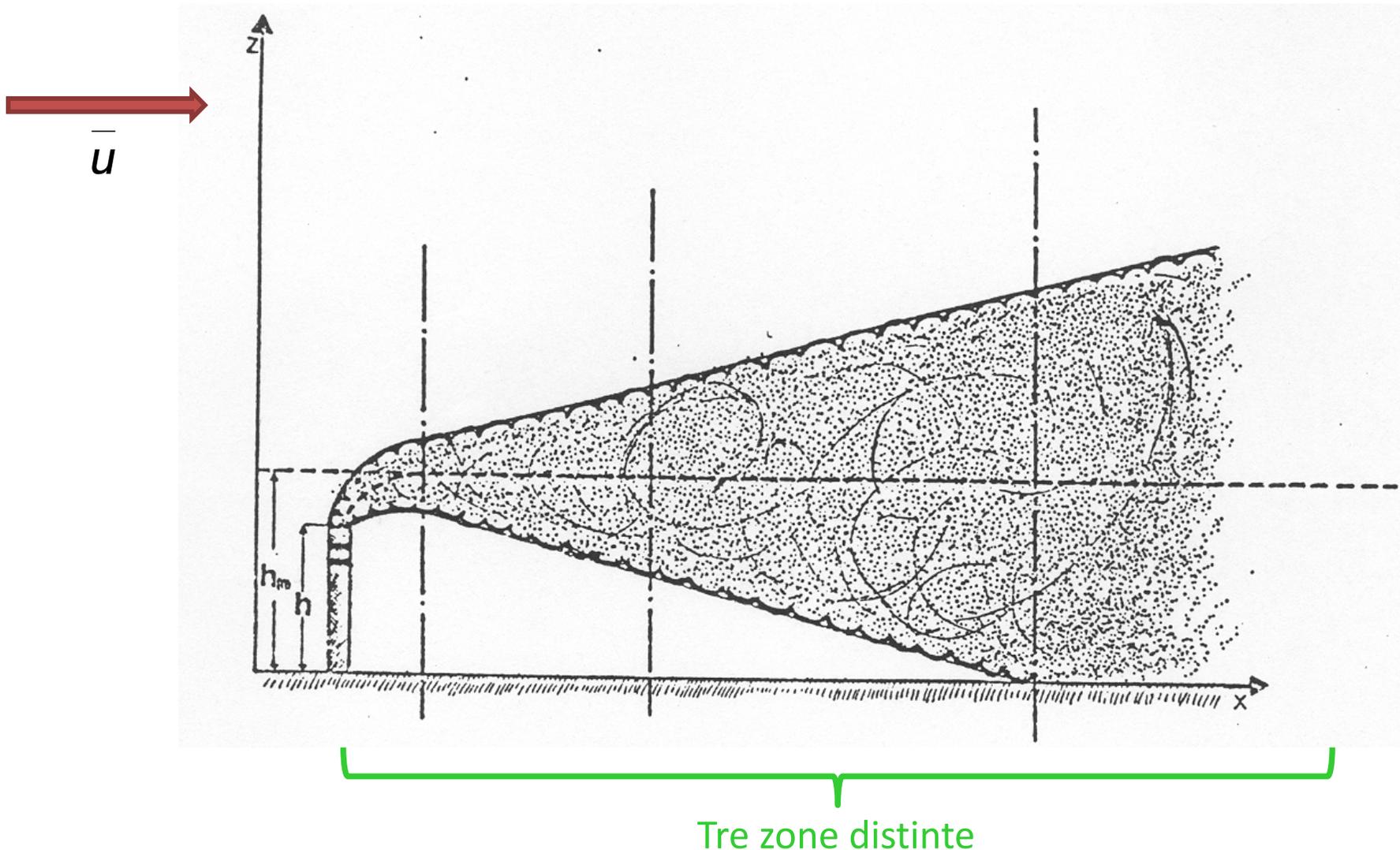
se si accettano, le previsioni possono costituire un utile base conoscitiva per una prima comprensione dei fenomeni in atto.

Approccio Lagrangiano

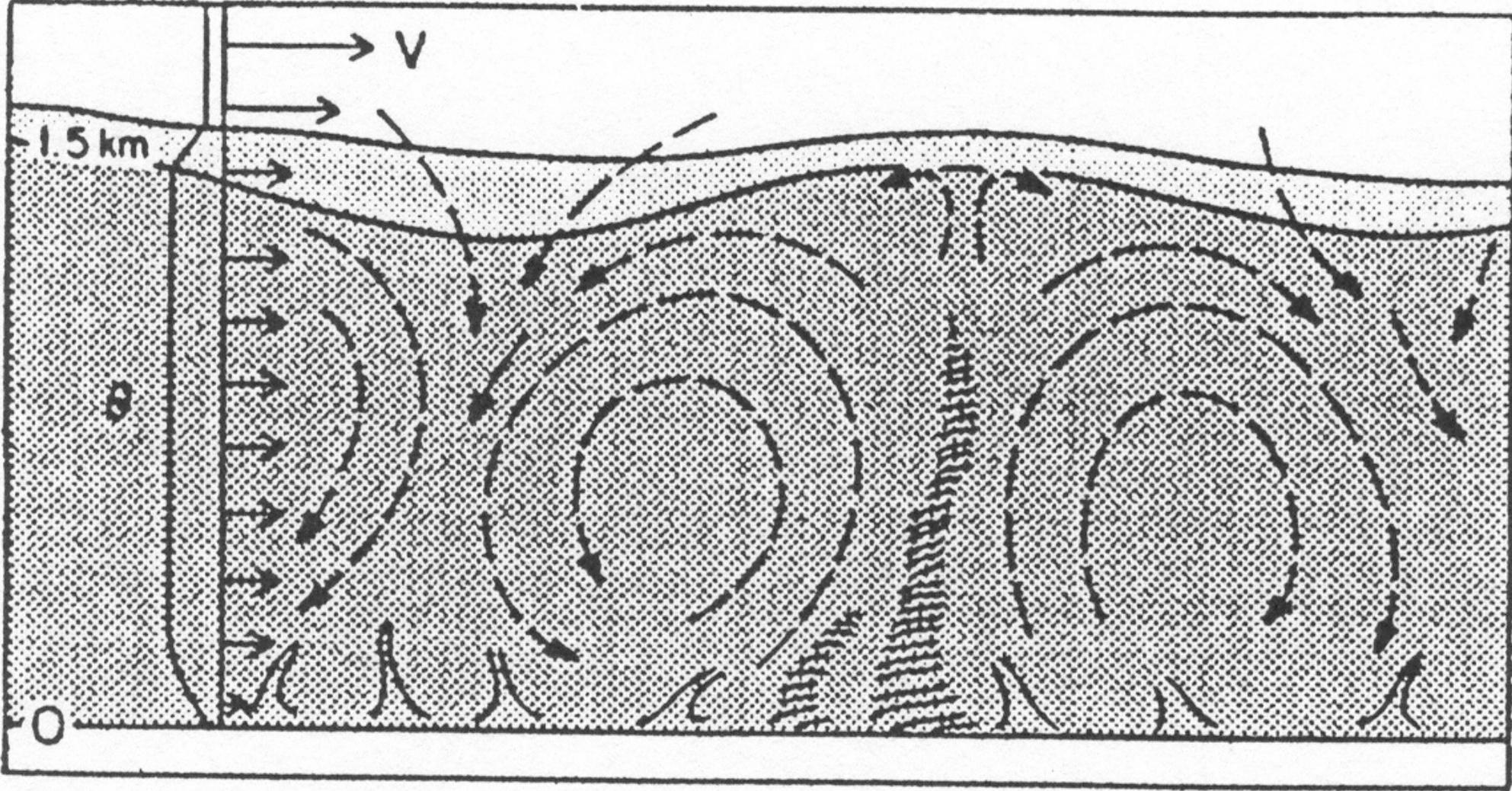
Approccio Euleriano.

Deduzione semiempirica del Modello Gaussiano plume

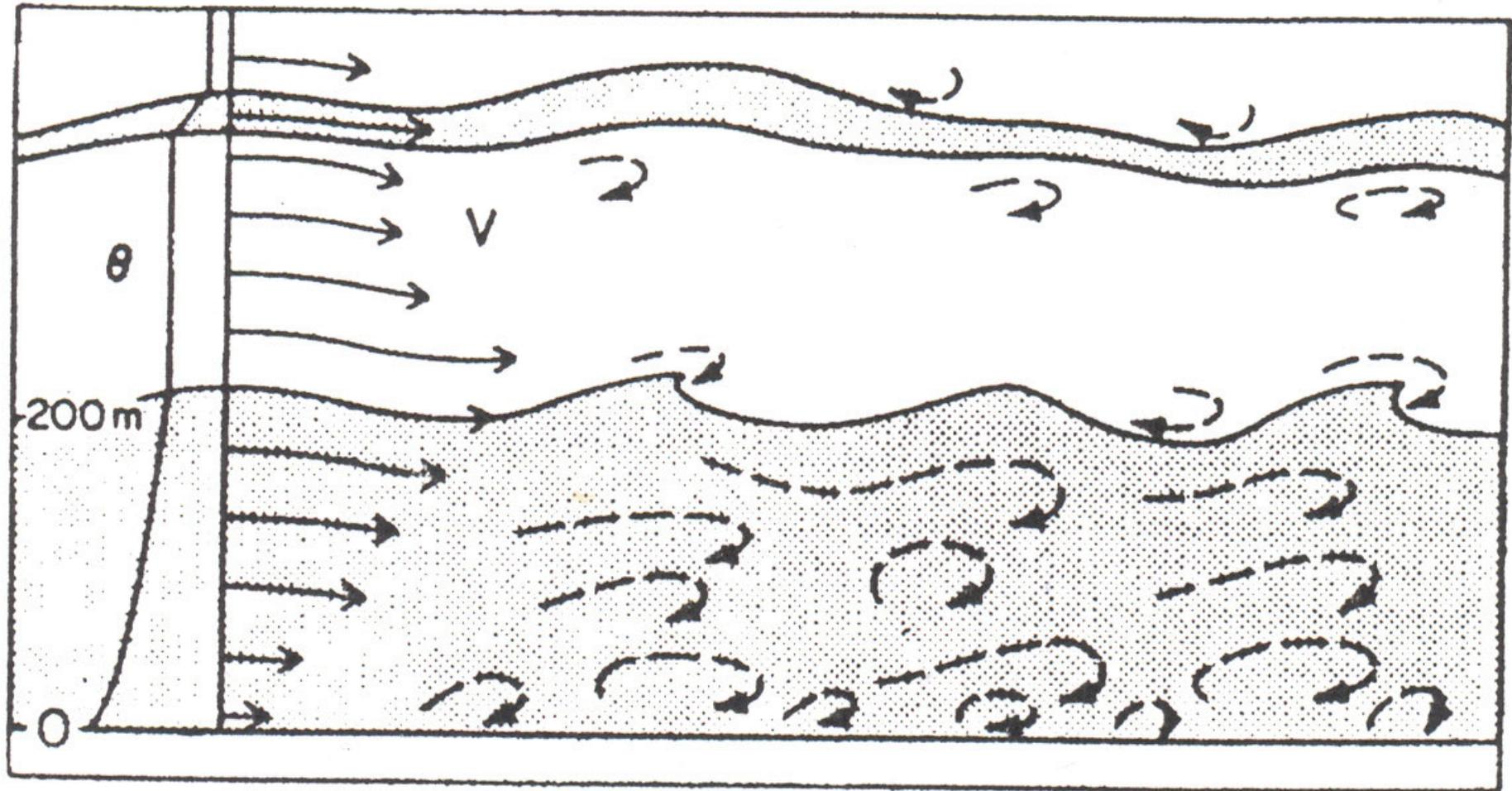
- Ciminiera elevata (~ 100 m)
- terreno pianeggiante e omogeneo
- *Fotografia*: prima mattina o al tramonto, in una giornata con vento abbastanza teso



PBL convettivo (Diurno)



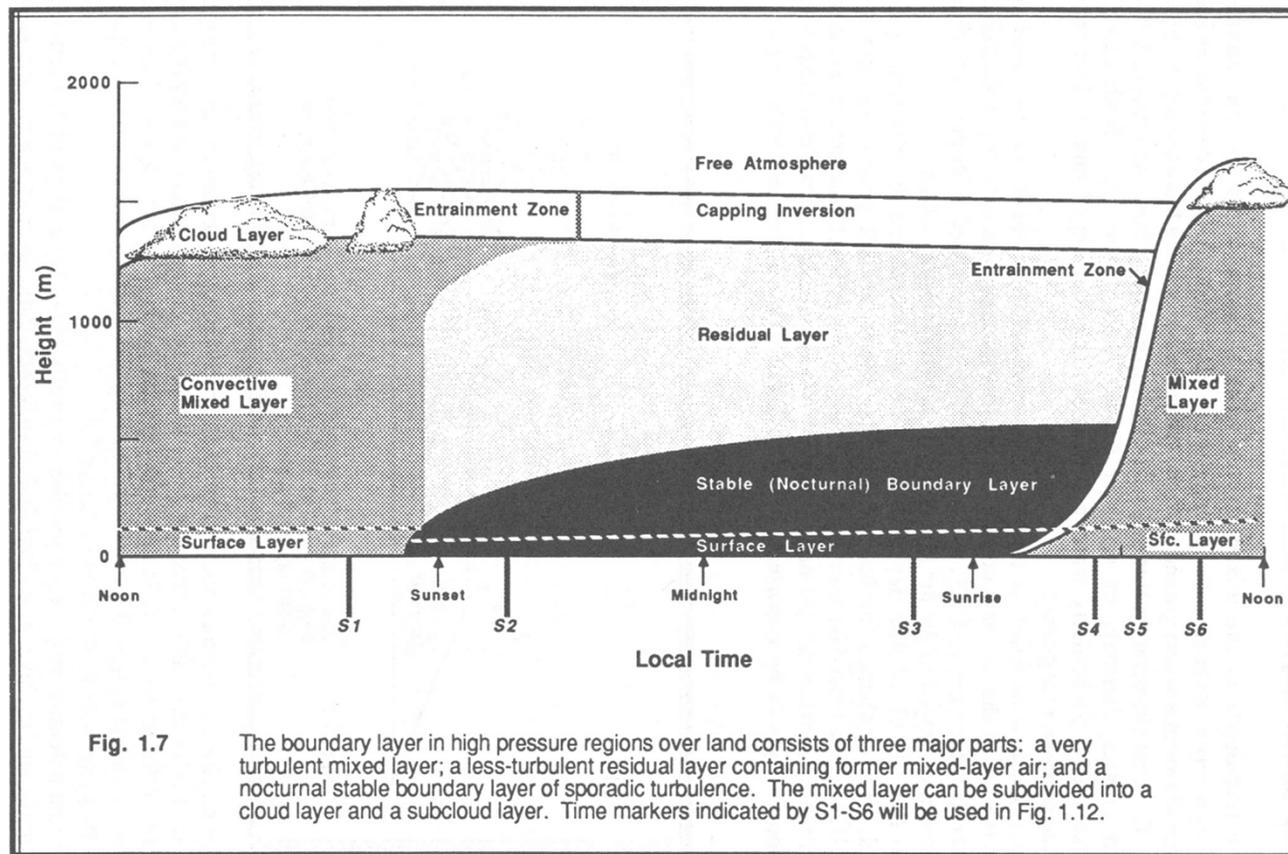
PBL stabile (Notturno)

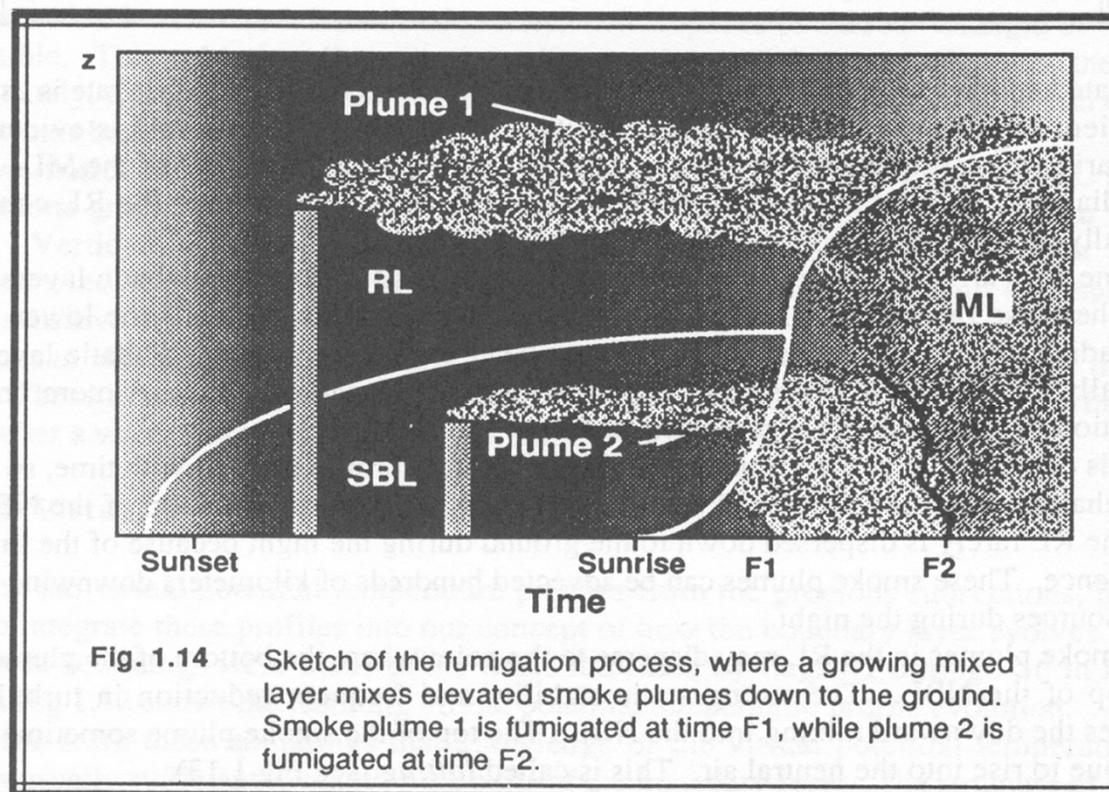
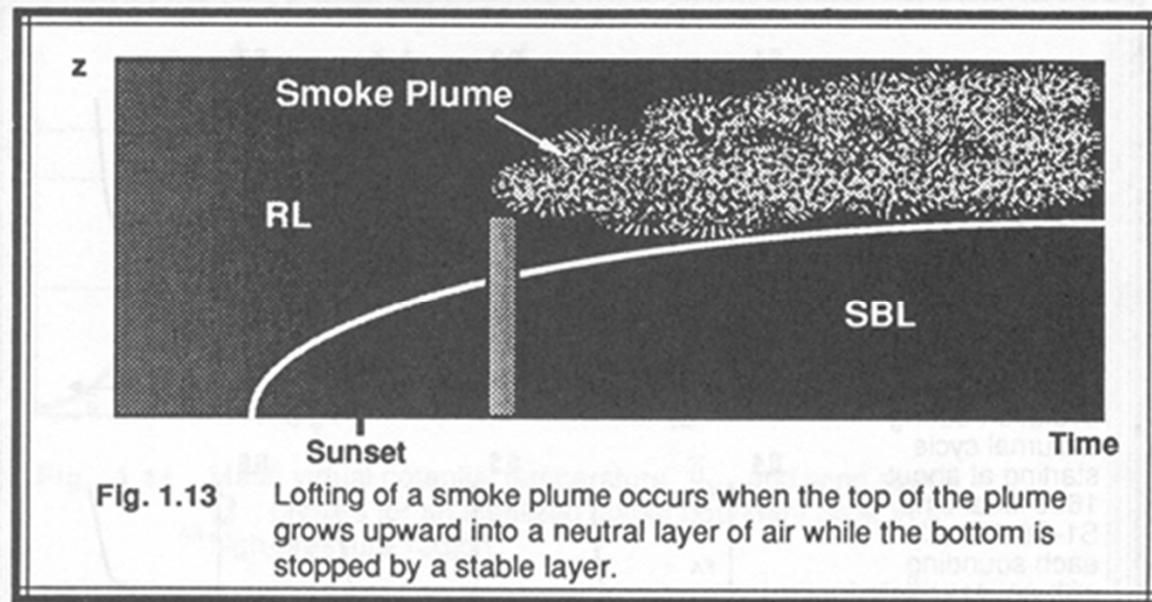


La struttura del PBL.

Sulla terraferma, il PBL ha una struttura ben definita che evolve nell'arco della giornata. Le componenti principali di tale struttura sono:

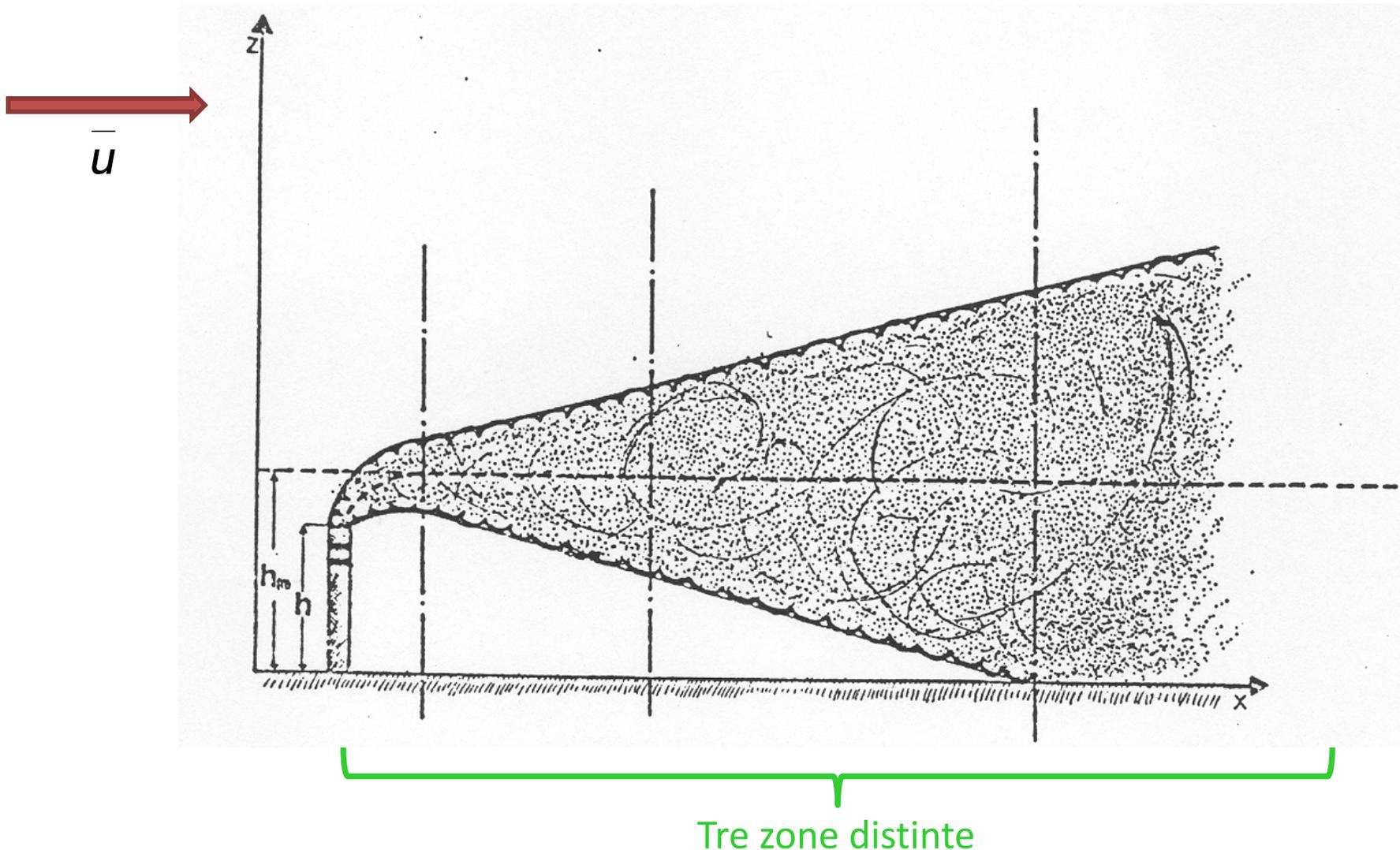
- lo strato superficiale (**Surface Layer SL**)
- lo strato rimescolato (**Mixed Layer ML**)
- lo strato residuo (**Residual Layer RL**)
- lo strato stabile (**Stable Boundary Layer SBL**)

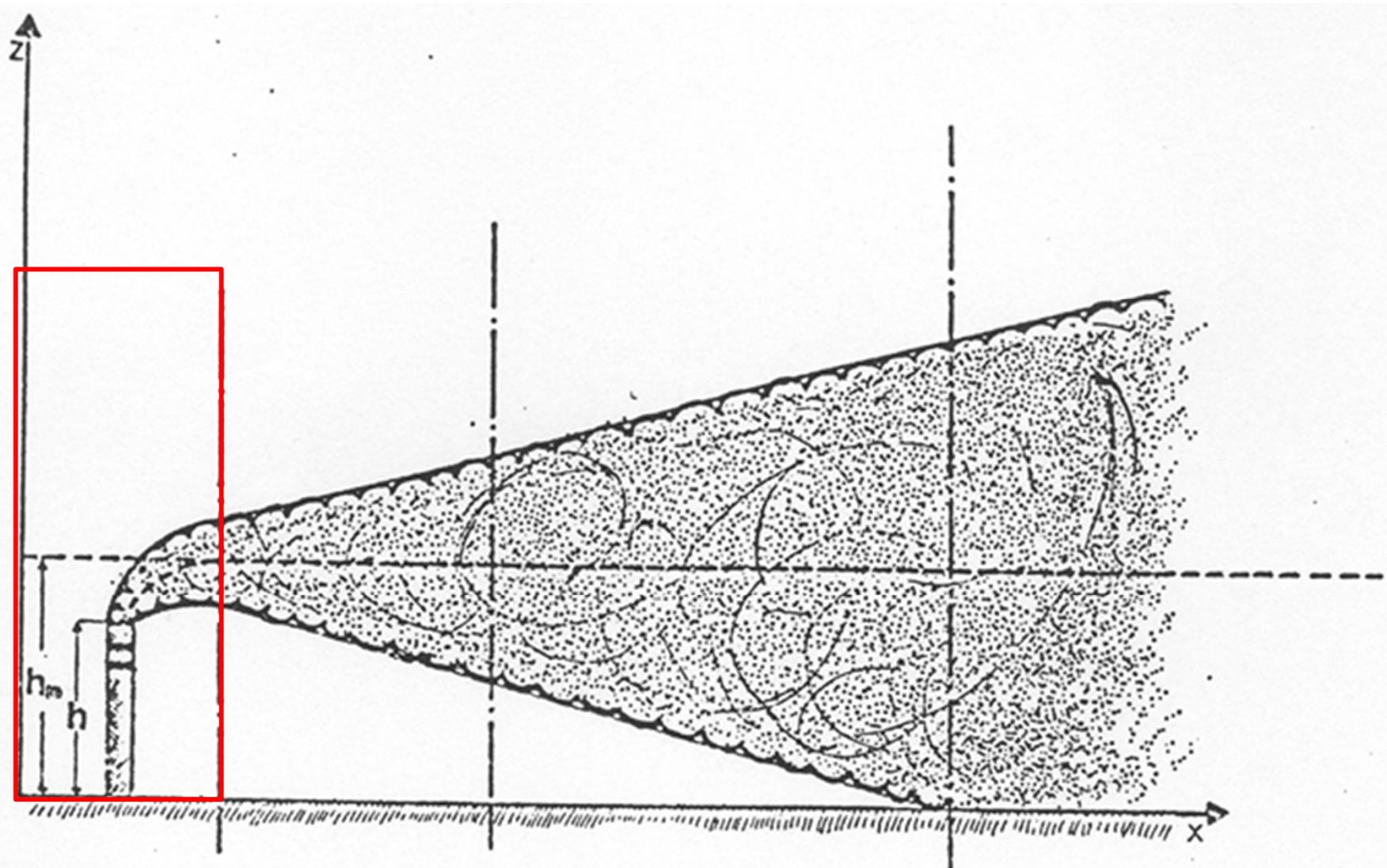




Deduzione semiempirica del Modello Gaussiano plume

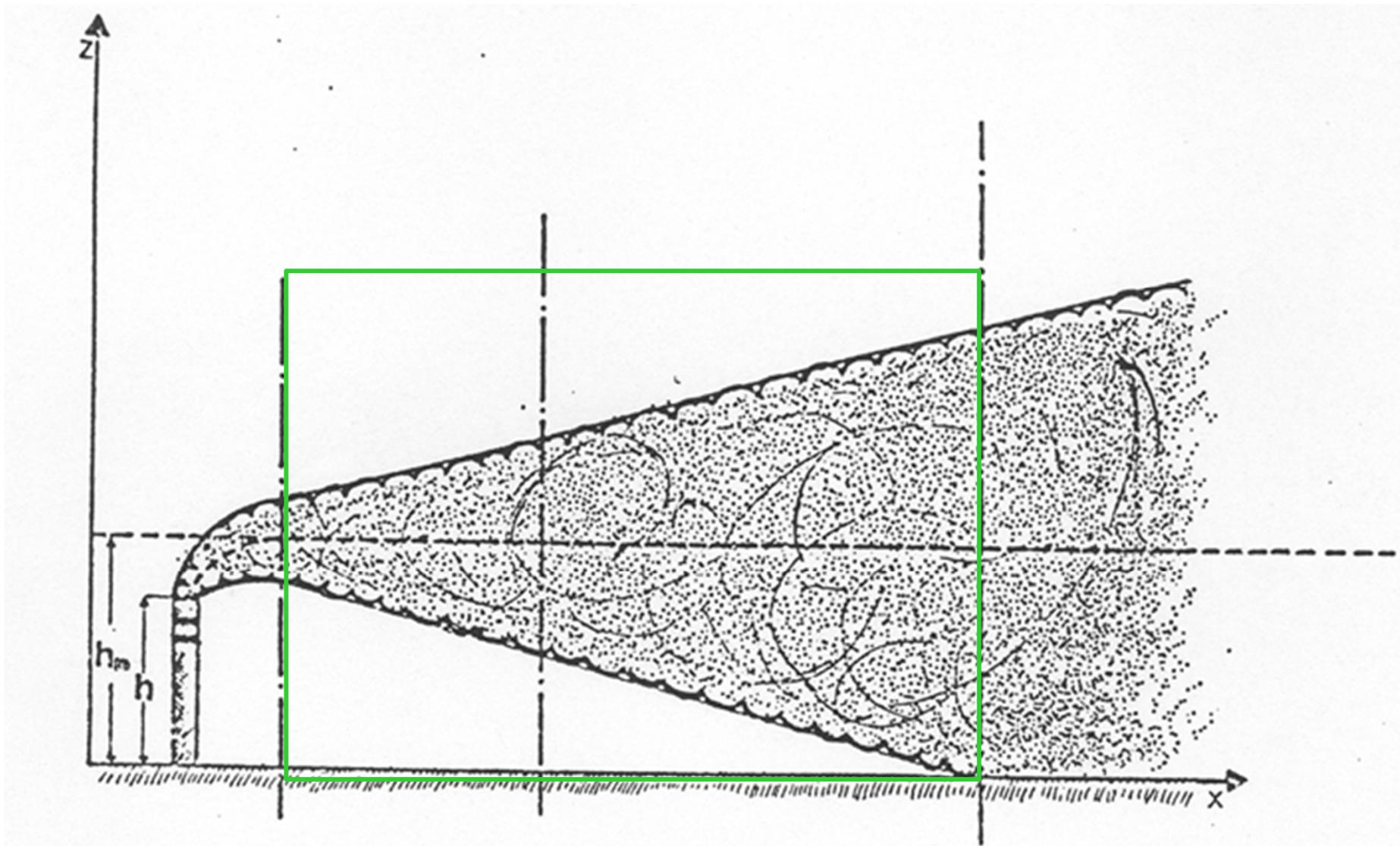
- Ciminiera elevata (~ 100 m)
- terreno pianeggiante e omogeneo
- *Fotografia*: prima mattina o al tramonto, in una giornata con vento abbastanza teso





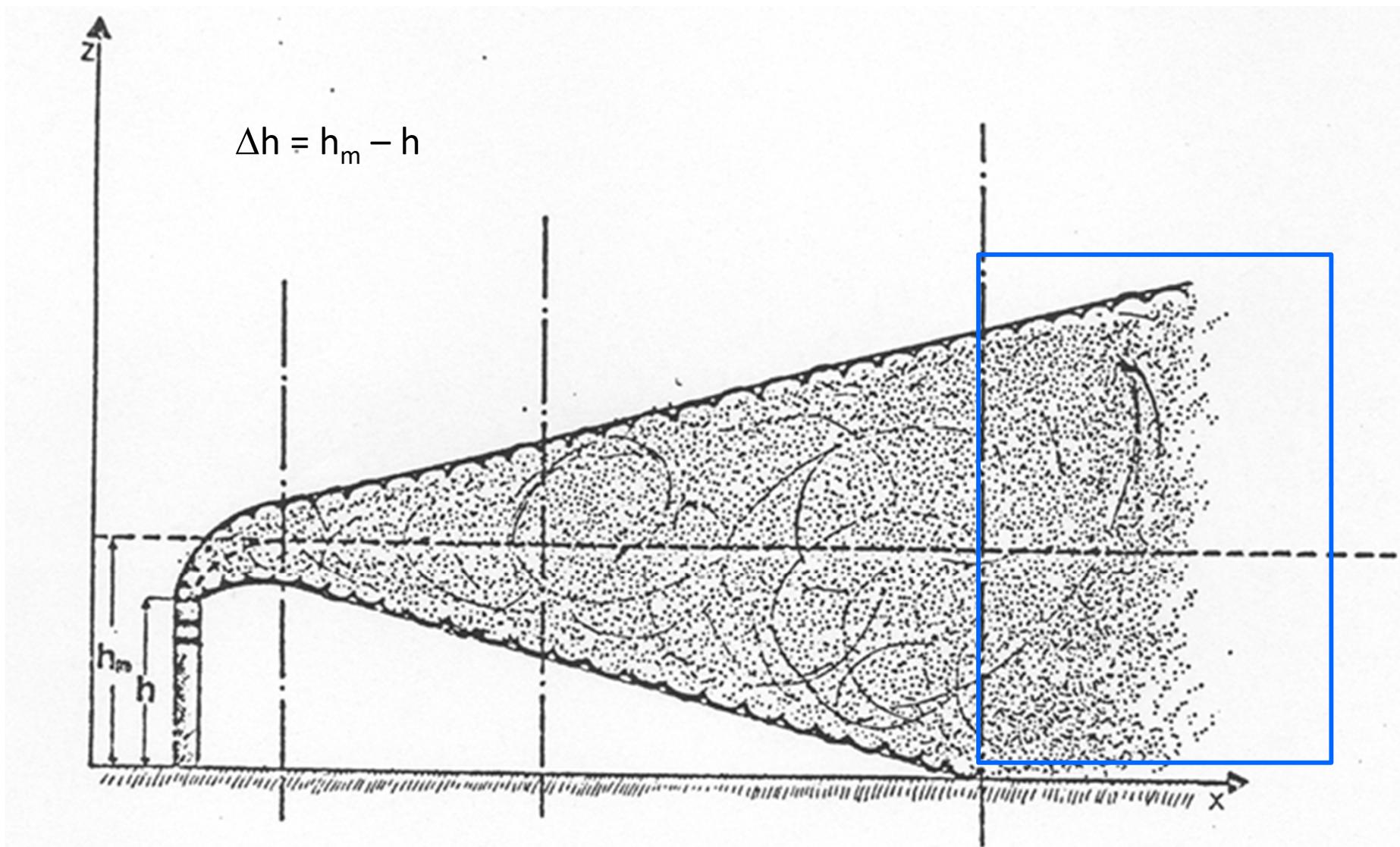
Zona 1 (zona ascensionale)

Il plume di fumo, decisamente denso e quindi facilmente visibile, parte verticale dalla bocca del camino e progressivamente si piega nella direzione sottovento fino a livellare orizzontalmente il proprio baricentro. Questa fase ascensionale termina ad una distanza sottovento molto vicina alla ciminiera (es. 100/300m) e dipendente dalle condizioni meteorologiche presenti nella zona, Se indichiamo con h l'altezza della ciminiera e con h_m la quota di livellamento raggiunta dal baricentro del pennacchio, col termine plume rise si intende $\Delta h = h_m - h$



Zona 2 (zona di trasporto senza interazione col suolo)

Una volta raggiunta la quota h_m , il pennacchio si allarga, più o meno a seconda della turbolenza atmosferica, senza che la parte visibile del plume (meno densa) raggiunga il suolo. In questa zona l'interazione tra plume e suolo è trascurabile ed il plume, in pratica, è libero di disperdersi nello spazio in modo indisturbato, pilotato solo dalla turbolenza atmosferica.

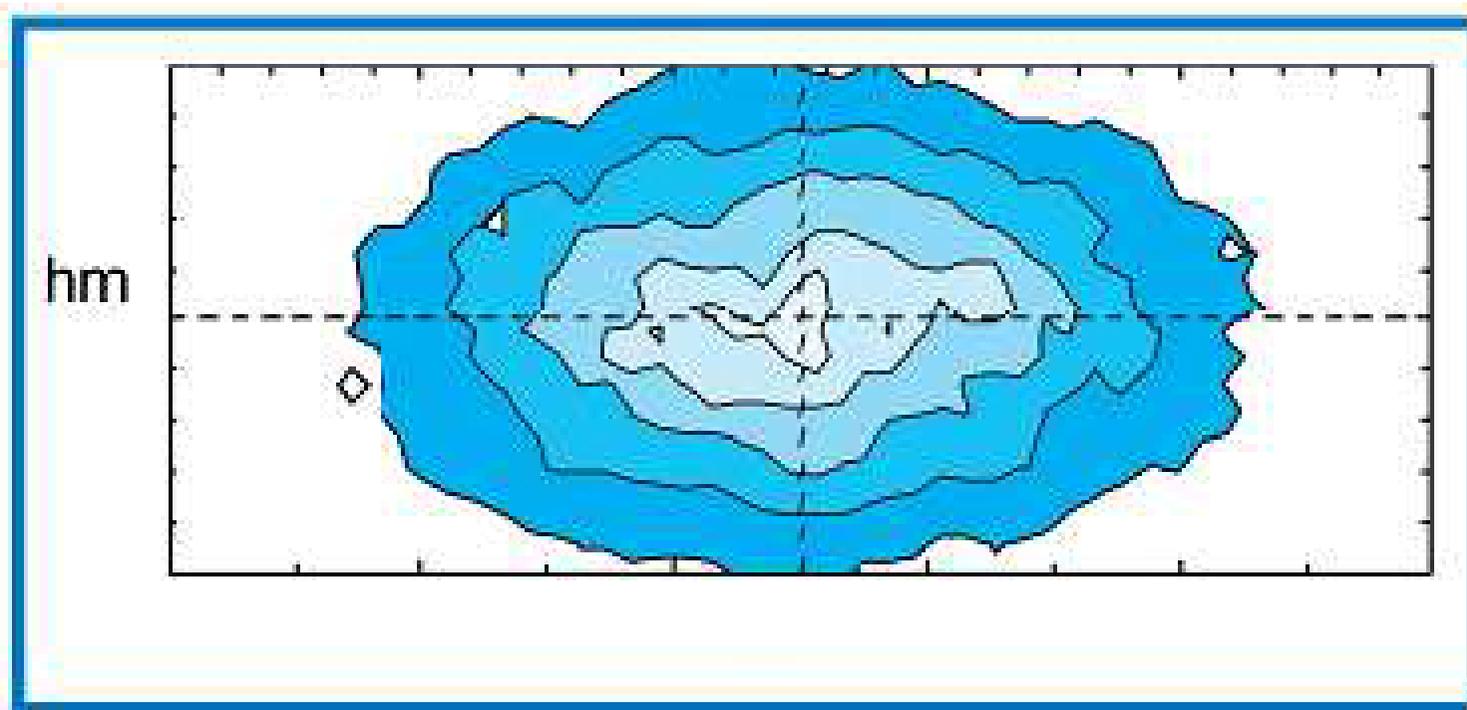


Zona 3 (zona di interazione col suolo).

Il bordo inferiore del *plume* raggiunge il suolo. A questo punto avviene un fenomeno di riflessione (parziale o totale) del *plume* a causa di questa frontiera solida. Questa zona è la meno definita ed anche la meno visibile visto che il *plume* ormai ha raggiunto un elevato grado di miscelazione con l'aria circostante e quindi i fumi sono meno densi e meno visibili.

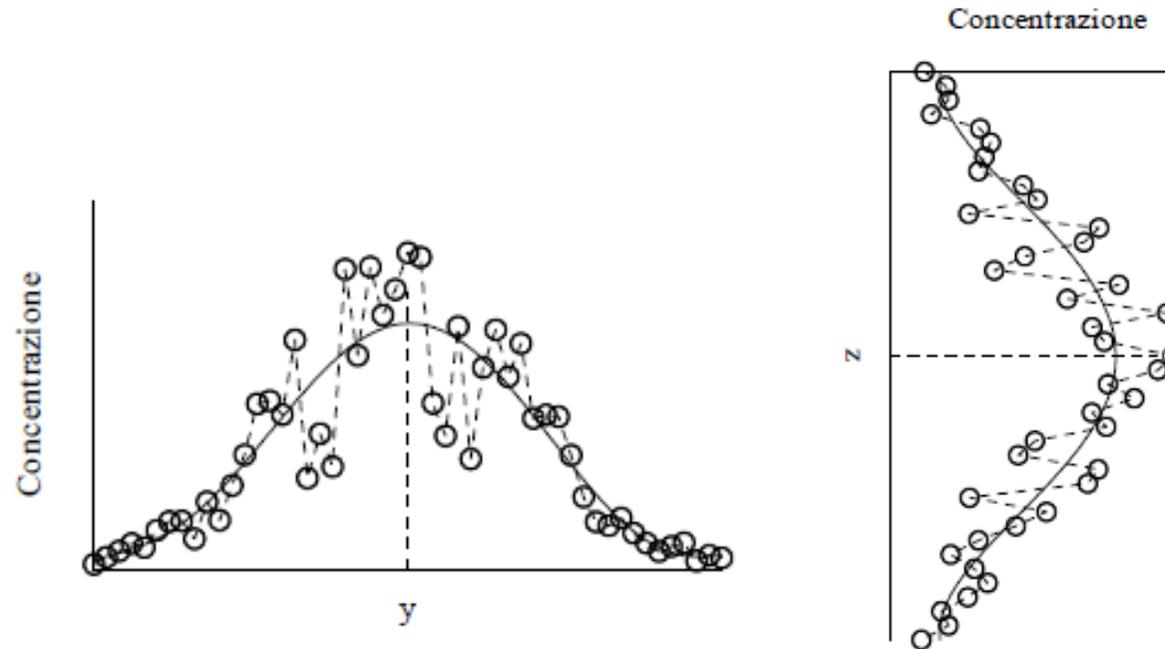
ZONA 2

Zona in cui il plume si disperde indisturbato nell'aria. Utilizziamo LIDAR
Analizziamo un piano \perp al baricentro del pennacchio
Isolinee di concentrazione del contaminante:



Descriviamo l'andamento della concentrazione rilevata lungo la linea che interseca il baricentro, orizzontale rispetto al suolo, e l'analoga concentrazione relativa alla linea, sempre intersecante il baricentro, ma verticale rispetto al suolo.

Andamento orizzontale e verticale della concentrazione normalizzata.



Andamento delle due concentrazioni:

- sono due funzioni il cui massimo coincide col baricentro del *plume*;
- diminuiscono rapidamente e simmetricamente all'allontanarsi dal pennacchio stesso, senza però arrivare ad annullarsi chiaramente.

Definiamo un sistema di riferimento cartesiano ortogonale:

origine = base della ciminiera

asse x = diretto parallelamente al baricentro del *plume*, lungo la direzione del vento medio

asse y = orizzontale e perpendicolare rispetto al precedente

asse z = verticale, positivo verso l'alto.

Ogni punto dello spazio sarà individuato da una terna di coordinate e ad esso sarà associata una concentrazione del generico inquinante considerato.

Vogliamo individuare una relazione matematica che consente di esprimere la concentrazione del punto nello spazio.

Possiamo immaginare di descrivere tale concentrazione in un punto qualsiasi del plume come prodotto tra una funzione in y ed un'altra in z nel modo seguente

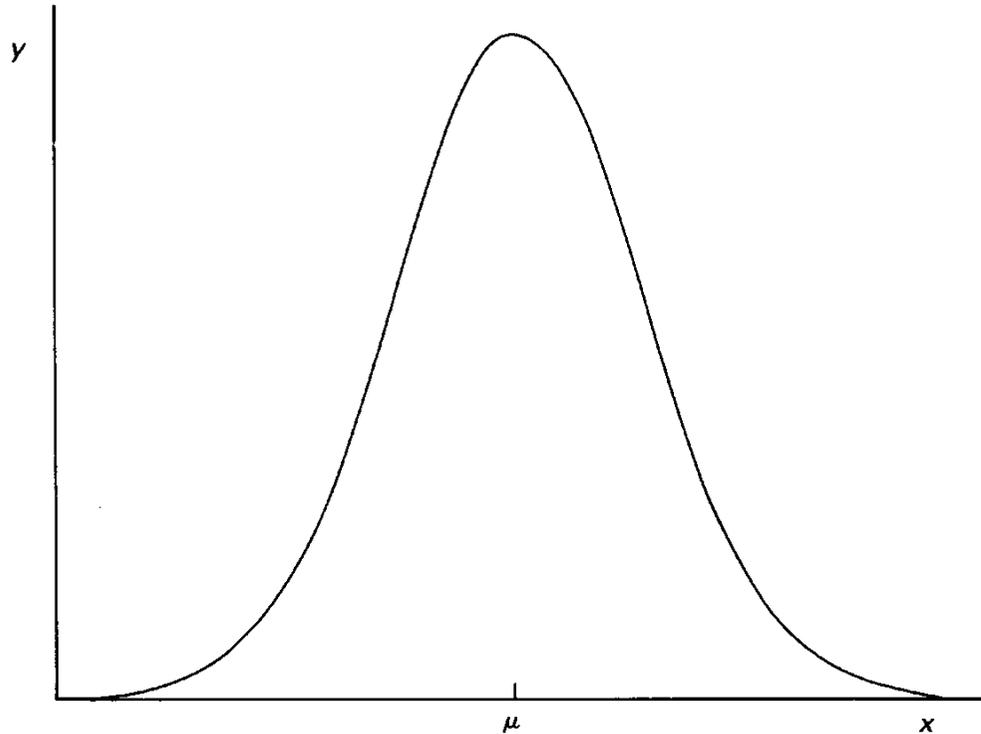
$$C(x,y,z) = K f_y f_z$$

f_y e f_z = espressione matematica delle funzioni a campana
K = opportuna costante.

Queste due funzioni descrivono quindi il grado di dispersione laterale e verticale che il fumo del *plume* subisce.

Si suppone siano valide per tutti gli altri piani perpendicolari al baricentro.

curva normale o Gaussiana, simmetrica rispetto a μ



Questa curva rappresenta quindi la distribuzione delle concentrazioni intorno al valore medio

$$y = \frac{\exp[-(x - \mu)^2 / 2\sigma^2]}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

σ = semiampiezza della curva nel punto di flesso

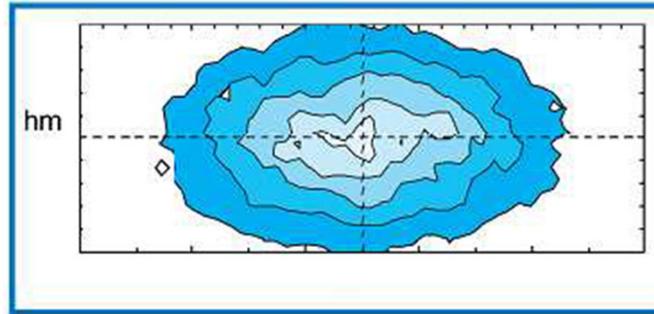
È un indice della dispersione delle misure.

$$C(x,y,z) = K f_y f_z$$

Dalle evidenze sperimentali:

- trovare f_y e f_z funzioni matematiche a campana con caratteristiche simili a quanto evidenziato;
- le *standard deviation* che caratterizzano tali distribuzioni dipendono dalla distanza sottovento x e dalla stabilità atmosferica.

$$C(x,y,z) = K \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{(z-h_m)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$



Quanto vale K e da cosa dipende?

Consideriamo una porzione dS del piano A di dimensioni $dydz$.

Definiamo:

Flusso di inquinante = quantità di inquinante che transita attraverso la superficie dS nell'unità di tempo è pari a

$$d\phi = C(x,y,z) \bar{u} \, dy \, dz$$

Principio di conservazione della massa \rightarrow il flusso di inquinante attraverso l'intera sezione A = quantità di inquinante che esce dalla bocca del camino nell'unità di tempo.

Q = emission rate = quantità di inquinante emesso nell'unità di tempo (g/s) si ha che:

$$Q = \int_A C(x,y,z) \bar{u} \, dy \, dz$$

Determinazione di **K** → legge di conservazione della massa.

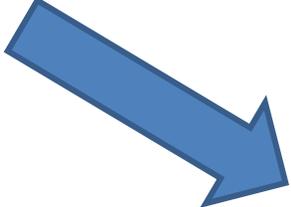
Se U è la velocità media del vento (costante in orizzontale e verticale) e se indichiamo con Φ il flusso lungo la direzione x attraverso la superficie infinitesima $dx dy$:

$$d\Phi = C(x, y, z) \bar{U} dy dz$$

controllo dimensionale $M L^{-3} L T^{-1} L L = M T^{-1}$

$$Q = \int_A C(x, y, z) \cdot \bar{U} \cdot dy dz$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$$


$$K = \frac{Q}{U}$$

Come calcolo K?

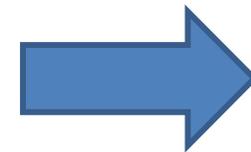
$$Q = \int_A C(x,y,z) \bar{u} \, dy \, dz$$

$$\text{Ma.....} C(x,y,z) = K \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$Q = \int_A K \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \bar{u} \, dy \, dz$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} \, dx = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$$

$$Q = K \bar{u} \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \sqrt{\pi 2\sigma_y^2} \sqrt{\pi 2\sigma_z^2} = K \bar{u} \frac{1}{2\pi\cancel{\sigma_y}\sigma_z} \pi \cancel{2\sigma_y} \sigma_z$$



$$K = \frac{Q}{\bar{u}}$$

dove con \bar{u} si è indicato il valore medio della velocità del vento (il valore del vento alla quota del baricentro del pennacchio pesata in modo da tener conto della sua variazione con la quota).

Facendosi aiutare da una tavola di integrali indefiniti non è difficile vedere che

$$K = \frac{Q}{\bar{u}}$$
$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \exp\left[-\frac{(z-h_m)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

Questa è la forma base del *Modello Gaussiano plume*.

È ora necessario rispondere a tre domande per rendere operativo questo modello:

- 1 - Come si calcola h_m (altezza efficace del plume)?
- 2 - Come si determinano σ_y e σ_z ?
- 3 - Come si comporta il plume nella zona 3?

Plume Rise

H is the sum of the physical stack height and plume rise.

Lavoro teorico-sperimentale realizzato prevalentemente da G.A. Briggs.
L'altezza effettiva del pennacchio è data da

$$h_m = h + \Delta h$$

- I gas emessi sono sottoposti a una spinta ascensionale dalla ciminiera dovuta alla loro velocità e temperatura propria.
- Vengono a contatto con l'atmosfera circostante, molto più turbolenta di loro.
- L'aria tende quindi ad infiltrarsi tra i gas, diminuendo progressivamente la loro velocità ascensionale e la temperatura, fino a disperderli al proprio interno.

Non sempre l'innalzamento del pennacchio è positivo.

Infatti se la velocità del vento è eccessivamente elevata rispetto alla velocità con cui escono i fumi dal camino, l'effetto di scia della ciminiera si concretizza in un abbassamento del pennacchio.

Per **pennacchi di fumo caldi** si nota che:

- Δh cresce allontanandosi dal punto di emissione fino a raggiungere un valore di equilibrio Δh_m .
- Δh dipende dalla distanza sottovento x , dalla velocità media del vento e dalla spinta di galleggiamento (buoyancy flux) definita come:

$$F_b = g V_s r_s^2 (T_s - T_a) / T_s$$

dove:

V_s = velocità di uscita dei fumi dalla bocca della ciminiera (m/s)

r_s = raggio della bocca della ciminiera (m)

T_s = temperatura assoluta dei fumi (K)

T_a = temperatura assoluta dell'aria (K)

Relazioni semiempiriche (*Briggs*) per il calcolo del *plume rise*.

Quando l'atmosfera è in condizioni stabili (situazioni notturne) Briggs presenta altri tipi di correlazioni per il calcolo dell'innalzamento del pennacchio.

Il valore all'equilibrio del plume rise è dato allora:

- se la velocità del vento è superiore a 1 m/s

$$\Delta h_m = 2.6 (F_b S / \bar{u})^{1/3}$$

- se la velocità del vento è molto bassa ($\leq 1 \text{ m / s}$), allora si può porre:

$$\Delta h_m = 5.0 F_b^{1/4} S^{-3/8}$$

Nelle relazioni precedenti il parametro S è il parametro di stabilità ed è espresso da

$$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\partial T_a}{\partial z} + 0.0098 \right)$$

Briggs ha proposto alcune relazioni semiempiriche che non portano a risultati soddisfacenti a causa dell'inadeguatezza del modello Gaussiano plume a descrivere tali situazioni.

Relazioni semiempiriche (*Briggs*) per il calcolo del *plume rise*.

Tutto quanto fin qui detto si riferisce al plume rise di pennacchi caldi, dotati quindi di una elevata spinta di galleggiamento quantificata dal *buoyancy flux*.

Se la temperatura dei fumi non è superiore a quella ambiente, cioè i **fumi sono freddi**, il principale meccanismo che determina il plume rise è la quantità di moto posseduta dai fumi stessi. In tal caso, detto F_m il parametro di flusso inerziale, definito come

$$F_m = V_s^2 r_s^2 \rho_s / \rho_a$$



il plume rise sarà dato, approssimativamente in ogni condizione di stabilità atmosferica:

$$\Delta h_m = 2.3 F_m^{1/3} \bar{u}^{-2/3} x^{-1/3}$$

EXAMPLE 4.7

A small industrial furnace emits $0.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ of exhaust gases at a temperature of 80°C . Outside air temperature is 10°C , and wind speed is $2 \text{ m}/\text{sec}$. The stack is 20 m tall, with a diameter of 40 cm . What is the plume height at the edge of the property 30 m downwind?

First, estimate the stack gas velocity:

$$F_b = g \frac{d^2 V}{4} \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad \Rightarrow \quad V = \frac{0.8 \text{ m}^3/\text{sec}}{\pi(0.2 \text{ m})^2} = 6.4 \text{ m}/\text{sec}.$$

Then use Eq. (4.19) to estimate the buoyancy flux parameter:

$$F_b = \frac{9.81 \text{ m}}{\text{sec}^2} \cdot \frac{(0.4 \text{ m})^2}{4} \cdot \frac{6.4 \text{ m}}{\text{sec}} \cdot \frac{353 \text{ K} - 283 \text{ K}}{353 \text{ K}} = \frac{0.50 \text{ m}^4}{\text{sec}^3}.$$

Finally, use Eq. (4.18) to estimate the plume rise:

$$\Delta H = 1.6 F_b^{1/3} x^{2/3} \quad \Rightarrow \quad \Delta H = (1.6) \left(\frac{0.50 \text{ m}^4}{\text{sec}^3} \right)^{1/3} (30 \text{ m})^{2/3} \left(\frac{1}{2 \text{ m}/\text{sec}} \right) = 6 \text{ m}.$$

Therefore, 30 m downwind, the plume height above the ground can be estimated as the stack height plus the plume rise:

$$20 \text{ m} + 6 \text{ m} = 26 \text{ m}.$$

I parametri di dispersione.

σ_y e σ_z dipendono dalla distanza sottovento rispetto al punto di emissione e dallo stato di turbolenza dell'atmosfera.

- la turbolenza atmosferica è descritta solamente dalle 6 classi di stabilità di Pasquill e dall'altezza di rimescolamento h_{mix}
- le due deviazioni standard sono espresse dalle relazioni matematiche seguenti:

$$\sigma_y = R_y x^{r_y} \quad \sigma_z = R_z x^{r_z}$$

	A	B	C	D	E	F
R_y	0.449	0.306	0.230	0.219	0.237	0.273
r_y	0.903	0.885	0.885	0.764	0.691	0.594
R_z	0.017	0.072	0.076	0.104	0.217	0.262
r_z	1.380	1.021	0.879	0.727	0.610	0.500

2.1. Pasquill-Gifford System

The values of σ_y and σ_z as functions of distance for use with his suggested stability categories were suggested by [12]. The modified values of σ_y and σ_z for use with the original Pasquill stability categories were suggested by [13]. The combination of Pasquill and Gifford parameters is called P-G scheme. In this scheme σ_y and σ_z are obtained from graphs as a function of downwind distance, x , for each stability class. These curves can be approximated by the following equations [14]

$$\sigma_y(x) = (a_1 \ln x + a_2) x \quad (5)$$

$$\sigma_z(x) = \frac{1}{2.15} \exp(b_1 + b_2 \ln x + b_3 \ln^2 x) \quad (6)$$

where the constants a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , and b_3 depend on the atmospheric stability and their values are presented in Table 1.

From Equation (6) and Equation (3) we find the formula of the estimated position of the MGLC as:

$$x_{me} = \exp\left(\frac{-b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4b_3 \left[b_1 - \ln\left(\frac{2.15H}{\sqrt{2}}\right)\right]}}{2b_3}\right) \quad (7)$$

Coefficient	Stability			Categories		
	A	B	C	D	E	F
a_1	-0.0234	-0.0147	-0.0117	-0.0059	-0.0059	-0.0029
a_2	0.3500	0.2480	0.1750	0.1080	0.0880	0.0540
b_1	0.8800	-0.9850	-1.1860	-1.3500	-2.8800	-3.8000
b_2	0.1520	0.8200	0.8500	0.7930	1.2550	1.4190
b_3	0.1475	0.0168	0.0045	0.0420	-0.0420	-0.0550

Table 1. Coefficient of the Pasquill-Gifford system for all stability classes [14].

where, the positive square root is selected to estimate x_{me} [14].

Classi di dispersione di Pasquill.

		Velocità del vento superficiale (u, m/s)				
Insolazione	copertura nuvole	$u < 2.0$	$2 < u < 3$	$3 < u < 5$	$5 < u < 6$	$u \geq 6$
	forte insolazione	A	A-B	B	C	C
Giorno	moderata insolazione	A-B	B	B-C	C-D	D
	bassa insolazione	B	C	C	D	D
Giorno						
o	copertura	D	D	D	D	D
Notte						
		-				
	leggera copertura o					
Notte	copertura $\geq 50\%$	-	E	D	D	D
	copertura $\leq 40\%$	-	F	E	D	D

A = molto instabile; B = instabile; C = debolmente instabile.

D = neutra.

E = debolmente stabile; F = stabile.

2.1. Pasquill-Gifford System

The values of σ_y and σ_z as functions of distance for use with his suggested stability categories were suggested by [12]. The modified values of σ_y and σ_z for use with the original Pasquill stability categories were suggested by [13]. The combination of Pasquill and Gifford parameters is called P-G scheme. In this scheme σ_y and σ_z are obtained from graphs as a function of downwind distance, x , for each stability class. These curves can be approximated by the following equations [14]

$$\sigma_y(x) = (a_1 \ln x + a_2) x \quad (5)$$

$$\sigma_z(x) = \frac{1}{2.15} \exp(b_1 + b_2 \ln x + b_3 \ln^2 x) \quad (6)$$

where the constants a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , and b_3 depend on the atmospheric stability and their values are presented in Table 1.

From Equation (6) and Equation (3) we find the formula of the estimated position of the MGLC as:

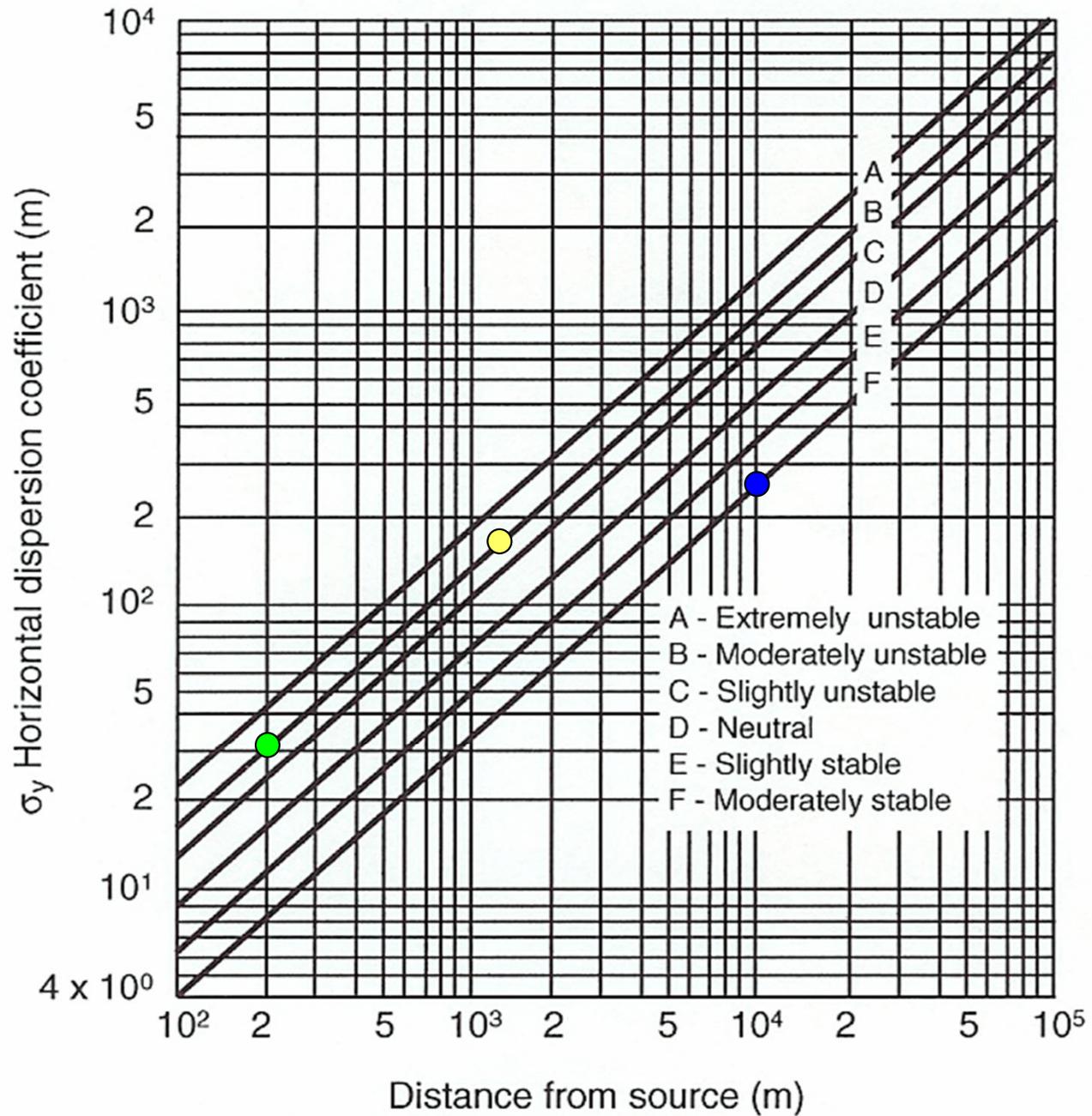
$$x_{me} = \exp\left(\frac{-b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4b_3[b_1 - \ln(\frac{2.15H}{\sqrt{2}})]}}{2b_3}\right) \quad (7)$$

Coefficient	Stability			Categories		
	A	B	C	D	E	F
a_1	-0.0234	-0.0147	-0.0117	-0.0059	-0.0059	-0.0029
a_2	0.3500	0.2480	0.1750	0.1080	0.0880	0.0540
b_1	0.8800	-0.9850	-1.1860	-1.3500	-2.8800	-3.8000
b_2	0.1520	0.8200	0.8500	0.7930	1.2550	1.4190
b_3	0.1475	0.0168	0.0045	0.0420	-0.0420	-0.0550

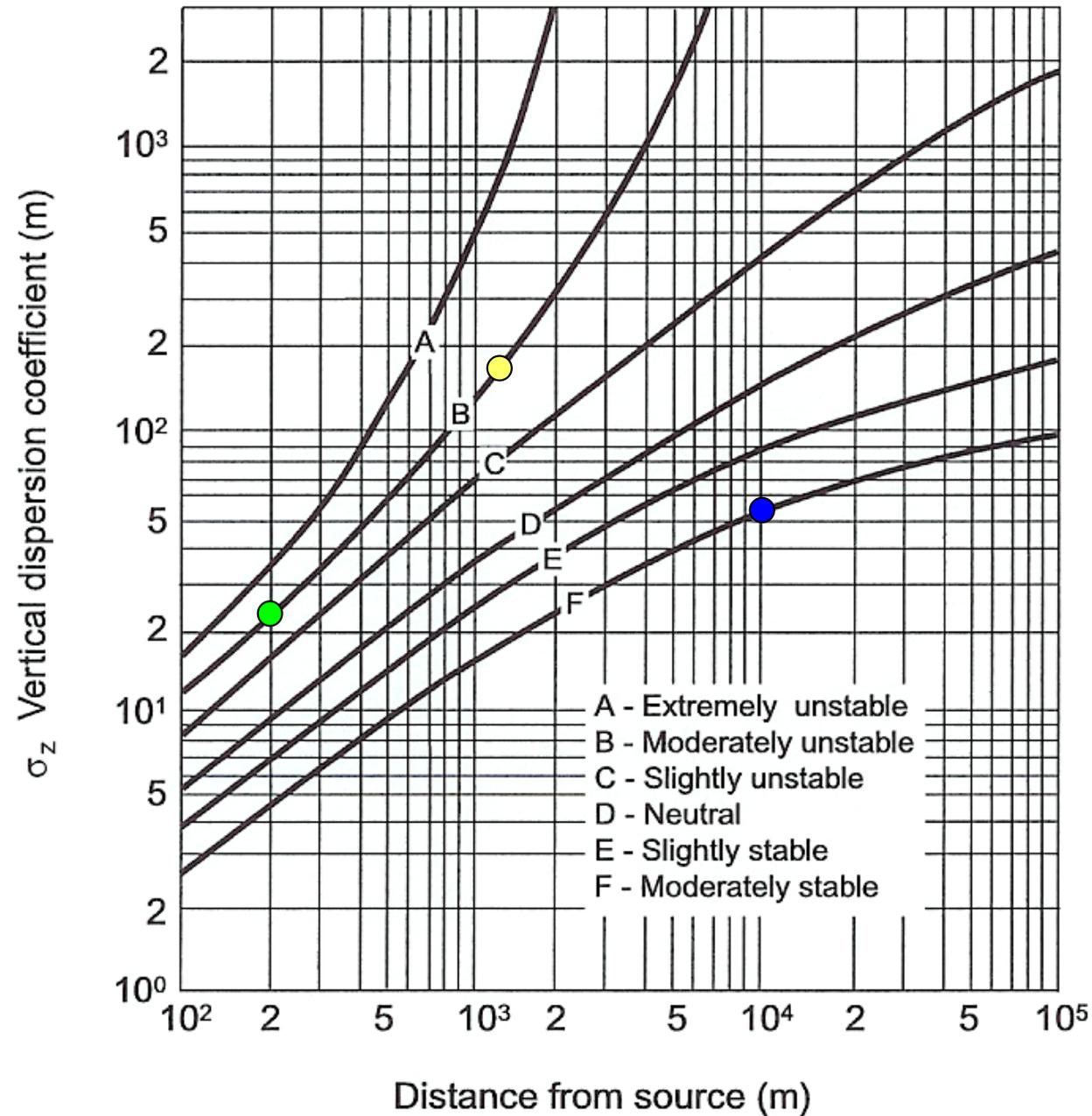
Table 1. Coefficient of the Pasquill-Gifford system for all stability classes [14].

where, the positive square root is selected to estimate x_{me} [14].

Dispersion Coefficients: Horizontal



Dispersion Coefficients: Vertical



2.1. Pasquill-Gifford System

The values of σ_y and σ_z as functions of distance for use with his suggested stability categories were suggested by [12]. The modified values of σ_y and σ_z for use with the original Pasquill stability categories were suggested by [13]. The combination of Pasquill and Gifford parameters is called P-G scheme. In this scheme σ_y and σ_z are obtained from graphs as a function of downwind distance, x , for each stability class. These curves can be approximated by the following equations [14]

$$\sigma_y(x) = (a_1 \ln x + a_2) x \quad (5)$$

$$\sigma_z(x) = \frac{1}{2.15} \exp(b_1 + b_2 \ln x + b_3 \ln^2 x) \quad (6)$$

where the constants a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , and b_3 depend on the atmospheric stability and their values are presented in Table 1.

From Equation (6) and Equation (3) we find the formula of the estimated position of the MGLC as:

$$x_{me} = \exp\left(\frac{-b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4b_3 \left[b_1 - \ln\left(\frac{2.15H}{\sqrt{2}}\right)\right]}}{2b_3}\right) \quad (7)$$

Coefficient	Stability			Categories		
	A	B	C	D	E	F
a_1	-0.0234	-0.0147	-0.0117	-0.0059	-0.0059	-0.0029
a_2	0.3500	0.2480	0.1750	0.1080	0.0880	0.0540
b_1	0.8800	-0.9850	-1.1860	-1.3500	-2.8800	-3.8000
b_2	0.1520	0.8200	0.8500	0.7930	1.2550	1.4190
b_3	0.1475	0.0168	0.0045	0.0420	-0.0420	-0.0550

Table 1. Coefficient of the Pasquill-Gifford system for all stability classes [14].

where, the positive square root is selected to estimate x_{me} [14].

Zona 3 - Interazione del pennacchio col suolo e con l'altezza di rimescolamento

Il modello descritto per la Zona 2, ha un'importanza più teorica che pratica visto che tale zona è poco estesa. Più estesa è la zona 3, cioè quella zona in cui il plume si è allargato fino ad interagire con il suolo e con la parte alta del PBL. Quello che si vede nella zona 3 è che:

- il pennacchio viene riflesso dal suolo,
- il pennacchio viene (parzialmente) riflesso dall'altezza di rimescolamento,
- il suo comportamento può essere visto come un fascio di luce che si riflette tra due specchi paralleli.

Modello a Riflessioni Multiple

Da considerazioni analitiche, sulla base di un'analogia ottica:

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \sum_{j=0,\pm 1,\pm 2,\dots} \left\{ \exp\left[-\frac{(z + 2jh_{mix} - h_m)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + 2jh_{mix} + h_m)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

Modello completo e generale per descrivere lo dispersione degli inquinanti nelle zone 1, 2 e 3.

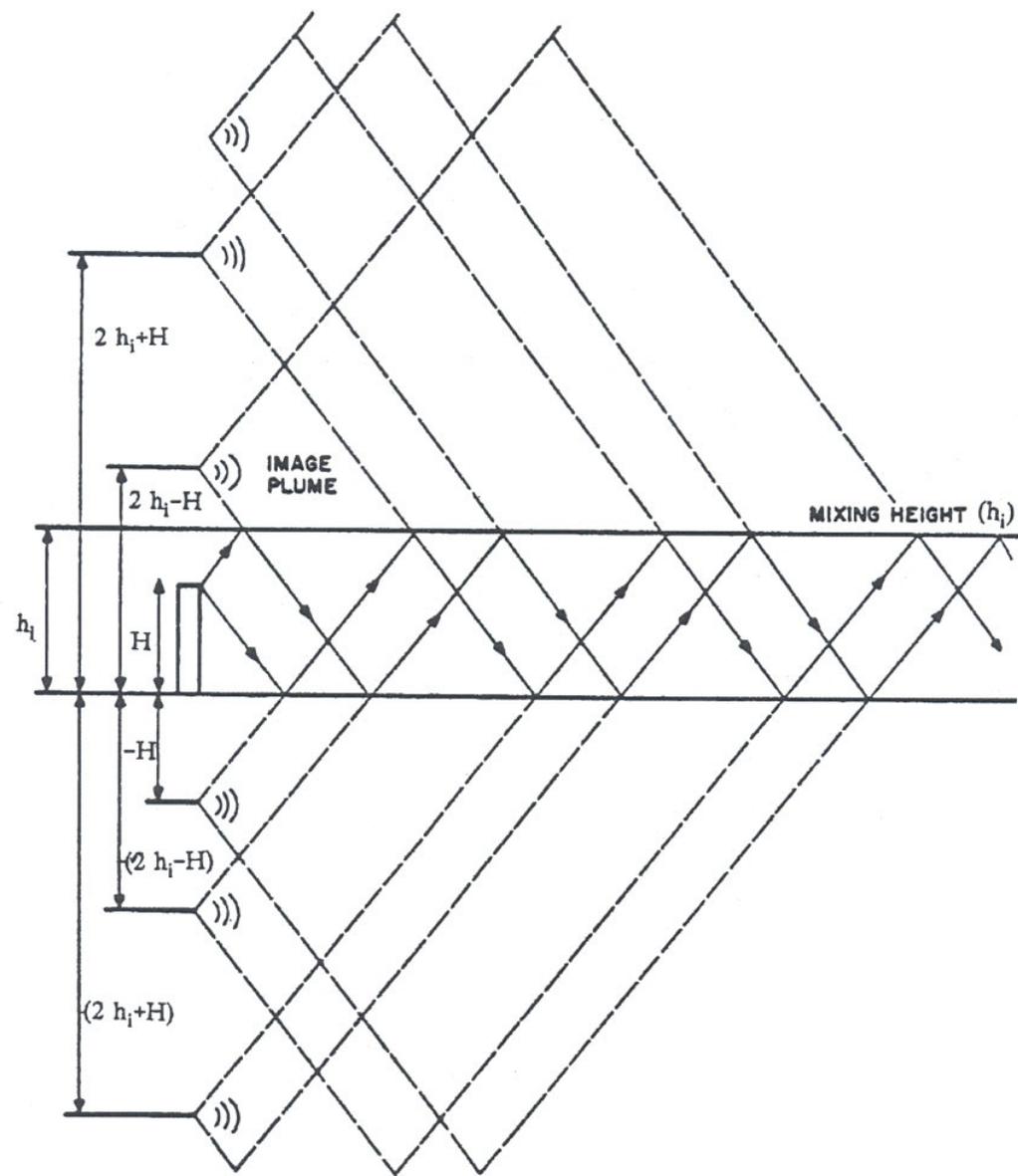
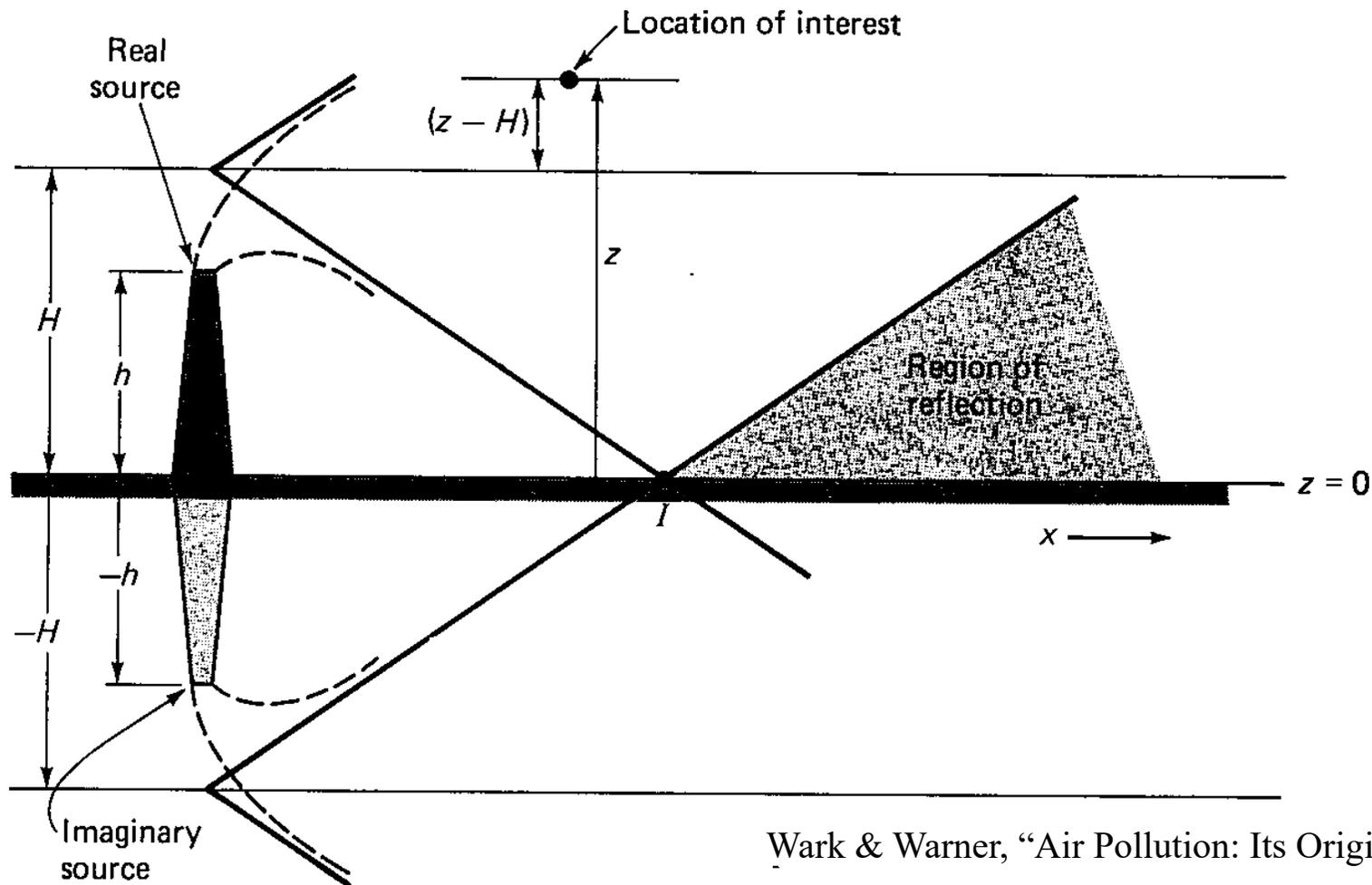


Fig.4.5: le riflessioni multiple di un plume stazionario (US-EPA,1995).



Wark & Warner, "Air Pollution: Its Origin & Control"

Figure 4-3 Use of an imaginary source to describe mathematically gaseous reflection at surface of the earth.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

Con tutte queste limitazioni si potrebbe pensare che il modello Gaussiano plume sia in pratica inutilizzabile. Nella realtà si nota che se:

- si utilizza come vento medio quello all'altezza h_m
- si simulano situazioni orarie
- si calcolano bene le categorie di stabilità

I risultati ottenuti per camini isolati in territori pianeggianti sono abbastanza realistici specialmente per studi di valutazione di impatto ambientale e paragonabili a quanto normalmente si ottiene con i modelli di maggiore complessità.

I modelli lagrangiani a particelle e i modelli plume ibridi forniscono previsioni decisamente migliori.

Semplificazioni:

- si considera solamente la concentrazione al suolo;
- si trascurano tutte le riflessioni tranne quella al suolo.

In questo caso si ha:

$$C(x,y,0) \approx \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \exp\left(-\frac{h_m^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Le limitazioni sono:

- è adatto per sorgenti puntiformi (ciminiera)
- ipotizza di simulare una situazione stazionaria
- ipotizza la presenza di un campo di vento spazialmente uniforme
- il terreno circostante deve essere piano e poco rugoso
- l'inquinante deve essere un gas inerte che non presenta fenomeni di deposizione
- il PBL e la sua turbolenza sono descritti solo dalle categorie di Pasquill e da h_{mix}

Maximum Ground Level Concentration

Under moderately stable to near neutral conditions,

$$\sigma_y = k_1 \sigma_z$$

The ground level concentration at the center line is

$$C(x,0,0) = \frac{Q}{\pi k_1 \sigma_z^2 u} \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

The maximum occurs at

$$dC / d\sigma_z = 0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_z = \frac{H}{\sqrt{2}}$$

Once σ_z is determined, **x can be** known and subsequently C.

$$C(x,0,0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp[-1] = 0.1171 \frac{Q}{\sigma_y \sigma_z u}$$

Example

An industrial boiler is burning 2.5% sulfur coal/h and emits SO₂ with an emission rate of 151 g/s. The following exist : H = 120 m, u = 2 m/s, γ = 0. It is one hour before sunrise, and the sky is clear. Determine downwind ground level concentration at 10 km.

Stability class = F



$\sigma_y = 230$ m



$\sigma_z = 53$ m



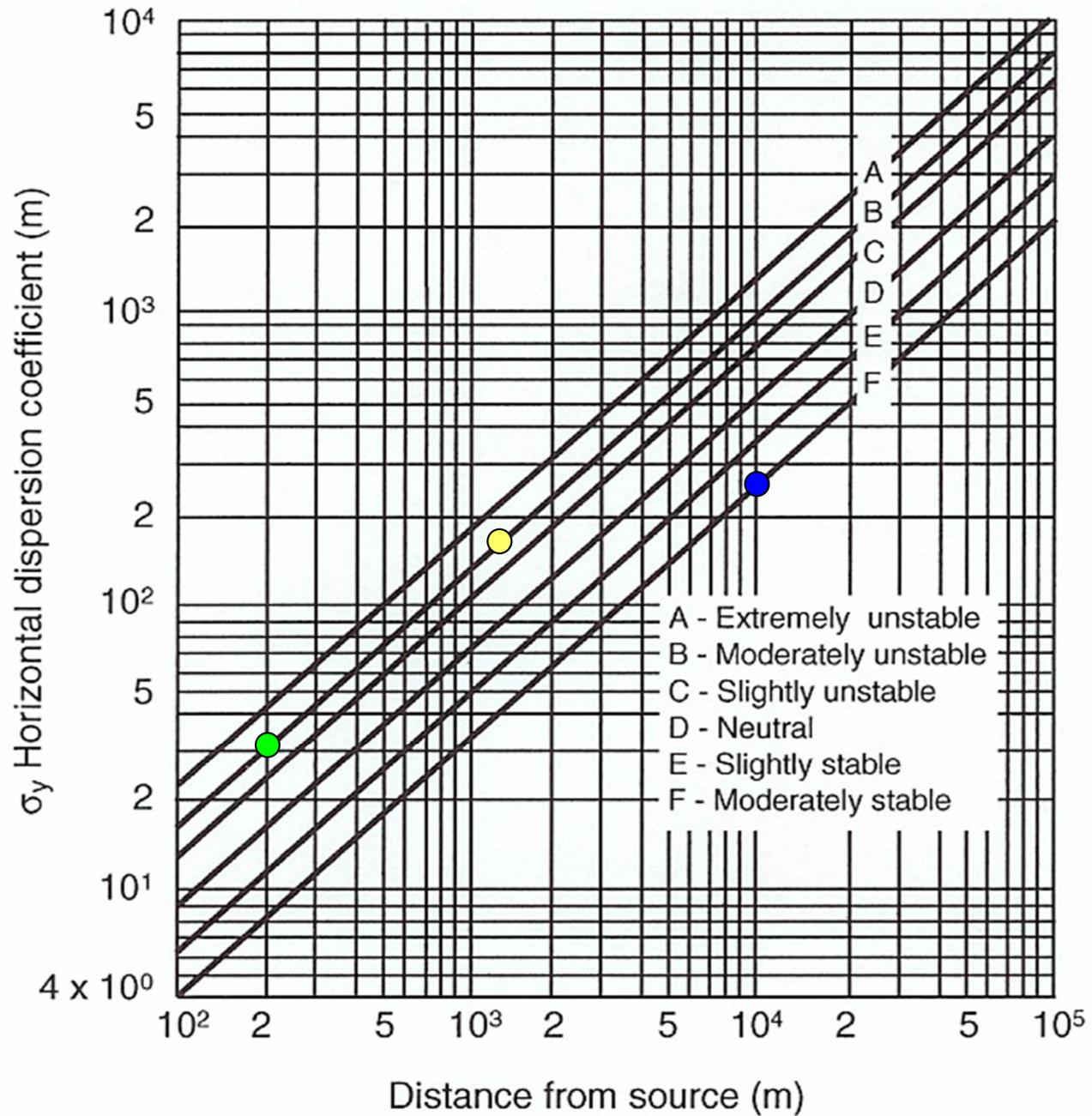
$$C(x,y,0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \exp\left(-\frac{h_m^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$C(10 \text{ km}, 0, 0) = 151 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

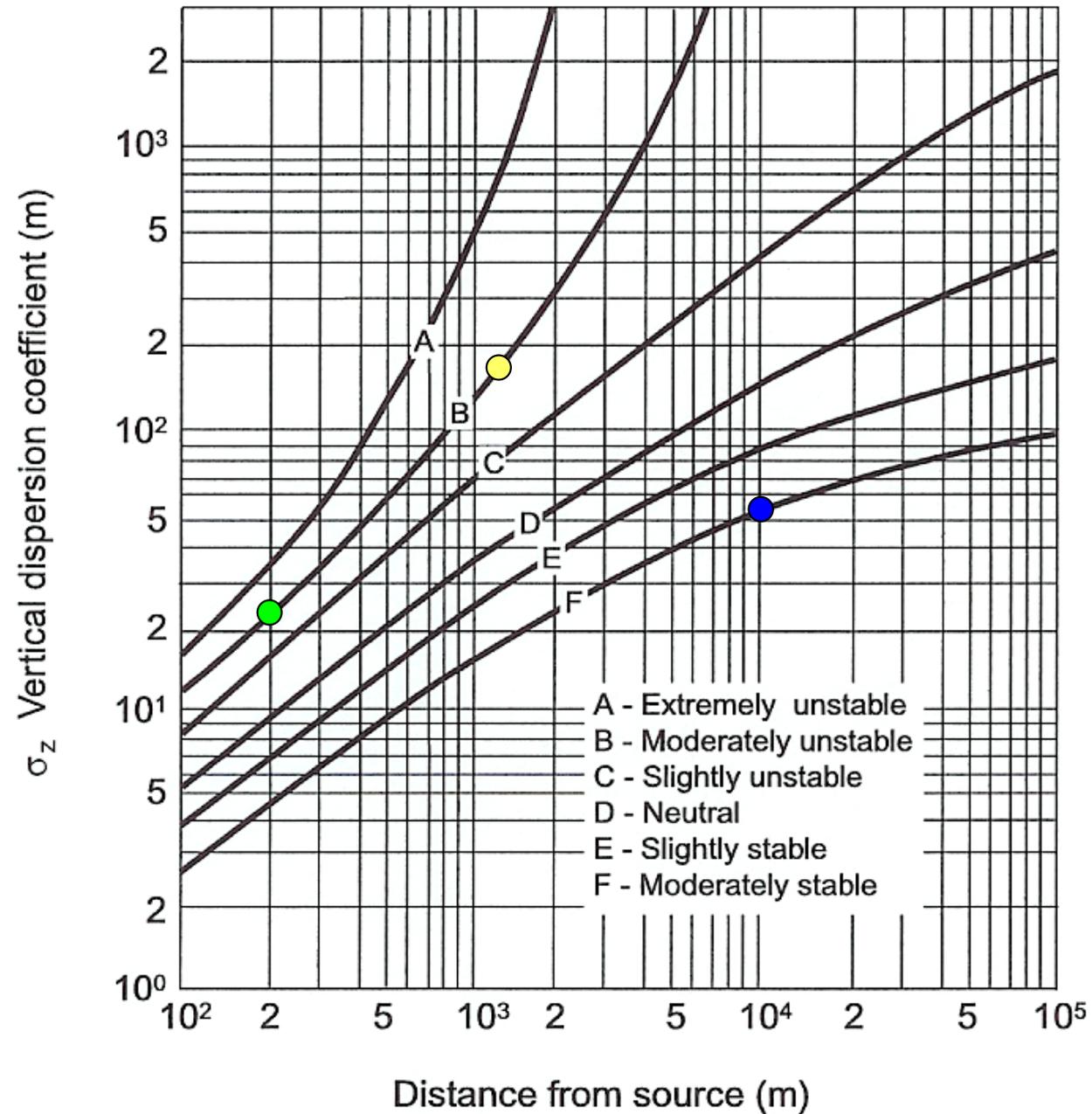
Atmospheric Stability Classes

Wind Speed, 10 m (m/sec)	Day			Night	
	Incoming Solar Radiation			Thinly Overcast	
	Strong	Moderate	Slight	>4/8 Cloud	<3/8 Cloud
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	D	E
3-5	B	B-C	C	D	D
>6	C	D	D	D	D

Dispersion Coefficients: Horizontal



Dispersion Coefficients: Vertical



I processi di impoverimento del pennacchio.

Processi di rimozione dal plume dovuti alle interazioni fisico-chimiche dell'inquinante con l'aria.

L'inquinante viene rimosso dal plume e può essere trasportato alla vegetazione, al suolo o all'acqua del mare o dei laghi, oppure può subire trasformazioni chimiche di varia complessità che determinano la sparizione dell'inquinante primario con la contemporanea comparsa di inquinanti secondari.

A seconda dei meccanismi che determinano questo processo di impoverimento del plume, si distingue tra:

- **Deposizione Secca:** processo di rimozione che avviene in continuazione, attivato solamente da meccanismi chimico-fisici caratteristici del suolo sopra cui transita il plume, della sua vegetazione e dal tipo di inquinante che si sta considerando. Tale processo è lento, ma continuo ed è il principale responsabile dell'acidificazione dei suoli.
- **Deposizione Umida:** processo di dilavamento del plume causato dalla pioggia. È un processo molto più intenso della deposizione secca, ma essendo attivato dalle precipitazioni, avviene con discontinuità temporale.
- **Reazioni chimiche:** insieme di reazioni chimiche che avvengono all'interno del plume e che determinano la sparizione dell'inquinante primario, con una contemporanea comparsa di inquinanti secondari.

Deposizione secca

Trasferimento di inquinante, gassoso o particellare, al suolo senza l'intervento dilavante della pioggia.

Si tratta la deposizione secca con un parametro aggregato, detto velocità di deposizione (V_d).

Si osserva che:

- la concentrazione di inquinante primario nel plume (in particolare nella parte del plume prossima al suolo) risulta inferiore a quanto ci si aspetterebbe trascurando tale fenomeno;
- questo deficit di inquinante sparisce dal bilancio e contemporaneamente si manifestano nella vegetazione che ricopre il suolo e nel suolo stesso fenomeni chimico fisici che ne alterano le caratteristiche originarie (aumento del pH, ecc.). Questo deficit = flusso di deposizione = quantità di inquinante primario estratta dal plume e incorporata nel suolo.

Deposizione secca definita con concentrazione in un punto del suolo ed il flusso di deposizione relativo.

$$\text{Flusso di deposizione} = V_d * C(x,y,z,t)$$

V_d = capacità dell'inquinante di lasciare il plume e di stabilirsi al suolo per cause non gravitazionali.

Deposizione umida.

Processo di impoverimento causato dall'interazione tra la pioggia e il plume.

Può avvenire entro le nubi

rainout

Può avvenire di sotto delle nubi

scavenging

Si usa il coefficiente di *Washout* (W_r).

Detto k_0 e C_0 rispettivamente la concentrazione di inquinante presente nella pioggia e nell'aria, il coefficiente di *washout* è così definito:

$$W_r = \frac{k_0}{C_0}$$

In questo caso il flusso di deposizione è dato dalla relazione seguente:

$$\text{Flusso di deposizione} = C_0 W_r J_0$$

dove J_0 è la piovosità in (mm/ora). Un tipico valore del coefficiente di *washout* per la SO_2 è di circa 105.

Reazioni chimiche approssimate

Non bisogna dimenticare che praticamente tutti gli inquinanti gassosi sono chimicamente reattivi e determinano, durante il loro trasporto e diffusione in atmosfera, una gran moltitudine di reazioni chimiche che producono specie secondarie (non presenti al momento dell'emissione). Se tali reazioni possono essere descritte con una cinetica del primo ordine, allora dopo un certo tempo t la concentrazione varierà secondo la relazione segue

$$C(t) = C_0 e^{-t/\tau}$$

dove con τ si è indicata la costante di tempo della reazione. Se si prede come riferimento SO_2 , tale tempo caratteristico è pari a circa 28 ore.

Evidentemente la chimica dell'atmosfera è ben più complicata, ma proprio questa complicazione ha impedito finora un suo inserimento realistico in modelli dispersivi di media complessità, come i modelli gaussiani plume.

Le sorgenti area e le sorgenti linea.

Se si devono trattare sorgenti con una geometria molto differente dalla ciminiera....

- le sorgenti areali, come possono essere le emissioni da discariche o da sorgenti non convogliate in ambito industriale;
- le sorgenti linea, come possono essere le emissioni delle autovetture lungo un tratto stradale.

Sorgenti areali

per ragioni di mancanza di informazioni specifiche, si adotta il concetto di sorgenti areali per descrivere una moltitudine di camini, di cui si ignorano le singole caratteristiche fisiche, ma di cui si conosce l'emissione complessiva. Un tipico esempio è la descrizione delle emissioni di un'area urbana.

Vista l'importanza di queste tipologie di sorgenti, sono state messe a punto delle estensioni del modello gaussiano *plume* che consentono di descriverle, anche se con una certa approssimazione.

Una generica sorgente areale può essere vista come una zona quadrata di lato x_0 orientata secondo gli assi coordinati. La concentrazione di un dato inquinante in un generico punto di coordinate (x,y) può essere determinata con la relazione seguente:

$$C(x,y,0) = \frac{Q_A F_z E x_0}{4\sqrt{2}u\sigma_z}$$

Dove:

- Q_A è l'emission rate della sorgente area ($g/(m^2 s)$)
- F_z è il termine di dispersione verticale così espresso

$$F_z = \sum_{j=0,\pm 1,\pm 2,\dots} \left\{ \exp\left[-\frac{(z + 2jh_{mix} - h_m)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + 2jh_{mix} + h_m)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

E è un termine dato dalla relazione seguente

$$E = \operatorname{erf}\left(\frac{r_0 + y}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{r_0 - y}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)$$

r_0 è il raggio efficace della sorgente areale $\longrightarrow r_0 = x_0 / \sqrt{\pi}$

Sorgente lineare

il metodo normalmente impiegato è l'integrazione della relazione gaussiana per una ciminiera lungo una linea.



[Vedi presentazione Caline.pptx](#)

LIMITI DEL MODELLO GAUSSIANO

Velocità del vento costante in direzione e modulo nella regione d'interesse (valido solo per brevi o medie distanze).

Velocità media del vento rappresentativa di tutto lo strato in cui avviene la dispersione. Si trascura il profilo verticale del vento (si considera la velocità del vento alla bocca del camino).

Non si tiene conto della conformazione del terreno: di conseguenza, l'applicabilità del modello è limitata a zone pianeggianti.



Modelli a "puff"

Ciascuna emissione viene considerata come la somma di un certo numero di "puff", all'interno dei quali la concentrazione varia con una espressione gaussiana.

LIMITI DEL MODELLO GAUSSIANO

Velocità del vento costante in direzione e modulo nella regione d'interesse (valido solo per brevi o medie distanze).

Velocità media del vento rappresentativa di tutto lo strato in cui avviene la dispersione. Si trascura il profilo verticale del vento (si considera la velocità del vento alla bocca del camino).

ALTERNATIVA

Il pennacchio viene diviso in una sequenza di elementi (segmenti o puff) che rimangono concatenati fra loro, ma evolvono (muovendosi ed espandendosi) in maniera indipendente, includendo le condizioni meteorologiche dell'area occupata nelle diverse fasi della loro evoluzione.

Ciascun pennacchio viene descritto da una catena sequenziale di elementi generati nel punto di emissione. La somma dei contributi dei diversi elementi di tutti i pennacchi considerati produce il campo di concentrazioni, che viene calcolato in ogni punto recettore specificato.

Ad ogni sottointervallo di dispersione viene generato, in ogni sorgente, un nuovo elemento di inquinante primario. Tale massa viene poi opportunamente ridotta in ciascun successivo intervallo temporale per tenere conto dei processi di deposizione secca, dei processi di rimozione dovuti alle precipitazioni e delle trasformazioni chimiche in inquinanti secondari.

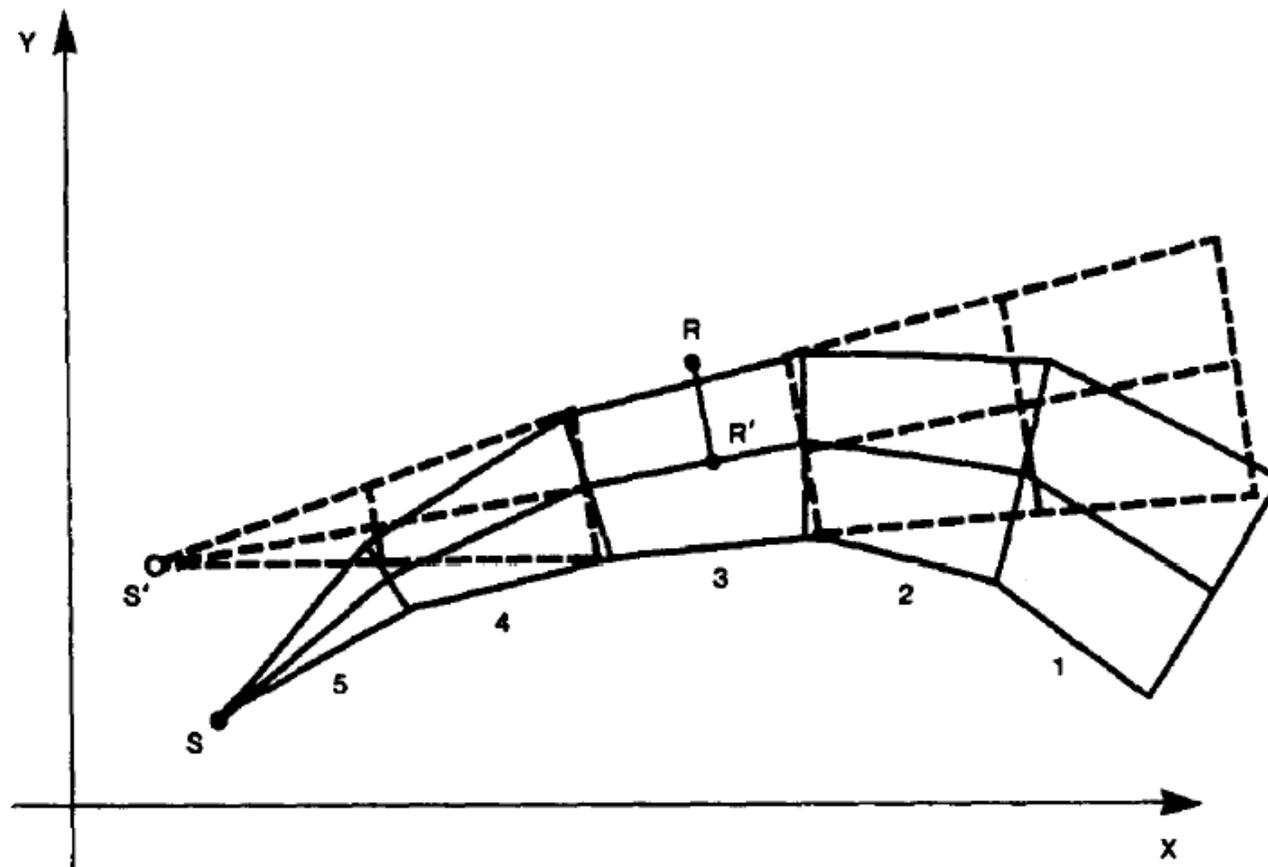


Fig. 1. Computation of the concentration at the receptor R generated by the segmented plume (solid lines). The computation is performed by evaluating the contribution of the virtual plume (dotted lines) from the virtual source S' passing through the closest segment (number 3) to the receptor R .

LIMITI DEL MODELLO GAUSSIANO

Non si tiene conto della conformazione del terreno: di conseguenza, l'applicabilità del modello è limitata a zone pianeggianti.

Se la sorgente emette degli impulsi, in aggiunta alla precedente formulazione “plume”, è possibile ottenerne un'altra, sempre gaussiana, ma non stazionaria: il modello Puff, del quale di seguito sono riportati i concetti di base:



Modelli a "puff"

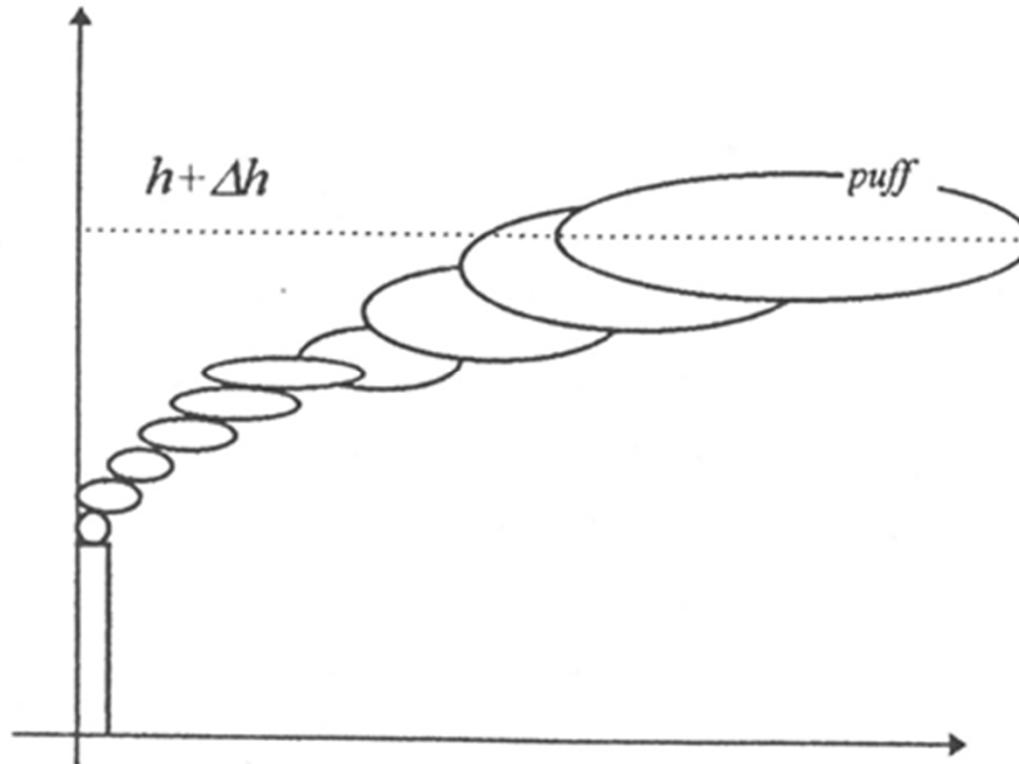
Ciascuna emissione viene considerata come la somma di un certo numero di "puff", all'interno dei quali la concentrazione varia con una espressione gaussiana.

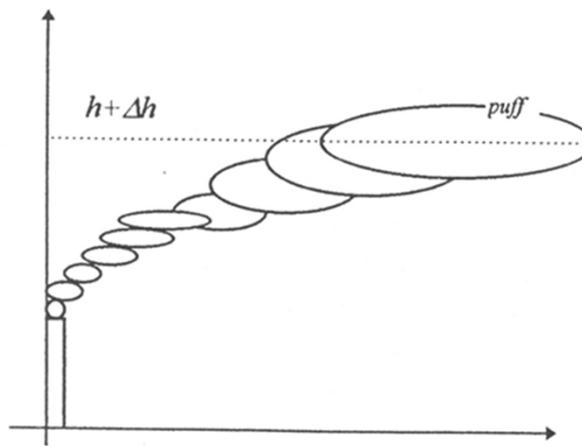
Il modello Puff.

Si è cercato di adattare il modello Gaussiano plume per descrivere situazioni orograficamente complesse o costiere, i risultati ottenuti sono abbastanza deludenti. Meglio è il modello Gaussiano Puff ed i modelli a particelle.

Formulazione gaussiana, ma non stazionaria.

Nella realtà, l'idea che sta' alla base di un tale modello può essere così sinteticamente illustrata:

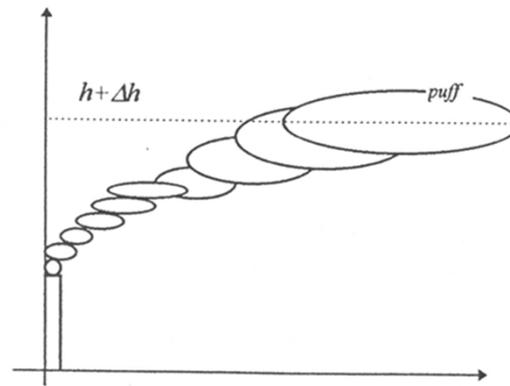




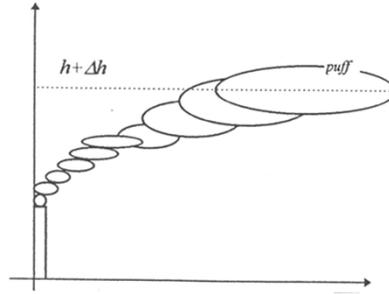
Se la sorgente emette degli impulsi, in aggiunta alla precedente formulazione “plume”, è possibile ottenerne un’altra, sempre gaussiana, ma non stazionaria: il modello Puff.

- * si procede sempre per scenari temporali distinti di durata T , dove T varia da 1 a 15 minuti (molto minore del passo temporale tipico del gaussiano plume, che è di 1 ora);
- * si suppone che tale intervallo sia sufficientemente piccolo da poter considerare la struttura del PBL abbastanza costante;
- * in questo intervallo T , si immagina di conoscere il campo di vento e lo stato della turbolenza (in modo più o meno preciso);
- * si suppone che l’inquinante venga emesso come una serie di N sbuffi successivi e indipendenti (uno ogni sottoperiodo Δt di T);
- * ciascuno sbuffo contiene una quantità di inquinante Δf ; la quantità emessa in T è quindi pari a $\Delta f \times N$;

- * ciascun puff si muove nel campo di vento con passi discreti di durata Δt ;
- * ogni puff è dotato di una sua propria forza di galleggiamento che dipende dalle condizioni atmosferiche, dalla sua temperatura e dalla distanza dal punto di emissione (All'aumentare della distanza x dal camino aumenta la quantità di aria inglobata nel puff e quindi diminuisce la sua temperatura);
- * durante il volo gli sbuffi aumentano di dimensione, a causa della turbolenza che tende ad aumentare la dispersione dell'inquinante e acquisiscono pertanto una simmetria ellissoidale (al cui interno la distribuzione di concentrazione è gaussiana);



- * alla fine di ciascun periodo T , si considerano tutti i puff presenti nel dominio di calcolo e, sovrapponendo la concentrazione di inquinanti in ciascuno di questi, si ricava il campo tridimensionale di concentrazione;
- * alla fine di tutti i passi temporali di durata T , si 'sommano' tutti questi campi ottenendo la distribuzione di concentrazione.



La concentrazione degli inquinanti in ogni singolo *puff* è rappresentata da una distribuzione gaussiana in evoluzione nel tempo e nello spazio. La concentrazione Δc in un generico punto $P(x,y,z)$ del dominio spaziale sarà:

$$\Delta c(x,y,z) = \frac{\Delta f}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - \bar{u}t)}{\sigma_x}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{2\sigma_y}\right)^2\right] \times$$

$$\left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z + h_m)^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z - h_m)^2}{\sigma_z^2}\right] \right\}$$

Si è tenuto conto della sola riflessione del suolo.

Si può tener conto anche degli effetti di riflessioni multiple e dei fenomeni di deposizione (soprattutto secca), analogamente a quanto fatto per i modelli plume.

Concentrazione in P

 sovrappongo i contributi dovuti a tutti i puff in tutti i time steps dell'intervallo di osservazione T.

Lo spostamento di ogni puff è calcolato ad ogni intervallo di tempo muovendo il suo centro di massa in accordo con il vento presente in quel punto ed in quell'istante.

È indispensabile disporre di un campo tridimensionale del vento.

Un modo relativamente semplice per ottenere ciò è

- disporre di un certo numero di misure realizzate in prossimità del suolo;
- disporre di alcune informazioni realistiche dei profili della velocità e della direzione del vento, nonché della temperatura;
- effettuare un'interpolazione dei dati anemologici disponibili sull'intero dominio spaziale di interesse;
- modificare il campo interpolato ottenuto in modo da soddisfare al meglio la legge di conservazione della massa.

 Modelli diagnostici di campo di vento.

Anche i puff subiscono un processo di innalzamento per galleggiamento nella pratica si ricorre alle relazioni di Brigg o simili (plume rise).

La diffusione è simulata attraverso σ_x , σ_y , σ_z , i cui andamenti dipendono dalla stabilità atmosferica.

Nella pratica si procede nel modo seguente:

- normalmente si pone $\sigma_x = \sigma_y$;
- si adottano le correlazioni usate per i modelli gaussiani plume.

I modelli puff di ultima generazione utilizzano relazioni legate ai parametri che descrivono la struttura del PBL (friction velocity, flusso turbolento di calore sensibile, altezza di rimescolamento, velocità di scala, ecc.)

I modelli puff non tengono conto dei processi fotochimici di trasformazione per i quali l'unica possibilità modellistica resta l'impiego dei modelli euleriani K.