

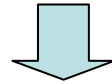


*Modelli di Dispersione
degli Inquinanti in Aria*
2011

Richiami di Micrometeorologia

*dott. Roberto Sozzi
dott. Andrea Bolignano*

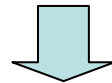
Causa Prima dell'inquinamento atmosferico



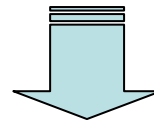
⇒ **Emissioni di inquinanti di origine**

- *Antropica*
- *Naturale*

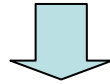
⇒ **Trasformazione chimica e fotochimica degli inquinanti presenti in atmosfera**



A parità di inquinanti emessi e di modalità di emissione, la distribuzione della loro concentrazione al suolo è la più varia.

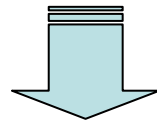


Non esiste sempre una relazione lineare e diretta tra emissioni e concentrazioni al suolo



Gli inquinanti

- ⇒ **vengono trasportati dal moto medio delle masse d'aria**
- ⇒ **vengono diffusi dalla turbolenza della parte bassa della troposfera**
- ⇒ **subiscono processi di deposizione secca ed umida**
- ⇒ **reagiscono chimicamente in aria**



**Ruolo Essenziale della Meteorologia
della parte bassa della Troposfera (PBL)**

Questo strato di Troposfera si estende

dal suolo fino ad una quota che varia durante il giorno e
da giorno a giorno

(estensione massima di 1 – 2 km nelle ore diurne e soleggiate).

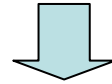
*Possiede caratteristiche fisiche e chimiche nettamente distinte dal
resto della troposfera.*

Micrometeorologia

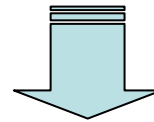
Studio del:

⇒ **trasporto delle masse d'aria**

⇒ **turbolenza dell'aria**



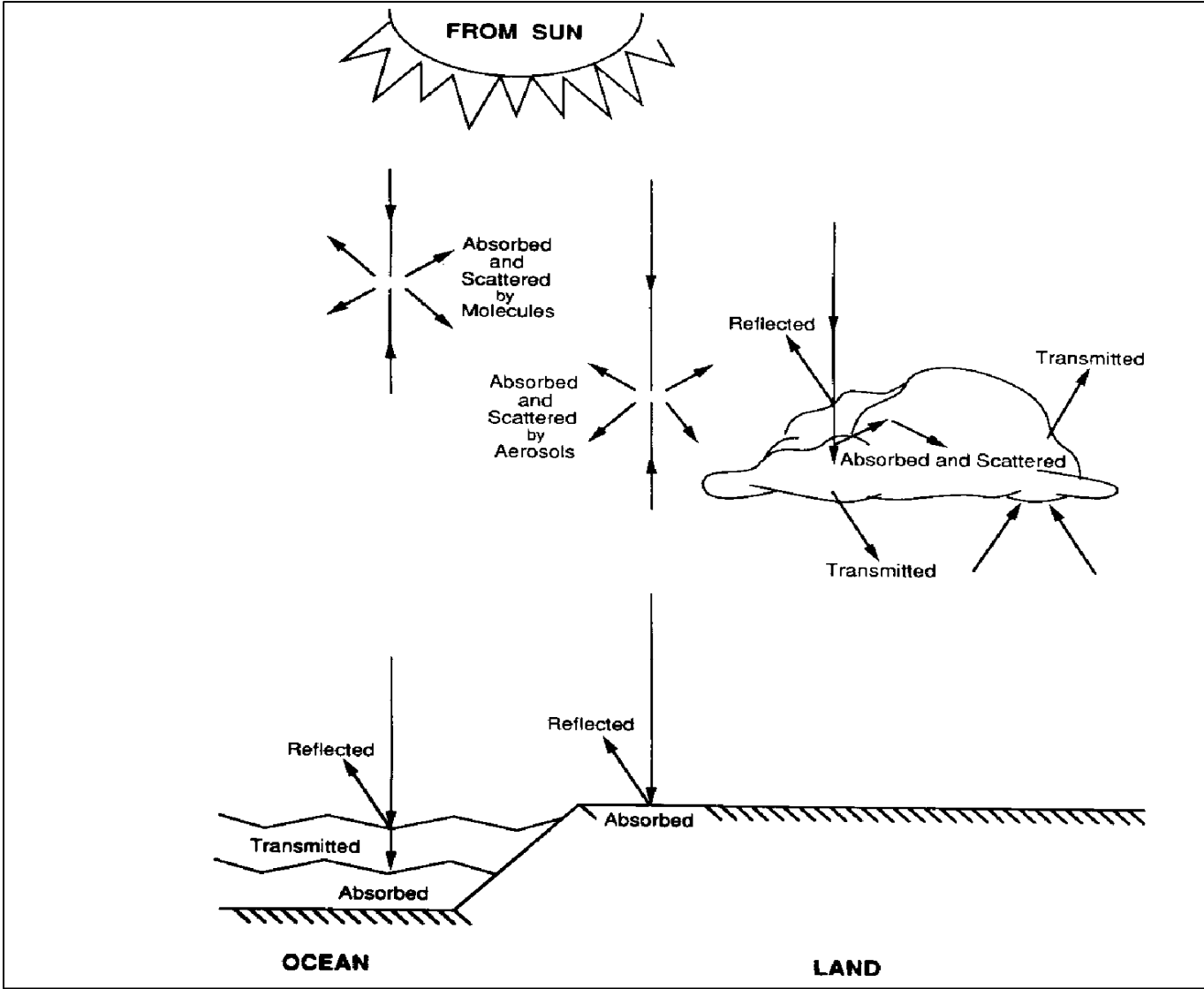
Capacità disperdente dell'atmosfera



Necessità di:

Misurare le caratteristiche del PBL
Simularle numericamente

La Forzante Solare nelle ore diurne



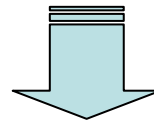
Bilancio Radiativo Superficiale

$$R_N = R_G - \alpha R_G + I \downarrow - I \uparrow$$

$$I \uparrow = \sigma \cdot T_{s,s}^4$$

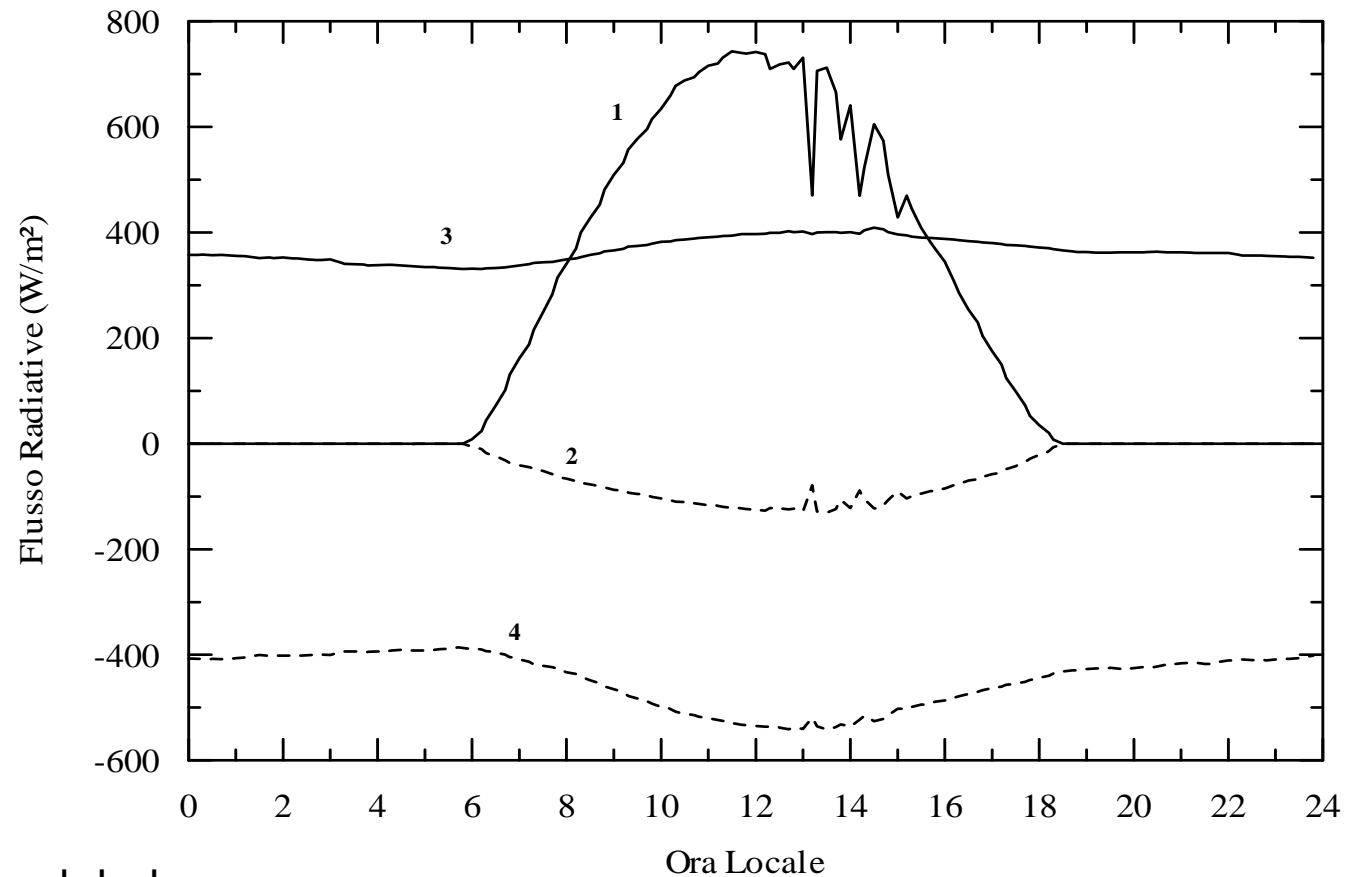
$$I \downarrow = \sigma \cdot T_{s,sky}^4$$

R_N rappresenta la disponibilità di energia all'interfaccia Aria-Suolo



La natura del suolo determina l'utilizzo di questa disponibilità energetica

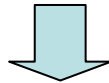
Bilancio Radiativo Superficiale



- 1 Radiazione solare globale
- 2 Albedo
- 3 Infrarosso dal cielo
- 4 infrarosso terrestre

Bilancio Energetico Superficiale

Una porzione (G) viene trasmessa per conduzione al suolo



Rimane disponibile la quantità di energia

$$R_N - G$$

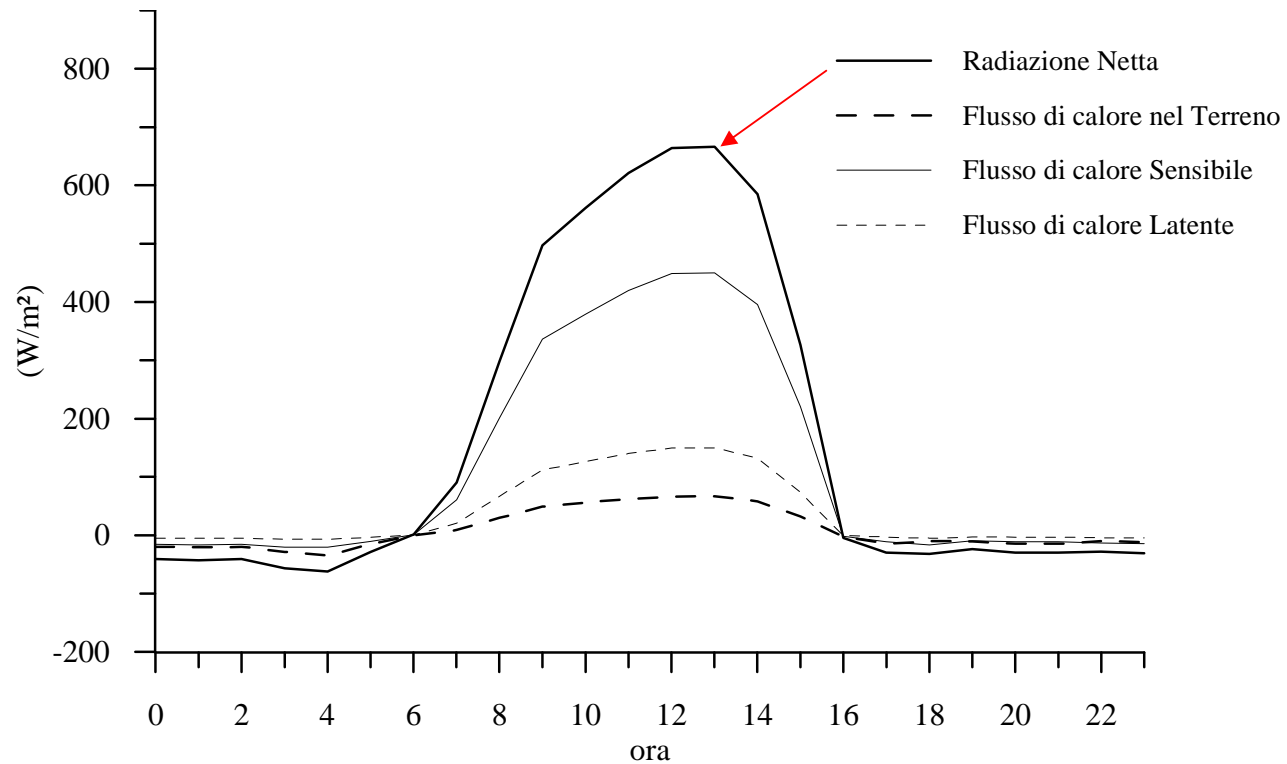
Una parte costituisce l'energia necessaria per l'evaporazione dell'acqua superficiale (Flusso Turbolento di calore latente H_E)

Una parte viene restituita all'atmosfera e si trasforma in moti turbolenti (Flusso Turbolento di calore sensibile H_0)

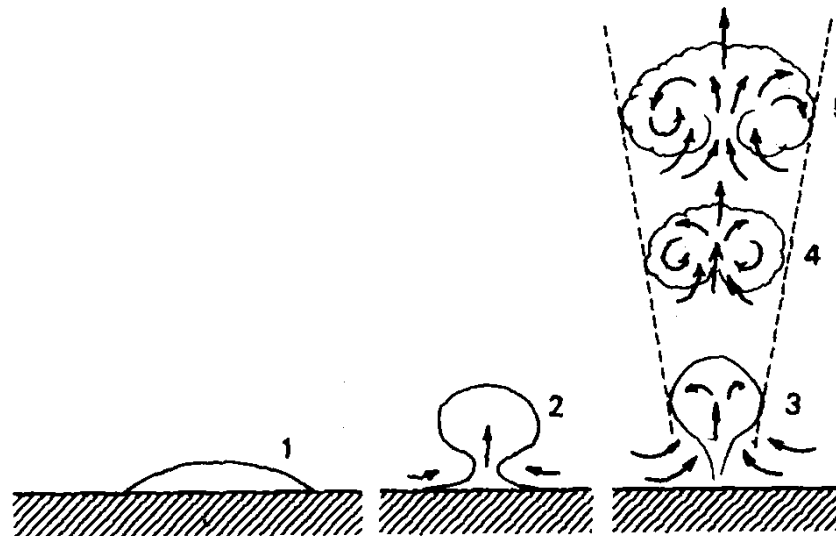
$$R_N - G = H_E + H_0$$

Bilancio Energetico Superficiale

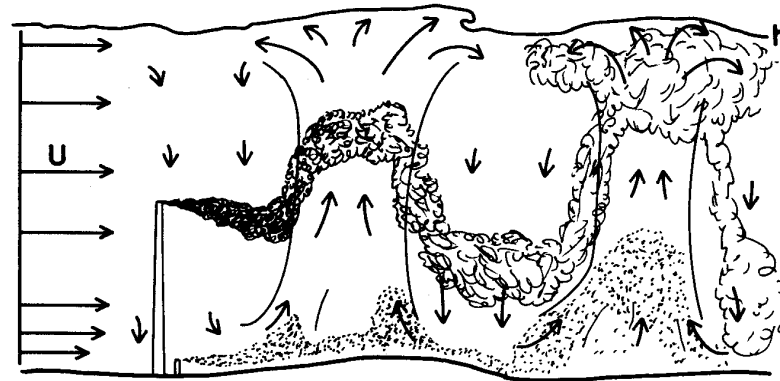
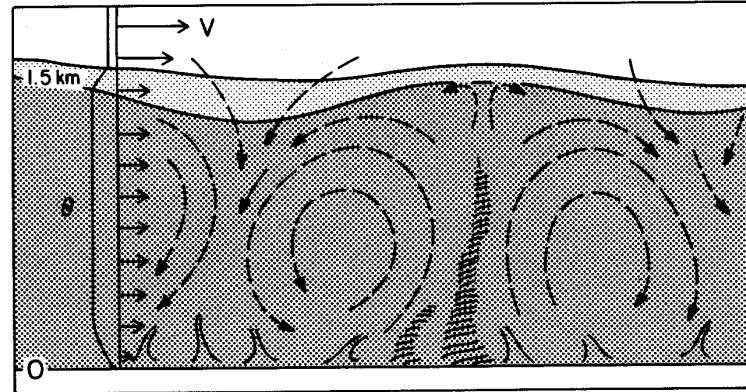
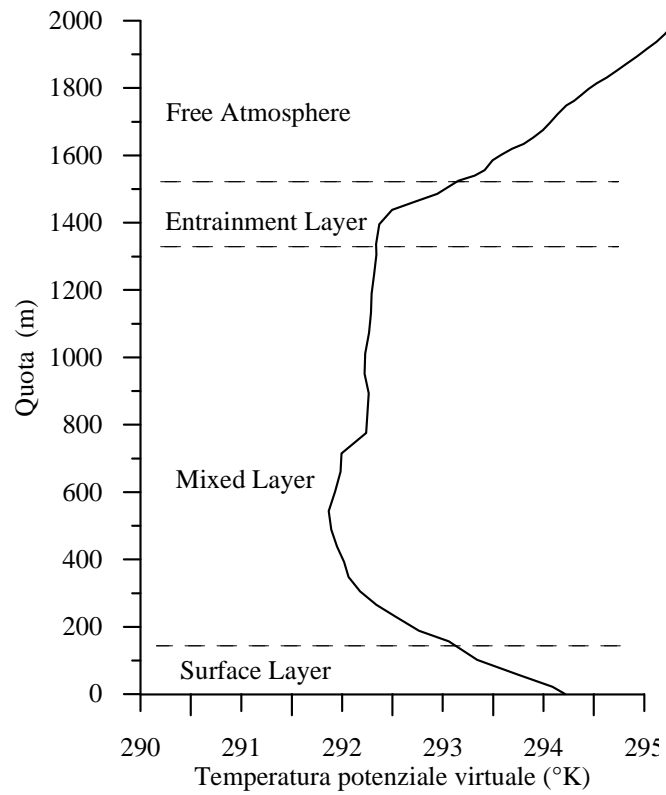
$$R_N - G = H_0 + H_E$$



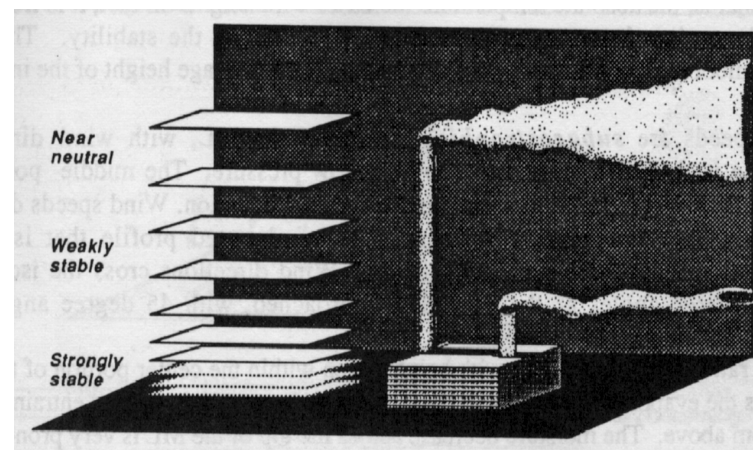
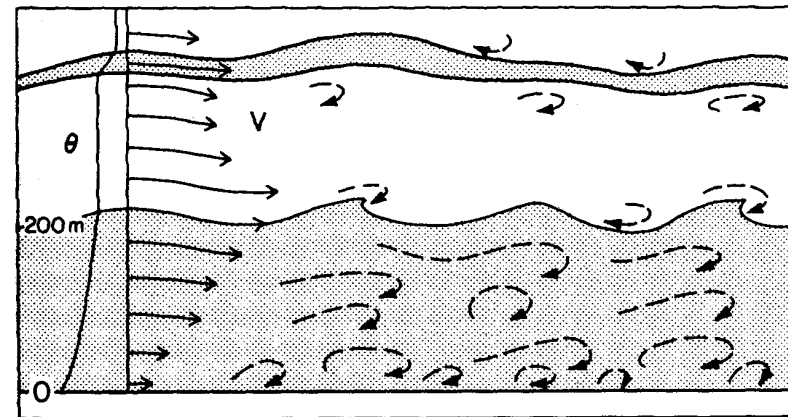
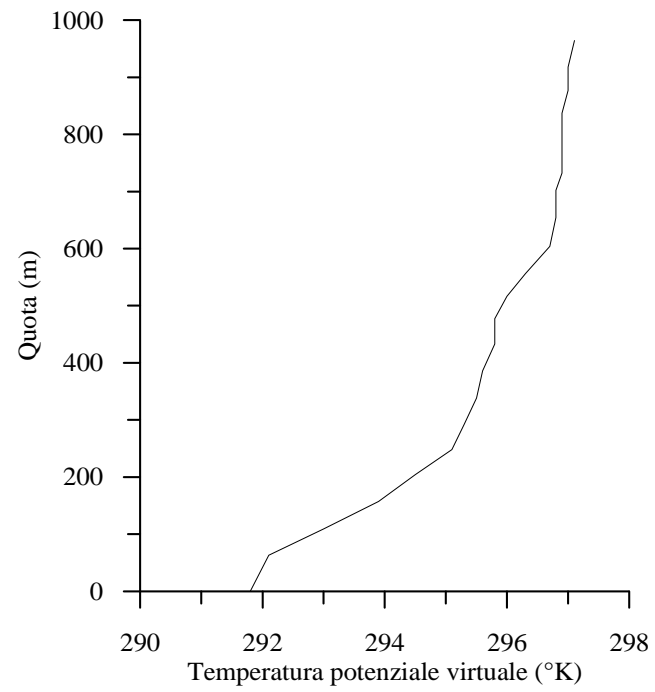
Meccanismo a Bolle di Oke per il Flusso Turbolento di Calore Sensibile



Situazioni Convettive



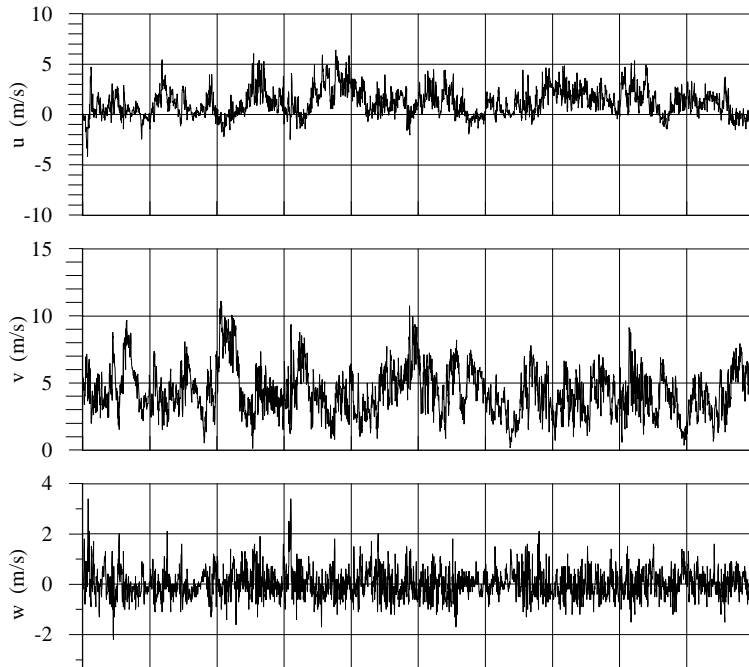
Situazioni Stabili



II PBL in Sintesi

PBL \Rightarrow Strato inferiore della Troposfera a diretto contatto col suolo

Caratteristiche particolari



Ogni variabile caratteristica presenta una spiccata variabilità con lo spazio e con il tempo

Turbolenza del PBL

Se si misurano le tre componenti del vento e la temperatura con sensori a risposta rapida si vede che:



Le variabili presentano un andamento abbastanza regolare cui si sovrappongono irregolarità elevate che paiono "rumore" con caratteristiche di un segnale casuale.



Segnale = andamento medio regolare + fluttuazioni irregolari
(turbolente)

Caratteristica esteriore rilevante della turbolenza nel PBL ed in tutti i fluidi turbolenti di interesse geofisico.

La quantificazione della Turbolenza deve essere necessariamente dedotta dall'**analisi delle fluttuazioni (irregolarità)** contenute nel segnale.

Ipotesi di Reynolds

Ogni segnale meteorologico è la sovrapposizione di un andamento medio regolare e di fluttuazioni turbolente apparentemente casuali aventi media nulla.

$$A(t) = \bar{A} + A'(t)$$

Un esempio è la componente u del vento:

$$u(t) = \bar{u} + u'(t)$$

Principali Variabili Caratteristiche della Turbolenza e del PBL

$$u_* = \left(\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2} \right)^{1/4}$$

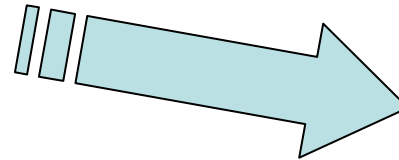
$$H_0 = \rho C_p \overline{w'\theta'}$$

$$H_E = \lambda \overline{a'w'}$$

Estensione Verticale del PBL

$$T_* = -H_0 / (\rho C_p)$$

$$1/L = \frac{kg}{T} \cdot \frac{T_*}{u_*^2}$$



RIASSUMENDO

Condizioni Convettive:

$$u_* > 0 \quad H_0 > 0 \quad T_* < 0 \quad L < 0$$

Condizioni Adiabatiche:

$$u_* > 0 \quad H_0 = 0 \quad T_* = 0 \quad L \rightarrow \pm\infty$$

Condizioni Stabili:

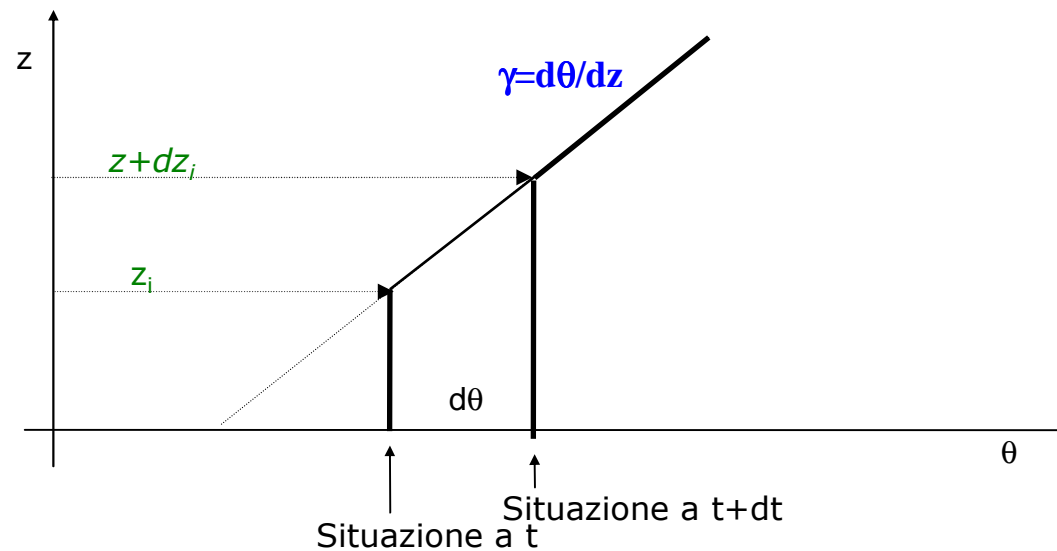
$$u_* > 0 \quad H_0 < 0 \quad T_* > 0 \quad L > 0$$

Modello Gryning-Batchvarova

modello termodinamico

1. *calore dal suolo*;
2. *no calore dall'entrainment* (ipotesi di encroachment);
3. *no turbolenza meccanica*.

$$z_i(t_2) = \sqrt{z_i^2(t_1) + \frac{2}{\gamma} \cdot \frac{H}{\rho \cdot C_p} \cdot (t_2 - t_1)}$$



Modello Gryning-Batchvarova

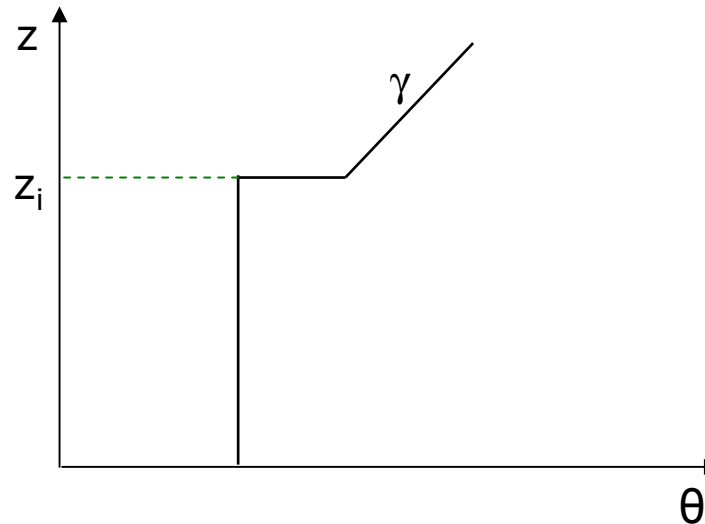
modello termodinamico

en.potenziale + en.cinetica = en.convettiva + en.meccanica

Entrainment

Turbolenza

$$\left\{ \frac{z_i^2}{(1+2A)z_i - 2BkL} + \frac{Cu_*^2 \bar{\theta}}{\gamma g [(1+A)z_i - BkL]} \right\} \cdot \left(\frac{dz_i}{dt} - w_h \right) = \frac{(\overline{w'\theta'})_s}{\gamma}$$



Informazioni del PBL che è necessario ottenere

Distribuzione al suolo (Campo 2D):

Radiazione Netta, cioè la disponibilità energetica esistente all'interfaccia aria suolo;

Flusso di calore nel suolo, cioè la porzione di energia disponibile catturata dal suolo e trasmessa alla vegetazione;

Friction velocity, cioè la forzante meccanica della turbolenza dell'intero *PBL*;

Flusso turbolento di calore sensibile, cioè la forzante convettiva della turbolenza del *PBL*;

Flusso turbolento di calore latente, cioè l'entità dell'evapotraspirazione, termine che costituisce il *link* con il bilancio idrico superficiale.

Distribuzione spaziale (Campo 3D):

Vettore vento medio, cioè delle sue tre componenti medie;

Temperatura (potenziale) media dell'aria;

Umidità media dell'aria;

Deviazione standard delle componenti streamline del vento σ_u , σ_v e σ_w ;

Deviazione standard della temperatura potenziale;

Energia Cinetica Turbolenta,

Dissipazione dell'energia cinetica turbolenta,

Relazioni base del Modello Matematico del PBL

- *legge di conservazione della massa*
- *legge di conservazione della quantità di moto*
- *legge di conservazione dell'entalpia*
- *equazione dei gas perfetti*

(Per semplicità non si considera l'acqua liquida e le sostanze inquinanti presenti nel PBL)

1. Conservazione della massa

Nell'ipotesi di fluido incomprimibile:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

In questa ipotesi la relazione differenziale è di tipo diagnostico, cioè non presenta una dipendenza differenziale dal tempo.

Conservazione della Quantità di Moto

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3} \cdot g + f_c \cdot \varepsilon_{ij3} \cdot u_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial^2 x_j}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_c v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f_c u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\}$$

Conservazione dell'Entalpia

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = v_{\theta} \left\{ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right\} + \text{Source / Sink}$$

Conservazione del vapor d'acqua

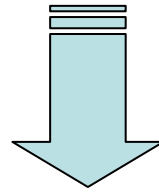
$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = v_q \left\{ \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right\} + \text{Source / Sink}$$

Legge dei Gas Perfetti

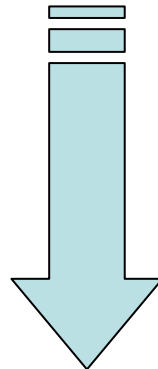
$$p = \rho RT$$

variabili istantanee

(sistema chiuso ma non conosciamo le condizioni iniziali e al contorno)



Ipotesi di Reynolds



Legge di Conservazione della Massa

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

Legge di conservazione della Quantità di Moto

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = f_c v - \left\{ \frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right\}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -f_c u - \left\{ \frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \right\}$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -g - \left\{ \frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'w'}{\partial z} \right\}$$

Legge di Conservazione dell'Entalpia

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = - \left\{ \frac{\partial \bar{\theta}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\theta}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\theta}'w'}{\partial z} \right\} + Source / Sink$$

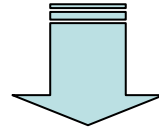
Legge di Conservazione del vapor d'acqua

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = - \left\{ \frac{\partial \bar{q}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{q}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{q}'w'}{\partial z} \right\} + Source / Sink$$

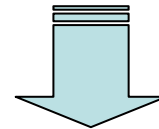
Legge dei Gas Perfetti

$$p = \rho R \bar{T}$$

sistema di equazioni differenziali non chiuso

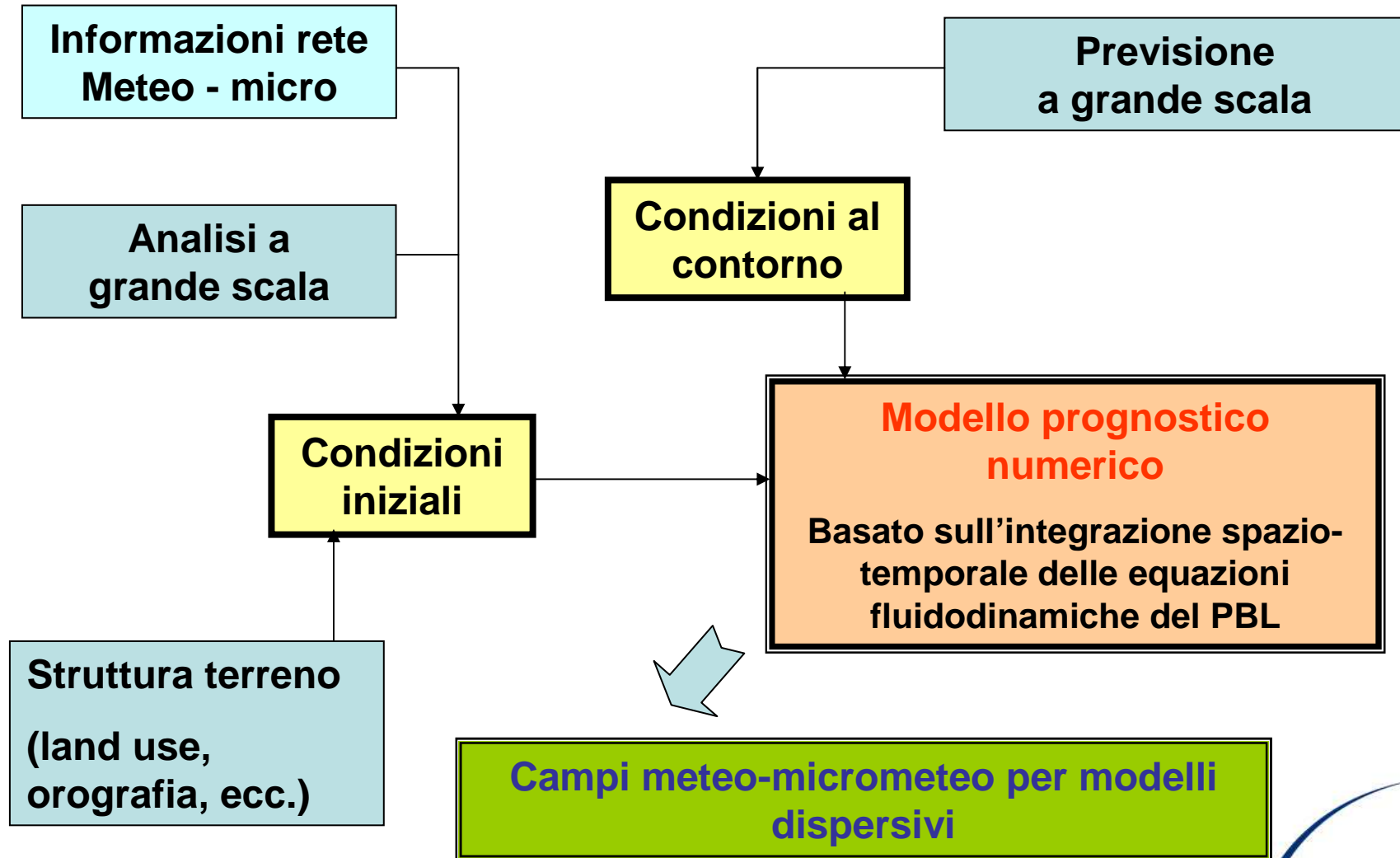


Schemi di chiusura



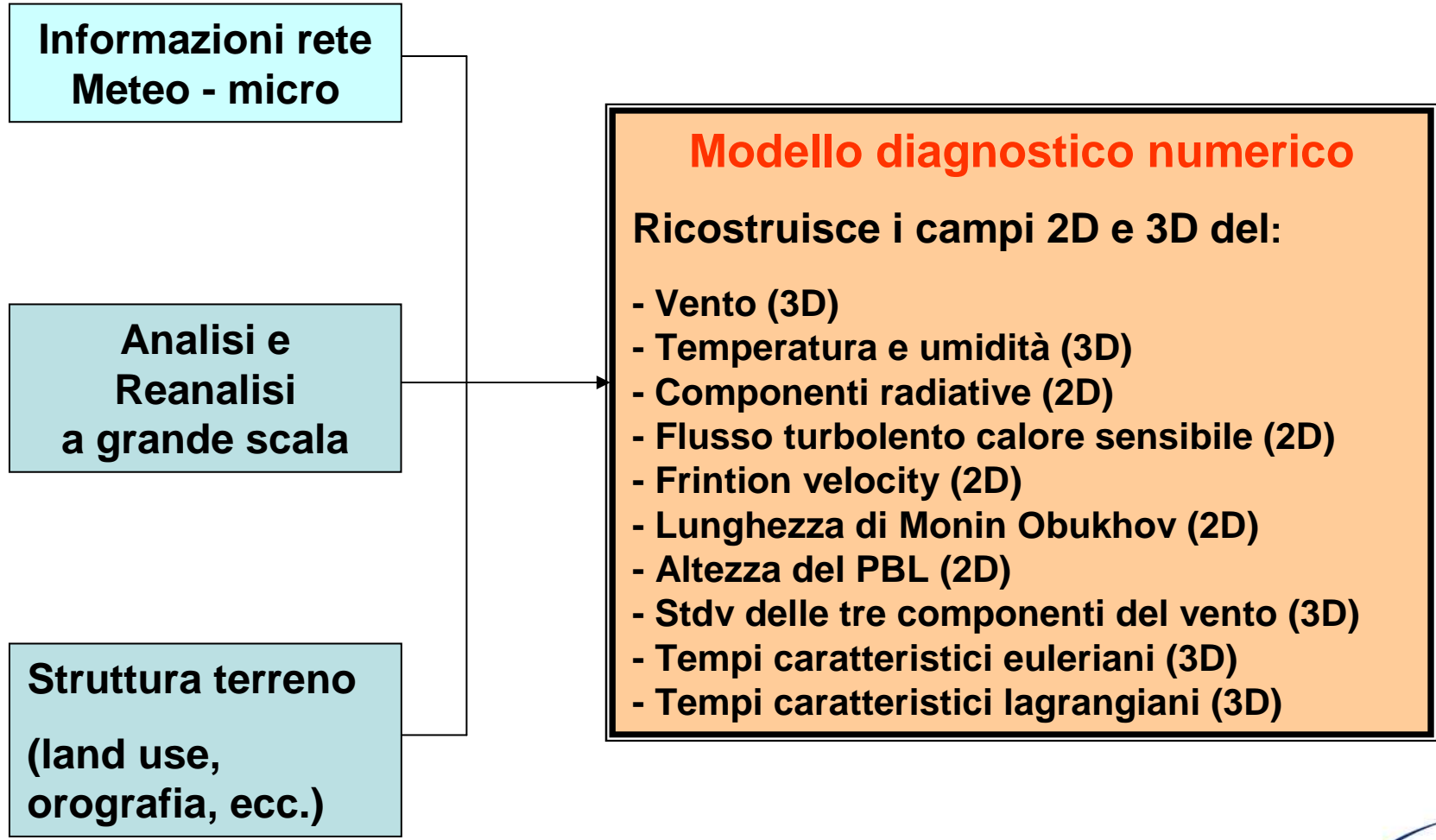
CHIUSURA K (I ordine)

Modelli Meteorologici Prognostici Numerici



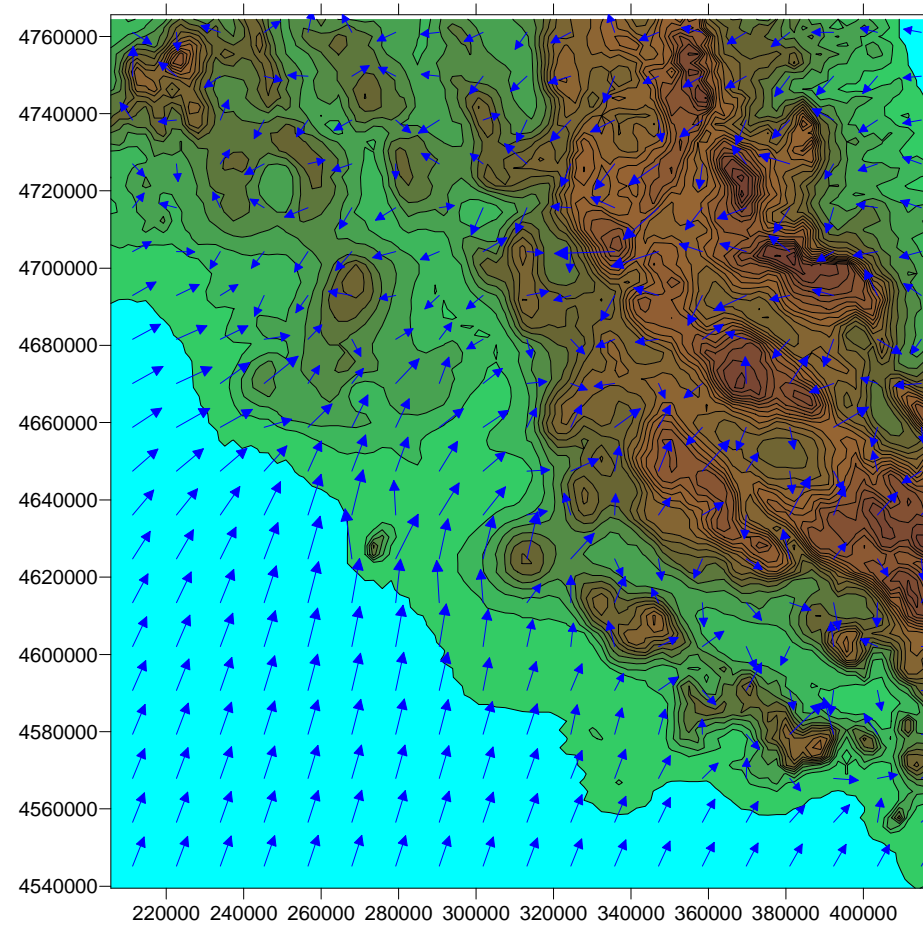
Modello Meteorologico Numerico Diagnostico

- ➔ **E' il modello meteorologico numerico tridimensionale più semplice ed economico**
- ➔ **E' basato prevalentemente sulle misure meteorologiche e micrometeorologiche raccolte dalla rete**
- ➔ **Considera un numero limitato di leggi fisiche (la divergenza nulla del campo di vento e le leggi di similarità)**
- ➔ **Tiene conto direttamente dell'orografia del territorio**
- ➔ **Con tali misure (e con osservazioni da remote sensing e/o radiosondaggi, se disponibili) è in grado di effettuare analisi e ricostruzioni**
- ➔ **Abbinato a previsioni numeriche a grande scala, può fare il down-scaling delle stesse e quindi fornire previsioni di prima approssimazione**



Ricostruzione Campo di Vento

Ricostruzione campo nel SL con algoritmo 3D



Temperatura dell'aria al suolo

