



.Meteorologia e Micrometeorologia per l'inquinamento atmosferico

2011

Parte 2

Elaborazioni Primarie dei Dati e Stima dei Parametri del PBL

*dott. Roberto Sozzi
dott. Andrea Bolignano*

1. Elaborazione Primaria dei Dati

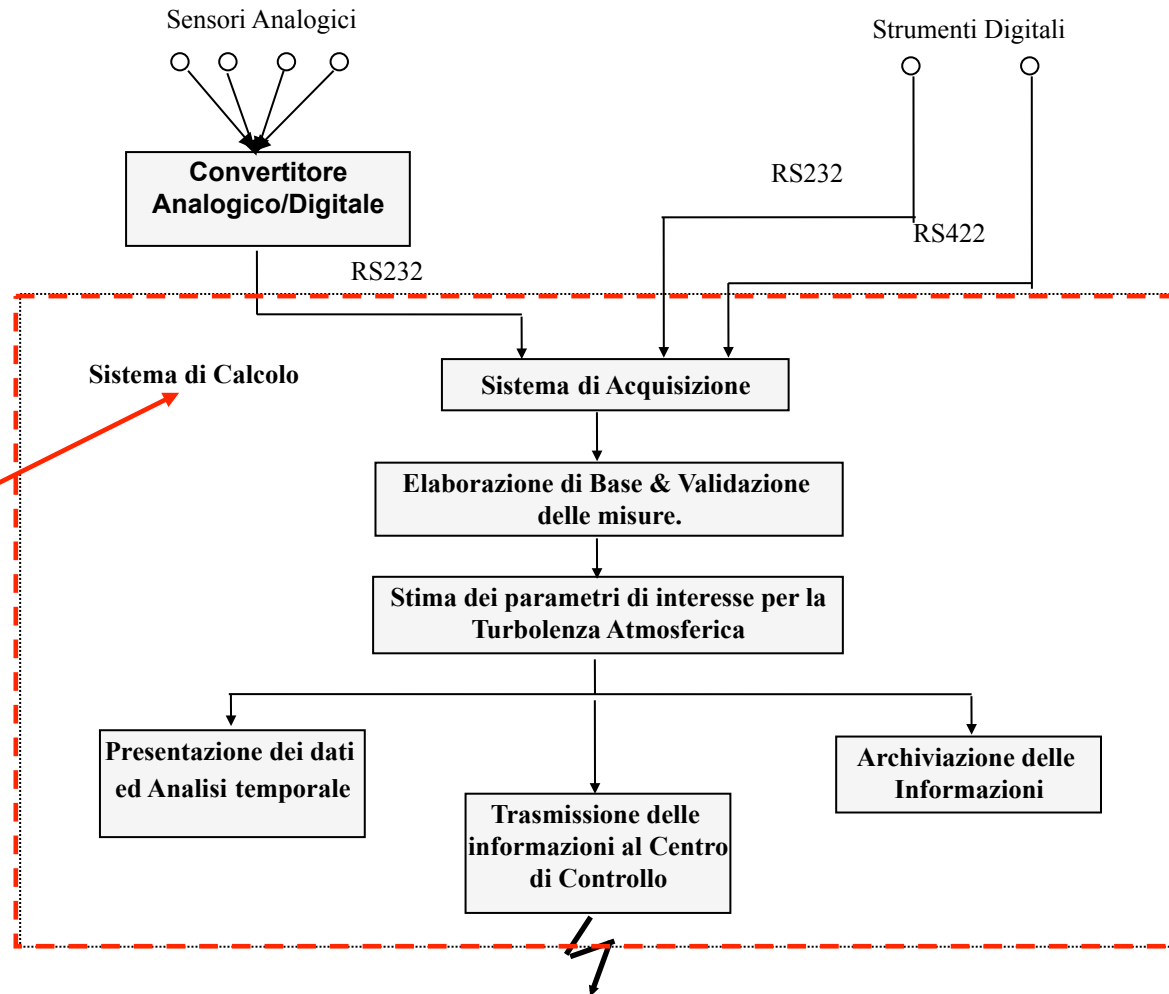
Sensore + Catena di Misura associata
=
Misura di una variabile che caratterizza il PBL

La misura è l'output della catena di Misura (che termina con il Convertitore A/D), quindi **la misura è un numero**

L'**aggregazione** di più sensori e relative catene di misura può dar luogo a sistemi differenti:

- **Stazione meteorologica**: insieme di sensori dedicati alla quantificazione delle principali caratteristiche medie del PBL
- **Stazione micrometeorologica**: insieme di sensori dedicati alla quantificazione dello stato del PBL e della sua turbolenza
- **Stazione di monitoraggio della Qualità dell'Aria**: insieme di sensori dedicati alla quantificazione della presenza media in aria di sostanze (gas e/o particelle) potenzialmente pericolose per la salute umana.

Esempio di Stazione Micrometeorologica



Ora studiamo
come è fatto il
Sistema di
Calcolo

Il **Sistema di Calcolo** è l'elemento intelligente della Stazione di Misura ed in sostanza è costituito da:

- un **Computer** dal punto di vista HW e
- da un **Programma di Elaborazione** dal punto di vista SW.

Funzioni del Programma di elaborazione:

- decidere quando acquisire le misure istantanee dei sensori
- realizzare il Controllo di Qualità primario delle misure
- decidere come e quando effettuare le elaborazione primarie dei dati istantanee provenienti dai differenti sensori
- realizzare un nuovo controllo di qualità dei dati elaborati
- decidere come e quando stimare i parametri derivati (es. I parametri caratteristici della turbolenza del PBL)
- decidere come e quando fornire output (presentazioni), immagazzinare localmente i dati e le elaborazioni e trasmetterle a distanza

L'**acquisizione delle misure** dai **sensori digitali** (normalmente a risposta veloce) e da **sensori analogici** (normalmente a risposta lenta) richiede la **definizione di 4 parametri**:

- 1 Frequenza di campionamento dei sensori analogic f_a**
(cioè quanto frequentemente tali sensori devono essere interrogati). Normalmente tali sensori sono a risposta lenta ed f_a sta nell'intervallo 1 – 0.1 Hz
- 2 Frequenza di campionamento dei sensori digitali f_d**
(quasi sempre si tratta di sensori a risposta rapida). Normalmente f_d sta nell'intervallo 10-20 Hz e conviene che sia un multiplo intero di f_a ;

- 3 Tempo di mediazione T** che è l'intervallo temporale rispetto al quale vengono realizzate le elaborazioni primarie delle misure *istantanee* (medie, varianze, covarianze, ecc.). Normalmente T si colloca nell'intervallo 900-3600 secondi per le stazioni meteorologiche e micrometeorologiche e nell'intervallo 1h – 24 h per le stazioni di qualità dell'aria.

Per esempio, se $f_a = 1$ Hz e $f_d = 10$ Hz, ogni T secondi avremo a disposizione:

$N_a = T \cdot f_a$ misure istantanee da ogni sensore analogico

$N_d = T \cdot f_d$ misure istantanee da ogni sensore digitale

- 4 Il periodo di trasmissione T_t** dei dati e delle elaborazioni ad un eventuale Centro di Controllo.
 T_t deve essere un multiplo intero di T

Il Programma di Elaborazione opera sulla base di questi 4 parametri di controllo



Dal punto di vista SW, il **Sistema di Acquisizione** dei dati è un Ciclo Infinito che:

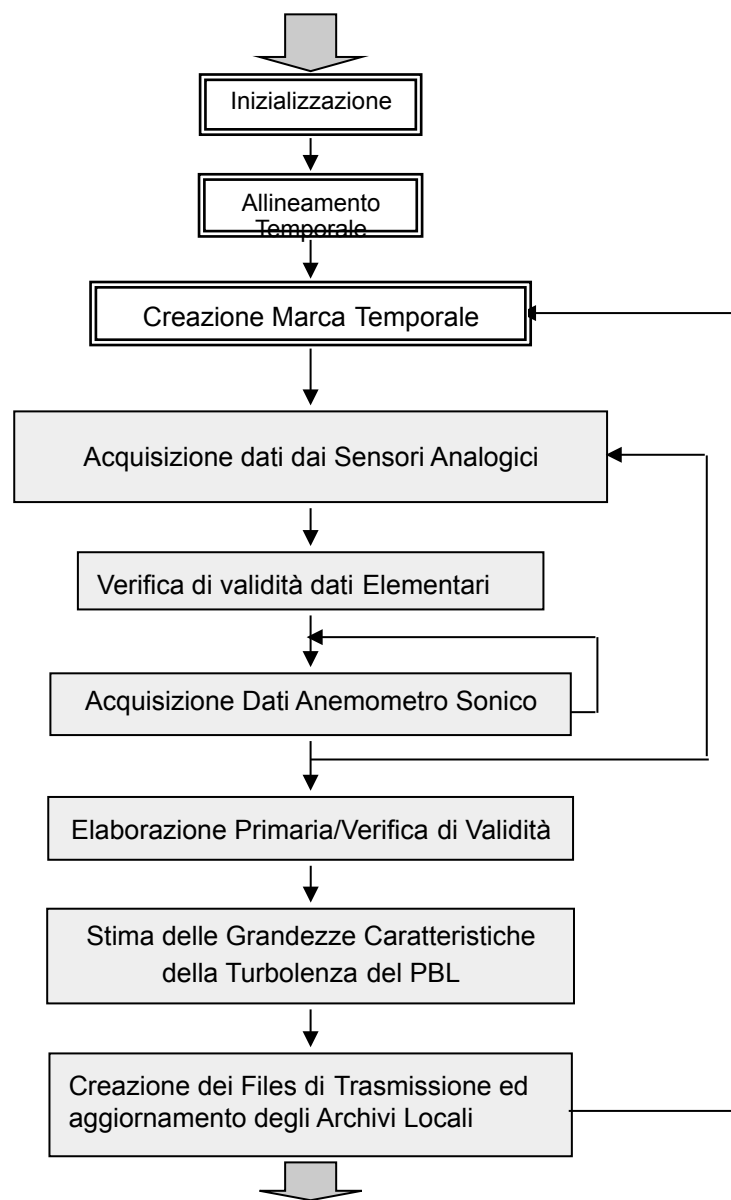
Passo 1: ad ogni intervallo di tempo $1/f_a$ acquisisce le misure istantanee dai sensori analogici;

Passo 2: ad ogni intervallo di tempo $1/f_d$ acquisisce la misure dai sensori digitali

Passo 3: si ripetono i passi 1 e 2 finchè si giunge al termine del periodo di mediazione T

Passo 4: si realizza il calcolo dei parametri di interesse (medie varianze e covarianze)

Passo 5: ad ogni periodo T_v le misure elementi ed i parametri calcolati vengono invisati al centro di Controllo.



Quando il Sistema di Acquisizione **acquisisce un dato elementare** da un sensore, immediatamente **trasforma questo numero** in **un valore della variabile misurata dal sensore** (es. Una variabile meteorologica).

Il **primo problema** che si incontra è quello di **decidere se questo valore è una misura vera oppure è il risultato di interferenze incontrate lungo la catena di misura** (rumore elettronico, variazioni nella tensione di alimentazione, interferenze elettromagnetiche, malfunzionamenti del sensore o di altre componenti della catena di misura)

In pratica, si deve decidere se un dato elementare è una misura o un errore.



Controllo di Qualità del dato

In particolare, è necessario verificare che:

- **I dati abbiano senso fisico** (per esempio una temperatura di 9000°C o una pressione di 0.1 mb non ha senso fisico se sono riferiti al PBL).
Al di là della ragione per cui essi hanno assunto questi valori (es. problemi nella trasmissione), **essi non devono essere considerati misure** e per poterli individuare nell'elaborazione primaria (calcolo di medie, varianze e covarianze) **ad essi deve essere attribuito un valore (marca) convenzionale di valore errato** facilmente individuabile (per es. -9999.99, valore che nessuna variabile meteorologica o chimica potrà mai avere nel PBL)
- **i dati abbiano senso fisico nel contesto di misura** (per esempio una temperatura dell'aria di -50°C a Città del Messico o una velocità del vento di 100 m/s a Milano).
Queste situazioni anomale (anch'esse dovute a errori lungo la catena di misura) a prima vista verosimili, sono difficili da individuare e **richiedono una conoscenza climatologica** del sito in cui si effettuano le misure. Anche in questo caso ad esse va attribuito il valore convenzionale di errore (es. -9999.99)

Elaborazione Primaria delle Misure

Sensore \Rightarrow Produce misure ad una ben precisa **frequenza di campionamento** f_c (Hz, misure al secondo) che devono essere impiegate nella **stima dei parametri di interesse** (valori medi, varianze e covarianze) relativamente ad un ben preciso **periodo di mediazione T** (secondi)

Numero di misure nel periodo di mediazione = $f_c \cdot P$

Es.

$f_c = 0.1 \text{ Hz} \Rightarrow 1 \text{ misura ogni } 10 \text{ s}$

$P = 1 \text{ ora} = 3600 \text{ s}$

Numero di misure in 1 ora = $f_c \cdot P = 0.1 \cdot 3600 = 360$

Grandezze scalari

(Temperatura, umidità, pressione, radiazioni, concentrazione di sostanze in aria, ecc.)

N = numero di misure nel periodo di mediazione **T**

T_i generica misura ottenuta al tempo **t_i**, **i=1,2,...,N**

Valore medio

$$\bar{T} = 1/N \sum_{j=1}^N T_j$$

Varianza

$$\sigma_T^2 = 1/(N-1) \sum_{j=1}^N [T_j - \bar{T}]^2$$

Covarianza tra misure **x_i e **y_i****

$$\overline{x'y'} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(x_j - \bar{x}) \cdot (y_j - \bar{y})]$$

N.B. Le varianze e le covarianze hanno senso solo se le misure provengono da sensori con caratteristiche dinamiche sufficienti.

Velocità e direzione del vento

Punto di vista vettoriale

Velocità Media del Vento

$$V_{vet} = \sqrt{\left\{ \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_{xj} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_{yj} \right)^2 \right\}}$$

Direzione Media di provenienza del Vento

$$\overline{Dir}_v = \tan^{-1} \left(\left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_{xj} \right\} / \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_{yj} \right\} \right)$$

Deviazione Standard della direzione del Vento

$$\sigma_{Dir1} = \text{sen}^{-1}(\varepsilon) \cdot [1 + 0.1547 \varepsilon^3]$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left\{ \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{v_{xj}}{\sqrt{(v_{xj})^2 + (v_{yj})^2}} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{v_{yj}}{\sqrt{(v_{xj})^2 + (v_{yj})^2}} \right)^2 \right\}}$$

Questi indicatori statistici (medie, varianze e covarianze, ecc) sono reali o sono invece il risultato di errori che non è stato possibile individuare nel Controllo di Qualità dei dati elementari?



Controllo di Qualità degli indicatori statistici calcolati

Anemometri di tipo meccanico

Per gli anemometri di tipo meccanico non si può fare molto per verificare se le coppe, le eliche o la banderuola non hanno avuto problemi. Solo una calibrazione periodica ed un'adeguata manutenzione consente di evidenziare e risolvere questi problemi.

A volte questi problemi risultano evidenti, soprattutto quando per esempio la velocità del vento permane per molto tempo (2-3 ore) con un valore nullo o quando la direzione del vento resta costante per periodi prolungati.

Termometri

Normalmente i termometri presentano pochi problemi, vista la loro robustezza intrinseca. E' sufficiente verificare che la temperatura media registrata stia in un intervallo climatologico ragionevole.

Igrometri

E' normale che gli igrometri si deteriorino col tempo. Pertanto è necessario una loro manutenzione frequente (6-12 mesi) ed una sostituzione periodica dell'elemento sensibile.

Radiometri Globali

Il funzionamento del radiometro globale dipende dal livello di pulizia della cupola in quarzo che dovrebbe essere pulita settimanalmente. Nonostante ciò, col tempo il sensore può deteriorarsi producendo dati realistici ma non corretti e quindi difficili da individuare.

Una maniera operativa per tener sotto controllo il fenomeno è quella di verificare periodicamente i valori medi di radiazione globale nella maniera seguente:

1. Si costruisca un grafico in cui l'asse x è l'angolo di elevazione solare e l'asse y la radiazione solare media misurata e si costruisca su tale grafico la curva di radiazione solare in assenza di copertura nuvolosa:

$$R_g = (a_1 \sin \Psi + a_2)$$

dove:

$$a_1 = 1098 \text{ W/m}^2$$

$$a_2 = -30 \text{ W/m}^2$$

Ψ è l'angolo di elevazione solare.

L'angolo di elevazione solare può essere ottenuto impiegando la relazione seguente:

$$\sin \Psi = \sin \phi \sin \delta - \cos \phi \cos \delta \cos \left[\left(\frac{\pi t_{utc}}{12} \right) - \lambda \right]$$

dove:

ϕ è la latitudine

λ è la longitudine

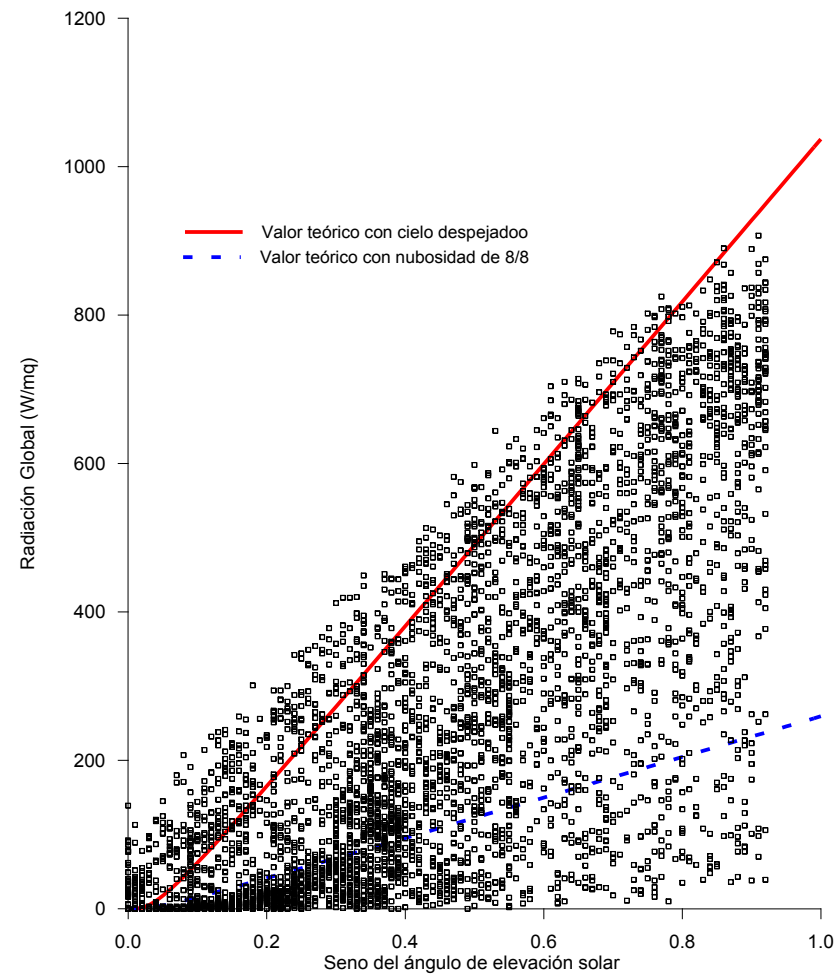
t_{utc} è il Coordinated Universal Time (ora locale – fuso orario)

δ è l'angolo di declinazione solare dato dalla relazione:

$$\delta = 0.409 \cos \left[\frac{2\pi(d - 173)}{365} \right]$$

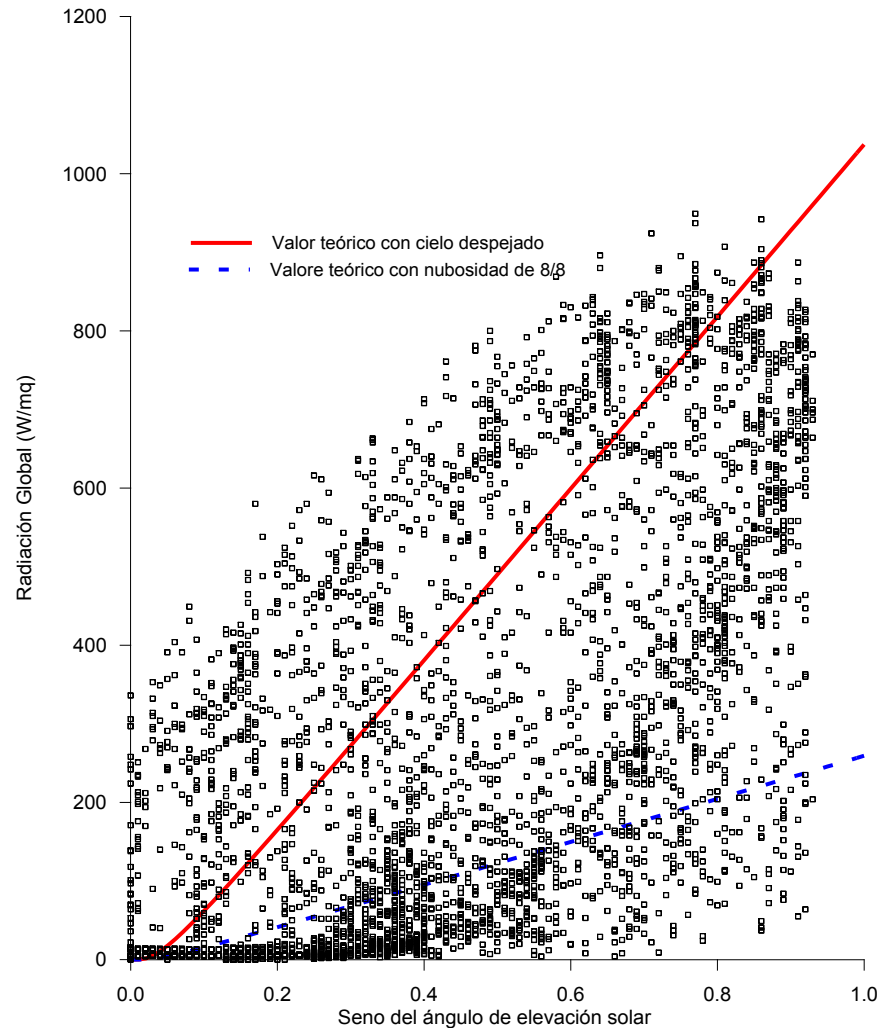
nella quale d è il giorno giuliano.

Se nel medesimo grafico si indicano anche i dati sperimentali ottenuti da un radiometro globale, si hanno due possibili risultati illustrati nelle figure seguenti.



Questo è un radiometro globale che funziona correttamente.

Le sue misure sono ben distribuite in tutto il triangolo inferiore e sono limitate dalla curva di radiazione massima teorica.



Questo è un radiometro globale che funziona in maniera non corretta.

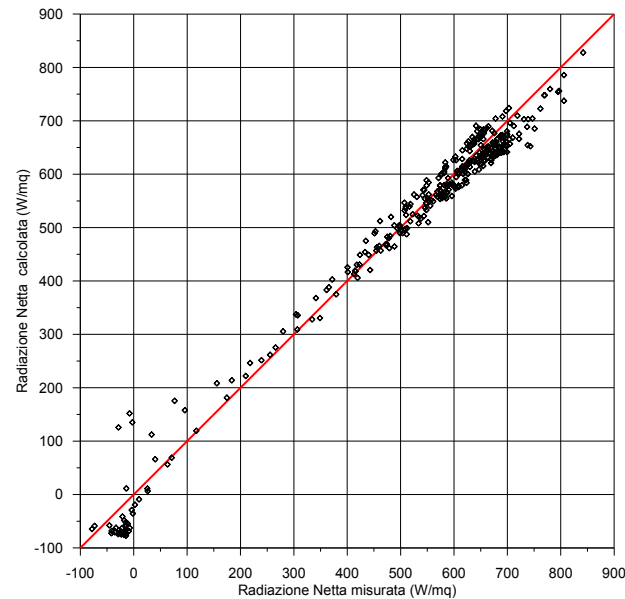
Le sue misure non sono ben distribuite in tutto il triangolo inferiore e non sono limitate dalla curva di radiazione massima teorica.

Radiometro Netto

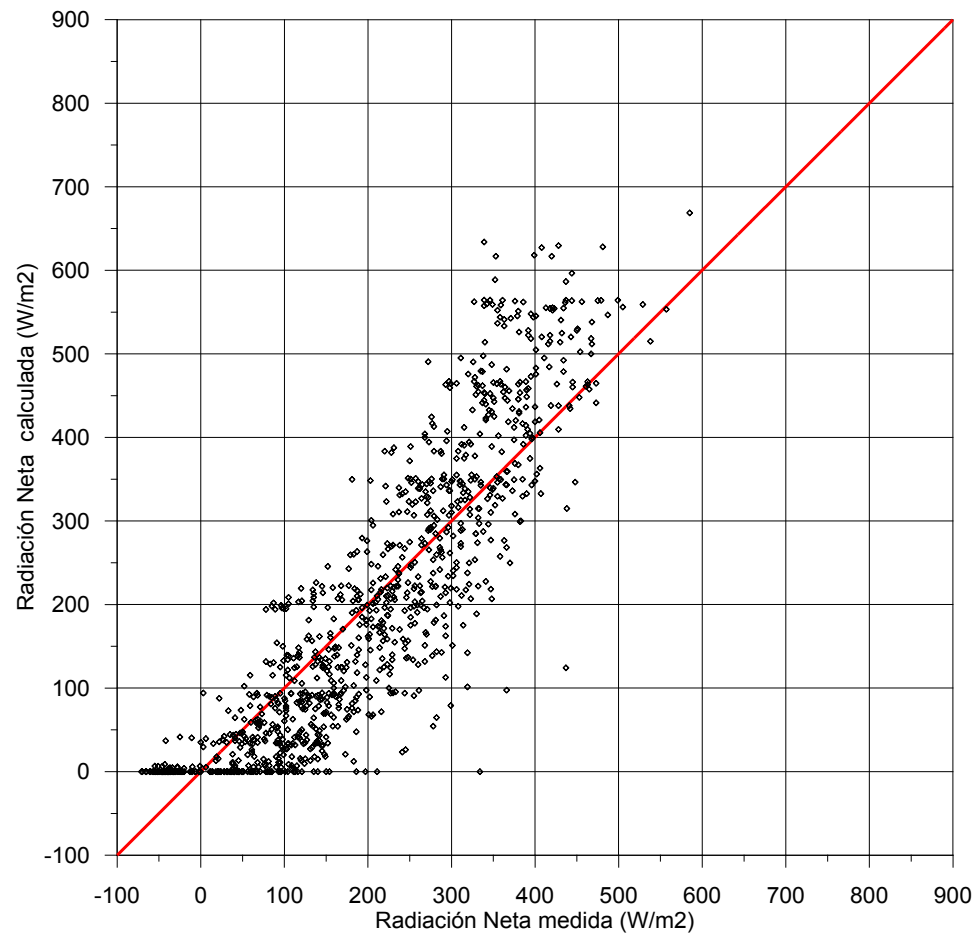
Anche il radiometro netto può presentare malfunzionamenti, più frequentemente di quanto lo possa fare un radiometro globale. Se si calcolano i valori teorici di radiazione netta e li si confrontano con i valori misurati, anche in questo caso è possibile avere una valida indicazione del buon funzionamento o meno del sensore.

Figura 3.9

Postazione meteo di: TEXCOCO (Citta' del Messico)
Confronto tra dati misurati e calcolati della RADIAZIONE NETTA
(in condizioni di cielo sereno).
Periodo di osservazione: 9/6/94 - 27/8/94



Radiometro Netto con ottimo funzionamento



Radiometro Netto con funzionamento dubbio

2. Stima dei Parametri della turbolenza del PBL

Stima dei parametri della turbolenza del PBL.

Parametri che definiscono la turbolenza del PBL:

- ⇒ la forzante meccanica (u_*) e convettiva (H_0)
- ⇒ l'estensione verticale (z_i) del PBL

Per quanto riguarda l'estensione verticale z_i del PBL (**altezza di rimescolamento**), essa può essere stimata:

- dall'esame del profilo di temperatura (radiosondaggi e RASS)
- dall'eco SODAR
- dal modello prognostico presentato in precedenza.

Nel seguito si presenterà una breve introduzione sui metodi per la stima di u_* e H_0 .

Metodo di determinazione diretta: Eddy-Covariance

Questo metodo consente la determinazione diretta della forzante convettiva e di quella meccanica sia nelle condizioni convettive che in quelle stabili.

Strumentazione da utilizzare: misura triassiale del vento e della temperatura a risposta rapida (in pratica ***anemometro sonico***)

Misure da utilizzare:

⇒ nel periodo di mediazione (15÷60 min.) l'anemometro ultrasonico raccoglie a frequenza elevata (10 Hz cioè 10 misure al secondo) N **quadruple** $(u_i, v_i, w_i, \theta_i)_i$, cioè le tre componenti cartesiane della velocità istantanea del vento e la temperatura;

⇒ con esse si stimano le **varianze** e **covarianze** seguenti:

a) Il valore medio delle tre componenti del vento e della temperatura

✘ Impossibile visualizzare l'immagine. La memoria del computer potrebbe essere insufficiente per aprire l'immagine oppure l'immagine potrebbe essere danneggiata. Riavviare il computer e aprire di nuovo il file. Se viene visualizzata di nuovo la x rossa, potrebbe essere necessario eliminare l'immagine e inserirla di nuovo.

$$\overline{u} \quad \overline{v} \quad \overline{w} \quad \overline{T}$$

b) Le varianze e le covarianze delle tre componenti del vento e della temperatura potenziale virtuale (sonica)

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \overline{u})^2$$

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - \overline{v})^2$$

$$\sigma_w^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_i - \overline{w})^2$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \overline{\theta})^2$$

$$\overline{u'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \overline{u}) \cdot (w_i - \overline{w})$$

$$\overline{v'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - \overline{v}) \cdot (w_i - \overline{w})$$

$$\overline{w'\theta'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_i - \overline{w}) \cdot (\theta_i - \overline{\theta})$$

A rigore, il sistema di riferimento cui dovrebbero rifarsi le componenti (u, v, w) dovrebbe essere un:

Sistema di riferimento stream-line, cioè orientato in modo tale che l'asse delle x sia parallelo alla direzione media del vento nel periodo di mediazione (quindi variabile da periodo a periodo).

Viceversa, l'anemometro ultrasonico triassiale è orientato in maniera fissa e alla fine produce (u, v, w) secondo il sistema di riferimento meteorologico.

Pertanto è necessario effettuare delle elaborazioni per ricondurre le misure in un sistema di riferimento prossimo a quello teorico (stream-line)

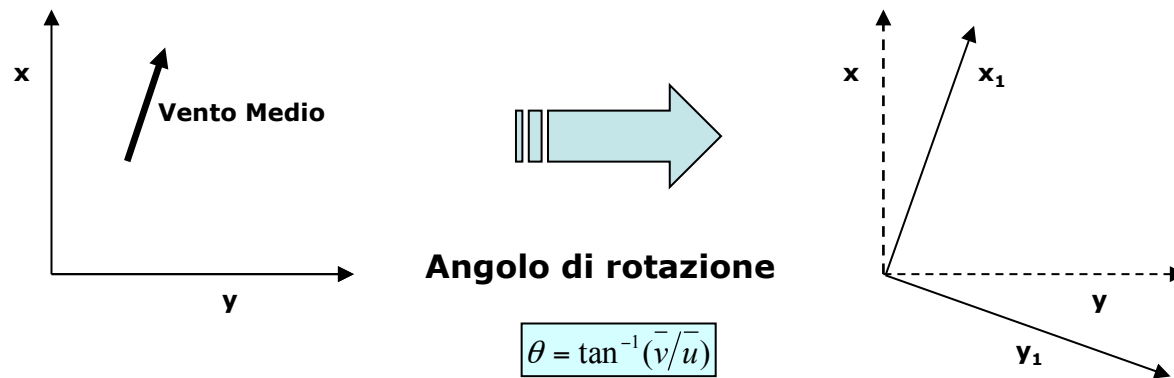
Metodo più comune \Rightarrow Rotazioni degli assi

Metodo delle due rotazioni

- 1) Ruoto il sistema strumentale attorno all'asse z (verticale) in modo che il nuovo sistema di riferimento (1) abbia l'asse x diretto secondo la direzione media del vento.**

Così facendo avrò:

$$\overline{u}_1 = vel = \sqrt{\overline{u}^2 + \overline{v}^2} \quad \overline{v}_2 = 0$$



- 2) Ruoto il sistema di riferimento precedentemente ottenuto (1) attorno all'asse y1 in modo tale che nel nuovo sistema di riferimento la componente media verticale sia nulla.**

Nuovo angolo di rotazione:

$$\Phi = \tan^{-1}(\overline{w}_1/\overline{u}_1)$$

Il valore medio della velocità del vento e le varie covarianze nel sistema ruotato si otterranno dai valori determinati nel sistema di riferimento strumentale nel modo seguente:

$$\overline{U} = \overline{u_2} = \sqrt{\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}}$$

$$\overline{v_2} = \overline{w_2} = 0$$

$$\overline{u'w'} = \overline{u'w'_2} = (\overline{u'w'} \cos \theta + \overline{v'w'} \sin \theta) \cdot (\cos^2 \Phi - \sin^2 \Phi) + \sin \Phi \cos \Phi \cdot \left[\sigma_w^2 - (\sigma_u^2 \cos^2 \theta + \sigma_v^2 \sin^2 \theta + 2\overline{u'v'} \sin \theta \cos \theta) \right]$$

$$\overline{v'w'} = \overline{v'w'_2} = -\left[\overline{u'v'} \cdot (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + \sin \theta \cos \theta (\sigma_v^2 - \sigma_u^2) \right] \sin \Phi + (-\overline{u'w'} \sin \theta + \overline{v'w'} \cos \theta) \cdot \cos \Phi$$

$$\overline{w'\theta'} = \overline{w'\theta'_2} = \overline{w'\theta'} \cos \Phi - \overline{u'\theta'} \cos \theta \sin \Phi - \overline{v'\theta'} \sin \theta \sin \Phi$$

Se al sonico è collegato un sensore agli infrarossi a risposta rapida, assieme alle variabili (u,v,w,θ) verranno acquisite anche:

- la quantità di H_2O

- la quantità di CO_2

presente in aria.

Concettualmente, la covarianza di queste due grandezze con la componente verticale del vento sarà data dalla relazione vista per la temperatura sonica.

Dalla conoscenza dei momenti del primo e secondo ordine nel sistema di riferimento ruotato si ottiene:

⇒ **La friction velocity:**

$$u_* = \sqrt[4]{\overline{u'w'^2} + \overline{u'w'^2}}$$

⇒ **Il Flusso Turbolento di Calore Sensibile:**

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

⇒ **La Lunghezza di Monin-Obukhov:**

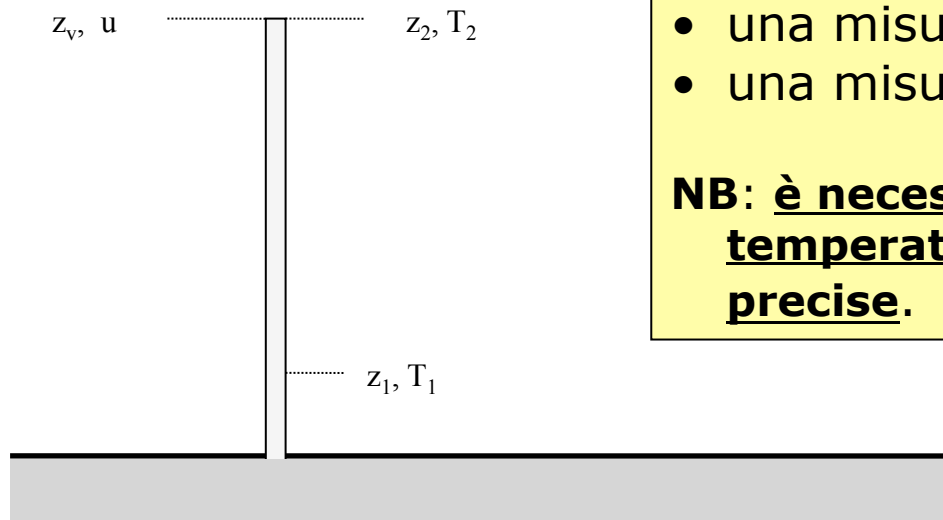
$$L = -\frac{\bar{T}}{kg} \cdot \frac{\rho C_p u_*^3}{H_0}$$

2. Metodo di determinazione indiretta: il metodo dei gradienti

Misure necessarie:

- una stima realistica della rugosità superficiale z_0 ,
- una misura della velocità u del vento alla quota z_v ,
- una misura di temperatura T_1 a z_1 ,
- una misura di temperatura T_2 a z_2

NB: è necessario che le misure di temperatura siano estremamente precise.



$$\theta_1 = T_1 + 0.0098 \cdot z_1$$

$$\theta_2 = T_2 + 0.0098 \cdot z_1$$

Il Metodo parte dalla conoscenza:

- delle **Relazioni di Similarità** per la descrizione del profilo verticale della velocità del vento e della temperatura potenziale
- e dalla definizione dei principali parametri che caratterizzano la turbolenza del SL:

$$u(z_v) = \frac{u_*}{k} \left\{ \ln \left(\frac{z_v}{z_0} \right) - \Psi_M \left(\frac{z_v}{L} \right) \right\}$$

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{T_*}{k} \left\{ \ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) - \Psi_H \left(\frac{z_2}{L} \right) + \Psi_H \left(\frac{z_1}{L} \right) \right\}$$

$$T_* = -\overline{w'\theta'} / u_*$$

$$\frac{1}{L} = - \frac{kg}{(T_m)} \frac{\overline{w'\theta'}}{u_*^3}$$

$$T_m = 0.5(T_1 + T_2)$$

E' un sistema di 5 equazioni (non lineari) in 5 incognite

Dato che:

- il numero di equazioni è pari al numero di variabili,
- la forma funzionale per le Funzioni Universali di Similarità è nota,

il sistema di equazioni, non lineare, è risolubile fornendo **tutti i parametri che caratterizzano la turbolenza del PBL.**

Dopo alcuni passaggi algebrici, da queste equazioni si ottiene anche una relazione funzionale tra il parametro L , la velocità del vento ed il gradiente di temperatura potenziale.

$$L = \frac{T_m u^2}{g \Delta\theta} \frac{\left\{ \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_M\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_H\left(\frac{z_1}{L}\right) \right\}}{\left\{ \ln\left(\frac{z_v}{z_0}\right) - \Psi_M\left(\frac{z_v}{L}\right) \right\}^2}$$

Il problema nella soluzione di questa equazione (o del sistema equivalente) sta nel fatto che la forma funzionale di Ψ_M e Ψ_H è non lineare e dipende dal valore di L , cioè dallo stato della turbolenza che, a priori, non è noto.

La Relazione di Similarità per il Profilo Verticale della Velocità del vento è:

⇒ Se $1/L < 0$

$$\Psi_M = \ln \left[\frac{(1+x^2)}{2} \left(\frac{1+x}{2} \right)^2 \right] - 2 \operatorname{actg}(x) + \frac{\pi}{2}$$

$$x = \left(1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{1/4}$$

⇒ Se $1/L > 0$

$$\Psi_M = -5 z/L$$

La Relazione di Similarità per il Profilo Verticale della Temperatura Potenziale Virtuale è:

⇒ Se $1/L < 0$

$$\Psi_H = 2 \ln \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 16 \frac{z}{L}} \right) \right]$$

⇒ Se $1/L > 0$

$$\Psi_M = -5 \frac{z}{L}$$

Questa metodologia può essere usata anche per ottenere i Flussi Turbolenti di altre variabili di interesse quando non siano disponibili (o realizzabili) sensori veloci per tali variabili da accoppiare all'anemometro ultrasonico triassiale, rendendo quindi impossibile l'impiego della stima diretta dei flussi turbolenti mediante l'Eddy Covariance.

Esempi tipici:

- **Flusso Turbolento di Calore Sensibile: lo si ottiene sostituendo ai due termometri due igrometri a risposta lenta ma precisa**
- **Flusso di altri gas come i terpeni emessi dalla vegetazione e per cui non risultano disponibili adeguati sensori a risposta rapida.**

In tutti questi casi le Funzioni di Similarità da utilizzare sono ancora quelle della temperatura.

Algoritmo Iterativo

Passo 1: se si pone $1/L = 0$ (cioè, come prima approssimazione, si considera una situazione adiabatica per cui Ψ_M e Ψ_H sono nulli), la relazione del profilo di vento e della temperatura potenziale consente una prima stima di u_* e T_* data da

$$u_* = \frac{ku}{\ln(z_v/z_0)} \quad T_* = \frac{\Delta\theta}{\ln(z_2/z_1)}$$

Passo 2: con tali valori di u_* e T_* si ottiene una prima stima di L usando la definizione di tale parametro e della temperatura media.

$$\frac{1}{L} = - \frac{kg}{(T_m)} \frac{\overline{w'\theta'}}{u_*^3}$$

Passo 3: noto L (e il suo segno) è possibile quindi il calcolo di Ψ_M e Ψ_H e quindi una nuova stima di u_* mediante le relazioni:

$$u_* = (k \cdot u(z_1)) / \left\{ \ln\left(\frac{z_v}{z_0}\right) - \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) \right\} \quad T_* = [k(\theta_2 - \theta_1)] / \left\{ \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_H\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_H\left(\frac{z_1}{L}\right) \right\}$$

Passo 4: si ritorni al Passo 2 e si ripeta il procedimento finché il valore di L se stabilizza attorno ad un valore praticamente costante. A questo punto si è ottenuto il **valore finale per la stima di**:

$$u_* \quad T_* \quad L$$

Passo 5: alla fine si calcola il valore del flusso di calore sensibile con la relazione che lo definisce

$$H_0 = \rho C_p \overline{w' \theta'} = -\rho C_p u_* T_*$$

Questo metodo è numericamente stabile e presenta una convergenza molto rapida.

Esempio di una situazione diurna

- **rugosità superficiale = 0.1 m**
- **velocità media del vento = 2 m/s all'altezza di 10 m.**
- **temperatura = 30°C all'altezza di 1 m.**
- **temperatura = 29.1°C all'altezza di 10 m.**

Se si usa questo algoritmo e si registrano le stime ad ogni singola iterazione si ha la situazione seguente

Iterazione	u_* (m/s)	T_* (K)	L (m)	$\overline{w\theta}$ (m/(s K))	H_0 (W/m ²)
0	0.174	-0.141	-16.5	0.024	29
1	0.211	-0.282	-12.2	0.059	71
2	0.218	-0.315	-11.7	0.069	82
3	0.219	-0.320	-11.6	0.070	84
4	0.220	-0.321	-11.6	0.070	84
5	0.220	-0.321	-11.6	0.070	84

Esempio di una situazione notturna

- rugosità superficiale = 0.1 m
- Velocità media del vento = 3 m/s all'altezza di 10 m.
- temperatura = 20°C all'altezza di 1 m.
- temperatura = 20.5°C all'altezza di 10 m.

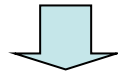
L'algoritmo si sviluppa nel modo seguente:

Iterazione	u_* (m/s)	T_* (°K)	$\overline{w\theta}$	L (m)	$\overline{w'T'}$ (m/(s°K))	H_0 (W/m ²)
0	0.261	0.102		49.7	-0.027	-32
1	0.214	0.073		46.6	-0.016	-19
2	0.211	0.072		46.4	-0.015	-18
3	0.211	0.072		46.4	-0.015	-18
4	0.211	0.072		46.4	-0.015	-18
5	0.211	0.072		46.4	-0.015	-18

3. Metodo di determinazione indiretta: il metodo della ripartizione della Radiazione netta

Misura indispensabile: la Radiazione Netta R_n .

⇒ Se R_n **non** è disponibile ma lo è R_g



$$R_N = \frac{(1-r)R_g + c_1T^6 + c_2N - \sigma T^4}{(1+c_3)}$$

dove:

r è il coefficiente di albedo

c_1, c_2, c_3 sono costanti ($5.31 \cdot 10^{-15}$, 60, 0.12)

σ è la costante di Stefan-Boltzman ($5.67 \cdot 10^{-8}$)

N è la copertura del cielo (0 - 1)

⇒ Se R_g **non** è nota ma lo è solo N , prima si **stima** R_g

Angolo di declinazione solare

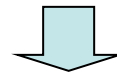
$$\delta = 23.45^\circ \cos \left[\frac{2\pi(d - 173)}{d_y} \right]$$

N.B. d = giorno giuliano

Angolo di elevazione solare

$$\sin \Psi = \sin \Phi \sin \delta - \cos \Phi \cos \delta \left[\left(\frac{\pi \cdot t_{utc}}{12} \right) - \lambda_e \right]$$

Φ è la latitudine,
 λ_c è la longitudine e
 t_{utc} è l'ora di Greenwich



$$R_g = (a_1 \sin \Psi + a_2) \cdot (1 + b_1 N^{b_2})$$

Il **Flusso Turbolento di Calore Sensibile** è pari a:

$$H_0 = \frac{(1 - \alpha) + \gamma/s}{1 + \gamma/s} (R_N - G) - \beta$$

- β è un parametro che vale 20
- α è un parametro dipendente dal tipo di suolo
 - 0.1 per un luogo desertico,
 - 0.5 per luogo arido e città,
 - 0.8 per campi,
 - 1.0 per campi umidi, foreste
 - 1.4 per mare
- G è il flusso di calore nel suolo e vale 0.2 R_n nelle ore diurne e 0.5 R_n nelle ore notturne

$$\gamma/s = \exp \left[\frac{6.42 - (T - 273)}{17.78} \right]$$

N.B. Questo metodo viene utilizzato esclusivamente nelle ore diurne

Esempio diurno 1: foresta equatoriale

$$T = 300 \text{ K}$$

$$R_N = 450 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha = 1$$

Dalle correlazioni si ha che:

$$G = 0.2 \cdot R_N = 90 \text{ W m}^{-2}$$

$$\gamma/s = 0.3143$$

Dalla relazione si ha che

$$H_0 = \frac{(1-1) + 0.3143}{1 + 0.3143} \cdot (450 - 90) - 20 = 66 \text{ Wm}^{-2}$$

Ricordando il **bilancio energetico superficiale** secondo cui

$$H_E = R_N - G - H_0$$

è possibile stimare il flusso turbolento di calore latente H_E usato per l'eva-potraspirazione della vegetazione:

$$H_E = 294 \text{ W m}^{-2}$$

Esempio diurno 2: deserto

$$T = 300 \text{ K}$$

$$R_N = 450 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha = 0.1$$

Dalle correlazioni si ha che:

$$G = 0.2 \cdot R_N = 90 \text{ W m}^{-2}$$

$$\gamma/s = 0.3143$$

Dalla relazione si ha che

$$H_0 = \frac{(1-0.1)+0.3143}{1+0.3143} \cdot (450-90) - 20 = 313 \text{ Wm}^{-2}$$

Ricordando il **bilancio energetico superficiale** secondo cui

$$H_E = R_N - G - H_0$$

È possibile stimare il flusso turbolento di calore latente H_E usato per l'evapotraspirazione del suolo

$$H_E = 47 \text{ W m}^{-2}$$

Una volta noto H_0 , la **friction velocity** la si ottiene dalla soluzione del sistema di equazioni non lineare:

$$u(z_1) = \frac{u_*}{k} \left\{ \ln\left(\frac{z_v}{z_0}\right) - \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) \right\}$$

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

$$\frac{1}{L} = - \frac{kg \overline{w' \theta'}}{(T_m) u_*^3}$$

A tale scopo è possibile impiegare un algoritmo iterativo molto simile a quello presentato per il metodo dei gradienti.

Nelle ore notturne si preferisce usare un altro metodo:

$$T_* = 0.09(1 - 0.5N^2)$$

$$u_* = C_{DN} u \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} B \right\}$$

$$B = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{2U_0}{C_{DN}^{1/2} u} \right)^2 \right]^{1/2} & \text{se è } > 0 \\ 0 & \text{in caso contrario} \end{cases}$$

$$C_{DN} = k / \ln(z_u / z_0)$$

$$U_0^2 = 4.7 z_u / (kA)$$

$$A = \frac{T_a}{gkT_*}$$

Nota u_* e T_* , H_0 lo si ottiene dalla relazione

$$H_0 = -\rho C_p u_* T_*$$

Stima della Rugosità Superficiale

La rugosità superficiale è quantificata dal parametro z_0 . La sua determinazione richiede la conoscenza della:

- velocità media U del vento ad una quota z
- Friction velocity u_*
- Lunghezza di Monin-Obukhov L

Dalla relazione di Similarità per il profilo verticale della velocità del vento

$$U = \frac{u_*}{k} \cdot \left\{ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) \right\}$$

si ha che z_0 si ottiene dalla relazione

$$z_0 = \frac{z}{\exp\left\{ \frac{kU}{u_*} + \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) \right\}}$$

Esempio

$$U = 1.7 \text{ m/s}$$

$$u^* = 0.25 \text{ m/s}$$

$$z = 10 \text{ m}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$H_0 = 80 \text{ W/m}^2$$

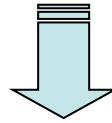
E' facile verificare che $z/L = -0.56$ e che $\Psi_M = 0.79$

Dalla relazione precedente, z_0 vale:

$$z_0 = \frac{10}{\exp\left[\frac{0.4 \cdot 1.7}{0.25} + 0.79\right]} \cong 0.3 \text{ m}$$

NB Per determinare z_0 in un sito specifico e in una direzione è conveniente impiegare numerose misure di anemometro sonico ottenute a differenti condizioni di stabilità, ottenendo per ciascuna una stima distinta di z_0 . Il valore caratteristico del sito sarà il valor medio (o mediano) delle stime trovate.

Se non è possibile realizzare la stima di z_0 con la relazione indicata per mancanza di strumentazione adatta

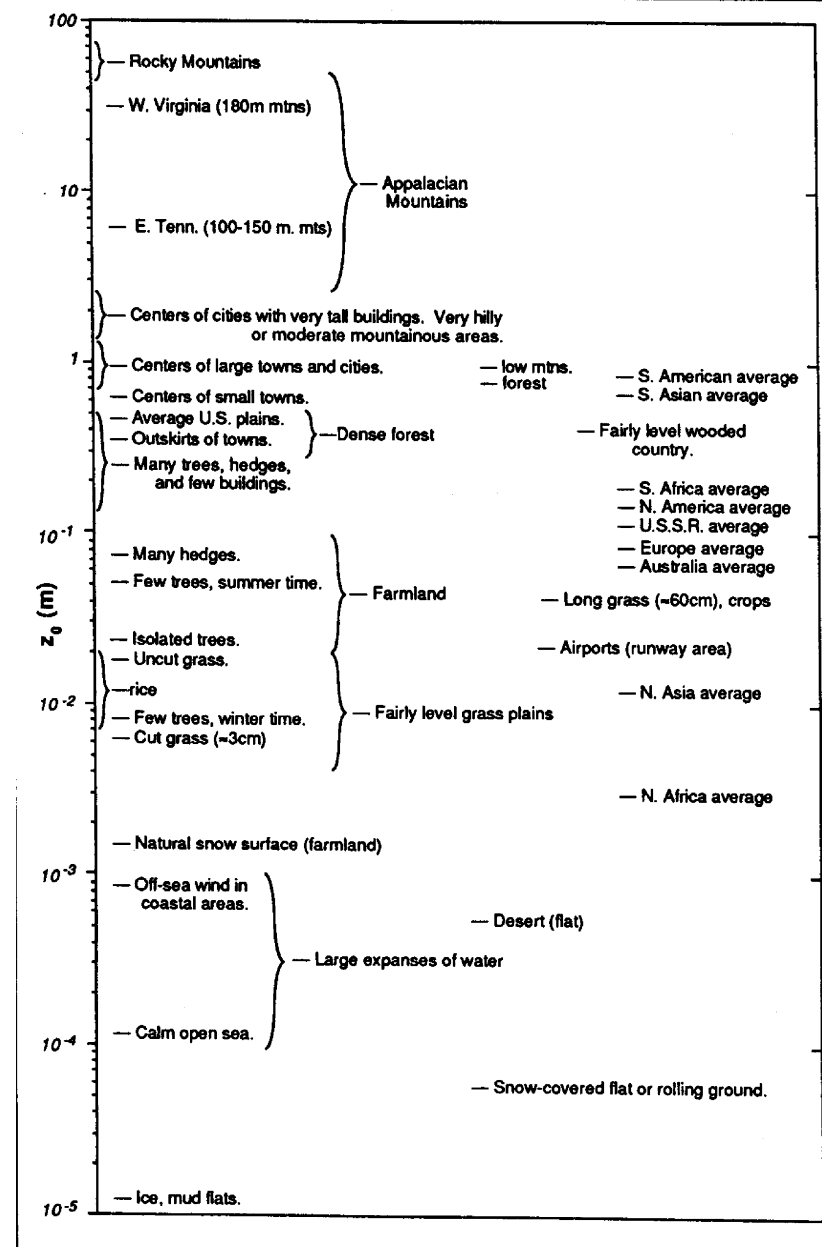


Analisi morfologica del sito



**Stima ottenuta da classificazioni approssimate
desunte da altre campagne di misura**





Stima dell' altezza del PBL z_i

Una volta note:

- la forzante meccanica u_*
- la forzante convettiva H_0

l' unico parametro ancora non stimato è l' altezza del PBL z_i .

Metodo Notturmo

Per ogni ora notturna caratterizzata da un valore $H_0 \leq 0$, si può ottenere una stima di z_i impiegando una delle correlazioni diagnostiche individuate dalle campagne sperimentali, per esempio:

$$z_i = c \cdot u_*^{3/2}$$

dove:

$$c = 2400 \cdot \frac{s^{3/2}}{m^{1/2}}$$

Metodo diurno

Per ogni ora t_i , $i = 1, \dots, N$

t_0 = prima ora con $H_0 > 0$,

t_N = ultima ora con $H_0 > 0$,

si applica la relazione seguente (modello termodinamico di z_i):

$$z_i(t_i) = \sqrt{z_i^2(t_{i-1}) + \frac{2.4}{\gamma} \cdot \frac{H_0(t_i)}{\rho \cdot C_p} \cdot (t_i - t_{i-1})}$$

N.B. L'ora t_0 è l'ultima ora notturna caratterizzata da un valore di z_i pari a $z_i(t_0)$ dato dalla correlazione notturna appena vista. Tale valore costituisce la condizione iniziale per il metodo diurno.

Come abbiamo visto, sia partendo da una stazione meteorologica avanzata (dotata di anemometro ultrasonico triassiale) che da misure di tipo aeronautico è possibile giungere a caratterizzare ogni ora con una stima per:

- la forzante meccanica u_***
- la forzante convettiva H_0**
- l'estensione verticale del PBL z_i**

e quindi anche per tutti gli altri parametri derivati.

Ovviamente, le configurazioni seguenti di stazione meteorologica

- Stazione micrometeorologica (con anemometro ultrasonico)**
- Stazione meteo con gradiente di temperatura**
- Stazione meteo con R_g e R_N**
- Stazione con solo R_g**
- Stazione aeronautica (METAR)**

avranno stime via via meno accurate, anche se sempre decisamente realistiche.