

# PARTE TERZA CLIMA

## ONLINE – APPROFONDIMENTO 6.1 STRUMENTI DI MISURA

Guido Baldoni

### 6.1.1 MISURE DELLA RADIAZIONE SOLARE

In biologia gli aspetti della radiazione solare più importanti sono l'intensità, la durata e lo spettro della luce che arriva sulla Terra.

#### Intensità della radiazione solare

Di questa caratteristica in un punto della superficie terrestre e per un certo periodo si può misurare:

- La radiazione globale (tutta la radiazione che giunge sul punto);
- La radiazione diretta (solo quella che giunge direttamente dal sole, a onde corte);
- La radiazione diffusa (quella che giunge non direttamente ma dopo essersi soffermata nell'atmosfera);

- La radiazione netta (quella che giunge sul punto (a onde corte), detratta quella emessa e/o riflessa (a onde medie e lunghe).

L'intensità della radiazione viene misurata con strumenti chiamati radiometri o solarimetri (**FIGURA 6.1.1**). Quelli più usati per scopi meteorologici sono di due tipi:

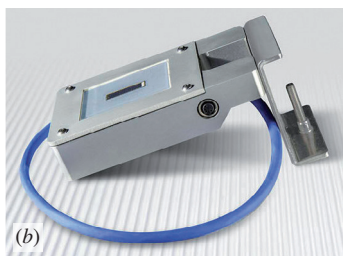
- 1) A termopila (chiamato anche piranometro)
- 2) Ad effetto fotovoltaico (chiamato anche piranometro al silicio)

#### Solarimetro a termopila

Il più utilizzato è il solarimetro di Kipp, il cui sensore è una termopila. Il suo funzionamento si basa sulla differenza di temperatura che si verifica tra strisce di colore nero alternate a strisce bianche, quando illuminate dal sole. Le diverse temperature



(a)



(b)



(c)

**FIGURA 6.1.1** Misuratori della radiazione: (a) Solarimetro a termopila di Kipp; (b) Piranometro a effetto fotovoltaico; (c) Pireliometro (fonte: Wikimedia, Hukseflux Thermal Sensors – licenza CC BY 4.0).

vengono rilevate mediante una termocoppia che fornisce una differenza di potenziale elettrico proporzionale alle differenze termiche. Il vantaggio di questo solarimetro è quello di registrare un'ampissima banda dello spettro della radiazione solare: dai 290 nm dell'ultravioletto (UV) fino ai 2800 nm dell'infrarosso lontano (FIR). Grazie al cupolino emisferico di vetro, inoltre, la misura non risente dell'effetto coseno (la detrazione dei reali valori di radiazione solare che si verificherebbe quando il sole si allontana dalla perpendicolare dello strumento, qualora la superficie di vetro fosse piana). Ha anche il vantaggio di poter funzionare senza bisogno di energia elettrica.

Con questo apparecchio si può rilevare:

- a. La radiazione globale in arrivo sulla Terra quando lo strumento non è schermato.
- b. La luce diffusa, quando possiede uno schermo che lo ripara dalla luce diretta del sole (diffusometro). Lo schermo deve potersi muovere per seguire la declinazione del sole durante le stagioni.

La radiazione diretta viene calcolata dalla differenza fra la radiazione globale e quella misurata col diffusometro; può, però, essere anche misurata direttamente, con un pireliometro, costituito da un tubo allungato, un'apertura stretta e una termocoppia ricevente. Lo strumento necessita di un meccanismo, detto inseguitore solare, per essere sempre puntato verso il sole.

Il rapporto fra la radiazione incidente e quella riflessa (albedo) è determinato dall'albedometro, costituito da due solarimetri: uno rivolto verso la sorgente luminosa, l'altro verso la superficie riflettente.

#### *Solarimetro ad effetto fotovoltaico*

Lo strumento è meno preciso ma più economico di quello a termopila. Il suo funzionamento si basa sul



**FIGURA 6.1.2** Radiometro netto compatto.

fatto che alcuni materiali, come il silicio, convertono direttamente la radiazione luminosa in energia elettrica. Fornisce determinazioni entro una banda spettrale da 300 nm a 1100 nm, più ristretta del solarimetro a termopila. Inoltre, la misura è influenzata dalla temperatura, deve quindi avere un apposito software di correzione.

#### *Radiometro netto*

Per un bilancio radiativo completo, occorre misurare tutte le componenti della radiazione (input/output). Ciò si può eseguire utilizzando coppie di piranometri o, più comodamente, un solo strumento, detto radiometro netto, che combina i vari sensori in un unico corpo (**FIGURA 6.1.2**).

La conoscenza della radiazione netta è particolarmente importante in ambito agricolo poiché rappresenta la quantità di energia effettivamente a disposizione della vegetazione.

#### **Durata della luce solare**

La misura di questa caratteristica è effettuata con l'eliofanometro (che può essere anche eliofanografo). Con esso si determina per quanto tempo l'insolazione supera una certa intensità. In agrometeorologia è utilizzato per determinare per quante ore, nel corso della giornata, il sole non è oscurato da nuvole. Gli eliofanometri più frequentemente usati sono di due tipi

1. Ad effetto termico (di Campbell-Stokes).

In esso la radiazione solare viene concentrata, mediante una sfera di vetro che fa da lente convergente (**FIGURA 6.1.3**), su una striscia di carta sulla quale, se l'intensità della radiazione è sufficiente, si ha una bruciatura lineare.

Lo strumento è provvisto di dispositivi per regolarne l'inclinazione in rapporto alla latitudine del luogo in cui è installato e le strisce di carta vanno cambiate quotidianamente. Data la laboriosità della misura e della lettura delle strisce, questi strumenti non vengono più utilizzati nella pratica.

2. Fotoelettrico.

È uguale al precedente, solo che le strisce di carta sono sostituite da un complesso di fotocellule che forniscono un segnale elettrico solo se intercettano luce di una certa intensità. In questo caso il loro segnale è trasferito a un data logger, che elabora e memorizza i dati.



**FIGURA 6.1.3** Elioanometro di Campbell e Stokes (fonte: Wikimedia – licenza CC BY 3.0).

## 6.1.2 MISURE DELLA TEMPERATURA

La temperatura dell'aria in agrometeorologia si misura all'altezza standard di 1,2 m dalla superficie del terreno e si determina con termometri che rilevano una grandezza fisica variabile linearmente con la temperatura. Tradizionalmente, si tratta della dilatazione termica di una sostanza, che può essere liquida, gassosa o solida. Può essere, però, valutata anche dalla modifica della resistenza elettrica di alcuni materiali (termoresistenze e termistori), dalla differenza di po-

tenziale elettrico che si viene a creare tra due metalli uniti fra loro (termocoppie) o dalla quantità di onde elettromagnetiche emesse da un corpo (**FIGURA 6.1.4**).

I principali tipi di termometro sono:

*a.* Termometro con liquido in capillare

è il più tradizionale; sfrutta la dilatazione del volume di una sostanza al variare della temperatura. È costituito da un capillare graduato su cui leggere direttamente la temperatura. A un'estremità il capillare si allarga in un bulbo, per contenere la riserva della sostanza. Un tempo si usava, tipicamente, il mercurio. Nel 2009 il mercurio è però stato messo al bando a causa della tossicità per l'uomo. Oggi, al suo posto, viene usato il galistan (una lega di gallio, indio e stagno) oppure l'alcool.

*b.* Termometro bimetallico

anch'esso tradizionale, è formato da una lamina a forma di U o a spirale, costituita da due metalli con diverso coefficiente di dilatazione (di solito ferro e rame) che vengono saldati tra loro, uno nella parte esterna e l'altro nella parte interna della lamina. Una delle estremità della lamina è collegata ad un indice che si muove lungo una scala graduata. Quando la temperatura aumenta, la lamina si incurva dalla parte del metallo meno dilatabile e la deformazione si trasmette all'indice. Collegandolo ad un tamburo rotante, questo tipo di termometro era usato per ottenere una registrazione delle variazioni di temperatura in continuo (termografo). Spesso il termografo era anche unito ad un rilevatore dell'umidità dell'aria, in modo da poter registrare con continuità entrambi i parametri (termoigrografo).



T. a mercurio      T. a min. e Max

T. a gas e schema

Termoigrografo con t. a lama bimetallica

T. a termocoppia

T. a termoresistenza

T. a infrarossi

**FIGURA 6.1.4** Principali tipologie di termometro.

#### c. Termometro a gas

misura la temperatura attraverso la variazione di volume o di pressione di un gas contenuto all'interno di un tubo di vetro. I termometri a gas sono molto precisi e vengono usati quali termometri primari, per la taratura di altri termometri.

#### d. Termometro a termoresistenza

sfrutta la proprietà che possiedono alcuni metalli, sottoposti ad una differenza di potenziale, di modificare la propria resistenza al flusso di elettroni in modo lineare in risposta alla temperatura, entro range piuttosto estesi. Esistono molti termometri di questo tipo. Diffuso è, ad esempio, il termometro al platino, la cui resistenza alla temperatura di riferimento ( $R_0$  a  $0^\circ\text{C}$ ) è pari a  $100\ \Omega$  (è quindi chiamato Pt 100).

#### e. Termistori

anch'essi misurano la differente resistenza elettrica di semiconduttori al variare della temperatura, ma non in maniera così lineare come i precedenti. Vanno dunque usati per range termici ristretti, ma hanno il vantaggio di essere molto piccoli.

#### f. Termometro a termocoppia

usa un sensore costituito da due metalli saldati assieme alle due estremità: una alla temperatura di riferimento (giunto freddo), l'altra alla temperatura da misurare (giunto sensibile). I due metalli hanno la proprietà di sviluppare un diverso potenziale elettrico in funzione della temperatura. La ddp è sufficientemente lineare se il termometro è usato entro il range di temperature naturali. Le termocoppie hanno il vantaggio di poter essere molto piccole, utili per misure puntuali e veloci, e non hanno bisogno di essere alimentate.

#### g. Termometro a massima e minima

indica le temperature dell'aria estreme raggiunte in un dato intervallo di tempo (di solito si rilevano quotidianamente). Il fluido termometrico è l'alcool contenuto in un capillare provvisto di un bulbo terminale ripiegato a U. La colonna di alcool è interrotta da un tratto riempito di mercurio su cui galleggiano due aghi di ferro, scorrevoli con attrito nel cannello (indicatori). Al variare della temperatura, l'alcool (principalmente quello nel bulbo) si espande o si contrae, trascinandosi con sé il mercurio, ma, mentre l'alcool può passare attorno ai cilindretti, altrettanto non può farlo il mercurio. Pertanto, la posizione assunta dai cilindretti indica i valori massimi e minimi raggiunti dai due menischi mercurio-alcool. Una volta registrati tali valori, i cilindretti vengono riportati a contatto del mercurio mediante una piccola calamita.

#### h. Termometro a infrarossi

più che a misurare la temperatura dell'aria, il termometro a infrarossi è indicato per rilevare la temperatura di una superficie. Secondo la legge di Stefan-Boltzmann, ogni corpo emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche in misura proporzionale alla quarta potenza della propria temperatura. Nel termometro a infrarossi un sensore rileva la radiazione elettromagnetica emessa da un oggetto e ne calcola istantaneamente la temperatura. Poiché le sostanze di interesse meteorologico emettono prevalentemente radiazioni ad elevata lunghezza d'onda, questi termometri vengono di solito chiamati ad infrarosso. Il loro grande vantaggio è quello di misurare la temperatura da remoto, senza toccare l'oggetto. Termometri a infrarossi, ad esempio, sono installati sui satelliti artificiali per misurare le temperature di ambienti terrestri e ultimamente vengono utilizzati su droni nell'ambito della precision farming, rilevando da remoto le temperature dei campi coltivati più o meno ricoperti dalla vegetazione.

## 6.1.3 MISURA DELL'UMIDITÀ RELATIVA DELL'ARIA

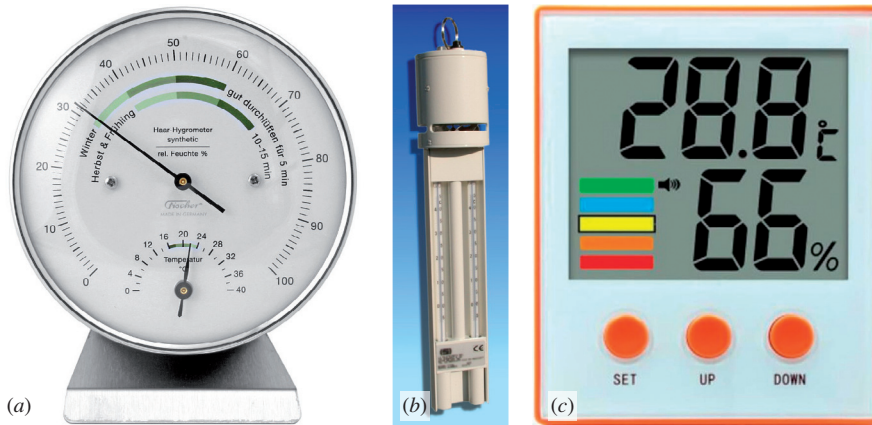
L'umidità relativa dell'atmosfera si misura con l'igrometro (FIGURA 6.1.5). Esistono igrometri basati su differenti principi.

- Igrometro a capelli

è stato il primo ad essere utilizzato e ancora oggi è diffuso. Si basa sull'allungamento dei capelli umani, molto igroscopici, in risposta all'aumento dell'umidità relativa. È uno strumento semplice, che rileva, con elevata prontezza, un ampio campo di UR (dal 20 fino all'80%), ma non è molto preciso poiché la sua lettura è influenzata dalla temperatura, che deve variare entro un range compreso fra  $0$  e  $33^\circ\text{C}$ . Per avere un'indicazione sulla sua precisione l'igrometro a capelli è spesso associato a un termometro.

- Psicrometro a bulbo umido

misura l'umidità relativa dell'aria indirettamente, basandosi sulla differenza di temperatura che si crea in seguito all'evaporazione dell'acqua, che sottrae calore all'ambiente. Consiste dunque in due termometri, uno col bulbo asciutto e l'altro mantenuto umido mediante una garza immersa ad una estremità in un serbatoio di acqua. La presenza di un ventilatore interno velocizza l'evaporazione. Quando si è raggiunto il punto di equilibrio, la differenza di temperatura tra i due termometri è direttamente pro-



**FIGURA 6.1.5**

(a) Igmometro a capelli (fonte: [www.utensiliprofessionali.com](http://www.utensiliprofessionali.com)); (b) psicometro a bulbo umido (fonte: Wikimedia, fotografia di Luigi Chiesa - GNU Free Documentation License e CC BY-SA 3.0); (c) Termo-igmometro elettronico in cui sono indicati gli stati di benessere umano, in funzione dell'interazione fra temperatura e umidità dell'aria.

porzionale all'acqua che evapora a quella pressione. Esistono tabelle e software per calcolare l'UR% in funzione di queste differenze. Lo strumento è poco adatto a essere usato nella pratica agricola (occorre riempire spesso il serbatoio di acqua distillata) ma è ottimo per scopi di ricerca.

- Igmometri elettronici

utilizzano sensori solidi con la caratteristica di variare le loro proprietà elettriche in maniera proporzionale all'umidità a cui sono sottoposti. Gli igmometri elettronici sono strumenti compatti, sensibili e precisi, anche se a umidità estreme (inferiori al 10% e prossime al 100%) presentano una certa deriva.

Possono essere di tipo resistivo o capacitivo:

- Gli igmometri resistivi sono costituiti da sostanze (sali igroscopici) che variano la loro resistenza elettrica in funzione dell'umidità relativa. Sono posti fra due elettrodi a una data  $d$  e si determina il passaggio di corrente fra essi. Il campo di variazione delle resistenze di questi materiali è molto ampio (da  $4 \cdot 10^6 \Omega$  per il 10% UR, fino a  $10^3 \Omega$  col 100% di umidità), ma a umidità elevate diventano poco precisi. I migliori risultati si ottengono con sensori resistivi a base di polvere di carbone sospeso in gelatina di cellulosa.
- Gli igmometri capacitivi sono basati sulla modifica della costante dielettrica di alcune sostanze al variare dell'umidità relativa del gas che le circonda. Di solito, si usano gli ossidi di alluminio e di tantalio, che vengono posti tra le armature di un condensatore, la cui capacità varia linearmente al variare dell'UR% dell'aria.

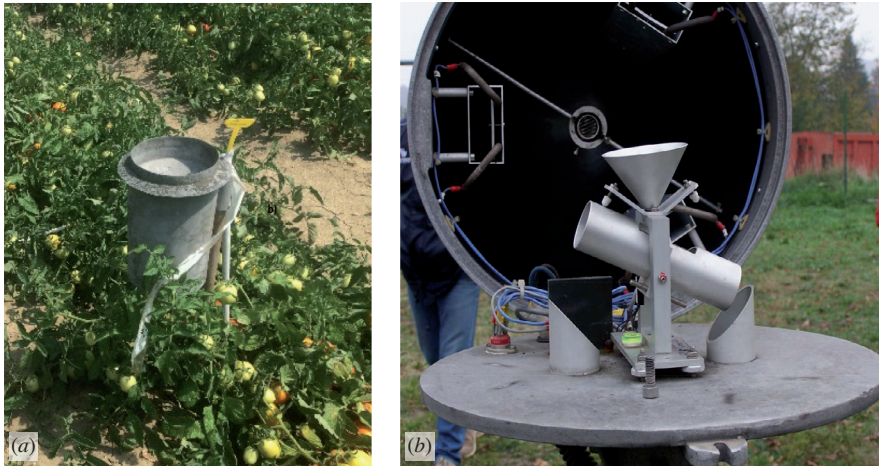
- Igmometro al kripton

È basato su alcune bande di assorbimento della radiazione da parte dell'acqua. In particolare, per questo scopo viene usata la banda ultravioletta emessa dal gas kripton. Lo strumento consiste in un emettitore posto a una certa distanza da un ricevitore. Le bande emesse dal kripton sono varie, ma solo una di esse è assorbita dal vapore acqueo. L'UR sarà proporzionale al rapporto tra i segnali ricevuti nelle due bande. Lo strumento sarebbe preciso, ma la lettura va corretta in funzione delle eventuali impurità dell'aria (polvericco atmosferico) e della presenza di ossigeno molecolare. Inoltre, la sua precisione non è perfetta a umidità relativamente alte, tanto che se ne consiglia l'uso solo in ambienti asciutti.

## 6.1.4 MISURA DELLA PIOGGIA

La quantità di pioggia viene misurata mediante pluviometri o pluviografi; da questi ultimi si può avere anche un'indicazione sull'intensità di precipitazione, cioè sulla quantità di acqua caduta nell'unità di tempo (**FIGURA 6.1.6**).

Fondamentalmente, il pluviometro è rappresentato da un imbuto con un'apertura superiore di superficie standardizzata (di norma pari a  $0,1 \text{ m}^2$ , costituito da un cerchio di 31,83 mm di diametro), che raccoglie l'acqua meteorica. Questa viene convogliata in un recipiente, dove è misurata ogni 24 ore (ottenendo la quantità di pioggia giornaliera). Esistono anche pluviometri più semplici, nei quali la quantità di pioggia si legge direttamente su un contenitore graduato.



**FIGURA 6.1.6**  
 (a) pluviometro graduato classico CER (per gentile concessione di Francesca Ventura); (b) pluviografo a bascula (fonte: ARPAV – <http://www.arpa.veneto.it/>).

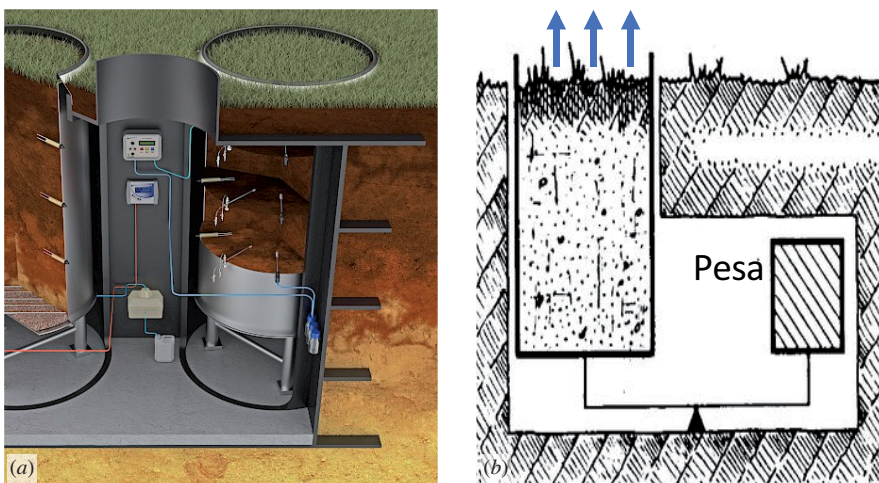
Il pluviografo oggi più usato è quello a bascula, dove l'acqua di pioggia viene convogliata su due vaschette basculanti. Ogni oscillazione corrisponde a una quantità di pioggia (es. 0,1 o 0,2 mm) e viene rilevata da un registratore elettronico che risale ai mm caduti nell'unità di tempo.

### 6.1.5 MISURE DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE

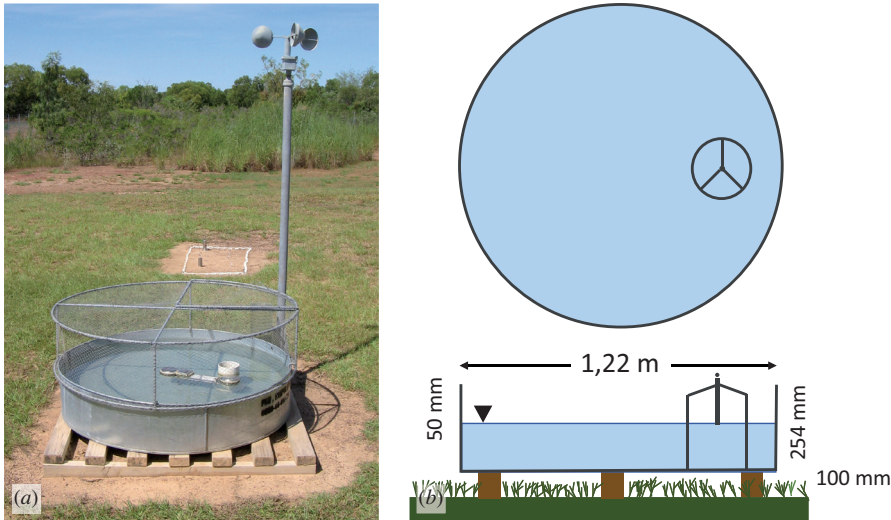
L' $ET_p$  (evapotraspirazione potenziale) può essere misurata direttamente mediante l'impiego di lisimetri, che consistono in contenitori interrati e riempiti di terra, collegati a un sistema di pesatura (FIGURA

6.1.7). Sulla loro superficie e attorno a essi viene mantenuta una vegetazione standard, cioè un prato di *Festuca arundinacea* Schreb. di 10-15 cm di altezza, rifornito costantemente d'acqua. Dalla differenza fra due pesate consecutive, a cui va sottratta la quantità di pioggia eventualmente caduta, si può rilevare direttamente la quantità di acqua persa in atmosfera. La costruzione e manutenzione di queste strutture sono, però, complicate e costose. Inoltre, difficilmente i lisimetri, per quanto grandi, possono simulare il reale stato idrico di un terreno.

L'evapotraspirazione viene, quindi, stimata più frequentemente in modo indiretto. I metodi di stima sono numerosi; quello più comune in agrometeorologia utilizza un evaporimetro detto «di classe A»,



**FIGURA 6.1.7**  
 Lisimetro interrato per la misura diretta dell'evapotraspirazione e schema del suo funzionamento.



**FIGURA 6.1.8**

Evaporimetro di classe A: (a) (fonte: Wikimedia – licenza CC BY 3.0); (b) (fonte: Wikimedia, modello di Giancarlo Dessì – licenza GNU Free Documentation License e CC BY-SA 3.0).

col quale si misura l’evaporazione dal pelo libero dell’acqua contenuta in un contenitore cilindrico standard, posto fuoriterra (FIGURA 6.1.8).

La differenza del livello dell’acqua nella vasca fra due misure successive rappresenta l’evaporazione avvenuta nell’intervallo di tempo. La misura svolta ogni giorno, espressa in mm d<sup>-1</sup>, fornisce ciò che viene definito evaporato giornaliero dell’evaporimetro (ET<sub>pan</sub>).

Per risalire alla evaporazione giornaliera (ET<sub>0</sub>), l’ET<sub>pan</sub> va corretta usando un coefficiente di vasca (k<sub>evap</sub>).

$$ET_0 = k_{evap} ET_{pan} \quad (6.1.1)$$

Ove:

ET<sub>0</sub> = evaporazione dell’acqua giornaliera;

ET<sub>pan</sub> = differenza di altezza del pelo libero dell’acqua tra due letture eseguite in due giorni consecutivi

k<sub>evap</sub> = coefficiente caratteristico dell’evaporimetro di classe A, pari a 0,75; 0,65 e 0,55 in climi umidi, semiumidi e aridi, rispettivamente.

## 6.1.6 MISURA DELLA PRESSIONE

La pressione viene misurata col barometro, tra i quali il più comunemente usato è quello aneroido (senza fluido), di stazione. Esso consiste in un tubo chiuso a pareti sottilissime, di sezione lenticolare, privo d’aria e piegato ad arco (toroide). Quando varia la pressio-

ne, la superficie esterna, più estesa di quella interna, ne risente maggiormente l’influenza. Pertanto, gli estremi dell’arco si avvicinano se la pressione aumenta e si allontanano se diminuisce. I piccoli spostamenti vengono amplificati e trasmessi all’indice, che si muove all’interno di un quadrante (FIGURA 6.1.9). In un barografo l’indicatore è costituito da un pennino che si muove su un tamburo rotante.



**FIGURA 6.1.9** Barometro aneroido.

## 6.1.7 MISURA DEL VENTO

L'intensità del vento viene rilevata mediante un anemometro. In genere, lo strumento è posto a un'altezza di 2,0 m e deve essere lontano da qualsiasi ostacolo che ne infici la misura. Si consiglia una distanza di sicurezza pari ad almeno 10 volte l'altezza dell'ostacolo. Vi sono, fondamentalmente, tre tipi di anemometri: meccanici, nei quali si sfrutta l'energia cinetica del vento, termici o sonori.

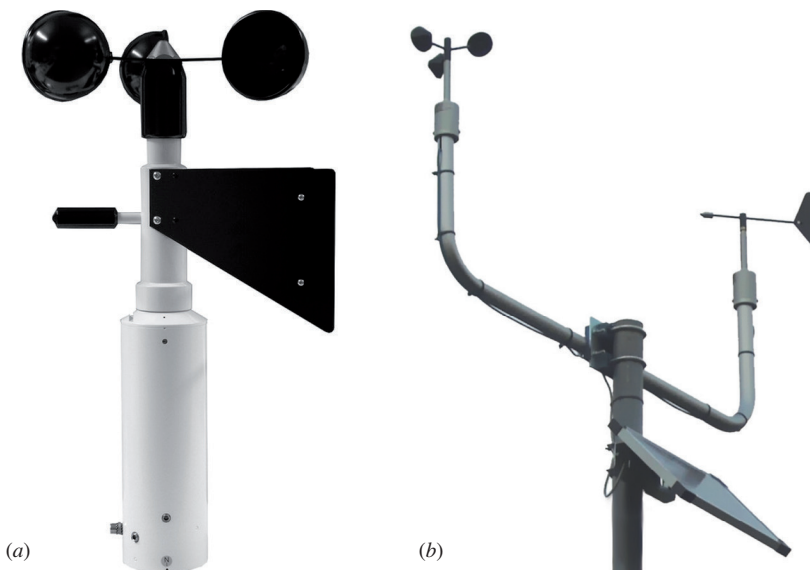
Il tipo più comune è l'anemometro meccanico. È composto da mulinelli a tre coppe o da eliche, la cui velocità di rotazione è funzione della velocità del vento. La velocità di rotazione viene rilevata da un trasduttore, di tipo dinamotachimetrico o optoelettronico, che invia il segnale a un datalogger. La soglia di funzionamento degli anemometri, ovvero il minimo vento rilevabile, è funzione della qualità dei materiali e della loro leggerezza (inerzia). Una soglia soddisfacente è pari a 0,25-0,30 m s<sup>-1</sup>.

Il funzionamento degli anemometri termici, detti anche a filo caldo, consiste nel riscaldare un filo metallico ad una temperatura superiore a quella dell'aria. La quantità di calore che viene scambiata dal filo con l'ambiente è correlata con la velocità del vento. Ovviamente è necessario isolare gli effetti dovuti al vento da quelli della temperatura dell'aria. Questa vie-

ne misurata mediante una termocoppia, usata come punto di paragone delle misure dell'anemometro. Questo tipo di anemometro, che ha un intervallo di misura da 0 a 15-20 m s<sup>-1</sup>, è particolarmente adatto per misure all'interno di una copertura vegetale. Un altro vantaggio è che non presenta parti in movimento.

Gli anemometri sonori sono considerati gli standard per le misure della turbolenza. Possono misurare la velocità del vento lungo un singolo asse scelto all'operatore. Però, se vengono utilizzati ponendo tre sensori agli angoli di un triangolo equilatero, la loro lettura può permettere di misurare l'intensità del vento nei tre assi cartesiani. Il loro funzionamento si basa sul fatto che la velocità di propagazione delle onde sonore nell'aria varia al variare della temperatura. Ogni sensore è trasmettitore e rilevatore di segnali sonori. Quello che viene misurato è il tempo necessario per un'onda di passare dall'uno all'altro, i suoi impulsi sono nel range degli ultrasuoni, tra 40 e 120 kHz, ideali per misure della turbolenza dell'aria.

A volte l'anemometro include anche un gonioanemometro separato, che, mediante un meccanismo meccanico-elettronico, registra la direzione del vento (FIGURA 6.1.10). Questo strumento va posizionato in modo che il suo zero sia rivolto a nord e che l'est corrisponda a 90°.



**FIGURA 6.1.10**

(a) Anemometro e gonioanemometro combinati e (b) separati (Stazione meteorologica Geoves – fonte: Geoves snc – [www.geoves.it](http://www.geoves.it)).