

# 1. AGRONOMIA, AGRICOLTURA E AGRO-ECOSISTEMI

## 1.1. L'AGRONOMIA

**L'Agronomia generale** ha per oggetto lo studio dei fattori che condizionano la produzione vegetale e le tecniche della loro regolazione, per realizzare le massime e/o le più convenienti produzioni, nel rispetto della conservazione della fertilità del terreno e dell'ambiente (F.Bonciarelli, 1983).

La scienza agronomica procede secondo due grandi direttive di indagine:

- una riguardante l'ambiente fisico (clima, terreno) e i mezzi atti a modificarlo a vantaggio delle colture;
- una orientata sulla coltura, ossia la comunità di piante seminata in un campo, sia per un intervento diretto attraverso lo studio dei processi fisiologici che stanno alla base della produzione e dell'adattamento delle colture alle diverse condizioni ambientali, sia per un intervento indiretto come la lotta alle infestanti o la successione delle colture.

E' quindi parte integrante dell'agronomia lo studio del comportamento della singola pianta nell'ambito di una coltura, e dell'interazione di quest'ultima con l'atmosfera e con il terreno, in alcuni casi indicato come **ecologia agraria**. Lo studio dell'ecologia agraria costituisce un presupposto indispensabile per una corretta applicazione della **tecnica agronomica** che, a sua volta, consente di ottimizzare l'utilizzazione delle risorse umane e ambientali disponibili nel contesto sociale nel quale viene svolta l'attività agricola.

L'Agronomia pertanto non studia i fattori della produzione come tali, come fanno, invece, la meteorologia, la pedologia, la genetica, ecc., ma studia gli interventi su tali fattori al fine di realizzare la produzione con obiettivi economici, ecologici e sociali. Conseguentemente, **l'agronomo** non è uno specialista, ma un professionista che deve conoscere l'ambiente in cui opera da un punto di vista fisico, economico, sociale ed ecologico in modo da saper fare una diagnosi dei problemi agronomici e saper adattare la tecnica all'ambiente agronomico, coordinando i mezzi atti a risolvere i problemi su un piano sia economico che ecologico.

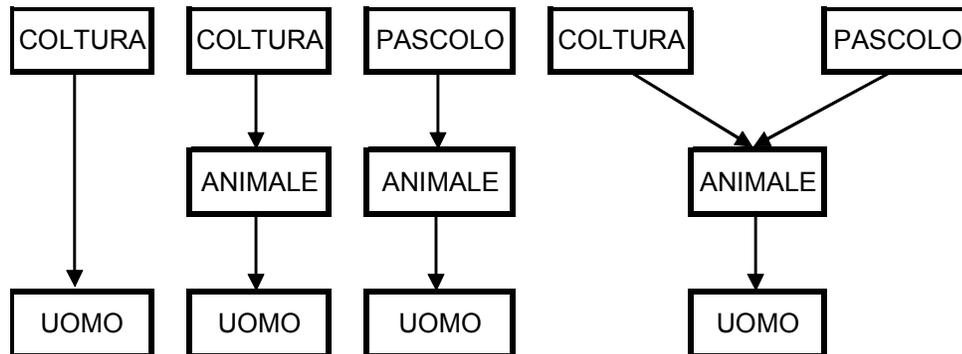
## 1.2. L'AGRICOLTURA

**L'agricoltura** in senso lato può essere definita come *l'attività umana volta ad incrementare l'efficienza con la quale l'energia proveniente dal sole è utilizzata dalla pianta per la produzione di zuccheri, utilizzati per la sintesi di carboidrati, proteine, lipidi ed altri composti*. Queste sostanze possono essere usate per il consumo umano o animale, o come base per prodotti industriali.

Gli animali domestici rappresentano una parte integrante dell'agricoltura perché sono in grado di nutrirsi di una parte della produzione vegetale non adatta all'alimentazione umana e di convertirla in alimenti per l'uomo con ottime qualità nutrizionali ed elevato valore biologico (latte, carne, uova). Tutti gli animali, uomo compreso, sono infatti in grado di digerire proteine semplici, grassi e zuccheri, ma esistono enormi differenze relativamente alla capacità di digerire carboidrati complessi quali amido e cellulosa. La digestione della cellulosa è importante, sia perché la cellulosa rappresenta il più abbondante costituente biochimico dei tessuti vegetali, che perché la parete cellulosica racchiude e protegge il contenuto cellulare. Poiché un serio attacco alla cellulosa richiede l'intervento di enzimi cellulolitici prodotti dai microrganismi, gli animali domestici dotati di tratti gastrointestinali, quali il ruminante, adatti alla fermentazione batterica delle cellulose, sono quelli maggiormente in grado di garantirne la digestione e il conseguente rilascio del contenuto cellulare.

A livello mondiale, gli animali pascolano un'area pari a circa 2,5 volte quella destinata alle colture, e la maggior parte della produzione dei terreni agricoli è destinata all'alimentazione degli animali. Gli animali domestici sono quindi i principali consumatori della produzione vegetale, con esigenze pari a circa 2,5 volte quelle dell'uomo. La loro efficienza nel trasferimento alimentare all'uomo varia con il tipo di sistema digerente e con il livello e la qualità dell'alimentazione che viene loro garantita.

Le catene alimentari relative ai sistemi agricoli sono pertanto riconducibili a quattro tipologie (Figura), tutte molto corte rispetto a quelle che è possibile tracciare negli ecosistemi naturali.



Oltre agli alimenti, l'agricoltura fornisce anche alcuni materiali grezzi per l'industria quali fibre (cotone, canapa, lana) e lipidi (cere e olii) sono gli esempi più ovvi e le biomassa quelli più recenti, per cui alle catene alimentari si potrebbe affiancare un percorso coltura→industria.

Le catene alimentari diventano reti complesse quando malerbe, insetti, uccelli e flora e fauna del terreno vengono inclusi nello schema ma, in ogni caso, i materiali morti o perduti a ciascun livello arrivano sempre a un ultimo livello nel quale i cosiddetti decompositori, rappresentati dalla popolazione microbica, svolgono il ruolo critico di riciclo degli elementi nutritivi. Senza la loro attività elementi fondamentali per la vita sulla terra quali C, H, N e O e elementi minerali essenziali finirebbero semplicemente per accumularsi nei materiali organici morti.

La produzione di sostanza organica nei campi dipende dalla fisiologia delle colture e dall'ambiente nel quale esse crescono e questi aspetti sono soggetti alle analisi ecologiche in termini di principi biologici, chimici e fisici. Tuttavia, le decisioni riguardo a quali colture seminare e a come coltivarle sono a carico dell'uomo e dipendono da una serie di fattori quali l'utilità del prodotto, i costi di produzione e il rischio associato alle diverse opzioni possibili. In questo senso l'agricoltura affianca ai principi delle scienze naturali la tecnologia, l'economia e le competenze degli agricoltori.

Lo scopo principale dell'agricoltura è stato, fino a qualche decennio fa, esclusivamente quello di soddisfare la domanda alimentare di una popolazione mondiale in continua crescita, massimizzando le produzioni e minimizzando i costi, con poco riguardo all'impatto sull'ambiente. Questo ha portato a una intensificazione dell'agricoltura e a un crescente ricorso alla monocoltura e all'uso di fertilizzanti, che ha però comportato dei costi ambientali in termini di aumentata erosione e abbassamento della fertilità dei suoli su scala locale, inquinamento delle acque ed eutrofizzazione di fiumi e laghi su scala regionale. L'ingresso del mondo in un'era in cui la produzione alimentare globale dovrà probabilmente raddoppiare per soddisfare i futuri bisogni alimentari della popolazione mondiale, impone che i futuri aumenti di produzione siano accompagnati da una maggiore protezione dell'ambiente che renda 'sostenibile' l'attività agricola. La soluzione di ogni problema agronomico, quindi, non solo dovrà tener presenti le limitazioni imposte dalle diverse tecnologie e dall'organizzazione sociale, ma anche dall'ambiente, così da soddisfare le necessità di oggi e di domani. È questo il concetto di **agricoltura sostenibile**, ossia un'agricoltura ecologicamente idonea, economicamente valida e

*socialmente giusta e umana* (International Alliance for Sustainable Agriculture). L'agricoltura sostenibile è pertanto un'attività umana che attua una proficua gestione delle risorse agricole per soddisfare le necessità umane nel mentre mantiene o migliora la qualità dell'ambiente e conserva le risorse naturali (CGIAR, Consultative Group on International Agricultural Research). Gli agricoltori svolgono quindi un ruolo decisivo nella conservazione delle infrastrutture ecologiche nelle aree rurali e devono essere premiati per ogni azione concreta ed efficace volta a migliorare l'ambiente (Wageningen Memorandum, 1991).

### 1.3. LA TECNICA AGRONOMICA

L'attività agricola consiste nel manipolare l'ambiente e le comunità vegetali attraverso l'adozione di una determinata **tecnica agronomica**, che rappresenta la *tecnologia* che un imprenditore agricolo utilizza ed è definita :

- dalle **colture** scelte, intendendo per coltura una comunità di piante coltivate nello stesso appezzamento o in più appezzamenti di terreno, appartenenti ad una o poche specie o cultivar;
- dalla loro organizzazione spaziale (coltura specializzata o *consociazione*);
- dalla loro organizzazione temporale (*avvicendamento*, ossia alternanza di colture diverse su uno stesso appezzamento o *monosuccessione*);
- dagli input necessari a modificare l'ambiente, in modo tale che la coltura realizzi la produzione desiderata (acqua, concimi, lavoro, fitofarmaci, ecc).

All'interno dei limiti oggettivi imposti dalle risorse ambientali disponibili (radiazione, fertilità terreno ecc.) e dal genotipo delle colture, il successo di una tecnica agronomica è strettamente dipendente dall'insieme delle condizioni ambientali, economiche e sociali nelle quali viene applicata.

L'adozione di una qualunque tecnica agronomica implica quindi delle decisioni **sogettive** che l'imprenditore agricolo prende, di volta in volta, in considerazione di una serie di fattori che spaziano dalla sua competenza professionale ed esperienza, alla sua propensione al rischio, alla situazione economica e sociale, alla tecnologia disponibile ecc.

In altri termini, la pratica agricola si basa in parte sulla tradizione, in parte sulla conoscenza scientifica, e in parte su congetture sulle quali basare i tentativi di risoluzione dei problemi. In questo contesto, per tradizione s'intende quell'innata saggezza o insieme di abitudini che sono alla base dell'agire, per il semplice fatto che tale agire ha consentito di ottenere risultati positivi anche senza conoscerne i motivi e senza sapere se soluzioni diverse potrebbero fornire risultati migliori. La ricerca scientifica nel settore agronomico, e in tutte le discipline ad essa collegate, può fornire gli strumenti per risolvere i problemi che ricadono nell'ambito dell'attuale conoscenza, mentre le congetture ed i tentativi sono utili qualora si presentino nuovi problemi per i quali non esiste una conoscenza scientifica su cui basare le decisioni. Maggiori saranno le conoscenze scientifiche di chi opera in agricoltura, maggiore sarà la quantità di decisioni che possono essere prese sulla base della conoscenza, e minore quella delle scelte basate su congetture e tentativi. Oltre ad offrire soluzioni nuove e più efficienti, un aumento della conoscenza scientifica può migliorare la comprensione della realtà e aumentare la capacità di risolvere i problemi anche quando le condizioni ambientali nelle quali l'agricoltore opera cambiano e non esiste più una tradizione sulla quale basarsi.

Il processo decisionale non è così complesso come può apparire: una volta decisa la coltura, infatti, la scelta della cultivar, della data di semina, del tipo di lavorazioni ecc. ne sono una conseguenza. Un aspetto critico è rappresentato piuttosto dalla flessibilità nelle scelte, che consente all'agricoltore di adattarsi alle fluttuazioni e alle incertezze associate all'ambiente e ai mercati. Tale flessibilità è massima nelle aziende zootecniche, nelle quali uno sbilanciamento tra

la produzione di foraggio e il numero di animali in azienda può essere compensata macellando parte degli animali o riducendone il tasso di riproduzione o, alternativamente, aumentando la produzione foraggera attraverso concimazione o irrigazione o attraverso un aumento nelle superfici destinate a colture foraggere. Questo esempio bene illustra il **principio della non-uniformità** (Noy-Meir, 1981), secondo il quale il trattamento non uniforme della superficie agricola nello spazio o nel tempo può rappresentare uno strumento importante della tecnica agronomica.

## 1.4. GLI AGRO-ECOSISTEMI

L'agricoltore opera all'interno di un **agro-ecosistema**, inteso come *il complesso di aria, acqua, terreno, piante, animali, microrganismi ed ogni cosa che, compresa in una determinata area, viene modificata dall'uomo per lo svolgimento dell'attività agricola.*

### 1.4.1. La struttura degli agro-ecosistemi – Input e output

Tecnica agronomica, ambiente fisico (clima, terreno, topografia ecc.) e ambiente sociale (istituzioni che operano nel settore, capacità imprenditoriale ecc.) definiscono la **struttura** dell'agro-ecosistema, dalla quale dipendono gli **input** necessari al suo funzionamento e gli **output** che se ne ottengono.

Gli **input** necessari al funzionamento dell'agro-ecosistema posso essere:

- **non sostituibili o primari** (semi, acqua, elementi nutritivi ecc.). Si tratta di quegli input prelevati dalle piante o incorporati nella biomassa vegetale che svolgono dei ruoli specifici e insostituibili nella crescita e nel metabolismo.
- **sostituibili o secondari** (lavoro, meccanizzazione, erbicidi). Non sono incorporati nella pianta e, entro certi limiti, sono mutuamente scambiabili: gli erbicidi possono essere sostituiti da un diserbo manuale o meccanico.

Il risultato del funzionamento di un agro-ecosistema, e quindi il suo principale output, è la

**produzione**, rappresentata dalla quantità di prodotti utili all'uomo che lascia l'agro-ecosistema. Gli agro-ecosistemi differiscono dagli ecosistemi perché vengono gestiti in modo che la maggior proporzione possibile di prodotto venga sottratta a eventuali consumatori competitivi per essere destinata, direttamente o indirettamente, all'uomo. Il livello di produzione è importante, non solo perché determina l'efficienza nell'uso degli input e la convenienza economica dell'attività agricola, ma anche perché è la base della capacità di carico in esseri umani e animali domestici delle superfici destinate all'agricoltura.

La produzione è lo scopo dell'attività agricola, sebbene dal funzionamento di un agro-ecosistema, possano anche derivare degli output indesiderabili, come il dilavamento dell'azoto con conseguente inquinamento delle falde, o l'accumulo di

Table 15.4 Energy budget for maize production in Indiana, 1975

Input	Quantity per ha	MJ ha <sup>-1</sup>
Labor <sup>1</sup>	3.8 h	280
Machinery	prop. for farm (150 ha)	366
Fuel	diesel (55 l)	2104
	gasoline (29 l)	1136
Fertilizer		
	nitrogen (167 kg)	13 000
	phosphorus (78 kg)	1097
	potassium (110 kg)	1076
Seeds	(26 kg)	384
Herbicides	(4 l)	1314
Drying		
Fuel		2607
Electricity		86
Total		23 500
Maize yield (8.8 t ha <sup>-1</sup> )		146 800
Output/input ratio	6.2	

pesticidi nel terreno. Input e output possono essere espressi in unità fisiche (kg, ha, ecc.), valore energetico (Tabella), valore monetario.

#### 1.4.2. Organizzazione e analisi degli agro-ecosistemi (Loomis e Connor)

Gli agro-ecosistemi sono organizzati gerarchicamente e a ciascun livello gerarchico competono domande biologiche, ambientali e sociali diverse. Anche le relazioni tra input e output possono essere analizzate, quantificate e applicate ai diversi livelli di organizzazione, e per ciascun livello l'analisi richiede e produce diversi tipi di informazioni.

L'unità fondamentale è costituita dal singolo campo. Una coltura o la comunità vegetale di un pascolo, presenti in un campo, e la tecnica agronomica adottata (lavorazioni, rotazioni, per es.) in quel campo, costituiscono un **sistema colturale**. Il campo costituisce un'unità omogenea in base ad una o più caratteristiche rilevanti al fine della tecnica agronomica che deve essere attuata, quali ad esempio caratteristiche del terreno e topografia. A livello di campo possono essere analizzati i processi produttivi delle piante, i processi che avvengono nel terreno, e la loro dipendenza dall'ambiente. Osservando i campi nel corso degli anni si può valutare l'effetto delle rotazioni, delle tecniche di lavorazione, degli ammendanti somministrati al terreno, e della raccolta del prodotto sulla fertilità del terreno e sulle produzioni successive, e può essere condotta un'analisi sull'utilizzazione di risorse fondamentali quali acqua ed elementi nutritivi.

Ad un più alto livello di organizzazione, i singoli campi vanno a costituire l'azienda agraria, che costituisce il **sistema aziendale**. Le aziende sono le unità fondamentali per analisi economiche e sociologiche, in quanto sono organizzate principalmente allo scopo di fornire un reddito anche se altri obiettivi, quali fornire il cibo per l'agricoltore (agricoltura di sussistenza) o perpetuare l'azienda per le generazioni successive, possono essere altrettanto importanti. E' l'obiettivo predominante che impone la quota di lavoro e capitale da destinare all'attività produttiva, ed è la disponibilità di lavoro e capitale, insieme alla propensione al rischio dell'imprenditore agrario a imporre limiti nella scelta delle colture da seminare, delle rotazioni e dell'intensità della pratica agricola. Alcuni aspetti dell'ecologia agraria che possono essere meglio analizzati a livello aziendale che non a livello di campo sono: la quota dell'attività aziendale destinata al bestiame e la quota destinata alle colture, ed il trasferimento di elementi nutritivi da un campo all'altro attraverso il letame o i residui colturali.

I tentativi di classificare i sistemi aziendali incontrano grosse difficoltà in quanto è difficile trovare due imprenditori agricoli che si comportino allo stesso modo. Il tipo di terreno, le colture, le risorse finanziarie, la capacità imprenditoriale e le opinioni su ciò che è meglio fare, cambiano da agricoltore ad agricoltore. Molto spesso, comunque, le aziende di una data area sono organizzate in modo simile e vanno a costituire ciò che definiamo un **sistema agricolo**. A questo livello sono possibili ulteriori analisi, quali quelle relative a drenaggio ed inquinamento dell'acqua e dell'aria, mentre da un punto di vista economico e sociologico può essere interessante studiare a questo livello il ruolo dei servizi (acquisto dei prodotti, stoccaggio, trasporto) garantiti dalle città e dai paesi all'interno della regione.

I sistemi agricoli interagiscono fortemente con la più ampia società che consuma i prodotti dell'agricoltura, la quale, a sua volta, fornisce agli agricoltori i beni e i servizi loro necessari per il compimento del processo produttivo. La domanda di prodotti agricoli dipende dalle dimensioni della popolazione e dal suo livello di salute. La conseguenza di queste interazioni è che i luoghi e i modi nei quali l'attività agricola viene realizzata sono determinati tanto da fattori economici che si riflettono nei prezzi degli input e dei prodotti, quanto dalla dipendenza dell'attività biologica delle colture dalle condizioni ambientali. Frequentemente perciò, l'agricoltore non coltiva ciò che è maggiormente produttivo o più efficiente nell'utilizzazione delle risorse ambientali. Nell'agricoltura di sussistenza, ad esempio, destinata principalmente a soddisfare le necessità alimentari dell'agricoltore e della sua famiglia, molto spesso vengono scelte colture che fanno parte della

tradizione alimentare, e l'obiettivo principale è soddisfare il fabbisogno in cibo nel tempo. Nei sistemi agricoli più sviluppati, d'altro canto, aumenta sempre più il controllo economico e politico imposto dai governi su ciò che deve essere coltivato. Un tipico esempio può essere la forte influenza che la Comunità Economica Europea esercita sulla scelta della coltura attraverso gli aiuti economici che assicura per la coltivazione di alcune di esse.

I sistemi agricoli sono soggetti a una continua evoluzione e a continui cambiamenti. Nelle società capitalistiche, il capitale e il lavoro si muovono liberamente tra il settore rurale e quello urbano dell'economia con il risultato che l'agricoltura esiste come *continuum* di una economia più ampia. Il clima e il terreno determinano quali colture possono essere coltivate in una determinata regione, ma le colture che effettivamente vengono coltivate e l'intensità del processo produttivo dipendono dall'accesso ai mercati e dalla disponibilità di lavoro e degli altri mezzi di produzione. I costi di trasporto rappresentano importanti fattori di accesso ai mercati, per cui sistemi intensivi quali quelli orticoli tendono ad essere localizzati vicino ai centri urbani mentre produzioni con minor valore economico e meno intensive quali quelle pastorali sono in genere confinate a zone più distanti.

### 1.4.3. Le proprietà degli agro- ecosistemi

Le più importanti proprietà di un agro-ecosistema sono:

- La **produttività**, che esprime la quantità di prodotto (produzione) per unità di input, e quindi può essere diversa a seconda dell'input preso in considerazione.

- La **stabilità**, ossia una misura dalle *fluttuazioni in produttività* nel tempo associata alla ripetibilità e alla prevedibilità delle produzioni agricole. La stabilità riguarda le fluttuazioni in produttività dovute alle variazioni che avvengono nell'ambiente sociale e fisico dell'agro-ecosistema (variazioni nella quantità e distribuzione delle piogge, periodici attacchi parassitari, variazioni dei prezzi), nonché a errori umani. La stabilità viene valutata rispetto ad un valore medio o ad un andamento (trend), calcolati su un lungo periodo. Una semplice misura della variazione è il coefficiente di variabilità ( $CV = \text{deviazione standard} / \text{produttività media} * 100$ ). L'impatto della variabilità ambientale è particolarmente marcato sull'agricoltura in asciutto delle regioni semi-aride a causa dell'ampia variazione delle piogge che caratterizza queste regioni (Figure). A titolo di esempio, il coefficiente di variazione interannuale nella produzione di frumento in Australia è pari a 0.22, ossia a circa tre volte quello di 0.06 calcolato per la stessa specie in Germania.

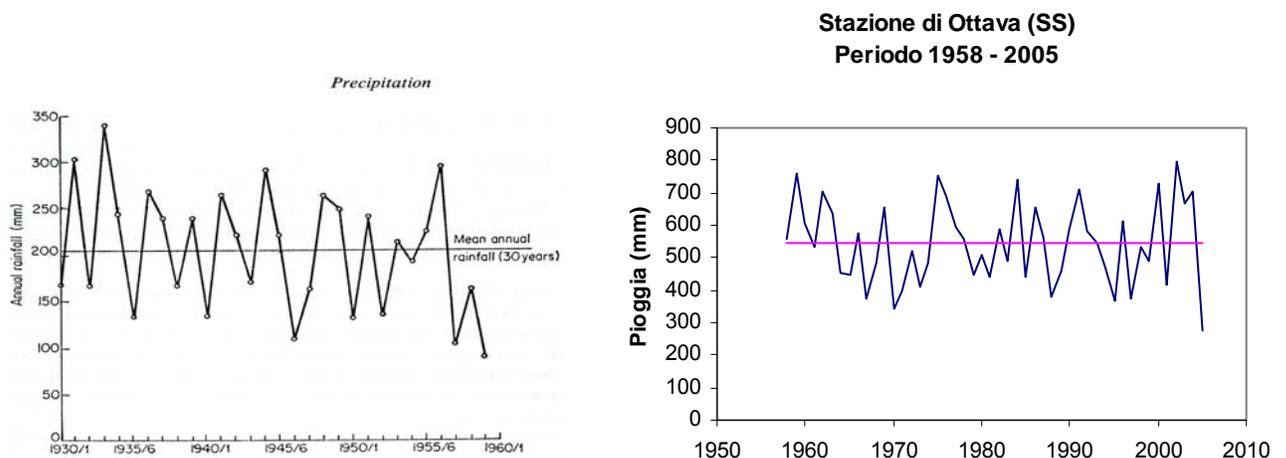


Fig. 2.1. Seasonal variability of rainfall in a dry region (Bersheeba, Israel).

In genere, quando le colture vengono allevate al di fuori degli intervalli ottimali di risorse ambientali, nutritive o di pH del terreno, piccole variazioni ambientali sono in grado di indurre ampie fluttuazioni in resa.

Variazioni considerevoli nelle rese sono un fenomeno normale in considerazione delle notevoli variazioni interannuali nel tempo e delle differenze che esistono tra i campi nei quali le produzioni vengono realizzate. La variabilità nelle rese può comportare anche il completo fallimento di una coltura, evento generalmente limitato a situazioni estreme quali attacchi epidemici di parassiti, allagamenti, gelo ecc. Nel caso il completo fallimento si ripeta troppo spesso, diviene indispensabile rivedere la tecnica agronomica adottata.

Sebbene la stabilità sia un attributo desiderabile della produttività, un elevato livello di resa è in genere più importante perché implica un più efficiente uso delle risorse. Per questo motivo limitate variazioni in resa sono generalmente percepite come positive in quanto consentono di sfruttare gli anni in cui la disponibilità di risorse è massima.

La stabilità delle rese è oggi molto maggiore rispetto a quella del 1800 o dei secoli precedenti, anche se non è chiaro a quali mutamenti nella tecnica agronomica possa essere attribuito questo miglioramento. Certamente l'uso di concimi, biocidi, drenaggio e la meccanizzazione rappresentano acquisizioni importanti della tecnica agronomica nel consentire un aumento della stabilità, così come la maggiore resistenza ai patogeni delle cultivar moderne. E' quindi chiaro che l'aumento della produttività osservato nell'ultimo secolo nelle più importanti specie coltivate non ha comportato una diminuita stabilità. Anzi, aumenti della produttività possono avere effetti positivi anche sulla stabilità. Una trasformazione irrigua, ad esempio, può aumentare la produttività grazie ad un maggiore raccolto nelle annate peggiori, riducendo le variazioni di produzione tra gli anni per effetto del diverso andamento meteorico, e aumentando quindi la stabilità del sistema.

La maggior parte delle pratiche agronomiche ha lo scopo o l'effetto di aumentare la stabilità delle rese. Poiché però non è possibile eliminarla totalmente, molte tecniche servono a gestirla o a sfruttarla. La possibilità di conservare le produzioni da un anno all'altro, ad esempio, consente di usare i surplus di un anno per compensare i deficit di un altro. In questo senso, la presenza di animali in azienda rappresenta il principale mezzo per espandere o contrarre il consumo di granella ed è il fattore maggiormente responsabile della maggiore elasticità dei prezzi della granella destinata all'alimentazione animale rispetto a quella destinata all'alimentazione umana.

- La **sostenibilità**, considerata come la *capacità di un agro-ecosistema di mantenere nel tempo la sua produttività*. La sostenibilità degli agro-ecosistemi dipende principalmente dalla conservazione della qualità del suolo, ossia della capacità del suolo di sostenere la produttività biologica mantenendo la propria qualità. Acidificazione, erosione, perdita di elementi nutritivi e di sostanza organica e salinizzazione sono i principali processi attraverso i quali la qualità del suolo diminuisce

La sostenibilità può assumere diversi valori a secondo del modo con cui è misurata la produttività. Se per mantenere la produzione di granella a certi livelli è necessario aumentare l'uso di concimi, la produzione per ettaro può essere sostenibile, mentre quella per unità di concime non lo è. Lo stesso discorso può essere fatto nel caso del controllo delle erbe infestanti: se per il controllo è necessario aumentare il lavoro, la produttività per unità di superficie rimane invariata, ma quella per unità di lavoro impiegato diminuisce.

La perdita di sostenibilità può essere la conseguenza di un deterioramento dell'agro-ecosistema in seguito a un uso non corretto della tecnica agronomica: irrigazione con acqua salmastra e/o con volumi di adacquamento insufficienti a impedire l'accumulo dei sali nella zona occupata dalle radici, eccesso di lavorazioni con conseguente erosione e generale degradazione del suolo, errato uso del controllo chimico e/o monosuccessione eccessiva con conseguente sviluppo di patogeni particolarmente resistenti ai pesticidi.

Non necessariamente aumentare la produttività influisce negativamente sulla sostenibilità. Esistono anzi svariati casi in cui un aumento della produttività può avere un impatto positivo sulla sostenibilità.

Una trasformazione irrigua, ad esempio, può aumentare la produttività e con essa la quantità di residui colturali che, a loro volta, possono favorire un aumento e/o il mantenimento del contenuto di sostanza organica del terreno. Per contro una trasformazione irrigua può esercitare un effetto negativo sulla sostenibilità se i volumi di adacquamento non sono sufficienti ad evitare un accumulo di sali nel terreno. La sostenibilità di un sistema colturale irriguo, dipende quindi dalla quota di acqua d'irrigazione destinata al dilavamento dei sali che si accumulano nello strato di terreno interessato dagli apparati radicali e, in generale, da una corretta applicazione della tecnica agronomica.

Ci sono per contro dei casi in cui una maggiore produttività è associata ad una più bassa sostenibilità. L'utilizzazione di una varietà migliorata con un'elevata resa potenziale, se da un lato consente maggiori rese, dall'altro, a causa di un verosimile minore adattamento, può determinare una maggiore incidenza di attacchi fungini o un maggiore effetto degli stress abiotici. La maggiore produttività può anche portare alla saturazione del mercato e quindi al calo dei prezzi, per cui in termini monetari la produzione perde di sostenibilità. La maggiore produttività può portare alla diminuzione della sostenibilità se le elevate produzioni sono a spesa delle risorse del terreno (per es. : maggiore erosione, riduzione del contenuto di sostanza organica, sottrazione degli elementi nutritivi).

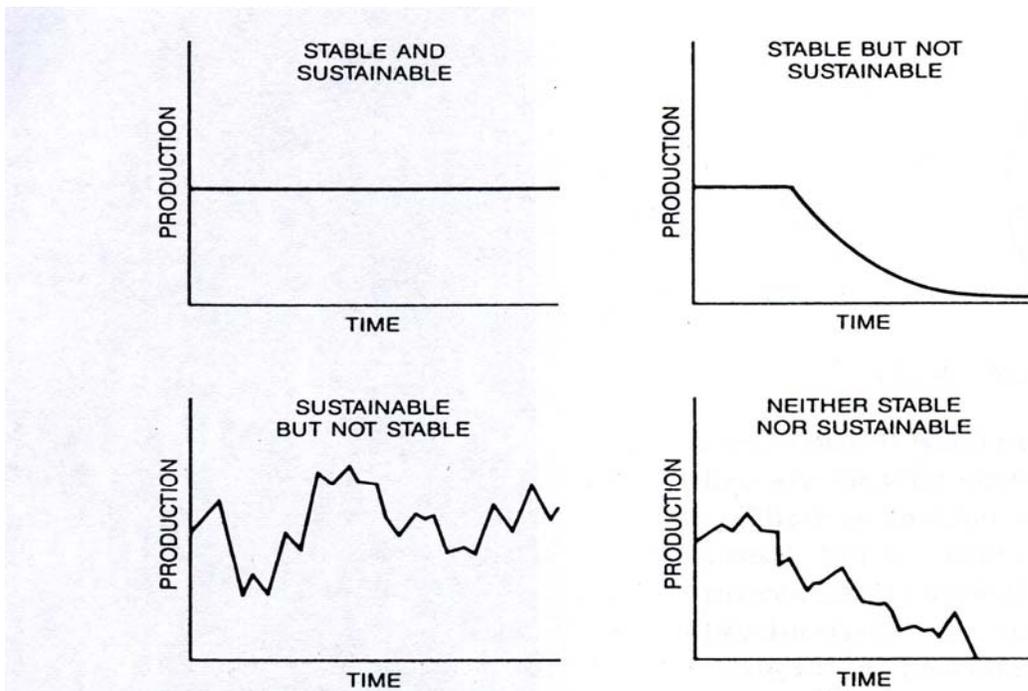


Fig. 2. The meaning of stability and sustainability in terms of the time course of production.

### 1.5. LA PRODUTTIVITA'

La produttività di un agro-ecosistema può essere diversa a seconda dell'input preso in considerazione. In generale è alta rispetto agli input che limitano la produzione, mentre è bassa rispetto agli input che sono in eccesso. La produttività è quindi una misura della efficienza dell'agro-ecosistema rispetto a quello specifico input.

Per i cacciatori-raccoglitori era importante la brevità del ciclo e lo sforzo richiesto per ottenere il raccolto. Una volta che seminare divenne una pratica consolidata, a diventare discriminante tra le diverse colture fu il rapporto tra il seme raccolto e quello seminato. Man mano che la disponibilità di terre coltivabili ha iniziato a diminuire, la produzione ha iniziato ad essere valutata in funzione della superficie (resa,

produzione per unità di superficie) e, laddove possibile, ha assunto importanza la possibilità di realizzare più colture entro una stessa annata e quindi l'obiettivo è stato quello di massimizzare la produzione/ha/giorno. Considerata la continua erosione dei terreni arabili, irrigazione, fertilizzanti, pesticidi e tutti quegli input oramai correntemente utilizzati per aumentare le produzioni come sostituti della terra diventeranno sempre più limitanti, e le produzioni verranno valutate anche in termini di quantità d'acqua, o azoto usati per la loro realizzazione.

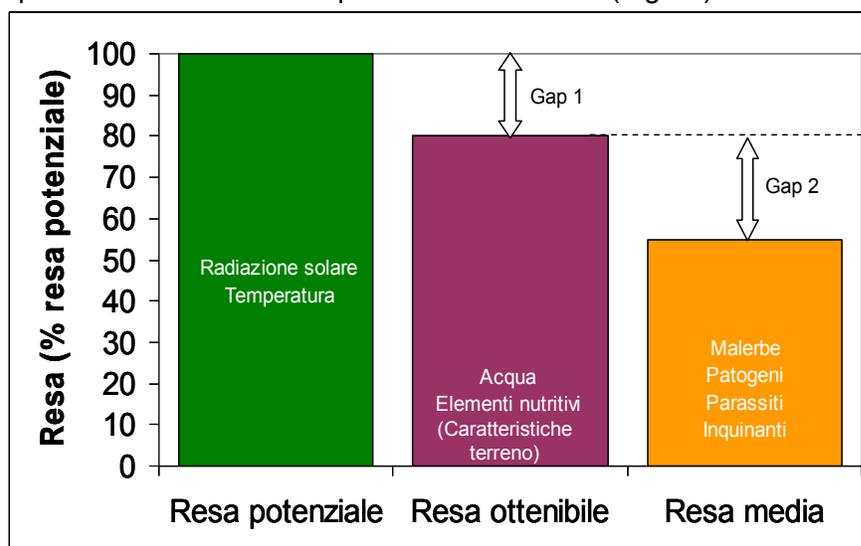
In ambienti in cui l'approvvigionamento idrico è un problema, l'agricoltore sarà interessato a massimizzare la produzione per unità di acqua utilizzata. Allo stesso modo in aree dove l'erosione del terreno costituisce un grosso problema, l'efficienza dell'agro-ecosistema può essere valutata in termini di produzione per unità di suolo eroso. L'energia fornita all'attività agricola attraverso i combustibili può essere l'input energetico di maggiore importanza dal punto di vista governativo, se il petrolio viene importato e costituisce una voce importante del bilancio per quel paese. In questo caso potrebbe essere conveniente esprimere l'efficienza dell'agro-ecosistema rispetto all'input combustibile.

Una tecnica agronomica adeguata riesce in genere a combinare una elevata produttività con una efficiente e poco rischiosa utilizzazione delle risorse. Si pensi, per esempio, ad una azienda in asciutto in un'area in cui le piogge limitano la produzione. In questo caso l'agricoltore, nel massimizzare la produttività (resa per unità di superficie), massimizza anche l'efficienza nell'utilizzazione dell'acqua disponibile. Allo stesso tempo, razionalizzando la tecnica agronomica attraverso un ridotto ricorso alla concimazione azotata, riduce i rischi di insorgenza di stress idrico indotto dal maggior consumo idrico conseguenza di una eccessiva concimazione azotata.

In generale, quando si parla di produttività si fa riferimento alla *quantità di prodotto utile (produzione) per unità di superficie, o resa ( $t\ ha^{-1}$ )*. La produzione per unità di superficie è massimizzata solo in alcune aree del mondo (Giappone e Nord Europa per es.), perché in queste aree il principale fattore limitante è la superficie agricola. In altre economie, quali quelle australiana o nord americana i terreni agricoli sono abbondanti rispetto alla popolazione e il reddito dell'agricoltore viene massimizzato con investimenti finalizzati a garantire un'elevata produttività del lavoro. Per questi motivi, la resa mediamente realizzata da un sistema agricolo non è generalmente un buon indicatore della potenzialità produttiva del sistema in esame.

### 1.5.1. Livelli di produttività

Possono essere individuati tre livelli produttivi in relazione ai fattori che definiscono la crescita della coltura, a quelli che la limitano e a quelli che la riducono (Figura).



a) I fattori che definiscono la crescita sono quelli che, data una disponibilità ottimale dei tutti gli input (primari e secondari), determinano la crescita potenziale e il livello di **resa potenziale**. Includono pertanto sia alcune caratteristiche della coltura legate alla fisiologia (fotosintesi), alla fenologia, alle proprietà ottiche delle foglie (riflessione, trasmissione e assorbimento della radiazione) e alle caratteristiche geometriche della *canopy* (disposizione delle foglie e capacità di intercettare la radiazione), che i fattori dell'ambiente fisico principalmente responsabili della crescita e dello sviluppo della coltura, ossia la radiazione e la temperatura, a loro volta funzione della latitudine e dalla stagione nel luogo e nell'epoca in cui si svolge il ciclo biologico. Il livello della resa potenziale può perciò anche essere definito come quel livello di resa che può essere ottenuto in un certo ambiente da una particolare specie quando la tecnica agronomica non costituisce limitazione alla produzione, e tutte le "conoscenze disponibili" (fertilizzanti, varietà, epoca di semina ecc.) sono applicate nel miglior modo possibile. La resa potenziale viene generalmente quantificata attraverso l'uso di modelli teorici nei quali vengono imposti i limiti del clima e delle caratteristiche morfofisiologiche (C3 o C4, graminacea o leguminosa) della specie. I risultati di questi modelli devono essere necessariamente posti a confronto con dati reali, rappresentati dalle **produzioni record** in quell'ambiente e per quella specie, ossia da produzioni realizzate in condizioni eccezionali.

Una delle prime stime teoriche delle rese potenziali fatta da De Wit nel 1972 parti dalla considerazione che un massimo tasso fotosintetico delle foglie di 20 kg di zuccheri  $\text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$  in una coltura di cereale in grado di intercettare completamente la radiazione corrispondeva a una fotosintesi potenziale di circa 400 kg di zuccheri  $\text{ha}^{-1} \text{d}^{-1}$  in estate e la metà in autunno e primavera, per un totale di 50000 kg di zuccheri  $\text{ha}^{-1}$  da metà Aprile a metà Ottobre (lunghezza del ciclo di una coltura a semina primaverile), corrispondenti a circa 35000 kg di sostanza organica  $\text{ha}^{-1}$ . Ammettendo che circa  $\frac{1}{4}$  di questa quantità venga usato per la respirazione, la resa potenziale dovrebbe essere pari a 200 kg di sostanza secca  $\text{ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ . Un tale tasso di accumulo della sostanza secca è effettivamente stato osservato in Olanda (ambiente sul quale si è basata la stima di De Wit) nelle condizioni più favorevoli, ma in altre parti del mondo può essere diverso in relazione alla lunghezza della stagione di crescita della coltura, della disponibilità di radiazione e della temperatura.

Data una certa località e una certa specie, la produzione potenziale può essere aumentata soltanto indirettamente dalla tecnica agronomica attraverso la costituzione di varietà migliorate e agendo sulla data di semina (durata del ciclo colturale) e la densità di semina (intercettazione della radiazione).

b) I fattori che limitano la crescita comprendono le risorse abiotiche indispensabili per la coltura, ossia acqua ed elementi nutritivi. Se disponibili in quantità inadeguate, questi fattori causano una diminuzione del tasso di crescita della coltura rispetto a quello potenziale e quindi livelli di resa inferiori a quella potenziale, indicati come **resa ottenibile**. Nella maggior parte delle regioni agricole del mondo, la resa ottenibile è meno del 20% di quella potenziale e le ragioni di questa differenza sono da ricercare nel fatto che durante parte o addirittura l'intero ciclo colturale, la crescita è limitata dalla inadeguata disponibilità di acqua e/o elementi nutritivi, nonostante un corretto uso della tecnica agronomica disponibile, principalmente a causa di limitazioni nelle caratteristiche del terreno che influenzano l'efficienza nell'*uptake* degli input (caratteristiche idrologiche, profondità del suolo, tessitura, pH, contenuto in sostanza organica). Se il problema della scarsa fertilità del terreno fosse eliminato, le rese ottenibili potrebbero essere 2-5 volte le attuali.

La resa ottenibile coincide con la resa ottenuta dai migliori agricoltori di una zona o nelle stazioni sperimentali.

c) I fattori che riducono la crescita comprendono fattori biotici quali malerbe, patogeni e insetti, e fattori abiotici quali sostanze inquinanti. L'effettivo livello produttivo realizzato (**resa "reale" o media o ottenuta**) dipende dalla disponibilità di acqua ed elementi nutritivi e dalla misura in cui la

coltura è protetta dai fattori in grado di ridurre la crescita o riesce a evitarli. La resa reale media di un sistema agricolo rappresenta quanto può essere ottenuto dall'agricoltore medio in quelle condizioni pedo-climatiche.

Evans (1993) attribuisce il divario tra rese ottenibili e reali a diverse cause. Una è rappresentata dalle diverse condizioni pedologiche e dalla diversa tecnica agronomica che distinguono una azienda modello o una stazione sperimentale da una azienda media. Un'altra causa è il divario tra la resa che è possibile ottenere ricorrendo alla migliore tecnica agronomica e quale tecnica agronomica è conveniente da un punto di vista economico: utilizzare elevati livelli di input per aumentare le rese a livello aziendale può ridurre i profitti e aumentare i rischi per l'agricoltore. Sono inoltre estremamente importanti il livello di preparazione dell'agricoltore medio, il suo accesso a tecnologia e sussidi, e la sua propensione al rischio.

La resa reale può essere aumentata agendo sui fattori che limitano la crescita attraverso l'applicazione di input primari (acqua e elementi nutritivi) e su quelli che riducono la crescita attraverso l'applicazione di input in genere secondari (diserbanti, pesticidi ecc.)

I concetti di resa "reale" (ottenuta), ottenibile, record e potenziale forniscono indicazioni per la valutazione di un sistema agricolo, ed aiutano ad identificare i segmenti del processo produttivo che possono essere migliorati. Un agricoltore può migliorare le rese medie migliorando la protezione nei confronti dei fattori biotici, e quella ottenibile agendo sulla disponibilità di acqua ed elementi nutritivi. Data una certa specie e località, infine, può anche essere possibile aumentare la resa potenziale attraverso la costituzione e l'uso di varietà migliorate geneticamente, o agendo attraverso la data di semina o la densità di semina sulla temperatura e la radiazione disponibili durante il ciclo colturale.

Questi concetti servono anche a definire il grado di *intensità* della pratica agricola. Quando le rese medie sono prossime a quelle ottenibili, come nel caso del Giappone e del Nord Europa, l'agricoltura viene detta *intensiva*. Inoltre, l'intensità della pratica agricola aumenta al diminuire della durata dell'intervallo di tempo che intercorre tra due colture successive. Tale minor intervallo consente infatti di aumentare la quantità di prodotto ottenibile per unità di superficie nell'arco di un anno; l'esempio può essere la semina di un ibrido di mais precoce (primi di luglio) in successione ad una coltura di orzo.

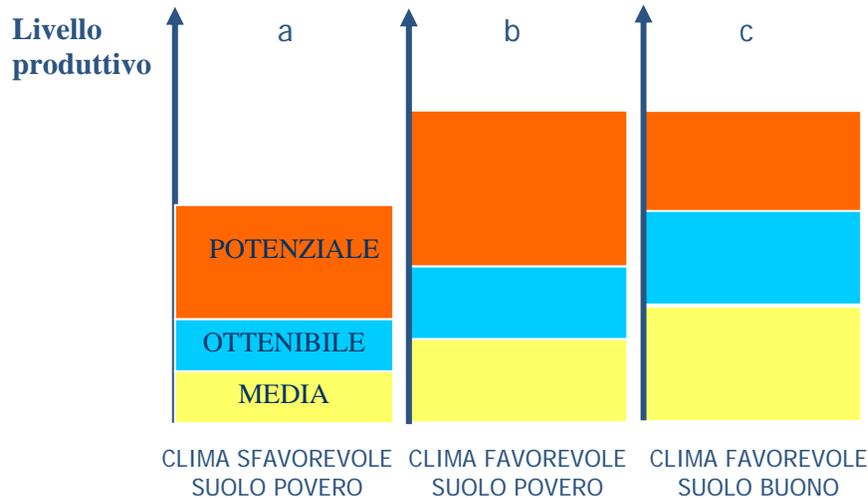
Il grado di intensificazione di un sistema agricolo dipende dal criterio economico seguito nella sua gestione. In Australia e negli USA i terreni agricoli sono abbondanti rispetto alla popolazione ed il prezzo dei prodotti agricoli è basso. Il reddito dell'agricoltore viene quindi massimizzato con investimenti finalizzati a garantire un'elevata produttività del lavoro, il che favorisce un'agricoltura di tipo estensivo. In Giappone ed in Europa occidentale, al contrario, la densità di popolazione è maggiore, per cui la risorsa più limitante è la terra, mentre il prezzo dei prodotti agricoli e dei salari è elevato. In questo caso il reddito viene massimizzato massimizzando la resa per unità di superficie, e favorendo quindi un'agricoltura intensiva.

### 1.5.2. La produttività e l'ambiente fisico

Il rapporto input/output, ossia il livello di produzione e gli input necessari per ottenere una data quantità di prodotto è fortemente condizionato dall'**ambiente fisico** in cui si realizza la produzione, particolarmente difficile da manipolare, essendo il risultato di:

- 1) *fattori climatici* : temperatura, livello di radiazione solare e umidità ;
- 2) *caratteristiche del terreno* che condizionano l'efficienza nell'utilizzazione degli input : disponibilità di elementi nutritivi, capacità di ritenzione idrica, profondità, tessitura, pH, contenuto di sostanza organica;
- 3) *fattori abiotici* del terreno e dell'atmosfera che riducono la crescita come terreni asfittici o presenza di inquinanti atmosferici e del terreno.

Il livello di produzione potenziale di due località può essere diverso a motivo della diversa componente climatica dell'ambiente fisico (figura, a vs b) mentre, in teoria, la resa potenziale non dovrebbe essere diversa tra due ambienti con diverso tipo di terreno e identiche condizioni climatiche (b vs c). In realtà invece l'esperienza indica che molto spesso le rese potenziali in queste condizioni sono diverse a causa della impossibilità di superare completamente con la tecnica agronomica le limitazioni alla produzione derivanti dal diverso livello di fertilità del terreno.



Un ambiente fisico superiore potrebbe essere definito come un ambiente nel quale gli input vengono usati più efficientemente (alto rapporto output/input) rispetto ad un altro. Quindi, a parità di livelli di input, sia le rese medie che quelle ottenibili saranno maggiori in un ambiente fisico superiore (b e c vs a).

In effetti, ciò che generalmente si osserva nella realtà è che le regioni con buoni terreni e climi favorevoli sono in grado di produrre più economicamente delle altre, ossia di utilizzare più efficientemente gli input. Gli agricoltori di queste regioni si concentrano sulle colture più redditizie relativamente ai loro investimenti in input e lavoro entro accettabili livelli di rischio. Il mercato quindi raggiunge un equilibrio attraverso le produzioni delle regioni con climi e terreni meno favorevoli dove gli agricoltori coltivano specie meno redditizie su aree maggiori con tecniche colturali meno intensive e meno costose.

## 1.6. TECNICA AGRONOMICA E EFFICIENZA NELL'USO DEGLI INPUT

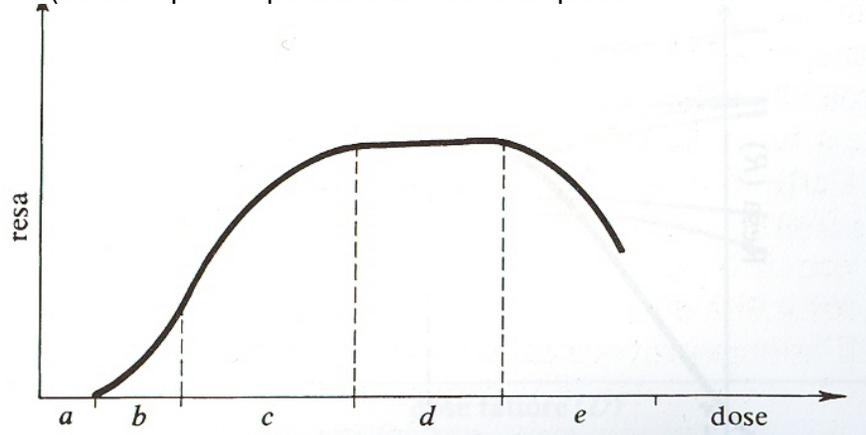
Raramente l'ambiente fisico nel quale la coltura cresce e si sviluppa è in grado di soddisfare pienamente le sue esigenze. Per quanto le piante abbiano una certa capacità di adattamento all'ambiente, quindi, esse subiscono in tutto o in parte del proprio ciclo condizioni ambientali non ideali, che si traducono in stress di vario tipo (da alte o basse temperature, da carenze nutritive o energetiche ecc.), che risultano, in ultima analisi, in diminuzioni della produttività.

Gli interventi agronomici hanno lo scopo di rimediare alle carenze dell'ambiente fisico e spaziano da interventi diretti sulla coltura (scelta di specie e varietà più adatte all'ambiente fisico, coltura specializzata o consociazione), a interventi sul terreno (lavorazioni, fertilizzazione, irrigazione, sistemazioni), sul clima (apprestamenti protettivi), e sui fattori biotici (trattamenti antiparassitari, diserbo). Alcuni di tali interventi modificano direttamente la disponibilità per la coltura di una o più risorse (acqua, elementi nutritivi, temperatura), altri la modificano indirettamente permettendo un migliore sfruttamento delle risorse ambientali (epoca di semina, diserbo).

Nel primo caso, è di fondamentale importanza per la scelta del tipo di intervento la conoscenza del modo con cui una comunità di piante risponde, in termini produttivi, all'aumento nella disponibilità di una risorsa. Tale conoscenza consente di stabilire se ed in quale misura tale risorsa, o input, limita la produzione e quindi di valutare l'opportunità economica di un intervento e l'entità della risorsa da fornire alla coltura.

I modelli proposti ed utilizzati per descrivere e quantificare la relazione funzionale tra input e resa sono numerosi. Nella maggioranza dei casi essi sono riconducibili alla figura sottostante, e individuano :

- un intervallo (a) in cui la disponibilità è talmente bassa da non essere in grado di garantire alcuna produzione (ad esempio temperatura al di sotto di quella che consente la crescita)



- un intervallo di disponibilità della risorsa (b) entro il quale la resa è fortemente limitata dalla scarsa disponibilità della risorsa. In questo intervallo, quindi, un aumento nella disponibilità della risorsa si traduce in forti incrementi di resa, generando una pendenza della curva elevata;

- un intervallo (c) (figura sottostante) in cui la risposta produttiva alla risorsa segue alla legge della 'produttività decrescente', caratterizzata dal fatto che gli incrementi di resa diminuiscono all'aumentare della risorsa disponibile:

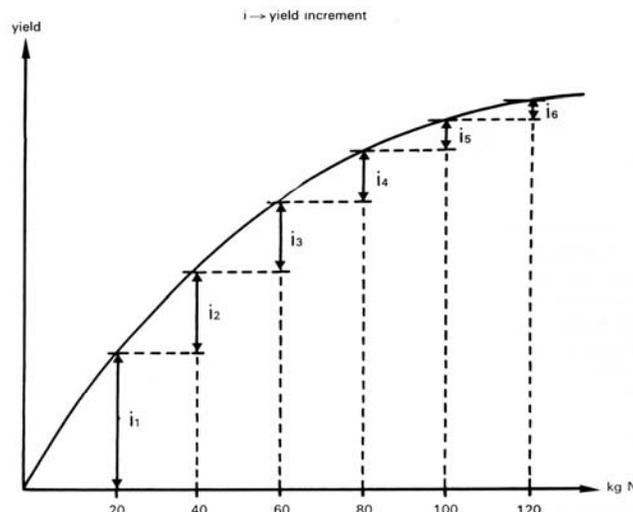


Fig. 11.5. Mitscherlich response curve showing diminishing increments. From Mengel and Kirkby (1982).  
By permission of the International Potash Institute.

- un tratto (d) in cui la risorsa analizzata non limita la produzione, che non varia al variare della disponibilità della risorsa, per cui la pendenza è zero;

- solo per certe risorse, quando la disponibilità del fattore supera un certo livello, si verifica un'inversione nella pendenza della curva (e), ad indicare che, all'aumentare della risorsa, la resa diminuisce. Nel caso in cui la risorsa presa in considerazione sia un elemento nutritivo, l'inversione è determinata da diversi fattori riconducibili o alla tossicità dell'elemento nutritivo quando somministrato in abbondanti quantità, o al fatto che l'ampia disponibilità di un elemento nutritivo può indurre deficienza per un altro nutriente o fattore della produzione. Nei cereali, ad esempio, un'ampia disponibilità di azoto può determinare una riduzione nella quantità di granella prodotta in ambienti in cui la disponibilità idrica non sia elevata. L'eccessiva concimazione azotata comporta, infatti, lo sviluppo di un'abbondante copertura fogliare che, attraverso un incremento dell'evapotraspirazione, accentua i fenomeni di stress idrico.

In definitiva la pendenza misura la "sensibilità" della resa alle variazioni del fattore, sensibilità che dipende dalla resa realizzata, ovvero dalla quantità di risorsa già utilizzata, e dal valore massimo

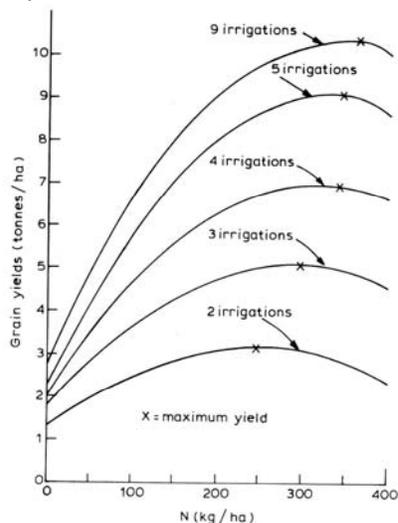


Fig. 11.7. Effect of N fertilization at different soil-moisture régimes on grain yields of maize. After Shimshi (1966). By permission of the author.

(figura). L'andamento della curva è qualitativamente simile per tutti i livelli di disponibilità idrica. Quella che cambia è soprattutto la resa massima che può essere ottenuta, e quindi la sensibilità della resa agli incrementi del fattore azoto. Una migliore disponibilità idrica influisce positivamente sull'efficienza d'uso dei concimi, sia aumentando la quantità di fertilizzante che viene assorbita (dimensioni dell'apparato radicale, aumento nella mobilità degli elementi nutritivi), che aumentando la quantità di biomassa che viene prodotta (apertura stomatica, sviluppo dell'area fogliare). Gli incrementi di resa che si ottengono agendo sul fattore azoto sono pertanto tanto maggiori quanto minore è la sua disponibilità e quanto migliore la disponibilità idrica.

Questa conclusione può essere formulata più correttamente in questo modo: *tutti i fattori della produzione sono utilizzati più efficientemente quando tutti gli altri sono al loro ottimo* (Legge dell'ottimo o di Liebscher), il che equivale a dire che un fattore della produzione che è disponibile in minime quantità influisce in misura tanto maggiore sulla resa quanto più gli altri fattori sono al loro ottimo. E' quindi necessario che gli interventi per realizzare la produzione siano bilanciati, in modo che l'utilizzazione di ciascun input sia proporzionale al livello di resa che, sulla base delle risorse disponibili e delle condizioni ambientali, si pensa di poter conseguire.

La conseguenza della legge dell'ottimo è che, sebbene un incremento dei livelli produttivi necessiti di una maggiore quantità di risorse per unità di superficie, queste vengono utilizzate più efficientemente, ovvero la quantità di prodotto per unità di input è maggiore. Si può quindi affermare che, in generale, le basse rese sono associate ad una bassa efficienza nell'utilizzazione delle risorse.

di resa conseguibile.

Quando una coltura viene allevata in un ambiente fisico molto diverso da quello ottimale, piccole variazioni ambientali o nel livello degli input possono causare ampie variazioni di resa, e quindi una minore stabilità della produzione.

La natura curvilinea della relazione fattore/resa evidenzia come questa sia limitata contemporaneamente da più fattori che possono interagire tra loro. Consideriamo il caso di due importanti fattori della produzione quali l'azoto e l'acqua, e supponiamo di rappresentare le risposte produttive alla concimazione azotata per diverse disponibilità idriche della coltura

Esistono delle eccezioni a quanto affermato. E' il caso dei biocidi utilizzati per il controllo di parassiti obbligati come gli afidi, o di malattie fungine quali il mal bianco e le ruggini. Molto spesso si ha un aumento nell'incidenza di queste malattie all'aumentare della resa, per cui l'efficienza di questi fattori della produzione diminuisce all'aumentare della produttività della coltura. Generalmente la maggiore incidenza è legata a condizioni microclimatiche più favorevoli o a una maggiore concentrazione di azoto nei tessuti attaccati. Accade pertanto che lo sviluppo di alcune infezioni epidemiche sia così lento con bassi livelli produttivi e con bassi input di azoto da rendere superfluo qualunque trattamento, ma così rapido a livelli produttivi maggiori, che il trattamento diviene indispensabile perché quell'azoto si traduca in maggiore resa.

Poiché l'efficienza nell'utilizzazione dei fattori di produzione aumenta all'aumentare della resa, è chiaro che gli agricoltori che occupano i terreni più fertili avranno la possibilità di produrre con dei costi inferiori rispetto a quelli che occupano aree meno favorite. Gli imprenditori che occupano le aree più fertili avranno pertanto una maggiore possibilità di utilizzare i mezzi tecnici che il progresso mette a disposizione per ridurre il divario tra resa potenziale e resa reale. Il conseguente continuo aumento di produzione porta quindi, in un'economia di mercato, alla diminuzione dei prezzi, con una progressiva marginalizzazione delle aree meno favorite. Questo effetto assumerà nel tempo una sempre maggiore rilevanza a causa della internazionalizzazione dei mercati.

Il fatto che le risorse vengano utilizzate più efficientemente nelle aree più fertili, dovrebbe ridurre, in queste aree il rischio d'inquinamento in seguito all'attività agricola. Questo è però vero solo in parte. Sebbene l'uso delle risorse per unità di prodotto diminuisca all'aumentare della produzione, la concentrazione dell'attività agricola porta anche alla concentrazione degli inquinanti su una superficie più ridotta. In tal modo si perde la possibilità di sfruttare l'effetto diluizione per ridurre i rischi di degrado ambientale. L'obiettivo di ottimizzare l'utilizzazione degli input comporta una riduzione del numero di possibili colture che vengono allevate in un determinato ambiente, con il conseguente incremento della monocoltura (semplificazione dei sistemi colturali). Una tale specializzazione colturale comporta dei rischi. In generale, con la monocoltura si allungano i tempi per i quali i terreni vengono lasciati privi di copertura vegetale, e ciò comporta maggiori rischi di erosione da parte di acqua e vento e di dilavamento dell'azoto minerale derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica nell'intervallo tra due semine. La continua presenza della stessa coltura porta inoltre alla specializzazione della flora infestante e dei parassiti, rendendone sempre più difficile il controllo.

### ***Bibliografia principale:***

- Loomis RS, Condor DJ, 1992. *Crop Ecology: productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press, 538 pp.
- Marten GG, 1988. *Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties of agroecosystem assessment*, *Agricultural systems* 26, 291-316
- De Wit CT, 1992. *Resource use efficiency in agriculture*, *Agricultural systems* 40, 125-151
- Van Ittersum MK, Rabbinge R, 1997. *Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations*

## 2. LA RADIAZIONE ED IL BILANCIO RADIATIVO

La vita sulla Terra è basata su scambi di energia e di materia. Fondamentale per lo studio dell'ecologia agraria, ossia dei rapporti tra pianta ed ambiente fisico, è la comprensione di come l'energia fluisce e viene trasferita da una forma ad un'altra all'interno dei sistemi biologici e fisici, e di come la materia viene trasportata all'interno dell'ambiente. Tali scambi seguono le leggi basilari della fisica e della chimica. Questo significa che i processi attraverso i quali l'energia viene scambiata e convertita da una forma ad un'altra sono l'irraggiamento, la convezione, la conduzione e l'evaporazione, mentre i trasferimenti di massa riguardano gli scambi di elementi nutritivi, anidride carbonica e altri materiali. E' principalmente attraverso i flussi energetici che il clima interagisce con le piante: la radiazione, la temperatura dell'aria, la temperatura del terreno, la velocità del vento e l'umidità sono tutti fattori ambientali che influiscono sugli scambi di energia, mentre la concentrazione di anidride carbonica, la concentrazione di ossigeno e l'umidità influiscono sugli scambi di gas. Questi fattori climatici agiscono sempre simultaneamente e in modo variabile nel tempo. Le piante, a loro volta possono essere in grado di rispondere ai fattori ambientali in modo più o meno sensibile. Una manifestazione dello stato energetico delle piante è la loro temperatura, che rappresenta la risultante di tutti gli scambi energetici e di massa tra pianta e ambiente fisico.

Uno degli obiettivi dell'ecologia è proprio quello di capire come una pianta cresce in risposta ai fattori ambientali (Gates, 1980). In tal modo può essere possibile gestire un agro-ecosistema così da convertire i flussi di massa e di energia in produzione nel modo più efficiente possibile (Sinclair e Gardner, 1998). Gli agroecosistemi catturano l'energia solare durante periodi più o meno lunghi e la conservano come energia chimica sotto forma di carboidrati, proteine e lipidi, che rappresentano circa il 95% della sostanza secca delle piante. La massa vegetale che viene accumulata non potrà mai essere maggiore della quantità di energia intercettata dalla pianta e usata per formare energia chimica. In questo senso è possibile affermare che è l'ambiente fisico che stabilisce le rese potenziali di una coltura.

### 2.1. LA RADIAZIONE E GLI ORGANISMI VIVENTI

Gli organismi viventi dipendono dall'energia, dall'acqua e dalle sostanze minerali per i propri processi metabolici e per l'accrescimento. La quasi totalità dell'energia utilizzata dagli organismi deriva (o è derivata) dalla radiazione solare. Persino i combustibili fossili (carbone, petrolio e gas naturali) rappresentano riserve di energia solare immagazzinate nei resti degli organismi vissuti milioni di anni fa.

La radiazione è perciò uno dei componenti principali dell'ambiente fisico in cui le colture vivono, ossia del *microclima*: La sua energia è il fattore che determina la temperatura dell'aria, del terreno, e delle piante, i venti, l'evaporazione e la fotosintesi.

Su una scala più ampia, la radiazione è forse il più importante elemento del clima, o *macroclima*, in quanto praticamente tutte le manifestazioni climatiche traggono origine dalla ineguale distribuzione spaziale e temporale di energia radiante, che determina la distribuzione terrestre e le variazioni giornaliere e annuali della temperatura, del vento e dell'umidità (idrometeorie) e, in ultima analisi, la geografia dei suoli e la distribuzione della vegetazione.

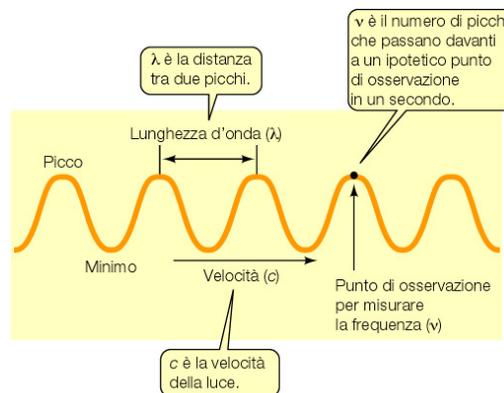
I motivi per cui la radiazione è importante per la vita delle piante sono:

1. **Effetti termici.** L'irraggiamento è il modo principale mediante il quale viene scambiata l'energia tra l'ambiente aereo e le piante. La radiazione solare rappresenta il più importante input energetico per le piante: parte di questa energia è convertita in calore, determinando la temperatura dei tessuti e quindi la velocità dei processi metabolici, parte viene scambiata mediante la traspirazione, parte ancora viene reirradiata.

2. **Fotosintesi.** Parte della radiazione solare viene assorbita ed utilizzata per la sintesi di legami chimici ad elevato contenuto energetico (ATP) e di composti ridotti del carbonio. Questo processo rappresenta il principale input di energia libera per la biosfera.
3. **Fotomorfogenesi.** La quantità e la distribuzione spettrale della radiazione solare ha un effetto morfogenetico sulle piante, che si manifesta con cambiamenti quantitativi nella crescita (divisione ed espansione cellulare) e nella differenziazione di cellule ed organi (sviluppo).
4. **Mutagenesi.** La radiazione di breve lunghezza d'onda, e quindi particolarmente ricca di energia (ultra violetto, raggi X, raggi gamma), può danneggiare le cellule principalmente in quanto modifica la struttura del materiale genetico rompendo i legami degli acidi nucleici e causando mutazioni. Le piante hanno in genere messo a punto adeguati meccanismi di difesa nei confronti della radiazione UV: la cuticola che copre i tessuti vegetali assorbe questa radiazione in modo particolarmente attivo impedendole di penetrare all'interno delle cellule.

## 2.2. NATURA FISICA DELLA RADIAZIONE

Fisicamente, la radiazione ha sia le proprietà tipiche delle onde (natura ondulatoria), che quelle delle particelle (natura corpuscolare).



**Figura 1.** Onde elettromagnetiche

a) La natura ondulatoria della radiazione è dovuta al fatto che essa si propaga sottoforma di onde elettromagnetiche (Fig.1). Le onde elettromagnetiche sono caratterizzate, dalla **velocità di propagazione  $v$** , dalla **frequenza d'oscillazione  $\nu$  (ni)** e dalla **lunghezza d'onda  $\lambda$  (lambda)** legate tra loro dalla relazione:

$$v = \nu \times \lambda$$

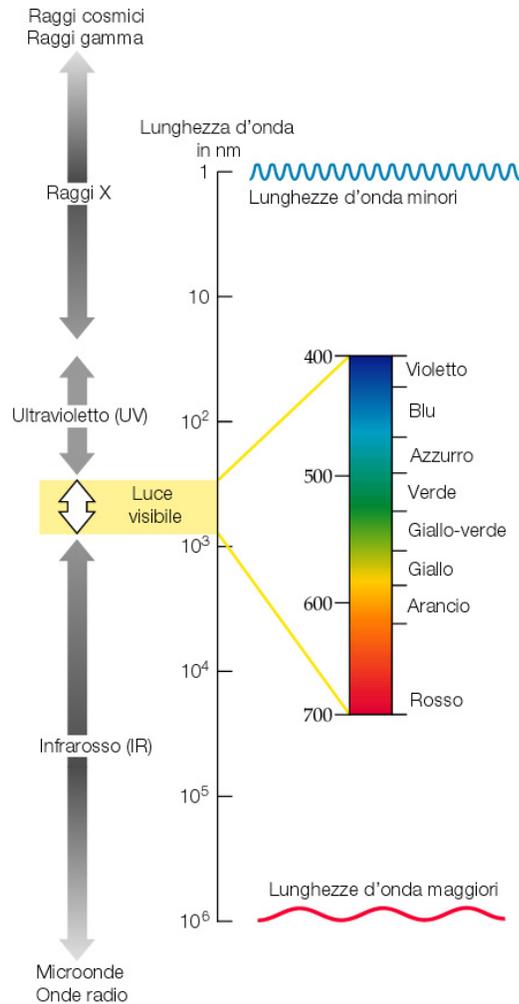
- La velocità. Tutte le onde elettromagnetiche viaggiano nel vuoto alla stessa velocità che è pari alla velocità della luce. Questa velocità è rappresentata con  **$c$**  ed è pari a  $299800 \text{ km s}^{-1}$ , o circa  $3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ .

Quando le onde attraversano un mezzo (aria, acqua, vetro) la loro velocità di propagazione diminuisce in misura diversa in funzione della lunghezza d'onda. Le lunghezze d'onda minori subiscono una maggiore riduzione di velocità, in quanto la maggiore frequenza d'oscillazione comporta che interagiscano più frequentemente con gli elettroni presenti nel mezzo. La riduzione di velocità aumenta all'aumentare della

densità del mezzo, perché aumenta il numero di elettroni che incontra l'onda nell'attraversare il mezzo. Un'onda con lunghezza pari a 589 nm subisce per questo una diminuzione della sua velocità dello 0.03% nell'attraversare l'aria, del 25% nell'attraversare l'acqua e del 40% nell'attraversare il vetro. La diminuzione di velocità di propagazione è accompagnata da una pari diminuzione della lunghezza d'onda, quindi la frequenza d'oscillazione rimane costante ed è indipendente dal mezzo in cui l'onda si propaga. Quando si riporta la lunghezza d'onda della radiazione si fa generalmente riferimento alla lunghezza d'onda nel vuoto.

- La frequenza è il numero di picchi per secondo. Considerata la precedente formula, a parità di  $v$  la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda.

- La lunghezza d'onda rappresenta la distanza tra due picchi successivi della stessa fase. Può essere espressa in *nanometri* (nm) ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ), o in *micrometri* ( $\mu\text{m}$ ) ( $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$ ). Esiste un numero infinito di lunghezze d'onda che, nel loro insieme, formano lo **spettro elettromagnetico**, all'interno del quale le regioni di lunghezza d'onda che rivestono maggiore importanza in biologia sono l'ultravioletto, il visibile e l'infrarosso (Fig. 2). Nell'*ultravioletto* (UV) sono comprese le lunghezze d'onda minori di 400 nm, con un limite inferiore indicato arbitrariamente a 10 nm. L'importanza di questa banda di radiazione è dovuta alla loro azione mutagena, che le rende distruttive per la vita. All'estremo opposto, la regione dell'*infrarosso* (IR) comprende la radiazione con lunghezza superiore ai 700 nm e sino a valori di 100 micrometri. La bassa frequenza e la bassa energia di queste lunghezze d'onda non è sufficiente a consentire la costruzione di legami molecolari, mentre le rende importanti per gli scambi di calore. La regione del *visibile*, chiamata così perché rappresenta l'intervallo di lunghezze d'onda percepite dall'occhio umano, si estende tra i 400 ed i 700 nm con una suddivisione in bande la cui diversa lunghezza d'onda viene percepita sottoforma di diversi colori (violetto, blu, verde, giallo, arancio e rosso). Solo questo piccolo intervallo di lunghezze d'onda ha fotoni sufficientemente energetici da generare vita ma non abbastanza per distruggerla e rappresenta pertanto la cosiddetta radiazione fotosinteticamente attiva (PAR).



*b) Le proprietà corpuscolari* della radiazione sono formalizzate nella Legge di Planck, secondo la quale l'energia radiante viene trasferita in pacchetti discreti (**quanti** o **fotoni**). I fotoni non hanno massa e non occupano spazio. Ad essi è associata una quantità di energia  $E$  inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione, e quindi direttamente proporzionale alla frequenza, secondo la relazione:

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

$h$  = costante di Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  J s)

$c$  = velocità della luce ( $3 \times 10^8$  m s<sup>-1</sup>)

Attraverso l'equazione è possibile calcolare l'energia di un fotone di radiazione di una data lunghezza d'onda: l'energia di un fotone blu ( $\lambda = 450$  nm =  $4,5 \times 10^{-7}$  m), ad esempio, sarà pari a :

$$E = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}) / (4,5 \times 10^{-7}) = 4,42 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Poiché in termini di singoli fotoni i valori di energia sono numeri molto bassi, spesso può essere conveniente esprimere l'energia di una mole di fotoni, ossia l'energia posseduta da un *numero di Avogadro* ( $6,023 \times 10^{23}$ ) di fotoni, semplicemente moltiplicando per ( $6,023 \times 10^{23}$ ) l'energia di un fotone.

Una mole di fotoni blu avrà allora un contenuto energetico pari a:

$$E = 4,42 \times 10^{-19} \text{ J} \times 6,023 \times 10^{23} = 266217 \text{ J} = 266 \text{ KJ}$$

Nella tabella sottostante è riportata l'energia associata alle diverse lunghezze d'onda.

**Table 4-1.** Definitions and Characteristics of the Various Wavelength Regions of Light<sup>a</sup>

Color	Approximate wavelength range (nm)	Representative wavelength (nm)	Frequency (cycles s <sup>-1</sup> , or hertz)	Energy (kJ mol <sup>-1</sup> )
Ultraviolet	Below 400	254	$11.80 \times 10^{14}$	471
Violet	400–425	410	$7.31 \times 10^{14}$	292
Blue	425–490	460	$6.52 \times 10^{14}$	260
Green	490–560	520	$5.77 \times 10^{14}$	230
Yellow	560–585	570	$5.26 \times 10^{14}$	210
Orange	585–640	620	$4.84 \times 10^{14}$	193
Red	640–740	680	$4.41 \times 10^{14}$	176
Infrared	Above 740	1,400	$2.14 \times 10^{14}$	85

<sup>a</sup>The ranges of wavelengths leading to the sensation of a particular color are arbitrary and vary with individuals. Both frequencies and energies in the table refer to the particular wavelength indicated in column 3 for each wavelength interval. Wavelength magnitudes are those in a vacuum.

La quantità di energia associata ai fotoni della parte visibile dello spettro è notevole:

- L'idrolisi dell'ATP, il principale vettore di energia chimica nel mondo biologico, generalmente produce da 40 a 50 kJ mol<sup>-1</sup>, pari a 1/5 – 1/6 dell'energia associata ad una mole di fotoni di luce blu (260 kJ mol<sup>-1</sup>).
- I fotoni di luce UV (ultravioletto) trasportano 471 kJ mol<sup>-1</sup> di energia radiante. Questa energia è superiore a quella di un legame C-C (384 kJ mol<sup>-1</sup>), o O–H (463 kJ mol<sup>-1</sup>). L'elevata quantità di energia associata alla radiazione ultravioletta è sufficiente a distruggere i legami covalenti, e per tale motivo ha un'azione mutagena e battericida.

### 2.3. IL TRASFERIMENTO DI ENERGIA SOTTOFORMA DI RADIAZIONE

L'irraggiamento, insieme alla convezione ed alla conduzione, è uno dei tre modi attraverso i quali può essere trasferita energia. Contrariamente agli altri due, l'irraggiamento consente il trasferimento di energia anche attraverso il vuoto.

La quantità di energia trasferita attraverso la radiazione viene espressa in termini di **flusso radiante (J s<sup>-1</sup> = W)**, pari alla quantità di radiazione (in joule, J) emessa, trasmessa o ricevuta da una superficie per unità di tempo (s), e di **densità del flusso radiante (W m<sup>-2</sup>)**, pari al flusso radiante netto attraverso l'unità di superficie. In relazione al tipo di fenomeno indagato, ossia alla teoria (ondulatoria o corpuscolare) in grado di meglio interpretare il fenomeno in oggetto, tale grandezza si può misurare anche in termini di **densità di flusso fotonico (moli di fotoni m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)**.

La misura della quantità totale di energia radiante non dà infatti indicazioni sul numero di fotoni ai quali questa energia è associata, né sull'energia associata a ciascun fotone. Esistono però processi, come la fotosintesi, il cui tasso dipende dal tasso di assorbimento di fotoni di opportuna energia (lunghezza d'onda compresa tra 400 e 700 nm) e non dal generico tasso di

assorbimento di energia. Per contro nei fenomeni di riflessione, rifrazione, trasmissione ed interferenza è più conveniente fare riferimento alla natura ondulatoria della radiazione.

Il tasso al quale l'energia radiante si allontana da una superficie rappresenta **l'emittanza** ( $W m^{-2}$ ). Per **irradianza** ( $W m^{-2}$ ) invece si intende il tasso al quale l'energia raggiunge un corpo.

### 2.3.1. Le leggi fisiche

Ogni corpo con temperatura superiore allo zero assoluto (0 K) emette radiazione nello spazio circostante e, contemporaneamente, riceve radiazione da altri corpi.

Un corpo che riceve radiazione può rifletterla e/o trasmetterla e/o assorbirla. Per ciascuno dei tre processi (riflessione, trasmissione e assorbimento) può essere definita la percentuale della radiazione incidente, di una specifica lunghezza d'onda che viene riflessa ( $\rho$ , *riflessività*), trasmessa ( $\tau$ , *trasmissività*), o assorbita ( $\alpha$ , *assorbività*) da un corpo. Poiché queste sono le uniche tre possibilità:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Più precisamente, l'**assorbività** ( $\alpha$ ) di un materiale è definita dalla *frazione della radiazione incidente (di data lunghezza d'onda o che copre una banda ben definita) che può essere assorbita*.

L'assorbimento si verifica ogniqualvolta un corpo raggiunto da un'onda elettromagnetica assorbe l'energia dei fotoni che collidono con le sue molecole, cambiando il proprio livello energetico. Questo in genere si traduce in un aumento del moto vibrazionale delle sue molecole ed in un aumento di temperatura. L'energia assunta dal corpo può quindi essere emessa, ossia reirradiata. Poiché le transizioni energetiche implicate nell'assorbimento di radiazione sono identiche (ma opposte in direzione) a quelle implicate nell'emissione della radiazione, conoscere l'assorbività di un corpo consente di dedurre anche la sua **emissività** ( $\varepsilon$ ) ad una data lunghezza d'onda, secondo quanto formalizzato dalla **legge di Kirchoff**, secondo la quale l'assorbività di un corpo per la radiazione di specifica lunghezza d'onda è uguale alla sua emissività nella stessa lunghezza d'onda:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$$

L'emissività può essere definita solo rispetto a quella di un corpo che emetta radiazione con la massima intensità possibile a tutte le lunghezze d'onda, e che assorba completamente tutta la radiazione che lo raggiunge. Un tale corpo non esiste in natura, ma rappresenta una entità fisica ideale indicata come '**corpo nero**' (**black body**), perfetto 'radiatore' e perfetto 'assorbitore'. L'emissività è quindi *la frazione della radiazione emessa a quella lunghezza d'onda, rispetto alla massima che può essere emessa da un corpo nero alla stessa temperatura*.

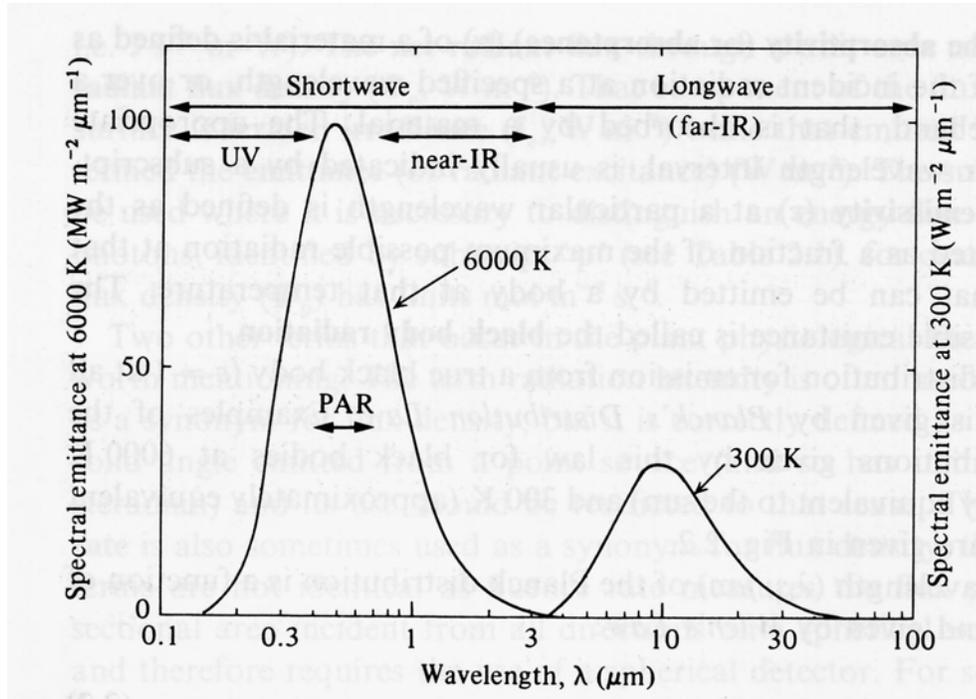
I corpi naturali hanno un comportamento differente rispetto al corpo nero, sia in termini qualitativi che quantitativi, nel senso che in genere assorbono o trasmettono o emettono solo una parte della radiazione che li raggiunge comportandosi come corpi 'grigi'. In alcuni intervalli di lunghezza d'onda però, possono mostrare emissività quasi pari ad 1, ossia emettere tanta radiazione quanta ne emetterebbe un corpo nero. Per esempio nella banda 8-14 micrometri, il terreno bagnato e la vegetazione hanno un'emissività di circa 0.97-0.99.

Sia lo spettro di emissione della radiazione, che  $\lambda$  alla quale viene emessa la maggiore quantità di flusso radiante, dipendono dalla temperatura assoluta del corpo. Per un corpo nero, la distribuzione è definita dalla legge di distribuzione di Planck, e la lunghezza d'onda alla quale la densità di flusso radiante è massima dalla legge di Wien:

$$\lambda_{\max} = 2897 / T$$

secondo la quale, più un corpo è caldo, minore sarà la  $\lambda_{max}$  alla quale emette la maggior quantità di radiazione ( $^{\circ}C = ^{\circ}K-273$ ).

Nella Fig. 3 sono riportate le distribuzioni dell'energia alle varie lunghezze d'onda di due corpi neri, uno con una temperatura prossima a quella del sole (6000 K), l'altro con temperatura prossima a quella terrestre (300 K).



**Figura 3.** Distribuzione spettrale della radiazione emessa da corpi neri a temperature approssimativamente equivalenti a quella del Sole (6000 °K) e della Terra (300 °K)

E' possibile osservare che il grado di sovrapposizione delle distribuzioni è limitato, e che la lunghezza d'onda di 3  $\mu\text{m}$  può essere utilizzata per separare i due tipi di radiazione. La radiazione emessa dal sole è compresa tra 0.15 e 3  $\mu\text{m}$ , con un picco di emissione a 483 nm, e viene spesso semplicemente indicata come radiazione ad onda corta (**shortwave radiation, SW**). La radiazione emessa dai corpi terrestri, inclusi il terreno, le piante e l'atmosfera, è invece compresa tra 3 ed i 100  $\mu\text{m}$ , e coincide pertanto con la banda dell'infrarosso. Essa viene comunemente indicata come radiazione ad onda lunga (**longwave radiation, LW**), o termica, ed il suo picco di emissione si colloca a 9.65  $\mu\text{m}$ .

L'area sottesa alle due curve rappresenta la quantità di flusso radiante emessa dai due corpi neri. Come si può notare, l'area é maggiore per il corpo a temperatura superiore, come postulato dalla **legge di Stefan-Boltzmann**, secondo la quale anche la quantità totale di flusso radiante emessa da un corpo dipende dalla sua temperatura assoluta, secondo la relazione:

$$\phi = \varepsilon \sigma T^4$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{K}^{-4}$  costante di Stefan-Boltzmann

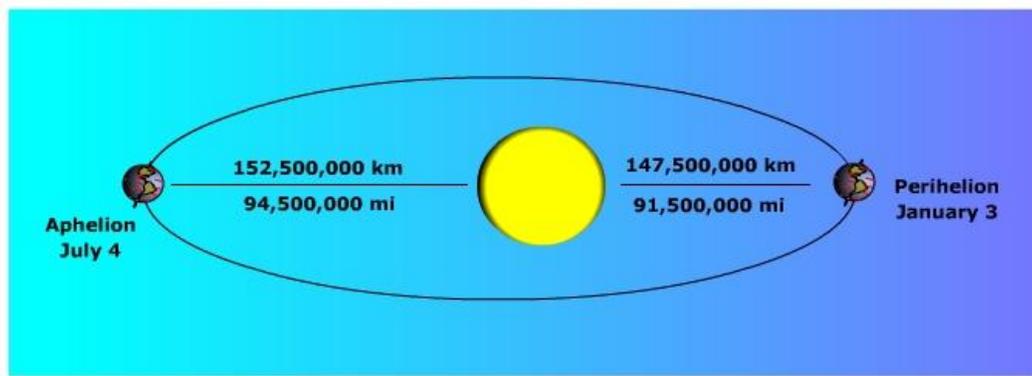
$\varepsilon$  = emissività

T = temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ )

Poiché la densità del flusso radiante è direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta, variazioni di temperatura anche piccole, come quelle che si verificano nel corso della giornata, si traducono in ampie variazioni nella densità del flusso radiante. Per esempio, la densità del flusso radiante di un corpo la cui temperatura è di 304 K, è superiore del di 6  $\text{W m}^{-2}$  rispetto a quella di un corpo la cui temperatura sia inferiore di un solo K (303 K).

## 2.4. LA RADIAZIONE AD ONDA CORTA (SW)

Il Sole emette radiazione in tutte le direzioni, ma la distanza tra Terra e Sole è talmente grande ( $1,5 \times 10^8$  km) che generalmente si può ammettere che la radiazione arrivi sulla terra in fasci paralleli da una fonte puntiforme. La radiazione solare viaggia nel vuoto fino al limitare dell'atmosfera terrestre, la cui superficie riceve, mediamente, una densità di flusso radiante pari a  $1360 \text{ W m}^{-2}$ , quantità indicata come 'costante solare'. Tale valore è una media che tiene conto del fatto che la terra ruota intorno al sole secondo un'orbita ellittica, in base alla quale la distanza tra terra e sole varia tra un massimo di  $1,52 \times 10^8$  km che si verifica il 4 luglio (afelio) ed un minimo di  $1,47 \times 10^8$  (3 gennaio, perielio) (Fig. 4).



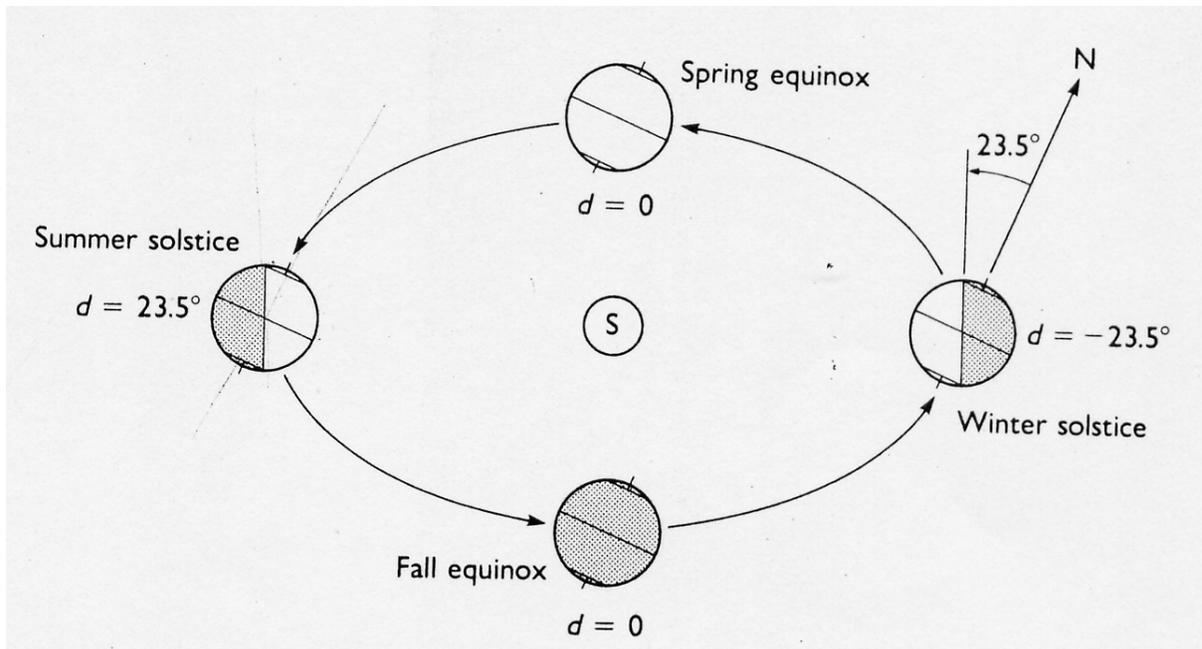
**Figura 4.** Orbita ellittica della Terra intorno al Sole

Poiché la costante solare si misura su un piano, mentre la radiazione che arriva sul margine esterno dell'atmosfera si distribuisce su una calotta sferica di una sfera che ruota, l'input medio di energia al margine dell'atmosfera è pari a  $340 \text{ W m}^{-2}$ , cioè circa il 25% della costante solare. Si tratta di un dato medio poiché la radiazione che effettivamente raggiunge la superficie terrestre non è pari a questo valore in ogni punto della superficie terrestre e in ogni momento a causa:

- di *fattori astronomici* che determinano la posizione del sole nel cielo e una distribuzione ineguale della quantità di radiazione nel tempo e nello spazio;
- del fatto che il *passaggio attraverso l'atmosfera* modifica la radiazione, sia in termini di quantità che di qualità

### 2.4.1. I fattori astronomici e l'ineguale distribuzione della radiazione SW

La terra impiega  $365 + \frac{1}{4}$  giorni per compiere una intera rotazione intorno al sole (*rivoluzione*). Durante questo periodo essa ruota anche intorno al suo asse di rotazione, che passa per i poli, ad un tasso uniforme ogni 24 h (*rotazione*). L'asse di rotazione attorno al quale la terra ruota non è perpendicolare al piano dell'orbita ellittica intorno al sole, ma è inclinato di  $23.5^\circ$  e costantemente puntato verso la stella Polaris (Fig. 6). Senza questa inclinazione ogni punto della Terra avrebbe un clima uniforme durante l'anno e tutti i giorni avrebbero 12 ore di luce e 12 di buio. E' infatti la combinazione dell'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre con i moti di rivoluzione e rotazione che causa l'alternarsi delle stagioni e il variare della lunghezza del giorno.



**Figura 6.** Geometria Sole-Terra durante la rivoluzione annuale della Terra intorno al Sole. Il nome dei solstizi e degli equinozi è stato attribuito in base alle stagioni dell'emisfero Nord.  $d$  = angolo di inclinazione

In corrispondenza di uno dei due *solstizi* (attorno al 22 Dicembre) (Fig. 6), il sole è allo zenit (perpendicolare alla superficie) del Tropico del Capricorno ( $23.5^\circ$  S), il polo sud è inclinato verso il Sole ed il polo nord è inclinato lontano dal sole. Nell'emisfero Nord i giorni sono brevi (è sempre buio al polo nord) ed è inverno, mentre nel polo sud la situazione è opposta (giorni lunghi ed estate, 24 ore di luce al polo). Il contrario capita sei mesi dopo, all'altro solstizio, quando il sole è allo zenit del Tropico del Cancro ( $23.5^\circ$  N).

Gli *equinozi* (intorno al 21 marzo ed al 23 settembre) individuano i momenti dell'anno in cui l'asse terrestre giace su un piano parallelo ai raggi solari. Entrambi i poli sono irradiati, il giorno è lungo 12 h a tutte le latitudini, ed il Sole a mezzogiorno è allo zenit dell'equatore.

a) Effetto delle variazioni nell'elevazione solare sulla densità del flusso radiante.

Rotazione, rivoluzione e inclinazione dell'asse fanno sì che l'angolo tra i raggi solari e la superficie terrestre sia diverso, sia alle diverse latitudini, che nel corso dell'anno.

Il cambiamento dell'angolo solare si traduce in un cambiamento nella densità di flusso radiante che raggiunge la superficie, in accordo con la Legge del coseno di Lambert, secondo la quale il flusso radiante incidente su una superficie dipende dal suo orientamento rispetto alla direzione del flusso, e precisamente :

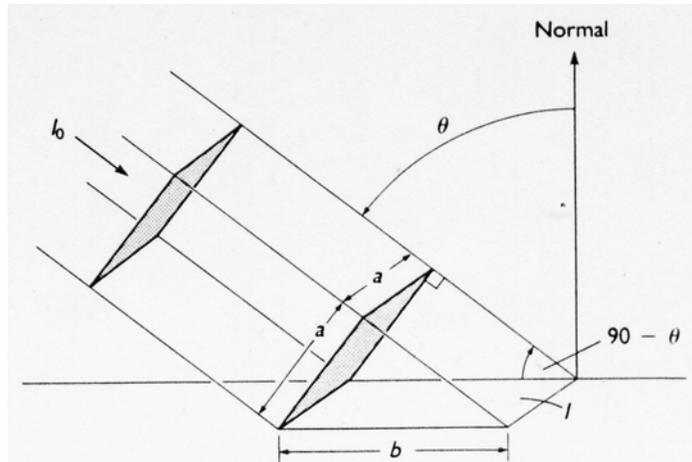
$$I = I_0 \cos \theta = I_0 \sin \beta$$

$I$  : flusso radiante incidente sull'unità di superficie terrestre

$I_0$  : flusso radiante incidente sull'unità di superficie perpendicolare alla direzione del flusso.

angolo  $\theta$  : distanza zenitale

angolo  $\beta$  : complemento ad  $\alpha$  : altezza angolare del sole rispetto all'orizzonte o elevazione (Fig.5).

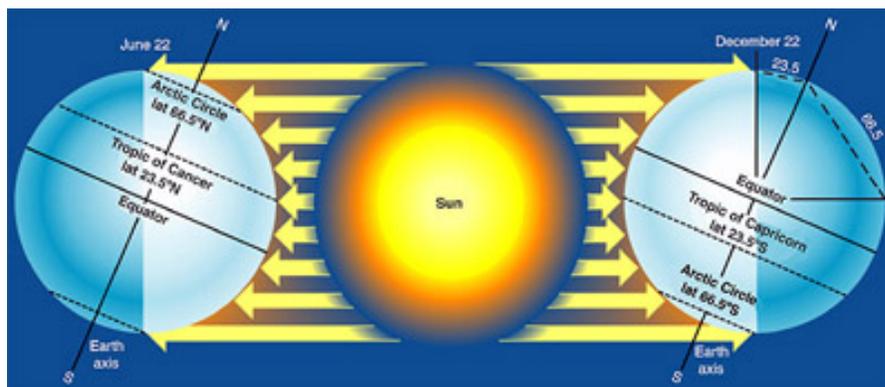


**Figura 5.** Legge del coseno di Lambert

Questa legge viene utilizzata per calcolare la radiazione diretta su una generica superficie non perpendicolare ai raggi solari (un pendio, una foglia), così come per spiegare la variazione nella disponibilità di energia solare nel corso dell'anno ed alle varie latitudini.

In base a questa relazione è chiaro che tanto è maggiore l'angolo che la direzione del flusso forma con la perpendicolare, ossia tanto minore è l'elevazione del sole, tanto maggiore sarà la superficie sulla quale questo flusso radiante si distribuisce, e tanto minore la densità del flusso radiante. Il massimo flusso radiante si realizza quando il sole è perpendicolare alla superficie, ossia quando si trova allo *zenit* (intersezione della perpendicolare al piano dell'orizzonte passante per l'osservatore con l'emisfero celeste, ossia il punto esattamente sopra la testa dell'osservatore).

A causa dei moti di rivoluzione e rotazione e dell'inclinazione dell'asse terrestre, il Sole a mezzogiorno è allo zenit solo nelle latitudini comprese tra i due Tropici, in momenti diversi nel corso dell'anno. In corrispondenza del solstizio d'inverno (attorno al 22 Dicembre) (Figura 6), il sole è allo zenit del Tropico del Capricorno (23.5° S), mentre si trova allo zenit del Tropico del Cancro (23.5° N) solo in corrispondenza del solstizio d'estate (22 giugno).



**Figura 7.** Posizione della Terra in corrispondenza dei due solstizi.

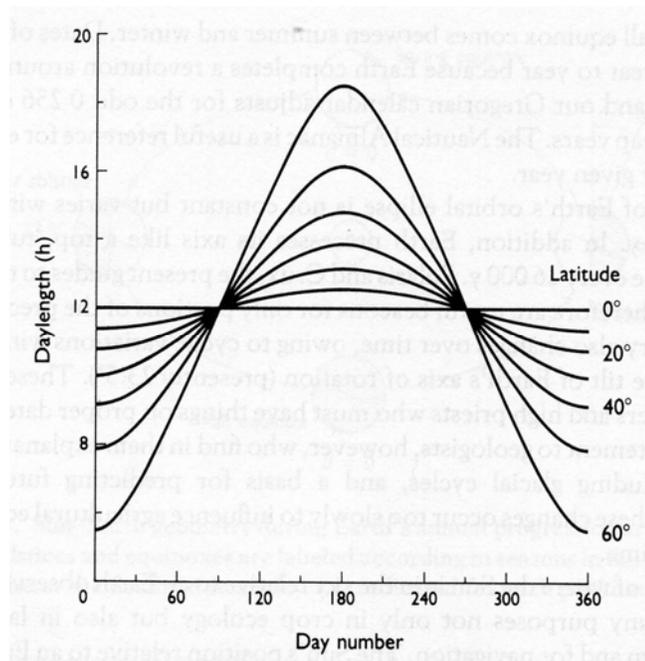
Nelle latitudini comprese tra i due tropici il sole si trova allo Zenit per due giorni in un anno, così come all'equatore, dove il Sole a mezzogiorno è allo zenit due volte all'anno, in corrispondenza degli equinozi. Al di fuori di questa fascia, il Sole a mezzogiorno non si trova mai allo zenit, e la

massima densità di flusso radiante è sempre inferiore a quella massima che si realizza alle medie latitudini.

**b) Effetto dei fattori astronomici sulla lunghezza del giorno**

La lunghezza del giorno nell'emisfero Nord passa da un minimo al solstizio d'inverno, a 12 h all'equinozio, ad un massimo al solstizio d'estate, per poi iniziare nuovamente a diminuire. L'entità di queste variazioni è minima all'equatore (12 ore circa durate tutto l'anno) e massima ai poli (24 ore circa) (Tabella e Figura 8).

Latitudini Nord Latitudini Sud	G L	F A	M S	A O	M N	G D	L G	A F	S M	O A	N M	D G
0° (Equatore)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
10	11.6	11.8	12	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
20	11	11.5	12	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
30	10.4	11.1	14	12.9	13.6	14	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
35	10.1	11	11.9	13.1	14	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15	14.7	13.7	12.5	11.2	10	9.3
42	9.5	10.5	11.9	13.3	14.5	15.2	14.9	13.9	12.5	11.1	9.9	9.2
44	9.3	10.4	11.9	13.4	14.7	15.4	15.1	14	12.5	11	9.8	9
46	9.1	10.3	11.9	13.5	14.9	15.7	15.3	14.1	12.5	10.9	9.6	8.7
48	8.9	10.2	11.9	13.6	15.1	16	15.6	14.3	12.6	10.8	9.4	8.5
50	8.6	10	11.8	13.7	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.2

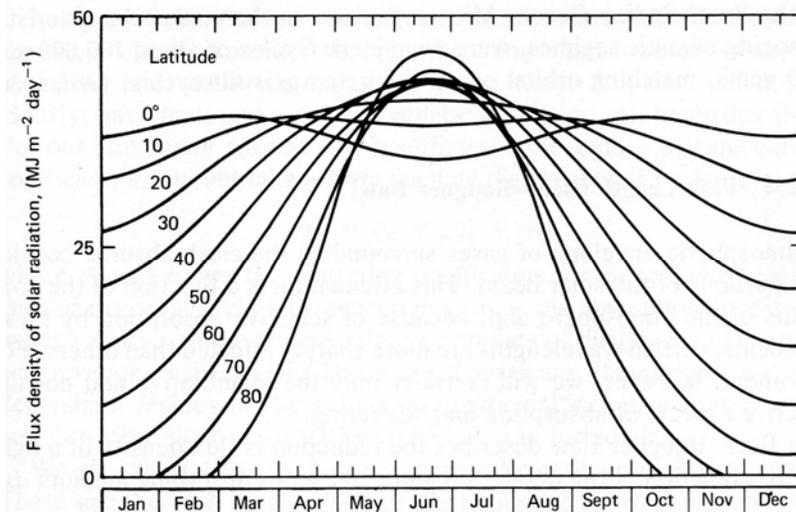


**Figura 8.** Lunghezza del giorno (dall'alba al tramonto) alle latitudini Nord in funzione del giorno dell'anno.

Oltre che contribuire a definire la quantità di radiazione che raggiunge la superficie alle diverse latitudini e giorni dell'anno, la lunghezza del giorno ha anche una importanza fondamentale perché è uno dei fattori ambientali dai quali dipende lo sviluppo delle piante.

c) Effetto combinato della densità di flusso radiante e della lunghezza del giorno sulla ineguale distribuzione della radiazione.

Sia la variazione nella lunghezza del giorno che l'alternarsi delle stagioni contribuiscono a che la distribuzione dell'energia radiante non sia uniforme né durante l'anno in una stessa località, né in uno stesso momento in località diverse. La quantità di energia che raggiunge la superficie dipende infatti, sia dal numero di ore di insolazione (e quindi dalla lunghezza del giorno), che dalla densità del flusso radiante (funzione dell'altezza del sole sull'orizzonte e quindi del giorno dell'anno, del momento del giorno (dato dall'angolo orario) e della latitudine). Calcoli teorici consentono di ricavare la variazione in flusso radiante in base a questi fattori riportata nella Figura 9, dove il valore della radiazione solare alle varie latitudini e nei diversi mesi dell'anno è espresso in  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , intendendo per giorno le ore di insolazione.



**Figura 9.** Totali giornalieri di radiazione solare ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , in base alla lunghezza del giorno) ricevuta nell'emisfero Nord da una superficie orizzontale, in funzione della latitudine e del giorno dell'anno, ipotizzando la completa trasparenza dell'atmosfera.

La figura mostra che, sebbene all'equatore la quantità totale di radiazione solare che raggiunge la terra durante l'anno (area sottesa alla curva) sia superiore a quella che si registra alle latitudini più elevate, la densità del flusso radiante giornaliero nei mesi estivi può essere sensibilmente più elevata alle latitudini maggiori a causa della maggiore durata del giorno (24 h ai poli).

#### 2.4.2. L'atmosfera la radiazione SW

Poiché l'atmosfera non è completamente trasparente alla radiazione come ipotizzato nella Figura 9, il passaggio attraverso l'atmosfera influisce sia sulla qualità che sulla quantità di radiazione che raggiunge la superficie terrestre.

La radiazione solare che raggiunge l'atmosfera può infatti essere riflessa, trasmessa o assorbita. La riflessione nelle lunghezze d'onda del visibile è responsabile dei colori degli oggetti: le **foglie** sono verdi perché riflettono prevalentemente la luce verde; la **neve** è bianca perché riflette molto

bene tutta la radiazione visibile. Contrariamente alla riflessione e alla trasmissione, che non comportano cambiamenti nella molecola né a livello energetico, né a livello chimico, l'assorbimento comporta cambiamenti a livello energetico: l'energia dei fotoni viene assorbita e la temperatura del corpo aumenta. L'energia assorbita può rimanere nel corpo, può essere reirradiata ad un lunghezza d'onda diversa, trasferita ad un altro corpo, usata per compiere un lavoro.

Le diverse lunghezze d'onda che compongono la radiazione solare possono essere assorbite o riflesse o trasmesse in misura diversa in relazione alla composizione dell'atmosfera. Quando  $\alpha$ ,  $\tau$  e  $\rho$  vengono riferiti ad all'intervallo tra 0.3 - 3 micrometri che comprende la radiazione solare, si parla più precisamente di *coefficienti di assorbimento, trasmissione e riflessione*, che rappresentano il valore medio di assorbimento, trasmissione e riflessione, pesato sulla distribuzione della radiazione in quell'intervallo di  $\lambda$ .

### Il coefficiente di riflessione (albedo)

Il coefficiente di riflessione della radiazione solare incidente sulle superfici naturali viene chiamato **albedo**. L'albedo dipende sia dalla natura della superficie e da quanto questa è liscia, sia dall'elevazione solare: al diminuire dell'elevazione, come nelle prime e ultime ore della giornata, l'albedo aumenta. L'albedo dà una misura della quantità di radiazione SW in entrata che viene persa e non contribuisce quindi al bilancio energetico delle superfici.

La riflessione è un fenomeno che non implica transizioni energetiche, per cui la lunghezza d'onda della SW riflessa è la stessa di quella incidente. Le varie particelle che compongono l'atmosfera, le nubi e la superficie terrestre riflettono parte della radiazione che le raggiunge indietro nello spazio. L'albedo riferito alla superficie terrestre è mediamente pari a circa 0.33, con valori notevolmente variabili (Tabella). La maggior parte delle rocce, sabbie, terreni e coperture vegetali hanno coefficienti di riflessione compresi tra 0.10 e 0.30 sebbene la riflessività della sabbia del deserto possa essere considerevolmente maggiore. Alcuni autori hanno evidenziato che il coefficiente di riflessione di un terreno nudo diminuisce all'aumentare del contenuto di umidità dei primi 2 cm di profondità.

L'albedo della superficie di terreno coltivato aumenta con l'aumentare del grado di copertura del terreno da parte della vegetazione. Nella caso di una coltura di soia è stato misurato un incremento di albedo dell' 1,3% per ogni 10% di aumento del grado di copertura.

Il coefficiente di riflessione dell'acqua invece è basso, con valori compresi tra 0.07 e 0.14. Grazie a questa scarsa

SUPERFICIE	CONDIZIONI	$\rho_s$
Nuvole	spessore: 100 m	0.40
	200 m	0.50
	300 m	0.70
Acqua liquida	calma; el. solare: 60°	0.05
	30°	0.10
	20°	0.15
	10°	0.35
	5°	0.60
	agitata; el. solare: 60°	0.10
Acqua solida	neve fresca; poco densa	0.85
	molto densa	0.65
	ghiaccio; pulito	0.35
	sporco	0.25
Sabbia	asciutta; sole alto	0.35
	sole basso	0.60
	grigia; umida	0.10
	asciutta	0.20
	bianca; umida	0.25
	asciutta	0.35
Terreno	organico; scuro	0.10
	argilloso	0.20
	sabbioso	0.30
Prato	in accrescimento; taglia alta	0.15
	taglia bassa	0.25
Colture erbacee	cereali, tabacco	0.25
	patata, pomodoro	0.20
	canna da zucchero	0.15
Colture forestali	foresta pluviale	0.15
	abete rosso	0.10
	latifoglie	0.18
Valore medio per coperture vegetali (risp. a $R_s$ )		0.20
Valore medio per coperture vegetali (risp. a $R_p$ )		0.05

Tabella 5.14. Albedo di corpi e superfici diverse (da Dingman, 1994, mod.).

riflessione, l'acqua si comporta come un buon accumulatore dell'energia solare. Le nubi hanno un albedo mediamente elevato, che può diventare particolarmente elevato quando sono molto spesse.

### Trasmissione e dispersione

La dispersione, indicata dagli anglosassoni col termine di '**scattering**', è un processo per il quale le molecole dell'atmosfera diffondono una porzione della radiazione incidente in tutte le direzioni senza alterarne le proprietà. Essa è dovuta:

- a molecole di gas di dimensione inferiore alla lunghezza d'onda della radiazione, più efficaci per le  $\lambda$  minori (di qui il colore blu del cielo) (*Rayleigh's scattering*);
- a molecole più grandi (polvere, gocce d'acqua), ed in questo caso è relativamente indipendente dalla  $\lambda$  e conferisce al cielo un colore lattiginoso (*Mie scattering*).

Poiché la radiazione blu (0.4  $\mu\text{m}$ ) viene dispersa 10 volte meglio di quella rossa (0.7  $\mu\text{m}$ ), la radiazione solare diffusa è più ricca di blu.

### Assorbimento selettivo

Parte della radiazione solare SW che penetra l'atmosfera non raggiunge la superficie (almeno non come SW), a causa dei fenomeni di **assorbimento**. L'atmosfera assorbe la radiazione che la attraversa modificandone sia la quantità che arriva sulla superficie, che la qualità. L'assorbimento rimuove energia dalla radiazione e provoca il riscaldamento dell'atmosfera. L'aumento della temperatura delle particelle che compongono l'atmosfera, in accordo con la legge di Wien, fa sì che queste riemettono, in tutte le direzioni, radiazione di  $\lambda$  inversamente proporzionale alla loro temperatura assoluta, quindi a  $\lambda$  lunga (LW). L'assorbimento da parte dei gas atmosferici, della polvere, del vapor acqueo e dagli altri materiali sospesi nell'atmosfera, è un assorbimento di tipo selettivo, che dipende quindi dalla qualità e quantità dei costituenti l'atmosfera. I costituenti di una massa di aria limpida e secca, sono riportati in % del volume nella tabella.

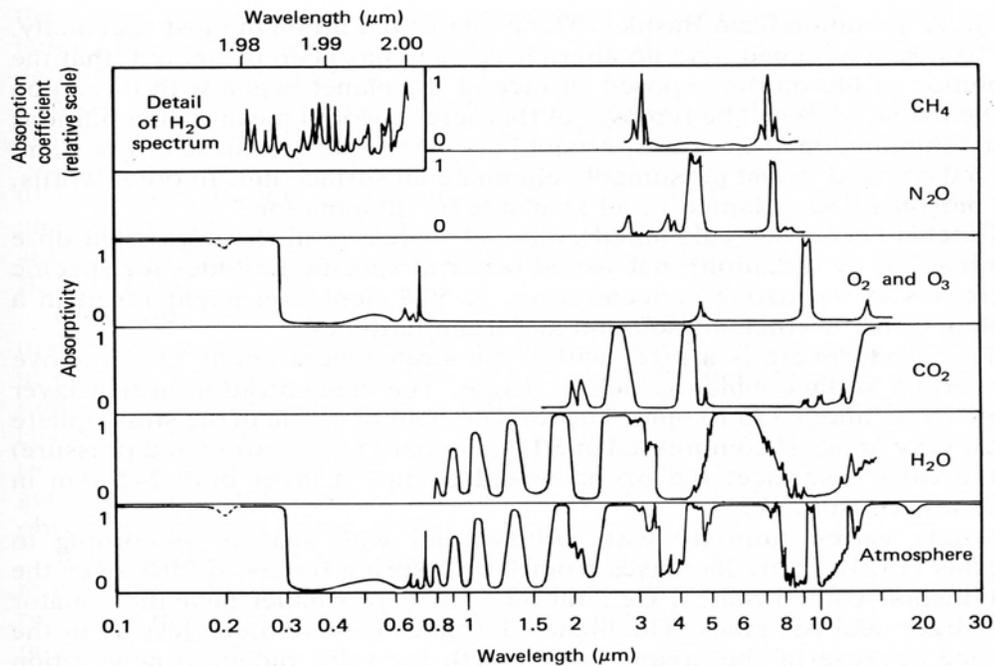
**Table 1.2 Constituents of clean, dry air**

Constituent	Volume (%)
Nitrogen	78.08
Oxygen	20.95
Argon	0.93
Carbon dioxide <sup>b</sup>	0.032
Neon	$1.8 \times 10^{-3}$
Helium	$5.24 \times 10^{-4}$
Krypton	$1 \times 10^{-4}$
Hydrogen	$5 \times 10^{-5}$
Xenon	$8.0 \times 10^{-6}$
Ozone <sup>a</sup>	Variable; about $1.0 \times 10^{-6}$
Radon <sup>a</sup>	$6.0 \times 10^{-18}$
<i>Plus</i>	
Water vapor	0-3%+
Dusts	?
Pollens	?
Industrial emissions	?

SOURCE: R. J. List, ed., Smithsonian Meteorological Tables, 1966, p.389.  
<sup>a</sup> Variable  
<sup>b</sup> The mean global concentration reached about 0.034 in 1980.

Gli spettri di assorbimento di alcuni dei componenti principali dell'atmosfera sono riportati nella figura 10, sia per quanto riguarda la SW che la LW.

Per quanto riguarda la radiazione SW che entra nell'atmosfera proveniente dal Sole, è di grande importanza biologica l'assorbimento pressoché totale delle radiazioni mutagene UV da parte dell'ozono e dell'ossigeno. La figura mette in evidenza anche la relativa trasparenza dell'atmosfera nei confronti della radiazione visibile/fotosinteticamente attiva (PAR), cioè proprio in corrispondenza del picco di emissione del Sole. La radiazione SW che arriva in superficie è perciò impoverita in UV e IR vicino, ma non nelle lunghezze d'onda del visibile, rispetto a quella emessa dal Sole.



**Figura 9.** Spettro di assorbimento dei principali componenti dell'atmosfera

### 2.4.3. Radiazione solare globale, diretta e diffusa

La radiazione solare che, non essendo stata assorbita o riflessa al di fuori dell'atmosfera, raggiunge la superficie, viene indicata come **radiazione globale** e si compone di due quote:

- la **radiazione solare diretta**, ossia la parte della radiazione che riesce a raggiungere indisturbata la superficie terrestre, e che raramente supera il 75% della radiazione globale;
- la **radiazione solare diffusa**, ossia la porzione di radiazione solare intercettata dall'atmosfera (cielo e nuvole) che viene riemessa verso la terra attraverso fenomeni di riflessione e **dispersione**.

La radiazione globale si misura attraverso i **radiometri** che, se opportunamente ombreggiati nei confronti della radiazione diretta, possono servire a misurare la sola componente diffusa della radiazione e, se posizionati al contrario (verso la superficie, servono anche a misurare l'albedo.

La radiazione globale ricevuta giornalmente sulla superficie terrestre varia con la stagione, la latitudine, l'altitudine, le condizioni atmosferiche. I valori massimi sono dell'ordine di  $34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , e si riscontrano. All'equatore il flusso di radiazione globale è assai costante e dell'ordine di  $17\text{-}19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Il valore decisamente inferiore al massimo è dovuto all'azione schermante dell'onnipresente copertura nuvolosa. Alle medie latitudini si osservano ampie variazioni nei

flussi di radiazione globale, che possono passare da minimi di  $2\text{-}4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  in giornate invernali coperte, a massimi di  $34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  nelle giornate estive senza nuvole nella fascia desertica in corrispondenza dei solstizi.

I valori teorici di radiazione globale al variare della latitudine e del periodo dell'anno in assenza di nuvolosità sono riportati nella seguente tabella:

**TABLE 3.1. Mean Solar Radiation for Cloudless Skies (calculated from Budyko, 1963)**

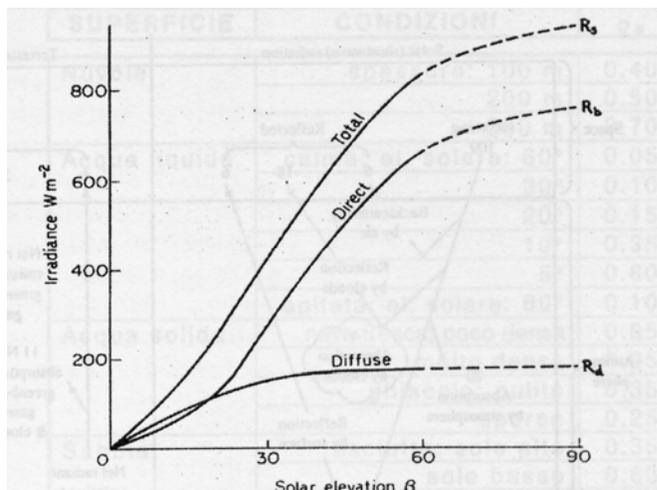
Latitude	Mean Solar Radiation for Cloudless Skies per Month											
	Jan	Feb	Mar	April	May	June (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
60 N	2.51	5.99	13.82	22.32	29.01	31.95	29.85	23.32	15.78	8.50	3.64	1.55
55 N	4.31	8.67	16.33	24.16	29.85	32.66	30.56	25.00	18.00	10.89	5.57	3.22
50 N	6.70	11.43	18.55	25.83	30.98	33.08	31.53	26.67	20.10	13.52	8.08	5.44
45 N	9.34	14.36	20.64	27.21	31.53	33.37	32.36	28.05	22.06	16.04	10.89	8.25
40 N	12.27	17.04	22.90	28.34	32.11	33.49	32.66	29.18	23.74	18.42	13.52	10.76
35 N	14.95	19.55	24.58	29.31	32.11	33.49	32.95	30.14	25.25	20.52	15.91	13.52
30 N	17.46	21.65	25.96	29.85	32.11	33.20	32.66	30.44	26.67	22.48	18.30	16.04
25 N	19.68	23.45	27.21	30.14	32.11	32.66	32.24	30.44	27.63	24.28	20.39	18.30
20 N	21.65	25.00	28.18	30.14	31.40	31.82	31.53	30.14	28.47	25.83	22.48	20.52
15 N	23.57	26.50	29.01	29.85	30.56	30.69	30.56	29.60	29.18	26.92	24.28	22.48
10 N	25.25	27.63	29.43	29.60	29.60	29.31	29.43	28.76	29.60	28.05	25.83	24.41
5 N	26.92	28.47	29.85	29.31	28.18	27.76	27.93	27.93	29.73	28.76	27.21	26.25
0 E	28.18	29.18	30.02	28.47	26.92	26.25	26.67	27.76	29.60	29.60	28.47	26.80
5 S	28.05	29.85	29.85	27.76	25.54	24.58	25.00	26.67	28.09	29.85	30.44	29.31
10 S	30.69	30.44	29.43	26.80	24.70	22.73	22.73	25.00	27.55	29.85	30.44	30.69
15 S	31.53	30.69	28.76	25.54	22.32	20.81	21.48	23.86	26.59	29.73	31.28	31.95
20 S	32.36	30.69	27.93	23.99	20.52	18.71	19.26	22.06	25.54	29.31	31.53	32.95
25 S	32.95	30.69	27.09	22.32	18.13	16.75	17.58	20.64	24.33	28.76	32.11	33.62
30 S	33.37	30.44	25.96	20.81	16.62	14.78	15.49	18.84	22.94	28.05	32.11	34.33
35 S	33.49	29.73	24.58	18.97	14.53	12.56	13.40	16.87	21.48	27.21	32.11	34.88
40 S	33.49	28.76	22.90	17.04	12.14	10.17	11.30	14.78	19.30	26.08	31.82	35.17
45 S	33.49	27.76	21.23	14.95	9.92	7.66	8.79	12.69	18.09	24.70	31.28	35.17
50 S	32.95	26.38	19.26	12.85	7.54	5.32	6.41	10.59	16.20	23.15	30.44	34.88
55 S	32.36	24.83	17.17	10.47	5.32	3.22	4.19	8.25	13.90	21.48	29.60	34.33
60 S	31.53	23.15	15.07	7.83	3.35	1.38	2.22	6.15	11.47	19.68	29.31	34.04

Note: August values in the southern hemisphere were corrected to obtain a smooth transition in monthly values. Also, 30-day months were assumed because when actual days per month were used, a smooth transition between January and March did not occur.

### Rapporti tra radiazione diretta e diffusa

Il contributo della radiazione diffusa è maggiore alle latitudini più elevate, durante l'inverno e quando l'elevazione solare è modesta, oltre che, naturalmente, in presenza di nubi.

La variazione nel rapporto tra radiazione diretta e diffusa nel corso del giorno è rappresentato nella fig. 12.



La frazione diffusa rappresenta la totalità della radiazione globale prima dell'alba e dopo il tramonto, ed ha una spiccata azione biologica.

Perfino in giorni limpidi, la radiazione diffusa contribuisce per il 10-30% alla radiazione globale. In Inghilterra, ad esempio, il cielo è frequentemente nuvoloso ed il cielo è limpido solo per il 34% del tempo durante il quale il sole è al di sopra dell'orizzonte. In queste condizioni la radiazione diffusa arriva a rappresentare dal 50 al 100% della

radiazione globale, in funzione della stagione e dell'ora del giorno. In climi più asciutti la radiazione diffusa è molto minore.

Sebbene circa il 45% dell'energia della radiazione solare diretta che arriva alla superficie sia nelle lunghezze d'onda del PAR, la proporzione media di radiazione diretta + radiazione diffusa nel PAR é approssimativamente del 50%. Questo perché la radiazione diffusa tende ad arricchirsi di onde nel visibile, particolarmente se il sole é basso sull'orizzonte.

#### 2.4.4. Le nubi e la radiazione SW

Le nuvole, essendo costituite da goccioline d'acqua o da cristalli di ghiaccio, hanno effetti importanti sulla radiazione, che possono disperdere, riflettere o assorbire.

Le nubi disperdono la radiazione sia nella direzione dalla quale proviene che nella direzione opposta.

I diversi sistemi nuvolosi sono caratterizzati da coefficienti di riflessione e trasmissione assai diversi, molto sensibili alle variazioni di spessore, e sono in grado di assorbire fino al 30-40% della radiazione incidente. Le nubi che si formano sul mare hanno una maggiore capacità di assorbimento, a parità di spessore, delle nubi che si formano sul continente, in quanto sono costituite da gocce di umidità di maggiori dimensioni.

Se hanno spessore elevato predominano i fenomeni di riflessione verso l'alto che possono arrivare fino a 70% della radiazione incidente. In questi casi 2/3 del restante 30% possono essere assorbiti ed il rimanente 10% trasmesso

Le nubi manifestano effetti notevoli sul rapporto tra radiazione diffusa e diretta. Con cieli completamente coperti la radiazione è tutta diffusa ed il coefficiente di estinzione molto alto. Il loro effetto più importante é però quello nei confronti della quantità di radiazione che raggiunge la superficie. Considerando sia riflessione che assorbimento, la presenza delle nubi é responsabile del fatto che l'insolazione media giornaliera nelle regioni umide è comunemente inferiore del 20-30% rispetto a quella delle regioni aride e semi-aride. Si consideri, al proposito, che una nuvolosità del 50% è rappresentativa delle condizioni che si incontrano nelle latitudini medie durante l'estate, per cui solo per metà delle ore il cielo è limpido.

L'effetto della nuvolosità sulla radiazione globale é tale che la radiazione globale può essere stimata a partire dall'**eliofania**, che è una misura della durata dell'insolazione, ossia del tempo per il quale, durante una giornata, il sole è stato visibile al suolo perché non nascosto dalle nubi. L'eliofania si misura con uno strumento molto semplice, l'*eliofanografo*, si esprime in ore e può essere utilizzata per stimare la radiazione globale quando non siano disponibili misure dirette di radiazione. La stima è basata sul fatto che il rapporto tra la radiazione che effettivamente raggiunge la superficie terrestre ( $R_s$ ) e la radiazione  $R_{so}$  che in quel giorno ed a quella latitudine raggiungerebbe la superficie in assenza di nubi, sia funzione del rapporto tra il numero di ore con sole non coperto da nubi ( $n$ , eliofania) ed il numero massimo di ore di illuminazione alla latitudine e nel periodo considerato ( $N$ ) o l'**eliofania relativa**. Questi due rapporti sono legati dalla relazione :

$$\frac{R_s}{R_{so}} = a + b \frac{n}{N}$$

dove le costanti  $a$  e  $b$  sono costanti empiriche che cambiano da ambiente ad ambiente (negli USA  $a= 0,35$  e  $b= 0,61$ ). La radiazione ( $R_s$ ) che effettivamente raggiunge la superficie terrestre può pertanto essere stimata a partire da questa relazione considerando che  $N$  (lunghezza del

giorno) e  $R_{so}$  possono essere calcolati in base a latitudine e giorno dell'anno (i valori mensili di  $R_{so}$  sono quelli riportati nella tabella 3.1 della pagina precedente) e vche quindi  $R_s$  è l'unica incognita.

## **2.5. LA RADIAZIONE A ONDA LUNGA (LW) O RADIAZIONE TERMICA**

Viene considerata radiazione termica o LW quella emessa da oggetti la cui temperatura superficiale è inferiore ai 600 K. La denominazione 'termica' è dovuta al fatto che, a causa del loro elevato coefficiente di assorbimento per l'IR lontano, la maggior parte degli organismi hanno un livello energetico, ossia una temperatura, fortemente dipendente dalla radiazione LW che ricevono dall'ambiente circostante.

Poiché anche la Terra ha una temperatura superiore allo zero assoluto, anche la Terra emette radiazione ma, data la sua minore temperatura rispetto al Sole, emette radiazione di maggiore lunghezza d'onda (Legge di Wien), mediamente compresa tra 3 e 100  $\mu\text{m}$  (regione dell'infrarosso), con un picco intorno a 9,6  $\mu\text{m}$ . Alle medie latitudini, la superficie terrestre emette un flusso di radiazione termica che può raggiungere valori di 30-40  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ . La quantità di radiazione emessa dalla superficie terrestre dipende più dalla temperatura della sua superficie che dalla destinazione della stessa (terreno nudo, foresta, prateria) in quanto le superfici naturali hanno un'emissività praticamente pari ad 1 indipendentemente dalla loro destinazione. La temperatura del terreno dipende poi notevolmente dal suo bilancio idrico.

Circa il 90% della radiazione LW irradiata dalla terra viene assorbita dall'atmosfera entro pochi metri dalla superficie a causa della opacità di quest'ultima alla LW, dovuta prevalentemente al vapor acqueo ed alla  $\text{CO}_2$  (Fig. 9) E' perciò la concentrazione di  $\text{CO}_2$  e vapor acqueo ad essere responsabile dell'*effetto serra*, insieme a quella dei clorofluorocarburi e di altri materiali di origine organica, anch'essi trasparenti alla radiazione SW, ma opachi nei confronti della radiazione LW. Per questo motivo la presenza di nubi ostacola il raffreddamento del terreno per irraggiamento. Questa opacità impedisce che l'energia reirradiata dalla superficie terrestre verso l'atmosfera vada tutta perduta nello spazio. Esiste solo una 'finestra' trasparente alla radiazione LW 8 e 14  $\mu\text{m}$ , ossia proprio in corrispondenza del picco di emissione della Terra.

Radiazione ad onda lunga (LW) viene emessa anche dall'atmosfera, poiché questa si riscalda assorbendo sia radiazione SW proveniente dal sole, che radiazione LW proveniente dalla terra (nonché per effetto della condensazione dell'acqua nelle nubi e per contatto con oggetti più caldi). La temperatura dell'atmosfera può così variare da valori estremamente bassi, a valori simili a quelle terrestri, finanche a temperature intorno ai 323°K (50°C). Alle medie latitudini il flusso radiante di radiazione termica dell'atmosfera può raggiungere i 15-20  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ .

L'emissione di LW da parte dell'atmosfera è direzionalmente casuale e la terra ne riceve la parte diretta verso il basso, talora chiamata 'controradiazione'. Spesso la radiazione LW viene indicata come radiazione notturna. Sebbene l'emissione di LW sia essenzialmente l'unico flusso radiativo durante la notte, quando la radiazione solare SW è assente, essa prevale anche durante il giorno, a causa del fatto che la temperatura del terreno è più alta nelle ore diurne. Quindi tutte le superfici della terra ricevono radiazione SW durante il giorno, e scambiano radiazione LW con l'atmosfera continuamente.

E' ovvio che il valore del bilancio tra radiazione termica emessa dal cielo e quella emessa dalla terra dipende notevolmente dalla differenza delle loro rispettive temperature.

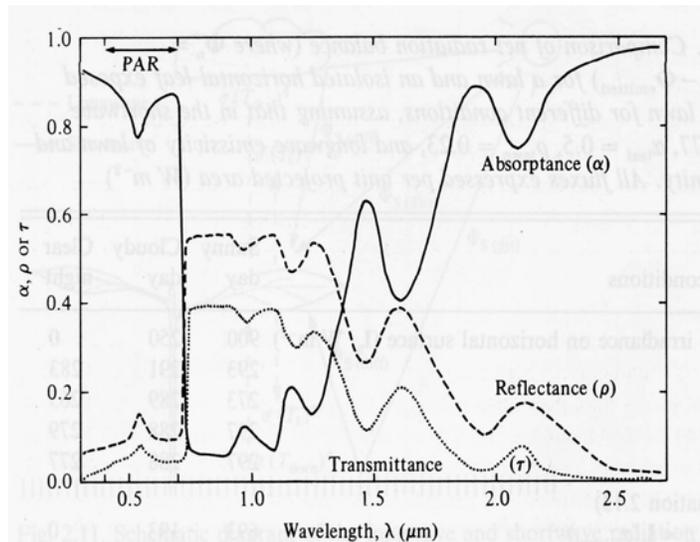
La differenza tra il flusso incidente sull'atmosfera e quello emesso nello spazio rappresenta il flusso radiante netto della radiazione ad onda lunga. Tale flusso, con cielo privo di nubi, è approssimativamente costante durante il giorno e nel corso dell'anno, e rappresenta una perdita netta di  $100 \text{ W m}^{-2}$  da parte della terra. Poiché il contributo al flusso di radiazione ad onda lunga da parte dello spazio è praticamente nullo, a causa del fatto che la sua temperatura è prossima allo  $0^\circ\text{K}$ , si verifica un graduale e netto flusso di radiazione termica dall'atmosfera allo spazio.

## 2.6. LA RADIAZIONE E LE FOGLIE

Anche le foglie hanno un proprio spettro di riflessione, trasmissione ed assorbimento, i cui valori tipici per quanto riguarda la radiazione SW sono riportati nella figura della pagina successiva, nella quale si possono notare:

- il forte assorbimento nella banda della PAR (verde escluso, da qui il colore verde delle foglie). Una piccola frazione di questa energia viene utilizzata con la fotosintesi e fissata nelle molecole organiche che ne derivano, mentre la maggior parte aumenta la temperatura della foglia o viene usata per la traspirazione. L'elevato assorbimento a queste lunghezze d'onda si traduce nel fatto che, sebbene solo il 50 % della radiazione solare sia fotosinteticamente attiva (PAR), ben l'85 % di questa viene assorbita dalle foglie.
- il basso assorbimento nell'IR vicino, tra 0,7 e circa 1,2 micrometri, che evita un sovrariscaldamento della foglia e che è responsabile del fatto che la radiazione solare che giunge alla base della pianta è percentualmente più ricca in questo intervallo di lunghezze d'onda.

Mediamente, la quantità di radiazione solare assorbita da una foglia può essere considerata pari a circa il 50%, tranne che nelle prime ore del mattino e nelle ultime della sera, quando, essendo la radiazione solare relativamente più ricca nella regione dell'infrarosso, l'assorbimento scende mediamente al 40% (Gates, 1980). L'assorbimento medio può aumentare fino al 59% in giornate nuvolose rispetto giornate serene a causa del fatto che la distribuzione spettrale della luce in questo caso è interamente nelle lunghezze d'onda dell'ultravioletto e del visibile, dove le foglie hanno il massimo assorbimento.



Se si considera l'intero spettro di radiazione solare, si può parlare di coefficiente di riflessione delle foglie, o albedo fogliare ( $\rho$ ), che è mediamente pari al 0,30, con minime variazioni tra le specie. Solo le foglie aghiformi delle conifere, con un  $\rho$  di 0,12, si discostano significativamente da questo valore, che è quindi accompagnato dal coefficiente di assorbimento più elevato (0,88), rispetto a valori di 0,50 nelle specie a foglia larga.

Per quanto riguarda invece la radiazione LW, le foglie sono caratterizzate da un ottimo assorbimento nell'IR lontano, così che in questa banda le foglie si comportano come dei corpi neri con valori di assorbività ed emissività da 0.94 a 0.99 per la maggior parte delle specie. L'elevata emissività in questa banda di lunghezze d'onda è fondamentale per consentire alla foglia di abbassare la propria temperatura reirradiando parte dell'energia assorbita.

## 2.7. IL BILANCIO RADIATIVO E LA RADIAZIONE NETTA

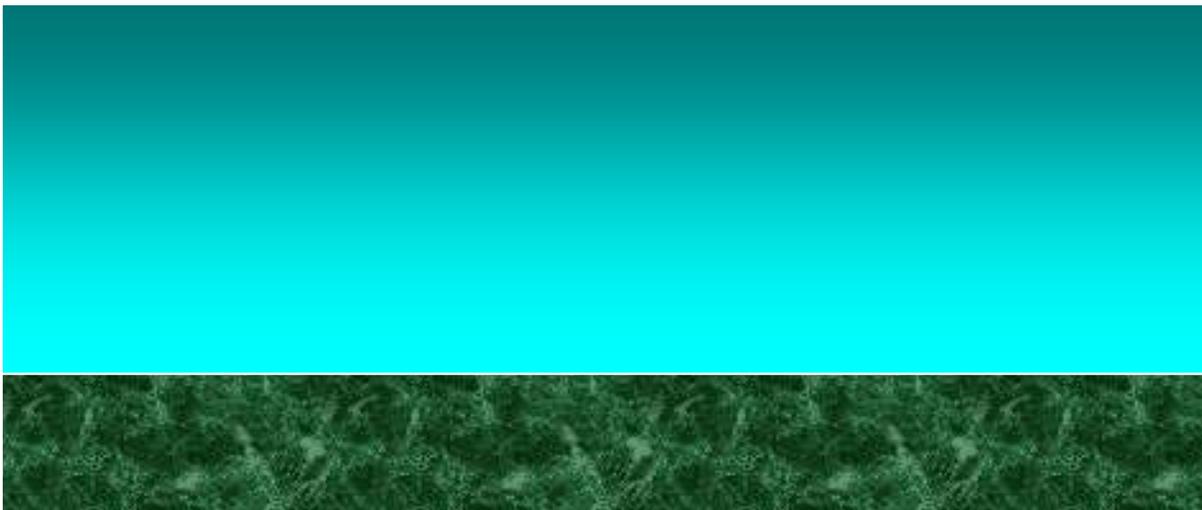
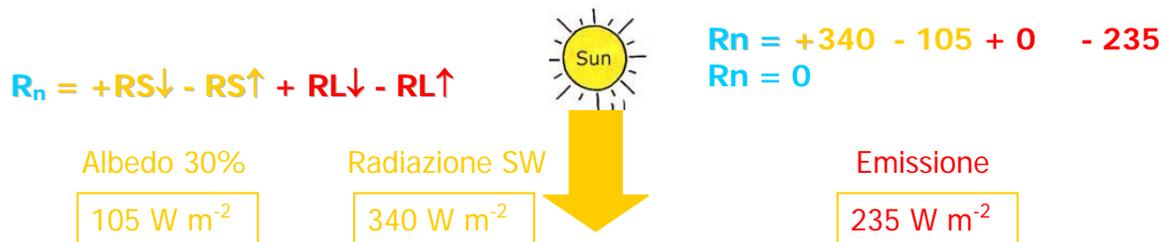
Il bilancio radiativo del sistema terra considera sia le componenti di radiazione che arrivano sulla Terra che quelle che lasciano la terra.

Il flusso netto di tutta la radiazione (onda corta ed onda lunga) attraverso l'unità di superficie di un piano è chiamata **radiazione netta**. Essa rappresenta l'energia disponibile su quella superficie per scambi con altre forme di energia. Alternativamente, la radiazione netta assorbita da un oggetto può essere indicata come la *somma di flussi radianti incidenti meno i flussi radianti che lasciano l'oggetto*. La radiazione incidente si compone di una parte ad onda corta ( $R_{S\downarrow}$ ) che comprende la radiazione solare diretta e diffusa, e di una parte ad onda lunga ( $R_{L\downarrow}$ ) che comprende la radiazione riemessa dall'atmosfera verso la superficie terrestre. La radiazione che lascia la superficie si compone anch'essa di una parte ad onda corta che è quella che viene riflessa dalle superfici ( $R_{Sp\uparrow}$ ), e di una parte ad onda lunga, che viene emessa dalla superficie terrestre ( $R_S\uparrow$ ). La radiazione netta alla superficie del terreno sarà quindi pari a :

$$R_n = R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{Sp\uparrow} - R_L\uparrow$$

La radiazione riflessa dipende dall'albedo della superficie ( $\rho$ ), mentre la radiazione emessa dipende dall'emissività della superficie e dalla sua temperatura assoluta (fig.6). L'emissività della superficie terrestre nella regione ad onda lunga può essere considerata con buona approssimazione pari ad 1. Se, come per una superficie di terreno coltivata, si assume che la superficie in esame non trasmetta, la differenza tra la radiazione incidente e quella riflessa, è pari alla quantità di radiazione assorbita.

### Bilancio dei flussi radianti all'esterno dell'atmosfera



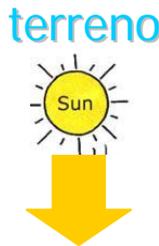
Queste componenti si bilanciano nel lungo periodo e se si considera la terra nel suo insieme, o semplicemente la superficie dell'atmosfera. La figura soprastante rappresenta valori medi globali dei flussi radiativi SW e LW, e dimostra come i flussi in entrata siano perfettamente bilanciati da quelli in uscita. Se così non fosse la terra si raffredderebbe o si riscalderebbe continuamente.

Relativamente ad una qualsiasi superficie che possiamo individuare sul terreno o nell'atmosfera, il bilancio dei flussi radianti è raramente pari a 0. Il mancato bilanciamento dei flussi radianti è dovuto al fatto che parte della radiazione emessa o assorbita può essere scambiata con altri flussi energetici associati all'evaporazione/condensazione dell'acqua ed al riscaldamento/raffreddamento delle superfici.

In tutte quelle situazioni, come quella illustrata, in cui il bilancio è positivo, l'energia che si rende disponibile viene usata nel sistema terra per compiere lavoro, ed in particolare per consentire i cambiamenti di fase dell'acqua, e per modificare la temperatura dell'aria e quella della superficie.

## Bilancio dei flussi radianti alla superficie del terreno

$$R_n = +RS\downarrow - RS\uparrow + RL\downarrow - RL\uparrow$$



$$R_n = +177 - 14 + 330 - 384$$

$$R_n = +109$$

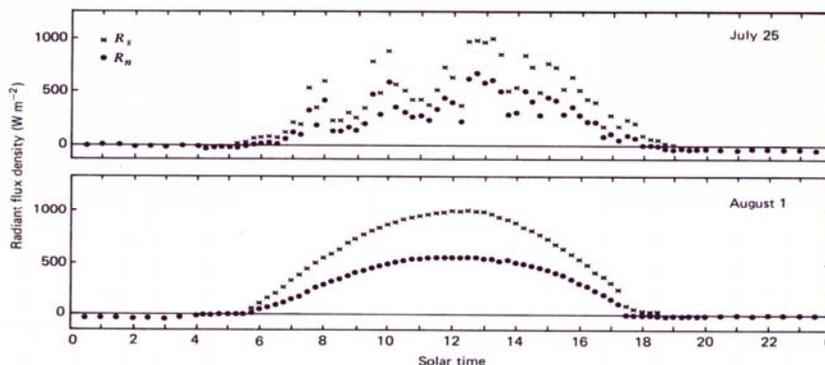
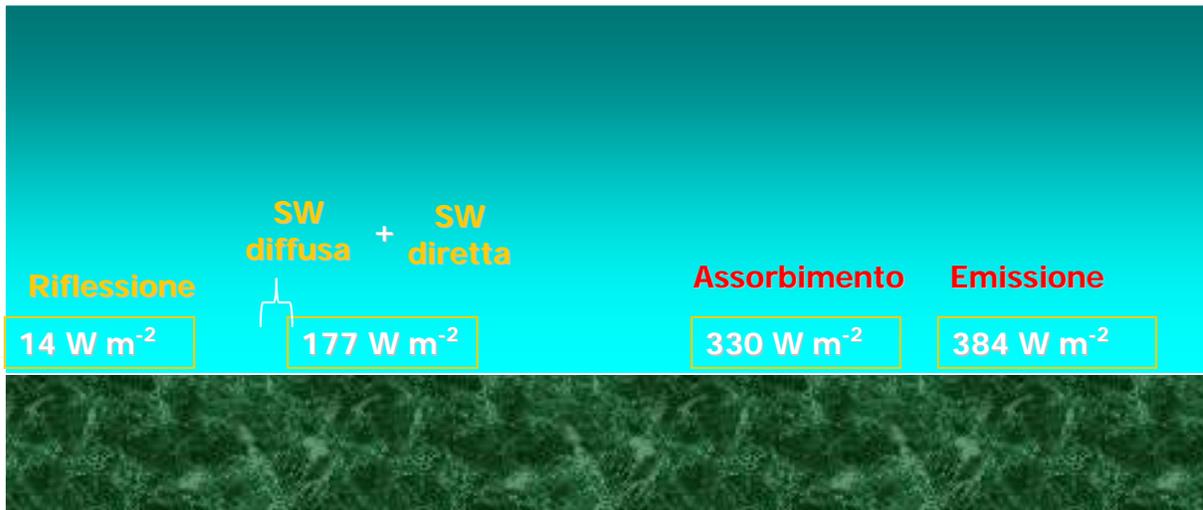


Fig. 1.24 Solar ( $R_s$ ) and net ( $R_n$ ) radiation over soybeans at Mead, Nebraska, on cloudy and clear days in midsummer.

### 2.7.1. Variazioni giornaliere e stagionali nella $R_n$

Poiché il flusso della radiazione SW cambia in modo considerevole nel passare dal giorno alla notte, mentre i flussi di LW variano

meno, il valore della  $R_n$  mostra un andamento simile a quello della radiazione solare, ma a differenza di questa assume valori positivi durante il giorno e negativi durante la notte (figura).

Il valore di  $R_n$  diventa positivo dopo il sorgere del sole, e negativo prima del tramonto, quando i flussi radianti che lasciano la superficie superano quelli che la raggiungono.

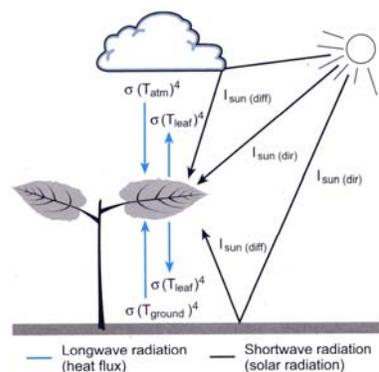
Quando si considerano i valori annuali di  $R_n$ , questi sono in genere positivi nelle zone tropicali, negativi nelle regioni polari, positivi in estate e negativi in inverno alle latitudini intermedie, tra i tropici ed i circoli polari.

L'ampiezza della variazione in  $R_n$  aumenta con la latitudine, analogamente a quanto osservato per la radiazione solare. Il valore medio di radiazione netta giornaliera è positivo durante l'estate (raggiunge un picco intorno al solstizio), mentre d'inverno è negativo perché i valori giornalieri della radiazione solare sono scarsi e le notti sono lunghe.

## 2.7.2. Radiazione globale e $R_n$

Per molti fenomeni biologici ciò che è importante è il valore della radiazione netta piuttosto che quello della radiazione globale. Il rapporto tra  $R_n$  e radiazione globale sarà alto sulla superficie degli oceani e dei laghi, in quanto le superfici sono fredde (bassa emissione di radiazione ad onda lunga) e la riflessione della radiazione ad onda corta è scarsa. Sui deserti questo rapporto sarà basso, in quanto le superfici sono molto calde e la riflessione delle superfici chiare è elevata. Nelle regioni tropicali sarà alto perché la riflessione da parte della vegetazione è bassa, mentre la temperatura della superficie è moderata. Il valore di questo rapporto varierà pertanto da 0.85 per la superficie libera dell'acqua a 0.25 per le superfici desertiche.

## 2.7.3. Il bilancio radiativo delle piante



**Fig. 2.1.10.** Radiation balance of a leaf.  $I_{sun}$  Radiation from the sun as direct and diffuse radiation;  $\sigma(T_{atm})^4$  heat radiation of the atmosphere;  $\sigma(T_{leaf})^4$  heat radiation of the upper surface of the leaf;  $\sigma(T_g)^4$  heat radiation from the soil (from Jones 1994)

Sebbene le foglie assorbano poca radiazione nell'IR vicino (SW), una considerevole quantità di energia viene assorbita nelle lunghezze d'onda del visibile. Solo una piccolissima percentuale di tale energia può essere conservata come energia fotochimica nei pigmenti, per cui l'eccesso viene convertito in calore, che si somma al calore che viene prodotto nelle reazioni che portano alla sintesi delle molecole organiche.

Ammettendo che la quantità di energia solare assorbita da una foglia nelle ore centrali di una giornata senza nuvole ammonti a  $350 \text{ W m}^{-2}$ , la maggior quantità di tale energia, che surriscalderebbe la foglia, viene dissipata grazie alla elevata emissività nell'IR lontano che consente alla foglia di reirradiare parte dell'energia. Poiché il flusso

di energia radiante è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta di un corpo ( $\phi = \epsilon \sigma T^4$ , Legge di Stefan-Boltzmann), foglie che si trovino ad una temperatura di  $27^\circ \text{C}$  ( $300 \text{ K}$ ), reirradiano  $460 \text{ W m}^{-2}$  da ciascun lato.

Se si considerassero unicamente questi due flussi ( $+350 - 460 \times 2 \text{ W m}^{-2}$ ) si avrebbe una perdita netta di energia dalla foglia che si raffredderebbe rapidamente anche durante il giorno. In realtà le foglie intercettano anche radiazione LW proveniente dall'ambiente circostante e dall'atmosfera soprastante. Ammettendo che le superfici che ritrovano sotto la foglia siano alla sua stessa temperatura, allora, il flusso di  $460 \text{ W m}^{-2}$  in uscita è perfettamente bilanciato dalla radiazione LW che arriva sulla foglia.

Lo stesso non accade per la pagina superiore della foglia, che riceve radiazione LW da una atmosfera che ha una temperatura apparente, in assenza di nubi, di  $-53^\circ \text{C}$  ( $220 \text{ K}$ ),

in grado di emettere un flusso di  $130 \text{ W m}^{-2}$ . Lo sbilanciamento è tra i flussi radianti in entrata e in uscita è di scarsa entità:

$$350 - 460 + 130 = 20 \text{ W m}^{-2}$$

ma comunque positivo, il che significa che la foglia ha necessità di altri flussi energetici attraverso i quali evitare che i  $20 \text{ W m}^{-2}$  assorbiti la riscaldino eccessivamente.

Se poi sono presenti nubi, la temperatura dell'atmosfera è molto più alta, potendo arrivare a  $7 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $280 \text{ K}$ ), equivalente ad un flusso di  $350 \text{ W m}^{-2}$ . Poiché però, se il cielo è nuvoloso, è inferiore anche la quantità di radiazione incidente, ammettendo che questa venga dimezzata il bilancio diventa:

$$350/2 - 460 + 130 = 65 \text{ W m}^{-2}$$

equivalente ad una maggiore quantità di calore da dissipare per evitare temperature eccessivamente alte.

Durante la notte la situazione è molto diversa perché, a causa dell'assenza della SW dal bilancio radiativo ed energetico.

$$\text{In assenza di nubi: } 0 - 460 + 350 = -110 \text{ W m}^{-2}$$

$$\text{In presenza di nubi: } 0 - 460 + 350 = -110 \text{ W m}^{-2}$$

La superficie fogliare, così come la maggior parte delle superfici sulla Terra, tende a raffreddarsi in una misura che dipende fortemente dalla presenza di nubi, tanto che, in notti limpide, la temperatura delle foglie può scendere al di sotto dei valori di congelamento anche se la temperatura dell'aria è più alta (gelate radiative).

In accordo con tali calcoli teorici, la  $R_n$  delle foglie e delle colture è in genere pari a 0 o negativa durante la notte, positiva durante il giorno, e particolarmente elevata nelle ore centrali della giornata, caratterizzate da una maggiore densità di flusso radiante. E' perciò spesso necessario l'intervento di altri flussi energetici per dissipare il calore in eccesso che potrebbe portare la temperatura della foglia a livelli eccessivi.

Fonti:

Rosemberg NJ, Blad BL, Verma SB, 1983. *Microclimate. The biological environment*. 2<sup>nd</sup> Ed. J. Wiley and Sons, 495 pp.

Jones HG, 1992. *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. 2<sup>nd</sup> Ed. Cambridge University Press, 428 pp.

Loomis RS & Connor DJ, *Crop ecology. Productivity and management in agricultural systems*.

## APPENDICE

Table 7-1. Base SI units.

Quantity	Unit	Symbol
length	meter	m
mass	kilogram	kg
time	second	s
electric current	ampere	A
thermodynamic temperature	kelvin	K
amount of substance	mole	mol
luminous intensity	candela	cd

Table 7-2. Derived SI units with special names.

Derived quantity	Name	Symbol	Expression in terms of other SI units	Expression in terms of SI base units
absorbed dose, specific energy imparted, kerma	gray	Gy	$\text{J kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
activity (of a radionuclide)	becquerel	Bq		$\text{s}^{-1}$
capacitance	farad	F	$\text{C V}^{-1}$	$\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$
Celsius temperature	degree Celsius	$^{\circ}\text{C}$		K
dose equivalent	sievert	Sv	$\text{J kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
electric charge, quantity of electricity	coulomb	C		$\text{s A}$
electric conductance	siemens	S	$\text{A V}^{-1}$	$\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2$
electric potential, potential, difference, electromotive force	volt	V	$\text{W A}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$
electric resistance	ohm	$\omega$	$\text{V A}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$
energy, work, quantity of heat	joule	J	$\text{Nm}$	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$
force	newton	N		$\text{m kg s}^{-2}$
frequency	hertz	Hz		$\text{s}^{-1}$
illuminance†	lux	lx	$\text{cd sr}$	$\text{cd sr}$
inductance	henry	H	$\text{Wb A}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$
luminous flux†				
magnetic flux	weber	Wb	$\text{V s}$	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$
magnetic flux density	tesla	T	$\text{Wb m}^{-2}$	$\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$
plane angle‡	radian	rad		$\text{m m}^{-1} = 1$
power, radiant flux	watt	W	$\text{J s}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$
pressure, stress	pascal	Pa	$\text{N m}^{-2}$	$\text{kg s}^{-2}$
solid angle‡	steradian	sr		$\text{m}^2 \text{m}^{-2} = 1$

† Photometric units are not allowed in ASA, CSSA, and SSSA publications.

‡ The class of supplemental units was eliminated and the radian and steradian were reclassified as derived units in 1995 (Taylor, 1995, p. iv).

Table 3.3 SI prefixes

Name	Symbol	Size	Factor
yotta	Y	1 000 000 000 000 000 000 000 000	$10^{24}$
zetta	Z	1 000 000 000 000 000 000 000	$10^{21}$
exa	E	1 000 000 000 000 000 000	$10^{18}$
peta	P	1 000 000 000 000 000	$10^{15}$
tera	T	1 000 000 000 000	$10^{12}$
giga	G	1 000 000 000	$10^9$
mega	M	1 000 000	$10^6$
kilo	k	1000	$10^3$
hecto	h	100	$10^2$
deca	da	10	$10^1$
		1	
deci	d	0.1	$10^{-1}$
centi	c	0.01	$10^{-2}$
milli	m	0.001	$10^{-3}$
micro	$\mu$	0.000 001	$10^{-6}$
nano	n	0.000 000 001	$10^{-9}$
pico	p	0.000 000 000 001	$10^{-12}$
femto	f	0.000 000 000 000 001	$10^{-15}$
atto	a	0.000 000 000 000 000 001	$10^{-18}$
zepto	z	0.000 000 000 000 000 000 001	$10^{-21}$
yocto	y	0.000 000 000 000 000 000 000 001	$10^{-24}$

### 3. IL BILANCIO ENERGETICO

#### 3.1. L'energia e il suo trasferimento

L'energia è la proprietà della materia che rappresenta a sua attitudine a svolgere un lavoro. Il concetto di radiazione netta ( $R_n$ ) è estremamente importante perché quantifica l'energia che si rende disponibile per gli scambi energetici che si realizzano a livello di coltura. Poiché la radiazione, una volta assorbita, si trasforma in calore, i flussi energetici associati all'assorbimento della radiazione non riguardano più l'energia radiante, ma l'energia termica.

Per calore si intendono diversi tipi di energia interna legati al moto vibrazionale, rotatorio e traslatorio degli atomi e delle molecole. Il calore posseduto da un corpo rappresenta la quantità totale di tale energia. La temperatura è una misura del livello medio di energia cinetica degli atomi e delle molecole che compongono il corpo, ed è quindi una misura del suo stato termico. Per poter parlare di flussi di calore è necessario acquisire alcuni concetti di base:

- il **calore specifico** di una sostanza è la quantità di calore necessaria per innalzare di  $1^\circ\text{C}$  la temperatura di 1 kg (calore specifico di massa,  $C_s$ , misurato in  $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ ) o di 1 l (calore specifico di volume,  $C_v$ ,  $\text{J l}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ ) di quella sostanza. I due tipi di calore specifico sono legati tra loro dalla densità, secondo la relazione:  $\rho C_s = C_v$

*Il calore specifico dell'acqua è l'energia necessaria per portare la temperatura dell'acqua da  $14,5$  a  $15,5^\circ\text{C}$ , ed è pari a  $4,19 \text{ J}$ .*

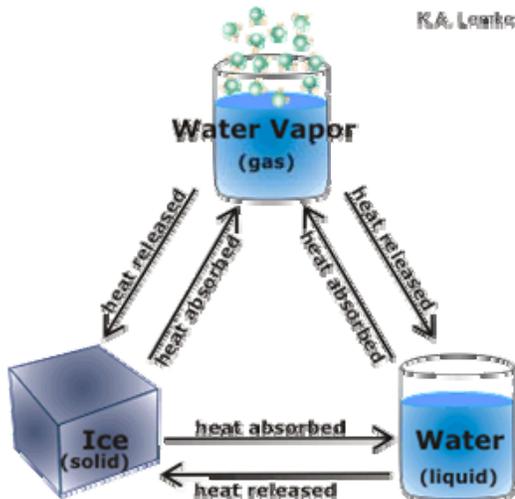
- la **capacità termica** di una sostanza è il rapporto tra il calore assorbito (o rilasciato) ed il corrispondente innalzamento (o abbassamento) in temperatura. Si misura in  $\text{J }^\circ\text{K}^{-1}$ .

Come vedremo, l'aria e l'acqua sono molto diverse riguardo a queste proprietà.

Oltre che per irraggiamento, l'energia può essere scambiata attraverso vari processi (Hsiao, 2003):

#### a) Flussi di calore latente (LE)

Se una superficie è umida e c'è evaporazione, verrà consumata energia ad un tasso che è proporzionale al tasso di evaporazione ( $E$ ) e pari a  $LE$ , dove  $L$  è il calore di vaporizzazione dell'acqua, che è costante ad una data temperatura e varia in modo molto limitato al variare della temperatura.  $LE$  viene indicato come **flusso di calore latente** perché associato ai cambiamenti di stato dell'acqua che comportano quindi un trasferimento di massa, alla quale è associato un certo quantitativo di energia, da o verso la superficie. Il calore latente è chiamato così perché il flusso energetico non si traduce in un cambiamento di temperatura ma in un cambiamento di stato che consente all'acqua di 'conservare' l'energia.



Perché l'acqua passi dallo stato solido a quello liquido, ha necessità di assorbire energia. Il ghiaccio, se riscaldato, assorbe energia fino a che non raggiunge 0°C. A questo punto, anziché continuare a riscaldarsi, usa l'energia che assorbe per fondere, e passa allo stato liquido senza ulteriori cambiamenti di temperatura. L'energia che ha assorbito per cambiare stato è stata però 'conservata', è calore latente. Quando l'acqua ghiaccia, questa energia viene rilasciata, ed una volta rilasciata diventa calore sensibile perché provoca cambiamenti di temperatura che possono essere misurati. Analogamente, quando l'acqua evapora, assorbe calore. L'energia assorbita nel processo di evaporazione viene conservata nel vapor acqueo che, quando condensa, la rilascia sottoforma di calore sensibile. La bipolarità delle molecole d'acqua è responsabile del fatto che molecole d'acqua vicine stabiliscano dei legami idrogeno. Questo fa sì che l'acqua sia caratterizzata da un elevato calore di vaporizzazione. Il calore di vaporizzazione è quello necessario per rompere i legami H che esistono tra le molecole dell'acqua allo stato liquido, in modo che esse possano allontanarsi dalla superficie del liquido evaporando.

Il passaggio dallo stato solido a quello liquido, e viceversa, è associato ad una variazione energetica di **334 J g<sup>-1</sup> di H<sub>2</sub>O (calore latente di fusione, F)**, mentre il passaggio dallo stato liquido a quello gassoso, e viceversa, comporta variazioni di **2442 J g<sup>-1</sup> alla temperatura di 25°C (calore latente di vaporizzazione, L)**.

Il flusso energetico associato al cambiamento di stato dell'acqua è indicato con LE perché dipende sia dal calore latente di vaporizzazione dell'acqua (L, **2,44 MJ kg<sup>-1</sup>**) che dal tasso di evaporazione o condensazione E, espresso in kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, ed è pertanto pari a LE (J m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, ossia W m<sup>-2</sup>).

I cambiamenti di stato dell'acqua consentono quindi lo scambio di grosse quantità di energia tra l'aria e la superficie (terreno + colture). I flussi di calore latente sono alla base del processo di evaporazione dell'acqua, sia dalla superficie del terreno (evaporazione propriamente detta) che dalle colture (traspirazione). Sono positivi per la superficie quando l'acqua condensa su di essa, negativi quando l'acqua evapora (la superficie perde energia).

L'energia disponibile per i flussi di calore latente in parte determina la domanda evapotraspirativa dell'atmosfera, e quindi i consumi idrici delle colture.

#### b) Flussi di calore sensibile (H)

Quando la temperatura della superficie è diversa da quella dell'aria, del calore viene trasferito tra la superficie (foglia, terreno) e l'atmosfera circostante attraverso i **flussi di calore sensibile (H)** così chiamati in quanto possono essere percepiti con una variazione di temperatura dell'aria e della superficie. I flussi di calore sensibile si manifestano in presenza di gradienti di temperatura, che ne rappresentano la forza motrice: la superficie si può riscaldare in seguito al contatto con aria più calda, o si può raffreddare se a contatto con aria più fredda perché in questo caso il calore passa dalla superficie all'aria.

I processi attraverso i quali viene trasferito il calore sensibile sono la conduzione e la convezione.

La conduzione è il processo di trasmissione del calore che avviene per interazione diretta tra molecole: se due molecole dotate di diversa energia interna entrano in contatto, l'energia passa dalla molecola che ne ha di più a quella che ne ha di meno fino a che non è ripartita equamente tra le due. Il processo è relativamente lento, dipende dal numero di molecole coinvolte, ed ha luogo da zone più calde a zone più

fredde. Dipende anche dalla densità delle sostanze coinvolte, ossia da quanto sono vicine tra loro le molecole. L'oro, l'argento, il rame e l'acqua sono eccellenti conduttori di calore.

La convezione avviene quando il calore viene trasportato dal movimento di un fluido: gruppi di molecole si spostano da una parte all'altra del sistema trasportando calore. In questo caso quindi, al flusso di calore è associato un flusso di massa, che può avvenire in modo naturale o forzato. Il riscaldamento di una stanza con un normale radiatore può essere paragonato alla convezione libera, mentre in presenza di un ventilatore si ha una convezione forzata. In genere si usa il termine convezione quando si fa riferimento ad un flusso in direzione verticale, al termine avvezione quando il flusso è orizzontale.

### **H e LE: l'equazione generale di trasporto**

Il trasporto di calore (H) e quello di vapore acqueo (LE) possono essere descritti da una stessa equazione generale:

$$\text{Densità del flusso} = \text{costante di proporzionalità} \times \text{forza motrice}$$

La costante di proporzionalità (D) stabilisce quale è la relazione tra la densità del flusso e la forza motrice, ossia di quanto varia il flusso per unità di variazione nella forza motrice.

La forza motrice è rappresentata dalla differenza in concentrazione nell'entità che partecipa al flusso per cui, nel caso più semplice in cui il flusso è costante lungo il percorso considerato (ossia non c'è assorbimento o evoluzione della specie trasportata in quella regione) e la costante di proporzionalità D non cambia con la posizione:

$$\text{densità del flusso} = D (c_1 - c_2)/l$$

dove  $c_1$  e  $c_2$  sono le concentrazioni nei punti  $x_1$  e  $x_2$  che distano tra loro  $l$ . Quindi la costante di proporzionalità che mette in relazione la densità del flusso con la differenza di concentrazione è  $D/l$ . Quando la costante di proporzionalità si esprime in funzione della distanza che il flusso percorre viene convenzionalmente chiamata **conducibilità** ( $D/l$ ), indicata con il simbolo  $g$ . L'unità di misura della conducibilità dipende da cosa si sceglie come forza motrice ed è in certa misura arbitraria. In ogni caso è possibile manipolarla in modo da arrivarla ad esprimerla in  $\text{m s}^{-1}$ . La conducibilità è una proprietà dell'intero sistema entro il quale si verifica il flusso e varia con la geometria (distanza lungo la quale avviene il trasporto) e con il meccanismo di trasporto (diffusione molecolare, trasporto turbolento).

Nel caso dei flussi di calore sensibile H e di quelli di calore latente LE, la forza motrice è quindi rappresentata dalla:

- Differenza di temperatura per i flussi di calore sensibile
- Differenza di concentrazione di vapore acqueo per i flussi di calore latente

Quando tali flussi avvengono tra una superficie e l'atmosfera, oltre che dalla forza motrice e dalla costante di proporzionalità, dipendono anche dalle proprietà dell'aria:

- calore specifico,  $c_a = 1010 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
- densità,  $\rho_a = 1,204 \text{ kg m}^{-3}$

valori alla temperatura di 20 °C e alla pressione di 1 bar.

### c) Flussi associati all'accumulo fisico dell'energia (G)

Un altro modo di trasferire energia consiste nel conservarla. Una superficie è teoricamente infinitamente sottile e non può quindi conservare energia. Gli strati sottostanti la superficie però hanno questa possibilità e possono riscaldarsi acquisendo energia dalla superficie. Si parla in questo caso di accumulo fisico di energia ( $G$ , *ground* in inglese) e con questo termine si indicano quindi i flussi energetici che trasferiscono l'energia dalla superficie del terreno agli strati di terreno sottostanti la superficie per **conduzione**.

Il calore acquisito dal terreno durante il giorno fa sì che il terreno divenga fonte di calore durante la notte. Durante l'anno, il calore conservato nei mesi caldi viene rilasciato nell'aria durante i mesi freddi. L'energia conservata in questa forma non è prontamente disponibile a causa della scarsa conducibilità termica del terreno.

Le foglie possono essere assimilate a delle superfici ideali, prive di spessore, e quindi non in grado di conservare l'energia ricevuta come  $R_n$  e l'accumulo fisico di calore da parte delle piante intere è in genere trascurabile.

#### d) Flussi associati a processi metabolici (M)

Un'altra forma di accumulo di energia consiste nell'accumulo chimico (M): parte di  $R_n$  viene convertita **energia di legame** nel processo fotosintetico e quindi rilasciata durante la respirazione come calore sensibile o come radiazione termica (M).

### 3.2. Il bilancio energetico

In base alla Prima Legge della Termodinamica: '*L'energia totale di un sistema isolato non può subire variazioni, quali che siano le trasformazioni a cui il sistema viene assoggettato*', significa che l'energia non può essere creata o distrutta ma solo trasformata da una forma in un'altra. E' possibile perciò costruire un bilancio energetico per una singola foglia o per una coltura.

Un valore positivo di  $R_n$  su una superficie significa che la superficie acquisisce energia che viene convertita in calore, uno negativo che la superficie perde energia e si raffredda. I flussi energetici appena descritti che derivano dall'acquisizione o dalla perdita di energia da parte di una qualunque superficie vegetale sono inclusi nella seguente equazione, che soddisfa il Primo Principio della Termodinamica:

$$R_n = H + LE + G + M$$

H = flussi di calore sensibile (per conduzione e convezione)

LE = flussi di calore latente (attraverso cambiamenti di stato dell'acqua, in particolare evaporazione e condensazione)

G = flussi associati all'accumulo fisico dell'energia nel terreno (*physical storage*) (conduzione)

M = flussi di calore associati all'accumulo di energia chimica attraverso i processi metabolici (fotosintesi e respirazione)

Tutti i termini di questa equazione sono dei tassi di trasferimento di energia espressi per unità di tempo e di superficie ( $W m^{-2}$ ) e possono assumere valori sia positivi (guadagno energetico per la superficie) che negativi (perdita energetica per la superficie).

Oltre che a spiegare i flussi energetici responsabili dei cambiamenti di temperatura del terreno e della coltura e dell'evaporazione dell'acqua, questa equazione può anche essere utilizzata su scala globale, per spiegare i flussi energetici a livello di continenti ed oceani, dove enormi quantità di calore e di vapore vengono trasferite all'atmosfera o estratti da essa.

### 3.3. Il bilancio energetico semplificato: H e LE

Nell'ambito di una superficie coltivata  $G$  ed  $M$  rappresentano una quota limitata della  $R_n$  (dall'1 al 5%). L'entità di  $G$  è limitato dalla scarsa capacità del terreno di condurre il calore e dalla presenza della copertura vegetale che, intercettando l'energia radiante, riduce gli scambi energetici tra terreno e atmosfera. Considerando l'intervallo di tempo di un anno,  $G$  diventa circa uguale a 0 (non si ha una variazione netta della temperatura del terreno). Tenuto conto che i valori massimi tipici di fotosintesi sono compresi tra 0,5 e 2,0  $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , si può calcolare un valore di  $M$  compreso tra 8 e 32  $\text{W m}^{-2}$ , e pari quindi a meno del 5% della  $R_n$ . Da quanto affermato deriva che  $LE$  e  $H$  rappresentano le principali modalità di scambio energetico tra la superficie coltivata e l'atmosfera, per cui il bilancio energetico può essere semplificato a:

$$R_n - H - LE = 0$$

***Cosa determina quale porzione dell' $R_n$  servirà per l'evaporazione e quale verrà trasferita come calore sensibile ( $H/LE$ ) ?***

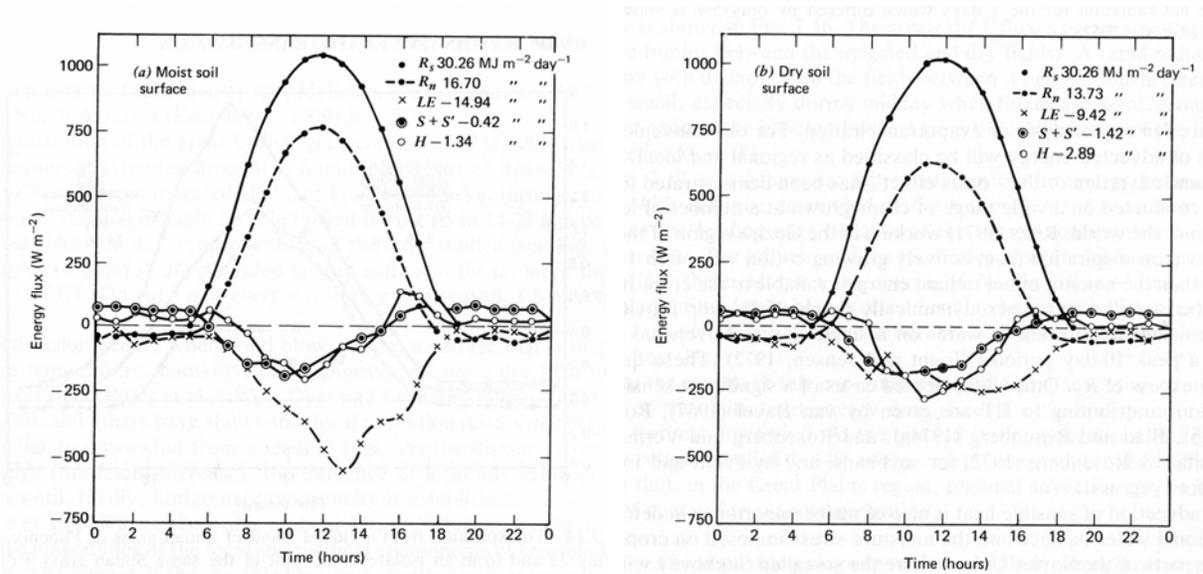
$LE$  è prioritario rispetto a  $H$ , ma l'evaporazione può avvenire solo in presenza di umidità. Quindi, fintantoché c'è acqua a disposizione per l'evapotraspirazione, questo flusso predomina.  $H$  subentra quando non c'è più acqua disponibile per l'evaporazione.  $LE$  è importante negli ambienti umidi ed in tutte le situazioni in cui vi sia ampia disponibilità di acqua, mentre  $H$  assume maggiore importanza negli ambienti aridi e dove la disponibilità idrica è ridotta. Questo accade perché:

- Una superficie completamente umida evapora più acqua di una parzialmente umida
- Una superficie parzialmente umida dissiperà una piccola proporzione della sua  $R_n$  come calore latente, e quindi una porzione maggiore come calore sensibile, rispetto ad una completamente umida
  - Colture con una disponibilità idrica ottimale che coprono completamente il terreno, e terreni alla capacità di campo, si comportano, durante le ore del giorno, come una superficie completamente umida
  - Colture in condizioni di carenza idrica e con gli stomi parzialmente chiusi si comportano in genere come superfici parzialmente umide, evaporando meno acqua e dissipando una maggiore proporzione della loro  $R_n$  come calore sensibile

### **3.4. Andamento giornaliero di $H$ e $LE$ in una superficie coltivata**

La figura mostra la distribuzione oraria delle componenti del bilancio energetico su una superficie coltivata a) il terzo giorno dopo l'irrigazione (umida) e b) il quinto giorno dopo l'irrigazione, quando ormai il terreno era asciutto. Innanzitutto, l'andamento regolare della  $R_n$  suggerisce un cielo privo di nubi per l'intera giornata, notte compresa, quando la  $R_n$  diviene negativa.

Durante le ore del giorno, quando  $R_n$  è positiva, la maggior parte dell'energia assorbita nella situazione di buona disponibilità idrica viene consumata nel processo di evapotraspirazione ( $LE$ ), mentre una quota molto minore viene destinata a scaldare l'aria ( $H$ ) o il terreno ( $S$ ). Durante la notte, al contrario, l'energia persa dalla superficie come energia radiante viene rimpiazzata da flussi di calore dagli strati di terreno sottostanti la superficie e dal passaggio di una ridotta quantità di calore dall'aria verso la superficie, senza alcun contributo dalla condensazione del vapor acqueo ( $LE$  è sempre negativa).



La prima differenza nel caso del terreno asciutto rappresentato nella figura a destra è la minore quota di  $R_n$  a parità di radiazione globale, presumibilmente attribuibile alla maggiore temperatura del terreno asciutto responsabile di un maggior flusso di LW in uscita. La notevole riduzione dell'acqua disponibile per il processo evaporativo si traduce in una distribuzione pressoché equa della energia radiante acquisita durante le ore del giorno, tra H, LE e G, ossia in una quantità di energia utilizzata per il processo evaporativi pari a quella usata per riscaldare l'aria e il terreno.

## 4. LA TEMPERATURA DELL'ARIA

La temperatura dell'ambiente nel quale vivono ha, per i vegetali, una importanza ancora maggiore che per gli animali, in considerazione del fatto che i vegetali, a differenza di molti animali, non hanno, né la possibilità di muoversi, né quella di riscaldare i propri tessuti con la respirazione se non in misura trascurabile.

Sia la temperatura dell'aria ( $T_a$ ) che quella del terreno ( $T_s$ ) sono importanti per la vita delle piante, tanto che stress termici, sia da basse che da elevate temperature, sono responsabili di perdite di produzione notevoli. La temperatura dell'aria ha effetto sui processi di crescita (fotosintesi e respirazione), sviluppo, evapotraspirazione e sulla temperatura stessa delle colture; quella del terreno influisce più specificamente sull'attività della microflora, la velocità della germinazione dei semi, lo sviluppo, l'attività radicale, l'evaporazione.

### 4.1. LA TEMPERATURA DELL'ARIA

#### 4.1.1. I flussi di calore sensibile e la temperatura dell'aria

L'aria assorbe in misura ridotta la radiazione solare e pertanto le sue variazioni di temperatura sono determinate principalmente:

- dall'assorbimento e dall'emissione della radiazione termica (irraggiamento) (flusso incluso in  $R_n$ )
- dai flussi di calore sensibile ( $H$ ) che si instaurano in seguito al contatto con la superficie del terreno e con le piante per conduzione e per convezione.

Il terreno rappresenta quindi il principale scambiatore di calore nel microambiente di interesse agro-meteorologico, e la temperatura dell'aria nella zona sovrastante il terreno è fortemente influenzata dal bilancio energetico alla superficie, ed in particolare da  $G$ , ossia dal calore che il terreno è in grado di immagazzinare, e da  $H$ .

Come visto nel capitolo 3, l'entità dei flussi di calore sensibile dipende, oltre che dal gradiente di temperatura e dalla conduttanza, dal **calore specifico dell'aria ( $c_a$ )**, dalla sua densità ( $\rho_a$ ). Il **calore specifico dell'aria a pressione costante  $c_p$**  [ $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ], rappresenta la *quantità di calore richiesta per aumentare di 1 °C la temperatura di 1 kg d'aria*, ammettendo che l'unità di massa del gas venga riscaldata in modo tale che la sua pressione rimanga costante, come effettivamente accade negli ambienti naturali nei quali la maggior parte dei processi che comportano scambi di calore nell'aria avvengono effettivamente a pressione costante (pressione atmosferica). Il valore del  $c_p$  dell'aria a 27° C ed alla pressione di 1 bar è di **1.01 kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>**. In queste condizioni di temperatura e di pressione la densità è pari a 1.17 kg m<sup>-3</sup> per cui la **capacità termica dell'unità di volume di aria** ossia la quantità di calore che l'unità di volume d'aria può contenere, è pari a  $\rho_a \times c_a = 1.2 \text{ kJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$ . La capacità termica dell'aria è quindi solo 0.0003 volte quella dell'acqua allo stato liquido (4.184 MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>). Perché l'aria possa trasportare le grosse quantità di calore sono perciò necessari notevoli gradienti di temperatura e/o il movimento di grosse masse di aria, ossia l'intervento della convezione, sia libera che forzata, come meccanismo di trasferimento di energia.

Nella convezione libera, l'aria riscaldata o raffreddata attraverso il contatto con il terreno o con le piante subisce delle variazioni di densità. L'aria calda è meno densa dell'aria fredda circostante,

e per questo motivo si muove verso l'alto sottoforma di piccoli vortici anche in assenza di vento, dando la possibilità a l'aria più fredda di spostarsi verso il basso.

Le basi per le variazioni di densità indotte dalle variazioni di temperatura si ritrovano nella legge dei gas:

$$PV = n R T_a$$

dove:

*P* = pressione atmosferica in bar (o Pascal (Pa); 1 bar o 0.1 MPa=0.987 atm);

*V* = volume in litri;

*n* = moli di gas (l'aria ha una massa molecolare media di 29 g l<sup>-1</sup>);

*R* = costante universale dei gas (0.0831 bar mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>);

*T<sub>a</sub>* = temperatura dell'aria (K).

A livello del mare ed alla temperatura di 27°C (300 K), 1 mole di gas occupa  $V = nRT_a / P = 24.9$  litri. In queste condizioni la densità dell'aria è = massa molecolare media dell'aria / volume occupato da una mole di gas = 29 / 24.9 = 1.17 g l<sup>-1</sup>.

L'aumento di temperatura determina un aumento di volume in quanto la pressione è fissa essendo conseguenza delle generali condizioni atmosferiche. Il risultato è quindi che *n/V* diminuisce e l'aria calda diventa più leggera dell'aria fredda.

Nella convezione forzata il movimento dell'aria, e quindi il trasferimento di calore sensibile, è ulteriormente favorito dal vento. L'effetto del vento è duplice: mantiene elevato il gradiente di temperatura e genera turbolenza, favorendo il rimescolamento dell'aria.

L'elevato gradiente di temperatura è dovuto al fatto che il vento garantisce un continuo ricambio dell'aria nei pressi della superficie con aria che non è stata modificata dalla superficie stessa, favorendo in questo modo una maggiore velocità di flusso rispetto alle condizioni di aria ferma.

La turbolenza si manifesta con la formazione di vortici, o mulinelli, causati dalla frizione tra le parcelle d'aria in movimento e le superfici sopra alle quali esse scorrono. Anche la convezione libera (anche detta termica) genera vortici, che però, in presenza di vento, sono più piccoli e più veloci e quindi più efficienti nel rimescolare l'aria.

Più turbolenta è l'aria, più rapido è il suo rimescolamento, più veloce il trasporto di calore da dove l'aria è più calda a dove è più fredda. La turbolenza non è costante ma dipende dalla velocità del vento e dall'altezza della copertura vegetale, per cui il movimento di masse d'aria per convezione forzata, e quindi gli effetti sulla temperatura dell'aria, sono

- tanto maggiori quanto più veloce è il vento e quanto più rugosa è la superficie, in quanto da questi fattori dipende l'entità dell'attrito che turbolenza meccanica

- a parità di velocità del vento, aumentano all'aumentare dell'altezza della pianta poiché le piante più alte sviluppano un attrito maggiore di quelle più basse

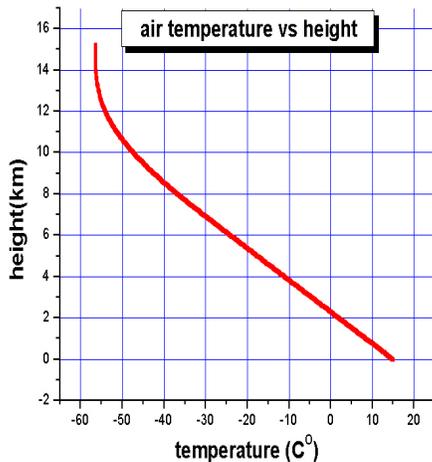
- sono tanto più intensi quanto maggiore è il differenziale termico tra la superficie e l'atmosfera, in quanto da questi fattori dipende l'entità della turbolenza termica.

Come si vedrà in seguito, parlando di vento, i vortici che si creano in seguito alla turbolenza trasportano, non solo calore, ma tutte le altre proprietà dell'aria (vapore acqueo, CO<sub>2</sub> ed O<sub>2</sub>) caratteristiche del luogo dal quale i vortici si sono creati (coltura o atmosfera).

#### **4.1.2. La temperatura e la distanza dalla superficie**

##### **a) Effetto dell'altitudine**

A livello macroambientale, quando si considerano le variazioni di temperatura nella troposfera



(lo strato di atmosfera a contatto con il suolo, spesso da 8 a 20 km), si osserva una marcata tendenza della temperatura a diminuire con l'altitudine come risultato della diminuzione della pressione atmosferica all'aumentare dell'altitudine. La ragione di questa diminuzione é che, man mano che una parcella d'aria sale, tende ad espandersi in conseguenza della diminuzione di pressione. Questa espansione richiede del lavoro. Se la parcella d'aria é isolata dall'ambiente circostante (sistema adiabatico) e quindi non scambia calore con esso, l'energia per questa espansione viene attinta dalla stessa aria, la cui temperatura, conseguentemente, si abbassa. Il tasso di abbassamento della temperatura con l'altitudine derivante da questo fenomeno é chiamato 'lapse rate' in inglese o gradiente adiabatico di

temperatura in italiano e, per l'aria secca, é pari a circa  $0,01^{\circ}\text{C m}^{-1}$  di altitudine. Nel caso di aria umida, satura di vapor acqueo, il gradiente adiabatico di temperatura é molto minore (da  $0,003$  a  $0,007^{\circ}\text{C m}^{-1}$  in relazione alla temperatura dell'aria) perché parte dell'energia necessaria per l'espansione viene fornita dalla condensazione del vapor acqueo che si verifica in conseguenza dell'abbassamento di temperatura.

In situazioni naturali, la temperatura della troposfera diminuisce, in media, di  $0,006^{\circ}\text{C m}^{-1}$  (circa  $6,4^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ). Questa marcata diminuzione rimarca l'importanza della tolleranza al freddo nel determinare la distribuzione della vegetazione ad altitudini elevate.

### b) Effetto degli scambi di calore sensibile con la superficie

I valori estremi di temperatura si osservano sempre in prossimità della superficie del suolo, dove si possono riscontrare temperature diverse di  $5-10^{\circ}\text{C}$  rispetto a quelle misurate a 2 m di altezza, a conferma del fatto che il terreno é il più attivo scambiatore di calore in un sistema agro-

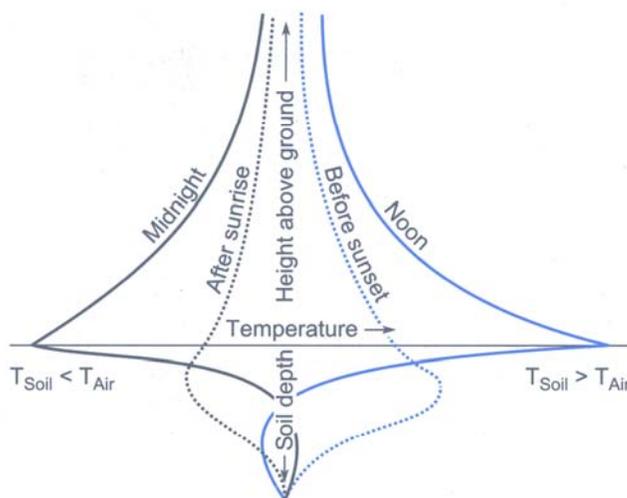


Fig. 2.1.5. Above- and below-ground diurnal temperature profile. (After Gates 1965)

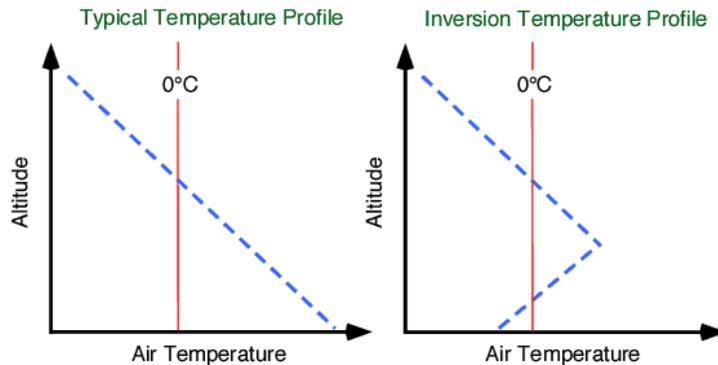
meteorologico, rappresentando la superficie nella quale il calore del sole viene immagazzinato e redistribuito tra l'aria ed il suolo di giorno, e dal quale viene emesso verso l'atmosfera di notte. Di conseguenza, anche il gradiente di temperatura é maggiore nei pressi della superficie che lontano da essa.

Generalmente, durante il giorno il terreno si riscalda rapidamente fino a diventare più caldo dell'aria sovrastante attivando quindi un flusso di calore sensibile dal terreno verso l'aria. La temperatura diminuisce con l'aumentare della distanza dalla superficie (figura).

Durante la notte, quando il sole tramonta, le perdite per irraggiamento dalla superficie non sono più compensate dall'assorbimento di radiazione solare, e la

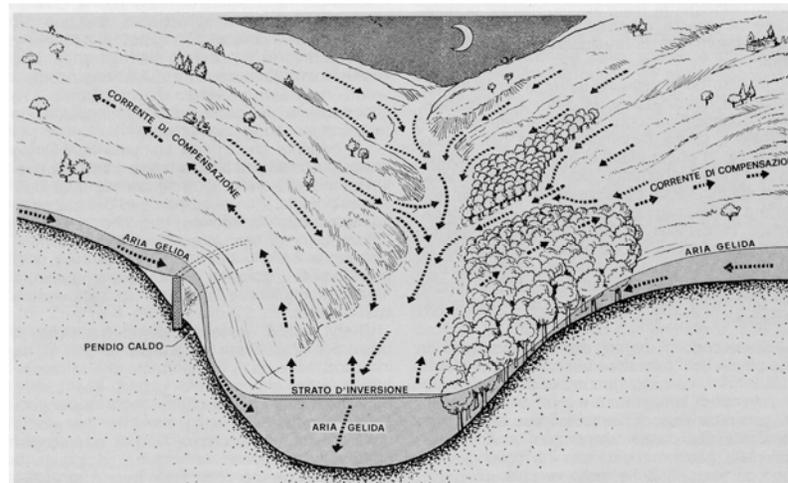
superficie del terreno si raffredda rapidamente, diventando, in breve, il punto più freddo del

profilo. L'aria in prossimità della superficie perde quindi calore diventando più fredda e più pesante dell'aria soprastante. Si forma così uno **strato di inversione termica**, nel quale la temperatura aumenta man mano che ci si allontana dalla superficie, che può raggiungere la profondità di pochi metri, o può essere di più vasta scala condizionando l'andamento climatico di



vaste aree (figura). Questo processo è accentuato dal fatto che gli strati di aria fredda e densa tendono a ristagnare in basso senza dar luogo ai moti convettivi che si producono invece quando il gradiente è opposto. E' evidente che l'inversione termica notturna è favorita da tutte quelle condizioni che favoriscono l'irraggiamento dalla superficie terrestre: notti lunghe, assenza di vento, cielo limpido.

L' inversione termica appena descritta viene indicata come inversione termica per irraggiamento. Si verifica regolarmente durante la notte e può assumere una gravità particolare quando si verifica nelle valli. In questi casi (figura) gli strati d'aria più bassi sulle pendici, raffreddandosi per irraggiamento, tendono a scivolare verso il basso, nel fondovalle, dove formano delle sacche d'aria molto fredda dando luogo all'inversione termica per convezione.



Più raramente, l'inversione termica può realizzarsi durante il giorno per avvezione: il passaggio di aria calda su una superficie vegetale caratterizzata da una elevata evaporazione, apporta nuovo calore sensibile che può essere usato per l'evaporazione, causando l'abbassamento della temperatura del terreno o della copertura vegetale al di sotto di quella dell'aria.

Spesso l'inversione termica per irraggiamento e convezione, causa abbassamenti delle temperature al di sotto dello 0°C, ossia le **gelate**. Quando le gelate si verificano in presenza di aria con un sufficiente contenuto di umidità, si ha la formazione di **brina** per sublimazione del vapor acqueo in cristalli di ghiaccio su oggetti che si trovano ad una temperatura inferiore allo 0. L'intensità delle gelate è, a parità di altre condizioni, maggiore nei terreni sabbiosi ed asciutti, a causa della loro scarsa conduttività termica, che riduce il flusso di calore dagli strati inferiori di terreno verso la superficie.

### 4.1.3. Variazioni giornaliere e annuali della temperatura dell'aria

Il flusso di calore sensibile è generalmente diretto dal terreno verso l'aria durante il giorno, e dall'aria verso il terreno durante la notte.

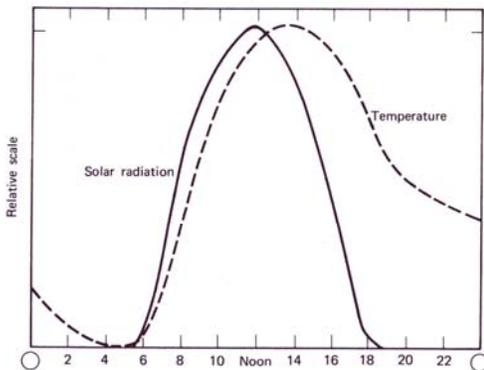


Fig. 3.6 Normalized solar radiation and air temperature above bare soil, early September at Scottsbluff, Nebraska (after Neild et al., 1967).

Durante il giorno la temperatura dell'aria presenta un andamento sinusoidale, con la temperatura minima che si verifica normalmente nelle prime ore del mattino, e la massima che si verifica nelle prime ore del pomeriggio. L'andamento termico non è in generale così regolare nel singolo giorno, specialmente in quei climi caratterizzati dal passaggio di fronti, da nuvolosità irregolare o da una forte avvezione proveniente da altre regioni. Tale andamento tende a divenire più regolare se, anziché considerare le medie orarie di un singolo giorno, si utilizzano le medie di più giorni. Lo

sfasamento temporale tra, il momento in cui si verifica la temperatura massima giornaliera e la massima radiazione (figura), è dovuto al fatto che buona parte della radiazione solare che giunge durante le prime ore del giorno viene impiegata per il riscaldamento del terreno e della vegetazione che hanno perso calore durante la notte. Fintantoché queste superfici non diventano più calde dell'aria soprastante, non può verificarsi alcun flusso di calore sensibile verso l'aria. La quantità di energia disponibile per il riscaldamento dell'aria diventa sempre maggiore man mano che il terreno si riscalda. Il rallentato raffreddamento dell'aria nel pomeriggio, è dovuto al fatto che il terreno continua a riscaldare l'aria anche dopo che il sole è tramontato.

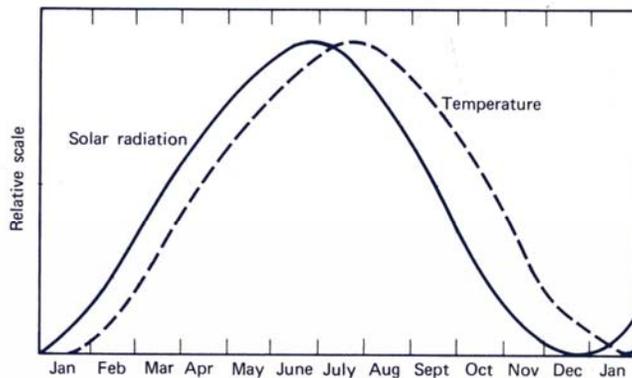


Fig. 3.7 Normalized and smoothed monthly mean solar radiation and monthly mean temperature at Lincoln, Nebraska (after Neild et al., 1967).

Lo stesso sfasamento, e per gli stessi motivi, si verifica quando si prende in considerazione il picco massimo di radiazione solare annua ed il picco massimo di temperatura (figura).

La variazione annuale della temperatura dell'aria segue un andamento di tipo sinusoidale, simile a quello della radiazione.

Il picco di temperatura si raggiunge circa un mese dopo quello della radiazione. Allo

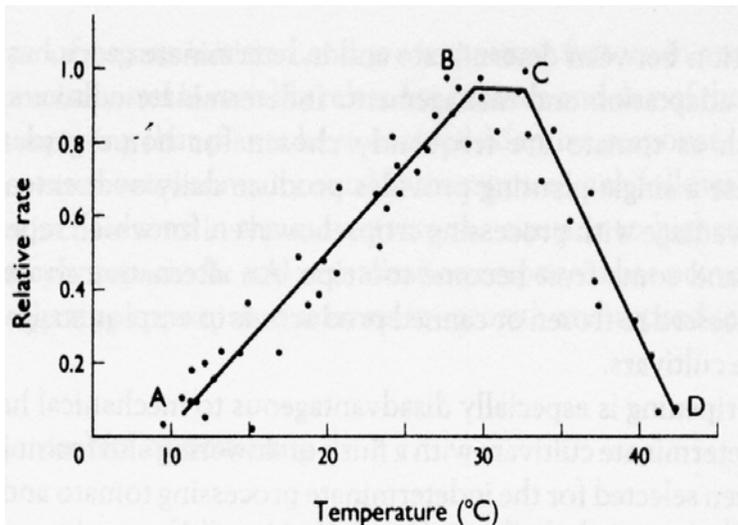
stesso modo il minimo di temperatura si raggiunge un mese dopo quello della radiazione. In primavera ed all'inizio dell'estate, una grande quantità della radiazione incidente viene assorbita dal terreno che ha raggiunto la temperatura minima alla fine dell'inverno. Nel tempo, il terreno diventa più caldo rispetto all'aria e pertanto una maggiore quantità di energia radiante può essere spesa per riscaldare l'aria (+H).

Gli sfasamenti (lag) giornalieri ed annuali tra massimi e minimi di temperatura e di radiazione aumentano all'aumentare della distanza dalla superficie, mentre l'andamento sinusoidale diviene progressivamente meno ampio.

## 5. LE PIANTE E GLI STRESS TERMICI

La temperatura di una pianta controlla i processi di crescita (fotosintesi, respirazione), sviluppo, evapotraspirazione. L'effetto della temperatura su tutti questi processi non è lineare, se non entro intervalli limitati.

E' in genere possibile individuare (Figura):



- un intervallo di temperature entro il quale il tasso del processo aumenta all'aumentare della temperatura
- uno all'interno del quale il tasso è quello massimo
- uno all'interno del quale il tasso diminuisce all'aumentare della temperatura
- una temperatura minima ed una massima al di sotto ed al di sopra delle quali il processo si arresta.

Gran parte degli organismi viventi ha un ampio *range* di tolleranza alla temperatura. La maggior parte delle piante può crescere in un intervallo che è grossolanamente compreso tra qualche grado al di sopra dello 0 e 40°C, anche se, come indicato dalla figura, il tasso di crescita raggiunge il suo massimo valore in un intervallo più ridotto che dipende dalla specie, dallo stadio di sviluppo e dalle condizioni ambientali in cui è stata allevata la pianta. Le esigenze termiche possono cambiare con lo stadio di sviluppo e le piante sono in grado, entro certi limiti, di adattarsi a temperature estreme.

In generale, al di sopra di 50°C, solo gli organismi unicellulari possono completare il proprio ciclo biologico. Poche piante superiori possono sopravvivere quando la loro temperatura si mantiene stabilmente al di sopra di 45°C.

### 5.1. BILANCIO ENERGETICO E TEMPERATURA DELLE PIANTE

La temperatura di una pianta è determinata dalle condizioni ambientali a livello di microclima. Poiché le condizioni microclimatiche cambiano molto più rapidamente di quelle climatiche e sono caratterizzate da temperature più estreme, le piante devono continuamente affrontare sia i cambiamenti periodici in temperatura legati alla stagione e all'alternarsi di giorno e notte, che i cambiamenti di breve periodo.

La temperatura di una pianta è una manifestazione del suo stato energetico, per cui dipende dal bilancio energetico a livello della pianta o della superficie coltivata. Le foglie e i fusti delle piante erbacee hanno masse ridotte caratterizzate in genere da una scarsa capacità di immagazzinare calore. Per questo motivo, la temperatura delle piante risponde rapidamente a cambiamenti nelle condizioni ambientali attraverso i diversi flussi energetici, che raramente sono però in grado di far sì che si stabilisca un perfetto equilibrio termico con il microambiente nel quale vivono.

I flussi energetici cui le piante partecipano sono quelli visti per il bilancio energetico: irraggiamento ( $R_n$ ), conduzione e convezione (H), traspirazione (LE). Quando ad essere

coinvolto è un organismo, l'entità di questi flussi dipende in parte da quanto tale organismo è 'coupled' (accoppiato) con i fattori microclimatici responsabili del flusso: la temperatura di organismi fortemente *coupled* con un certo fattore ambientale è fortemente dipendente da quel fattore ambientale, e viceversa.

*a) La superficie vegetale e i flussi radianti*

Una foglia è accoppiata al flusso di radiazione incidente tramite il coefficiente di assorbimento della sua superficie: se una pianta riflette il 100% della radiazione incidente il suo coefficiente di assorbimento è zero, e la sua temperatura non dipenderà in alcun modo dalla radiazione. Il contrario si verifica con assorbività del 100%, nel qual caso la temperatura della pianta dipenderà fortemente dalla densità del flusso radiante. La maggior parte delle foglie assorbe solo il 50% circa della radiazione SW incidente, e alcune solo il 20%. Al tempo stesso la maggior parte delle piante assorbe e riemette circa il 95% della radiazione LW incidente. Questo significa che le piante sono moderatamente accoppiate con il flusso incidente di radiazione SW e fortemente accoppiate con quello LW. Come vedremo in seguito, esistono inoltre tutta una serie di adattamenti morfo-fisiologici (presenza di pubescenza o cere, eliotropismo) che consentono alle piante di regolare la quantità di flusso radiante incidente.

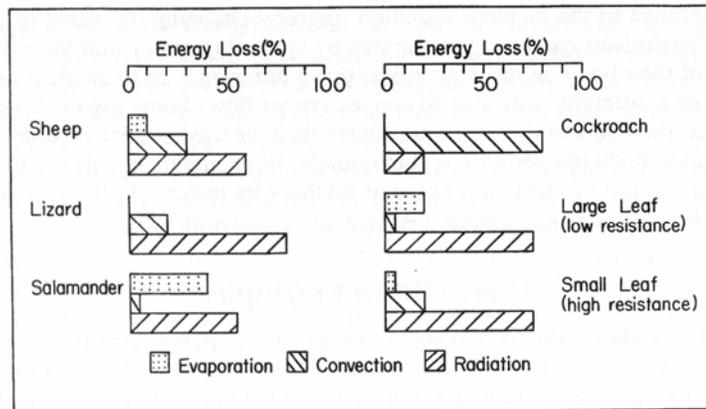
*b) La superficie fogliare e i flussi di calore sensibile (convezione)*

Il flusso energetico tra la pianta e l'aria nella quale è immersa avviene attraverso la convezione ed il tasso di questo flusso è proporzionale alla differenza di temperatura tra la pianta e l'aria. La costante di proporzionalità è il *coefficiente di convezione*, che in una foglia isolata dipende principalmente dalla dimensione (è tanto maggiore quanto minore è la dimensione), forma, tipo di superficie (liscia o ruvida) e orientamento, così come dalle proprietà dell'aria. L'accoppiamento della temperatura della foglia a quello dell'aria dipende da questo coefficiente, che è alto in una foglia piccola e basso in una grande: la temperatura delle foglie piccole è quindi più strettamente dipendente da quella dell'aria di quella delle foglie grandi. Questo significa che molte foglie piccole non sono in grado di discostare la propria temperatura da quella dell'aria di più di 2-3 °C, mentre la temperatura dei tronchi o delle branche più larghe o delle foglie più grandi può essere molto diversa da quella dell'aria.

*c) La superficie fogliare e i flussi di calore latente (traspirazione)*

La traspirazione consiste nel passaggio dell'acqua contenuta all'interno della pianta verso l'atmosfera sotto forma di vapore. Poiché le foglie sono rivestite da una cuticola pressoché completamente impermeabile all'acqua, il vapor acqueo può uscire dalla foglia solo attraverso gli stomi, piccole aperture presenti nelle foglie. Analogamente a quanto visto per i flussi di calore latente, il tasso è proporzionale alla differenza di concentrazione di vapore tra l'interno della foglia e l'aria, e la costante di proporzionalità è la conducibilità nei confronti della diffusione del vapor acqueo. Il passaggio dell'acqua allo stato di vapore richiede energia e quindi provoca il raffreddamento della foglia. Foglie o colture con una alta conducibilità alla diffusione hanno una temperatura che è fortemente dipendente dalla pressione di vapore dell'aria, mentre quelle con bassa conducibilità alla diffusione hanno una temperatura che dipende in misura minima dalla pressione di vapore dell'aria. Una foglia grande con una resistenza alla diffusione molto bassa è in grado di abbassare la propria temperatura anche di 30°C traspirando intensamente in un ambiente con un forte carico radiativo, contro i 5°C di una foglia nelle stesse condizioni ma con un'elevata resistenza alla diffusione. Se però una pianta non è esposta a irraggiamento intenso ( $R_n$  basso), la traspirazione è molto ridotta ed il suo effetto sulla temperatura è piccolo, dell'ordine di 2-3 °C. In ogni caso sono necessarie due condizioni perché la foglia traspiri: ci deve essere energia disponibile, e ci deve essere un gradiente di pressione di vapore tra l'interno e l'esterno della foglia.

Nel caso delle piante, il flusso energetico più importante nel determinarne la temperatura è quello radiativo, mentre l'importanza relativa di H e LE dipende dalla disponibilità energetica e da quella idrica e dall'entità delle forze motrici dei relativi flussi.



**Figure 2.3.** Approximate partitioning of energy loss from various organisms by evaporation, convection, and radiation.

Poiché la parte aerea delle piante è a diretto contatto con l'atmosfera, i flussi energetici tendono in genere a bilanciare la temperatura della pianta e quella dell'aria, anche se raramente viene raggiunto un equilibrio termico. Durante il giorno la temperatura delle foglie tende ad assumere valori superiori a quelli dell'aria, con scostamenti notevoli solo nelle ore di pieno sole, quando la differenza può salire fino a 10-20 °C, o in condizioni di stress. Durante la notte la temperatura delle foglie è solitamente al di sotto di quella dell'aria in prossimità della foglia. Questa differenza può essere di 2-4 °C in foglie esposte a notti fredde e prive di nubi, circa la metà in foglie non esposte (protette dalle foglie sovrastanti).

## 5.2. DANNI DA TEMPERATURE ELEVATE

L'inibizione del tasso di crescita in seguito all'esposizione a temperature superiori a quelle ottimali, è di diverso tipo rispetto all'inibizione determinata dalle basse temperature. La diminuzione del tasso di crescita al di sotto della temperatura ottimale è dovuta all'effetto negativo della temperatura sul tasso delle reazioni chimiche, e quindi sui processi metabolici che stanno alla base della crescita. Il decremento del tasso di crescita al di sopra della temperatura ottimale, invece, è dovuto ad un vero e proprio danno che si manifesta sia attraverso la denaturazione delle proteine che attraverso una alterata fluidità delle membrane cellulari.

A livello di tessuti, il danno termico è visibile sotto forma di necrosi.

A livello di coltura, all'aumentare della temperatura il tasso fotosintetico diminuisce più rapidamente di quello della respirazione, per cui l'assimilazione netta delle piante allevate fuori del campo ottimale di temperatura è minore. In queste condizioni abbiamo una riduzione nella quantità di zuccheri che possono essere accumulati dalla pianta negli organi di riserva (vedi barbabietola da zucchero) e quindi sensibili diminuzioni di produzione.

Le piante hanno sviluppato una quantità di meccanismi che consentono loro di adattarsi alle alte temperature molto maggiore di quelli che consentono l'adattamento alle basse temperature. Molti di questi meccanismi vengono attivati già pochi gradi al di sopra delle temperature ottimali, ad indicare che le piante hanno frequentemente a che fare con temperature molto prossime ai loro limiti superiori.

### 5.2.1. Meccanismi cellulari di difesa ed adattamento delle piante agli eccessi termici

La capacità delle piante di adattarsi a temperature estreme, sia alte che basse, si basa sostanzialmente nella loro possibilità di modificare la composizione lipidica delle bio-membrane in modo che queste possano conservare il loro livello di viscosità e quindi la loro funzionalità anche a queste temperature, e nella sintesi di specifiche proteine con funzioni protettive di vario tipo.

Nel caso delle alte temperature vengono sintetizzate le cosiddette *heat shock proteins*, la cui principale funzione è quella di 'ri-naturare' le proteine danneggiate dalle alte temperature o marcarle per la degradazione.

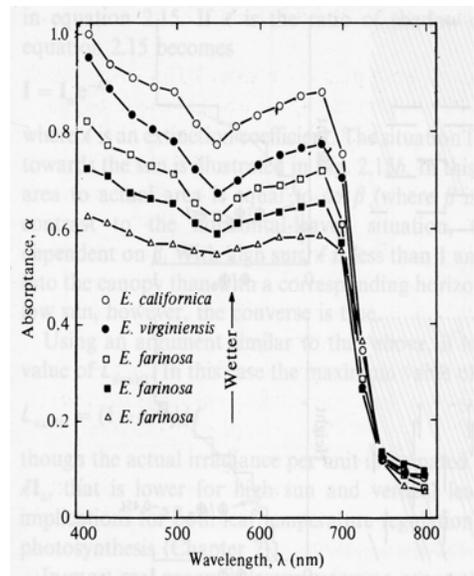
Un'altra possibilità è la disidratazione: cellule o tessuti disidratati, o che non sono in crescita attiva, hanno una maggiore capacità di sopravvivenza alle temperature elevate delle cellule e dei tessuti idratati. Il motivo è che esiste una *relazione tra contenuto idrico e denaturazione delle proteine*: la denaturazione può aver luogo solo quando un adeguato contenuto idrico permette alle molecole proteiche una certa mobilità. Così, i semi secchi resistono anche a temperature di 120°C, mentre per i granuli pollinici il massimo termico si colloca intorno ai 70°C. Nel caso di alcuni semi, non si ha danno termico sino a quando la temperatura è sufficientemente elevata da rompere i legami chimici.

### 5.2.2. Meccanismi morfologici di difesa ed adattamento delle piante agli eccessi termici

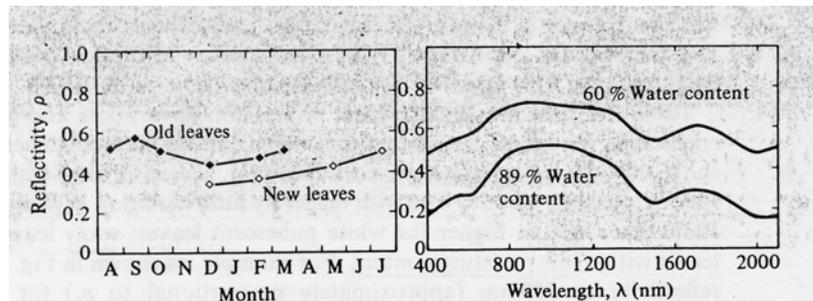
Consistono fondamentalmente nella possibilità, da parte delle foglie, di diminuire l'intercettazione e l'assorbimento radiazione. La diminuzione della quantità di energia radiante intercettata può essere ottenuta con diversi meccanismi: aumento dell'albedo, riduzione delle dimensioni fogliari, variazione dell'angolo di incidenza della radiazione solare, appassimento, arrotolamento a sigaro della foglia.

#### a) Aumento dell'albedo

- in presenza di pubescenza o di rivestimenti cerosi l'albedo delle foglie aumenta (e il coefficiente di assorbimento diminuisce). L'effetto della pubescenza sull'assorbimento della radiazione è mostrato nella figura 8 dove una specie desertica estremamente pubescente (*Encelia farinosa*) viene posta a confronto con altre specie dello stesso genere ma caratterizzate da un diverso livello di pubescenza, il cui valore minimo si ritrova nella (*E.californica*), specie glabra e delle zone costiere. Il coefficiente di assorbimento nel PAR ( $\alpha_{PAR}$ ) aumenta al diminuire della pubescenza, a causa di una contemporanea diminuzione dell'albedo, tanto che della *E.farinosa* è superiore del 50 % a quello della *E.californica*.



- L'albedo è più elevato (dal 5 al 9%) nelle foglie vecchie rispetto alle giovani, ed in foglie con un basso contenuto idrico, rispetto a quelle con una elevata percentuale d'acqua (figura)



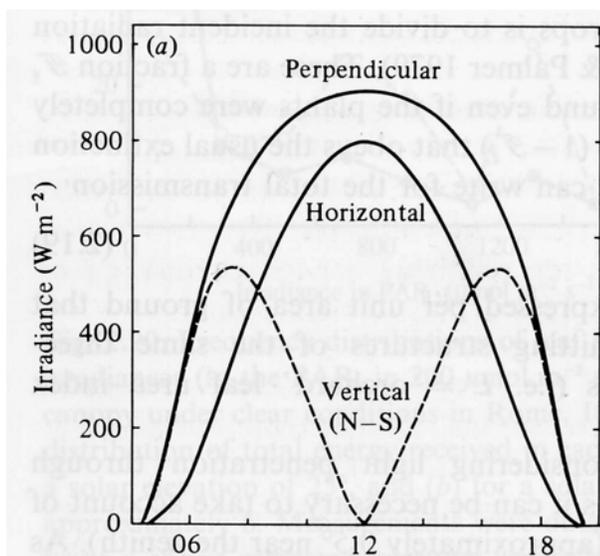
L'albedo ( $\rho$ ) delle coperture fogliari tende ad essere più basso di quello delle singole foglie, in quanto la ripetuta riflessione da parte di altre foglie e fusti intrappola la radiazione incidente. Questo effetto è particolarmente marcato per colture costituite da piante alte (foreste) dove il coefficiente di riflessione può scendere fino a circa 0.20, mentre per colture basse e molto fitte la riflessione praticamente eguaglia quella delle foglie.

b) Dimensione delle foglie

Minore è la dimensione delle foglie, maggiore il flusso di calore sensibile tra la foglia e l'aria circostante, tanto che la temperatura delle foglie piccole è molto prossima a quella dell'aria, con differenze massime di 2-3 °C. Questo meccanismo di adattamento può agire sia in risposta a stress radiativi, portando le piante a produrre foglie più piccole come risposta allo stress, che a un livello evolutivo, come si può dedurre dal fatto che molte piante desertiche hanno foglie molto piccole.

c) Variazione dell'angolo di incidenza della radiazione solare

Le foglie di alcune specie (soprattutto tra le Leguminose) hanno la possibilità di modificare la propria posizione in funzione della posizione del sole sull'orizzonte (movimento *eliotropico*). In questo modo vengono modificati sia il carico radiante che incide sulla loro superficie (legge del coseno), che l'albedo e quindi l'assorbimento, perché l'albedo dipende dall'angolo di incidenza della radiazione (aumenta al diminuire dell'angolo tra flusso radiante e superficie). L'effetto dei movimenti eliotropici sul carico radiante è illustrato nella figura sottostante, che pone a confronto il carico di energia radiante incidente su una foglia posta orizzontalmente, una orientata in maniera tale da essere sempre perpendicolare ai raggi del sole, ed una orientata nord-sud, durante una giornata. La foglia che si dispone perpendicolarmente riceve sino al 50 % di radiazione in più, in un giorno, di una foglia disposta orizzontalmente. Per contro, le foglie che si orientano parallelamente alla direzione dei raggi solari minimizzano l'intercettazione della radiazione.



**5.2.3. Meccanismi fisiologici di difesa ed adattamento delle piante agli eccessi termici**

a) Termodormienza. Un meccanismo di difesa da stress termici particolarmente elevati è la *termodormienza*, ossia l'arresto della crescita in seguito alla esposizione ad elevate temperature. E' il caso delle piante che vivono nella Valle della Morte (California), che crescono soltanto nei periodi in cui le temperature sono basse.

b) Sistemi fotosintetici. La fotosintesi è un processo sensibile alla temperatura: in generale, le piante originarie dell'area temperata (C3) realizzano il massimo della loro assimilazione netta in un intervallo termico compreso tra i 20 ed i 30°C, e mantengono la propria funzionalità sino a 0°C. Gli enzimi coinvolti nel processo fotosintetico delle piante C4 sono più efficienti in un intervallo termico più elevato, ma sono scarsamente adattati a temperature inferiori ai 10°C. Il risultato di questa diversa sensibilità termica è che le piante C3 hanno un maggior areale di diffusione delle piante C4, che tendono a prevalere e sono fotosinteticamente particolarmente efficienti negli areali o nelle stagioni più calde. Ciò non toglie che piante C3 come il cotone, siano adatte e molto produttive in ambienti particolarmente caldi.

c) Traspirazione. Normalmente, le piante sfruttano il processo della traspirazione per evitare l'eccessivo innalzamento della loro temperatura, in quanto la traspirazione richiede energia che alimenta il flusso di calore latente, e comporta quindi una diminuzione nella temperatura delle foglie. In condizioni di scarsa disponibilità idrica e di assenza di vento, che determinano la chiusura degli stomi, la temperatura fogliare non può essere abbassata con la traspirazione, e durante le ore centrali della giornata, quando è maggiore l'irraggiamento solare, arriva ad essere anche di 4-5°C superiore a quella dell'aria. *Lo stress idrico è quindi molto spesso indissolubilmente associato allo stress termico.*

### **5.3. DANNI DA BASSE TEMPERATURE**

Su circa due terzi della superficie terrestre le temperature minime annuali scendono al di sotto di 0 °C, e su metà al di sotto di -10 °C. Non è perciò sorprendente che gli stress da basse temperature siano di enorme importanza economica e i più studiati tra gli stress abiotici.

In relazione alla temperatura si distinguono danni da freddo e danni da gelata. Un effetto delle basse temperature comune a freddo e gelate sono i danni alle membrane cellulari che, quando le temperature sono troppo basse, perdono mobilità e funzionalità in aree più o meno estese diventando più viscosi e meno reattivi.

#### **5.3.1. Danni da freddo**

La diminuzione del tasso di crescita al di sotto della temperatura ottimale è dovuta all'effetto della temperatura sul tasso delle reazioni chimiche, che diminuisce. Poiché inoltre l'entità della diminuzione è diversa per le diverse reazioni, si verifica anche uno sbilanciamento tra i processi metabolici che stanno alla base della crescita. In molti casi questo rallentamento sfocia in un semplice arresto vegetativo temporaneo che, a seconda dei casi può comportare danni di varia entità per la vegetazione. In altri casi il diverso grado di rallentamento delle reazioni metaboliche può portare ad un disequilibrio tra i diversi processi metabolici. A livello cellulare il problema maggiore è rappresentato dall'aumento di viscosità delle membrane cellulari che le rende meno reattive e quindi più suscettibili a stress secondari.

Veri e propri danni da freddo si verificano in seguito all'esposizione delle piante a temperature comprese tra i 10-15°C ed i 0°C. Esso è quindi un danno che riguarda principalmente le piante originarie delle aree tropicali o sub tropicali (il riso e la canna da zucchero vengono danneggiati già ad una temperatura di 15°C), ma può interessare anche piante delle zone temperate, limitatamente ad alcune fasi del ciclo biologico. La fertilità del frumento, ad esempio, viene irrimediabilmente compromessa quando la pianta viene esposta ad una temperatura compresa tra i 0° ed i 3°C durante la fase di meiosi (botticella). I danni da freddo si manifestano con appassimento, inibizione della crescita, della germinazione o della riproduzione, e nei casi più estremi necrosi dei tessuti.

Come nel caso di altri stress, il danno da freddo è legato al tempo di esposizione alle basse temperature. Le foglie del cetriolo sopravvivono per una settimana alla temperatura di 10°C, vengono danneggiati nel giro di 3 giorni se esposti ad una temperatura di 8°C, ed entro poche ore se esposti a 5°C.

Quando l'abbassamento termico è repentino, si parla più propriamente di *shock termico*. A parità di temperatura raggiunta, i danni da freddo sono tanto maggiori quanto più velocemente si abbassano le temperature, perché un abbassamento graduale può dare il tempo alle piante di adattarsi alle nuove condizioni termiche. Lo shock termico si manifesta nel giro di pochi minuti, ed è legato alla perdita della funzionalità delle membrane cellulari (pseudo-plasmolisi, perdita di soluti). Le proprietà delle membrane delle specie sensibili al freddo vanno incontro ad una rapida perdita della loro funzionalità non appena si raggiunge la temperatura critica.

### 5.3.2. Danni da gelate

Si parla di gelate ogniqualvolta la temperatura scende al di sotto degli 0°C, in genere in seguito alla formazione di strati di inversione termica per irraggiamento o convezione. Le gelate possono verificarsi anche senza che si sviluppi una inversione termica, per avvezione, in seguito al passaggio di fronti di aria fredda, nel qual caso interessano aree più estese. Le gelate per avvezione sono di più lunga durata di quelle per irraggiamento e convezione, e con abbassamenti termici maggiori. Il passaggio di aria fredda e secca può anche favorire l'insorgenza di una gelata per irraggiamento, in quanto viene eliminato l'ostacolo alle perdite di calore.

In presenza di temperature inferiori a 0°C, ai danni dovuti alle basse temperature si sommano quelli dovuti alla formazione di ghiaccio. La formazione del ghiaccio provoca la disidratazione dei tessuti, delle cellule e delle membrane cellulari dai quali proviene l'acqua che ghiaccia, per cui i danni da gelate sono spesso simili ai danni da carenza idrica. La formazione del ghiaccio può avvenire negli spazi intercellulari o all'interno della cellula. Quando avviene all'interno delle cellule è sempre letale. L'acqua che congela negli spazi intercellulari proviene in parte dall'interno della cellula, e questo comporta una concentrazione eccessiva dei soluti all'interno della cellula e quindi un ulteriore danno alle membrane.

Uno stress secondario per le piante in caso di gelate è causato dal fatto che le piante non sono in grado di prelevare l'acqua da un terreno congelato e quindi rischiano, in caso di ghiaccio permanente abbastanza a lungo, danni da carenza idrica.

#### ***Meccanismi di difesa ed adattamento delle piante alle gelate***

**A livello cellulare**, il principale meccanismo attraverso il quale le cellule cercano di evitare i danni da gelate consiste nell' *evitare il congelamento dell'acqua* nella cellula attraverso:

- la disidratazione: alcuni organi vegetali, sono particolarmente tolleranti nei confronti di temperature inferiori allo 0°C grazie al fatto che, durante la loro formazione, si disidratano. E' il caso di semi, polline, e alcune gemme, che, disidratandosi, riducono la quantità di acqua libera, conservando quasi esclusivamente acqua legata, che non forma ghiaccio anche alle temperature più basse.

- l'abbassamento della temperatura di congelamento. Le cellule hanno la possibilità di aumentare la concentrazione dei succhi cellulari, abbassando in tal modo la temperatura di congelamento. Piante non alofite hanno la possibilità di raggiungere potenziali di -50 bar, mentre nelle piante alofite si possono raggiungere i -200 bar. Già la riduzione del potenziale idrico a -50 bar consente di abbassare la temperatura di congelamento dell'acqua di circa 4°C.

- il super-cooling. L'acqua può rimanere allo stato liquido al di sotto della temperatura di congelamento, se la formazione dei cristalli di ghiaccio è inibita per mancanza di nuclei di condensazione (*super-cooling*). In natura generalmente questo si verifica al massimo per 1-3°C al di sotto della temperatura di congelamento. L'acqua, infatti, al di sotto del punto di congelamento, si trova in condizioni instabili e la formazione di ghiaccio inizia non appena si formano dei centri di nucleazione. Lo stato di super cooling può essere mantenuto al massimo

per alcune ore, e può quindi aiutare le piante a sopportare le gelate radiative notturne che si verificano periodicamente in alcune zone. Il *super-cooling* è il meccanismo che consente la sopravvivenza delle piante provenienti dalle regioni calde. I frutti di arancio, con temperature di congelamento di  $-2^{\circ}\text{C}$ , tollerano, grazie a questo meccanismo, anche temperature di  $-5^{\circ}\text{C}$ . Per lo stesso motivo le foglie di patata possono tollerare temperature di  $-6^{\circ}\text{C}$ . Allo stesso meccanismo è legata la resistenza a temperature inferiori allo zero delle gemme fiorali e delle cellule parenchimatiche del legno delle piante caducifoglie delle regioni temperate.

**A livello di pianta e di coltura**, i meccanismi di difesa ed adattamento messi in atto nei confronti delle basse temperature e delle gelate sono molto pochi rispetto a quelli visti per le alte temperature. I più importanti sono:

- *l'acclimatamento alle basse temperature (hardening)*. Una gelata improvvisa è molto più deleteria di una che si verifichi dopo un progressivo abbassamento della temperatura perché, a parità di temperatura raggiunta, nel secondo caso le piante hanno la possibilità di acclimatarsi al gelo. Per questo fenomeno, le gelate più dannose non sono quelle che si verificano durante l'inverno, ma quelle precoci autunnali e quelle tardive primaverili. Nel caso delle piante originarie dell'area temperata, in autunno si ha un aumento progressivo della resistenza alle basse temperature, mentre in primavera si ha in generale una perdita della tolleranza. Il grado di sviluppo di un organo è inversamente correlato con la resistenza alle basse temperature. Questo non significa che sviluppo e tolleranza siano indissolubilmente collegati. In generale, temperature comprese tra i  $5$  ed i  $10^{\circ}\text{C}$ , rappresentano temperature soglia al di sopra delle quali non si ha alcun acclimatamento. Si è visto che periodi di caldo durante l'inverno possono indurre una interruzione dell'acclimatamento. Nella patata sono necessari 15 giorni di esposizione a basse temperature per indurre resistenza al freddo, ma bastano 24 h con temperature elevate per perdere questa resistenza.

- *la dormienza*. Il semplice arresto della crescita e dello sviluppo può essere sufficiente a conferire resistenza alle basse temperature, e quindi in generale la dormienza è correlata positivamente con la tolleranza alle basse temperature.

#### 5.4. PRATICHE AGRONOMICHE E TEMPERATURA DELL'ARIA E DEL TERRENO

In genere l'agronomo si limita a scegliere la specie più adatta al regime termico dell'ambiente di coltivazione e, all'interno della specie, la cultivar con la fenologia migliore, e ad intervenire sull'epoca di semina.

La temperatura alla quale le piante crescono, sia a livello del terreno che a livello dell'aria, possono essere almeno in parte modificate attraverso le pratiche agronomiche in vari modi:

- favorendo il drenaggio dell'acqua;
- variando il grado di copertura del terreno attraverso la quantità dei residui lasciati sul terreno o con il ricorso alla pacciamatura (*mulching*). La *pacciamatura* consiste nel ricoprire il terreno con materiale vario (paglia, materie plastiche ecc.), permettendo alla parte aerea delle piante di stare in piena aria. E' largamente impiegata in orticoltura, oltre che per aumentare la temperatura del terreno, per ridurre i consumi idrici e per impedire lo sviluppo di infestanti.
- attraverso le lavorazioni: se lo scopo è quello d'isolare gli strati sottostanti dalle variazioni termiche di quello superficiale, la lavorazione che crea porosità ha un effetto isolante, in quanto il calore diffonde più lentamente nell'aria che nella parte solida e nell'acqua del terreno (K diminuisce all'aumentare della porosità); se lo scopo è quello di favorire il flusso del calore accumulato durante il giorno verso l'atmosfera per ridurre i danni da

- esponendo a sud le colture in terreni in pendio
- disponendo le file in direzione N-S
- ricorrendo ad *apparecchiamenti protettivi*, che possono essere:
  - o *Coperture*: con teli di plastica, che proteggono la coltura per tutto il ciclo o solo per parte del ciclo (tunnel, campane), realizzate in materiali tali da garantire l'effetto serra
  - o *Cassoni o lettorini*: muretti perimetrali coperti di materiali trasparenti
  - o *Serre*: consentono di far crescere le piante in periodi o in ambienti in cui non sarebbe possibile. Possono essere di vetro materiali plastici, riscaldate e illuminate artificialmente o no, mobili o fisse

#### 5.4.1. Protezione dalle gelate.

Proteggere le piante dagli effetti letali delle basse temperature è un importante problema in agricoltura, particolarmente per le colture di alto reddito.

La maggiore difficoltà non è tanto nel prevedere la gelata, quanto nel quantificare il probabile danno che ne deriverebbe, ossia nel trovare una relazione tra temperature minime e perdita di prodotto. La perdita di prodotto, a parità di abbassamento termico, dipende infatti da molteplici fattori: tipo di coltura, varietà, grado di maturità dei tessuti, dimensione della coltura, tipo di potatura, tasso di diminuzione della temperatura (quando la temperatura si abbassa repentinamente, si formano cristalli di ghiaccio di grosse dimensioni, mentre quando l'abbassamento è più graduale sono più piccoli, ed il danno che provocano è conseguentemente minore), persistenza alle basse temperature. Inoltre la temperatura minima misurata nella stazione meteo fornisce informazioni limitate sulla temperatura fogliare. Durante le gelate, ossia in presenza di elevate perdite di calore dal terreno per irraggiamento, la temperatura fogliare può essere di 4-5°C inferiore a quella registrata nella capannina e, a parità di abbassamento termico, colture diverse sperimentano diverse temperature fogliari.

*Gelate e scelta della coltura*: la lunghezza della stagione di crescita disponibile in un certo ambiente per una determinata coltura è determinata dal verificarsi, in primavera ed in autunno, di gelate con temperature minime sufficienti ad uccidere la pianta o a danneggiarla gravemente. Le date in cui mediamente si verificano per l'ultima volta in primavera, o per la prima volta in autunno, temperature minime di 0°C, vengono utilizzate per definire la lunghezza della stagione di crescita. Alcuni autori hanno dimostrato che la data della prima gelata in autunno è indipendente da quella dell'ultima gelata in primavera. In media, le gelate per avvezione si verificano più precocemente in primavera, e più tardivamente in autunno di quelle per irraggiamento.

#### *Metodi di protezione dalle gelate*

1. Selezione del luogo. L'aria che si raffredda durante la notte diventa più densa e si sposta alle quote inferiori, tanto che alcuni autori hanno rilevato incrementi di temperatura di circa 6,2°C per ogni 100 m di altezza, rispetto al bacino nel quale si andava a raccogliere l'aria fredda. Poiché l'aria fredda tende a fluire negli strati sottostanti, le coltivazioni dovrebbero essere realizzate in aree dalle quali è possibile il drenaggio dell'aria fredda ad aree sottostanti. Il deflusso dell'aria fredda non dovrebbe essere impedito da frangivento, recinzioni ecc. Anche la vicinanza di grossi bacini acquiferi è importante perché in grado di ridurre la frequenza delle gelate e la loro severità. L'effetto benefico dei grossi bacini è stato evidenziato anche a distanza di 8 Km.
2. Intercettazione della radiazione. Le gelate per irraggiamento si verificano nelle notti limpide a causa dell'assenza di nubi che potrebbero assorbire la radiazione LW e reirradiarla verso il terreno. Un possibile mezzo di difesa potrebbe essere quello di creare delle nubi artificiali

3. Isolamento termico. Quando le piante che devono essere protette sono di piccole dimensioni, è possibile proteggerle con delle coperture temporanee che, generalmente, vengono sistemate nel tardo pomeriggio e rimosse la mattina seguente. Questo sistema è abbastanza efficace quando le gelate non sono molto intense e non si protraggono a lungo. I materiali utilizzati per la copertura devono avere una bassa emissività nell'infrarosso ed una bassa conduttività termica. Nel caso di specie arboree, a volte si ricorre alla copertura del tronco, la cui efficacia risiede nella capacità di ridurre le variazioni di temperatura del tronco durante la fase di gelata, riducendo il tempo in cui il tronco rimane esposto alle temperature inferiori allo 0°C. Il problema di questo sistema è che si vanno a costruire tane per roditori e un microambiente che favorisce l'insorgenza di patogeni.
4. Rimescolamento dell'aria. Durante le gelate per irraggiamento, la radiazione netta alla superficie del terreno è compresa tra -60 e -100 W m<sup>-2</sup>. L'aria pertanto si raffredda quando viene in contatto con la superficie. Il movimento convettivo dell'aria in queste condizioni viene inibito dall'inversione termica. In un qualche punto al di sopra della superficie del terreno, la temperatura dell'aria sarà superiore agli 0°C, e basterebbe del vento per rimescolare l'aria ed innalzare la temperatura alla superficie. Questo risultato può essere ottenuto installando grosse torri con grandi ventilatori (agrumeti della California e dell'Arizona). Bates ha descritto l'uso di questo sistema in un frutteto dell'Oregon dove il gradiente di temperatura tra 1,2 m e 18 m variava da 1 a 9°C. Egli ha trovato un qualche effetto della ventilazione su un'area di circa 5 ha, mentre in un'area di 2 ha la temperatura poteva essere tenuta prudentemente a livelli superiori a quelli di gelata. È stato dimostrato che anche gli elicotteri possono essere molto efficienti in questo senso, in quanto, oltre a rimescolare l'aria, dirigono aria calda verso il basso. L'uso degli elicotteri è preferito quando il valore economico della coltura non è tale da giustificare l'installazione di torri. L'opera di rimescolamento dell'aria, a parità di altre condizioni, è più efficiente (energia utilizzata/area protetta) quando l'inversione termica è più marcata. La velocità di rotazione dei ventilatori deve essere tale che ciascuna unità di superficie possa essere raggiunta almeno una volta ogni 5 minuti. Senza agitazione, infatti, l'inversione si ristabilisce prontamente. Applicazione di acqua (irrigazione antibrina). L'acqua può essere utilizzata con effetto nel prevenire i danni da gelata. Quando l'acqua utilizzata per l'irrigazione proviene da pozzi, essa si trova ad una temperatura superiore allo 0. L'effetto termico dell'acqua legato alla differenza di temperatura con i tessuti della pianta, è poca cosa rispetto al calore che viene liberato nel momento in cui l'acqua gela. Il calore di fusione dell'acqua a 0°C è di circa 0.334 MJ kg<sup>-1</sup>. L'acqua può essere applicata mediante irrigazione a pioggia. Non appena l'acqua congela sulla pianta, viene liberato il calore di fusione e sino a quando il congelamento continua la temperatura si mantiene a circa 0°C. Il calore rilasciato nel congelamento, deve compensare quello perduto dalla superficie con l'evaporazione, l'irraggiamento e la convezione. Per questo motivo il quantitativo di acqua che congela deve essere circa 7.5 volte il quantitativo di acqua che viene evaporato. L'irrigazione deve proseguire sino a quando l'innalzamento termico ad opera dell'irraggiamento solare fa sciogliere tutto il ghiaccio precedentemente formato sulla pianta, in modo da evitare che il calore necessario per sciogliere il ghiaccio venga prelevato dalla pianta, che subirebbe in questo caso i danni da gelata che erano stati evitati sino a quel momento. È opportuno porre attenzione nell'applicazione di questo metodo su piante alte ed alberi, perché in questi casi il forte carico di ghiaccio può portare a rotture di rami della pianta. Questo metodo di protezione dalle gelate è molto efficace con pomodoro, peperone, fagiolo ed ortive in generale. In alcuni casi ha consentito di proteggere le colture anche da temperature di -5°C. La pioggia

5. Il raffreddamento della pianta per prolungarne la dormienza. In alcuni casi l'irrigazione a pioggia dei frutteti, a fine inverno-inizio primavera, può essere efficace nell'abbassare la temperatura della pianta, e quindi nel prolungare la dormienza delle gemme. Nelle piante da frutto, la dormienza viene interrotta dall'innalzamento termico, una volta che è stato soddisfatto il fabbisogno in freddo della cultivar. Se le temperature aumentano precocemente in primavera, lo sviluppo viene accelerato e la pianta può subire considerevoli danni da ritorni di freddo. Alcuni autori hanno osservato ritardi di anche 17 giorni nella fioritura del melo in seguito al raffreddamento operato grazie all'irrigazione a pioggia. Il raffreddamento massimo si ottiene applicando l'acqua quando la temperatura è alta, e pertanto anche l'evaporazione è elevata. E' ovvio che l'efficacia dell'operazione dipende, oltre che dalla temperatura, dall'umidità, dalla velocità del vento, dalla radiazione netta e dal tasso ed epoca di somministrazione dell'acqua.
6. Manipolazione del terreno. La temperatura del terreno raggiunge il suo valore massimo in autunno. Il calore conservato negli strati del terreno al di sotto della superficie può quindi essere utilizzato, soprattutto in autunno, nella protezione dalle gelate per irraggiamento. A questo riguardo tutti i metodi che aumentano la conduttività termica e la diffusività del terreno possono essere utili. Il terreno compatto ha una buona conduttività per via dei pochi dei pori pieni di aria, per cui la rullatura di terreni nudi negli interfilari può avere un effetto positivo. La presenza dell'inerbimento in un frutteto, invece, può ridurre il potenziale contributo che il terreno può offrire al riscaldamento dell'aria. L'erba cattura il calore emesso dal terreno, e molto di questo viene restituito al terreno stesso. Durante il giorno possono essere sistemati dei fogli di plastica trasparente, e nel tardo pomeriggio fogli di alluminio, in modo da conservare il calore raccolto durante il giorno, rimuovendo tutte le coperture alle prime ore del mattino, in corrispondenza della probabile gelata. Applicando questa tecnica si è osservata una temperatura del terreno nudo coperto superiore di 10°C rispetto a quella del terreno non coperto. La perdita di calore da parte del terreno una volta che la copertura è stata rimossa, è stata abbastanza rapida.

Bibliografia principale:

- Rosemberg NJ, Blad BL, Verma SB, 1983. Microclimate. The biological environment. 2<sup>nd</sup> Ed. J. Wiley and Sons, 495 pp.
- Jones HG, 1992. Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology. 2<sup>nd</sup> Ed. Cambridge University Press, 428 pp.
- Turner N.C., Kramer P.J., 1980. Adaptation of plants to water and high temperature stress, J. Wiley and Sons, 482 pp.
- Schulze ED, Beck E., Muller-Hohenstein K., ... Plant Ecology. Springer.
- Bonciarelli, 1981. Agronomia. Edagricole, pp.292.

Fonti:

Rosemberg NJ, Blad BL, Verma SB, 1983. *Microclimate. The biological environment*. 2<sup>nd</sup> Ed. J. Wiley and Sons, 495 pp.

Jones HG, 1992. *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. 2<sup>nd</sup> Ed. Cambridge University Press, 428 pp.

Loomis RS & Connor DJ, 1992. *Crop ecology. Productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press, 538 pp.

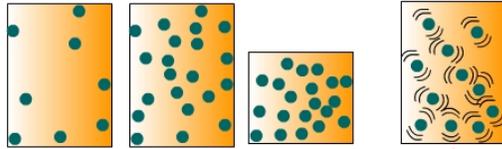
## 6. IL VENTO

Il processo di riequilibrio del bilancio energetico planetario viene in gran parte realizzato attraverso spostamenti di masse d'aria da un luogo all'altro: il vento costituisce il fenomeno che realizza tale processo ed è originato da differenze di pressione, a loro volta derivanti principalmente da differenze di temperatura tra le masse di aria coinvolte.

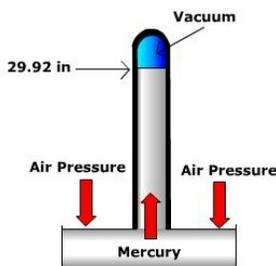
\*\*\*\*\*

### 6.1. La pressione atmosferica

La pressione atmosferica è la forza esercitata dal peso di una colonna di aria sopra un particolare luogo. Immaginiamo un contenitore chiuso: quando le molecole d'aria collidono con la superficie interna del contenitore, esse esercitano una pressione che dipende dal numero di collisioni (Figura). La pressione può essere cambiata in due modi: 1) aumentando la densità dell'aria (che può

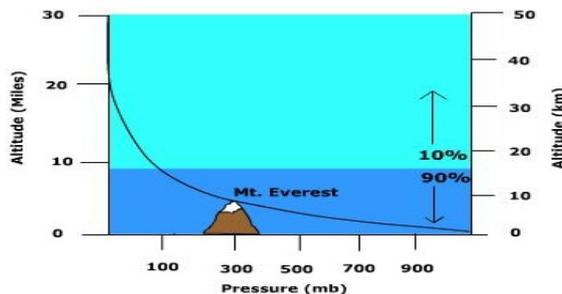


essere aumentata immettendo un maggior numero di molecole d'aria dentro al contenitore (b) o riducendo il volume del contenitore (c); 2) aumentando la temperatura (d) e quindi facendo muovere più velocemente le molecole d'aria, il che si traduce in un maggior numero di collisioni.



In natura, le variazioni di pressione attraverso la superficie terrestre si creano per cause meccaniche o per cause termiche. Variazioni in pressione dovute a cause meccaniche si verificano quando il flusso dell'aria è impedito, e una massa d'aria è costretta ad innalzarsi. I cambiamenti di temperatura causano anch'essi cambiamenti di pressione perché, quando l'aria viene riscaldata, sale, si espande e la pressione che esercita diminuisce. Al contrario, quando l'aria viene raffreddata, scende verso il basso causando un aumento di pressione.

La pressione con i barometri, il quello a mercurio del mare è tale da colonnina di un'altezza di 760 pressione di 1 atm 1,013 bar.



atmosfera si misura più comune dei quali è (Figura), nel quale la dell'atmosfera a livello fare innalzare una mercurio fino ad mm, corrispondente alla o di 0,1013 MPa, o di

La pressione atmosferica diminuisce all'aumentare dell'altitudine, perché contemporaneamente diminuisce l'altezza della colonna d'aria soprastante. Il tasso di diminuzione non è però costante perché, essendo l'aria fortemente comprimibile, essa ha una densità maggiore vicino alla superficie (Figura).

\*\*\*\*\*

L'aria si muove costantemente alla ricerca di un equilibrio tra le aree ad alta pressione a quelle a bassa pressione. Il vento non è altro che il movimento di molecole d'aria da un luogo all'altro, ad

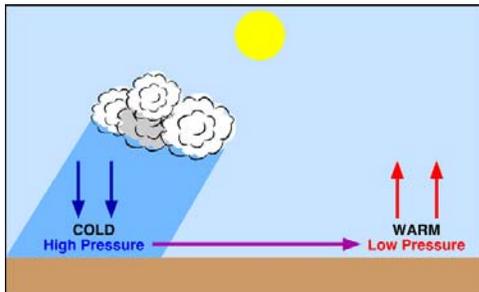
una velocità e con una direzione che rappresentano un bilancio tra le tre forze responsabili di questo movimento, che sono:

- il gradiente di pressione
- l'attrito superficiale
- la forza di Coriolis

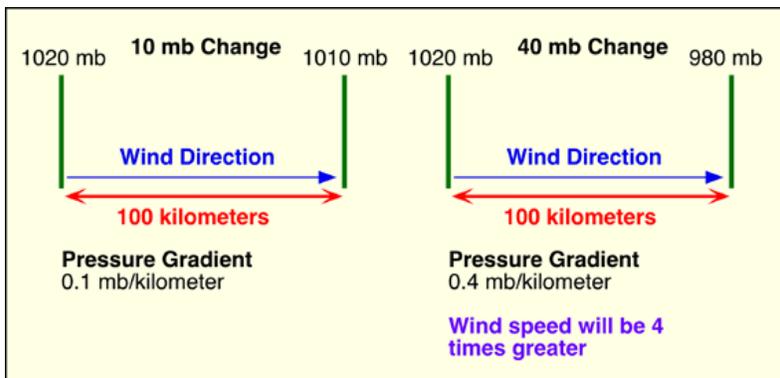
A livello microclimatico, si è interessati soprattutto alle prime due:

*a) il gradiente di pressione*

Il vento si origina sempre in presenza di un gradiente di pressione e, in linea teorica, esso acquista velocità proporzionale al gradiente ed alla densità dell'aria. Esso soffia dalle zone di alta pressione verso quelle di bassa pressione, ossia in direzione ortogonale alle isobare, ossia alle linee immaginarie che congiungono punti che si trovano alla medesima pressione. La distanza tra due isobare rappresenta il cambiamento in pressione che si verifica su una certa distanza, ossia il gradiente di pressione. Un cambiamento in pressione tra due zone può essere indotto dal fatto che una delle due riceve più energia di un'altra, ad esempio a causa di un diverso angolo solare. Il riscaldamento dell'aria che ne consegue provoca un suo innalzamento ed una condizione di pressione inferiore a quella delle zone circostanti, meno calde. Il gradiente di pressione che viene così a crearsi fa inizialmente spostare l'aria verso la zona a bassa pressione, creando un vento. Quindi:



*gradiente di energia → gradiente di temperatura → gradiente di pressione → vento*



Se si immagina di arrestare per un istante il moto di rotazione della terra, la direzione del vento è perpendicolare alle isobare ed il senso è dalla zona ad alta verso quella a bassa pressione. L'intensità o velocità, è direttamente proporzionale al gradiente ed inversamente proporzionale alla distanza.

*b) l' attrito superficiale*

Quando un fluido scorre su una superficie rigida, le particelle del fluido in prossimità della superficie vengono rallentate a causa della resistenza operata dalla superficie, che provoca una marcata variazione della componente orizzontale della velocità del vento con l'altezza.

Ogni ostacolo che il vento incontra causa quindi una resistenza, o attrito, che rallenta il vento e ne cambia la direzione per cause esclusivamente meccaniche. Colline e montagne, ma anche irregolarità della superficie di dimensioni molto inferiori, sono in grado di generare attrito. Lo spessore del vento interessato da questo fenomeno varia enormemente e dipende dalla configurazione superficiale. In generale, comunque, la velocità del vento si riduce man mano che ci si avvicina alla superficie di attrito.

**6.2. MISURA DEL VENTO**

Il vento è una quantità vettoriale, caratterizzata quindi sia dalla grandezza (velocità) che dalla direzione.

a) *velocità*. La velocità del vento si misura con gli **anemometri**, e l'unità di misura è il  $\text{m s}^{-1}$ , anche se alcuni costruttori di strumenti continuano ad usare il  $\text{km h}^{-1}$  o il miglio  $\text{h}^{-1}$  (1 miglio = 1609,3 m). La misura della velocità del vento è quella relativa alla componente orizzontale del moto dell'aria, le cui variazioni sono molto irregolari sia in intensità che in direzione. In media i moti orizzontali sono di due ordini di grandezza superiori a quelli verticali. Poiché queste fluttuazioni sono quasi istantanee l'intensità e la direzione del vento vengono espresse come media, generalmente su una base temporale di 10 minuti o di 1 ora, delle letture istantanee, solitamente rilevate ad un'altezza di 10 m. Per scopi agronomici la tendenza è quella di porre lo strumento a 2 m di altezza

Per l'applicazione di alcune formule utilizzate per la stima dell'evapotraspirazione, è spesso richiesto il percorso totale del vento in un determinato intervallo di tempo, ossia il cosiddetto vento 'filato', spesso distinguendo tra il **vento filato** durante il giorno e quello filato durante la notte. In realtà si tratta sempre di una velocità che viene rilevata con un anemometro totalizzatore che rileva la somma dei km percorsi in un determinato intervallo di tempo. La misura del vento filato si esprime in  $\text{km h}^{-1}$  o in  $\text{km d}^{-1}$ .

b) *direzione*. La direzione prevalente del vento si misura con gli **anemoscopi** e può essere ricavata dal numero di ore del giorno in cui il vento spira da una determinata direzione. Per ottenere questa misura possiamo suddividere i  $360^\circ$  in intervalli di  $30^\circ$  centrati a  $15^\circ$ ,  $45^\circ$  ecc. Una volta stabilita la base temporale sulla quale esprimere la direzione (generalmente l'ora), le letture istantanee vengono mediate relativamente a quell'intervallo di tempo. A questo proposito si stia attenti che per direzioni oscillanti intorno allo 0, ed a  $360^\circ$ , la semplice media aritmetica può portare ad errori fino a  $180^\circ$ . Si pensi a due letture istantanee di cui una pari a  $10^\circ$  e l'altra pari a  $350^\circ$ , la direzione del vento è Nord, ma la media aritmetica dà  $180^\circ$ , quindi Sud.

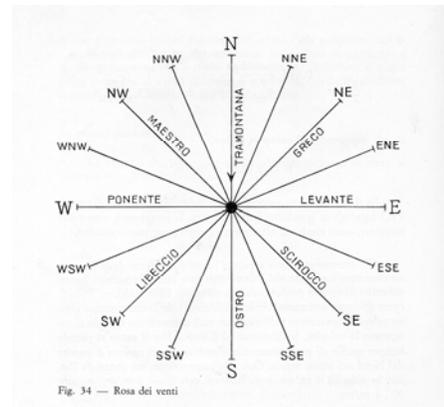


Fig. 34 — Rosa dei venti

I dati orari, giornalieri, del periodo, di velocità e direzione del vento possono essere a loro volta mediati quando si dispone di una serie storica di dati per quell'ora, giorno, zioperiodo. I valori medi possono essere utilizzati per calcolare : la velocità media, la % di ore di calma, la % di ore in cui il vento spira da una determinata direzione ecc..

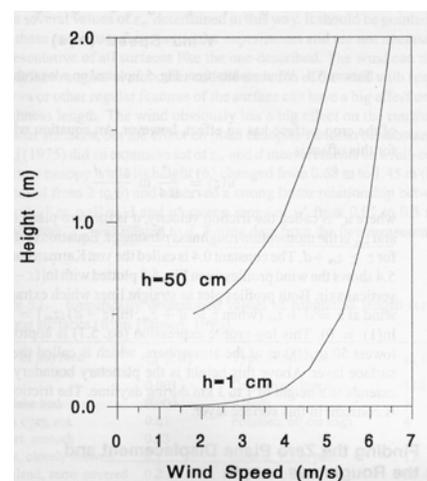
E' importante ricordare che nelle varie località è possibile individuare i cosiddetti 'venti dominanti', ossia quei venti la cui direzione è più frequente.

Molto spesso i danni del vento sono legati alla punta massima (massima intensità nell'intervallo di tempo considerato) che al valore della velocità media.

### 6.3. VARIAZIONI NELLA VELOCITA' DEL VENTO

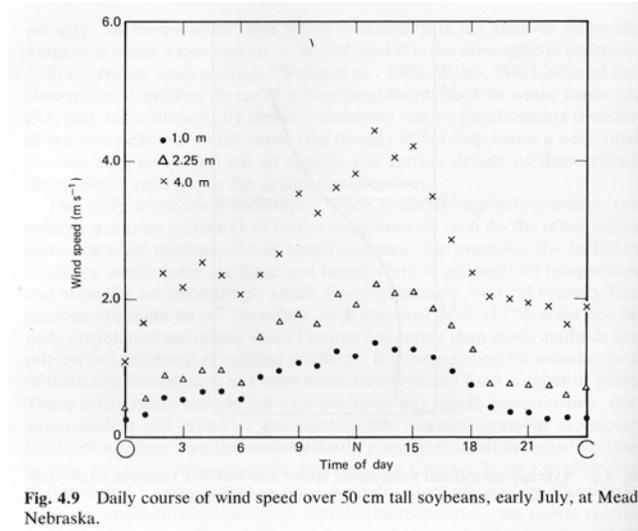
La velocità del vento può variare da  $2\text{-}5 \text{ m s}^{-1}$  nel caso di brezze, a  $15\text{-}20 \text{ m s}^{-1}$  nelle burrasche, fino a valori di  $32 \text{ m s}^{-1}$  e oltre nel caso degli uragani.

La velocità del vento aumenta con l'altezza, a causa della riduzione indotta dall'attrito in prossimità della superficie: è  $0 \text{ m s}^{-1}$  alla superficie del terreno, aumenta rapidamente con l'altezza vicino alla superficie, diventa costante ad una certa



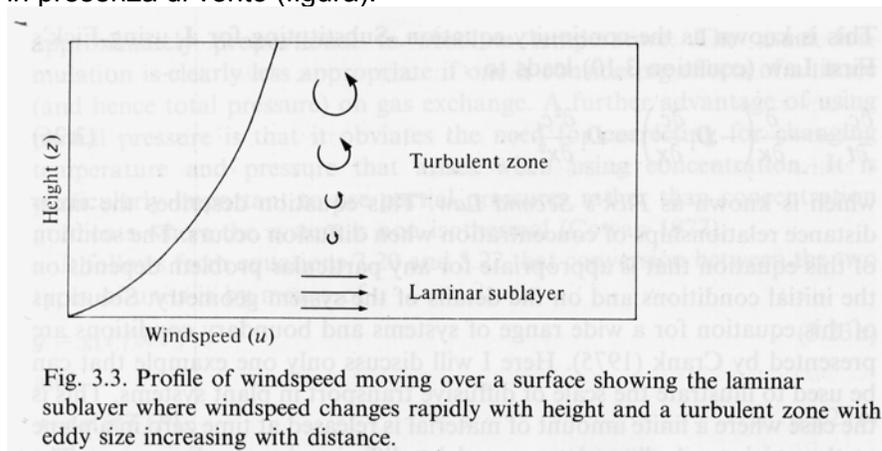
distanza dalla superficie. Sopra una coltura si osserva uno stesso andamento ma a partire da una velocità maggiore di zero sulla superficie della coltura (Figura. Profili della velocità del vento sopra una coltura alta 50 cm e sopra il terreno (1 cm) (da Campbell)).

Durante le ore notturne solitamente la velocità del vento diminuisce, in quanto lo spostamento dell'aria è determinato dal diverso riscaldamento della superficie terrestre da parte della radiazione solare (Figura pagina successiva). Per lo stesso motivo, la massima velocità viene generalmente registrata intorno a mezzogiorno. Nelle regioni o nei periodi dell'anno nei quali si verificano frequenti passaggi di fronti e temporali, questo andamento è più irregolare.



#### 6.4. IL VENTO E IL TRASPORTO TURBOLENTO

I flussi di energia e materia tra le superfici e l'aria avvengono solo in minima parte per diffusione in uno strato molto sottile d'aria immediatamente sopra la superficie chiamato **substrato laminare**, che può essere spesso solo pochi mm, e può talvolta essere perfino più sottile, specialmente in presenza di vento (figura).

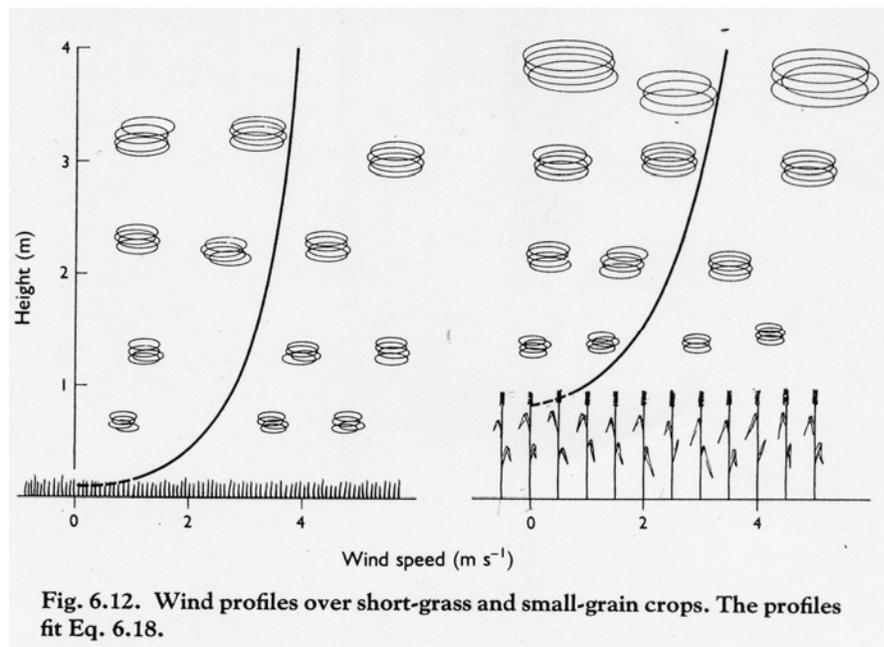


Al di sopra dello strato laminare si trova lo **strato superficiale turbolento** (o semplicemente strato superficiale), che si estende finanche a 50-100 m ed è dominato da moti turbolenti dovuti in parte al vento che causano forti rimescolamenti dell'aria. In questo strato i flussi di massa ed

energia avvengono prevalentemente per trasporto di massa, legato ai moti convettivi, sia liberi, che forzati (vento), che rimescolano gli strati d'aria prossimi all'organismo.

I movimenti di masse d'aria nello strato turbolento dipendono sia dalla *convezione libera*, causata dalle variazioni di densità dell'aria derivanti da gradienti di temperatura, meccanismo importante soprattutto in condizioni di vento molto leggero, che dalla *convezione forzata*, della quale è responsabile il vento. Questo meccanismo è più frequente del precedente negli ambienti vegetali.

Entrambi i meccanismi determinano la formazione di turbolenze che si manifestano sottoforma di vortici o mulinelli, in conseguenza delle forze di frizione tra le parcelle d'aria in movimento e le superfici sopra alle quali esse scorrono; i vortici hanno dimensioni variabili da alcuni metri ad alcuni millimetri. Sia le dimensioni che la velocità dei vortici, che sono spazialmente distribuiti in modo casuale e seguono le asperità della superficie, diminuiscono in prossimità della superficie. Nel caso della convezione libera (turbolenza termica o convettiva) i vortici tendono ad essere più grandi, più lenti (meno frequenti), più instabili e caratterizzati da un più rapido decadimento, di quelli che si originano per l'attrito del vento con le superfici (turbolenza meccanica). La dimensione di questi ultimi dipende dal gradiente di velocità; nei punti in cui il gradiente è maggiore i vortici sono più piccoli e veloci, mentre nei punti in cui il gradiente è minore i vortici sono più grandi, ma più lenti. Poiché la dimensione dei vortici tende a essere dello stesso ordine di grandezza della irregolarità della superficie, la loro dimensione è diversi ordini di grandezza maggiore di quella relativa al movimento molecolare determinato dalla diffusione. Per questa ragione il trasferimento di massa, di calore, di quantità di moto determinato dalla turbolenza è diversi ordini di grandezza (da 3 a 6) più rapido di quello determinato dalla diffusione.



Il trasporto di massa o energia attraverso questi meccanismi:

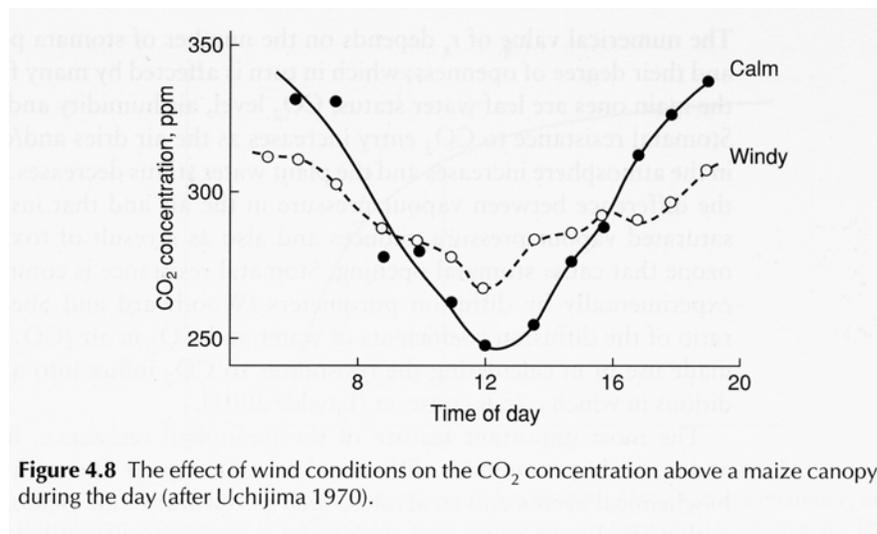
- è maggiore lontano dalla superficie, dove i vortici sono più grandi;
- è tanto maggiore quanto più veloce è il vento e quanto più rugosa è la superficie, in quanto da questi fattori dipende l'entità della turbolenza meccanica
- a parità di velocità del vento, aumenta all'aumentare dell'altezza della pianta poiché le piante più alte sviluppano un attrito maggiore di quelle più basse, e quindi un valore maggiore del gradiente di velocità tra l'atmosfera e la superficie (figura).
- è tanto più intenso quanto maggiore è il differenziale termico tra la superficie e l'atmosfera, in quanto da questi fattori dipende l'entità della turbolenza termica

### 6.4.1. Il trasporto turbolento e le piante

I vortici che si creano in seguito alla turbolenza trasportano tutte le proprietà dell'aria (calore, vapore acqueo, CO<sub>2</sub> ed O<sub>2</sub>) caratteristiche del luogo dal quale i vortici si sono creati (coltura o atmosfera), e queste proprietà, grazie al movimento dei vortici, vengono trasportate (miscelate) verso l'alto e verso il basso. L'efficacia di questo tipo di trasporto è legata anche al fatto che viene *mantenuto un elevato gradiente di concentrazione* delle diverse specie chimiche, che si traduce in una maggiore velocità di flusso rispetto alle condizioni di aria ferma dovuto al fatto che il movimento dell'aria fa sì che l'aria a contatto con la superficie venga sostituita con aria che non è stata modificata dalla superficie stessa. Questo meccanismo è importante solo nel caso di superfici isolate. Nel caso, invece, di vaste superfici omogenee, l'aria che giunge su una superficie è già stata modificata dalla superficie che ha incontrato precedentemente, per cui il cambiamento dell'aria non contribuisce in alcun modo ad accelerare il processo di diffusione. Il gradiente di concentrazione è infatti lo stesso che si ha nel caso di aria ferma.

Due esempi dell'importanza di questo tipo di trasporto riguardano il vapor acqueo e l'anidride carbonica:

- e) *vapor acqueo*: in una giornata estiva un prato irriguo può perdere per evapotraspirazione fino a 10 kg di acqua per m<sup>2</sup>, cui corrisponde, se si considera una colonna di atmosfera alta 100 m in stato di quiete, un aumento della densità di vapor acqueo di 100 g m<sup>-3</sup>. Se però si misura l'effettivo aumento in densità del vapor acqueo, solitamente questo è pari a pochi grammi, ad indicare che la maggior parte del vapore è stato trasportato a distanza dal moto delle masse d'aria.
- f) *anidride carbonica*: la stessa coltura dell'esempio precedente è in grado di organizzare giornalmente, attraverso la fotosintesi, tutta la CO<sub>2</sub> presente nei primi 30 m di atmosfera. Per contro, le fluttuazioni diurne del contenuto di CO<sub>2</sub> sono generalmente dell'ordine del 15%. Con poco vento la disponibilità atmosferica di CO<sub>2</sub> può abbassarsi fino a livelli limitanti per la fotosintesi (figura), mentre la concentrazione di vapor acqueo e la temperatura dell'aria aumentano.



Attraverso il trasporto di massa, quindi, il vento interagisce con le superfici naturali nei seguenti modi:

- ✓ esercita forze sulle superfici attraverso il trasporto di quantità di moto

- ✓ induce **effetti termici** (riscaldamento o raffreddamento) per trasporto di calore sensibile
- ✓ **favorisce l'evaporazione** dei liquidi attraverso i fenomeni di trasporto di massa ed energia
- ✓ **favorisce la fotosintesi** garantendo una adeguata disponibilità di CO<sub>2</sub>

## 6.5. L'avvezione

L'avvezione é il trasporto di massa e di energia sul piano orizzontale, nella direzione del vento. L'avvezione consente il trasporto di calore sensibile sottoforma di masse di aria calda o fredda.

Nel caso di aria fredda, può essere responsabile di gelate, più estese di quelle che si verificano su scala locale in seguito a perdite di calore per irraggiamento.

Nel caso di aria calda e secca, può aumentare il tasso di evapotraspirazione. Colture allevate in regioni aride talvolta vanno incontro a condizioni ambientali in cui LE è superiore al valore ipotizzabile dall'entità di R<sub>n</sub>. In questi casi, spesso, la ragione è la presenza di venti caldi provenienti da zone non irrigate, in cui R<sub>n</sub> viene prevalentemente convertita in H e utilizzata quindi per riscaldare l'aria trasportata dal vento. Se un vento caldo di questo tipo passa sopra una coltura irrigua, parte del suo calore sensibile (H) fornisce energia addizionale per l'evaporazione (LE).

L'avvezione contribuisce all'*effetto bordo*, responsabile del fatto che le piante ai margini di un campo o di una parcella crescono diversamente di quelle all'interno. Le piante di bordo sono infatti esposte maggiormente all'avvezione ed all'illuminazione, e quindi sono soggette ad una maggiore domanda evapotraspirativa. D'altro canto esse sono anche meno soggette a competizione con le piante circostanti per risorse del suolo e dell'aria.

## 6.6. Danni da eccessiva ventosità

La ventosità, se eccessiva, può influire negativamente sulla coltura in molti modi:

1. *Modificando l'economia idrica* attraverso un aumento dell'evapotraspirazione. Il movimento dell'aria, allontanando il vapor acqueo da una superficie evaporante, contribuisce a ripristinare il gradiente di pressione di vapore favorendo l'evaporazione.
2. *Causando danni meccanici* quali:
  - la rottura di rami o piante
  - la caduta di frutti. Più importante nelle colture arboree, la caduta di frutti può essere rilevante anche in certe specie erbacee, come il mais, le cui piante possono rompersi al di sotto della spiga quando un vento forte segue un attacco di piralide.
  - il danneggiamento di tunnel o serre
  - l'abrasione di cortecce o gemme. L'azione abrasiva si verifica quando il vento trasporta particelle di ghiaccio o di sabbia che possono danneggiare gravemente gemme e cortecce. Questo fenomeno è particolarmente forte pochi cm sopra la superficie del terreno o della neve.
  - l'allettamento di piante erbacee (*lodging*). Quest'ultimo fenomeno, frequente nei cereali vernini, in mais, girasole, canna da zucchero, consiste nel coricamento degli steli o dei culmi per piegatura in prossimità del terreno o per sradicamento delle radici in seguito a venti forti, soprattutto se concomitanti o successivi a piogge. Causa perdite di produzione e difficoltà nella raccolta meccanica.
3. *Trasportando semi di piante infestanti*
4. *Trasportando sali*: venti provenienti dal mare e che trasportano cloruro di sodio (NaCl) sono molto frequenti in Italia, e provocano gravi danni alla vegetazione a causa della forte tossicità di questo sale
5. *Ostacolando una corretta esecuzione dei trattamenti*

6. Provocando *erosione* del suolo attraverso il distacco ed il trasporto di particelle minute di terreno.

Il vento è un fattore ecologico particolarmente importante in regioni estese e pianeggianti, lungo le coste ed in alta montagna

La caratterizzazione della ventosità di un territorio assume importanza quando, ad esempio, a causa dell'importanza dei danni che ne derivano, è necessario organizzare una rete frangivento

## 6.7. I frangivento

I frangivento sono strutture che hanno lo scopo di ridurre la velocità del vento, e con essa gli effetti negativi della eccessiva ventosità sulla vegetazione.

Il ricorso ai frangivento rappresenta una strategia di difesa dal vento su grande scala, che può riguardare interi appezzamenti, o addirittura interi comprensori. Schematicamente, possiamo distinguere frangivento in morti e vivi.

I frangivento morti consistono prevalentemente in muretti a secco o in cannicciate, oppure in semplici canne infisse nel terreno una vicino all'altra come usano fare nel Mezzogiorno della Francia.

Nei frangivento vivi l'azione frangivento è esplicata da erbe, arbusti o alberi viventi. Sono vere e proprie piantagioni arboree, arbustive od erbacee, realizzate appositamente e con criteri idonee all'ottenimento della massima efficacia nella difesa dal vento. Nella zona da proteggere si creano fasce parallele di frangivento, o addirittura una rete di frangivento con maglie intrecciate.

Esiste un modello teorico cui un frangivento per essere perfetto dovrebbe aderire:

- a) essere sempre-verde, in modo da esercitare la sua protezione anche nei mesi invernali quando esistono sul terreno molte importanti colture, come i cereali;
- b) essere a rapida crescita, rustico, adattabile, resistente alla salsedine, per lo meno nelle zone in cui il vento da cui ci si vuoi difendere spirava dal mare;
- c) avere apparato radicale non così espanso da esercitare competizione eccessiva con le colture, e nello stesso tempo sufficientemente robusto da non offrire al vento la possibilità di sradicarlo.

La valutazione della opportunità di costruire una rete frangivento dipende dagli svantaggi e dai vantaggi: i primi sono rappresentati dalla competizione per l'acqua, per gli elementi nutritivi, per la luce ecc., mentre tra i vantaggi rientra il valore economico del legno o dei prodotti (olive per esempio) che si possono ottenere.

### 6.7.1. Efficacia dei frangivento

Il frangivento agisce, sia smorzando l'energia cinetica del vento, che deviandolo. Quando il vento arriva contro l'ostacolo, una parte di esso lo attraversa, diminuendo la propria velocità, mentre la rimanente parte viene deviata verso l'alto scavalcando l'ostacolo. L'efficacia di una rete frangivento dipende : dall'altezza, dalla porosità e dalla lunghezza.

Più è alto un frangivento, maggiore è l'area d'influenza, sia sopra-vento che sottovento, tanto che si è soliti esprimere la profondità dell'aria protetta in funzione dell'altezza del frangivento (h).

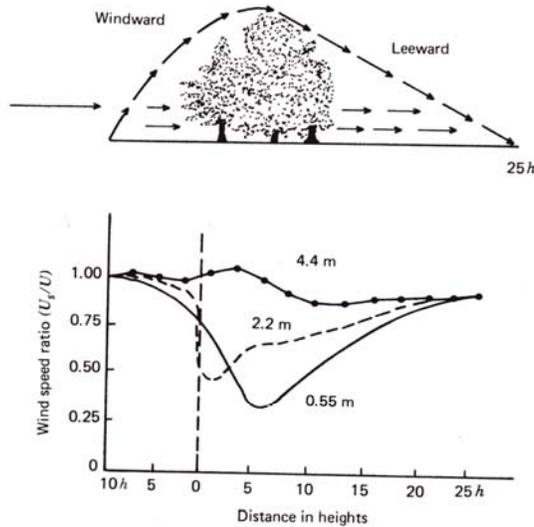


Fig. 9.4 Influence of a permeable windbreak on the ratio of wind speed in shelter ( $U_s$ ) and in the open ( $U$ ) (from van Eimern et al., 1964).

scavalca (figura pagina successiva); questo fa sì che oltre la barriera si determini una zona di bassa pressione che dà luogo a fenomeni di turbolenza, per cui si osserva una notevole riduzione della zona protetta.

In un esperimento in cui è stato misurato il profilo di vento in 10 tipi di frangivento con diversa porosità, si è osservato che la distanza alla quale il vento riprende la sua velocità iniziale dipende dalla velocità minima raggiunta. Maggiore è la diminuzione di velocità operata dal

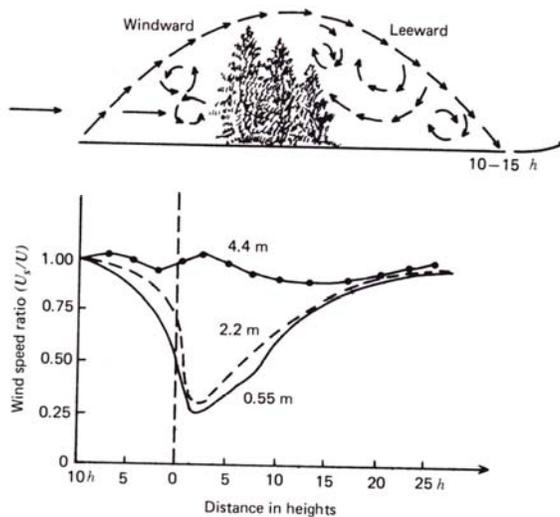


Fig. 9.3 Influence of a dense windbreak on the ratio of wind speed in shelter ( $U_s$ ) and in the open ( $U$ ) (from van Eimern et al., 1964).

terreno che favorisce la turbolenza, diminuendo l'area protetta.

Lo spessore del frangivento non contribuisce molto alla sua efficacia, più importante è la sua *struttura*. Con struttura si intende il profilo della sezione, che dipende dalla disposizione, dalla mole e dalla forma degli alberi. La massima efficacia non si ha con una struttura a sezione rettangolare, ottenuta ad es. con una o più file di cipressi molto fitti, ma con una struttura nella quale si abbia una serie di file di dimensioni progressivamente crescenti nella parte sopravvento, e una o due fasce di altezza decrescente nella parte sottovento. E' necessario, cioè, che nella parte sopravvento ci sia una specie d'«invito» a superare l'ostacolo. Per realizzare una struttura

L'azione di deviazione comincia sopravvento del frangivento, ad una distanza che va da 3 a 5 h. L'effetto di riduzione della velocità del vento nella parte sottovento è molto più esteso, protrahendosi fino a circa 20-25 h: oltre questa distanza il vento riprende la sua velocità iniziale (figura).

L'efficienza del frangivento varia con la sua densità. Se esso è abbastanza «poroso» (con il 30-50% di apertura nella massa) si osserva un'equilibrata ripartizione tra parte del vento che scavalca il frangivento e parte del vento che lo attraversa, e si ha la massima efficacia. Se il frangivento è invece molto denso, tutto il vento lo

frangivento, minore è la distanza sottovento perché il vento riprenda la sua velocità iniziale.

La lunghezza del frangivento rende la sua influenza più costante. Se una barriera è troppo corta o contiene dei buchi, si creano jet d'aria con una velocità addirittura superiore a quella che si avrebbe senza frangivento.

In generale, la migliore riduzione della velocità ed influenza sottovento si ottiene con frangivento la cui densità aumenta con l'altezza. In prossimità del suolo, infatti, la velocità del vento è minore, e se il frangivento è molto denso, la riduzione di velocità è molto forte. Si instaura così un forte gradiente di velocità tra sommità del frangivento e

di questo tipo si può far ricorso a diverse specie arboree di taglia diversa ed a specie arbustive, oppure a una sola specie arborea: es. *Eucalyptus*, alternando filari di alberi allevati ad alto fusto, con alberi ceduati (ossia tagliati alla base e lasciati germogliare) in diverse età.

### **6.7.2. Modificazioni microclimatiche indotte dalla presenza di frangivento**

Il microclima che si crea nell'ambito dell'area protetta dal frangivento non è semplicemente dovuto alla riduzione di velocità, ma anche ad una riduzione del coefficiente di trasferimento del vapore acqueo, che varia dal 25 all'80 % rispetto a quanto si verifica nell'area non protetta.

*La radiazione globale e quella netta* potrebbero essere sensibilmente ridotte dalla presenza del frangivento. Questo effetto è di scarsa importanza per i frangivento orientati in direzione N-S, in quanto solo una piccola area in prossimità del frangivento si trova in ombra durante il giorno. Se si tiene conto che durante la stagione di crescita il sole è generalmente alto, l'area in ombra è trascurabile. L'area in ombra al mattino, riceverà poi una quota addizionale nel pomeriggio a causa della riflessione operata dal frangivento. Per contro, i frangivento orientati in direzione E-W possono avere un grande effetto sul bilancio radiante. L'area esposta a Nord, particolarmente quando il sole è basso, sarà in ombra per un lungo periodo, mentre quella a Sud beneficerà di radiazione addizionale per riflessione. Generalmente, ad una distanza pari a 1- 2 h, la riduzione nella quantità di radiazione diventa trascurabile.

*La temperatura* in prossimità del frangivento è superiore a quella dell'area non protetta, dal momento che la riduzione della turbolenza riduce anche la rimozione di calore sensibile originato dalle piante e dal terreno. La riduzione della turbolenza ha anche l'effetto di rendere più accentuata l'inversione termica, per cui l'area protetta sarà più fredda e caratterizzata da una maggiore incidenza di gelate per irraggiamento. In contrasto con quanto affermato, autori polacchi hanno evidenziato una riduzione nell'incidenza di gelate in prossimità del frangivento. Questo fatto potrebbe essere spiegato ammettendo un apporto di energia radiante da parte del frangivento, e/o un effetto positivo della maggiore concentrazione di vapore nell'aria protetta sulla ri-emissione della radiazione termica emessa dal terreno.

*L'umidità dell'aria.* In prossimità del frangivento, si osserva un maggiore contenuto di umidità in quanto l'acqua evaporata o traspirata viene scarsamente rimossa.

*I consumi idrici.* Secondo molti ricercatori, il principale vantaggio delle reti frangivento delle zone aride, è il risparmio idrico. La minore velocità del vento porta ad una riduzione dell'evaporazione, in quanto, questa è in prima approssimazione proporzionale alla radice quadrata della velocità del vento. D'altro canto, la crescita delle piante al riparo del frangivento può essere più vigorosa, e questo maggiore vigore può portare ad un più rapido esaurimento delle riserve idriche del terreno e quindi ad uno stress idrico più precoce.

Secondo Brown e Rosemberg, in assenza di venti caldi, la maggiore conducibilità stomatica che si registra nell'area protetta può determinare un aumento dei consumi idrici rispetto all'area non protetta. La situazione si inverte in presenza di avvezione, ovvero quando venti caldi e/o poco umidi soffiano sulla coltura.

Miller ha misurato il consumo idrico di una coltura di soia irrigata in due situazioni, una di scarsa avvezione ed una di notevole avvezione. Il risparmio idrico da parte della coltura protetta era notevolmente maggiore quando si era in condizioni di forte avvezione. Il frangivento consentiva riduzioni di anche il 20% nel consumo idrico nell'ambito di periodi di 20 gg.

### 6.7.3. I frangivento in Sardegna

La zona italiana dove si è fatto più ricorso ai frangivento è Arborea, nella Sardegna occidentale, dove è stata fatta una bonifica idraulica e 'climatica' mediante l'installazione di frangivento su oltre 6000 ettari. In questa zona si sono create delle *fasce* molto ampie (*primarie*), normali alla direzione del vento dominante; perpendicolarmente a queste sono state poi create delle *fasce secondarie*, a formare una specie di grande reticolo, all'interno del quale è stato ricavato un reticolo più piccolo con delle *fasce terziarie*, che accompagnano le fosse di scolo e delimitano i singoli appezzamenti. In questo modo ci si può difendere da venti che spirano da ogni direzione. Le fasce principali sono costituite da 5-10 file di alberi, le fasce intermedie da 2-3 file e le fasce terziarie sono costituite da un filare di alberi che corre lungo le fosse longitudinali dei campi. Le specie usate sono l' eucalipto e nelle fasce secondarie il cipresso. È stato calcolato che ad Arborea, all'interno della zona protetta, la velocità del vento sia ridotta fino al 37-40% della velocità esterna del vento.