



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE E AMBIENTALI
PRODUZIONE, TERRITORIO, AGROENERGIA

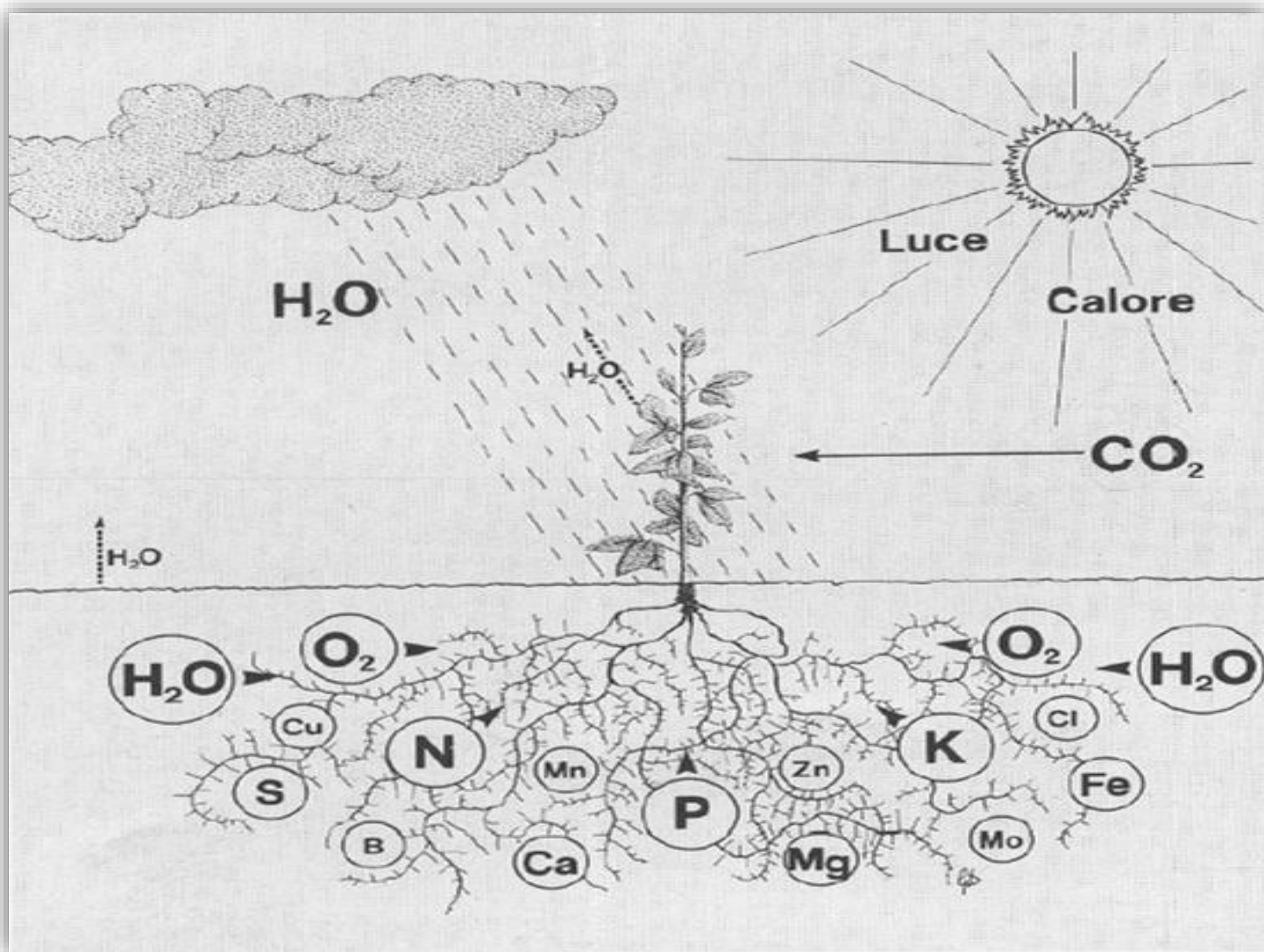
LA RADIAZIONE

Marco Acutis

Corso di studi in Produzione e Protezione delle Piante e dei Sistemi del Verde

PARAMETRI AGROMETEOROLOGICI

“Per agrometeorologia si intende la scienza che studia le interazioni dei fattori meteorologici ed idrologici con l’ecosistema agricolo-forestale e con l’agricoltura intesa nel suo senso più ampio, comprendendo cioè la zootecnia e la selvicoltura.” (art 1. ASSOCIAZIONE ITALIANA DI AGROMETEOROLOGIA)



PARAMETRI AGROMETEOROLOGICI

La conoscenza delle condizioni agrometeorologiche di una data area richiede la misura dei parametri dell'atmosfera, con una determinata frequenza spazio-temporale. I principali parametri sono:

- Radiazione solare,
 - Pressione atmosferica,
 - Temperatura dell'aria,
 - Temperatura del terreno,
 - Umidità dell'aria,
 - Umidità del terreno,
 - Bagnatura fogliare,
 - Precipitazioni,
 - Nuvolosità,
 - Evaporazione,
 - Vento.
- 
- Variano nel tempo in modo continuo o discreto (pioggia).
 - Si esprimono nell'intervallo di un periodo (giorno, decade, mese).
 - Si esprimono con il valore massimo, medio, minimo (es. temperatura), o con la sommatoria (es. pioggia).



RADIAZIONE SOLARE

FUNZIONI

- Fotosintesi: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{luce} \Rightarrow \text{Carboidrati} + \text{O}_2$
- Evapotraspirazione: apporto energetico per la traspirazione della pianta e per l'evaporazione di acqua dal suolo
- Riscaldamento aria, pianta, suolo

FOTOSINTESI:

Trasforma

l'**energia luminosa** (è inesauribile, è rinnovabile, è gratuita, è distribuita sul pianeta, è pulita,

ma

ha bassa intensità (energia/superficie), ha discontinuità temporale, non è trasportabile, non è conservabile, è difficilmente utilizzabile)

in **energia chimica** (ha alta intensità, è trasportabile, è conservabile, è facilmente utilizzabile per diversi fini da animali, motori, macchine,...,

ma

produce scorie, è costosa, è esauribile



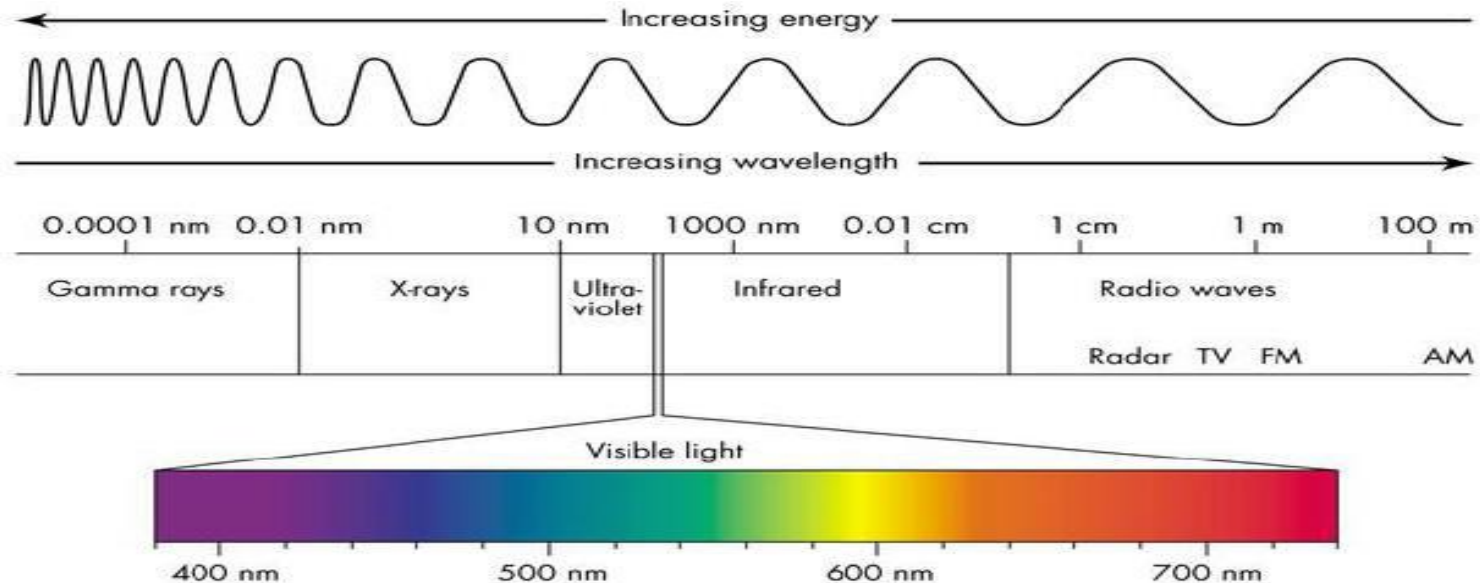
RADIAZIONE SOLARE

CARATTERISTICHE

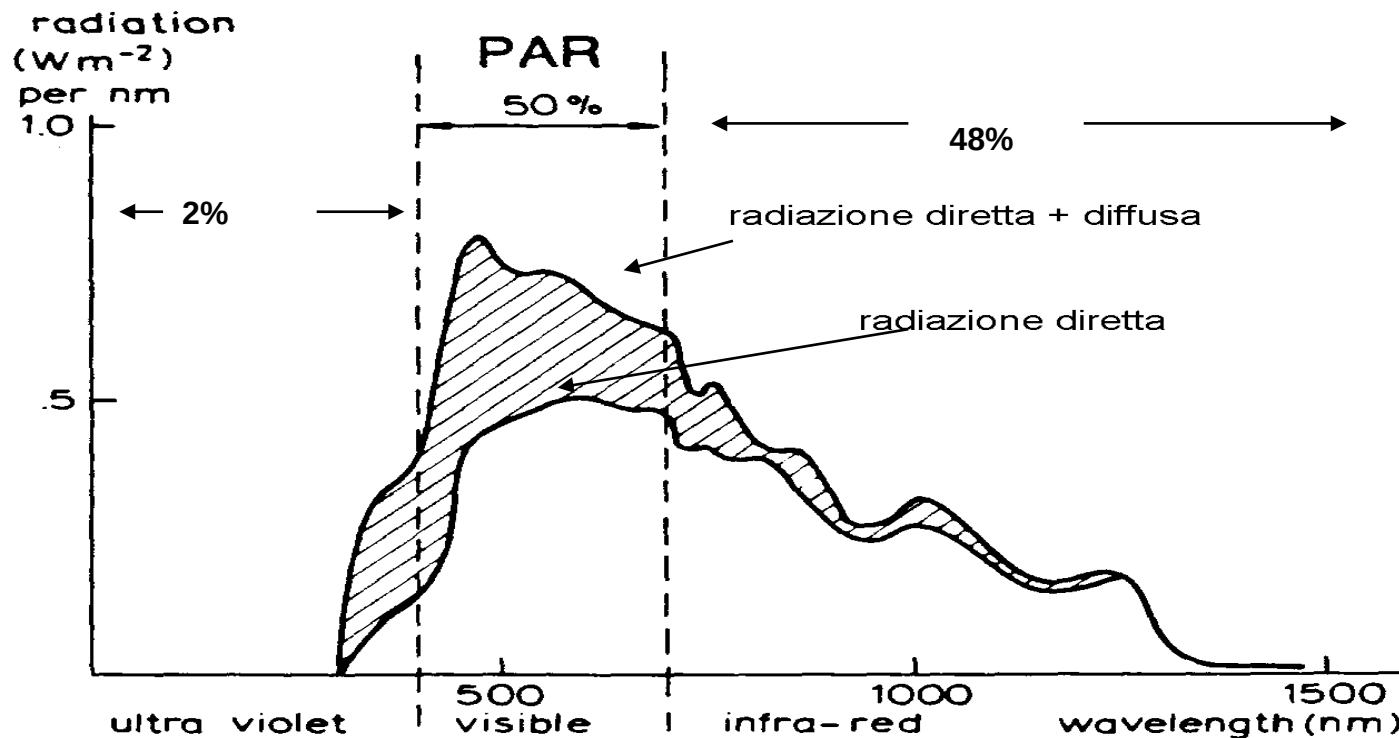
- intensità di flusso
- composizione spettrale
- radiazione fotosinteticamente attiva (PAR)
- illuminazione

UNITÀ DI MISURA

- flusso: $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (o $\text{KJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) o watt m^{-2} o $\text{cal cm}^2 \text{d}^{-1}$
- fotometria: micromoli di fotoni $\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ($\mu\text{Einstein s}^{-1} \text{m}^{-2}$)
- illuminazione: lux, basati sulla sensibilità dell'occhio umano

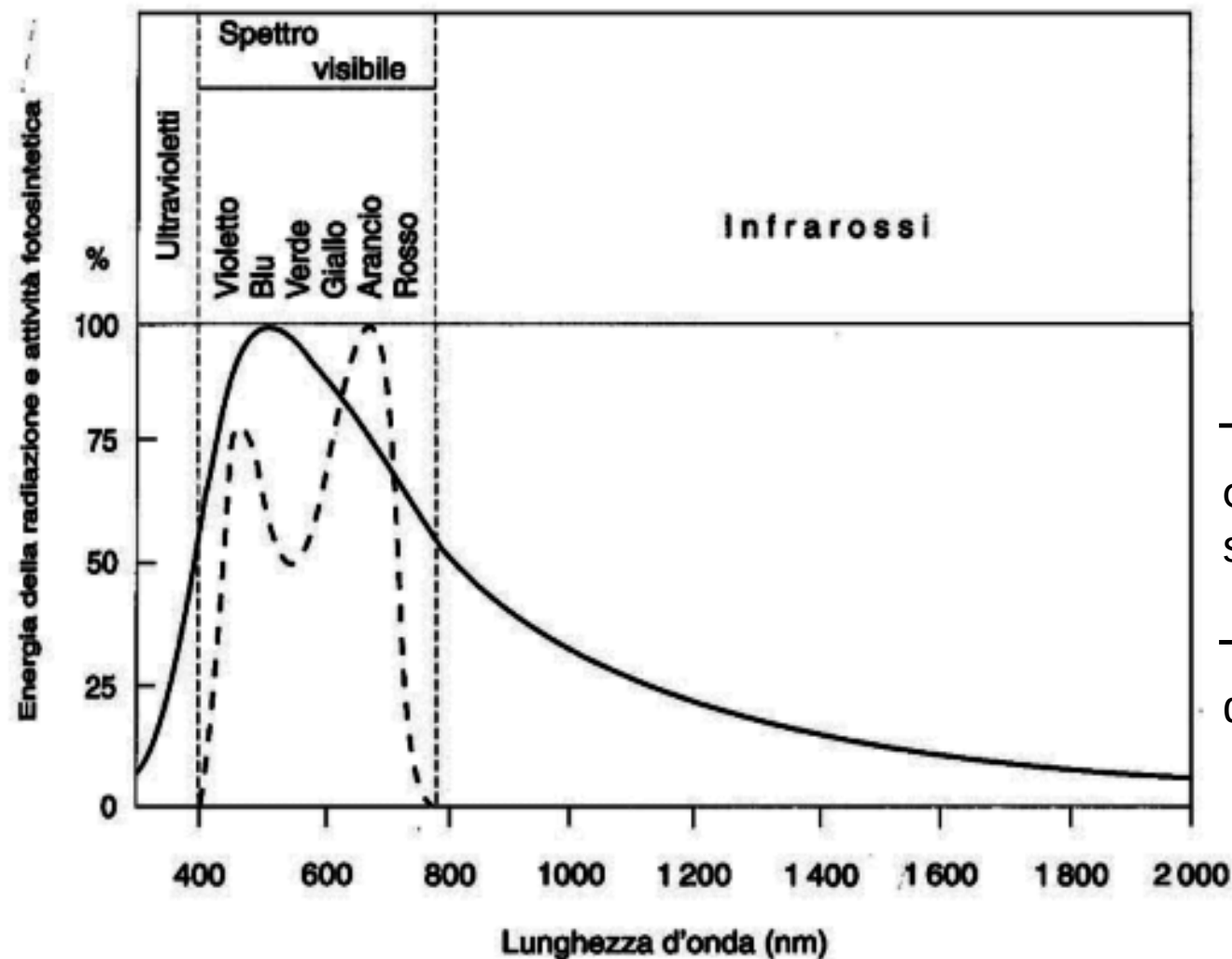


COMPOSIZIONE SPETTRALE DELLA RADIAZIONE



- PAR: radiazione fotosinteticamente attiva (fotosintesi e calore) da 400 a 700 nm
- Infrarosso (IR) >700 nm, radiazione termica (48% radiazione totale)
- Ultravioletto: da 230 a 400 nm, poco importante (2% radiazione totale)

COMPOSIZIONE SPETTRALE DELLA RADIAZIONE



— Distribuzione dell'energia nello spettro solare

- - - Attività fotosintetica del frumento

BILANCIO DELLA RADIAZIONE

COSTANTE SOLARE: All'esterno dell'atmosfera la radiazione ricevuta da un piano perpendicolare ai raggi incidenti è di 1400 W m^{-2} , pressoché costante (variazione 1-5%).

RADIAZIONE GLOBALE (R_g): Della radiazione extra-atmosferica, circa il 49% raggiunge la superficie del suolo; il resto viene assorbita o riflessa all'esterno dall'atmosfera (nubi, pulviscolo, vapore acqueo).

RADIAZIONE DIRETTA: Il 24% della Radiazione Globale arriva direttamente al suolo.

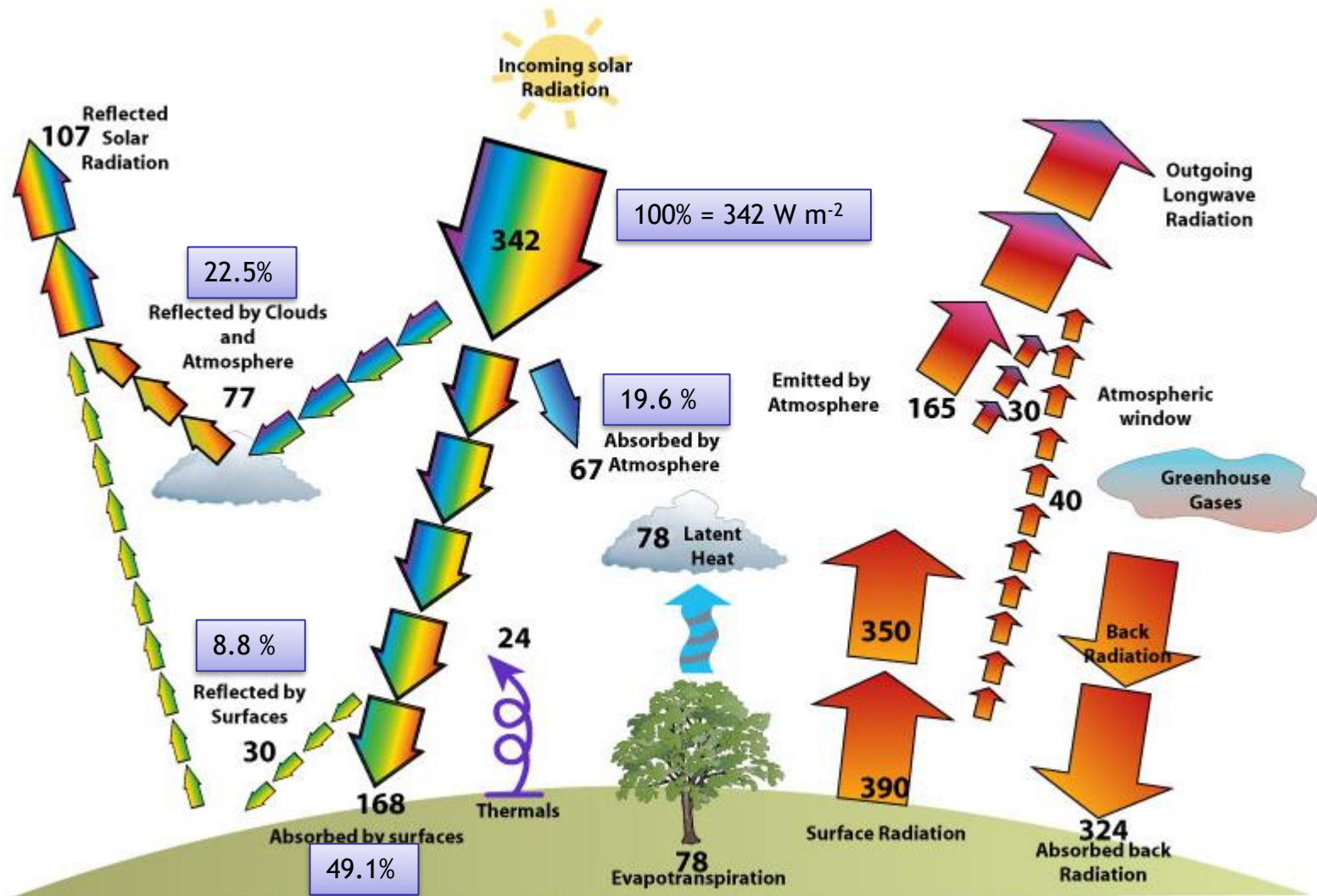
RADIAZIONE DIFFUSA: Un altro 23% arriva al suolo diffuso da nubi, pulviscolo, vapore acqueo; arriva quindi senza una direzione prevalente.

ALBEDO (α): Parte della radiazione globale in arrivo viene riflessa direttamente (e quindi non utilizzata).

- albedo neve 95%
- albedo deserto 30%
- albedo vegetazione 25% (circa 10% PAR)
- albedo terreno scuro 10%
- albedo acqua 5%



BILANCIO DELLA RADIAZIONE



RADIAZIONE NETTA

EMISSIONE DI SUOLO E ATMOSFERA

- Suolo e atmosfera hanno a loro volta una emissione di radiazione, dipendente dalla temperatura, nell'infrarosso a onda lunga (3000-10000 nm). Quella dell'atmosfera è riemessa verso il suolo (effetto serra).

BILANCIO RADIATIVO

- La radiazione netta (R_n) che costituisce l'effettivo apporto energetico al suolo, è dato da:

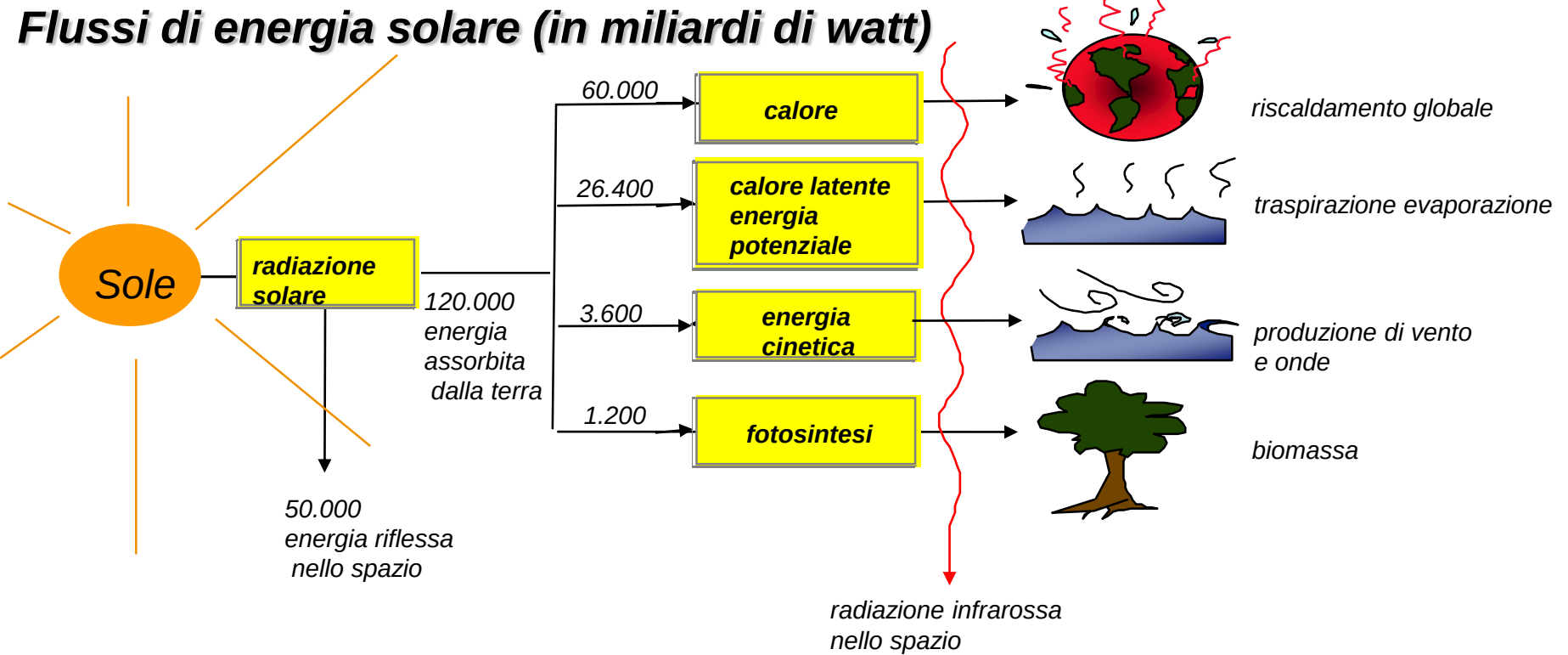
$$R_n = R_g(1-\alpha) + R_a - R_s$$

R_g = radiazione globale; R_a = radiazione che giunge dall'atmosfera; R_s = radiazione emessa dal suolo (vegetazione, terreno nudo e acqua); α =albedo.

- Il bilancio per l'intera terra è in pari; è positivo durante il giorno e negativo durante la notte.
- Le diverse parti della terra hanno bilanci differenti, da cui differenze di temperature, circolazione di masse d'aria, effetti sulla meteorologia.
- Senza atmosfera il suolo riemetterebbe più radiazione di quanto ne ha assorbita durante il giorno; in notti molto terse il pericolo di gelate per irraggiamento è maggiore (ridotto effetto serra da parte dell'atmosfera).



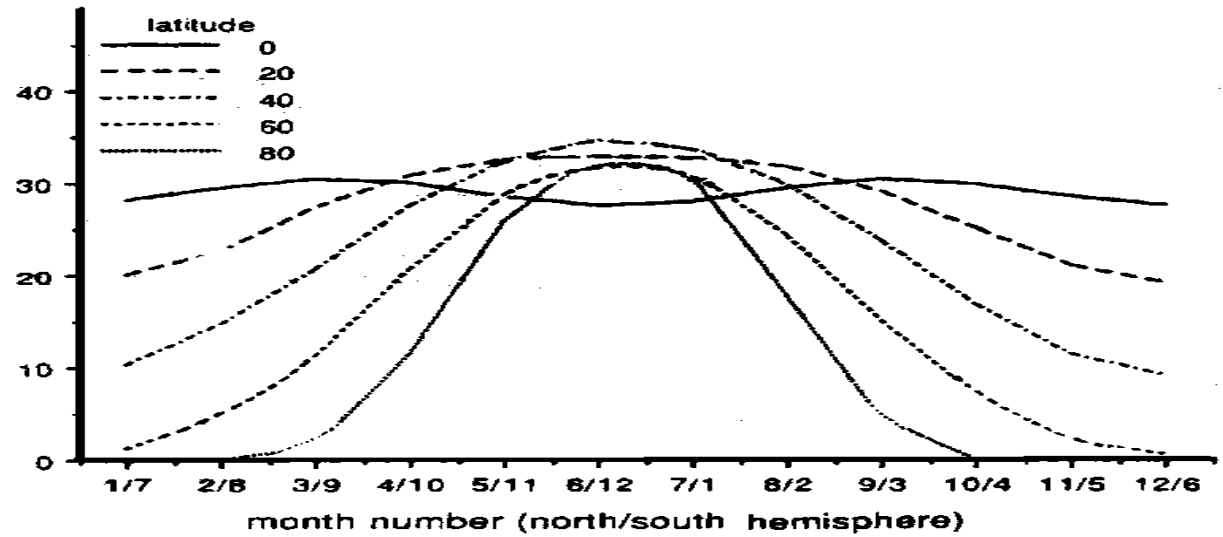
BILANCIO DELLA RADIAZIONE



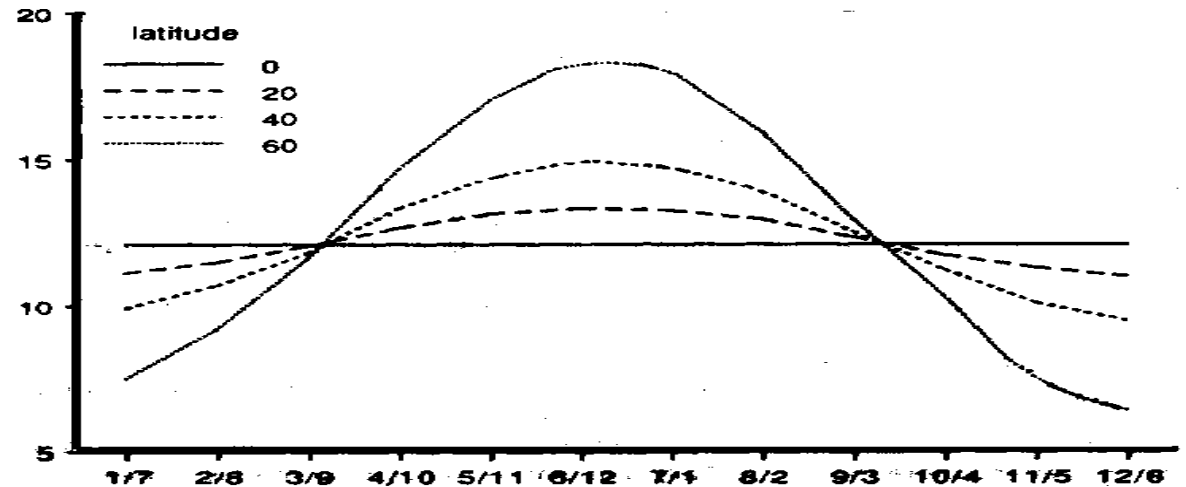
Anche se la fotosintesi riesce ad assorbire solo l'1% dell'energia solare che arriva sul Pianeta, riesce ad assorbire una quantità di energia pari a 9 volte il consumo energetico di tutti gli abitanti della Terra. Vale a dire che circa il 10% dei vegetali prodotti della fotosintesi, se utilizzati per produrre energia, basterebbero a soddisfare il fabbisogno energetico di tutta la popolazione mondiale.

DURATA DEL GIORNO

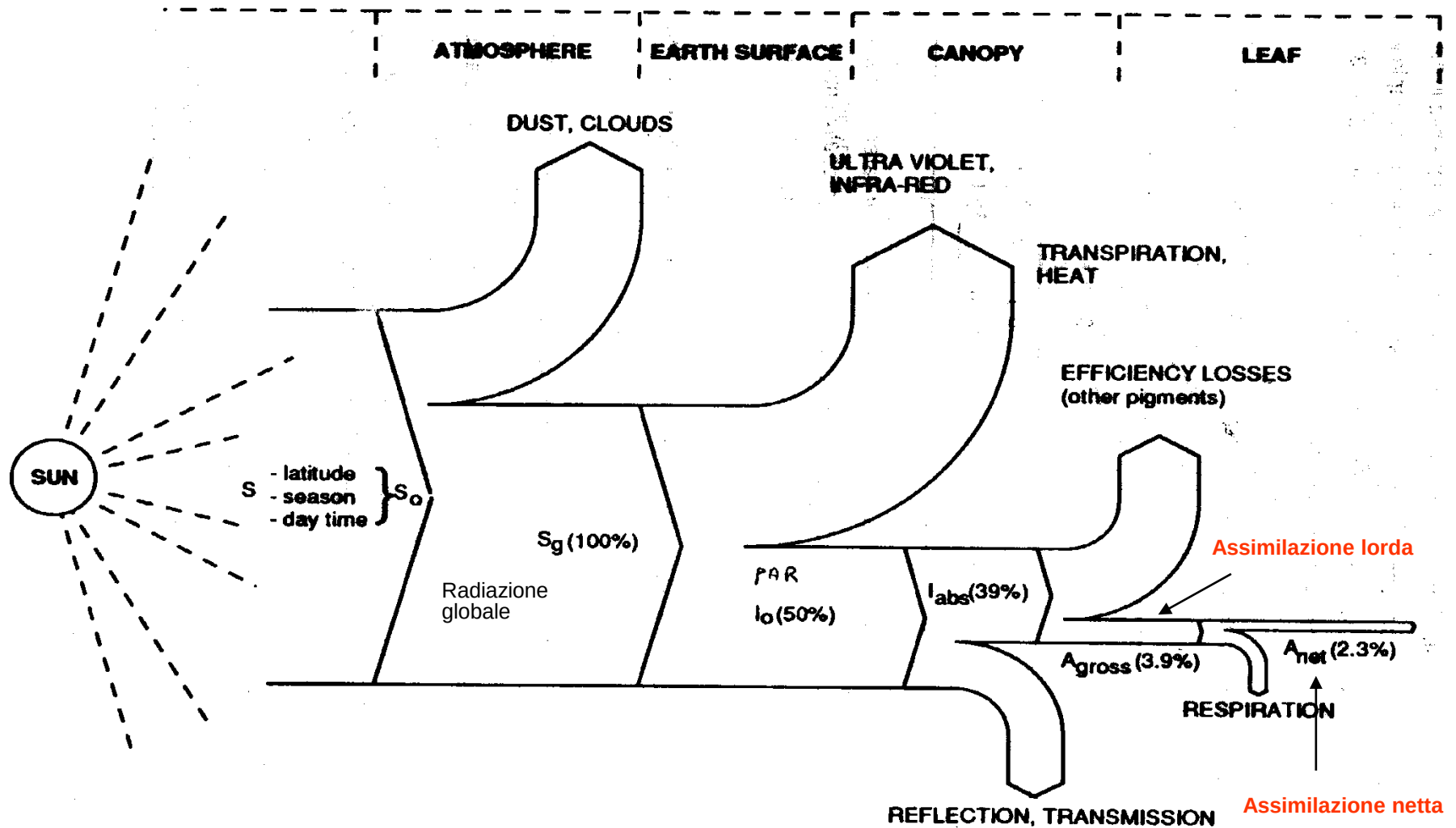
Rglob
[MJ m⁻² d⁻¹]



day length
[h]



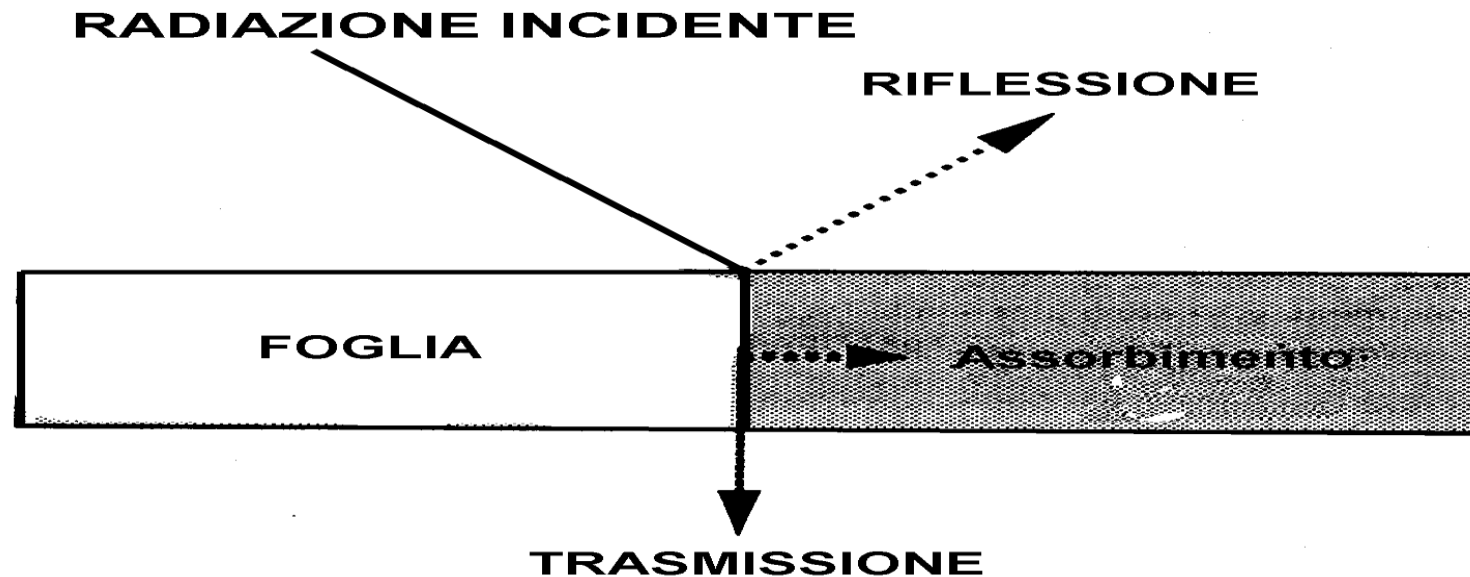
UTILIZZO DELLA RADIAZIONE



UTILIZZO DELLA RADIAZIONE: FOGLIA

A livello della foglia

- Riflessione: mediamente una foglia riflette il 10% della radiazione incidente.
- Trasmissione: mediamente il 10%, ma può variare tra 0 (foglie spesse) e 40% (in foglie molto sottili).
- Assorbimento = $100 - \text{riflessione (10\%)} - \text{trasmissione (10\%)}$ -> (80% in media).



UTILIZZO DELLA RADIAZIONE: COLTURA

Nell'ipotesi di una coltura con 3 strati di foglie, completamente ricoprenti il terreno, orizzontali e con trasmissività e riflessione del 10%

	Par incidente w m-2	PAR riflessa	PAR trasmessa	PAR assorbita
strato 1	200	20	20	160
strato 2	20	2	2	16
strato 3	2	0.2	0.2	1.6
suolo	0.1	trascurabili		
Totale				177.6
%				88.8

Nell'ipotesi di una coltura misurazioni ripetute e complesse considerazioni matematiche hanno dimostrato che:

$$I_d = I_0 * e^{-k * LAI_d},$$

I_d = PAR alla profondità d ; I_0 = PAR incidente; k = coefficiente di estinzione; LAI = Leaf Area Index (superficie di foglie (al livello d)/superficie del terreno su cui le foglie insistono)

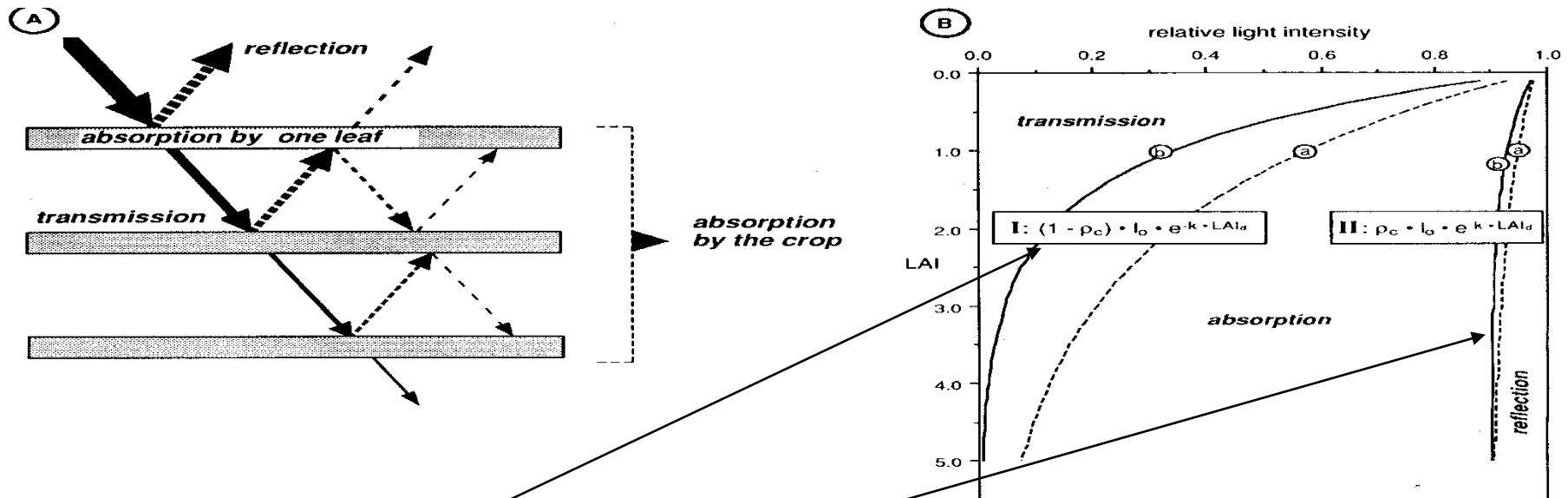
Cioè che la radiazione si attenua esponenzialmente all'intero di una coltura, secondo la quantità di foglie presente dall'altezza massima alla profondità considerata, secondo un coefficiente di estinzione k che nel caso di angolo di inserzione delle foglie distribuito casualmente (distribuzione sferica) vale 0,7. Nel riso, con foglie "verticali" vale 0.35..



UTILIZZO DELLA RADIAZIONE: COLTURA

Si deve infine considerare che la luce riflessa dalle foglie direttamente verso l'esterno della coltura è persa; la formula diviene allora:

$$I_d = (1 - \alpha) I_0 \cdot e^{-k \cdot LAI_d}$$



I=curva di PAR trasmessa; **II** = curva di PAR Riflessa; l'area tra le 2 curve rappresenta la PAR assorbita; a e b = 2 valori di K coefficiente di estinzione della radiazione
coefficiente di riflessione = 0,08

UTILIZZO DELLA RADIAZIONE: C3 e C4

- **PIANTE C3:** maggiore fotorespirazione, cloroplasti solo nel mesofillo
- **PIANTE C4:** minore fotorespirazione fotosintesi netta maggiore (ad alte T e Radiazioni); cloroplasti di due tipi nel mesofillo e nelle guaine
- C4 miglior conversione di C3 a alta T e Radiazione
- C3 miglior conversione C4 a bassa T e radiazione

(<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e24/24b.htm>)

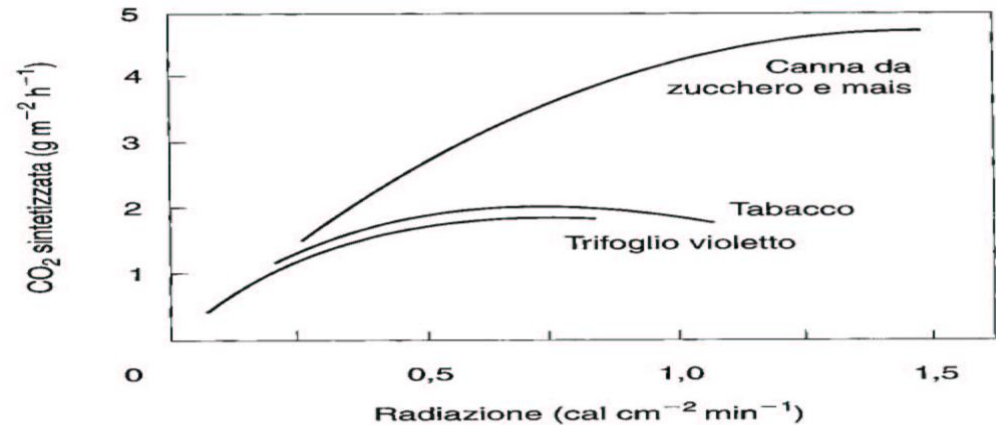


Fig. 2.4 Assorbimento della CO₂ in funzione dell'intensità di radiazione.

- A = temperatura ottimale e atmosfera arricchita di CO₂
B = bassa temperatura e atmosfera arricchita
C = temperatura ottimale e atmosfera normale

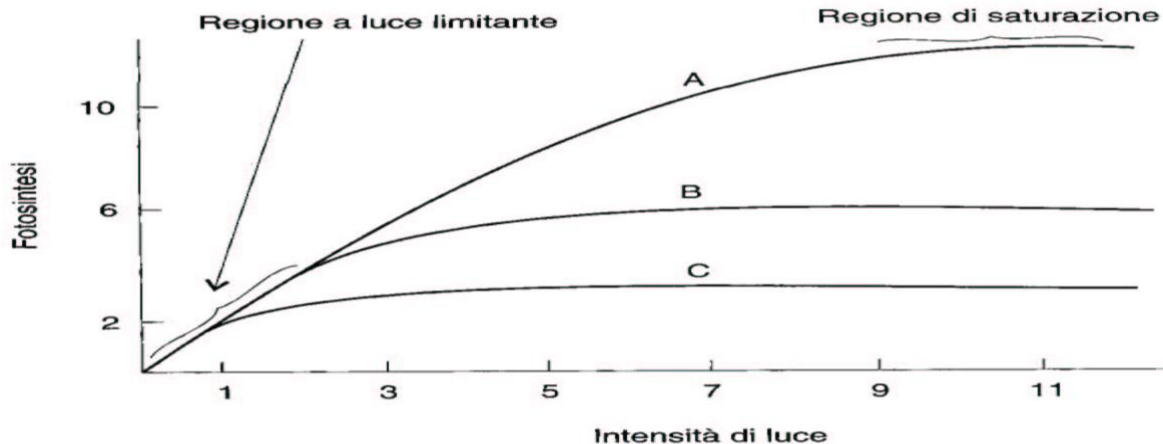


Fig. 2.5 Influenza dell'intensità di luce, della temperatura e della concentrazione di CO₂ sull'attività fotosintetica.



UTILIZZO DELLA RADIAZIONE: FOTOSINTESI

FOTOSINTESI

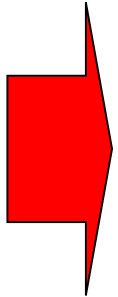
- CONVERSIONE ENERGIA LUMINOSA IN ENERGIA CHIMICA (DI LEGAME)

EFFICIENZA DELLA CONVERSIONE DELLA RADIAZIONE PAR ASSORBITA

- 5% (lordo) IN PIANTE C3 (grano, erba medica,...)
- 7.5% (lordo) PIANTE C4 (mais, sorgo,...)

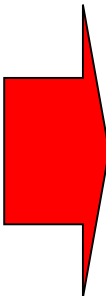
L'EFFICIENZA VARIA IN FUNZIONE DI:

1. INTENSITA' DI LUCE (fig. 2.4 e 2.5)
2. TEMPERATURA (25° C)
3. CONCENTRAZIONE CO₂ (fig. 2.5)
4. STRUTTURA DELLA FOGLIA (es. cloroplasti su 2 strati in C4)
5. TRASLOCAZIONE E ACCUMULO (feedback negativo dei sink – non si allontanano i fotosintetati)
6. RESPIRAZIONE (anche in questo le C4 sono più efficienti)
7. NUTRIZIONE MINERALE E IDRICA (cicli + lunghi)
8. ARCHITETTURA FOGLIARE (foglie erette= fig. 2.7)



UTILIZZO DELLA RADIAZIONE: FOTOSINTESI

INTERVENTI POSSIBILI:

- 
- SCELTA CULTIVAR
 - TECNICHE PER MIGLIORARE LA NUTRIZIONE
 - IRRIGAZIONE
 - LAVORAZIONI
 - CONCIMAZIONI
 - ...
 - EPOCA DI SEMINA (anticipare quanto possibile)
 - RIDUZIONE TRASPIRAZIONE (FRANGIVENTO)
 - MIGLIORARE INTERCETTAZIONE (DENSITA' DI SEMINA, ORIENTAMENTO FILE (N-S), DISPOSIZIONE EQUIDISTANTE,.....)
 - CONSOCIAZIONE TEMPORANEA (**mais+pioppo**)



UTILIZZO DELLA RADIAZIONE: orientamento foglie

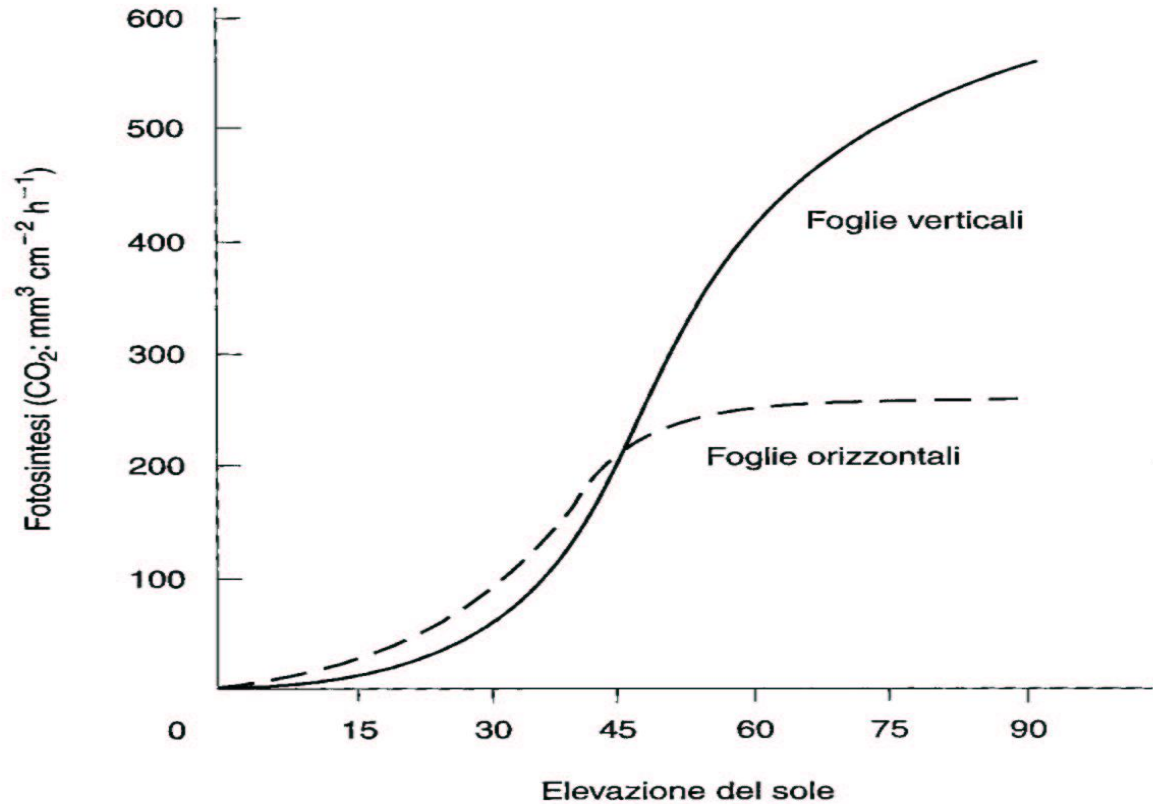


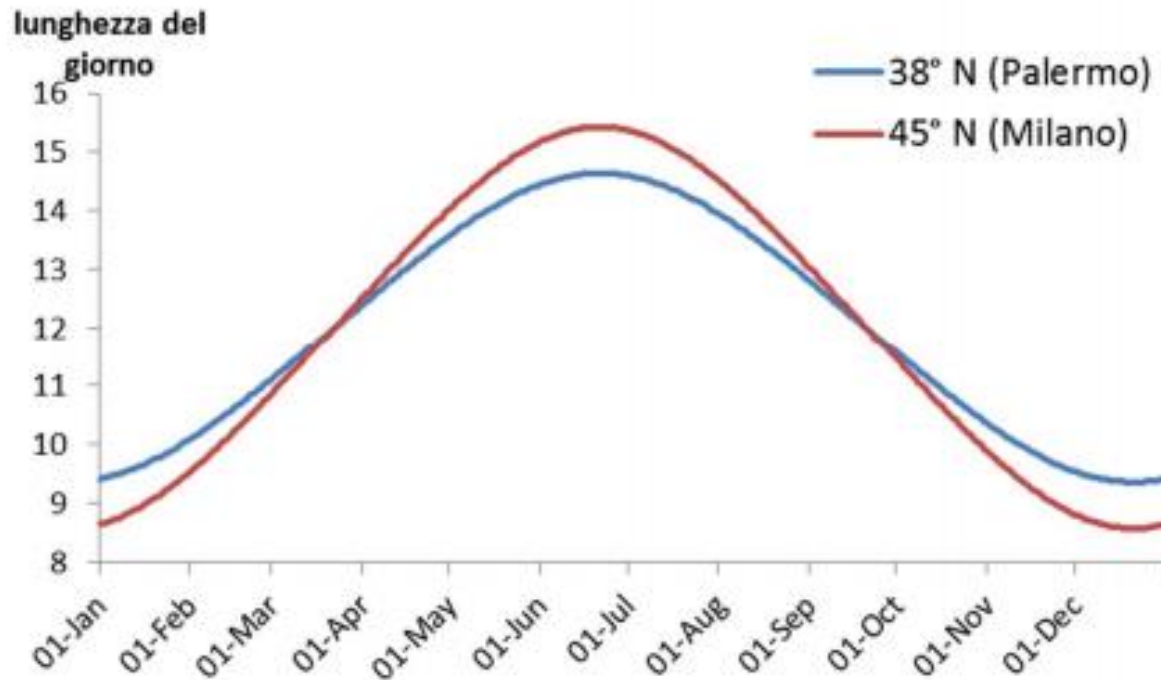
Fig. 2.7 Fotosintesi in piante con foglie ad architettura verticale e orizzontale (da WILLIAMS, 1975).

FOTOPERIODISMO

Risposta fisiologica delle piante alla durata del giorno.

- **epoca di fioritura (la più importante)**
- dormienza invernale gemme
- caduta foglie
- formazione organi di riserva

Soglia critica di 12-14 ore per
entrambe le tipologie



FOTOPERIODISMO

Risposta fisiologica delle piante alla durata del giorno.

- **epoca di fioritura (la più importante)**
- dormienza invernale gemme
- caduta foglie
- formazione organi di riserva

Soglia critica di 12-14 ore per
entrambe le tipologie

Piante **brevidiurne** fioriscono
con fotoperiodo inferiore a una
soglia critica



Piante di origine tropicale o subtropicale:

mais	soia
tabacco	patata
sorgo	cotone

Piante **longidiurne** fioriscono
con fotoperiodo superiore a
una soglia critica



Piante di latitudini medie e elevate:

frumento	fava
bietola	cipolla
trifoglio pratense	fleolo

Piante **neutrodiurne**



Piante in origine brevidiurne, in seguito a
selezione artificiale o naturale

mais	soia
tabacco	fagiolo
riso	



FOTOPERIODISMO: conseguenze agronomiche

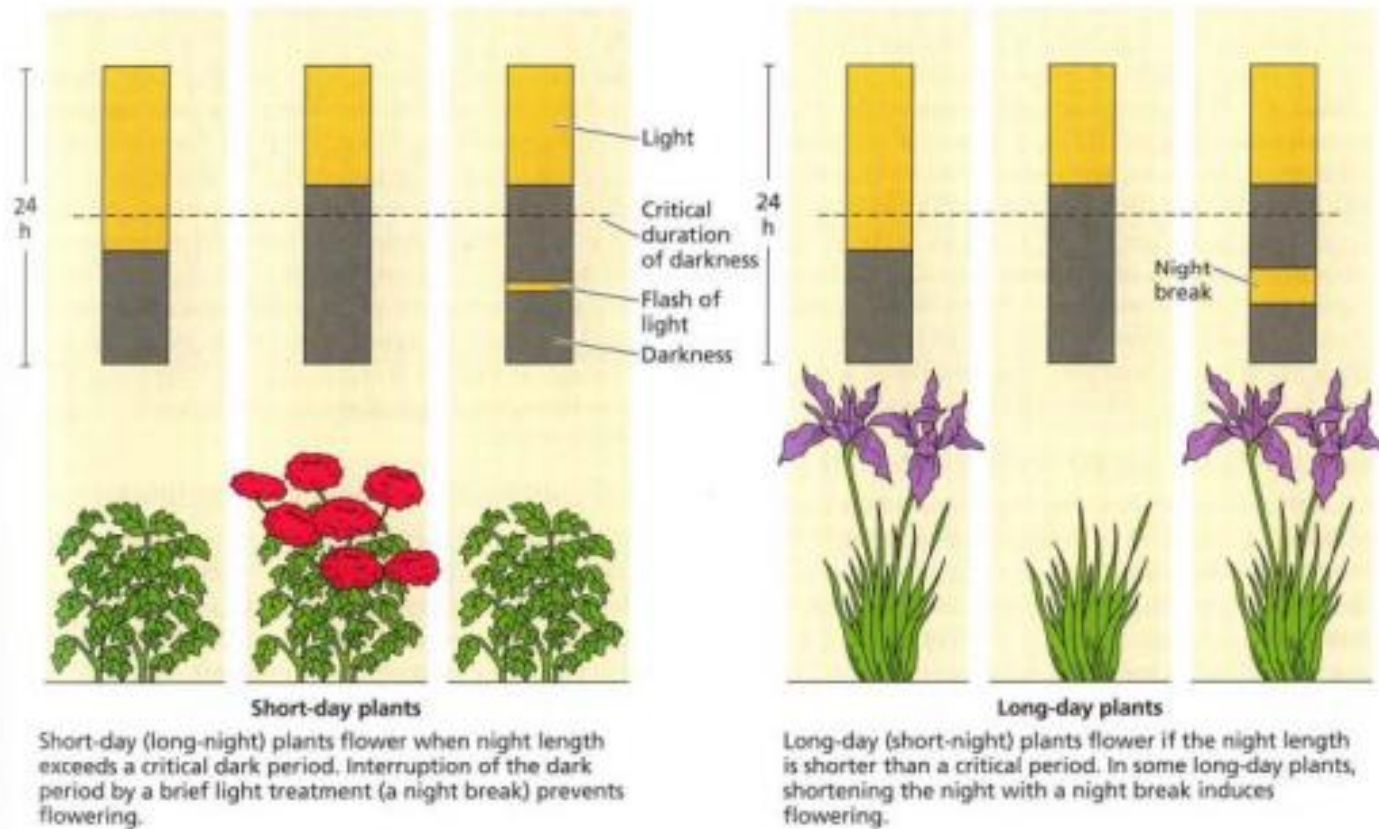
- spostamento piante al di fuori dell'areale di origine: le piante o non fioriscono o allungano troppo il ciclo vegetativo;
- necessità di miglioramento genetico per ridurre la sensibilità al fotoperiodo;
- alcune floricole: accorciamento giorno in estate per il crisantemo, illuminazione continua per astro della Cina.

Per l'interruzione dell'oscurità bastano illuminazioni modestissime o solo lampi di luce

- forzatura in serra di colture fuori stagione;
- diverse generazioni all'anno, per miglioramento genetico;
- forse spiega il supposto effetto della luna.



FOTOPERIODISMO



ANALISI DI CRESCITA

Lo studio dell'accrescimento delle piante è uno dei mezzi di indagine a disposizione per valutare gli effetti dei diversi fattori agro-ambientali. Le variazioni di resa riscontrabili in diversi ambienti per una specie e per la stessa varietà possono in parte essere spiegati tramite l'analisi dell'accrescimento.

I risultati possono dare utili indicazioni per migliorare gli interventi agronomici e per fornire dati per lavori di miglioramento genetico.

Per la definizione della dinamica della crescita delle colture e in relazione alla capacità di utilizzazione della radiazione si definiscono alcuni indici, che derivano da 2 grandezze di base:

- superficie assimilatoria
- peso secco della pianta

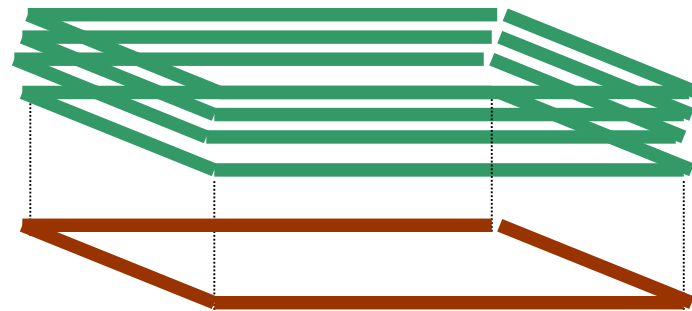
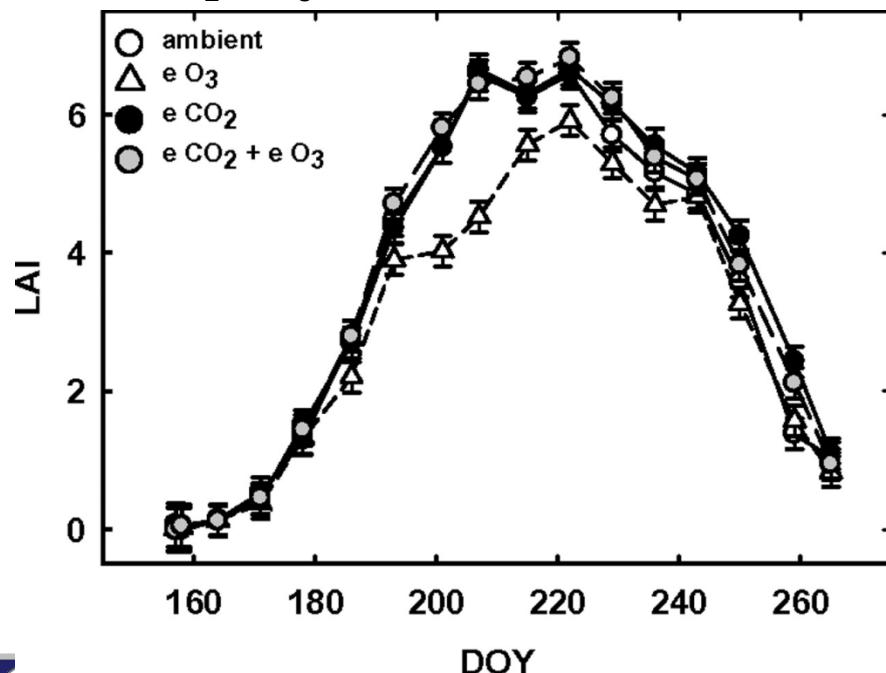
Gli indici possono essere riferiti alla pianta o alla coltura (riferimento all'unità di superficie)

- **LAI:** leaf area index: rapporto tra la superficie fogliare e superficie di terreno: $\text{m}^2 \text{ foglie} * \text{m}^{-2} \text{ terreno}$. Il terreno appare completamente coperto quando il LAI vale 3; il mais in condizioni ottimali raggiunge LAI di 6 – 7.
- **GAI:** green area index, comprende tutte le superfici assimilatorie verdi: rapporto tra la superficie fogliare verde e superficie di terreno.
- **LAD:** leaf area duration: integrale della curva del LAI in funzione del tempo espresso in GIORNI. (n di giorni con LAI unitario). Utile per il confronto tra specie diverse.



ANALISI DI CRESCITA

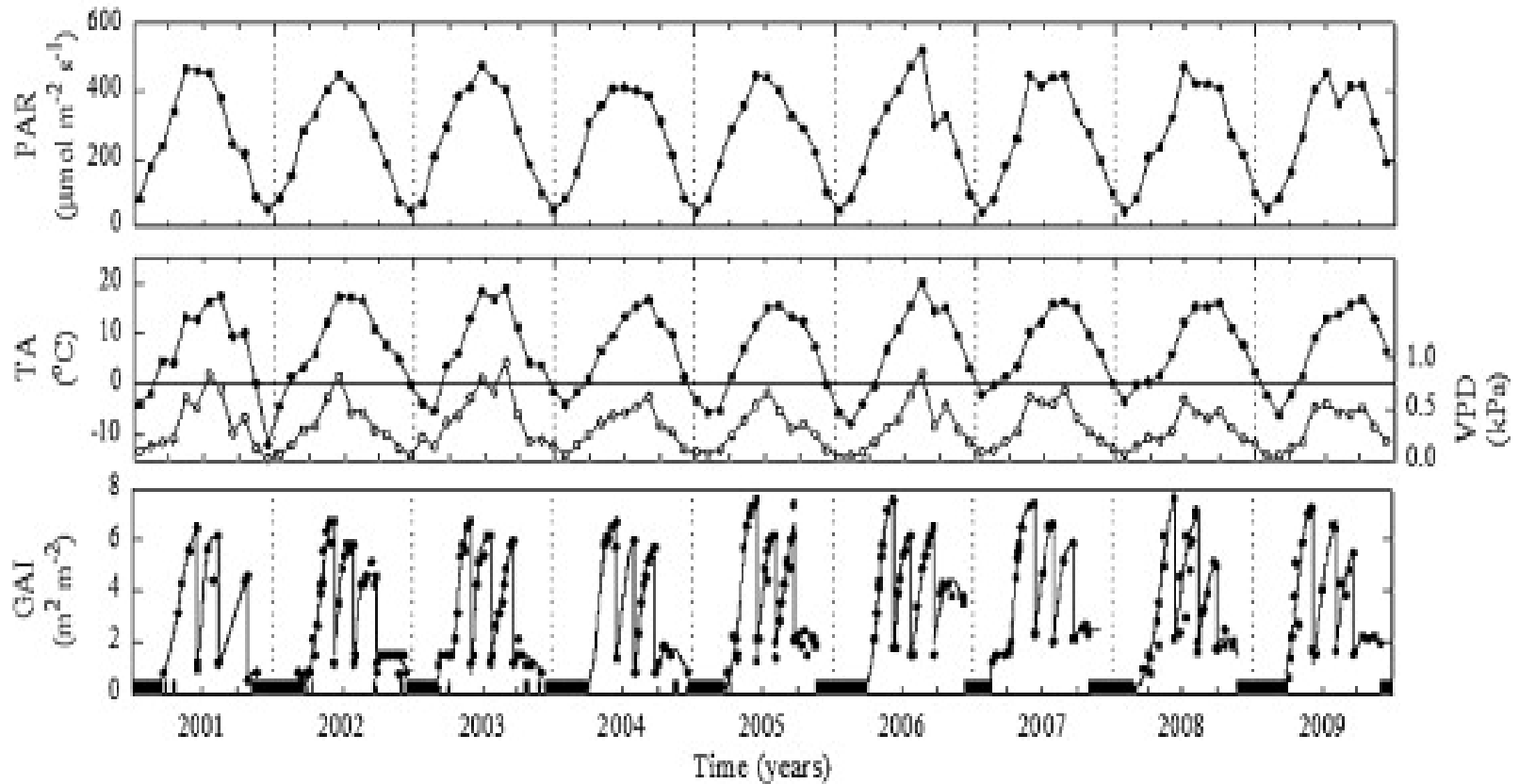
LAI di soia con differenti concentrazioni di CO₂ e O₃ (Gray et al., 2010)



LAI = 4 (4 m² di foglie per m² di terreno)

$$\text{LAI} = \text{m}^2 \text{ foglie} / \text{m}^2 \text{ terreno}$$
$$\text{LAD} = ((\text{LAI}_2 + \text{LAI}_1) / 2) \times (T_2 - T_1)$$

ANALISI DI CRESCITA



GAI per un prato sfalciato 3 volte l'anno (Brilli et al., 2011)

ANALISI DI CRESCITA

CGR: crop growth rate: incremento di peso secco per unità di area del suolo e unità di tempo.

$$CGR = \frac{W_2 - W_1}{(t_2 - t_1)}$$

W_1 = peso secco al momento t_1 (g m^{-2}); W_2 = peso secco al momento t_2

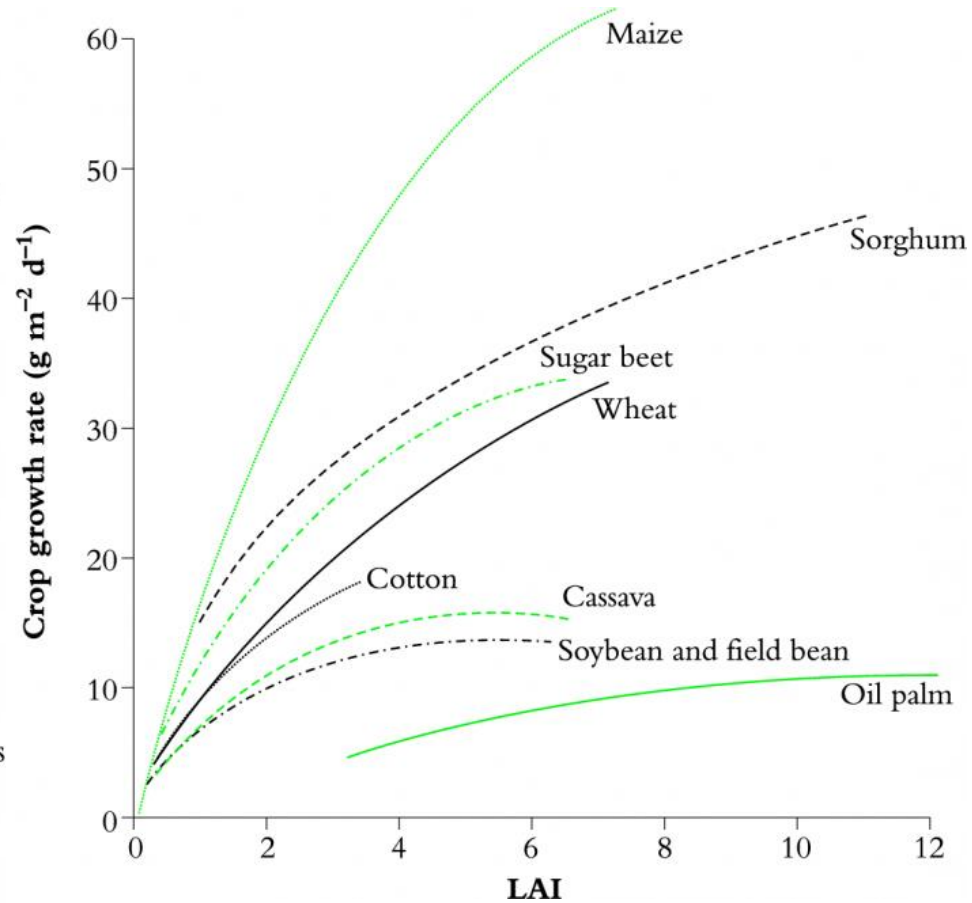
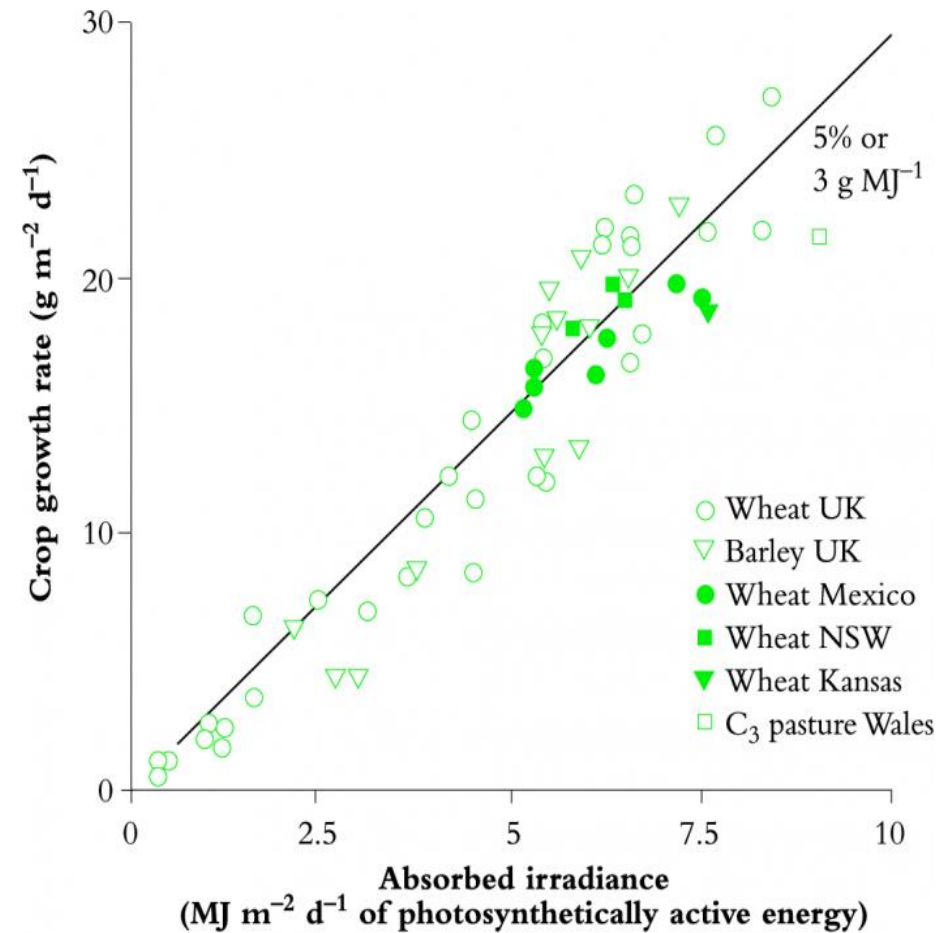
Espresso in **$\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$** o in **$\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$** .

Quantifica la capacità della coltura a produrre materiale vegetale

Da un punto di vista funzionale $CGR = \delta W / \delta t$



ANALISI DI CRESCITA



da Brian et al., 1999



ANALISI DI CRESCITA

NAR: net assimilation rate: è il come il CGR, ma rapportato alla superficie fogliare, esprime la capacità assimilatoria di un'unità di superficie di foglia. Usualmente si assume come valore di superficie fogliare quello medio tra t_1 e t_2 ($NAR = CGR/LAI$)

$$NAR = \frac{W_2 - W_1}{(t_2 - t_1)} * \left(\frac{2}{L_1 + L_2} \right)$$

SLA: specific leaf area: peso secco dell'unità di superficie fogliare $m^2 kg^{-1}$. Caratterizza la tipologia di foglie delle diverse specie ne quantifica l'eventuale variazione nel ciclo vegetativo

RGR: relative growth rate: capacità della sostanza secca di produrre nuova sostanza secca: $g g^{-1}$ di s.s t^{-1} . E' la derivata dell'andamento della sostanza secca rispetto al tempo. I logaritmi derivano dal fatto che l'RGR è come un tasso di interesse bancario

$$RGR = \frac{\ln(W_2) - \ln(W_1)}{t_2 - t_1}$$



ANALISI DI CRESCITA

Rapporti

(proporzioni della pianta, ripartizione degli assimilati):

LWR (leaf weight ratio) = fogliosità

LW/W peso secco delle foglie (LW) su peso secco totale biomassa epigea (W)

StWR (stem weight ratio) = “stelosità”

StW/W

SeWR (seed weight ratio)

SeW/W - spesso è confuso con l'HI (che si usa di più)

HI (Harvest Index) = indice di raccolto: rapporto percentuale tra il peso del prodotto utile e l'intera biomassa aerea della pianta. Indice molto utile, sia a livello genetico (ad esempio nel grano si è passati dallo 0.2 del 1920 allo 0.5 attuale) sia come diagnostica



Domande

- 1) PAR: definizione e spettro di attività.
- 2) Albedo: definizione e intervallo di valori di riferimento.
- 3) Qual è l'intervallo percentuale di trasmissività della radiazione incidente e da cosa dipende.
- 4) In quali condizioni la fotosintesi netta delle piante C3 è maggiore di quella delle piante C4?
- 5) Importanza dell'orientamento delle foglie per l'utilizzo della radiazione incidente.
- 6) Come si classificano le piante in base al fotoperiodismo: indicare qualche esempio.
- 7) Definire il LAI, indicare quando viene utilizzato e alcuni valori indicativi.
- 8) HI definizione, come si calcola e un valore indicativo.

