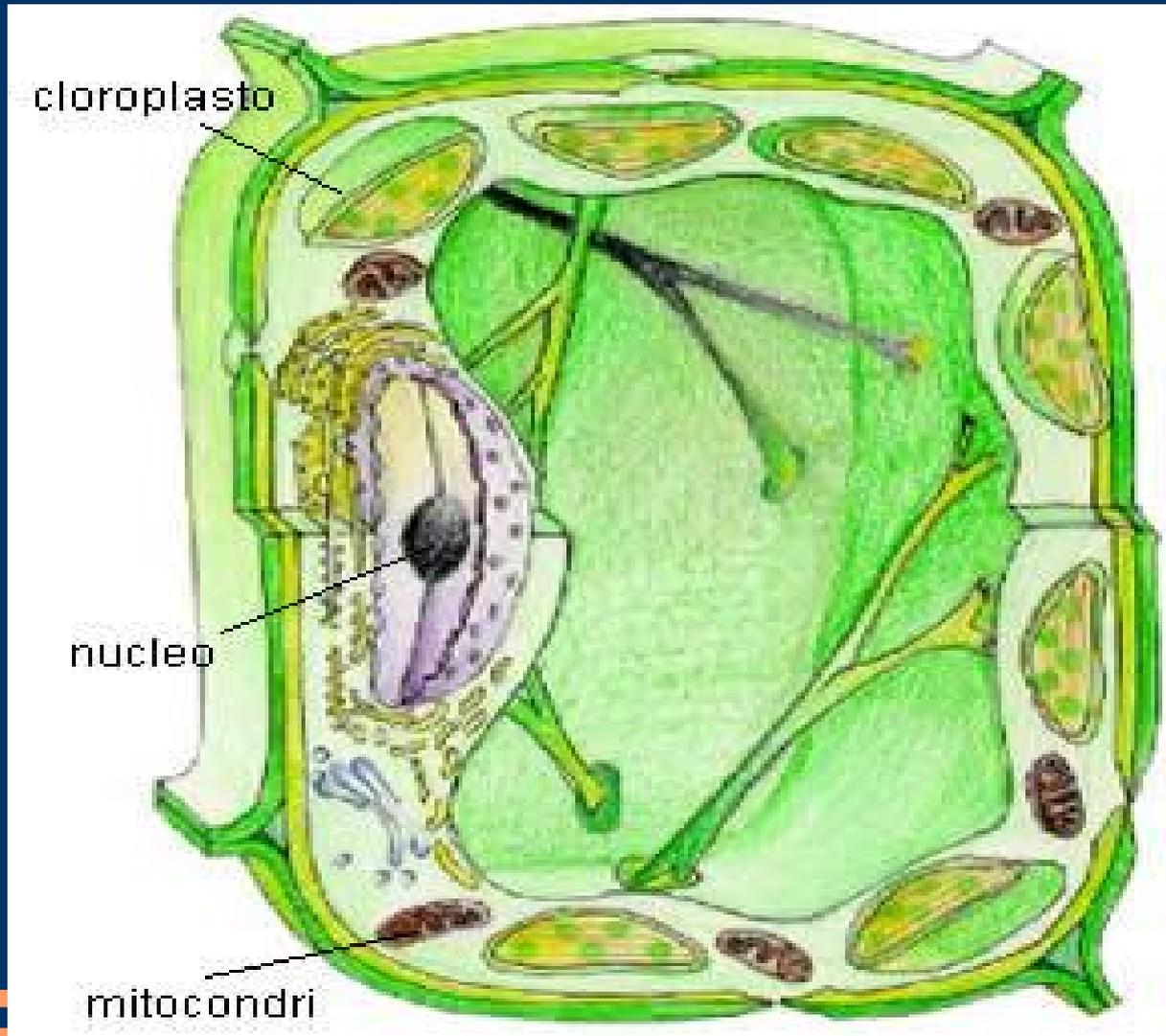


fotosintesi

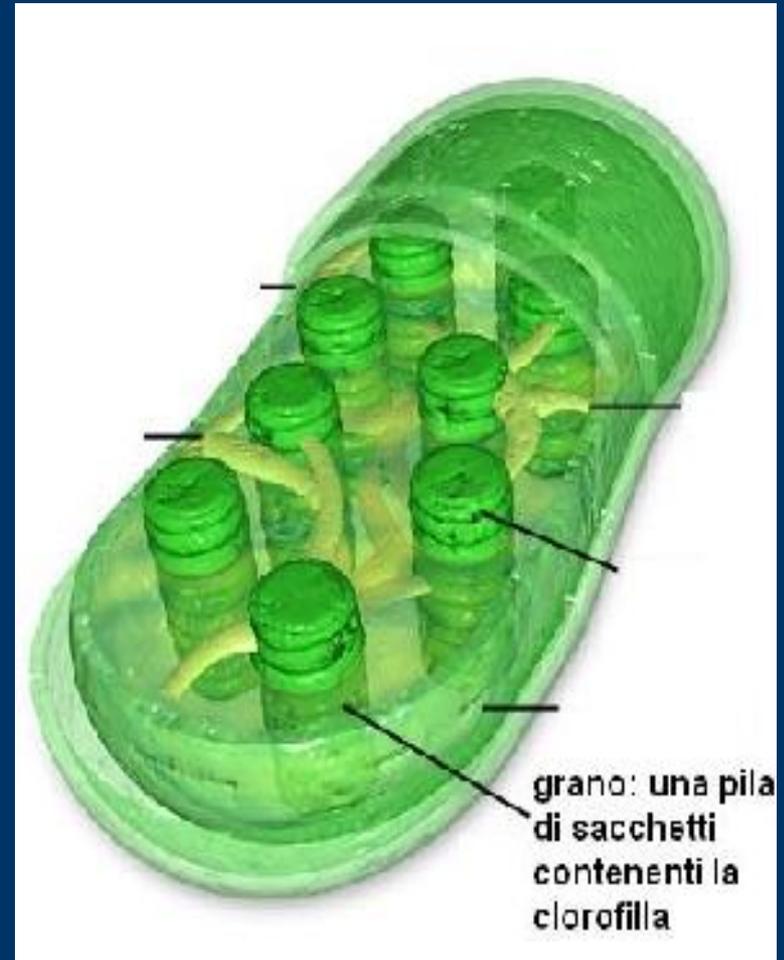
Trasferimento dell' energia solare
negli organismi viventi

Cellula vegetale



- **delimitati da membrane** che racchiudono una matrice chiamata **stroma**.
- Nello stroma vi è un sistema di lamine appiattite dette lamelle o **tilacoidi** intercomunicanti.
- I tilacoidi formano strutture colonnari dette **grana**
- I pigmenti fotosintetici (clorofilla e carotenoidi) si trovano nelle membrane dei tilacoidi.
- Nello stroma è presente **DNA**, da cui deriva la capacità dei cloroplasti di riprodursi

cloroplasti



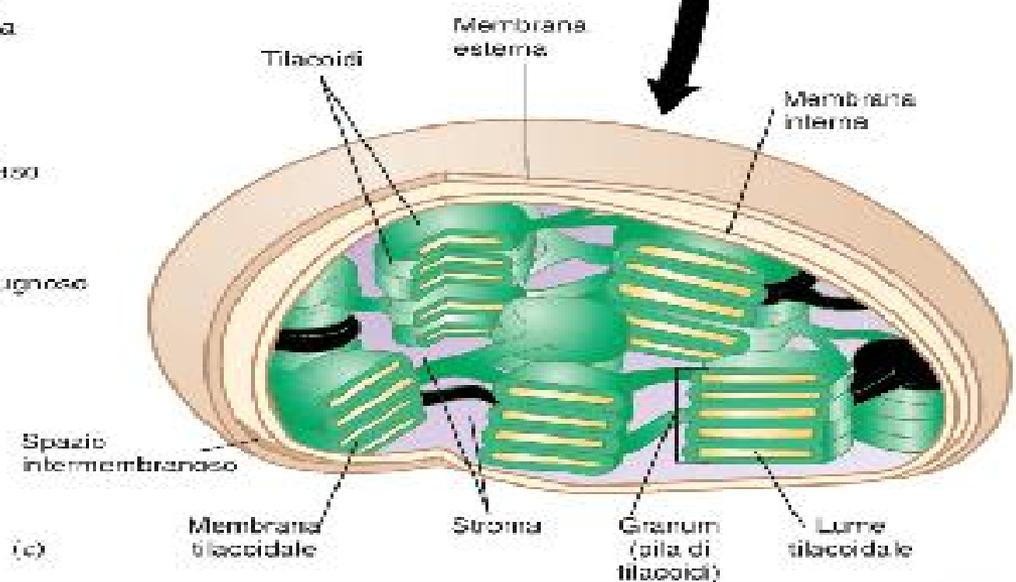
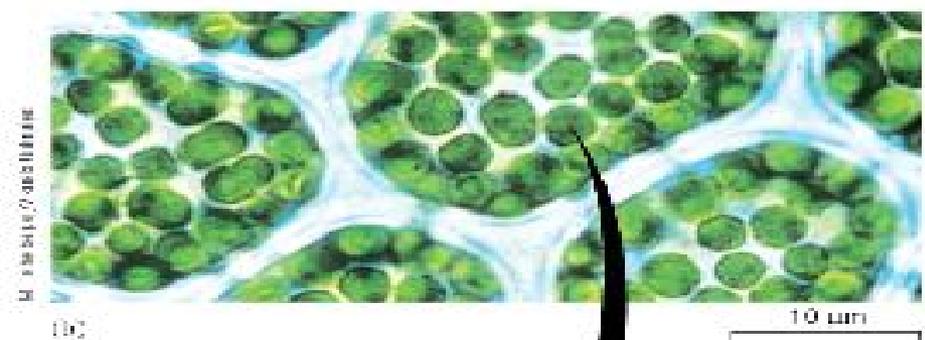
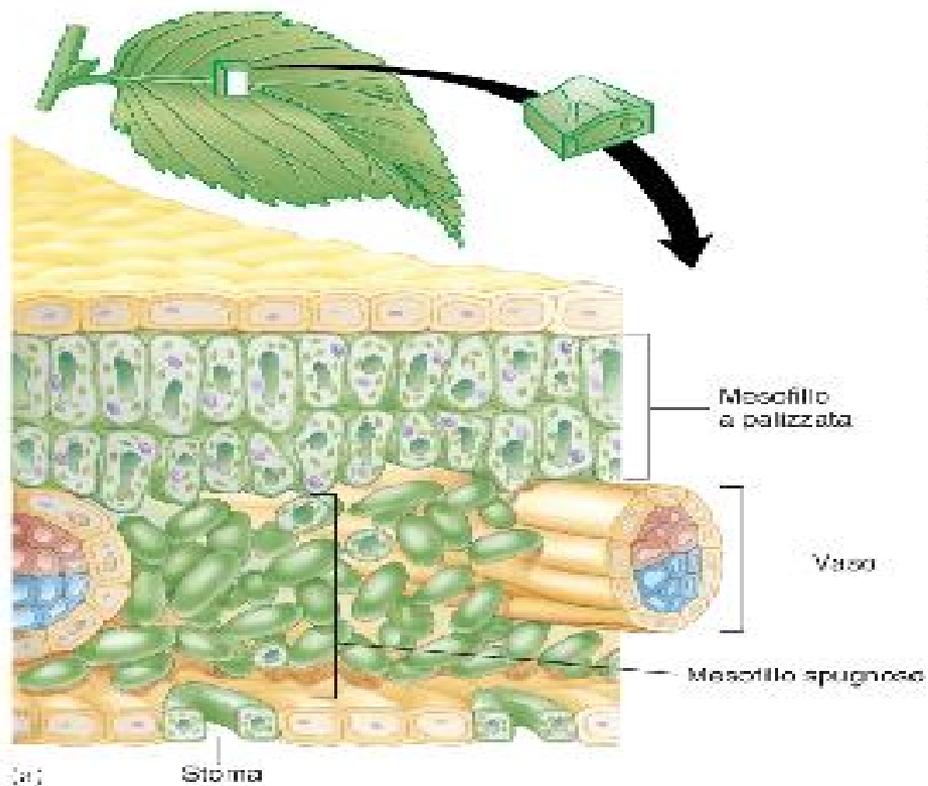


FIGURA 8-4 I siti della fotosintesi.

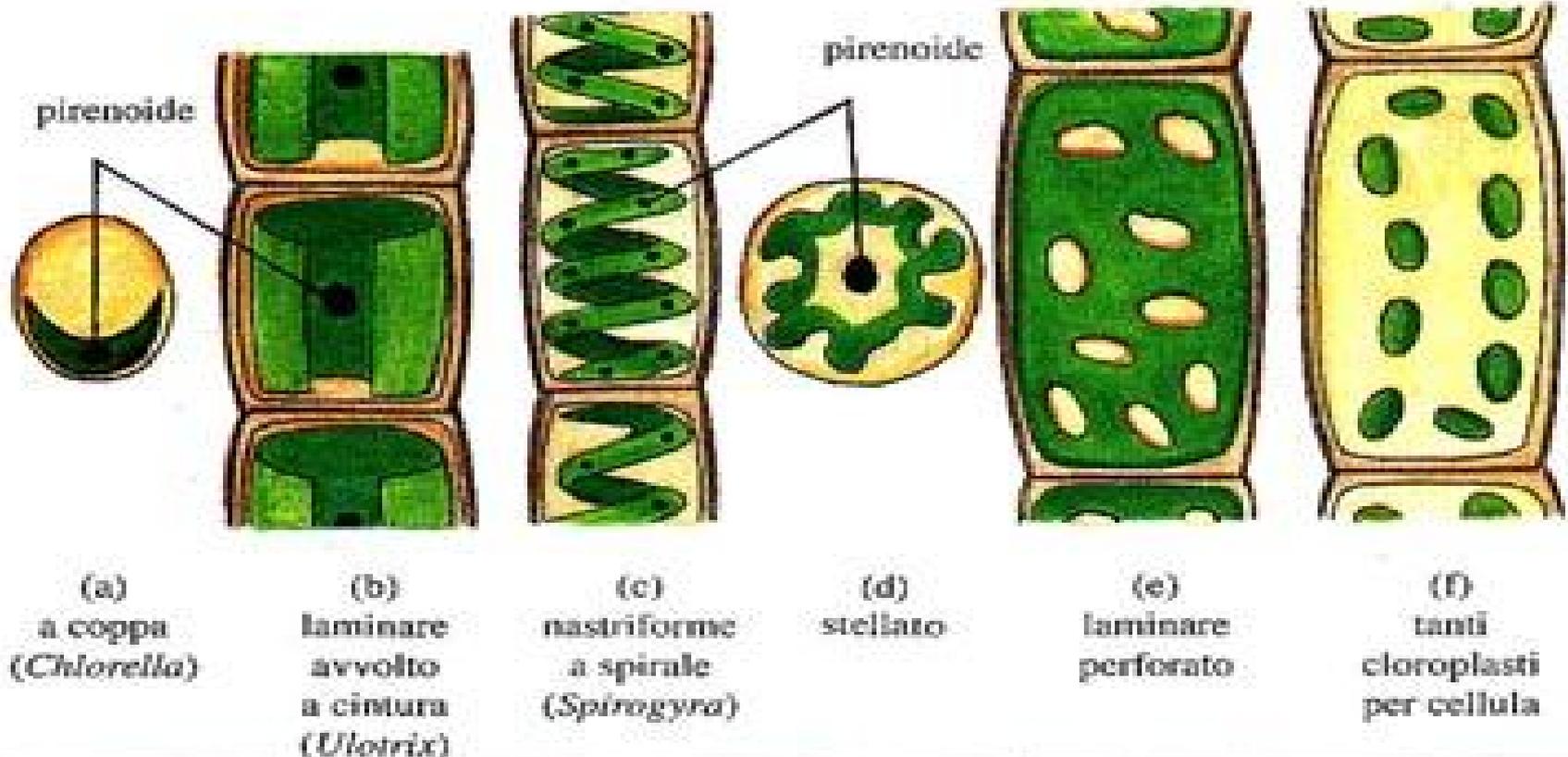
(a) Sezione trasversale di una foglia, che rivela la presenza del tessuto fotosintetico, cioè il mesofillo. La CO₂ entra nella foglia attraverso piccoli pori chiamati stomi, mentre l'H₂O è portata al mesofillo dai vasi. (b) Cellule di una pianta al microscopio ottico, con numerosi cloroplasti.

(c) Struttura di un cloroplasto. I pigmenti necessari per la cattura dell'energia luminosa nelle reazioni fotosintetiche fanno parte della membrana tilacoidale, mentre gli enzimi responsabili della sintesi dei carboidrati si trovano nello stroma.

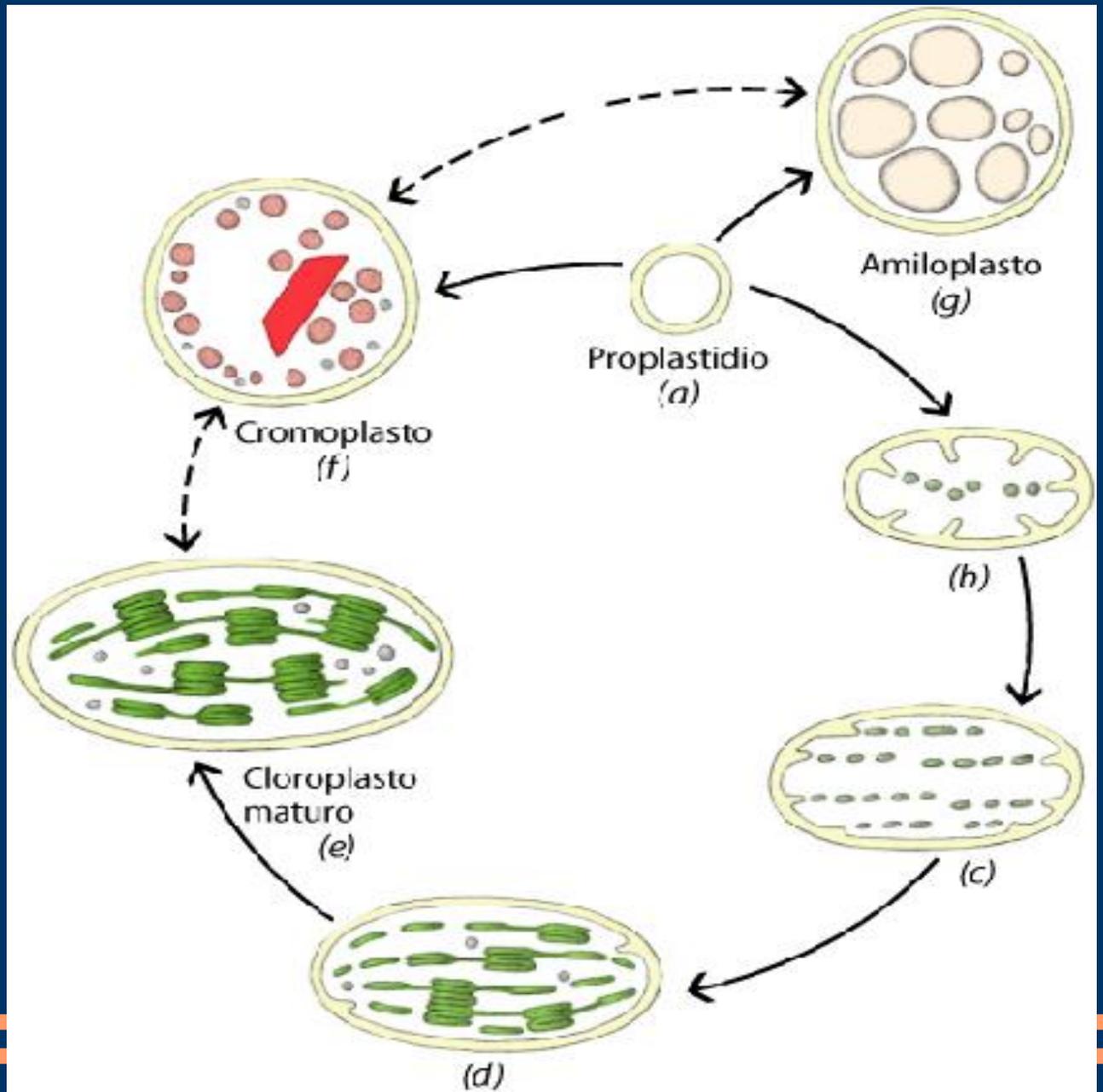
Cloroplasti

Organuli in cui si svolge la **fotosintesi clorofilliana**.

Hanno forma discoidale e \varnothing di **4-6 μm** . In una cellula del mesofillo fogliare vi sono da 40 a 50 cloroplasti; in un mm^2 di foglia vi sono mediamente 500.000 cloroplasti.



plastidi



Leucoplasti-amiloplasti

- Sono i plastidi incolori, presenti nei **tessuti di riserva**, **negli organi ipogei** o nei tessuti cresciuti in assenza di luce
- Spesso accumulano enormi quantità di amido (**amiloplasti**).

Sezione di tubero di patata con cellule parenchimatiche riempite di amiloplasti



cromoplasti

Sono **plastidi colorati** per la presenza di pigmenti diversi dalla clorofilla tra cui **carotenoidi**.

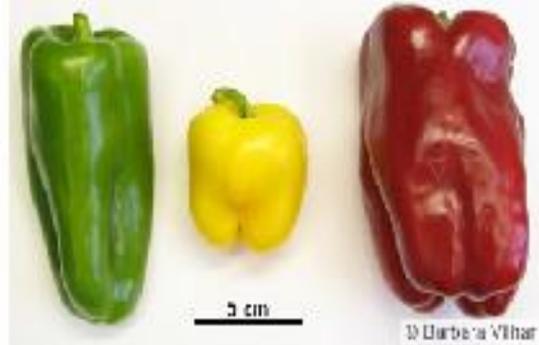
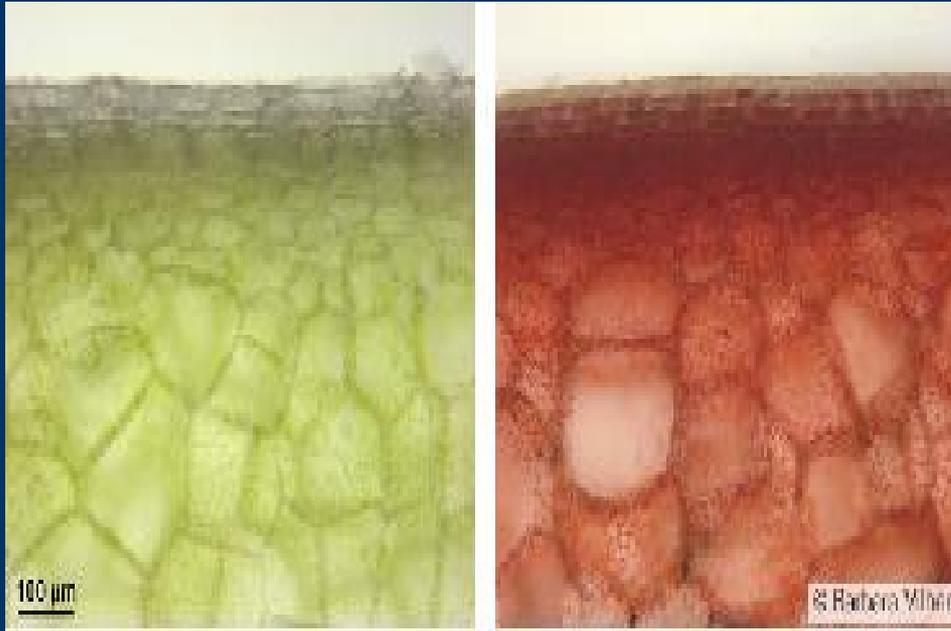
Sono presenti **nei fiori e nei frutti** e sono inattivi per la fotosintesi.

Cromoplasti nel parenchima di radice di *Daucus carota*

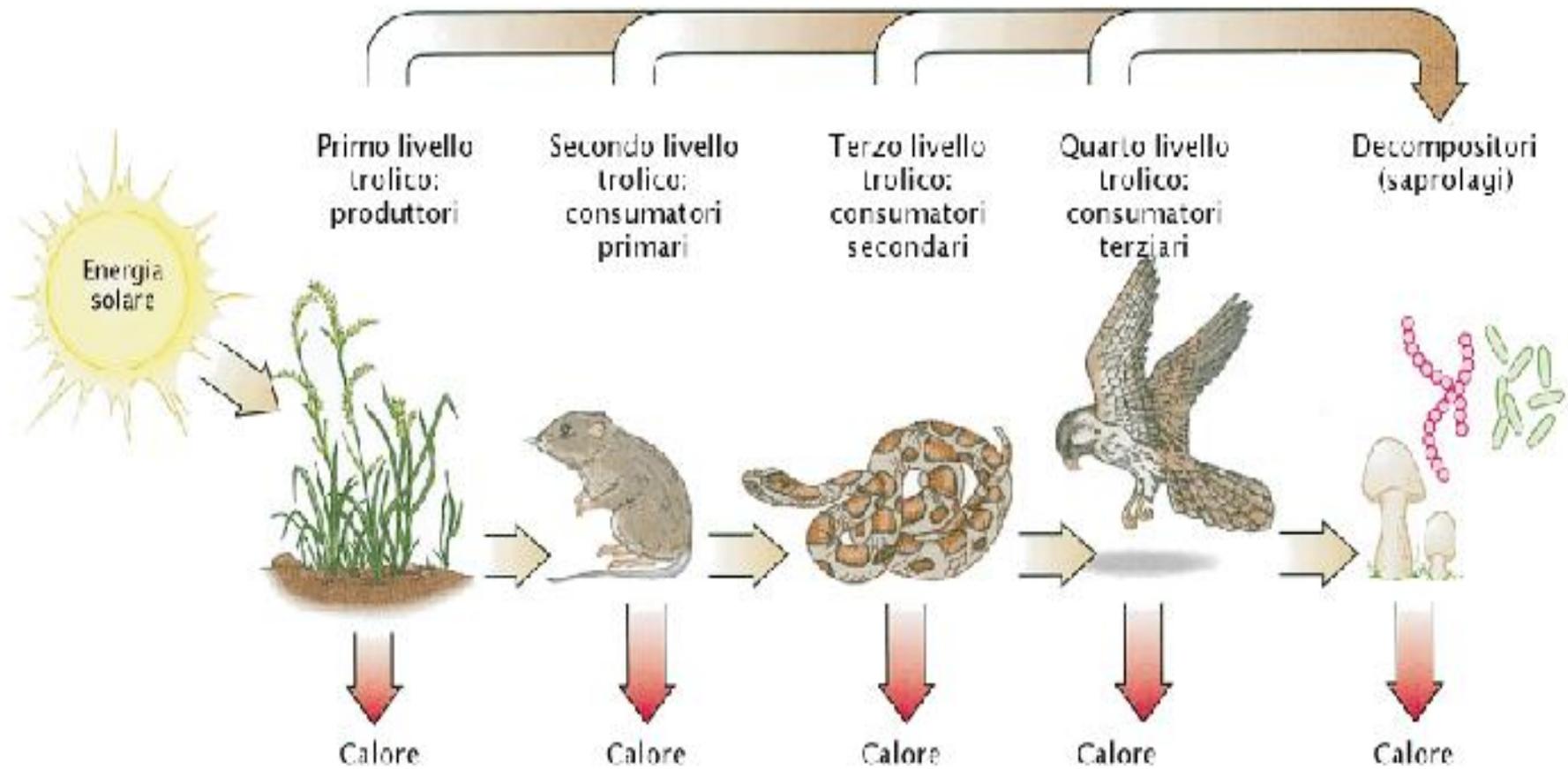


cromoplasti

Trasformazione dei cloroplasti in cromoplasti in frutti di *Capsicum annuus*



Spesso derivano dalla **trasformazione dei cloroplasti**, come si evidenzia nel viraggio di colore dei frutti da acerbi a maturi, a seguito della distruzione della clorofilla. Il processo è **irreversibile**.



■ **Figura 53-1 Il flusso di energia attraverso gli ecosistemi è unidirezionale.** L'energia entra negli ecosistemi da una fonte esterna (il sole) ed esce sotto forma di calore perduto. Come stabilito dalla seconda legge della termodinamica, la maggior parte dell'energia acquisita da un determinato livello trofico è rilasciata nell'ambiente sotto forma di calore ed è quindi non più disponibile per il livello successivo.

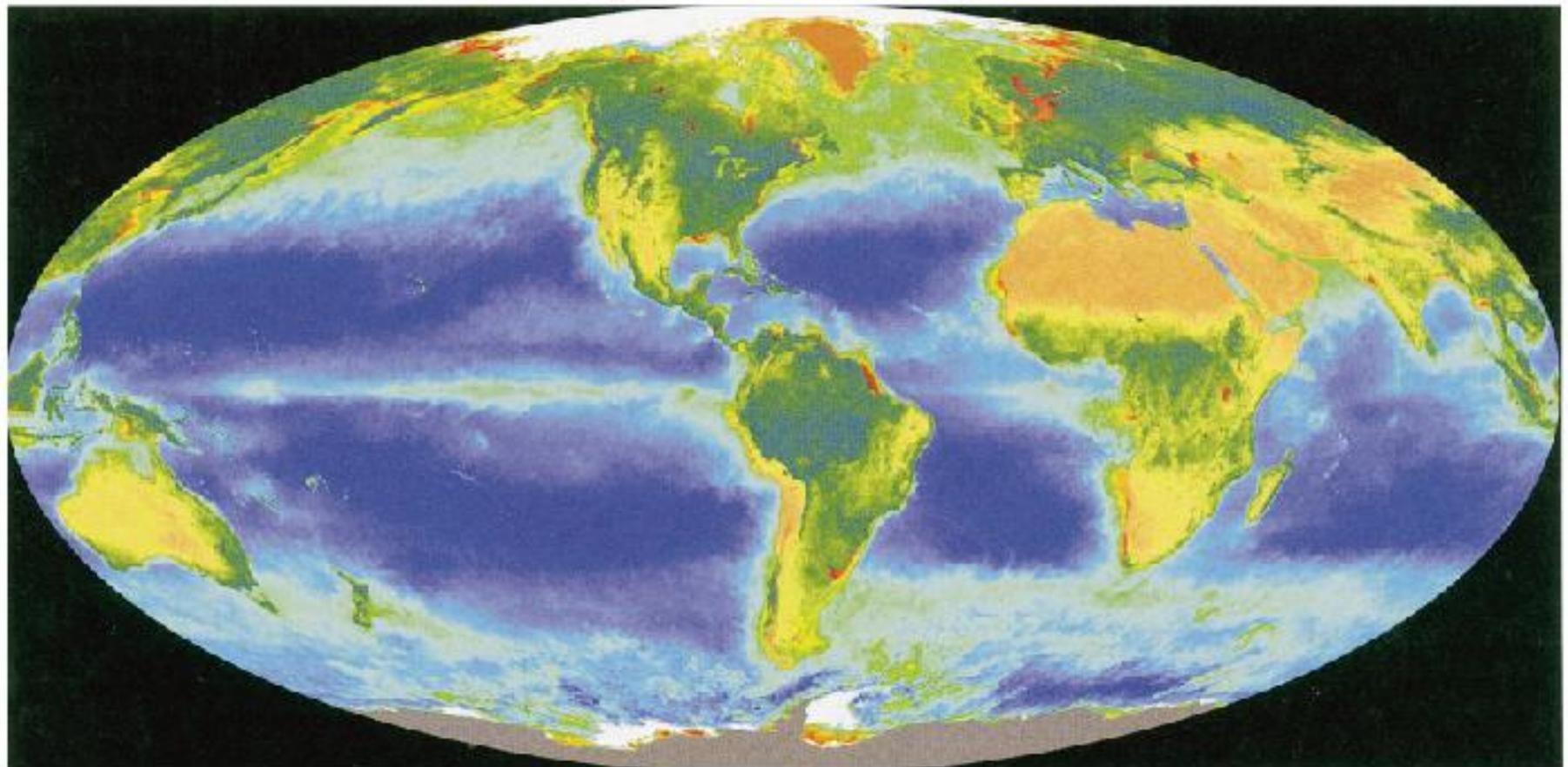


Figura 53-5 Produttività primaria della Terra. I dati sono stati forniti da un satellite, lanciato in orbita nel 1997 durante una missione (Mission to Planet Earth) della NASA. Il satellite ha misurato la quantità di vita vegetale sulle terre emerse e la concentrazione di fitoplancton (alghe) nell'oceano. Sulle terre emerse, le aree più produttive, come le foreste tropicali, sono indicate in verde scuro, mentre gli ecosistemi meno produttivi, i deserti, sono in arancione. Negli oceani e negli altri ecosistemi acquatici, le regioni più produttive sono in rosso, seguite da quelle in arancione, in giallo, in verde e in blu (le meno produttive). Non sono disponibili i dati relativi alle zone in grigio. (Fornito da SEAWIFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE)

Fotosintesi = via anabolica per la organizzazione del Carbonio..Viene effettuata da EUCARIOTI (alghe piante terrestri) PROCARIOTI (ALGHE AZZURRE, BATTERI)



composti iniziali:

- CO_2 = in atmosfera anche come prodotto catabolico della RESPIRAZIONE
 - H_2O = disponibile nell'ambiente del pianeta
 - $H\nu$ = energia solare = luce proveniente dal SOLE (spettro visibile)
-
-

Prodotti finali:

- **$C_6H_{12}O_6$ = glucosio (carboidrato di base per la formazione di amido e cellulosa)**
 - **$6O_2$ = ossigeno gassoso proveniente dalla scissione dell'acqua (FOTOLISI) come prodotto di scarto della fotosintesi, viene immesso in atmosfera**
 - **H_2O = immessa in atmosfera sotto forma di vapore (EVAPOTRASPIRAZIONE)**
-
-



- **Figura 8–9 L'ossigeno prodotto dalla fotosintesi.** Nelle giornate di sole, l'ossigeno rilasciato dalle piante acquatiche è talvolta visibile in forma di bollicine nell'acqua. Questa pianta (*Elodea* sp.) è in piena attività fotosintetica. (*Bernd Wittich/Visuals Unlimited*)

LUCE

- per la fotosintesi viene utilizzata solo la luce dello spettro visibile
- assorbita da pigmenti fotosintetici che la trasformano in energia chimica

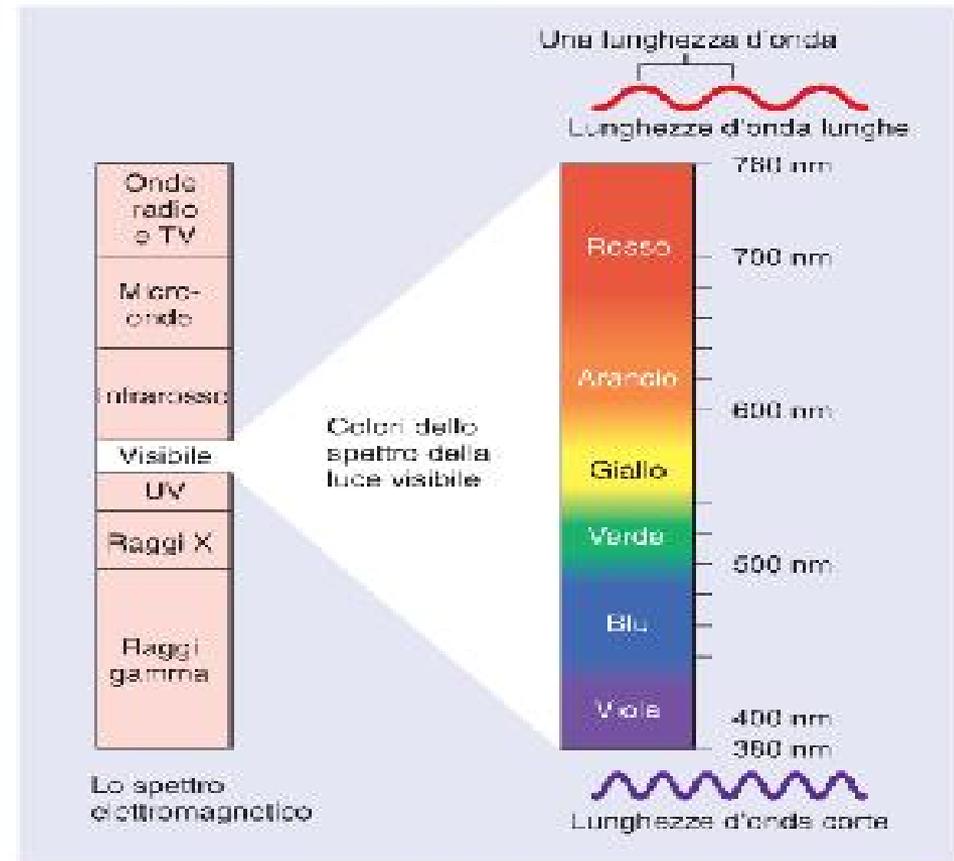


FIGURA 8-1

Lo spettro elettromagnetico.

Le onde dello spettro elettromagnetico hanno caratteristiche simili, ma differenti lunghezze d'onda. Le onde radio sono le più lunghe (circa 20 km) con meno contenuto di energia, mentre quelle dei raggi gamma le più corte con maggiore contenuto di energia. La luce visibile rappresenta una piccola frazione dello spettro elettromagnetico ed è compresa in un intervallo di lunghezze d'onda che va da circa 380 a 760 nm. Nella fotosintesi è utilizzata solo l'energia della luce visibile.



- **Figura 8-2 La radiazione solare.** La radiazione elettromagnetica proveniente dal sole contiene raggi ultravioletti e luce visibile di diversi colori e lunghezze d'onda.

10^{11} nm 10^8 nm nm 10^3 nm 10^2 nm 10^0 nm 10^{-1} nm



Luce visibile



———— aumento di lunghezza d'onda ————▶

◀ ———— aumento di energia ————

Quando la luce incontra la materia, può essere riflessa, trasmessa o assorbita. Le sostanze capaci di assorbire la luce visibile sono dette pigmenti. La *clorofilla a* è il pigmento che, nelle reazioni alla luce della fotosintesi, assorbe l'energia luminosa della luce solare per trasformarla in energia chimica contenuta negli zuccheri prodotti.

Altri pigmenti, come ad esempio la *clorofilla b*, sono capaci di assorbire energia luminosa e la trasferiscono alla *clorofilla a*.

La *clorofilla b* e i carotenoidi sono in grado di assorbire la luce a lunghezze d'onda diverse da quelle della *clorofilla a*.

Pigmenti fotosintetici CLOROFILLE

- **Clorofilla a** (la più antica) CIANOBAATRI, BATTERI ed EUCARIOTI
- **Clorofilla b** pigmento accessorio delle PIANTE SUPERIORI
- **Clorofilla c** pigmento accessorio delle ALGHE

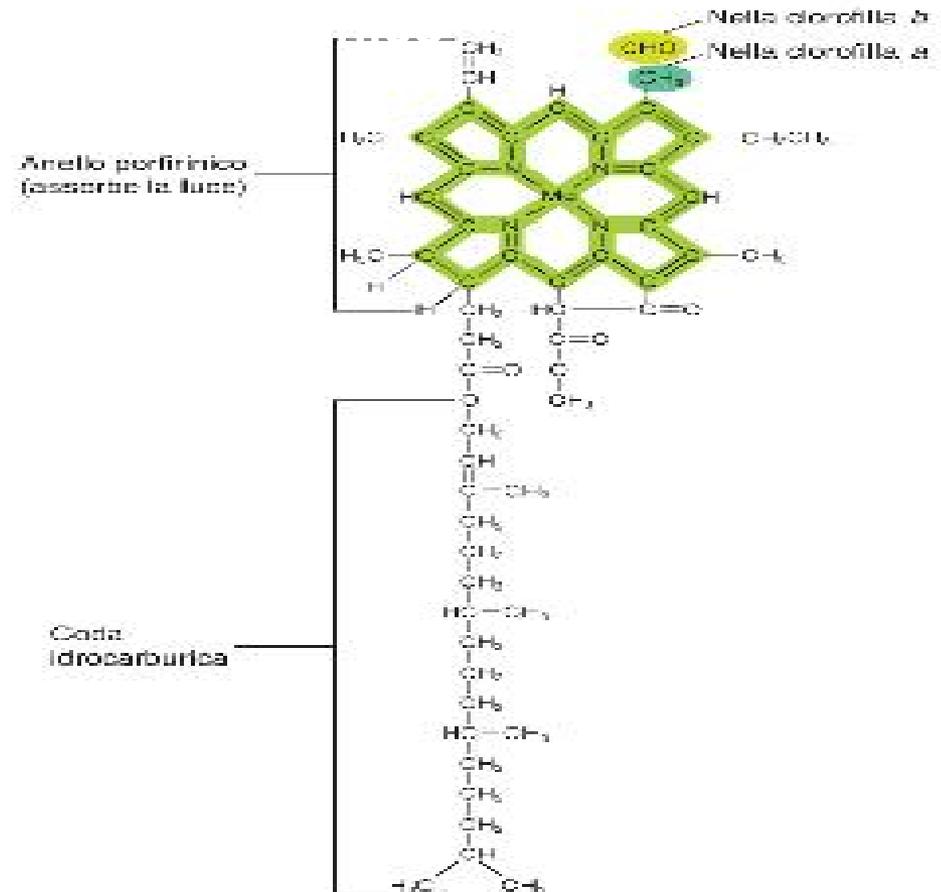
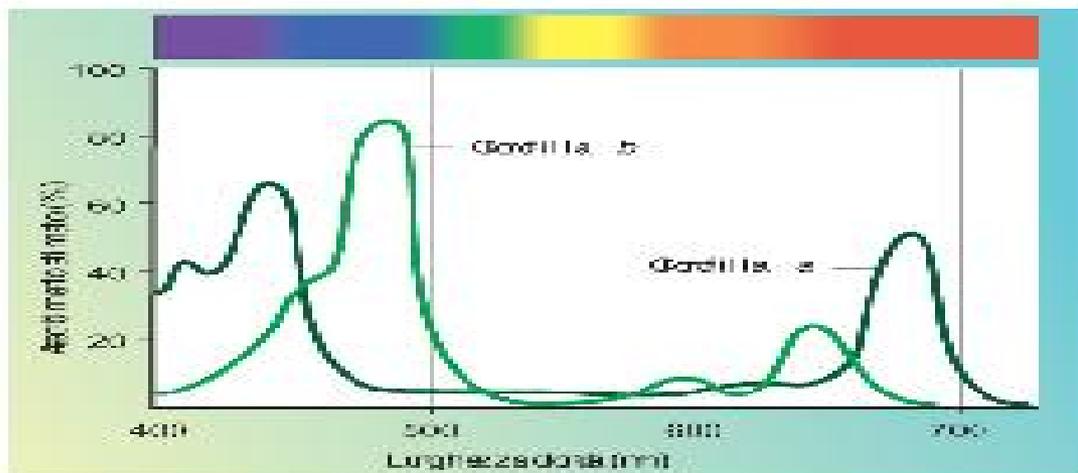
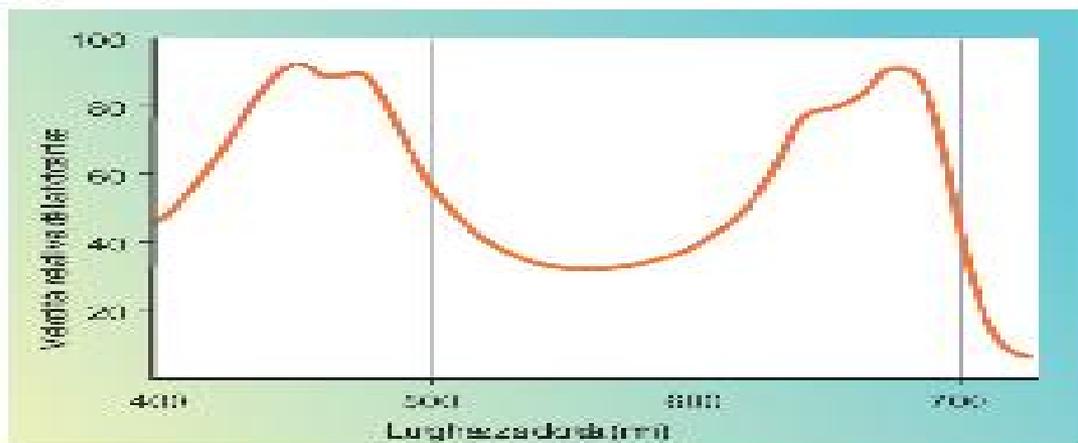


FIGURA 8-5 | Struttura della clorofilla.

La clorofilla è costituita da un anello porfirinico e da una coda idrocarburica. L'anello porfirinico, che ha al centro un atomo di magnesio, è una molecola contenente un sistema alternato di legami singoli e doppi; questa struttura si incontra comunemente nelle molecole dotate della proprietà di assorbire la luce visibile. In alto a destra del diagramma, un gruppo metilico ($-\text{CH}_3$) distingue la clorofilla a dalla clorofilla b, che nella stessa posizione ha un gruppo carbonilico ($-\text{CHO}$).



(a)



(b)

FIGURA 3-6

Spettro di assorbimento della clorofilla a e della clorofilla b e spettro di azione della fotosintesi.

(a) La clorofilla a e la clorofilla b assorbono luce principalmente nelle regioni del blu (432 nm–492 nm) e del rosso (647 nm–760 nm). (b) Lo spettro di azione della fotosintesi mostra l'efficacia delle varie lunghezze d'onda della luce nello stimolare la fotosintesi. Molte specie di piante fanno esseri d'azione per la fotosintesi che assomigliano a quello generale qui mostrato.

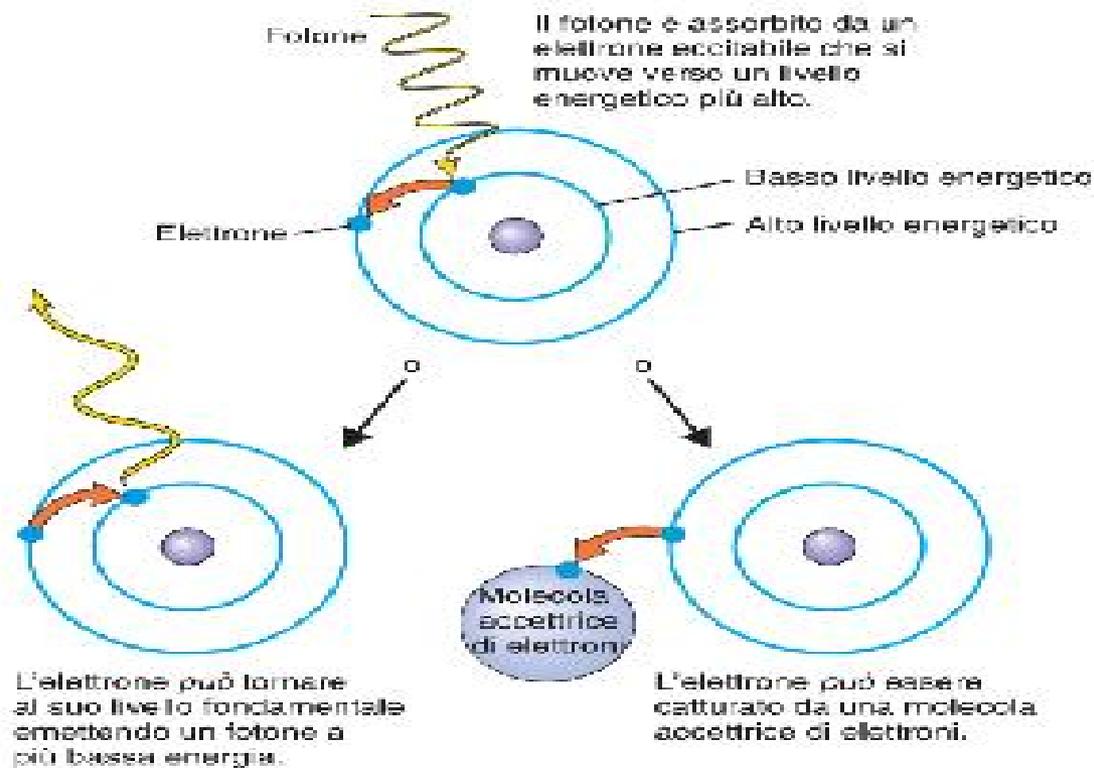


FIGURA 8-3

Interazioni tra la luce e gli atomi o le molecole.

(In alto) Quando un fotone di energia luminosa colpisce un atomo, o una molecola di cui l'atomo fa parte, l'energia del fotone può spingere un elettrone in un orbitale più lontano dal nucleo (cioè ad un livello energetico più alto). (In basso a sinistra) Se l'elettrone "ricade" sul livello energetico più basso, viene emesso un fotone ad energia minore (cioè a lunghezza d'onda maggiore) o come fluorescenza (mostrato) o come calore. (In basso a destra) Se è disponibile un appropriato accettore di elettroni, l'elettrone può abbandonare l'atomo. Durante la fotosintesi l'accettore primario di elettroni cattura l'elettrone eccitato e lo trasferisce lungo una catena di accettori di elettroni.

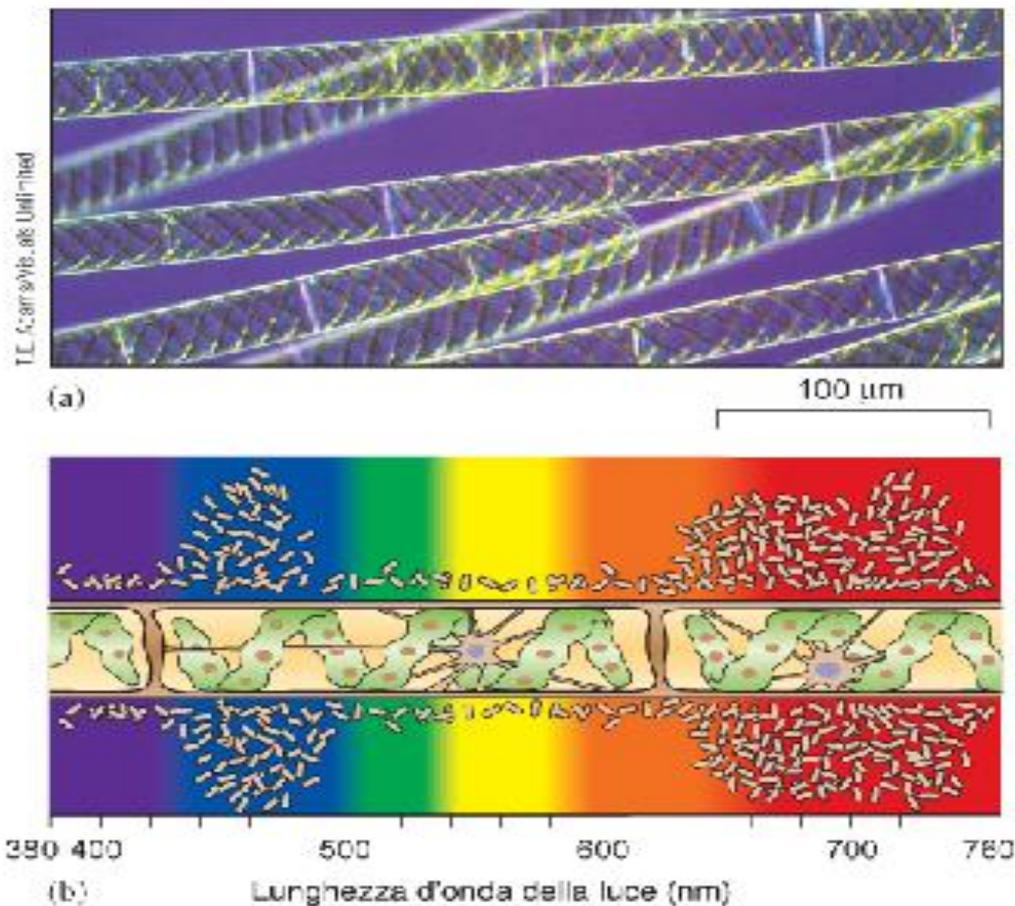
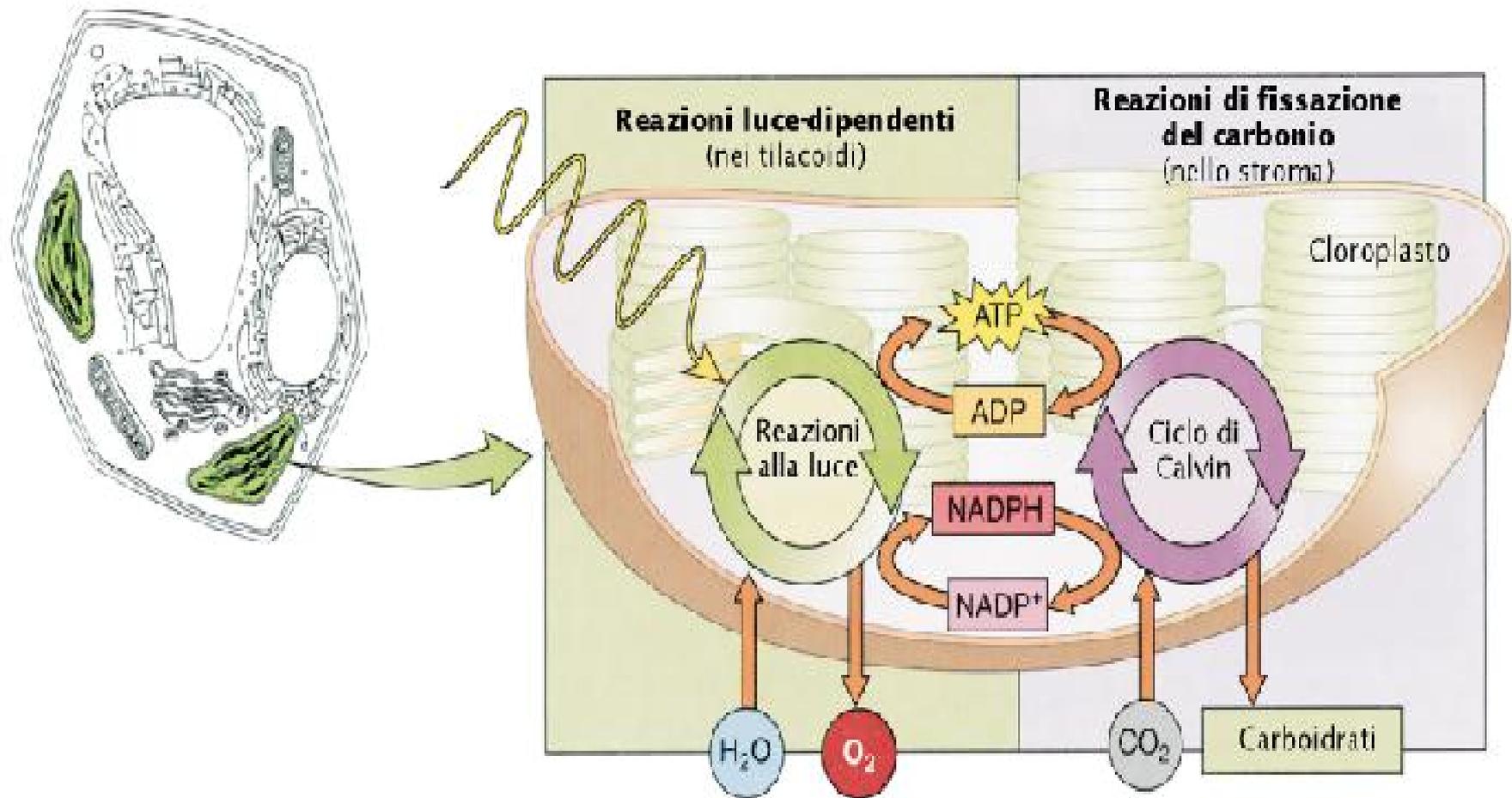


FIGURA 8-7

Il primo spettro di azione della fotosintesi.

(a) Un'immagine al microscopio ottico di filamenti di *Spirogyra sp.*, l'alga verde usata da Engelmann nel suo classico esperimento. L'addensamento dei batteri nella porzione del filamento illuminata con luce rossa o blu dimostra che la luce rossa e quella blu sono le più efficaci nello stimolare la fotosintesi.



■ **Figura 8-8 Una visione schematica della fotosintesi.** La fotosintesi consiste di reazioni dipendenti dalla luce, che hanno luogo sui tilacoidi, e di reazioni di fissazione del carbonio, che avvengono nello stroma del cloroplasto.

Reazioni dipendenti dalla luce

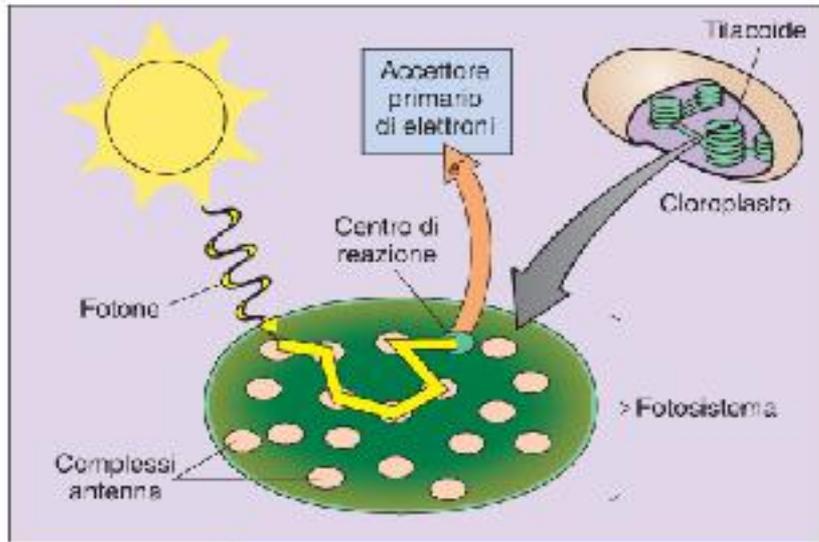


FIGURA 8-10 Un fotosistema.

Le molecole di clorofilla ed i pigmenti accessori sono organizzati in strutture che funzionano come antenne adatte a catturare la luce. Quando una molecola del complesso antenna cattura un fotone, l'energia assorbita è convogliata verso il centro di reazione. Quando questa energia raggiunge la molecola di clorofilla P700 (o P680) nel centro di reazione, si ha l'eccitazione di un elettrone che passa ad un livello energetico più elevato ed è catturato da un accettore primario.

- 1) L'energia luminosa viene assorbita da due gruppi di pigmenti
 - ✓ **fotosistema I (PS I)**
 - ✓ **fotosistema II (PS II)**
- 2) Le molecole di clorofilla cedono elettroni
- 3) L'acqua viene separata in ossigeno, protoni ed elettroni
- 4) Gli elettroni dell'acqua rimpiazzano quelli persi dai fotosistemi II e I.

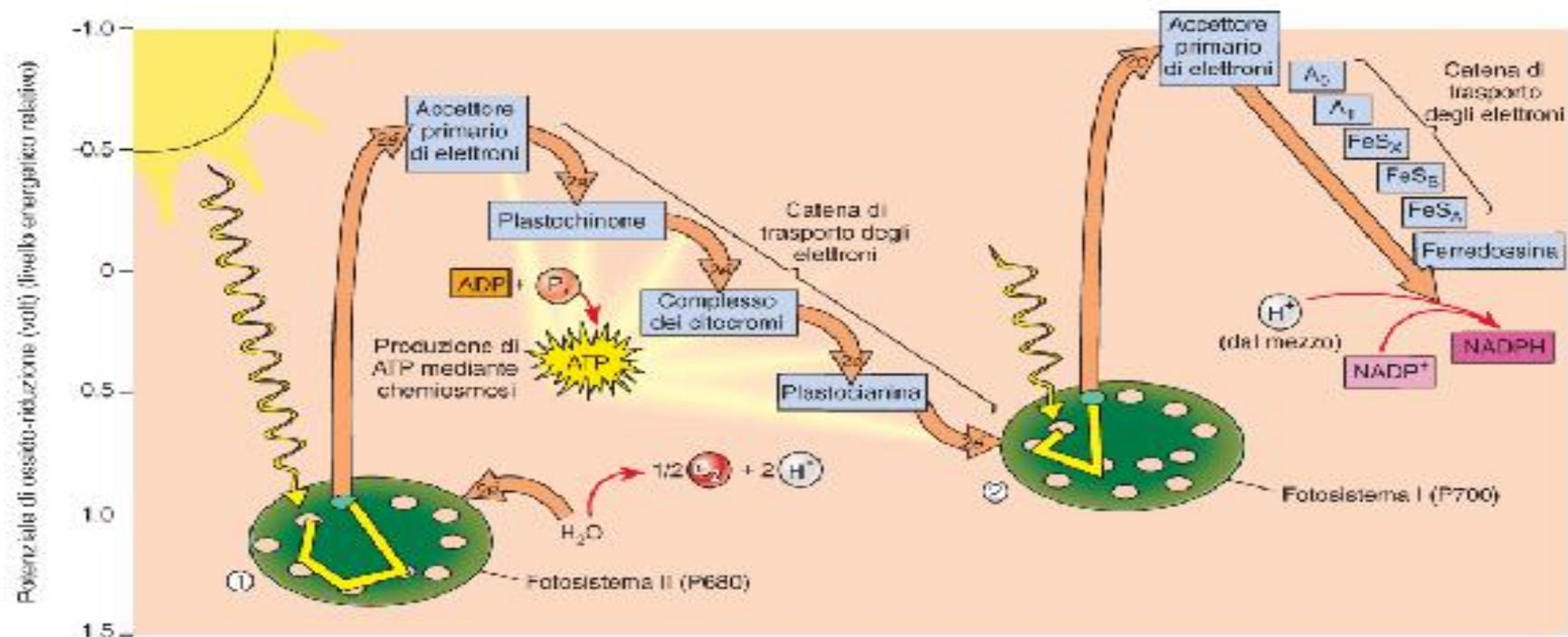
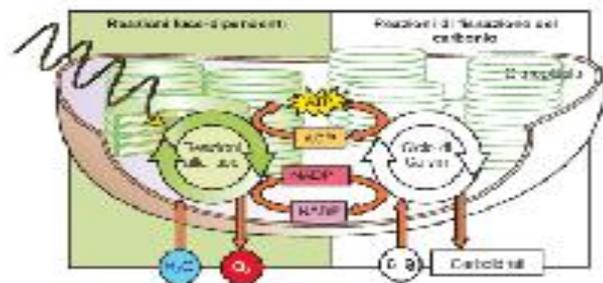
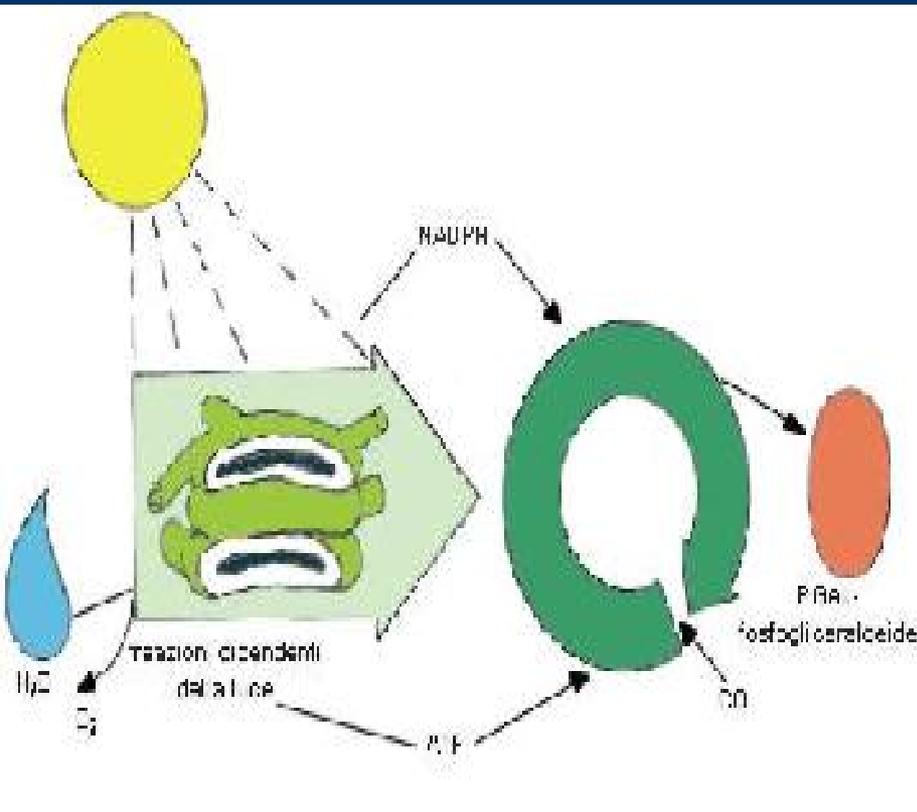


FIGURA 8-11 Il trasporto non ciclico di elettroni.

Nel trasporto non ciclico di elettroni, la produzione di ATP è accoppiata ad un flusso unidirezionale di elettroni eccitati (freccie arancioni), dall'acqua (in basso a sinistra) al NADP⁺ (al centro a destra). Attraverso la catena di trasporto passa un solo elettrone per volta, anche se nella figura sono mostrati due elettroni perché tanti sono quelli richiesti per formare una molecola di NADPH. ① Gli elettroni

sono forniti al sistema dalla lisi dell'acqua, effettuata dal Fotosistema II, con rilascio di ossigeno molecolare come prodotto di scarto. Quando il Fotosistema II è attivato dall'assorbimento di un fotone, gli elettroni eccitati sono trasferiti alla catena di trasporto e ceduti infine al Fotosistema I dove, ② riecitati dall'assorbimento di altra energia luminosa, sono infine ceduti al NADP⁺, formando NADPH.

fase oscura (Ciclo di Calvin)



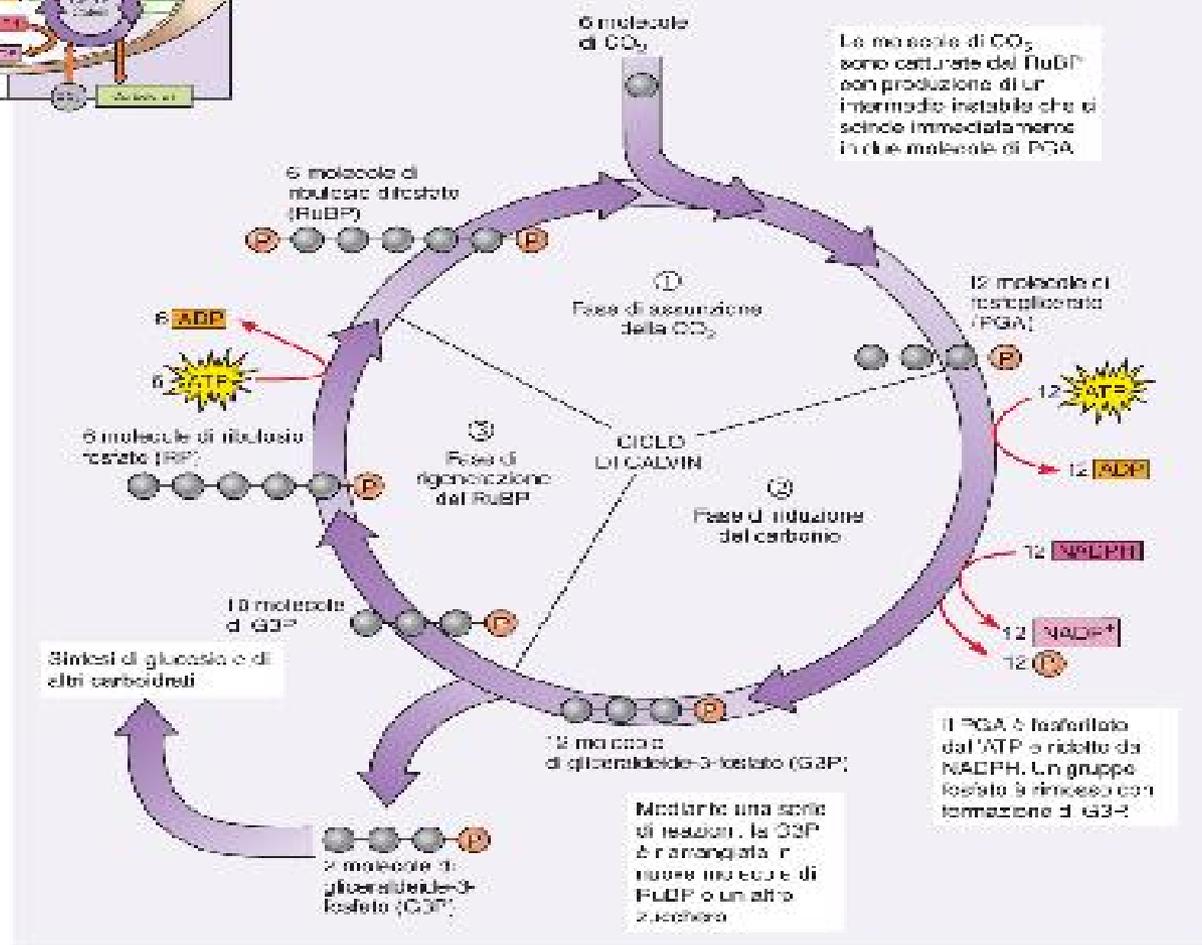
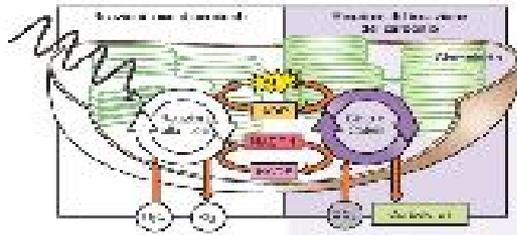
- Nelle reazioni **fotochimiche** (luce) l'energia luminosa viene assorbita e trasformata in energia chimica, molecole energetiche a vita breve.
- Nel **ciclo di Calvin** vengono poi combinate utilizzando l'anidride carbonica ricavata dall'aria per costruire **zuccheri a tre atomi di carbonio** e l'energia viene trasformata in energia chimica accumulata negli zuccheri.

Il ciclo di Calvin

- costituisce la serie di reazioni più importanti della fase oscura della **fotosintesi**; si tratta di reazioni cicliche (in cui i prodotti sono a loro volta reagenti) che non dipendono direttamente dalla luce solare e si svolgono nello stroma di un **cloroplasto**.
 - Usando la CO₂ atmosferica, l'ATP e il NADPH prodotto dalle reazioni della fase luminosa della fotosintesi, il ciclo di Calvin produce molecole di gliceraldeide-3-fosfato (**G3P**) ricche di energia, che possono essere trasformate in amido, acidi grassi, aminoacidi attraverso una serie di reazioni che si svolgono nello **stroma** del **cloroplasto**.
 - Una parte di tale composto può essere trasportata nel citoplasma dove, trasformata in glucosio-6-fosfato e fruttosio-6-fosfato, partecipa alla **glicolisi** o si trasforma in saccarosio (disaccaride di glucosio + fruttosio). In questa veste può essere portato, attraverso i vasi delle piante, in tutte le cellule vegetali che non operano la fotosintesi, svolgendo lo stesso ruolo del glucosio nelle cellule animali, cioè partecipando alla **respirazione cellulare**.
-
-

FIGURA 8-14 Una visione dettagliata del ciclo di Calvin.

① Questo disegno, nel quale gli atomi di carbonio sono rappresentati da sfere nere, mostra come sei molecole di CO_2 debbano essere "fissate" (incorporate) in una scheletta carbonata preesistente, nella fase di assunzione della CO_2 , per produrre uno zucchero a sei atomi di carbonio come il glucosio. ② Nella fase di riduzione del carbonio, si forma il glicerale de-3-fosfato (GAP). Due molecole di GAP "lasciano" il ciclo per ogni molecola di glucosio formata. ③ Il ribuloso-1,5-bisfosfato (RuBP) viene rigenerato e può partire un nuovo ciclo. Sebbene queste reazioni non richiedano direttamente la luce, l'energia che muove i cicli di Calvin proviene dall'ATP e da NADPH, che sono i prodotti delle reazioni dipendenti dalla luce.



Fosfogliceraldeide

La fosfogliceraldeide prodotta nel ciclo di Calvin può seguire distinte vie metaboliche:

1. utilizzata direttamente per ricavare l'energia attraverso la **respirazione cellulare**.
2. convertita in **saccarosio** (**glucosio** e **fruttosio**) inviato a tutte le cellule vive attraverso la linfa che percorre il floema.
3. trasformata in **polisaccaridi** necessari alla crescita: un esempio è la produzione di cellulosa, materiale costituente principale della parete cellulare
4. trasformata in **amido**, polisaccaride di riserva, immagazzinato in appositi organi, o in tessuti con funzione di riserva per un uso futuro (crescita vegetativa e germinazione)
5. trasformata in **altre molecole, biologiche**, usando ad esempio le catene carboniose per la produzione di lipidi o di amminoacidi.

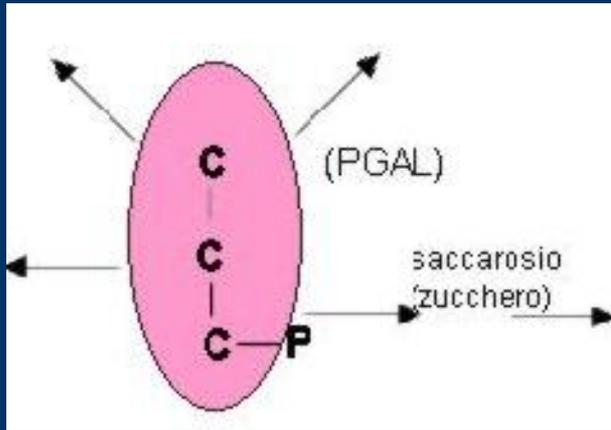
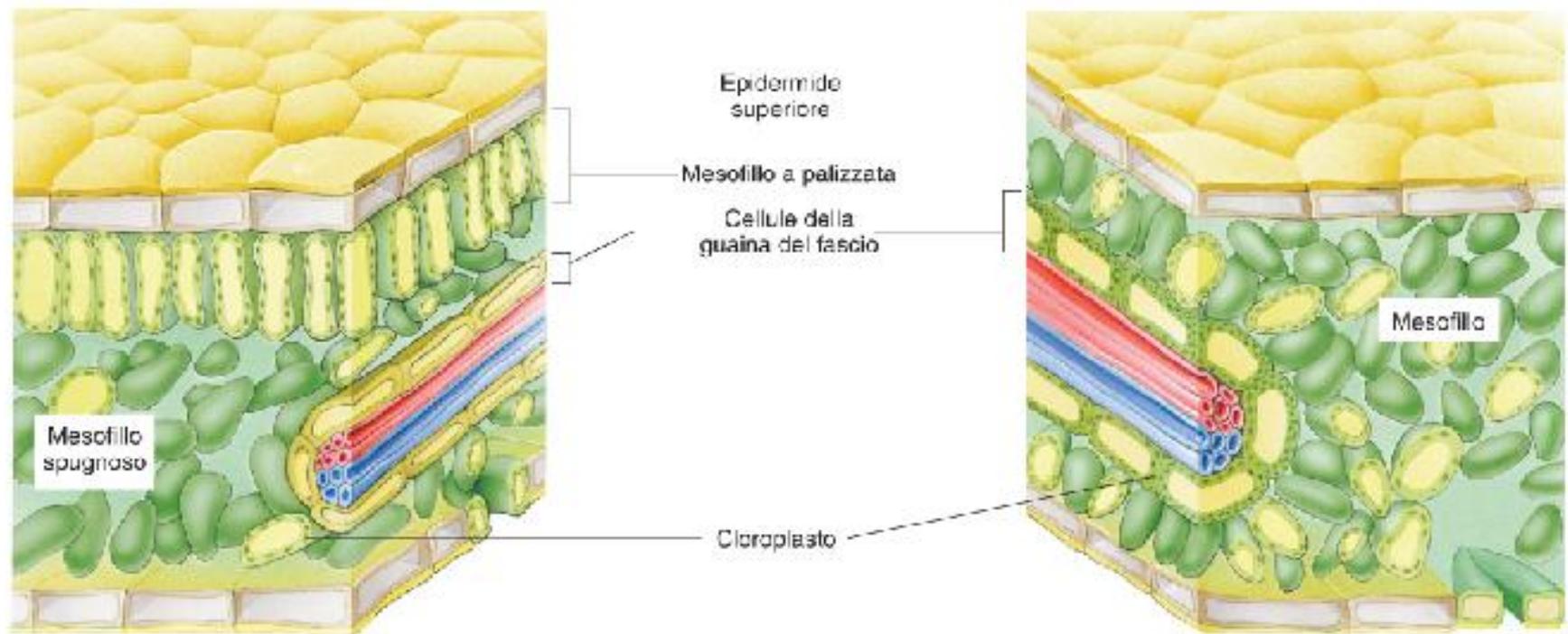


FIGURA 8-15

L'anatomia della foglia di piante C_3 e C_4 a confronto.

(a) Nelle piante C_3 , il ciclo di Calvin ha luogo nelle cellule del mesofilo e le cellule della guaina del fascio non sono fotosintetiche (b) Nelle piante C_4 , le reazioni di fissazione della CO_2 in composti a quattro atomi di carbonio avvengono nelle cellule del mesofilo. I composti a quattro atomi di carbonio sono quindi trasferiti dalle cellule del mesofilo alle cellule della guaina del fascio, nelle quali ha luogo il ciclo di Calvin.



(a) Organizzazione delle cellule in una foglia C_3

(b) Organizzazione delle cellule in una foglia C_4

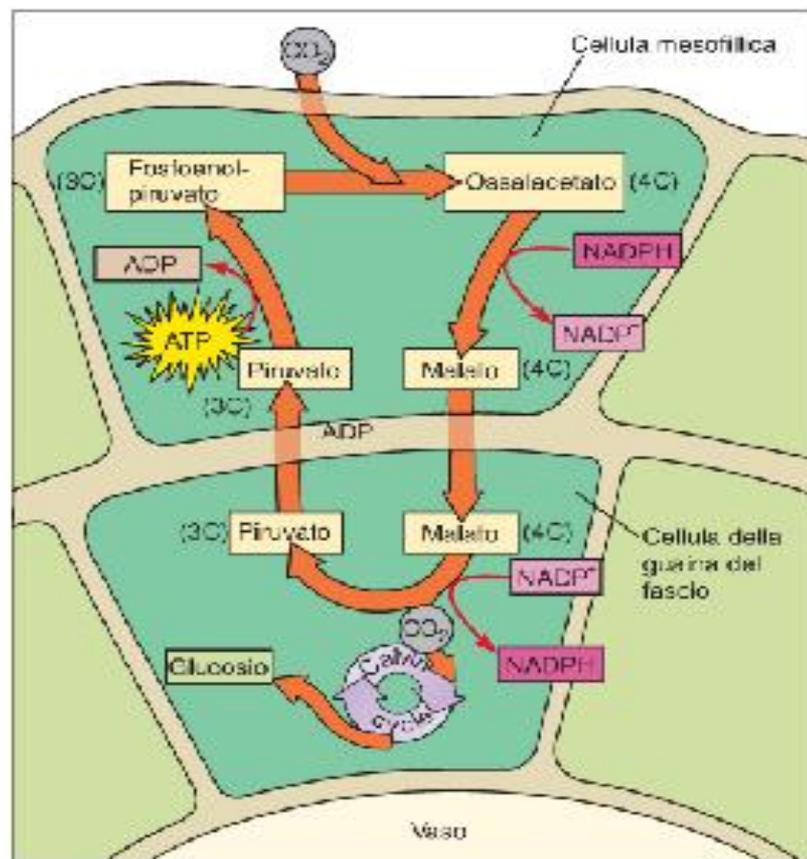


FIGURA 8-16 Una visione schematica della via C₄.

La CO₂ si combina con il fosfoenolpiruvato (PEP) nei cloroplasti delle cellule del mesofillo, formando un composto a quattro atomi di carbonio che è trasformato in malato. Il malato passa poi all'interno dei cloroplasti delle cellule della guaina del fascio, dove è decarbossilato. La CO₂ in tal modo liberata è utilizzata per la sintesi di zucchero mediante il ciclo di Calvin.