CAPITOLO

# 5

# La cellula e l'energia

*Ogni volta che espiri restituisci all'aria un po' di carbonio che una pianta, da qualche parte, le aveva tolto con l'aiuto della luce.*

**OBIETTIVI**

1. Distinguere autotrofi ed eterotrofi e descrivere il ciclo dell'ATP come trasferimento di energia.
2. Spiegare come agiscono gli enzimi e come temperatura e pH ne influenzano l'attività.
3. Leggere e verificare le equazioni complessive di fotosintesi e respirazione cellulare, indicando dove avvengono.
4. Confrontare respirazione cellulare e fermentazioni per prodotti, uso dell'ossigeno e resa energetica.
5. Progettare semplici esperimenti controllati sulla fotosintesi e sulla fermentazione.

**INDICE DEL CAPITOLO**


5.1 L'energia nei viventi ..... 2
5.2 Gli enzimi ..... 4
5.3 La fotosintesi ..... 7
5.4 La respirazione cellulare ..... 11
5.5 Le fermentazioni ..... 13
5.6 Fotosintesi e respirazione: due processi complementari ..... 15

Scienze naturali 2 · Parte I · La cellula · versione 1.0
Capitolo 5: La cellula e l'energia · pagine 109–130 del volume completo · estratto per lo studio

Un ragazzo che corre per prendere l'autobus, un fungo che cresce sotto le foglie, una cellula del fegato che costruisce glicogeno: tutti stanno usando energia. Nessuna cellula può fabbricare energia dal nulla, né conservarla per sempre. Deve procurarsela dall'ambiente, trasformarla in una forma utilizzabile e spenderla per crescere, muoversi, trasportare sostanze, riprodursi. In questo capitolo seguiamo l'energia dentro la cellula: dalla luce del Sole catturata dai cloroplasti, attraverso gli zuccheri, fino alla molecola di ATP che alimenta quasi ogni attività cellulare. Incontreremo anche gli enzimi, le proteine che rendono possibile tutto questo alla temperatura del corpo, e le fermentazioni, antiche alleate del fornaio e del casaro.

## 5.1 L'energia nei viventi

### 5.1.1 Autotrofi ed eterotrofi

Nel Capitolo 1 abbiamo visto che ogni vivente scambia materia ed energia con l'ambiente: è il suo metabolismo. Da dove viene questa energia? Secondo la risposta, i viventi si dividono in due grandi gruppi. Gli **autotrofi** (dal greco, «che si nutrono da sé») fabbricano le proprie molecole organiche a partire da sostanze inorganiche semplici, come il diossido di carbonio e l'acqua. La maggior parte degli autotrofi, cioè piante, alghe e cianobatteri, usa l'energia della luce: sono organismi fotosintetici. Alcuni batteri e archei ricavano invece l'energia da reazioni chimiche di sostanze inorganiche: è la chemiosintesi, che incontrerai nel Capitolo 12.

Gli **eterotrofi** (animali, funghi, molti batteri e protisti) non sanno costruire molecole organiche partendo da sostanze inorganiche: devono procurarsele nutrendosi di altri organismi o dei loro resti. Il nostro pranzo, che sia pasta, carne o insalata, porta nelle cellule molecole organiche fabbricate in origine da un autotrofo. In un ecosistema gli autotrofi sono i produttori, gli eterotrofi i consumatori e i decompositori: lo vedremo nel Capitolo 15. Qui ci interessa il punto di vista della singola cellula.

### 5.1.2 L'energia chimica

In entrambi i casi l'energia viaggia come **energia chimica**, immagazzinata nelle molecole organiche: zuccheri, grassi, proteine. In *Scienze naturali 1* hai distinto le reazioni esotermiche, che liberano energia, da quelle endotermiche, che la assorbono. La cellula fa lo stesso. Le reazioni che costruiscono molecole grandi e ricche di energia a partire da molecole piccole e povere, come la fotosintesi, assorbono energia; quelle che demoliscono le molecole organiche, come la respirazione cellulare, ne liberano.

Come in ogni trasformazione, l'energia non si crea e non si distrugge: passa da una forma all'altra. A ogni passaggio, però, una parte si disperde nell'ambiente come calore e non è più

utilizzabile dalla cellula. Per questo un organismo ha bisogno di un rifornimento continuo di energia, dalla luce o dal cibo.

### 5.1.3 L'ATP, la moneta energetica della cellula

Nel Capitolo 2 abbiamo incontrato l'ATP (adenosina trifosfato), un nucleotide formato dalla base adenina, dallo zucchero ribosio e da tre gruppi fosfato in fila. Quando il terzo gruppo fosfato si stacca, grazie a una molecola d'acqua (è un'idrolisi), si ottengono l'**ADP** (adenosina difosfato) e un gruppo fosfato libero, indicato con $P_i$. La reazione libera energia, che la cellula usa subito per un lavoro: contrarre un muscolo, pompare ioni attraverso la membrana (la pompa sodio-potassio del Capitolo 4), costruire proteine e altre macromolecole.

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + P_i + \text{energia}$$

La reazione inversa richiede energia: ADP e fosfato si riuniscono in ATP grazie all'energia liberata dalla demolizione delle molecole nutritive, nella respirazione cellulare e nelle fermentazioni. Si forma così un ciclo continuo, il **ciclo dell'ATP** (Figura 5.1).

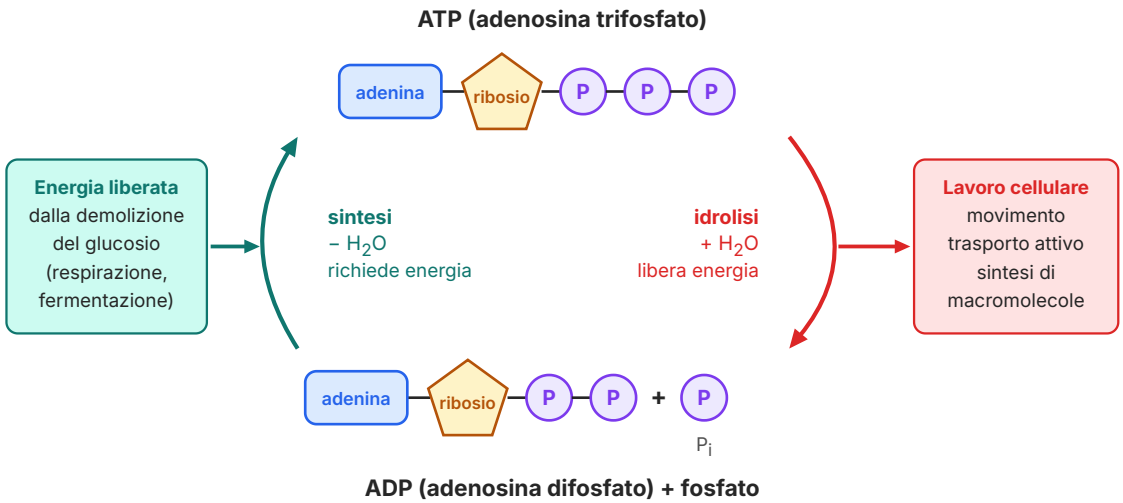



**Figura 5.1** Il ciclo dell'ATP (schema non in scala). A destra, l'idrolisi dell'ATP in ADP e fosfato libera l'energia usata per il lavoro cellulare; a sinistra, l'energia ricavata dalla demolizione del glucosio serve a ricostruire l'ATP.

Una cellula contiene poco ATP e lo ricostruisce di continuo: ogni molecola viene «spesa» e «ricaricata» moltissime volte in un giorno. Si stima che una persona a riposo idrolizzi e ricostruisca ogni giorno una massa di ATP dell'ordine del proprio peso corporeo, pur avendone in corpo, in ogni istante, una quantità molto piccola. Le vere riserve di energia sono altre: il glicogeno e i grassi negli animali, l'amido e gli oli nelle piante (Capitolo 2). Per questo si dice che

l'ATP è la «moneta» energetica della cellula: come il denaro, passa di mano in mano e serve per gli scambi, non per essere accumulato.

> **ERRORE FREQUENTE**
> «L'ATP contiene energia, come la benzina nel serbatoio di un'auto». L'immagine è fuorviante. L'ATP non è una riserva: trasferisce energia dalle reazioni che la liberano a quelle che la richiedono, e viene riciclato di continuo. Allo stesso modo, non pensare che l'energia sia «chiusa» nel legame dell'ultimo fosfato come in una scatola: è l'idrolisi nel suo insieme, cioè il passaggio da ATP e acqua ad ADP e fosfato, a liberare energia.

## 5.2 Gli enzimi

### 5.2.1 Catalizzatori biologici

Lo zucchero da cucina lasciato in un barattolo resta lì per anni senza trasformarsi, eppure la sua reazione con l'ossigeno libererebbe molta energia. Nel nostro corpo, invece, gli zuccheri vengono demoliti in pochi istanti, a 37 °C. Il segreto sono gli **enzimi**: catalizzatori biologici, quasi sempre proteine, che accelerano le reazioni chimiche della cellula. Un **catalizzatore** rende più veloce una reazione che sarebbe comunque possibile e alla fine è ancora intatto, pronto ad agire di nuovo: non viene consumato.

Perché una reazione parta, i reagenti devono ricevere una piccola «spinta» iniziale di energia, come un masso che va sollevato oltre un dosso prima di rotolare giù da una discesa. Questa spinta è l'**energia di attivazione**. In laboratorio la si fornisce scaldando: un fiammifero accende la carta. Una cellula non può scaldarsi molto senza danneggiarsi; gli enzimi, invece, abbassano l'energia di attivazione, e così la reazione procede veloce anche alla temperatura del corpo (Figura 5.2b). L'enzima non cambia né il punto di partenza né quello di arrivo: non rende possibile una reazione impossibile e non cambia l'energia che essa libera. Rende solo più facile la strada.

### 5.2.2 Il sito attivo e la specificità

La sostanza su cui agisce un enzima si chiama **substrato**. Ogni enzima ha una piccola tasca sulla superficie, il **sito attivo**, in cui il substrato si inserisce formando per un istante il complesso enzima-substrato. Lì la reazione avviene; poi i prodotti si staccano e l'enzima è libero di ricominciare. La saccarasi, per esempio, scinde il saccarosio in glucosio e fruttosio, un'idrolisi che hai incontrato nel Capitolo 2, e ripete il ciclo moltissime volte al secondo (Figura 5.2a).

La forma del sito attivo corrisponde a quella del substrato: per questo ogni enzima riconosce uno o pochi substrati. È la **specificità** degli enzimi. La saccarasi non scinde il lattosio, che pure è un disaccaride: per il lattosio serve un altro enzima, la lattasi. Molti nomi di enzimi finiscono in «-asi» e ricordano il loro substrato: amilasi (amido), lattasi (lattosio), lipasi (lipidi), proteasi (proteine).

Nel 1894 il chimico tedesco Emil Fischer propose di immaginare il rapporto fra enzima e substrato come quello fra una serratura e la sua chiave: è il **modello chiave-serratura**. Oggi sappiamo che gli enzimi non sono rigidi. Quando il substrato entra, il sito attivo cambia leggermente forma e lo «abbraccia» più strettamente, come un guanto che si adatta alla mano: è il modello dell'**adattamento indotto**, proposto da Daniel Koshland nel 1958. Entrambi spiegano la specificità; il secondo descrive meglio ciò che si osserva.

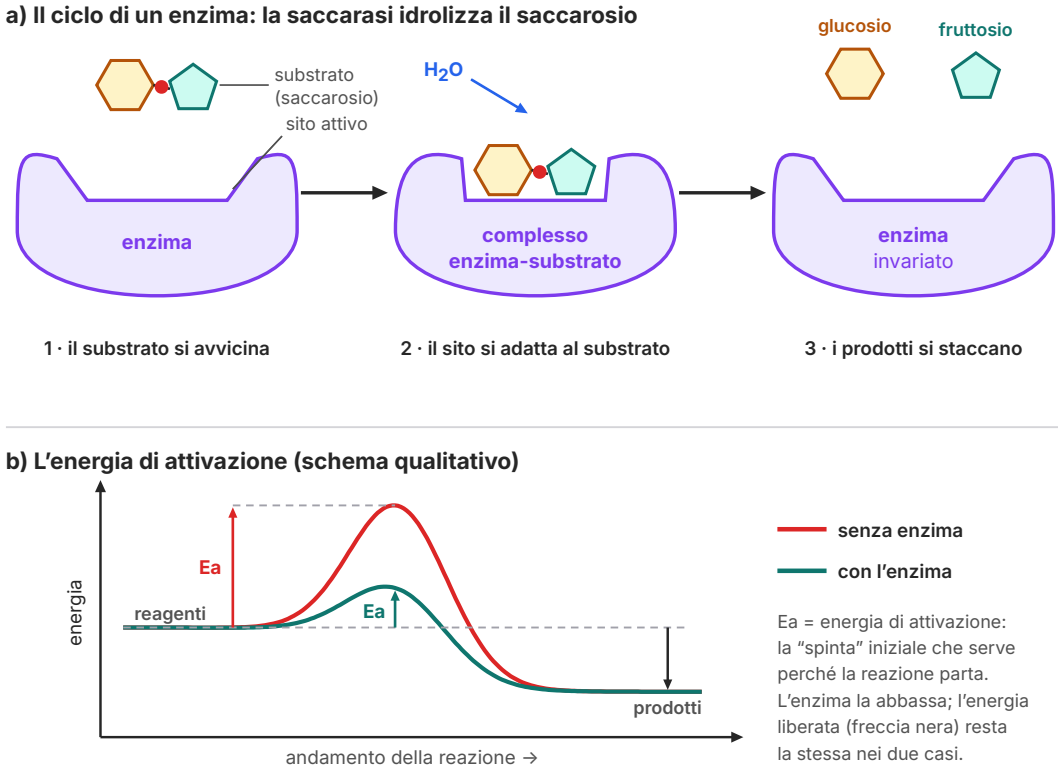



**Figura 5.2** a) La saccarasi idrolizza il saccarosio in glucosio e fruttosio; il sito attivo si adatta al substrato (adattamento indotto) e alla fine l'enzima è di nuovo libero. b) Schema qualitativo dell'energia durante una reazione, senza e con l'enzima. Le forme delle molecole sono schematiche e non in scala: un enzima è molto più grande del suo substrato.

### 5.2.3 Temperatura, pH e attività enzimatica

L'attività di un enzima, cioè la quantità di prodotto che forma in un certo tempo, dipende dalle condizioni. Se la temperatura sale, le particelle si muovono più velocemente (è il modello particellare di *Scienze naturali 1*) e si incontrano più spesso: l'attività cresce. Oltre un certo valore, però, l'agitazione termica deforma la proteina, il sito attivo perde la sua forma e l'enzima smette di funzionare: è la denaturazione, che hai osservato nel Capitolo 2 con l'albume cotto. Esiste dunque una **temperatura ottimale** alla quale l'attività è massima. Per molti enzimi umani è vi-

cina ai 37 °C; per gli enzimi dei batteri che vivono nelle sorgenti termali è molto più alta (Figura 5.3a).

Anche l'acidità conta. Il **pH** è una scala, da 0 a 14, che indica quanto una soluzione è acida (valori bassi) o basica (valori alti); il valore 7 corrisponde a una soluzione neutra, come l'acqua pura. Lo studierai in chimica nel secondo biennio. Ogni enzima ha un pH ottimale, adatto all'ambiente in cui lavora. L'amilasi della saliva, che comincia a digerire l'amido già in bocca, funziona meglio a pH vicino a 7; la pepsina, che digerisce le proteine nello stomaco, dà il meglio nel succo gastrico, molto acido, a pH intorno a 2 (Figura 5.3b). Lontano dal suo pH ottimale un enzima rallenta e, in condizioni estreme, si denatura.

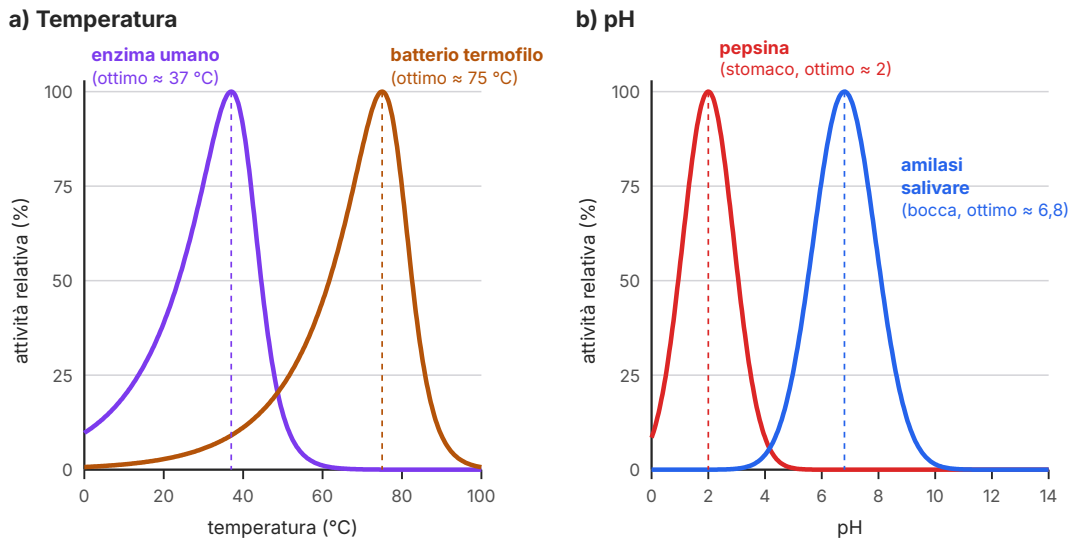



**Figura 5.3** Attività relativa, in percentuale del valore massimo, di un enzima umano e di un enzima di un batterio termofilo in funzione della temperatura (a), e della pepsina e dell'amilasi salivare in funzione del pH (b). Le curve sono illustrative, calcolate da un modello semplice; la posizione degli ottimi corrisponde a valori tipici.

Il freddo, invece, di solito non denatura gli enzimi: li rallenta soltanto. È uno dei motivi per cui il frigorifero conserva più a lungo i cibi: gli enzimi dei microrganismi e degli alimenti stessi lavorano più lentamente. Una febbre molto alta, al contrario, è pericolosa anche perché si avvicina alla temperatura alla quale alcune proteine del corpo cominciano a perdere la forma.

**COLLEGAMENTI**

**Enzimi in casa, in cucina e nella salute.** Molti detersivi per il bucato contengono proteasi, lipasi e amilasi, che scindono le macchie di proteine (uovo, sangue), di grasso e di amido: per questo lavano bene anche a temperature basse, alle quali gli enzimi lavorano senza denaturarsi. Il caglio, usato da secoli per fare il formaggio, contiene un enzima dello stomaco dei vitelli lattanti, la chimosina, che fa coagulare le proteine del latte; oggi la chimosina si ottiene anche da microrganismi.

La **lattasi** scinde il lattosio del latte in glucosio e galattosio, due zuccheri che l'intestino assorbe. In molte persone la produzione di lattasi diminuisce dopo l'infanzia: il lattosio non digerito arriva all'intestino crasso, dove i batteri lo fermentano producendo gas, e compaiono gonfiore e dolori. È l'**intolleranza al lattosio**. Il latte «senza lattosio» è latte trattato con lattasi: contiene già glucosio e galattosio, e per questo ha un sapore più dolce. Solo un medico può diagnosticare un'intolleranza: non affidarti al fai-da-te.

## 5.3 La fotosintesi

### 5.3.1 L'equazione della fotosintesi

Quasi tutta l'energia che fa funzionare i viventi sulla Terra entra nella biosfera attraverso un solo processo. La **fotosintesi** è la trasformazione con cui gli autotrofi fotosintetici usano l'energia della luce per produrre zuccheri a partire da diossido di carbonio e acqua, liberando ossigeno. Il suo bilancio complessivo si scrive così:

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \quad \text{(luce, clorofilla)}$$

Si legge: sei molecole di diossido di carbonio e sei molecole d'acqua, grazie all'energia luminosa assorbita dalla clorofilla, formano una molecola di glucosio e sei molecole di ossigeno. Come hai imparato in *Scienze naturali 1*, un'equazione bilanciata contiene a sinistra e a destra lo stesso numero di atomi di ogni elemento. La fotosintesi è una reazione endotermica: l'energia della luce resta immagazzinata come energia chimica nel glucosio.

L'equazione è un bilancio, non una singola reazione: nel cloroplasto avvengono decine di passaggi, ciascuno guidato da un enzima. Inoltre il glucosio è solo il modo convenzionale di scrivere il prodotto. La pianta trasforma gli zuccheri prodotti in saccarosio, che viaggia verso le altre parti della pianta, in amido di riserva, in cellulosa per le pareti cellulari e, con l'aggiunta di azoto e di altri elementi assorbiti dal suolo, in proteine, lipidi e acidi nucleici.

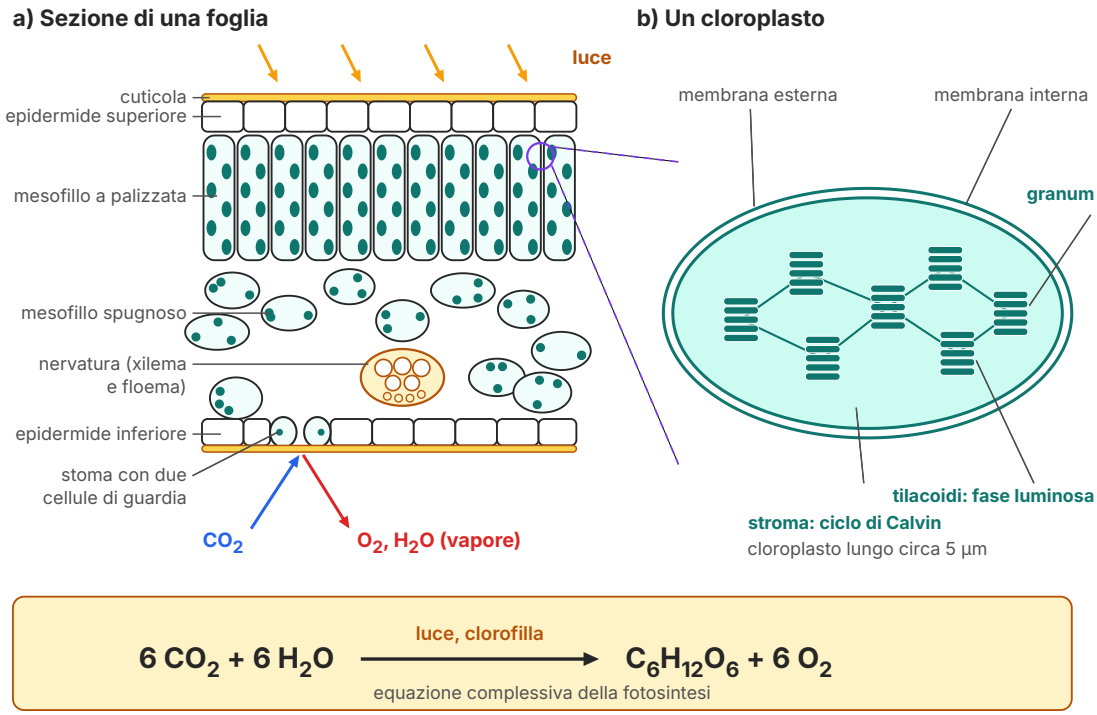



**Figura 5.4** a) Sezione di una foglia: gli stomi della pagina inferiore lasciano entrare il diossido di carbonio e uscire ossigeno e vapore acqueo; i cloroplasti (in verde) sono più numerosi nel mesofillo a palizzata. b) Un cloroplasto, con le sue due membrane, i tilacoidi impilati nei grana e lo stroma. In basso, l'equazione complessiva. Schema non in scala.

**ESEMPIO SVOLTO**

### Contare gli atomi nell'equazione della fotosintesi

**Problema.** Verifica che l'equazione $6\,CO_2 + 6\,H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$ è bilanciata.

**Soluzione.** Il coefficiente moltiplica tutti gli atomi della formula; l'indice vale solo per l'atomo che lo precede. A sinistra: carbonio $6 \times 1 = 6$; idrogeno $6 \times 2 = 12$; ossigeno $6 \times 2 + 6 \times 1 = 12 + 6 = 18$. A destra: carbonio 6; idrogeno 12; ossigeno $6 + 6 \times 2 = 6 + 12 = 18$.

**Risultato.** 6 atomi di C, 12 di H e 18 di O da entrambe le parti: l'equazione è bilanciata. Gli atomi non si creano e non si distruggono, si riorganizzano in molecole nuove, come prevede la legge di Lavoisier.

## 5.3.2 Dove avviene: foglie, stomi, cloroplasti

Nelle piante la fotosintesi avviene soprattutto nelle foglie, nelle cellule del mesofillo, ricchissime di cloroplasti (Capitolo 3). Il diossido di carbonio entra dall'aria attraverso gli **stomi**, piccole

aperture dell'epidermide della foglia delimitate da due cellule di guardia, che possono aprirle e chiuderle; dagli stomi escono l'ossigeno e il vapore acqueo. L'acqua arriva invece dalle radici, attraverso i vasi delle nervature (Figura 5.4). In molte piante gli stomi sono soprattutto sulla pagina inferiore della foglia. Le radici, il legno e molte altre parti non verdi della pianta non hanno cloroplasti e non fanno fotosintesi: ricevono gli zuccheri dalle foglie.

Nei cloroplasti si trova la **clorofilla**, il pigmento che assorbe soprattutto la luce rossa e quella blu e riflette il verde: per questo le foglie ci appaiono verdi. La clorofilla è inserita nelle membrane dei tilacoidi, i sacchetti appiattiti che formano le pile chiamate grana.

### 5.3.3 Le due fasi

La fotosintesi procede in due fasi collegate. Nella **fase luminosa**, sulle membrane dei tilacoidi, la clorofilla cattura l'energia della luce. Questa energia serve a scindere molecole d'acqua, liberando ossigeno, e a produrre ATP e una molecola che trasporta atomi di idrogeno (il NADPH). Nel **ciclo di Calvin**, che si svolge nello stroma, l'ATP e il NADPH prodotti dalla fase luminosa vengono usati per fissare il diossido di carbonio, cioè per inserirne il carbonio in molecole organiche, e costruire zuccheri. Le reazioni delle due fasi le studierai nel secondo biennio; qui basta ricordare che cosa avviene e dove.

Ne segue un fatto importante: l'ossigeno liberato dalla fotosintesi proviene dall'acqua, non dal diossido di carbonio. Il carbonio della $CO_2$, invece, finisce negli zuccheri. Dire che la pianta «trasforma la $CO_2$ in ossigeno» è quindi sbagliato.

### 5.3.4 I fattori limitanti

Quanto zucchero produce una foglia in un'ora? Dipende soprattutto da tre fattori: l'intensità della luce, la concentrazione del diossido di carbonio nell'aria e la temperatura, perché il ciclo di Calvin è guidato da enzimi. Se uno di questi fattori è scarso, frena l'intero processo anche quando gli altri abbondano: si chiama **fattore limitante**. All'ombra del sottobosco o all'alba il fattore limitante è di solito la luce; in una giornata di sole pieno è spesso la $CO_2$; in una mattina d'inverno può essere la temperatura. Anche l'acqua conta: una pianta assetata chiude gli stomi per non perdere vapore, e così la $CO_2$ non entra più. Nelle serre gli orticoltori talvolta arricchiscono l'aria di diossido di carbonio per accelerare la crescita delle piante.

APPROFONDIMENTO

**Approfondimento · Da dove viene la massa di un albero?** Nella prima metà del Seicento il medico fiammingo Jan Baptista van Helmont piantò un salice di 5 libbre in un vaso con 200 libbre di terra seccata al forno e per cinque anni lo innaffiò soltanto con acqua piovana. Alla fine il salice pesava circa 169 libbre, mentre la terra aveva perso appena 2 once (circa un ottavo di libbra). Van Helmont concluse che il legno si era formato dall'acqua: l'esperimento, pubblicato nel 1648, era ben controllato, ma la conclusione era incompleta, perché egli non poteva sapere che quasi tutta la materia della pianta viene dal diossido di carbonio dell'aria.

Nel 1771 l'inglese Joseph Priestley osservò che un rametto di menta, chiuso per qualche giorno sotto una campana di vetro in cui una candela si era spenta, «ripristinava» l'aria: una candela poteva bruciarvi di nuovo. Pochi anni dopo, nel 1779, l'olandese Jan Ingenhousz mostrò che le piante ripristinano l'aria soltanto alla luce, e solo nelle parti verdi.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

### Le bolle di ossigeno dell'*Elodea*

**Obiettivo.** Verificare come l'intensità della luce influisce sulla velocità della fotosintesi.

**Materiale.** Un rametto di *Elodea* (o di *Egeria*, piante acquatiche da acquario) lungo circa 8 cm; una provetta grande o un becher; acqua con un pizzico di bicarbonato di sodio, che fornisce diossido di carbonio; una lampada a LED, che scalda poco; un righello, un termometro, un cronometro; un foglio di carta stagnola.

1. Taglia in obliquo l'estremità del rametto e immergilo capovolto, con il taglio verso l'alto.
2. Poni la lampada a 10 cm, attendi 5 minuti e conta per 1 minuto le bolle che escono dal taglio. Ripeti tre volte e calcola la media.
3. Ripeti le misure con la lampada a 20, 30 e 40 cm, controllando ogni volta che la temperatura dell'acqua non sia cambiata.
4. Controllo: avvolgi la provetta nella carta stagnola e conta le bolle al buio.

**Variabili.** Indipendente: la distanza della lampada, cioè l'intensità della luce. Dipendente: il numero di bolle al minuto. Da tenere costanti: temperatura, rametto, quantità di bicarbonato.

**Sicurezza.** Tieni la lampada e i cavi lontani dagli schizzi d'acqua; lavati le mani alla fine.

**Risultato atteso.** Più la lampada è lontana, meno bolle si contano; al buio la produzione si ferma. Molto vicino alla lampada il numero di bolle smette di crescere: a quel punto il fattore limitante non è più la luce. Le bolle sono formate soprattutto da ossigeno; contarle è una misura approssimata, perché non hanno tutte la stessa dimensione.

**Domande.** Perché serve la prova al buio? Perché è meglio una lampada a LED che una lampadina a incandescenza?

APPROFONDIMENTO

**Approfondimento · Da dove viene l'ossigeno?** Nel 1941 gli statunitensi Samuel Ruben e Martin Kamen fornirono ad alghe unicellulari acqua contenente una forma più pesante, ma rara, dell'atomo di ossigeno (l'isotopo ossigeno-18), riconoscibile con uno strumento di misura. L'ossigeno liberato dalle alghe era «marcato» quando lo era l'acqua, non quando lo era il diossido di carbonio. Per mostrare che tutto l'$O_2$ viene dall'acqua, i biologi scrivono talvolta l'equazione in questa forma, anch'essa bilanciata:

$$6\ CO_2 + 12\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 6\ H_2O$$

Le 12 molecole d'acqua a sinistra forniscono i 12 atomi di ossigeno delle 6 molecole di $O_2$; l'ossigeno della $CO_2$ finisce nel glucosio e nella nuova acqua.

## 5.4 La respirazione cellulare

### 5.4.1 L'equazione della respirazione

Le molecole organiche prodotte dalla fotosintesi, o assunte con il cibo, contengono energia chimica, ma la cellula non può usarla così com'è: deve prima trasferirla all'ATP. Il modo più redditizio per farlo è la **respirazione cellulare**, la demolizione completa del glucosio, con l'ossigeno, fino a diossido di carbonio e acqua:

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{energia (ATP + calore)}$$

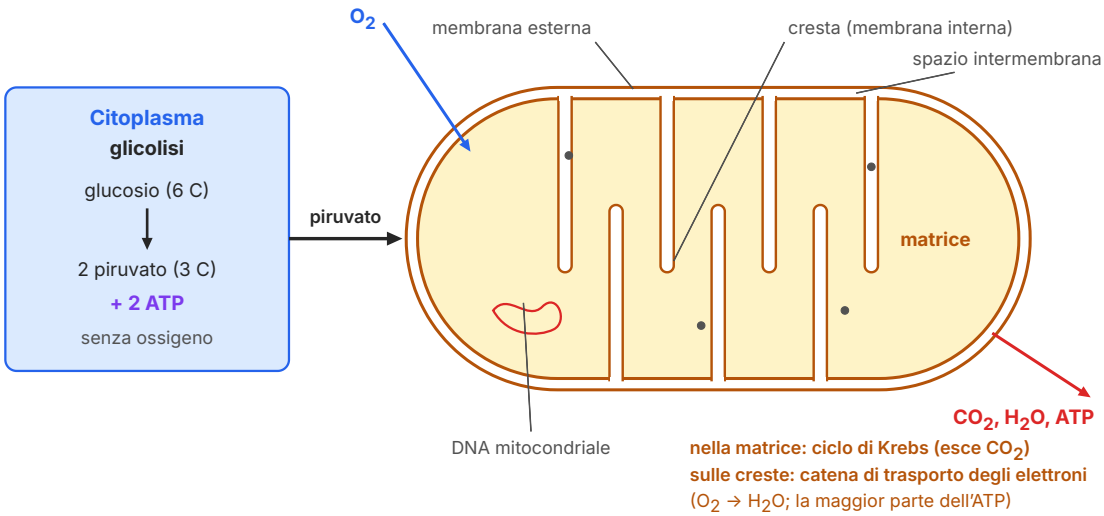
È l'equazione della fotosintesi letta al contrario, ed è anche l'equazione della combustione del glucosio. Ma c'è una differenza decisiva. Un cucchiaino di zucchero che brucia su una fiamma libera la sua energia tutta insieme, come luce e calore. Nella cellula la stessa demolizione avviene per piccoli passi, ciascuno controllato da un enzima, e una parte dell'energia viene trasferita all'ATP; il resto si disperde come calore che, negli uccelli e nei mammiferi, mantiene costante la temperatura del corpo.

La respirazione cellulare avviene in quasi tutti gli eucarioti, cioè animali, piante, funghi e protisti, e in molti procarioti, che non hanno mitocondri: in questi le stesse reazioni avvengono nel citoplasma e sulla membrana plasmatica. Le piante respirano giorno e notte, in tutte le cellule vive, comprese quelle delle foglie, che di giorno fanno anche la fotosintesi.

### 5.4.2 Le tappe: dal citoplasma al mitocondrio

La respirazione comincia nel citoplasma con la **glicolisi** (dal greco, «scissione dello zucchero»), una serie di reazioni che spezza ogni molecola di glucosio, a sei atomi di carbonio, in due molecole di **piruvato** (acido piruvico), a tre atomi di carbonio, con un piccolo guadagno: 2 molecole di ATP. La glicolisi non richiede ossigeno.

Se l'ossigeno è disponibile, il piruvato entra nei mitocondri (Figura 5.5). Nella matrice, una serie ciclica di reazioni chiamata ciclo di Krebs completa la demolizione: il carbonio esce sotto forma di $CO_2$, mentre gli atomi di idrogeno vengono consegnati a molecole trasportatrici. Infine, nella membrana interna ripiegata nelle creste, la catena di trasporto degli elettroni usa l'energia portata da queste molecole per produrre la maggior parte dell'ATP. Alla fine della catena l'ossigeno si unisce all'idrogeno e forma acqua. Ecco perché senza ossigeno la respirazione si ferma: l'ossigeno è l'ultimo «destinatario» della catena. Le cellule che consumano molta energia, come quelle dei muscoli e del cuore, contengono molti mitocondri.




$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \rightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{energia (ATP + calore)}$$

equazione complessiva della respirazione cellulare

**Figura 5.5** Le tappe della respirazione cellulare. La glicolisi avviene nel citoplasma; nel mitocondrio, il ciclo di Krebs nella matrice e la catena di trasporto degli elettroni nella membrana interna completano la demolizione del glucosio. Schema non in scala: un mitocondrio è lungo circa 1–2 µm.

**ERRORE FREQUENTE**

Non confondere la **respirazione cellulare** con la **respirazione polmonare**. La seconda è lo scambio di gas fra l'aria e il sangue che avviene nei polmoni: inspirando assumiamo l'ossigeno, espirando eliminiamo il diossido di carbonio. La prima è il processo chimico che, dentro ogni cellula, usa quell'ossigeno e produce quel diossido di carbonio. E attenzione: non è vero che le piante «respirano solo di notte». Respirano sempre; di giorno, in piena luce, la fotosintesi è molto più intensa e nasconde gli scambi della respirazione.

APPROFONDIMENTO

**Approfondimento · Quanto ATP per un glucosio?** La glicolisi produce 2 ATP per molecola di glucosio, il ciclo di Krebs altri 2; la maggior parte si forma nella catena di trasporto degli elettroni. Le stime attuali indicano un totale di **fino a circa 30–32 ATP** per molecola di glucosio, e il valore reale varia da cellula a cellula. Nei libri meno recenti si trovano 36 o 38 ATP: sono stime ormai superate, ottenute prima di misure più accurate del funzionamento della catena.

## 5.5 Le fermentazioni

Che cosa succede quando l'ossigeno manca? Molte cellule riescono ancora a ricavare un po' di energia dal glucosio con la glicolisi, che non ha bisogno di ossigeno. Devono però «scaricare» le molecole trasportatrici che la glicolisi ha caricato di idrogeno, altrimenti la glicolisi stessa si fermerebbe. Lo fanno con la **fermentazione**: il piruvato viene trasformato in un prodotto di scarto, senza usare ossigeno. La fermentazione non produce altro ATP oltre ai 2 della glicolisi: è una via rapida ma poco redditizia.

### 5.5.1 La fermentazione lattica

Nella **fermentazione lattica** il piruvato si trasforma in acido lattico ($C_3H_6O_3$). Il bilancio complessivo, dal glucosio all'acido lattico, è:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_3H_6O_3 + \text{energia (2 ATP)}$$

La compiono alcuni batteri, come i batteri lattici che trasformano il latte in yogurt: l'acido lattico che producono fa coagulare le proteine del latte, che si addensa e diventa acidulo, e ostacola la crescita di molti microrganismi indesiderati. La compiono anche le nostre cellule muscolari durante uno sforzo intenso, come uno scatto o una salita di corsa, quando l'ossigeno portato dal sangue non basta più. Il muscolo continua a lavorare per un po' con l'ATP della glicolisi, ma si affatica presto. Dopo lo sforzo, l'acido lattico (che nella cellula si trova come ione lattato) passa nel sangue e viene riutilizzato, soprattutto dal fegato e dal cuore.

ERRORE FREQUENTE

«Il giorno dopo la partita ho male alle gambe per l'acido lattico». Non è così: il lattato prodotto durante lo sforzo viene smaltito in tempi brevi dopo la fine dell'esercizio. I dolori muscolari che compaiono uno o due giorni dopo un allenamento insolito sono legati soprattutto a piccole lesioni delle fibre muscolari, che il corpo poi ripara.

### 5.5.2 La fermentazione alcolica

Nella **fermentazione alcolica**, tipica dei lieviti (funghi unicellulari, Capitolo 12), dal piruvato si formano alcol etilico (etanolo) e diossido di carbonio:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2 + \text{energia (2 ATP)}$$

Da millenni l'uomo sfrutta questa fermentazione. Nel pane, la $CO_2$ prodotta dal lievito di birra (*Saccharomyces cerevisiae*) resta intrappolata nell'impasto e lo fa lievitare; in cottura l'etanolo evapora. Nel vino il lievito fermenta gli zuccheri del mosto d'uva: l'etanolo resta, il gas si libera. Nella birra lo zucchero viene dall'amido dell'orzo germinato, il malto. Il lievito può vivere sia con l'ossigeno sia senza: quando l'ossigeno è disponibile è anche capace di respirare. Alcuni batteri, invece, vivono solo in assenza di ossigeno, che per loro è tossico: è il caso del batterio del tetano (Capitolo 12).

**Tabella 5.1** Respirazione cellulare e fermentazioni a confronto (per una molecola di glucosio).

| | Respirazione cellulare | Fermentazione lattica | Fermentazione alcolica |
|---|---|---|---|
| Ossigeno | necessario | non necessario | non necessario |
| Dove avviene (eucarioti) | citoplasma e mitocondri | citoplasma | citoplasma |
| Prodotti finali | $CO_2$ e $H_2O$ | acido lattico | etanolo e $CO_2$ |
| ATP prodotto | molto più che nelle fermentazioni | 2 | 2 |
| Esempi | quasi tutte le cellule eucariotiche | batteri lattici, muscoli sotto sforzo | lieviti (pane, vino, birra) |

La Tabella 5.1 riassume le differenze. Nelle fermentazioni la maggior parte dell'energia chimica del glucosio resta nei prodotti: l'etanolo, per esempio, brucia ancora con una bella fiamma. Nella respirazione il glucosio viene demolito fino a $CO_2$ e acqua, e la cellula ne ricava molta più energia.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

### Il lievito gonfia un palloncino

**Obiettivo.** Verificare che il lievito, fermentando lo zucchero, produce un gas, e studiare l'effetto della temperatura.

**Materiale.** Quattro bottigliette di plastica da 0,5 L; quattro palloncini; quattro bustine di lievito di birra secco; zucchero; tre contenitori per il bagnomaria (acqua con ghiaccio, acqua a circa 35 °C, acqua a circa 70 °C); un termometro; un metro da sarta; guanti o pinze.

1. In tre bottigliette versa 200 mL d'acqua, due cucchiaini di zucchero e una bustina di lievito; agita e infila subito un palloncino sul collo.
2. Metti una bottiglietta in ciascun bagnomaria: circa 5 °C, circa 35 °C, circa 70 °C.
3. Controllo: la quarta bottiglietta, a 35 °C, contiene acqua e lievito ma non zucchero.
4. Ogni 10 minuti, per 40 minuti, misura la circonferenza dei palloncini.

**Variabili.** Indipendente: la temperatura (e, nel controllo, la presenza dello zucchero). Dipendente: la circonferenza del palloncino. Costanti: quantità di acqua, zucchero e lievito.

**Sicurezza.** L'acqua a 70 °C scotta: maneggia le bottiglie con guanti o pinze.

**Risultato atteso.** A 35 °C il palloncino si gonfia di più; a 5 °C molto poco, perché gli enzimi lavorano lentamente; a 70 °C quasi per niente, perché il calore uccide le cellule del lievito e ne denatura gli enzimi. Nel controllo senza zucchero il palloncino resta quasi floscio.

**Domande.** Di quale gas si tratta? (Puoi riconoscerlo facendolo gorgogliare nell'acqua di calce, che diventa torbida.) Che odore senti aprendo la bottiglia a 35 °C, e perché?

## 5.6 Fotosintesi e respirazione: due processi complementari

Metti a confronto le equazioni complessive della fotosintesi e della respirazione cellulare: i prodotti dell'una sono i reagenti dell'altra. Il cloroplasto usa diossido di carbonio e acqua per produrre glucosio e ossigeno; il mitocondrio usa glucosio e ossigeno e restituisce diossido di carbonio e acqua (Figura 5.6). Nelle cellule vegetali i due organuli lavorano fianco a fianco; negli animali, che non hanno cloroplasti, il glucosio e l'ossigeno arrivano dalle piante, attraverso il cibo e l'aria.

C'è però una differenza fondamentale fra la materia e l'energia. La materia circola: gli stessi atomi di carbonio possono passare dall'aria a una foglia, da una foglia a un bruco, dal bruco di nuovo all'aria, e così via per milioni di anni. L'energia invece non circola. Entra come luce, diventa energia chimica degli zuccheri, poi ATP, poi lavoro, e alla fine calore, che si disperde e non può essere usato di nuovo per la fotosintesi. Per questo la vita sulla Terra dipende da un flusso continuo di energia dal Sole, mentre la materia viene riciclata: è un principio che ritroverai negli ecosistemi, nel Capitolo 15.

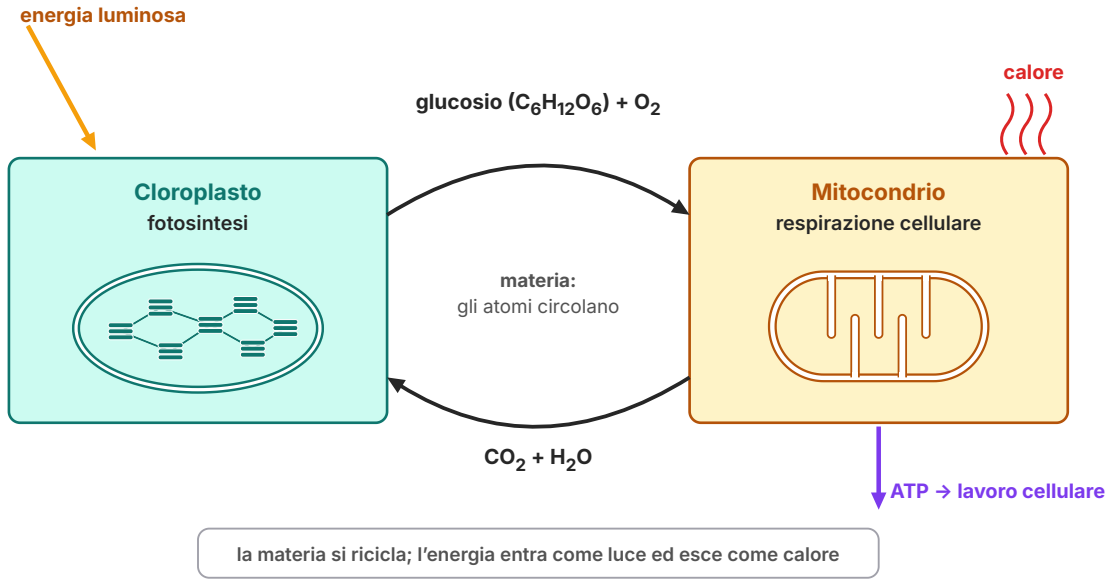



**Figura 5.6** Fotosintesi e respirazione cellulare sono complementari: la materia (carbonio, ossigeno, idrogeno) passa ciclicamente dall'una all'altra, mentre l'energia entra come luce, passa all'ATP e al lavoro cellulare e si disperde come calore. Schema non in scala.

Di giorno una pianta fa la fotosintesi e respira contemporaneamente. In piena luce la fotosintesi è molto più rapida, e nel complesso la pianta assorbe $CO_2$ e cede $O_2$. Di notte la fotosintesi si ferma ma la respirazione continua: la pianta assorbe ossigeno e cede diossido di carbonio. Un albero che cresce fissa in un anno più carbonio di quanto ne restituisca respirando: la differenza è il legno, le foglie e le radici che ha costruito.

**COLLEGAMENTI**

**Combustibili fossili e clima.** Carbone, petrolio e gas naturale si sono formati dai resti di organismi vissuti milioni di anni fa: il loro carbonio era stato fissato dalla fotosintesi. Bruciandoli liberiamo in pochi decenni la $CO_2$ sottratta all'atmosfera in tempi lunghissimi, e ne aumentiamo la concentrazione nell'aria, con le conseguenze sull'effetto serra che hai studiato in *Scienze naturali 1*. Proteggere le foreste e ridurre l'uso dei combustibili fossili sono fra gli obiettivi dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

**IN SINTESI**

**Ciclo dell'ATP:** ATP + $H_2O$ → ADP + $P_i$ + energia; la sintesi di ATP richiede energia.

**Fotosintesi** (cloroplasti, alla luce): 6 $CO_2$ + 6 $H_2O$ → $C_6H_{12}O_6$ + 6 $O_2$.

**Respirazione cellulare** (citoplasma e mitocondri, con $O_2$): $C_6H_{12}O_6$ + 6 $O_2$ → 6 $CO_2$ + 6 $H_2O$ + energia.

**Fermentazione lattica:** $C_6H_{12}O_6$ → 2 $C_3H_6O_3$ (2 ATP). **Alcolica:** $C_6H_{12}O_6$ → 2 $C_2H_5OH$ + 2 $CO_2$ (2 ATP).

## SINTESI

- Gli autotrofi producono molecole organiche da sostanze inorganiche, usando la luce (fotosintesi) o reazioni chimiche; gli eterotrofi le ricavano da altri organismi.
- L'energia dei viventi è energia chimica delle molecole organiche; a ogni trasformazione una parte si disperde come calore.
- L'ATP trasferisce energia: la sua idrolisi in ADP e fosfato libera l'energia per il lavoro cellulare; la sua ricostruzione richiede energia ricavata dal glucosio.
- Gli enzimi sono catalizzatori biologici, quasi sempre proteine: abbassano l'energia di attivazione e non vengono consumati.
- Il substrato si lega al sito attivo; la forma del sito spiega la specificità (modelli chiave-serratura e adattamento indotto).
- Ogni enzima ha una temperatura e un pH ottimali; il calore eccessivo e i pH estremi lo denaturano, il freddo lo rallenta.
- Fotosintesi: 6 $CO_2$ + 6 $H_2O$ → $C_6H_{12}O_6$ + 6 $O_2$, nei cloroplasti; la fase luminosa avviene nei tilacoidi, il ciclo di Calvin nello stroma.
- L'ossigeno della fotosintesi viene dall'acqua; luce, $CO_2$ e temperatura possono essere fattori limitanti.
- Respirazione cellulare: $C_6H_{12}O_6$ + 6 $O_2$ → 6 $CO_2$ + 6 $H_2O$ + energia; inizia con la glicolisi nel citoplasma e prosegue nei mitocondri. Le piante respirano sempre.
- Senza ossigeno, le fermentazioni lattica e alcolica ricavano dal glucosio solo i 2 ATP della glicolisi.
- Fotosintesi e respirazione sono complementari: la materia circola, l'energia scorre e si disperde come calore.

## ESERCIZI

### Comprendere e ricordare

1. ● Un organismo autotrofo:
   - **A.** si nutre di altri organismi o dei loro resti
   - **B.** produce le proprie molecole organiche a partire da sostanze inorganiche
   - **C.** non ha bisogno di energia per vivere
   - **D.** è sempre un organismo pluricellulare

2. ● Nella cellula l'ATP:
   - **A.** conserva energia per mesi, come l'amido
   - **B.** catalizza le reazioni al posto degli enzimi
   - **C.** trasporta l'ossigeno ai mitocondri
   - **D.** trasferisce energia dalle reazioni che la liberano a quelle che la richiedono

3. ● Un enzima:
   - **A.** accelera una reazione e alla fine è ancora intatto
   - **B.** viene consumato nella reazione che catalizza
   - **C.** rende possibile anche una reazione che non potrebbe mai avvenire
   - **D.** aumenta l'energia di attivazione della reazione

4. ●● La saccarasi scinde il saccarosio ma non il lattosio. Questo dipende:
   - **A.** dalla temperatura del corpo
   - **B.** dal fatto che il lattosio non è uno zucchero
   - **C.** dalla forma del sito attivo, adatta al saccarosio e non al lattosio
   - **D.** dal pH dello stomaco

5. ● Da quale molecola proviene l'ossigeno liberato dalla fotosintesi?
   - **A.** dal diossido di carbonio
   - **B.** dall'acqua
   - **C.** dal glucosio
   - **D.** dalla clorofilla

6. ●● La glicolisi:
   - **A.** avviene nel citoplasma e non richiede ossigeno
   - **B.** avviene nella matrice del mitocondrio
   - **C.** produce la maggior parte dell'ATP della respirazione
   - **D.** avviene solo nelle cellule vegetali

7. ●● Durante una corsa di 400 metri, quando l'ossigeno non basta più, le cellule muscolari:
   **A.** compiono la fermentazione alcolica
   **B.** smettono di produrre ATP
   **C.** producono ossigeno con la fotosintesi
   **D.** ricavano ATP dalla glicolisi e trasformano il piruvato in acido lattico

8. ●●● Una pianta in vaso viene chiusa per una notte, al buio, sotto una campana di vetro. Al mattino l'aria nella campana contiene, rispetto alla sera:
   **A.** più ossigeno e meno diossido di carbonio
   **B.** la stessa quantità di ossigeno e di diossido di carbonio
   **C.** meno ossigeno e più diossido di carbonio
   **D.** meno ossigeno e meno diossido di carbonio

### Vero o falso

9. ● Le piante respirano solo di notte, quando non fanno la fotosintesi.

10. ● Gli enzimi abbassano l'energia di attivazione delle reazioni che catalizzano.

11. ●● L'ossigeno che la fotosintesi libera nell'aria proviene dal diossido di carbonio.

12. ● La fermentazione alcolica dei lieviti produce etanolo e diossido di carbonio.

13. ●● Un enzima denaturato dal calore riprende sempre a funzionare quando la temperatura torna normale.

### Applicare

14. ● Nell'equazione della fermentazione lattica, $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_3H_6O_3$, conta gli atomi di C, H e O a sinistra e a destra e verifica che l'equazione sia bilanciata. Quante molecole di acido lattico si formano da 40 molecole di glucosio?

15. ●● Completa i coefficienti dell'equazione della fermentazione alcolica, $C_6H_{12}O_6 \rightarrow$ … $C_2H_5OH$ + … $CO_2$, e verifica il bilancio degli atomi.

16. ● Una pianta produce con la fotosintesi 5 molecole di glucosio. Quante molecole di $CO_2$ e di $H_2O$ consuma, e quante molecole di $O_2$ libera?

17. ●● Un lievito fermenta 500 molecole di glucosio. Quante molecole di etanolo, di diossido di carbonio e di ATP si formano?

18. ●●● Respirando glucosio, una cellula consuma 18 molecole di $O_2$. Quante molecole di glucosio ha demolito completamente? Quante molecole di $CO_2$ e di $H_2O$ ha prodotto?

19. ●● In un'esperienza con l'*Elodea* si contano 84 bolle in 4 minuti con la lampada a 15 cm e 30 bolle in 5 minuti con la lampada a 30 cm. Calcola il numero di bolle al minuto nei due casi e di quante volte diminuisce allontanando la lampada.

20. ● Nell'equazione $6\ CO_2 + 12\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 6\ H_2O$ conta gli atomi di ossigeno a sinistra e a destra. Quanti atomi di ossigeno contengono le molecole di $O_2$ prodotte?

### Leggere dati e figure

21. ● Osserva la Figura 5.3b. Qual è il pH ottimale della pepsina e quale quello dell'amilasi salivare? Quale dei due enzimi può lavorare nello stomaco? Che cosa accade all'amilasi salivare quando il cibo inghiottito arriva nello stomaco?

22. ●●● Osserva la Figura 5.3a. Qual è la temperatura ottimale dei due enzimi? Stima l'attività relativa dell'enzima umano a 50 °C e spiega perché diminuisce così rapidamente fra 40 e 50 °C, mentre l'enzima del batterio termofilo a 50 °C è ancora lontano dal suo massimo.

23. ●●● In un'esperienza con l'*Elodea* (dati di esempio) si sono ottenuti questi valori medi: lampada a 5 cm, 34 bolle al minuto; a 10 cm, 33; a 20 cm, 21; a 30 cm, 11; a 40 cm, 6. Descrivi l'andamento dei dati. Perché i valori a 5 e a 10 cm sono quasi uguali? Proponi un'esperienza per verificare la tua ipotesi.

### Indagare e argomentare

24. ●● Progetta un esperimento controllato per dimostrare che una pianta, al buio, produce diossido di carbonio. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, le variabili da tenere costanti e il controllo.

25. ●● Una persona con intolleranza al lattosio può bere latte «senza lattosio». Spiega come si produce questo latte, perché ha un sapore più dolce e perché il lattosio non digerito provoca gonfiore.

26. ●●● Spiega, usando ciò che sai sugli enzimi, perché una febbre molto alta è pericolosa e perché il frigorifero rallenta il deterioramento dei cibi senza però uccidere i microrganismi.

### Approfondimento

27. ●● Il salice di van Helmont passò da 5 libbre a 169 libbre e 3 once, mentre la terra perse circa 2 once (1 libbra = 16 once). Calcola l'aumento di massa del salice in once e la perdita della terra in percentuale di quell'aumento. Da dove proveniva, in realtà, quasi tutta la massa del salice?

28. ●● Nell'esperimento di Ruben e Kamen si fornisce a un'alga acqua marcata con ossigeno-18 e diossido di carbonio normale. In quale prodotto gassoso si ritrova l'ossigeno-18? Che cosa si osserva se invece si marca soltanto il diossido di carbonio?

29. ●●● Usa la stima di 30 ATP per glucosio nella respirazione cellulare. Quante molecole di glucosio deve fermentare un lievito per ricavare lo stesso ATP che otterrebbe respirando 10 molecole di glucosio?

## PER APPROFONDIRE

- [ALB] B. Alberts et al., *Essential Cell Biology*: i capitoli sugli enzimi e sulla produzione di energia nei mitocondri e nei cloroplasti, con figure molto chiare.
- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: le unità sul metabolismo energetico, la respirazione cellulare, le fermentazioni e la fotosintesi.
- [SAD] D. Sadava et al., *Life: The Science of Biology*: i capitoli sull'energia, gli enzimi e il metabolismo, con molti esperimenti storici descritti passo per passo.

# Glossario del capitolo

**Adattamento indotto**
Modello del funzionamento degli enzimi (Koshland, 1958): il sito attivo cambia leggermente forma quando il substrato vi si lega, adattandosi a esso.

**ADP**
Adenosina difosfato: la molecola che si forma quando l'ATP perde un gruppo fosfato; con un fosfato e dell'energia viene ritrasformata in ATP.

**Autotrofo**
Organismo che produce le proprie molecole organiche a partire da sostanze inorganiche, usando l'energia della luce o di reazioni chimiche.

**Catalizzatore**
Sostanza che accelera una reazione chimica senza essere consumata.

**Ciclo di Calvin**
Insieme di reazioni della fotosintesi che avviene nello stroma del cloroplasto: usa ATP e NADPH per fissare il diossido di carbonio e produrre zuccheri.

**Clorofilla**
Pigmento verde dei cloroplasti, inserito nelle membrane dei tilacoidi, che assorbe l'energia della luce.

**Energia di attivazione**
Energia iniziale necessaria perché una reazione chimica cominci; gli enzimi la abbassano.

**Enzima**
Catalizzatore biologico, quasi sempre una proteina, che accelera una reazione specifica della cellula.

**Eterotrofo**
Organismo che ricava le molecole organiche nutrendosi di altri organismi o dei loro resti.

**Fase luminosa**
Prima fase della fotosintesi, nelle membrane dei tilacoidi: la luce assorbita dalla clorofilla serve a scindere l'acqua, liberando ossigeno, e a produrre ATP e NADPH.

**Fattore limitante**
Il fattore (luce, $CO_2$, temperatura…) presente in quantità più scarsa, che frena la velocità di un processo come la fotosintesi.

**Fermentazione**
Via metabolica che, senza ossigeno, ricava dal glucosio 2 ATP con la glicolisi e trasforma il piruvato in un prodotto di scarto: acido lattico (lattica) o etanolo e $CO_2$ (alcolica).

**Fotosintesi**
Processo con cui gli autotrofi fotosintetici usano l'energia della luce per produrre zuccheri da $CO_2$ e acqua, liberando ossigeno.

**Glicolisi**
Prima tappa della demolizione del glucosio, nel citoplasma: una molecola di glucosio diventa due di piruvato, con un guadagno di 2 ATP; non richiede ossigeno.

**Respirazione cellulare**
Demolizione completa del glucosio con l'ossigeno fino a $CO_2$ e acqua, nel citoplasma e nei mitocondri, con produzione di ATP; diversa dalla respirazione polmonare.

**Scala del pH**
Scala da 0 a 14 che indica quanto una soluzione è acida (valori bassi) o basica (valori alti); 7 è neutro.

**Sito attivo**
Regione di un enzima in cui si lega il substrato e avviene la reazione.

**Stoma**
Piccola apertura dell'epidermide della foglia, delimitata da due cellule di guardia, attraverso cui passano $CO_2$, ossigeno e vapore acqueo.

**Substrato**
Sostanza su cui agisce un enzima.

# Soluzioni

**1.** B. Gli autotrofi (piante, alghe, cianobatteri, alcuni batteri chemiosintetici) costruiscono molecole organiche da $CO_2$ e acqua; esistono anche autotrofi unicellulari.

**2.** D. L'ATP è una «moneta» energetica, riciclata di continuo; le riserve a lungo termine sono amido, glicogeno e grassi.

**3.** A. Un catalizzatore accelera la reazione senza essere consumato; abbassa (non aumenta) l'energia di attivazione e non rende possibili reazioni impossibili.

**4.** C. È la specificità: il sito attivo ha una forma adatta a un solo substrato o a pochi.

**5.** B. L'$O_2$ viene dalla scissione dell'acqua nella fase luminosa.

**6.** A. La glicolisi avviene nel citoplasma di tutte le cellule, senza ossigeno, e produce solo 2 ATP per glucosio.

**7.** D. È la fermentazione lattica: la glicolisi fornisce 2 ATP per glucosio e il piruvato diventa acido lattico.

**8.** C. Al buio la pianta non fa fotosintesi ma respira: consuma $O_2$ e produce $CO_2$.

**9.** F. Le piante respirano giorno e notte; di giorno, in piena luce, la fotosintesi è più intensa della respirazione.

**10.** V.

**11.** F. L'ossigeno liberato proviene dall'acqua; il carbonio della $CO_2$ finisce negli zuccheri.

**12.** V.

**13.** F. Di solito la denaturazione da calore è irreversibile (come per l'albume cotto); è il freddo che rallenta gli enzimi senza danneggiarli.

**14.** Sinistra: C 6, H 12, O 6. Destra: $2 \times C_3H_6O_3$ = C 6, H 12, O 6: bilanciata. Da 40 molecole di glucosio si formano $40 \times 2 = 80$ molecole di acido lattico.

**15.** $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2$. Sinistra: C 6, H 12, O 6. Destra: C $2 \times 2 + 2 \times 1 = 6$; H $2 \times 6 = 12$; O $2 \times 1 + 2 \times 2 = 6$.

**16.** Per ogni glucosio servono 6 $CO_2$ e 6 $H_2O$ e si liberano 6 $O_2$: per 5 glucosio, 30 molecole di $CO_2$, 30 di $H_2O$ e 30 di $O_2$.

**17.** Ogni glucosio dà 2 etanolo, 2 $CO_2$ e 2 ATP: $500 \times 2 = 1000$ molecole di etanolo, 1000 di $CO_2$, 1000 di ATP.

**18.** Ogni glucosio consuma 6 $O_2$: $18 : 6 = 3$ molecole di glucosio. Prodotti: $3 \times 6 = 18$ molecole di $CO_2$ e 18 di $H_2O$.

**19.** A 15 cm: $84 : 4 = 21$ bolle al minuto. A 30 cm: $30 : 5 = 6$ bolle al minuto. Rapporto $21 : 6 = 3{,}5$: le bolle diminuiscono di 3,5 volte.

**20.** Sinistra: $6 \times 2 + 12 \times 1 = 24$ atomi di O. Destra: 6 (glucosio) + $6 \times 2$ ($O_2$) + $6 \times 1$ ($H_2O$) = 24. Le 6 molecole di $O_2$ contengono 12 atomi di ossigeno, tanti quanti ne portano le 12 molecole d'acqua dei reagenti.

**21.** Pepsina: ottimo a pH ≈ 2; amilasi salivare: ottimo a pH ≈ 6,8. Nello stomaco, molto acido, lavora la pepsina; l'amilasi salivare, a pH ≈ 2, ha un'attività quasi nulla e smette di digerire l'amido.

**22.** Ottimi: circa 37 °C per l'enzima umano e circa 75 °C per quello del batterio termofilo. A 50 °C l'enzima umano ha un'attività di circa il 15 % del massimo (lettura approssimata del grafico; sono accettabili valori fra il 10 e il 20 %). Oltre l'ottimo l'agitazione termica denatura la proteina e il sito attivo perde la forma; l'enzima del termofilo ha una struttura più stabile, che si denatura solo a temperature molto più alte.

**23.** Le bolle diminuiscono quando la lampada si allontana (meno luce), da 33 a 6 bolle al minuto fra 10 e 40 cm; al buio ci si aspetta circa zero. Fra 5 e 10 cm i valori sono quasi uguali: la luce non è più il fattore limitante, e la velocità è frenata da un altro

fattore, probabilmente la $CO_2$ disciolta o la temperatura. Verifica: a 5 cm si ripetono le misure con quantità crescenti di bicarbonato (temperatura costante); se le bolle aumentano, il fattore limitante era la $CO_2$.

**24.** Traccia: due recipienti chiusi uguali con acqua di calce (o un indicatore di $CO_2$), in uno una pianta, nell'altro niente (controllo), entrambi al buio e alla stessa temperatura; variabile indipendente: presenza della pianta; variabile dipendente: intorbidimento dell'acqua di calce (o cambio di colore dell'indicatore); costanti: volume, temperatura, durata, buio. Si può aggiungere un terzo recipiente con la pianta alla luce. Atteso: torbido solo con la pianta al buio, perché respira senza fare fotosintesi.

**25.** Traccia: al latte si aggiunge l'enzima lattasi, che idrolizza il lattosio in glucosio e galattosio; questi monosaccaridi hanno un sapore più dolce del lattosio e sono assorbiti dall'intestino. Senza lattasi il lattosio arriva all'intestino crasso, dove i batteri lo fermentano producendo gas: da qui gonfiore e dolori.

**26.** Traccia: gli enzimi sono proteine con una forma precisa; una temperatura molto alta (oltre i 41–42 °C circa) può cominciare a denaturarne alcuni, con danni irreversibili alle funzioni delle cellule. Il freddo invece non denatura gli enzimi, li rallenta: nel frigorifero i microrganismi e gli enzimi degli alimenti lavorano più lentamente, ma riprendono quando il cibo torna a temperatura ambiente.

**27.** Aumento del salice: 169 libbre e 3 once − 5 libbre = 164 libbre e 3 once = 164 × 16 + 3 = 2627 once. La terra perse 2 once: 2 : 2627 × 100 ≈ 0,08 % dell'aumento. Quasi tutta la massa veniva dal diossido di carbonio dell'aria (fissato con la fotosintesi) e dall'acqua.

**28.** L'ossigeno-18 si ritrova nell'$O_2$ liberato, perché l'ossigeno gassoso viene dall'acqua. Se si marca solo la $CO_2$, l'$O_2$ liberato non è marcato: l'ossigeno-18 finisce nel glucosio e nell'acqua che si forma.

**29.** Respirando 10 glucosio: 10 × 30 = 300 ATP. Con la fermentazione ogni glucosio dà 2 ATP: 300 : 2 = 150 molecole di glucosio, cioè 15 volte di più.