



**Compendio di Biologia**

**Dott. Giovanni Benelli**

**Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-  
ambientali**

**Università di Pisa**

**Giugno 2019**

# Capitolo 1: Chimica della vita

## Generalità su struttura e funzione delle macromolecole biologiche

### Carboidrati

I carboidrati sono composti chimici costituiti da carbonio, idrogeno e ossigeno. Molto abbondanti in natura, sono caratterizzati da sapore dolce. I carboidrati più semplici, formati da una sola molecola, sono detti monosaccaridi, includono:

- ribosio e desossiribosio (formati da 5 atomi di carbonio e componenti degli acidi nucleici)
- glucosio (C6, principale fonte di energia)
- fruttosio (C6, contenuto nella frutta)
- galattosio (C6, tipico del latte)

Varie molecole di monosaccaridi possono unirsi tra loro per dare un disaccaride (formato da 2 molecole di zucchero). Alcuni degli esempi più importanti sono:

- glucosio + fruttosio = saccarosio (zucchero da cucina)
- glucosio + galattosio = lattosio (lo possiamo trovare nel latte e nei latticini)

I carboidrati formati da 20 o più unità di monosaccaridi sono definiti polisaccaridi. Alcuni polisaccaridi sono utilizzati come riserve di zuccheri semplici per gli organismi. Per esempio, le piante immagazzinano lo zucchero in eccesso sotto forma di amido, che è formato da molte unità di glucosio. Gli animali fanno scorta di zucchero immagazzinandolo come glicogeno nel fegato. Altri polisaccaridi sono rappresentati da materiali che hanno la funzione di sostenere le cellule o l'intero organismo. Un esempio molto importante è la cellulosa, la principale componente del legno.

Le funzioni svolte dai carboidrati all'interno dell'organismo sono:

- Funzione energetica: forniscono all'organismo l'energia necessaria a svolgere tutte le sue funzioni.
- Strutturale: costituiscono strutture essenziali per gli organismi viventi (funzione di sostegno, soprattutto nei vegetali, grazie alla presenza di cellulosa)
- Funzione protettiva: costituiscono l'esoscheletro degli invertebrati (esempio: chitina, molto diffusa negli artropodi)

Le piante, che sono organismi autotrofi, producono carboidrati (glucosio) partendo da componenti inorganici quali acqua e anidride carbonica, mediante il processo di fotosintesi clorofilliana (si veda il capitolo successivo dedicato a questo argomento). Gli animali, che sono organismi eterotrofi, soddisfano il fabbisogno energetico nutrendosi di alimenti che contengono carboidrati.

## **Lipidi**

I lipidi sono costituiti da lunghe catene di atomi di carbonio, idrogeno e ossigeno, sono untuosi al tatto e sono insolubili in acqua.

Le funzioni dei lipidi comprendono:

- riserva energetica (es. molecole ad elevato contenuto energetico; accumulate nel tessuto adiposo)
- protezione meccanica per alcuni organi (es. cuore, fegato, reni)
- isolante termico (es. grasso animale)
- impermeabilizzante (es. cere sulle penne degli uccelli)
- funzione strutturale (es. nelle membrane cellulari sono presenti fosfolipidi)
- precursori di importanti molecole biologiche (es. ormoni, vitamine)

E' possibile classificare i lipidi in quattro grandi famiglie: trigliceridi, fosfolipidi, colesterolo e steroidi, cere.

I trigliceridi, noti comunemente come grassi, sono composti da una molecola di glicerolo e tre catene di acidi grassi. Possono essere di origine animale (es. strutto) o vegetale (es. olio di arachidi). I secondi sono tipicamente più ricchi di grassi insaturi, e quindi più salutari, rispetto ai trigliceridi presenti negli alimenti di origine animale. In breve, sono considerati trigliceridi i comuni grassi ed oli, che costituiscono una fonte energetica superiore rispetto ai carboidrati e si accumulano nel tessuto adiposo (grasso sottocutaneo), in tale sede svolgono anche la funzione di isolanti termici.

I fosfolipidi sono formati da una testa idrofila, composta da glicerolo e gruppo fosfato, e due code idrofobe costituite da due catene di acidi grassi. I fosfolipidi, insieme alle proteine di membrana, sono i principali costituenti delle membrane cellulari.

Il colesterolo svolge alcune funzioni molto importanti per il metabolismo. E' infatti un costituente delle membrane cellulari delle cellule animali, un precursore della vitamina D (cruciale per la crescita ossea e dei denti), è inoltre un composto di partenza per la sintesi

degli acidi biliari (che sono prodotti dal fegato). Il colesterolo può essere sintetizzato dalle cellule (origine endogena) o introdotto con l'alimentazione (origine esogena) ed è utilizzato nella sintesi degli steroidi, una famiglia di composti chimici tra cui troviamo gli ormoni sessuali (es. testosterone, estradiolo, progesterone).

E' importante ricordare che il colesterolo in eccesso nel sangue si accumula sulle pareti interne delle arterie provocando la formazione di placche che causano arteriosclerosi. Inoltre, il colesterolo in eccesso nel fegato si accumula dando origine ai calcoli biliari.

Infine le cere sono composti chimici insolubili in acqua che svolgono una rilevante azione di rivestimento protettivo ed impermeabilizzante. Alcuni esempi pratici: le cere rivestono le penne degli uccelli, vengono utilizzate da alcuni imenotteri sociali (in particolare le api) per costruire il favo, costituiscono la cuticola delle foglie e conferiscono lucentezza ai frutti.

### **Aminoacidi e proteine**

Le proteine sono catene (polimeri) di aminoacidi, rappresentano il più abbondante materiale biologico negli organismi animali e sono essenziali per la struttura e le funzioni degli esseri viventi. Assolvono diverse funzioni, tra cui quella strutturale (es. cheratina forma peli e capelli, il collagene è un componente di pelle, tendini e legamenti, proteine della seta sono utilizzate per costruire tele e bozzoli negli insetti e negli aracnidi), di contrazione (es. actina e miosina costituiscono i muscoli e sono responsabili della contrazione muscolare), di trasporto (es. l'emoglobina trasporta ossigeno ed anidride carbonica nei globuli rossi del sangue).

Come evidenziato sopra le proteine sono costituite da unità dette aminoacidi. Un aminoacido è un composto chimico caratterizzato da un gruppo amminico ( $-NH_2$ ), un gruppo carbossilico ( $-COOH$ ) ed un gruppo -R specifico per ogni aminoacido. In natura sono noti venti aminoacidi diversi. Il nostro organismo non è in grado di sintetizzare 8 di questi, detti aminoacidi essenziali, che devono essere pertanto introdotti con la dieta.

Gli aminoacidi sono tenuti insieme mediante un legame peptidico. Tale legame ha luogo tra il gruppo  $-COOH$  di un aminoacido ed il gruppo  $-NH_2$  dell'amminoacido successivo accompagnato dalla perdita di una molecola di acqua.

Le informazioni per la sintesi delle diverse proteine sono contenute nel DNA e tale processo avviene secondo la seguente sequenza di eventi:

- 1) Trascrizione del DNA in mRNA;

- 2) Traslocazione dell'mRNA dal nucleo nel citoplasma;
- 3) Traduzione dell'mRNA sui ribosomi;
- 4) Sintesi delle proteine.

E' importante notare che i filamenti proteici non rimangono lineari. Rispondendo alle sollecitazioni prodotte dalle loro polarità interne si ripiegano su se stessi formando strutture a diverso grado di complessità. Riguardo la struttura delle proteine, sono noti quattro livelli strutturali principali:

- Struttura primaria, costituita dalla successione degli amminoacidi.
- Struttura secondaria, definita dai tipi di avvolgimenti (stabilizzati da ponti H) che interessano tratti del filamento proteico (eliche, foglietti e curve).
- Struttura terziaria, definita da come il filamento proteico si ripiega su se stesso in una conformazione compatta di tipo globulare che contiene le diverse strutture secondarie.
- Struttura quaternaria, generata da diverse molecole proteiche con struttura terziaria globulare che si uniscono tra loro.

### **Nucleotidi e acidi nucleici**

Gli acidi nucleici sono catene lineari costituiti da una sequenza di nucleotidi e vengono distinti in acido desossiribonucleico (DNA) e acido ribonucleico (RNA). I nucleotidi sono formati da zucchero a cinque atomi di carbonio (ribosio nell'RNA e desossiribosio nel DNA), un gruppo fosfato e una base azotata. Le basi azotate sono 4: adenina (A), guanina (G), timina (T), citosina (C) e uracile (U). Quest'ultimo è presente solo nell'RNA dove sostituisce la timina.

Dal punto di vista funzionale, il DNA è il materiale genetico della cellula. Esso è formato da due filamenti uniti tra loro e avvolti a spirale in modo da formare una doppia elica. L'accoppiamento dei due filamenti è possibile grazie alla formazione di ponti a idrogeno tra le basi azotate. L'abbinamento fra i nucleotidi può realizzarsi soltanto tra basi complementari, cioè fra adenina e timina, mediante due ponti a idrogeno (A=T), o tra citosina e guanina, mediante tre ponti a idrogeno (C≡G).

L'RNA rappresenta il tramite attraverso cui le istruzioni del DNA si traducono nella sintesi delle proteine. Sono noti tre tipi di RNA, tutti coinvolti nella sintesi proteica:

- RNA ribosomiale (rRNA) che va a formare i ribosomi, organuli cellulari che traducono le sequenze nucleotidiche in sequenze proteiche.
- RNA messaggero (mRNA) che trascrive le informazioni contenute nel DNA e le trasferisce ai ribosomi per la traduzione.
- RNA di trasporto, detto anche transfer RNA (tRNA) che porta gli amminoacidi ai ribosomi per la sintesi proteica.

### **Il ruolo degli enzimi**

Gli enzimi sono catalizzatori biologici, ovvero molecole in grado di riconoscere, legarsi e modificare chimicamente una sostanza chimica, aumentando la velocità con cui la reazione avviene. Come tutti i catalizzatori, gli enzimi non si consumano durante la reazione, ma si ritrovano inalterati al termine di ciascun ciclo di catalisi. E' per questo motivo che essi risultano efficaci anche quando presenti a concentrazioni molto basse.

Ogni enzima riconosce in modo specifico il suo substrato. Esiste quindi un enzima specifico per ogni reazione che deve avvenire in una cellula. Senza gli enzimi la maggior parte delle reazioni all'interno delle cellule sarebbe estremamente lenta, a tal punto da non essere compatibile con la sopravvivenza dell'organismo. In aggiunta, gli enzimi sono lo strumento attraverso il quale la cellula controlla in un dato momento quali reazioni devono essere eseguite e quali no. In tal modo gli enzimi funzionano come veri e propri interruttori biologici: quando l'enzima è presente la reazione avviene, quando l'enzima è eliminato la reazione rallenta al punto da produrre effetti trascurabili.

E' noto che gli enzimi generalmente catalizzano le reazioni legandosi temporaneamente con altre molecole dette coenzimi o cofattori. Frequentemente, i coenzimi non sono molecole proteiche. La parte non proteica di una proteina composta è detta gruppo prostetico. Molti coenzimi derivano chimicamente dalle vitamine, molecole indispensabili al metabolismo che devono essere introdotte in piccole dosi tramite la dieta. Mentre gli enzimi riconoscono la sostanza da catalizzare (caratteristica nota come specificità di substrato), il coenzima effettua su di essa la modificazione chimica, mostrando quindi specificità di azione. E' interessante notare come uno stesso coenzima possa legarsi ad enzimi diversi, conservando la sua specificità di azione ed effettuando così la stessa reazione su substrati diversi.

Da un punto di vista terminologico, gli enzimi hanno desinenza –asi. Nella tabella riportata qui sotto si riassumono sinteticamente le principali reazioni catalizzate dai diversi tipi di enzimi:

<b>Famiglia</b>	<b>Reazione catalizzata</b>
Ossidoreduttasi	Ossidoriduzioni
Transferasi	Trasferimento gruppi chimici
Idrolasi	Idrolisi
Liasi	Addizione a doppio legame
Isomerasi	Conversione tra isomeri
Ligasi	Formazione legami con consumo ATP

## Capitolo 2: La cellula

### Cellule procariotiche ed eucariotiche: differenze e principali strutture cellulari

#### Generalità

La cellula è l'unità strutturale e funzionale degli organismi viventi. E' interessante notare come in tutti i viventi le cellule condividano alcune caratteristiche molto importanti. Infatti, tutte le cellule sono delimitate da una membrana esterna, detta membrana plasmatica (anche nota come plasmalemma) che racchiude il citoplasma. Quest'ultimo è formato da una componente liquida, il citosol, contenente acqua, sali minerali e molecole organiche, in cui si trovano immerse strutture dette organuli (o organelli) ciascuna preposta ad una particolare funzione. Le cellule, in base alla loro organizzazione interna, possono essere distinte in due grandi categorie: cellule procarioti e cellule eucarioti.

La cellula procariote è caratteristica degli organismi unicellulari appartenenti al regno delle monere (batteri ed alghe azzurre). Queste cellule sono relativamente piccole con dimensioni dell'ordine di 1  $\mu\text{m}$  ed hanno una struttura interna assai semplice. Gli unici organuli presenti sono i ribosomi. Nei procarioti il DNA si trova infatti libero nel citoplasma senza essere racchiuso da una membrana nucleare. Le cellule procarioti formano solo organismi unicellulari detti anch'essi procarioti. Sono le prime forme di vita comparse sulla terra (3,9 miliardi di anni fa!).

La cellula eucariote è tipica di tutti gli altri organismi viventi, unicellulari e pluricellulari: protozoi, piante, i funghi e animali. La sua dimensione è dell'ordine di 10  $\mu\text{m}$ . Nella cellula eucariote il DNA è racchiuso da una membrana, formando così un particolare organulo chiamato nucleo. Tale cellula inoltre mostra la presenza di organuli immersi nel citoplasma, ognuno deputato a svolgere una particolare funzione. Le prime tracce di organismi unicellulari eucarioti risalgono a circa 1,4 miliardi di anni fa. Gli organismi formati da cellule eucarioti sono noti come eucarioti.

#### Cellula animale

Le cellule eucariotiche animali sono avvolte dalla membrana plasmatica, che racchiude il citoplasma, nel quale si trovano il nucleo e svariati organuli. Il nucleo è il depositario



dell'informazione necessaria al funzionamento e alla riproduzione della cellula: esso contiene i filamenti di DNA organizzati in cromosomi. Il nucleo è avvolto da una membrana nucleare, interrotta in vari punti da pori per lo scambio di sostanze (particolarmente l'RNA), con il citoplasma. Nel citoplasma delle cellule eucariotiche sono presenti strutture di vario tipo, che svolgono funzioni ben precise.

Tali strutture sono il reticolo endoplasmatico, l'apparato di Golgi, i ribosomi, i mitocondri, i lisosomi, le ciglia e i flagelli. Di seguito si riportano le principali caratteristiche di ogni tipologia di organello.

Il reticolo endoplasmatico è una complessa rete di tubuli, sacchi e canali comunicanti, che dividono il citoplasma in ampi compartimenti, costituendo l'involucro nucleare. Il reticolo endoplasmatico è di due tipi: il tipo ruvido è una continuazione della membrana nucleare e porta sulla superficie esterna numerosissimi ribosomi, dove avviene la sintesi delle proteine. Il reticolo endoplasmatico liscio è invece privo di ribosomi ed è responsabile della sintesi dei lipidi.

L'apparato di Golgi è costituito da tubuli appiattiti al centro e rigonfi alle estremità, impilati l'uno sull'altro e terminanti a fondo cieco, dove vengono modificati e accumulati materiali vari quali le proteine e i lipidi sintetizzati nel reticolo endoplasmatico. Qui viene completata la sintesi di tali sostanze che verranno poi trasportate in altre parti della cellula o espulse.

Come anticipato sopra, i ribosomi sono la sede della sintesi proteica. Sono costituiti da due sub-unità e possono essere associati al reticolo endoplasmatico ruvido oppure liberi nel citoplasma.

I mitocondri, dalla tipica forma a fagiolo, sono preposti al rifornimento energetico della cellula, essendo la sede della respirazione cellulare (si veda il capitolo successivo dedicato alla respirazione), un processo che produce energia tramite la demolizione di molecole di zucchero (glucosio).

I lisosomi sono vescicole contenente enzimi idrolitici. Un lisosoma è formato dalla fusione di vescicole idrolasiche del Golgi con vescicole di endocitosi (endosomi). Il lisosoma è ricco di enzimi digestivi in grado di degradare molecole e strutture presenti all'interno della cellula, ma anche molecole estranee ingerite dalla cellula, nei loro costituenti elementari, che possono poi essere riutilizzati in altro modo o espulsi. La membrana del lisosoma contiene proteine di trasporto per esportare nel citosol i prodotti della digestione e grandi

quantità di glucidi legati a lipidi o a proteine della faccia non citosolica come protezione contro i propri enzimi.

Infine, le ciglia e i flagelli sono dei prolungamenti della membrana plasmatica. Le prime spostano il fluido sulla superficie di una cellula ferma mentre i flagelli permettono alla cellula di muoversi in un liquido. Ne esistono di numerose tipologie e forme caratteristiche, il lettore interessato troverà numerosi dettagli al riguardo in Rodomontano (2019).

## **Cellula vegetale**

Le cellule eucariotiche vegetali possiedono i medesimi organuli delle cellule animali, in aggiunta in esse possiamo notare anche alcune strutture esclusive, con particolare riferimento alla parete cellulare e ad organuli come cloroplasti, cromoplasti e vacuoli.

### Parete cellulare

La parete cellulare costituisce uno strato rigido e robusto, posto all'esterno della membrana cellulare. È composta da sottili filamenti di cellulosa (vedi capitolo precedente) che, unendosi tra loro, formano filamenti più spessi. Le molecole si dispongono parallelamente una all'altra, su piani sovrapposti, in ognuno dei quali esse assumono una particolare direzione. Un altro costituente della parete cellulare è la lignina, che le conferisce rigidità. Inoltre, vi sono sostanze grasse, ad esempio la cutina (tipica delle pareti delle cellule dell'epidermide fogliare), la suberina (caratteristica delle pareti delle cellule del sughero) e le cere, che riducono le perdite d'acqua per disidratazione.

### *Plastidi*

Come avviene nei mitocondri, i plastidi sono costituiti da un involucro composto da due membrane. All'interno è presente un fluido che contiene vari metaboliti ed intermedi di reazione detto stroma. Sulle membrane sono inseriti numerosi enzimi che partecipano a vari processi metabolici. È rilevante ricordare che i plastidi hanno ribosomi e DNA propri rispetto a quelli della cellula e perciò possono svolgere sintesi proteica autonoma. In analogia con i mitocondri, anche per i plastidi è stata discussa un'origine endosimbiontica. In cellule non ancora differenziate è possibile rilevare la presenza di proplastidi, di piccole dimensioni e con sistema interno di membrane poco sviluppato.

Dai proplastidi si differenziano i plastidi. Questi ultimi possono essere classificati in base alla loro funzione, colore, sviluppo delle membrane interne e contenuto dello stroma, in tre diversi tipi: leucoplasti, cromoplasti e cloroplasti. I primi sono incolore dove vengono

sintetizzati e confinati l'amido (amiloplasti) o altre molecole utili al metabolismo vegetale (oli e proteine). Nei cromoplasti si accumulano pigmenti caratteristici del colore dei fiori e dei frutti. I cloroplasti sono di colore verde per la presenza prevalente di clorofilla. Nei cloroplasti ha luogo la fotosintesi clorofilliana (si veda il capitolo successivo dedicato alla fotosintesi).

### Vacuoli

All'interno delle cellule vegetali possiamo trovare i vacuoli, cavità piene di un liquido detto succo vacuolare. Il vacuolo può occupare gran parte del volume cellulare ed è delimitato da una membrana nota come tonoplasto. Per la cellula vegetale rappresenta una sorta di idroscheletro, esercitando una pressione contro la superficie della cellula che è racchiusa dalla parete rigida ed in tal modo produce un'azione di sostegno per la cellula stessa (turgore cellulare). All'interno del vacuolo possono essere immagazzinate sostanze di riserva, prodotti intermedi di alcuni processi metabolici ed anche scorie metaboliche. Il vacuolo può altresì rappresentare un'area di deposito per sostanze nocive o repellenti, ad esempio a scopi difensivi/deterrenti nei confronti di organismi animali. Il vacuolo, regolando il contenuto idrico della cellula è utile per difendere il citoplasma dal congelamento durante la stagione fredda. Infatti, assorbendo acqua dal citoplasma lo rende più concentrato abbassando la temperatura di solidificazione della soluzione.

## Capitolo 3: Genetica, riproduzione ed evoluzione

### Mitosi, meiosi e meccanismi di riproduzione

Tipicamente, la cellula può essere in grado di dividersi in due cellule figlie. Sono noti due tipi di divisione cellulare: mitosi e meiosi. La mitosi è una divisione cellulare in cui le cellule figlie sono caratterizzate dal medesimo corredo cromosomico della cellula madre. Durante la mitosi una cellula diploide ( $2n$ ) produce due cellule diploidi identiche a sé stessa (clonazione).

La mitosi è utilizzata dagli organismi unicellulari per riprodursi, mentre negli organismi pluricellulari la mitosi viene utilizzata al fine di aumentare il numero delle cellule durante lo sviluppo e l'accrescimento, così come per sostituire le cellule senescenti. I miliardi di cellule che formano i vari tessuti e organi di cui si compone un organismo pluricellulare derivano da una sola cellula, lo zigote, che si forma dall'unione di un gamete femminile (uovo) con un gamete maschile (spermatozoo) in occasione della fecondazione. Lo zigote è poi in grado di produrre tutte le cellule somatiche dell'organismo attraverso una serie di mitosi.

D'altra parte, la meiosi è una particolare divisione cellulare dove le cellule figlie sono caratterizzate da un corredo cromosomico dimezzato ( $n$ ) rispetto alla cellula che le genera (definita cellula madre). Durante la meiosi una cellula madre diploide ( $2n$ ) produce cellule figlie aploidi ( $n$ ) che mostrano tra loro diversità genetica. La meiosi è fondamentale negli organismi pluricellulari al fine di generare le loro cellule riproduttive, i gameti. In altre parole, meiosi svolge una funzione riproduttiva negli organismi pluricellulari, producendo le cellule aploidi che potranno fondersi durante la fecondazione per rigenerare il corredo diploide che caratterizza lo zigote. È importante notare che la meiosi ha il compito di creare "variabilità genetica", come descritto nei paragrafi che seguono, producendo cellule aploidi geneticamente fra loro, al fine di garantire variabilità genetica nella progenie.

Tutto ciò caratterizza la riproduzione sessuale. È bene ricordare che, da un punto di vista biologico riproduzione e sessualità sono concetti diversi. Mentre la riproduzione genera nuovi individui, la sessualità genera variabilità genetica. Negli organismi superiori, caratterizzati per la maggior parte da riproduzione sessuata, tali processi avvengono allo stesso tempo. I gameti sono prodotti grazie a processi sessuali di rimescolamento dei caratteri genetici (*crossing-over*, assortimento indipendente degli omologhi) che

garantiscono significativa variabilità genetica. La riproduzione sessuale avviene mediante gameti (ovuli e spermatozoi,  $n$ ), che si formano tramite meiosi, come descritto sopra. Successivamente, durante la fecondazione, l'unione casuale dei gameti sopramenzionati porta alla ricongiunzione degli alleli.

D'altra parte, oltre al meccanismo sopra descritto di riproduzione sessuata, esistono svariati meccanismi di riproduzione asexuale (detta anche asexuata o vegetativa). La riproduzione asexuale porta alla di nuovi organismi da un singolo organismo, unicellulare o pluricellulare. Negli eucarioti, grazie alla mitosi, produce discendenti cloni, identici a chi li ha generati, mentre nei procarioti è nota la riproduzione per scissione, che genera cloni cellulari come nella mitosi, ma tramite un processo notevolmente semplificato. Esempi rilevanti di scissione in due parti identiche (detta perciò binaria) si possono osservare in batteri, protisti e alcuni plattelminti. Numerosi individui possono essere prodotti attraverso scissione multipla ad esempio in anellidi e cnidari. La scissione avviene allo stadio adulto, così come processi di gemmazione (detta anche paratomia, si tratta della formazione di gemme laterali che fuoriescono dalla parete dell'individuo, possono originare nuovi organismi o rimanere uniti al genitore formando colonie, ne sono esempio tipico i coralli). Nel caso della gemmazione le cellule figlie hanno dimensioni diverse fra loro e contenuto citoplasmatico non equamente ripartito.

Allo stadio adulto si può avere anche riproduzione asexuale per frammentazione (nota anche come architomia). In tal caso, parte dell'organismo si distacca e genera un individuo completo. La parte distaccata è solo un frammento (non una gemma) ed è quindi soggetta ad ampia riorganizzazione. Un esempio tipico sono i bulbilli delle liliacee, ma anche talee e margotte, per quanto riguarda il mondo vegetale, sclerozi e spore nei funghi. Infine, esempio tipico nei cianobatteri sono gli ormogoni (gruppi di cellule che vanno a formare nuove colonie).

Si noti che la frammentazione è un concetto diverso da quello dell'autotomia (ovvero l'autoamputazione di parti del corpo a scopo antipredatorio o riproduttivo, es. perdita della coda nelle lucertole)

Per quanto riguarda invece la riproduzione asexuale negli stadi giovanili, sono noti vari meccanismi. In particolare, la poliembrionia (consiste nella divisione in più parti dello zigote o dell'embrione nei primissimi stadi di sviluppo, di solito durante la segmentazione) e

l'amplificazione larvale (ha luogo ad uno stadio più avanzato rispetto alla poliembrionia, qui sono le larve a separarsi in altri individui, è caratteristica dei plattelminti.

## Ereditarietà e geni

La genetica nasce intorno la metà dell'Ottocento grazie gli esperimenti di Gregor Mendel focalizzati su incroci tra piante di pisello (*Pisum sativum*). Mendel per primo individuò le leggi dell'ereditarietà che regolano la trasmissione dei caratteri da una generazione all'altra. Gli studi sull'eredità compiuti da Mendel furono pubblicati nel 1865 ma rimasero praticamente sconosciuti fino all'inizio del '900, quando furono riconsiderati da alcuni botanici che stavano studiando l'incrocio di varietà vegetali (H. de Vries, K. Correns e E. Tschermak von Seysenegg).

A partire dagli anni Trenta e Quaranta del Novecento alla genetica classica si sono aggiunte la genetica di popolazione e successivamente la genetica molecolare. La genetica di popolazione nasce dalla fusione dei principi della genetica mendeliana con la teoria dell'evoluzione (si veda il capitolo dedicato nelle pagine a seguire). Negli anni Trenta furono messi a punto modelli matematici per simulare l'effetto dell'eredità mendeliana sulla dinamica evolutiva delle popolazioni. La genetica di popolazione studia la struttura genetica delle popolazioni (ovvero la distribuzione dei caratteri all'interno di un gruppo di individui) ed i processi evolutivi ai quali essa è sottoposta (la dinamica delle variazioni di frequenza dei caratteri e cause che le provocano).

In aggiunta, la genetica molecolare nasce in seguito alla scoperta che la base chimica e molecolare dell'eredità è costituita dagli acidi nucleici, principalmente il DNA. La genetica molecolare studia la struttura biochimica dei geni e la relazione esistente tra geni e caratteri osservabili. A partire dagli anni Settanta, grazie alla biologia molecolare, si è aperta la strada alla manipolazione del materiale genetico, con conseguente rapido sviluppo dell'ingegneria genetica.

Alla base della genetica classica c'è il concetto di gene, coniato da Johanssen nel 1909. Il gene è un fattore ereditario legato ad una particolare caratteristica morfologica o fisiologica dell'individuo, detta carattere. Da un punto di vista molecolare il gene è il tratto di DNA che controlla l'espressione di un carattere, in genere codificando per una determinata proteina. I geni sono contenuti nei cromosomi. Un cromosoma può essere visto come

un'ordinata successione di geni. A causa di mutazioni avvenute durante il processo evolutivo di una specie, un gene può presentarsi con delle forme varianti, dette forme alleliche o alleli.

Negli organismi diploidi, le cui cellule contengono due serie di cromosomi omologhi ( $2n$ ), ciascun gene è portato sia dall'omologo materno che dall'omologo paterno. Un individuo i cui due alleli per la determinazione di un carattere sono uguali si dice omozigote per quel carattere, mentre un individuo i cui due alleli per la determinazione di un carattere sono diversi si dice eterozigote. Si noti che i termini allelomorfo, omozigote ed eterozigote furono introdotti nel 1902 da Bateson.

La particolare combinazione di alleli che controlla un certo carattere è nota come genotipo. Ogni genotipo genera una manifestazione osservabile di un carattere che è detto fenotipo. In caso di eterozigosi, il genotipo può manifestarsi con diversi fenotipi, legati al tipo di interazione che ha luogo tra i due alleli diversi. Possiamo avere dominanza completa, dominanza incompleta e codominanza.

Si ha dominanza completa quando uno dei due alleli prevale ed è l'unico a manifestarsi, determinando il fenotipo. Esso è detto dominante. L'allele latente è detto recessivo. Per convenzione l'allele dominante è indicato con una lettera maiuscola (es. A) e l'allele recessivo con la corrispondente minuscola (es. a).

Si ha dominanza incompleta (o intermedia) quando il fenotipo dell'eterozigote è una miscela tra il fenotipo dell'omozigote dominante e quello dell'omozigote recessivo (es. colore rosso, rosa o bianco nella bocca di leone).

Si ha codominanza se in un individuo eterozigote si osserva l'espressione fenotipica di entrambi gli alleli, non mescolati, ma separati. Esempi classici di codominanza sono il colore pezzato del mantello di molti mammiferi.

Le leggi della genetica classica - o mendeliana - hanno origine dai risultati di incroci. In genere gli incroci non si interrompono alla prima generazione, ma gli individui ottenuti vengono incrociati per numerose generazioni. I genitori costituiscono la generazione parentale (P). I figli vanno a formare la prima generazione filiale ( $F_1$ ). I nipoti vanno a formare la seconda generazione filiale ( $F_2$ ) e così via.

Si noti che Mendel si occupò di caratteri che si presentavano nel fenotipo senza forme intermedie, poi noti come caratteri mendeliani o caratteri discreti o caratteri a variabilità discontinua. Si tenga presente che tali caratteri non sono molto diffusi in natura.

La maggior parte dei caratteri sono infatti caratteri a variabilità continua (es. altezza di un individuo).

I risultati degli incroci di Mendel possono essere modernamente riassunti dalla legge della dominanza (nota anche come legge dell'uniformità degli ibridi  $F_1$ ), ovvero: l'incrocio tra un omozigote dominante ed un omozigote recessivo genera una generazione  $F_1$  di eterozigoti (ibridi) fenotipicamente uguali al genitore dominante.

In una nuova serie di studi, Mendel lasciò incrociare tra loro degli ibridi  $F_1$ . Fu osservato che gli individui  $F_2$  erano per il 75% fenotipicamente dominanti e per il 25% fenotipicamente recessivi. Per spiegare ciò Mendel ipotizzò correttamente che ogni carattere ereditario è presente in un individuo con due fattori (oggi detti alleli) trasmessi dai genitori ai figli con la riproduzione. Inoltre, per giustificare il rapporto 3:1 in  $F_2$  ipotizzò che le due copie di un fattore si separano (segregazione) durante la riproduzione per poi ricongiungersi casualmente.

### Codice genetico e sintesi proteica

Come dettagliato nel primo capitolo, il DNA contiene le informazioni necessarie per posizionare nella giusta successione gli amminoacidi di una proteina. Il tratto di DNA che codifica per una certa proteina è detto gene. Le informazioni genetiche sono codificate nella struttura primaria del DNA, grazie alla variabilità nella successione delle sue basi azotate.

Nel descrivere la sintesi proteica si utilizza una metafora linguistica, in cui esistono due linguaggi: quello del DNA con un alfabeto di 4 lettere (basi azotate A, T, C e G) e quello delle proteine con un alfabeto di 20 lettere (amminoacidi). Le informazioni devono essere tradotte da un linguaggio ad un altro. Il codice genetico definisce come la successione delle basi azotate del DNA deve essere tradotta nella corretta successione di amminoacidi di una proteina. Ogni amminoacido viene codificato da una certa tripletta di basi o codone. I codoni sono le triplette già trascritte nella molecola dell'RNA messaggero e quindi con l'uracile (U) che sostituisce la timina (T). Si noti che esistono più triplette che codificano per il medesimo amminoacido (ridondanza del codice genetico), mentre ciascuna tripletta non può codificare per amminoacidi diversi. Infine esistono anche triplette che non codificano per alcun amminoacido, dette "not-sense", che la cellula utilizza come segni di interpunzione durante la traduzione dell'informazione per segnalare la fine della sintesi di una determinata proteina.



Il processo di sintesi proteica si articola in due fasi: trascrizione e traduzione dell'informazione genetica. Nella fase di trascrizione l'informazione viene trasferita dal DNA all'RNA, mentre nella fase di traduzione l'informazione viene trasferita dall'RNA alle proteine.

### Principi e basi dell'evoluzione

La prima teoria articolata dell'evoluzione biologica si deve alle pubblicazioni di Lamarck (1744-1829). Lamarck, come Cuvier ed altri, aveva osservato come gli strati di roccia più profondi e quindi verosimilmente più antichi contenevano fossili di forme viventi più semplici. Lo scienziato ipotizzò una sorta di derivazione degli organismi più complessi e recenti da quelli più semplici e antichi.

Questa derivazione biologica o evoluzione, dipendeva per Lamarck da due fattori:

- I nuovi caratteri compaiono negli esseri viventi in risposta alla necessità ed ai nuovi bisogni indotti da un ambiente in continua trasformazione. I nuovi caratteri si sviluppano con l'uso, mentre regrediscono e scompaiono se inutilizzati ("principio dell'uso e non uso").
- I nuovi caratteri acquisiti vengono trasmessi per eredità alle generazioni successive (principio dell'ereditarietà dei caratteri acquisiti).

Per citare uno dei suoi esempi più celebri, secondo Lamarck la giraffa moderna si è evoluta da antenati a collo corto, costretti ad allungarlo per raggiungere le foglie più alte dei rami in periodi di scarsa disponibilità alimentare. Questi antenati trasmisero il collo allungato ai loro discendenti i quali continuarono ad allungarlo e così via.

Per giustificare il fatto che, nonostante il processo evolutivo trasformi gli organismi più semplici in organismi più complessi, i gradini più bassi della scala naturale continuano ad essere occupati da forme di vita estremamente semplici, Lamarck accetta l'ipotesi aristotelica della generazione spontanea degli organismi più semplici dalla materia organica inanimata.

La teoria lamarckiana non fu accolta favorevolmente dalla critica tradizionalista, trovando un forte oppositore in Cuvier che, col suo crescente prestigio nel campo degli studi biologici e paleontologici, ne decretò il declino. Morti Lamarck e Cuvier, si spensero gli echi dello scalpore suscitato dalla teoria lamarckiana.

Nonostante la teoria lamarckiana non sia oggi più sostenibile, essa rappresentò il primo tentativo coerente di superare il concetto di fissità delle specie in favore di una visione evoluzionistica del mondo dei viventi e rappresentò un punto di riferimento fondamentale per l'opera di Darwin. C. Darwin e A. R. Wallace formularono contemporaneamente e separatamente una teoria evolutiva degli esseri viventi per selezione naturale.

Nel 1859 Darwin pubblicò "On the origin of species by mean of natural selection", dando un'interpretazione scientificamente soddisfacente dei meccanismi evolutivi. Darwin intuisce che le conclusioni dell'economista Malthus, ovvero che cibo e altre risorse sono un fattore limitante per la crescita delle popolazioni, erano vere per tutte le specie. Il processo attraverso il quale gli esseri viventi sono "scelti" per perpetuare la loro specie è stato definito da Darwin selezione naturale.

L'esperienza decisiva per le teorie di Darwin fu fatta dallo studioso durante il viaggio di circumnavigazione della terra sul Beagle. In seguito, Darwin sintetizzò le sue osservazioni in una teoria organica dell'evoluzione, basata sulla selezione naturale, che è riassunta nei suoi punti chiave di seguito:

- Tutti gli organismi producono una prole superiore alle capacità che l'ambiente ha di sostenerla; dunque tra tutti gli individui che nascono solo alcuni sono in grado di raggiungere la maturità ed hanno la possibilità di riprodursi.
- In ogni generazione sono presenti individui casualmente molto diversi gli uni dagli altri, con una grande variabilità di caratteri.
- Non tutti i caratteri presenti in ciascuna generazione hanno la stessa rilevanza rispetto alla possibilità di sopravvivenza dell'individuo nell'ambiente in cui vive; ci sono caratteri che possono rendere l'individuo che li porta più adatto a sopravvivere in quel determinato ambiente. Altri caratteri possono essere indifferenti o dannosi.
- Tra gli individui di una generazione solo quelli che presentano casualmente i caratteri che li rendono più adatti sopravvivono ed hanno così la possibilità di proliferare; ciò consente loro di trasmettere i loro caratteri alla discendenza, mentre i caratteri degli individui inadatti si estinguono con essi.

E' bene notare che per Darwin l'ambiente gioca un ruolo puramente passivo di filtro, mentre per Lamarck esercita un ruolo attivo, inducendo la variazione dei caratteri.

Darwin fu attaccato nel punto più debole della sua teoria, quello dell'eredità genetica. Egli non era infatti in grado di spiegare la natura della variabilità individuale ed il modo in cui essa veniva trasmessa di generazione in generazione.

Relativamente all'argomento sopra menzionato, si creò una notevole confusione sino all'inizio del '900, quando H. de Vries formulò la sua teoria delle mutazioni, dove sostenne che nuovi caratteri possono improvvisamente comparire per modificazione permanente ed ereditabile del patrimonio genetico. Tali studi genetici, così come quelli di autori contemporanei, portarono all'aprirsi di un conflitto tra la teoria darwiniana dell'evoluzione e la teoria mendeliana dell'ereditarietà.

Il divario tra i due approcci si acuì quando si iniziarono a studiare i caratteri quantitativi a variabilità continua. Oggi noi sappiamo che anch'essi sono riconducibili ad un'eredità di tipo mendeliano con un controllo polifattoriale del carattere, ma allora l'interpretazione corrente era che si trattasse di una variabilità puramente fenotipica, non ereditabile.

Successivo a tali approcci fu l'approdo ad una teoria sintetica dell'evoluzione. Nel 1918 R. A. Fisher dimostrò che tutti i risultati del processo continuo descritto da Darwin possono esser fatti derivare dai principi mendeliani. Fisher dimostrò come la variabilità continua possa essere il risultato dell'effetto additivo di molti geni. Questo lavoro è spesso considerato l'inizio della sintesi tra i due modelli, poiché Fischer aveva reso disponibile un rigoroso modello statistico-matematico in grado di soddisfare le esigenze (ed i metodi) sia della scuola biometrica che di quella mendeliana. Fu sempre Fisher e, indipendentemente, John B. S. Haldane e Sewall Wright, a completare il lavoro teorico che portò alla sintesi della teoria darwiniana della selezione naturale con quella mendeliana dell'ereditarietà. Nasce il neodarwinismo, o teoria sintetica dell'evoluzione. Fu quindi definito come la selezione naturale agisce sulla normale variabilità delle popolazioni selvatiche, che seguono le leggi di ereditarietà mendeliane. Negli anni successivi anche altre branche della biologia come la paleontologia, iniziarono a reinterpretare le proprie conoscenze alla luce della nuova teoria sintetica che rappresentò il paradigma e la nuova struttura unificante delle diverse discipline biologiche. Negli anni '40 la nuova teoria era completa ed organicamente fondata, come dettagliato nel testo di Huxley "Evolution. The Modern Synthesis" (1942).

## Capitolo 4: Concetti generali sui processi energetici della cellula

### Respirazione

#### **Respirazione aerobica**

Con il termine respirazione si intende generalmente il processo fisiologico macroscopico che consiste nella assunzione di  $O_2$  e nel rilascio di  $CO_2$  da parte di organismi pluricellulari. In biochimica si usa il termine respirazione in senso microscopico per riferirsi ai processi molecolari che implicano consumo di  $O_2$  e formazione di  $CO_2$  da parte della cellula. Si tratta di una reazione esoergonica di ossidoriduzione in cui un substrato energetico (tipicamente il glucosio  $C_6H_{12}O_6$ ) viene ossidato ad anidride carbonica ( $CO_2$ ) cedendo i suoi elettroni all'ossigeno ( $O_2$ ) che si riduce ad acqua ( $H_2O$ ).

La reazione globale è un'ossidazione completa del glucosio. Solo una parte dell'energia liberata viene trasformata in energia chimica sotto forma di ATP. In totale si ottengono 38 ATP per ogni molecola di glucosio. Si ottengono  $38 \times 7.3 = 277 \text{ Kcal mol}^{-1}$ . L'efficienza del processo è circa il 40%.

La respirazione cellulare aerobica può essere riassunta in 3 stadi: glicolisi, ciclo di Krebs e fosforilazione ossidativa. Il primo ha luogo nel citoplasma, gli ultimi due nei mitocondri: il ciclo di Krebs nella matrice, la fosforilazione ossidativa a livello della membrana interna (creste).

#### Glicolisi

La glicolisi è una via metabolica presente negli animali, nelle piante, e nella maggior parte dei microrganismi. La glicolisi è costituita da una sequenza di 10 reazioni che avvengono nel citoplasma e degradano il glucosio in 2 molecole di acido piruvico (o piruvato) ( $CH_3-CO-COOH$ ) in assenza di  $O_2$  producendo 2 ATP e 2 NADH. L'acido piruvico viene successivamente ossidato e decarbossilato (decarbossilazione ossidativa = ossidazione ed eliminazione del gruppo carbossile  $-COOH$  sotto forma di una molecola di  $CO_2$ ) con formazione di un gruppo acetile ( $CH_3CO-$ ). L'energia e gli elettroni che si liberano da questo processo vanno a caricare 1 NADH. Il gruppo acetile viene agganciato da un coenzima, noto come coenzima A (CoA), con formazione dell'acetil-CoA. Quest'ultimo ha il compito di trasportare il gruppo acetile

all'interno del ciclo di Krebs per completare il processo ossidativo. Si tenga presente che l'acetil-CoA può essere generato anche a partire da altri substrati energetici (es. lipidi).

### Ciclo di Krebs

Il ciclo di Krebs, detto anche ciclo degli acidi tricarbossilici o ciclo dell'acido citrico, consiste in una serie di reazioni all'interno dei mitocondri, nello spazio della matrice. Queste reazioni sono realizzate in otto tappe enzimatiche al fine di ossidare completamente i 2 atomi di carbonio del gruppo acetile formando 2 molecole di CO<sub>2</sub>. Durante questo processo si liberano energia ed elettroni che vanno a caricare 3 NADH, 1 FADH<sub>2</sub> e 1 ATP. Anche in questo caso l'ATP si forma come conseguenza di un processo di fosforilazione a livello del substrato. 1 glucosio fornisce al ciclo di Krebs 2 gruppi acetile, quindi il guadagno ottenuto dal ciclo di Krebs per molecola di glucosio sarà di 6 NADH, 2 FADH<sub>2</sub> e 2 ATP. Se sommiamo a questo le molecole che si sono caricate in precedenza (2 ATP e 2 NADH per la glicolisi, 2 NADH per la decarbossilazione ossidativa) si ottengono: 10 NADH, 2 FADH<sub>2</sub> e 4 ATP.

Le ossidoreduttasi (NADH, FADH<sub>2</sub>) che si sono caricate sono accettori temporanei di elettroni. Queste devono scaricarsi e cedere elettroni ed energia ad un accettore finale.

### Fosforilazione ossidativa

Nel terzo stadio NADH e FADH<sub>2</sub> si scaricano, cedendo elettroni all'O che, riducendosi ad H<sub>2</sub>O, costituisce l'accettore finale di elettroni. Il trasferimento di elettroni avviene attraverso una serie di molecole intermedie (citocromi), grazie alla catena di trasporto degli elettroni, nota come catena respiratoria. In questo modo l'energia contenuta nelle ossidoreduttasi viene liberata in piccole quantità ad ogni passaggio e può essere utilizzata per caricare ATP.

Ogni NADH che si scarica nella catena respiratoria carica 3 ATP, ogni FADH<sub>2</sub> 2 ATP. I 10 NADH caricheranno quindi 30 ATP, i 2 FADH<sub>2</sub> caricheranno altri 4 ATP, per un totale di 34 ATP che, sommati ai 4 ATP già ottenuti evidenziano un guadagno totale della respirazione aerobica di 38 ATP.

La catena respiratoria è composta da 4 complessi proteici che contengono gruppi prostetici redox ben legati. Gli elettroni vengono trasferiti da un gruppo redox al successivo. I complessi 1, 3 e 4, in occasione del passaggio di elettroni, sono in grado di generare un flusso di ioni H<sup>+</sup> dalla matrice verso lo spazio inter-membrana, per tale ragione sono definiti pompe protoniche. Mediante il processo sopra descritto, ai due lati della membrana delle creste si crea una nella concentrazione di ioni H<sup>+</sup>. Sotto la spinta di questo gradiente, gli H<sup>+</sup>

rientrano nella matrice utilizzando l'ATP-sintetasi, un enzima trans-membrana in grado di convertire il flusso di ioni  $H^+$  in energia chimica per la sintesi di ATP.

### **Vie metaboliche anaerobiche: fermentazione lattica e alcolica**

Nella respirazione cellulare aerobica l'accettore finale di elettroni è l' $O_2$ . Sono dette anaerobiche le vie metaboliche di demolizione dei substrati energetici in cui l'accettore finale di elettroni non è l' $O_2$ . Se comparati alla respirazione aerobica, tali processi sono meno efficienti dal punto di vista energetico, ma sufficienti a garantire la sopravvivenza di numerosi microrganismi.

Tra le varie vie metaboliche note, la fermentazione lattica e la fermentazione alcolica sono molto importanti per i processi biologici, entrambe utilizzano la glicolisi come fase iniziale. Nella prima, i due NADH che si formano dal processo glicolitico si scaricano sul piruvato, riducendolo ad acido lattico ( $CH_3-CHOH-COOH$ ). Alla fine del processo il guadagno energetico si riduce quindi ai 2 ATP formati durante la glicolisi. La fermentazione lattica avviene nei nostri muscoli, quando il lavoro muscolare è particolarmente intenso e l'apporto di ossigeno non è sufficiente a soddisfare le richieste energetiche. E' altresì tipica di processi fermentativi volti alla produzione di alimenti come lo yogurt.

Nella fermentazione alcolica i due NADH che si formano dal processo glicolitico si scaricano sul piruvato, in analogia con quanto avviene nel corso della fermentazione lattica. Qui però il piruvato viene anche decarbossilato, con liberazione di  $CO_2$  e formazione di etanolo o alcol etilico ( $CH_3-CH_2OH$ ). Alla fine del processo il guadagno energetico è sempre di 2 ATP. Questo tipo di fermentazione anaerobica è alla base della produzione di bevande alcoliche fermentate (es. vino, birra) ad opera di lieviti.

### Trasporto

La membrana plasmatica è una barriera selettivamente permeabile. Il doppio strato fosfolipidico permette infatti il libero passaggio dell'acqua, di gas quali ossigeno e anidride carbonica e di piccole molecole liposolubili, mentre risulta impermeabile per ioni e molecole idrosolubili. Il trasporto dei materiali per i quali la membrana non è permeabile viene effettuato dalla cellula utilizzando particolari proteine trasportatrici transmembraniche (carriers) e/o attraverso fenomeni di motilità della membrana (esocitosi ed endocitosi).

Il processo di esportazione, noto anche come esocitosi, avviene grazie alla capacità della cellula di avvolgere il materiale da espellere con una piccola porzione di membrana (vescicola di esocitosi) che si stacca dai sistemi interni di membrana (apparato del Golgi) e si va a fondere con la membrana plasmatica. Il contenuto delle vescicole di esocitosi viene così riversato all'esterno. La cellula utilizza l'esocitosi per eliminare le sostanze di rifiuto, per secernere sostanze utili, quali segnali chimici o sostanze aggressive per attaccare altre cellule.

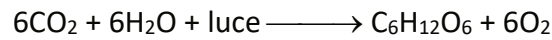
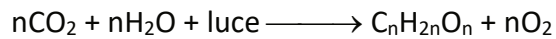
Il processo di importazione, noto come endocitosi, avviene mediante la capacità della cellula di avvolgere il materiale da introdurre con una piccola porzione di membrana che si stacca come una goccia (endosoma) all'interno del citosol. Si parla di endocitosi mediata da recettori quando la sostanza che deve essere inglobata nella cellula, viene riconosciuta e legata da specifici recettori situati sulla superficie della membrana. Si viene a formare in questo modo un complesso recettore-ligando che funge da attivatore del processo di endocitosi. Se il materiale da introdurre è solido si parla di fagocitosi, se è liquido di pinocitosi.

Le proteine di trasporto (*carriers*) possono agganciare e trasportare specifiche sostanze chimiche. Alcune di queste proteine sono disciolte nel sangue e trasportano sostanze per via ematica. Altre sono immerse nella membrana cellulare (proteine transmembratiche o integrali) e permettono alla cellula di scambiare sostanze con l'ambiente esterno. Queste ultime si dividono in pompe e canali: le pompe consumano energia per effettuare il trasporto (trasporto attivo), mentre i canali sono in grado di trasportare sostanze attraverso la membrana senza consumare energia (trasporto passivo).

## Fotosintesi

La fotosintesi è praticamente il solo meccanismo che consente l'immissione di energia nel mondo vivente. L'energia luminosa viene utilizzata dalla fotosintesi per produrre sostanze organiche a partire da  $\text{CO}_2$  ed  $\text{H}_2\text{O}$ . Questo lavoro è svolto dagli *organismi fotoautotrofici* (piante, alghe e certi batteri) mentre gli *organismi eterotrofici* (per esempio gli animali) utilizzano le sostanze organiche prodotte dagli organismi autotrofi. Il bilancio chimico della fotosintesi è semplice: da 6 molecole di  $\text{CO}_2$  viene formata una molecola di esoso. Gli atomi

di idrogeno necessari per questo processo derivano dall'acqua; l'ossigeno molecolare è solo un prodotto di scarto, anche se in realtà è essenziale per la vita sulla Terra.



La fotosintesi è un processo fisico-chimico attraverso il quale le piante, le alghe ed i batteri fotosintetici utilizzano l'energia luminosa per la sintesi di composti organici. Nelle piante, nelle alghe ed in certi tipi di batteri, il processo fotosintetico consiste nel rilascio di ossigeno molecolare e nella assimilazione della  $\text{CO}_2$  atmosferica utilizzata per la sintesi dei carboidrati (*fotosintesi ossigenica*). Alcuni tipi di batteri utilizzano invece l'energia luminosa per formare composti organici senza però produrre ossigeno (*fotosintesi anossigenica*).

La serie di reazioni costituenti il processo fotosintetico, mediante il quale l'energia elettromagnetica è convertita in energia chimica (*fase luminosa*), e successivamente immagazzinata sotto forma di legami in una gran varietà di composti organici (*fase biochimica* o fotoassimilazione della  $\text{CO}_2$ ), nelle piante verdi avviene nei cloroplasti, organuli citoplasmatici dotati di particolare morfologia.

Le reazioni luminose del processo fotosintetico dovute alla cattura dei fotoni ed alle reazioni associate di trasporto degli elettroni sono localizzate nelle lamelle e nei grana dei cloroplasti. In particolare le lamelle contengono i componenti del PS I e della fosforilazione ciclica, mentre i grana contengono ambedue i fotosistemi PS I e PS II e i componenti della fosforilazione ciclica e della fosforilazione non ciclica. Invece la serie delle reazioni responsabili della fissazione dell'anidride carbonica è localizzata nella parte stromatica del cloroplasto.

L'energia utilizzata nel processo fotosintetico deriva dal centro del sole, dove la massa è convertita in calore dalla fusione dell'idrogeno. Nel tempo, l'energia raggiunge la superficie del sole, dove una parte di essa è convertita in energia luminosa, le cui radiazioni raggiungono la Terra. Una piccola frazione dell'energia luminosa visibile che raggiunge la Terra viene assorbita dalle piante. Attraverso una serie di reazioni di trasduzione dell'energia, gli organismi fotosintetici sono capaci di trasformare l'energia luminosa in energia chimica libera in una forma stabile anche per milioni di anni (es. fossili).

Il processo fotosintetico nelle piante e nelle alghe avviene in piccoli organelli noti con il nome di *cloroplasti* che sono localizzati all'interno delle cellule del mesofillo fogliare. Le reazioni luminose consistono nella *cattura della luce* (energia radiativa) e nella sua



conversione in energia chimica che da luogo al trasferimento di elettroni mediante una catena di carriers. Questi ultimi sono complessi metallo ionici e gruppi aromatici, legati alle proteine. La maggior parte delle proteine presenti nelle membrane fotosintetiche sono composte da numerosi polipeptidi e fanno da ponte per gli ioni metallici ed i gruppi aromatici. Un elettrone entra in un complesso proteico in uno specifico sito e quindi viene trasferito nella proteina da un *trasportatore di elettroni* (carrier) ad un altro. Il trasferimento di elettroni tra le proteine, è controllato dalla distanza, dalla energia libera e dalla probabilità che le due proteine siano in stretto contatto. Non sempre comunque i carriers si legano alle proteine. La forma ridotta del plastoquinone e la plastocianina agiscono come carriers mobili che operano il trasferimento di elettroni tra i diversi complessi proteici.

Le reazioni luminose della fotosintesi convertono l'energia solare in diverse forme ed il primo step è la conversione dell'energia luminosa in energia di eccitazione delle molecole dei pigmenti localizzati nei sistemi antenna, che catturano la luce. Questo sistema di de-eccitazione delle molecole è molto importante ai fini del processo fotosintetico. Infatti, il trasferimento di energia di risonanza tra pigmenti diversi è necessario al fine che l'energia raggiunga un pigmento che faccia da centro di raccolta dell'energia detto *centro di reazione*. Nei tilacoidi esistono due tipi di centri di reazione, entrambi costituiti da molecole di clorofilla *a* rese speciali dalla loro associazione con particolari proteine o altri componenti della membrana e definiti P680 (annesso al fotosistema II) e P700 (annesso al fotosistema I). Questi due fotosistemi lavorano in coordinazione, più precisamente in serie. Il PSII fornisce gli elettroni al PSI attraverso una serie di carriers intermedi. Il risultato netto è il trasferimento di elettroni dall'acqua al NADP<sup>+</sup> producendo così la forma ridotta, il NADPH. Nel processo fotosintetico gran parte della energia luminosa è raccolta come energia libera redox nel NADPH e verrà utilizzata in seguito per la riduzione della CO<sub>2</sub>. In più, durante il trasferimento degli elettroni si liberano protoni nella parte interna della membrane fotosintetiche e si crea così un gradiente protonico tra le membrane. In questo caso il trasferimento di elettroni converte l'energia libera redox in un potenziale elettrochimico di membrana che viene utilizzato da un complesso proteico intermembrana (ATP sintetasi) per unire covalentemente un fosfato al gruppo dell'adenosina difosfato (ADP) per formare l'adenosina trifosfato (ATP) (*Fotofosforilazione*). Il trasferimento di protoni attraverso l'ATP sintetasi secondo il gradiente di membrana (processo esoergonico, cioè spontaneo) viene utilizzato per favorire la reazione endoergonica tra ADP e fosfato. L'energia raccolta nell'ATP

può poi essere trasferita ad altre molecole attraverso reazioni accoppiate che comprendono il trasferimento del gruppo fosfato. L'effetto netto delle reazioni luminose fotosintetiche è quindi la conversione dell'energia radiante in energia libera redox sotto forma di NADPH e legami fosfato nella forma dell'ATP. Nelle reazioni luminose, il trasferimento di un singolo elettrone dall'acqua al  $\text{NADP}^+$ , coinvolge circa 30 metallo-ioni e 7 gruppi aromatici. I metallo-ioni sono: 19 Fe, 5 Mg, 4 Mn ed 1 Cu. I composti aromatici sono i chinoni, la feofitina, il NADPH, la tirosina e una flavoproteina. Il NADPH e l'ATP formati dalle reazioni luminose costituiscono il potere riducente e l'energia necessaria per le successive fasi di fissazione e riduzione della  $\text{CO}_2$ , note con il nome di *ciclo di Calvin*, o ciclo della riduzione fotosintetica del carbonio. Il ciclo di Calvin avviene nella fase acquosa del cloroplasto (stroma) e coinvolge una serie di reazioni enzimatiche. Il primo step delle reazioni è catalizzato dalla proteina Rubisco (Ribuloso, 1-5, bisfosfato carbossilasi/ossigenasi) che catalizza la reazione della  $\text{CO}_2$  con un composto a 5 atomi di carbonio, il ribuloso 1,5-bisfosfato. Si forma un complesso instabile a 6 atomi di carbonio che si scinde in due molecole di acido 3-fosfoglicerico (PGA). Reazioni successive che coinvolgono diversi enzimi determinano la riduzione del carbonio a carboidrati.

## Capitolo 5: Diversità tra i viventi

### Virus

Il termine virus permette di identificare organismi di natura non cellulare e di dimensioni submicroscopiche costituiti da un acido nucleico rivestito da un involucro proteico (noto come capsida) incapaci di una sintesi proteica autonoma, dunque caratterizzati dalla vita parassitaria endocellulare obbligata. I virus sono agenti eziologici di numerose malattie di animali, piante e batteri. Tali organismi sono costituiti da un solo tipo di acido nucleico (DNA o RNA) racchiuso in un contenitore di natura proteica; si riproducono traducendo le informazioni genetiche solo quando il loro genoma viene introdotto in una cellula; non hanno ribosomi e sistemi enzimatici deputati alla produzione di energia, sono privi di capacità biosintetiche, sfruttano l'apparato biosintetico della cellula ospite per la propria replicazione.

Una particella virale è detta virione e la sua funzione è quella di introdurre il proprio acido nucleico all'interno di una cellula ospite, affinché esso possa essere espresso dall'apparato biosintetico della stessa. Nei virus, il rivestimento proteico ha la doppia funzione di proteggere l'acido nucleico dalla degradazione degli agenti denaturanti presenti nell'ambiente extracellulare e di consentire l'adesione del virione su specifici recettori della membrana citoplasmatica della cellula ospite. Le proteine del rivestimento sono codificate dal genoma virale, in genere di modeste dimensioni; difatti il rivestimento è costituito da unità ripetitive di una o poche proteine combinate tra loro con simmetria elicoidale o cubica del prodotto finale. Così si genera il capsida, che racchiude l'acido nucleico e le proteine a esso associate, note come nucleoproteine. L'insieme di nucleo e capsida è definito nucleocapsida. In aggiunta, molti virus, hanno un secondo capsida esterno composto da proteine virali e lipidi cellulari, detto pericapsida: I virus che mancano di pericapsida sono detti nudi. Nei virus il genoma è composto da DNA o da RNA: può essere monocatenario o bicatenario, lineare o circolare, e costituito da un'unica molecola o da vari segmenti (genoma segmentato).

## Batteri

I batteri sono microrganismi unicellulari precedentemente considerati parte del regno Procarioti, ad oggi considerati un dominio a sé stante, quello dei Bacteria. E' importante ricordare come molte attività metaboliche dei batteri condizionano le possibilità di vita di numerosi altri organismi. Alcuni batteri sono patogeni di piante ed animali, altri concorrono ai processi di degradazione enzimatica delle spoglie di animali e piante e ai cicli biogeochimici maggiormente rilevanti. Altrettanto importanti sono i processi batterici di sintesi e di trasformazione nei quali si hanno la produzione di antibiotici e vitamine e la fermentazione di varie sostanze (latte, vino, vedi paragrafi precedenti dedicati alla fermentazione).

Per molti anni si è pensato che il mondo vivente fosse diviso in procarioti ed eucarioti e che questi ultimi si fossero evoluti dai primi. Negli ultimi decenni del 20° secolo, l'aumento delle conoscenze dovute alla sistematica molecolare ha portato all'evidenziazione di un nuovo rango tassonomico, il dominio (detto anche impero o superregno). Ad oggi, gli esseri viventi sono divisi in Archea, Bacteria ed Eucaria. Nella vecchia classificazione i batteri erano divisi in archeobatteri ed eubatteri; con la nuova sistematica i batteri fanno parte dei Bacteria e gli archeobatteri agli Archea. I Bacteria sono divisi in 31 classi, 70 ordini, 175 famiglie e 872 generi.

I batteri mostrano alcune importanti forme fondamentali: bastoncellare (bacilli), sferica (cocchi), ricurva (vibrioni o spirilli). Elemento fondamentale della cellula batterica è la presenza di una regione nucleare, detta nucleoide, che nella maggior parte dei batteri contiene un singolo cromosoma circolare a doppio filamento. I batteri possono anche avere unità genetiche accessorie, dette plasmidi. La membrana citoplasmatica ha una struttura analoga a quella degli eucarioti, ma è priva di steroli. Tra le proteine della membrana citoplasmatica vi sono quelle della catena respiratoria, coinvolte nella generazione di energia (vedi paragrafo dedicato alla respirazione). I batteri fotosintetici la membrana assume attività fotosintetica, mentre i cloroplasti sono assenti. Esclusi i micoplasmi, tutti i batteri sono caratterizzati da un involucro esterno alla membrana citoplasmatica, la parete cellulare, composta da peptidoglicano più vari polimeri. L'identità e organizzazione di questi ultimi conferisce diverse caratteristiche ai batteri, permettendoci di dividerli in gram-positivi e gram-negativi.

E' importante ricordare che alcuni batteri sono provvisti di appendici che emergono al di fuori degli involucri cellulari; dette fimbrie o pili a seconda della loro funzione (le fimbrie sono particolarmente importanti per aderire a substrati solidi), e composte da subunità proteiche ripetute.

I batteri si possono riprodurre per divisione della cellula madre in due cellule figlie (scissione diretta o schizogonia). Le nuove cellule batteriche così originate possono rimanere in relazione, formando aggruppamenti caratteristici (es. catene, tetradi, filamenti, grappoli). In peculiari condizioni, molti batteri possono produrre una struttura cellulare resistente e quiescente, detta endospora o spora batterica, alcune possono essere in grado di germinare anche dopo 500 anni.

## Protisti

I protisti sono organismi unicellulari di tipo eucariotico che costituiscono un gruppo estremamente eterogeneo, comprendente circa 50.000 specie diverse tra alghe unicellulari, funghi unicellulari e protozoi. Nella maggior parte dei casi i protisti sono organismi strettamente unicellulari; in alcuni casi, tuttavia, come si verifica ad esempio in Volvox, si osserva la tendenza a formare colonie di più individui, spesso visibili anche a occhio nudo, e dotate di una complessità di organizzazione tale da ricordare quella degli organismi superiori.

La maggior parte dei protisti è acquatica, vivendo sia in acque marine che in quelle dolci e altri ancora vivono nei fluidi corporei di altri organismi. Altri protisti si trovano nel suolo umido o nella corteccia umida di alberi in decomposizione. Molti altri, infine, vivono nelle acque del suolo, dove contribuiscono al ciclo dell'azoto cibandosi di batteri del suolo e trasformando i composti azotati in nitrati. Alcune specie di protisti conducono vita libera; esiste comunque un notevole numero di specie che conduce vita endosimbiotica all'interno di altri organismi. Alcuni gruppi di protisti comprendono esclusivamente organismi immobili, mentre altri gruppi comprendono anche cellule dotate di movimento ameboide, battito ciliare o flagellare. I protisti possiedono caratteristiche metaboliche estremamente varie.

Dal punto di vista della nutrizione, si tratta di organismi autotrofi, eterotrofi per assorbimento o per ingestione, mentre altri ancora sono mixotrofi, cioè scelgono il tipo di nutrizione in base alle condizioni ambientali, passando con facilità dalla condizione autotrofa a quella eterotrofa, qualità questa che permette loro di sfruttare al massimo le risorse

energetiche disponibili, come ad esempio si verifica nel caso di molti protozoi flagellati fotosintetici come *Euglena* e *Chlamydomonas*.

La riproduzione, nella maggior parte dei casi, avviene per via asessuale, mediante semplice scissione binaria, scissione multipla, gemmazione o mediante formazione di spore; allo stesso modo anche la riproduzione sessuale può avvenire in alcune specie con meccanismi diversi. La diversità di forma corporea, habitat, locomozione, metabolismo e riproduzione che caratterizza i protisti riflette le molteplici vie seguite nei primi stadi evolutivi degli eucarioti.

La caratteristica principale e più evidente che rende i protisti unici nel mondo dei viventi è rappresentata dalla loro duplice natura, cioè dal fatto che ciascuno di essi rappresenta contemporaneamente una cellula eucariotica ed un organismo completo. Per quanto riguarda la loro natura di cellula eucariotica, nei protisti troviamo un'ampia gamma di variazioni sul tema di complessità strutturale e funzionale, che non ritroviamo in nessun'altra cellula di qualunque metazoo. Ad esempio, nel protozoo ciliato *Loxodes striatus* è presente un organello strutturalmente molto complesso, chiamato "vescicola di Müller", che funziona come un sensore di gravità. Oppure, nel dinoflagellato *Erytropsis pavillardi*, tipico delle profondità oceaniche, è presente un sofisticato apparato visivo, connesso con un tentacolo retrattile propulsore.

Per quanto riguarda, invece, la loro natura di organismo completo, i protisti, d'altra parte, devono essere in grado di affrontare con successo le sfide che la vita quotidiana pone alla loro sopravvivenza: oltre a cercare il cibo, le condizioni ambientali favorevoli ed i potenziali partner per la riproduzione sessuale, i protisti devono anche sfuggire la predazione, conquistare nuovi habitat e disperdersi nell'ambiente per garantire la diffusione della specie. Ciò, a differenza di quanto fa qualunque cellula di qualunque metazoo (animale) che, invece, non deve affrontare tali sfide, in quanto facendo parte insieme ad altre cellule analoghe di un solo tessuto, è specializzata a svolgere una sola funzione ben determinata (G. Di Giuseppe, comunicazione personale).

## Funghi

I funghi sono organismi eucarioti filamentosi che traggono il proprio nutrimento da altri organismi, vivi o in decomposizione. I funghi si differenziano dagli organismi animali perché

non provvisti di apparati locomotori o di sistemi per l'ingestione e digestione di alimenti. A differenza degli organismi vegetali non sono in grado di fare fotosintesi.

I funghi costituiscono un gruppo comprendente organismi di aspetto estremamente variabile, alcuni macroscopici, come i funghi mangerecci, altri così minuti che si possono osservare solo al microscopio (es. patogeni di piante ed animali). Il regno Funghi fa parte del dominio Eucaria e non comprende più né i Mixomiceti, funghi mucilluginosi privi di parete e a organizzazione cellulare cenocitica, spostati nel gruppo Micetozoi, né gli Oomiceti, muffe d'acqua con parete di cellulosa, riproduzione peculiare e alcune vie metaboliche diverse da quelle dei funghi, che, inclusi in passato nella divisione Eumiceti (Mastigomiceti), vengono raggruppati nel gruppo Stramenopili. I Deuteromiceti, precedentemente classificati in base alla mancanza o alla mancata dimostrazione di una fase sessuata, sono stati ridistribuiti nei vari ordini del regno Funghi, con l'indicazione mitosporici che ne sottolinea la peculiarità nella riproduzione. Il regno Funghi è ripartito in quattro phyla: Chytridiomiceti (Chytridiomycota), Ascomiceti (Ascomycota), Basidiomiceti (Basidiomycota) e Zigomiceti (Zygomycota).

I funghi sono costituiti da un tallo unicellulare o, più comunemente, pluricellulare, formato da elementi filiformi, uni- o pluricellulari, detti ife, intrecciati a formare il corpo (detto micelio). In alcuni funghi le ife, intrecciandosi danno origine a uno pseudotessuto (detto ifenchima) che costituisce, ad esempio, i corpi fruttiferi degli Ascomiceti e dei Basidiomiceti e gli sclerozi. Nei funghi le singole cellule contengono uno o più nuclei, hanno la membrana costituita da cellulosa o da una sostanza azotata (micosina), affine alla chitina degli animali. Questi organismi sono tipicamente parassiti o saprofiti, ma in alcuni casi sono caratterizzati da simbiosi mutualistica con altri organismi (esempi tipici sono licheni e micorrize, le ultime di grande interesse agrario e forestale, oltre che ecologico) e dunque possono essere endobiotici (se sviluppano il micelio nell'interno dell'ospite) o epibiotici (se ciò avviene nelle parti esterne).

Le modalità della riproduzione sono varie, comprendono processi di riproduzione vegetativa e sessuale. La prima può avere luogo per frammentazione del micelio, per formazione endogena di spore immobili o mobili (Ficomietti) entro speciali cellule (sporangii, spora), per formazione esogena di conidi o di corpi simili (clamidospore) nella continuità di una ifa o provengono da diretta trasformazione delle ife vegetative. Le spore sono durature e permettono al fungo di superare condizioni sfavorevoli anche prolungate.

La riproduzione sessuale comprende vari meccanismi, tra cui la copulazione di parti del tallo (Zigomiceti) o di isogameti mobili, la fecondazione di una oosfera da parte di nuclei provenienti da anteridi cresciuti accanto all'oogonio (Saprolegniali, alcuni Ascomiceti) o di spermi mobili (Monoblefaridali) o di spermazi immobili (alcuni Ascomiceti).

I funghi sono eterotrofi, possono comportarsi da saprofiti o parassiti. Un numero ridotto di specie è capace di attività predatorie, grazie a peculiari strutture ad anello, con cui intrappolano, ad esempio, i nematodi.



## Piante

Le piante possono essere unicellulari o multicellulari. Secondo peculiari caratteristiche si distinguono: piante annue e perenni; piante erbacee e legnose; piante a foglie caduche o sempreverdi; piante longidiurne e brevidiurne; piante acquatiche e terrestri. Le piante hanno la capacità di accedere a fonti esterne di energia e convertirla in energia chimica per i processi metabolici; sono capaci di sintetizzare composti organici notevolmente ridotti, partendo da composti inorganici semplici e notevolmente ossidati (vedi capitolo dedicato alla fotosintesi).

Caratteristiche peculiari delle piante sono:

- 1) massima superficie del corpo adibita alla nutrizione che si compie attraverso grandi superfici a contatto con l'ambiente esterno;
- 2) presenza di vari plastidi di cui quelli clorofilliani sono alla base dei processi fotosintetici.
- 3) presenza, in aggiunta alla membrana citoplasmatica (plasmalemma), di una parete cellulare di natura chimica diversa dal protoplasma che la produce (pectico-cellulosica, in alcuni casi lignificata, cutinizzata, suberificata, silicizzata);
- 4) tolleranza osmotica reversibile superiore a quella della cellula animale, ciò è possibile grazie alla parete cellulare;
- 5) accrescimento indefinito, dovuto all'attività dei meristemi apicali e intercalari (e, eventualmente, avventizi);
- 6) alternanza tra una generazione sessuale o gametofitica (con individui aploidi che producono gameti) e una asessuale o sporofitica (diploide monoica o dioica, che, per meiosi, produce spore);
- 7) assenza di separazione tra linea somatica e linea germinativa, qualsiasi cellula vegetale è totipotente e capace di produrre un nuovo individuo intero.

Le funzioni delle piante possono essere considerate due, nutrizione e riproduzione. Per quanto riguarda la nutrizione, le piante possono essere autotrofe o eterotrofe. Le autotrofe comprendono specie chemosintetiche o fotosintetiche. Nelle eterotrofe si distinguono le saprofiti e le parassite: le prime vivono su sostanza organica in decomposizione, le seconde invadono i tessuti di altri organismi, depredandoli delle sostanze nutritive.

La struttura generale delle piante può avere luogo grazie a due forme principali, il tallo e il cormo: il primo non è differenziato in parti di valore diverso, come radice, caule o

fusto, foglie, che invece si riscontrano nel cormo. Il cormo può avere forme estremamente diverse, esempi caratteristici sono i cormi delle piante superiori, con radici, rami e foglie di varia foggia e dimensione.

E' importante notare che i molteplici processi metabolici che hanno luogo contemporaneamente nelle cellule, così come i vari processi fisiologici che si svolgono a un tempo in tutti gli organismi viventi, sono finemente regolati. Durante gli anni Trenta, furono ottenute le prime evidenze scientifiche relative alla presenza degli ormoni vegetali. Molti processi fisiologici complessi, quali la crescita e la divisione cellulare, la fioritura, la dormienza, la senescenza, la maturazione, richiedono la contemporanea presenza di pressoché tutte le classi ormonali note. Gli ormoni rinvenuti nelle piante sono auxine, gibberelline, citochinine; a ciascuna di queste classi appartengono molte molecole con azione ormonale. Altre sostanze ormonali sono l'acido abscissico, l'etilene, l'acido jasmonico e i brassinosteroidi.

## Animali

Gli animali comprendono un regno di eucarioti che è costituito da quegli organismi che presentano corpo pluricellulare e riproduzione sessuale nella maggior parte dei casi. Lo sviluppo si compie per mezzo di una sfera cava, nota come blastula, costituita da cellule diploidi. La meiosi è gametica; la nutrizione è eterotrofa e ingestiva o secondariamente osmotrofa in alcuni parassiti. Gli animali popolano gli ambienti acquatico, terrestre ed endozoico (questi ultimi sono detti animali endoparassiti). Il regno è rappresentato da un gran numero di taxa: sono state descritte circa 1.500.000 specie ripartite in molti phyla.

Nella vastità e diversità delle specie appartenenti al regno animale, possiamo generalizzare alcuni aspetti. Con diverse eccezioni, in particolare parazoi, placozoi, e mesozoi, gli animali hanno un corpo differenziato in quattro tessuti distinti: epiteliale, connettivo, muscolare e nervoso. In genere, c'è anche una cavità interna digerente, con una o due aperture. Gli animali con questo tipo di organizzazione sono chiamati eumetazoi.

Tutti gli animali hanno cellule eucariotiche, circondate da una caratteristica matrice extracellulare composta di collagene e glicoproteine elastiche. Questa può essere mineralizzata a formare strutture come conchiglie, ossa e spicole. Durante lo sviluppo, secondo un quadro relativamente flessibile, le cellule possono muoversi e riorganizzarsi, realizzando strutture complesse.

In tutti gli animali, escludendo quelli più primitivi da un punto di vista evolutivo, il tegumento e il sistema muscolare sono variamente in rapporto tra loro e dipendono strettamente dall'ambiente in cui gli organismi vivono. Il tegumento, oltre alla funzione di protezione dell'ambiente interno da eventuali pericoli provenienti dall'ambiente esterno all'animale, può nei vari taxa svolgere varie altre funzioni.

Gli animali, come già ricordato sono organismi eterotrofi, non sono cioè in grado di fabbricarsi da soli l'alimento come le piante, ma devono procurarselo nutrendosi di piante, altri animali o resti di altri animali. Così come per gli altri sistemi e apparati, varie sono le modalità sviluppate dai vari phyla riguardo alle abitudini alimentari, alla digestione delle sostanze ingerite e ai propri processi metabolici.

Negli animali, l'apparato circolatorio svolge la funzione di distribuire le sostanze nutritive alle cellule del corpo. Può eventualmente contenere anche cellule e pigmenti respiratori (emoglobina, emocianina), e quindi distribuire l'ossigeno. Può essere chiuso (Anellidi, Vertebrati, molluschi Cefalopodi) o aperto (Insetti, altri Molluschi), o addirittura mancare del tutto, come in alcuni Phyla.

La finalità della respirazione è rifornire i tessuti di ossigeno e liberarli dall'anidride carbonica, prodotto di scarto dell'attività cellulare. Una qualsiasi superficie sottile, umida, è in grado di adempiere a questa funzione; riconosciamo branchie e polmoni a seconda che l'animale sia acquatico o meno. L'apparato escretore si occupa di eliminare cataboliti, principalmente prodotti azotati, dall'organismo, sotto forma di ammoniaca, urea o acido urico.

Per quanto riguarda le abilità sensoriali, è noto che gli organismi unicellulari sono in grado di rispondere a uno stimolo esterno con una reazione, dimostrandosi eccitabili o irritabili. Dal passaggio alle forme pluricellulari nasce la necessità di un sistema nervoso capace di gestire e coordinare le funzioni dei vari tessuti, apparati e sistemi in modo che essi agiscano come un'unità. Troviamo neuroni sensoriali e neuroni motori, spesso collegati fra loro attraverso neuroni associativi.

Negli animali, la riproduzione può avvenire sessualmente o asessualmente. La riproduzione asessuale, tipica dei Batteri e dei Protozoi, è nel regno animale molto meno diffusa e, sostanzialmente, presente solo nei phyla meno evoluti, dove comunque si può avere anche una riproduzione sessuale. A volte è presente l'alternanza di generazioni.

Per una dettagliata esposizione delle categorie sistematiche comprese negli animali e loro caratteristiche si rimanda il lettore a testi più ampi ed esaustivi, con speciale riferimento a Baccetti et al. (1995), Mitchell et al. (1991) e il database della Fauna Europea disponibile online.

## **Bibliografia e referenze informatiche utili:**

Questo sintetico compendio ad uso degli studenti può essere vantaggiosamente integrato dal lettore utilizzando le seguenti fonti bibliografiche, da cui sono stati attinti parte dei contenuti esposti sopra:

- Baccetti B. et al. (1995) Trattato Italiano di Zoologia. ISBN 978-88-08-09366-0.
- Mitchell, L. G., Mutchmor, J. A., Dolphin, W. D. (1991). Zoologia. Ed. Zanichelli.
- Campbell, N., Reece, J. (2004). Biologia. Ed. Zanichelli.
- Corgiat Mecio, A. (2019). Dispense di Biologia. Disponibile online: [https://www.iis-ferraris.gov.it/files/dispensa\\_di\\_biologia.pdf](https://www.iis-ferraris.gov.it/files/dispensa_di_biologia.pdf)
- Roberti, R., Alunni Bistocchi, G. (2007) Elementi di Chimica e Biochimica. McGraw Hill.
- Enciclopedia Treccani (2019) <http://www.treccani.it/enciclopedia> (voci: virus, batteri, fungo, pianta, animale, Eumetazoi).
- Rodomontano, M. (2019). Appunti di Biologia. Disponibile online: <http://rodomontano.altervista.org/biologia.php>

Si ringrazia il Prof. Graziano di Giuseppe, del Dipartimento di Biologia dell'Università di Pisa, per il suo contributo e la discussione critica riguardo il capitolo dedicato ai protisti.