CAPITOLO

4

La membrana cellulare e gli scambi con l'ambiente

Ogni cellula vive di scambi: la sua membrana è insieme un confine e una porta.

OBIETTIVI

1. Descrivere la membrana plasmatica secondo il modello a mosaico fluido.
2. Spiegare la diffusione e l'osmosi con il modello particellare e prevederne il verso.
3. Usare correttamente i termini ipotonica, isotonica e ipertonica e prevedere il comportamento di cellule animali e vegetali.
4. Distinguere trasporto passivo e attivo, con e senza proteine, ed endocitosi ed esocitosi.
5. Calcolare variazioni percentuali di massa e stimare una concentrazione isotonica da dati sperimentali.

INDICE DEL CAPITOLO

4.1 La membrana plasmatica: un confine che sceglie 2
4.2 La diffusione 4
4.3 L'osmosi 6
4.4 Il trasporto con le proteine: passivo e attivo 10
4.5 Endocitosi ed esocitosi 12
4.6 In laboratorio: misurare l'osmosi 14

Scienze naturali 2 · Parte I · La cellula · versione 1.0
Capitolo 4: La membrana cellulare e gli scambi con l'ambiente · pagine 87–108 del volume completo · estratto per lo studio

Un'insalata salata e lasciata in tavola mezz'ora si affloscia; le stesse foglie, immerse in acqua fredda, tornano croccanti. Un globulo rosso messo in acqua pura si gonfia fino a scoppiare. In tutti questi casi l'acqua attraversa la sottile pellicola che avvolge ogni cellula, la **membrana plasmatica**. In questo capitolo vedrai com'è fatta, perché lascia passare certe sostanze e ne blocca altre, e in quanti modi la cellula scambia materia con l'ambiente: a volte senza spendere energia, a volte pagando con l'ATP.

4.1 La membrana plasmatica: un confine che sceglie

Ogni cellula, procariotica o eucariotica, è delimitata da una membrana plasmatica, come hai visto nel capitolo precedente. Da un lato separa il citoplasma dall'ambiente e permette alla cellula di mantenere al suo interno condizioni diverse da quelle di fuori, base dell'omeostasi. Dall'altro non è un muro: ossigeno, nutrienti e ioni devono entrare, anidride carbonica e scarti devono uscire, e la membrana decide che cosa passa e in che direzione. Si dice che ha una **permeabilità selettiva**.

La membrana è sottilissima: il suo spessore è di circa 5–10 nm, cioè molto al di sotto del limite di risoluzione del microscopio ottico (circa 0,2 µm). Al microscopio ottico se ne vede soltanto il contorno; la sua struttura a due strati è stata osservata con il microscopio elettronico a trasmissione, che la mostra come due linee scure separate da una linea chiara.

4.1.1 Il modello a mosaico fluido

Il modello oggi accettato per descrivere la membrana è il **modello a mosaico fluido**, proposto nel 1972 da Seymour J. Singer e Garth L. Nicolson (Figura 4.1). Il suo «telaio» è il **doppio strato fosfolipidico**. Ricorderai dal capitolo sulle biomolecole che un fosfolipide ha una testa idrofila e due code idrofobe. In acqua i fosfolipidi si dispongono spontaneamente su due strati affiancati: le teste sono rivolte verso l'acqua, da una parte verso il liquido extracellulare e dall'altra verso il citosol, mentre le code restano nascoste all'interno, lontane dall'acqua. Proprio questo cuore idrofobo rende difficile il passaggio delle sostanze che si sciolgono bene in acqua, come gli ioni e gli zuccheri.

Nel doppio strato sono immerse molte proteine, come le tessere di un mosaico. Le **proteine integrali** sono inserite nel doppio strato e in genere lo attraversano da parte a parte (per questo si chiamano anche *transmembrana*); le **proteine periferiche** sono invece appoggiate su una delle due facce, spesso quella interna, legate alle teste dei fosfolipidi o alle proteine integrali. Le proteine svolgono quasi tutti i compiti specifici della membrana:

- **trasporto**: formano canali o trasportano molecole da un lato all'altro;

- **recettori**: legano un messaggio chimico proveniente da fuori, per esempio un ormone, e lo «segnalano» all'interno;
- **enzimi**: accelerano reazioni che avvengono sulla membrana;
- **riconoscimento e adesione**: permettono alle cellule di riconoscersi e di unirsi fra loro;
- **ancoraggio**: collegano la membrana ai filamenti del citoscheletro, all'interno, e alle strutture che circondano la cellula, all'esterno.

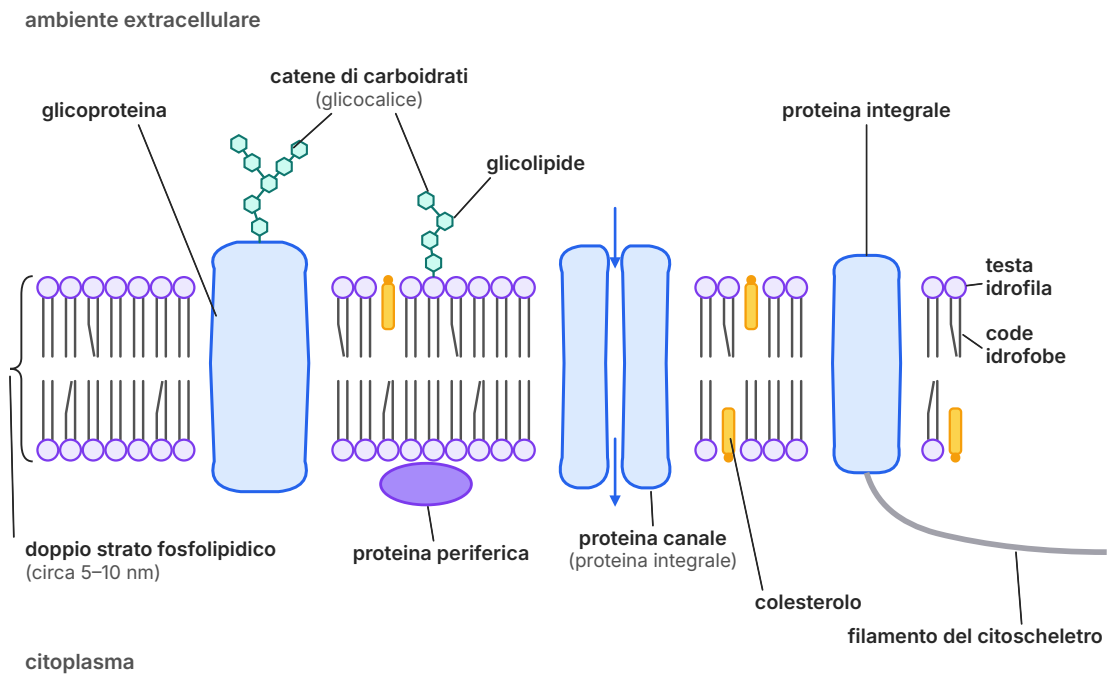


Figura 4.1 Il modello a mosaico fluido della membrana plasmatica. Il doppio strato fosfolipidico ha le teste idrofile rivolte verso l'acqua e le code idrofobe all'interno; alcune code hanno una piega, dovuta a un acido grasso insaturo. Le proteine integrali attraversano il doppio strato, le periferiche sono appoggiate su una faccia. Le catene di carboidrati di glicoproteine e glicolipidi sono rivolte solo verso l'esterno. Schema non in scala.

Perché «fluido»? Perché fosfolipidi e molte proteine si spostano di continuo lateralmente nel proprio strato, come persone in una piazza affollata; il passaggio da uno strato all'altro, invece, è raro. Le code piegate degli acidi grassi insaturi impediscono ai fosfolipidi di impacchettarsi strettamente e rendono la membrana più fluida. Nelle cellule animali le molecole di **colesterolo**, inserite fra le code, ne regolano la fluidità: la rendono meno rigida quando fa freddo e meno fluida quando fa caldo.

Sulla faccia esterna, infine, molte proteine e alcuni lipidi portano catene di zuccheri: sono le **glicoproteine** e i **glicolipidi**. L'insieme di queste catene forma il **glicocalice**, un rivestimento che funziona come una «carta d'identità» della cellula. Grazie al glicocalice le cellule di un tes-

suto si riconoscono fra loro e le cellule del sistema immunitario distinguono le cellule dell'organismo da quelle estranee. Anche i gruppi sanguigni del sistema AB0, che studierai nel capitolo sulla genetica umana, dipendono da catene di zuccheri presenti sulla superficie dei globuli rossi.

DA RICORDARE

Semipermeabile o selettiva? Le membrane artificiali da laboratorio, come i tubi da dialisi, lasciano passare l'acqua e le molecole piccole e trattengono quelle grandi, come l'amido o le proteine: sono *semipermeabili*. La membrana plasmatica fa di più: con le sue proteine sceglie anche fra molecole di dimensioni simili e può perfino spingere una sostanza «in salita». Le membrane interne della cellula eucariotica (nucleo, reticolo, Golgi, mitocondri, cloroplasti) hanno la stessa struttura di base.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Dal «sandwich» al mosaico fluido

Nel 1925 gli olandesi Evert Gorter e François Grendel estrassero i lipidi dalle membrane dei globuli rossi e li stesero sull'acqua in uno strato spesso una sola molecola: lo strato copriva una superficie circa doppia di quella delle cellule, quindi nella membrana i lipidi formano *due* strati. Nel 1935 Hugh Davson e James Danielli proposero un modello a «sandwich», con il doppio strato racchiuso fra due strati continui di proteine.

Il sandwich entrò in crisi quando il microscopio elettronico mostrò proteine immerse nel doppio strato. Nel 1970 L. D. Frye e M. Edidin fusero una cellula di topo e una umana, con le proteine di membrana marcate da coloranti fluorescenti diversi: in meno di un'ora i due colori si erano mescolati. Le proteine si muovono. Nel 1972 Singer e Nicolson riunirono questi dati nel modello a mosaico fluido.

4.2 La diffusione

In *Scienze naturali 1*, studiando il modello particellare, hai visto che il profumo di una boccetta aperta si sparge in tutta la stanza anche se l'aria è ferma: è la diffusione, dovuta al moto continuo e disordinato delle particelle. Ora la guardiamo con gli occhi della cellula.

Supponiamo che una sostanza sia più concentrata in una zona e meno in un'altra: fra le due zone esiste un **gradiente di concentrazione**, cioè una differenza di concentrazione fra due punti vicini. Ogni particella si muove a caso, senza «sapere» dove andare; ma poiché dove la concentrazione è alta le particelle sono più numerose, sono di più quelle che passano verso la zona povera che quelle che fanno il cammino inverso. Il risultato è un **movimento netto** dalla zona a concentrazione maggiore verso quella a concentrazione minore: si dice che la sostanza si sposta *secondo gradiente*, cioè «in discesa» (Figura 4.2).

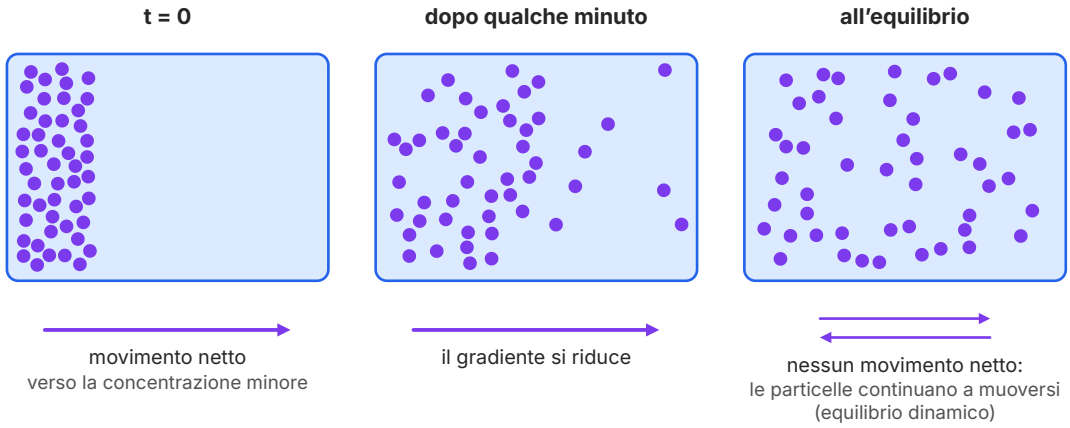


Figura 4.2 La diffusione di un soluto in acqua. All'inizio le particelle sono concentrate a sinistra; il loro moto casuale produce un movimento netto verso destra, finché la concentrazione diventa uniforme. All'equilibrio le particelle continuano a muoversi, ma in ogni direzione ne passano in media tante quante nella direzione opposta.

Quando la concentrazione è diventata uguale dappertutto il movimento netto cessa, ma le particelle non si fermano: continuano a muoversi, solo che ora, in media, tante vanno in un verso quante nel verso opposto. È un **equilibrio dinamico**. La diffusione non richiede energia dall'esterno: è il moto spontaneo delle particelle a produrla.

La velocità della diffusione dipende da diversi fattori:

- la **temperatura**: più è alta, più le particelle si muovono velocemente e più rapida è la diffusione;
- il **gradiente**: più è grande la differenza di concentrazione, più è veloce il movimento netto;
- le **dimensioni delle particelle**: le particelle piccole diffondono più in fretta di quelle grandi;
- il **mezzo**: la diffusione è rapida nei gas, più lenta nei liquidi.

C'è poi una regola importante per i viventi: la diffusione è efficace solo su distanze brevi. Una molecola d'ossigeno attraversa una cellula in una frazione di secondo, ma per percorrere qualche centimetro di acqua ferma impiegherebbe ore. Ecco un altro motivo, oltre al rapporto superficie/volume che hai studiato nel primo capitolo, per cui le cellule sono piccole.

4.2.1 La diffusione semplice attraverso la membrana

Alcune sostanze attraversano la membrana passando direttamente fra i fosfolipidi: è la **diffusione semplice**. Ci riescono le molecole piccole e prive di carica, come l'ossigeno (O_2) e l'anidride carbonica (CO_2), e le sostanze che si sciolgono bene nei grassi. Non ci riescono, o quasi, gli

ioni come Na^+ e K^+, che sono carichi, e le molecole grandi e idrofile come il glucosio: il cuore idrofobo del doppio strato le respinge.

La diffusione semplice è sempre «in discesa». Una cellula consuma continuamente ossigeno nei mitocondri (lo vedrai nel prossimo capitolo, con la respirazione cellulare): perciò dentro la cellula la concentrazione di O_2 resta più bassa che fuori, e l'ossigeno continua a entrare. Per l'anidride carbonica, che la cellula produce, vale il contrario: è più concentrata dentro, e quindi esce.

COLLEGAMENTI

Polmoni e foglie: tutto per diffusione. Nei polmoni l'ossigeno passa dall'aria al sangue per diffusione, attraverso le pareti sottilissime degli alveoli e dei capillari. Nella foglia la CO_2 entra dagli stomi e diffonde fino ai cloroplasti. In entrambi i casi le superfici di scambio sono molto estese e molto sottili: è così che la diffusione diventa veloce. L'anatomia di questi organi la studierai negli anni successivi.

4.3 L'osmosi

L'acqua è la sostanza che attraversa le membrane in quantità maggiore: in parte fra i fosfolipidi, in gran parte attraverso canali proteici che vedrai nel prossimo paragrafo. Il suo movimento ha un nome proprio.

L'**osmosi** è la diffusione dell'acqua attraverso una **membrana semipermeabile**, cioè una membrana che lascia passare l'acqua ma non il soluto. Osserva l'esperimento della Figura 4.3. Un tubo a U è diviso in due rami da una membrana semipermeabile: a sinistra c'è acqua pura, a destra una soluzione di saccarosio, che non può attraversare la membrana. L'acqua sì, in entrambi i versi; ma dal lato dell'acqua pura le molecole d'acqua libere di raggiungere la membrana sono più numerose, mentre dal lato della soluzione una parte è «trattenuta» intorno al soluto. Ne risulta un flusso netto d'acqua verso destra: il livello della soluzione sale.

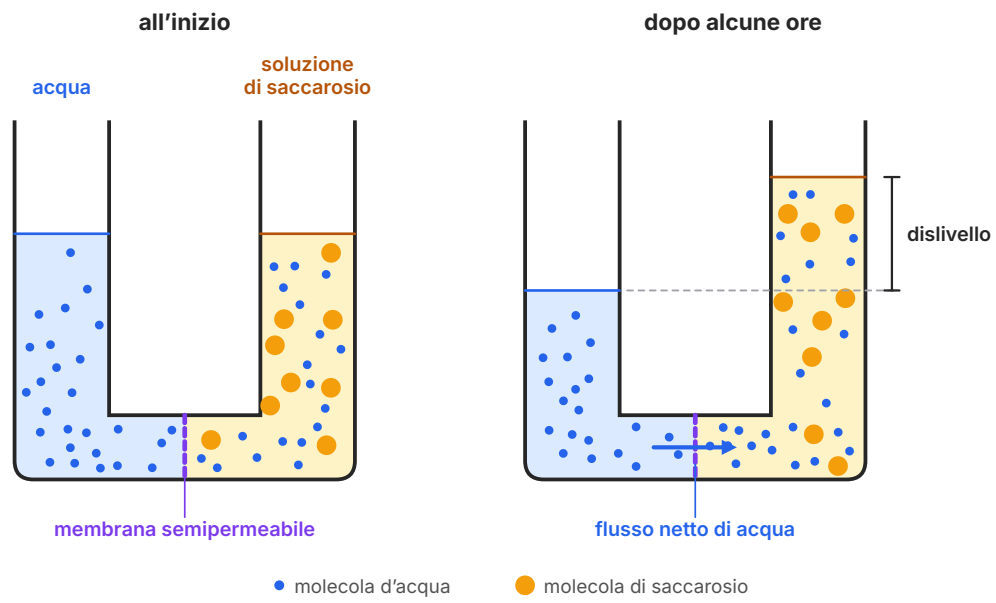


Figura 4.3 L'osmosi in un tubo a U. La membrana semipermeabile lascia passare l'acqua ma non il saccarosio. L'acqua si sposta in prevalenza verso la soluzione, il cui livello sale; il dislivello cresce finché il peso della colonna di liquido in più non bilancia l'ingresso dell'acqua. Le molecole sono enormemente ingrandite: schema non in scala.

Man mano che il livello a destra sale, il peso della colonna di liquido in più spinge l'acqua indietro; quando le due tendenze si bilanciano, il dislivello smette di crescere. Alla fine le due concentrazioni non sono uguali: a sinistra c'è ancora acqua pura.

In breve: **l'acqua si sposta dalla soluzione con meno soluto verso la soluzione con più soluto**. Detto in un altro modo, l'acqua va da dove essa stessa è più «concentrata» verso dove lo è meno: anche l'osmosi è una diffusione secondo gradiente, quello dell'acqua.

4.3.1 Ipotonica, isotonica, ipertonica

Per descrivere l'osmosi si confrontano le concentrazioni di due soluzioni separate da una membrana; per esprimerle si usa spesso la concentrazione percentuale massa/volume (% m/V), cioè i grammi di soluto in 100 mL di soluzione, che hai studiato in *Scienze naturali 1*. Rispetto a un'altra soluzione, una soluzione si dice:

- **ipertonica** se contiene *più* soluto (cioè più particelle di soluto disciolte);
- **ipotonica** se contiene *meno* soluto;
- **isotonica** se ne contiene *la stessa quantità*: in questo caso l'acqua passa ugualmente nei due versi e non c'è flusso netto.

L'acqua si sposta quindi dalla soluzione ipotonica verso quella ipertonica. Quando si parla di cellule, il termine di confronto è il citoplasma: una soluzione «ipertonica» per un globulo rosso è una soluzione che contiene più soluto del citoplasma del globulo rosso.

ERRORE FREQUENTE

«Il sale entra nella cellula» e «la soluzione è ipotonica». Due errori diffusi. Primo: nell'osmosi ad attraversare la membrana è l'*acqua*, non il soluto: una fetta di patata in acqua salata perde massa perché esce acqua. Secondo: *ipotonica*, *isotonica* e *ipertonica* sono aggettivi di confronto, come «più alto» o «più basso». Una soluzione al 2 % è ipertonica rispetto a una all'1 %, ma ipotonica rispetto a una al 5 %. Dire che una soluzione «è ipotonica» senza dire rispetto a che cosa non ha senso.

ESEMPIO SVOLTO

Da che parte va l'acqua? Un sacchetto fatto di una membrana semipermeabile, che lascia passare l'acqua ma non il glucosio, contiene una soluzione di glucosio al 10 % m/V. Il sacchetto viene immerso in un becher con una soluzione di glucosio al 2 % m/V. Che cosa succede?

Confronto. Dentro il sacchetto: 10 g di glucosio ogni 100 mL. Fuori: 2 g ogni 100 mL. La soluzione interna è ipertonica rispetto a quella esterna (e quella esterna è ipotonica rispetto all'interna).

Conclusione. L'acqua si muove in prevalenza dalla soluzione ipotonica a quella ipertonica: entra nel sacchetto, che si gonfia finché la sua parete tesa non si oppone all'ingresso di altra acqua.

4.3.2 Le cellule animali e le cellule vegetali

La Figura 4.4 mostra che cosa accade a due tipi di cellule poste in soluzioni diverse. Un **globulo rosso** in una soluzione isotonica, come il plasma del sangue, conserva la sua forma di disco biconcavo. In una soluzione ipotonica, per esempio acqua distillata, l'acqua entra; la cellula, che non ha una parete, si gonfia fino a rompersi: è l'**emolisi**. In una soluzione ipertonica l'acqua esce e il globulo rosso si raggrinzisce. Per una cellula animale, perciò, l'ambiente ideale è isotonico; l'organismo regola in continuazione la concentrazione dei liquidi che bagnano le cellule.

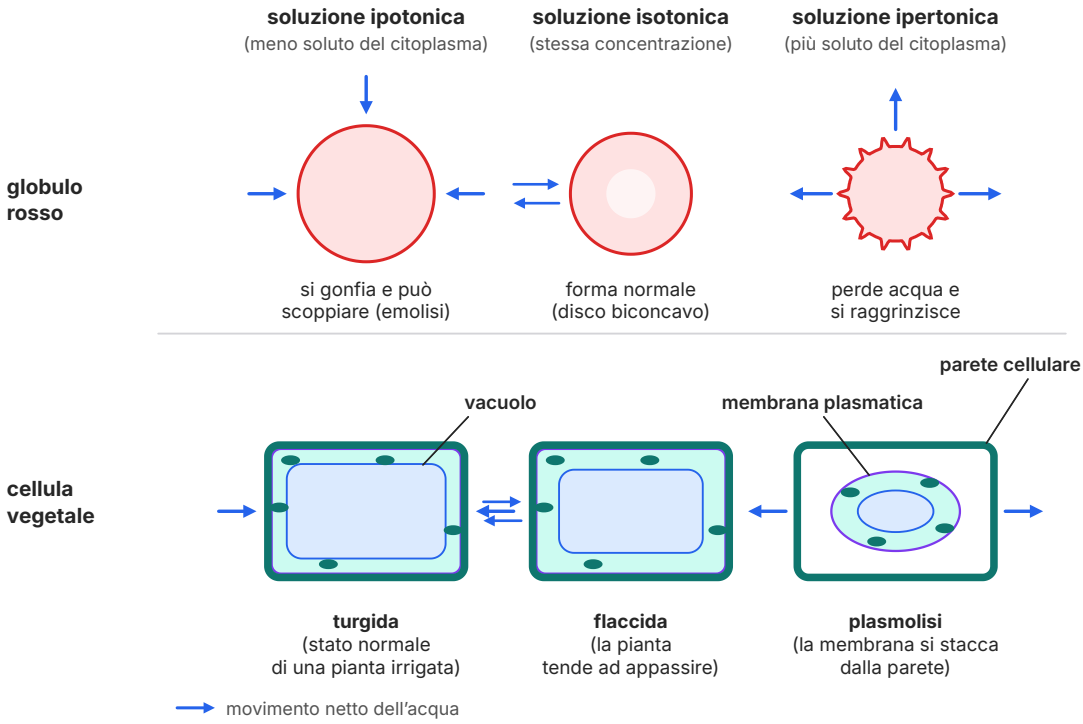


Figura 4.4 Globuli rossi e cellule vegetali in soluzioni ipotoniche, isotoniche e ipertoniche rispetto al loro citoplasma. Le frecce indicano il movimento netto dell'acqua. La parete cellulare impedisce alla cellula vegetale di scoppiare; in soluzione ipertonica la membrana plasmatica, con il citoplasma, si stacca dalla parete (plasmolisi). Schema non in scala.

Una **cellula vegetale** si comporta in modo diverso perché è circondata da una parete di cellulosa, robusta e poco elastica. In un ambiente ipotonico l'acqua entra, soprattutto nel grande vacuolo centrale, e spinge la membrana contro la parete, che resiste: la cellula diventa tesa, senza scoppiare. Questa pressione interna è il **turgore**, condizione normale di una pianta ben irrigata: le cellule turgide tengono erette foglie e fusti erbacei. In un ambiente isotonico la cellula diventa flaccida e la pianta appassisce. In un ambiente ipertonico l'acqua esce dal vacuolo, il citoplasma si contrae e la membrana plasmatica si stacca dalla parete: è la **plasmolisi**, ben visibile al microscopio. Se dura a lungo, la cellula muore.

I protisti d'acqua dolce, come il paramecio, assorbono acqua di continuo ma non scoppiano: un **vacuolo contrattile** raccoglie l'acqua in eccesso e la espelle.

COLLEGAMENTI

La flebo, la marmellata e il baccalà. Le soluzioni che si iniettano in vena devono essere isotoniche rispetto al sangue, altrimenti i globuli rossi si gonfierebbero o si raggrinzirebbero. La più usata è la **soluzione fisiologica**, acqua con lo 0,9 % m/V di cloruro di sodio: 0,9 g di sale ogni 100 mL.

L'osmosi spiega anche alcuni metodi di conservazione antichissimi. Nella marmellata, nella frutta candita, nel baccalà e nel prosciutto lo zucchero o il sale rendono l'ambiente fortemente ipertonico per batteri e muffe: le loro cellule perdono acqua e non riescono a moltiplicarsi. Ed ecco perché l'insalata si sala solo al momento di servirla.

4.4 Il trasporto con le proteine: passivo e attivo

Ioni, zuccheri e amminoacidi sono indispensabili alla cellula, ma il doppio strato fosfolipidico li lascia passare pochissimo. Per farli entrare e uscire servono le **proteine di trasporto** della membrana. Ognuna è specifica: trasporta un solo tipo di sostanza, o poche sostanze simili. Le cellule controllano quali sostanze scambiare decidendo quali proteine di trasporto inserire nella propria membrana. La Figura 4.5 riassume i casi principali.

4.4.1 La diffusione facilitata

Nella **diffusione facilitata** una sostanza attraversa la membrana con l'aiuto di una proteina, ma sempre secondo gradiente, dalla concentrazione maggiore alla minore. Come la diffusione semplice, è un **trasporto passivo**: non consuma energia della cellula. Le proteine che la rendono possibile sono di due tipi.

- Le **proteine canale** formano un tunnel attraverso la membrana, attraverso cui passano rapidamente certi ioni o l'acqua; molti canali per ioni si aprono e si chiudono in risposta a segnali. I canali per l'acqua si chiamano **acquaporine** e abbondano, per esempio, nelle cellule del rene e nei globuli rossi.
- Le **proteine trasportatrici** legano la sostanza da un lato della membrana, cambiano forma e la liberano dall'altro lato. Così entra il glucosio in molte cellule, per esempio nei globuli rossi. Poiché ogni trasportatore lavora una molecola alla volta, quando sono tutti occupati la velocità del trasporto non cresce più, anche se si aumenta la concentrazione esterna: si dice che il trasporto «si satura».

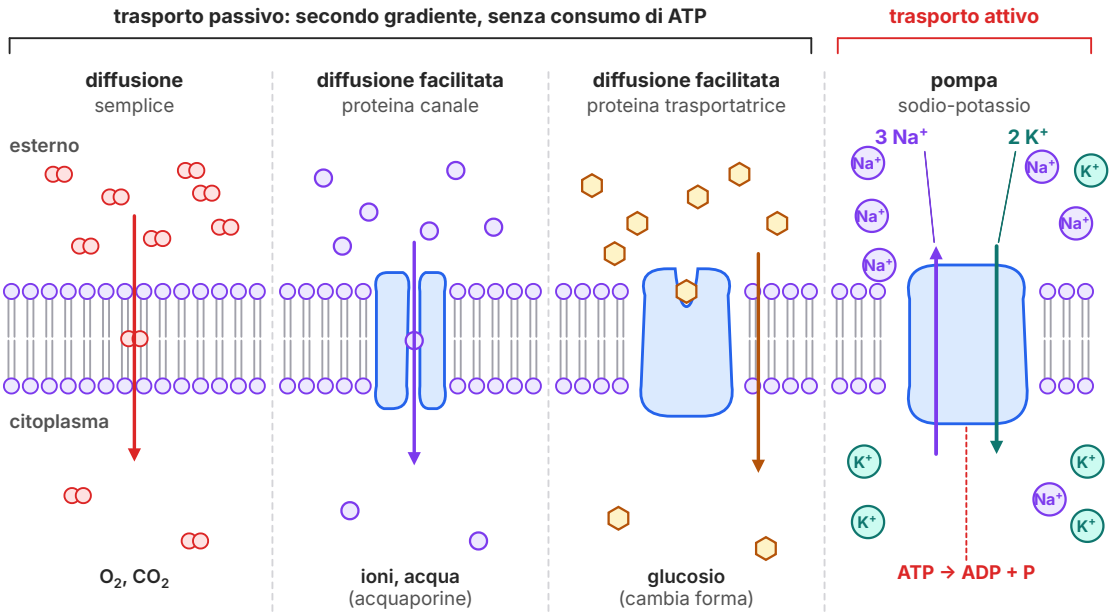


Figura 4.5 I tipi di trasporto attraverso la membrana. Nella diffusione semplice e nella diffusione facilitata le sostanze scendono lungo il proprio gradiente senza consumo di energia. La pompa sodio-potassio porta, per ogni molecola di ATP, tre ioni Na^+ fuori e due ioni K^+ dentro, entrambi contro gradiente. Schema non in scala.

Basta un difetto in una sola proteina di trasporto per causare una malattia: nella fibrosi cistica, malattia ereditaria, funziona male un canale per gli ioni cloruro e le secrezioni dei bronchi diventano dense e vischiose.

4.4.2 Il trasporto attivo

A volte la cellula deve accumulare una sostanza dove è già più concentrata, cioè spostarla *contro* il suo gradiente, «in salita». Questo non può accadere spontaneamente: serve un lavoro, e quindi energia. Il **trasporto attivo** è il passaggio di una sostanza attraverso la membrana contro gradiente, compiuto da proteine di trasporto che consumano energia, di solito fornita dall'ATP, la «moneta energetica» della cellula di cui hai sentito parlare nel capitolo sulle biomolecole.

L'esempio più studiato è la **pompa sodio-potassio**, presente nella membrana di quasi tutte le cellule animali. A ogni ciclo la pompa usa l'energia di una molecola di ATP, che diventa ADP e fosfato, per portare **tre ioni sodio (Na^+) fuori** dalla cellula e **due ioni potassio (K^+) dentro**. Entrambi i movimenti sono contro gradiente: il sodio è molto più concentrato fuori, il potassio dentro. Queste differenze sono indispensabili, per esempio, alle cellule nervose e muscolari, e la cellula spende una parte importante del suo ATP per mantenerle.

Anche le piante usano il trasporto attivo: le cellule delle radici assorbono dal terreno ioni minerali, come il potassio e i nitrati, anche quando nella radice sono già più concentrati che nel suolo.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Due premi Nobel per le «porte» della membrana

Nel 1957 il danese Jens Christian Skou, studiando i nervi di granchio, scoprì un enzima che consuma ATP solo in presenza di ioni sodio e potassio: la pompa sodio-potassio. Ricevette il premio Nobel per la chimica nel 1997.

Alcune cellule, come i globuli rossi, lasciano passare l'acqua molto più in fretta di quanto permetta il solo doppio strato. Nel 1992 il gruppo dello statunitense Peter Agre dimostrò che una proteina della loro membrana è un canale per l'acqua: la prima acquaporina. Agre ricevette il Nobel per la chimica nel 2003, insieme a Roderick MacKinnon, che aveva chiarito la struttura dei canali per il potassio.

4.5 Endocitosi ed esocitosi

Le proteine di trasporto spostano ioni e piccole molecole. Ma una cellula può anche dover inglobare una grande proteina, una goccia di liquido o addirittura un batterio intero, oppure liberare all'esterno grandi quantità di sostanze prodotte al suo interno. In questi casi interviene la membrana stessa, che si ripiega e forma delle **vescicole**, piccole sacche delimitate da membrana (Figura 4.6). Anche questi processi richiedono energia.

Nell'**endocitosi** la membrana si introflette intorno al materiale da inglobare e si chiude, staccando una vescicola che finisce nel citoplasma. Se ne distinguono tre forme:

- la **fagocitosi** («mangiare da parte della cellula»): estroflessioni della cellula, gli **pseudopodi**, circondano una particella grande, come un batterio, e la chiudono in un vacuolo, che poi si fonde con i lisosomi. Così si nutrono le amebe e alcuni globuli bianchi distruggono i batteri;
- la **pinocitosi** («bere da parte della cellula»): la membrana forma piccole introflessioni che inglobano una goccia di liquido extracellulare, con le sostanze disciolte;
- l'**endocitosi mediata da recettori**: certe molecole si legano a recettori specifici della membrana, che poi si raccolgono in una fossetta e vengono inglobati in vescicole: così molte cellule catturano il colesterolo trasportato nel sangue.

L'**esocitosi** è il processo inverso: una vescicola si avvicina alla membrana plasmatica, la sua membrana si fonde con essa e il contenuto viene liberato all'esterno. È la tappa finale della via di secrezione che hai seguito nel capitolo precedente, dal reticolo endoplasmatico ruvido al Golgi fino alla membrana. Così le cellule del pancreas liberano enzimi digestivi e insulina e le mucose secernono il muco. Ogni esocitosi aggiunge un po' di membrana alla superficie, ogni endocitosi ne toglie: la membrana è continuamente rinnovata.

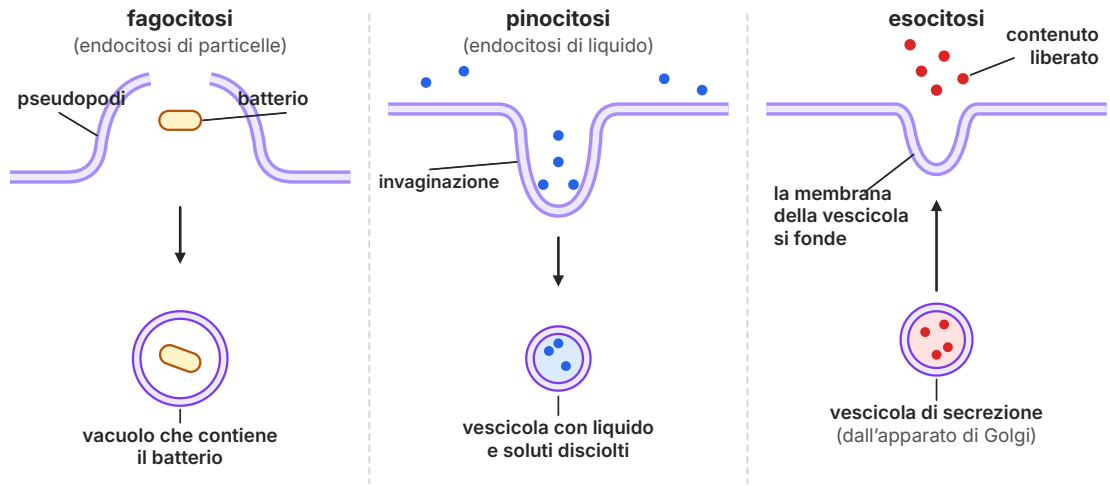


Figura 4.6 Endocitosi ed esocitosi. Nella fagocitosi gli pseudopodi circondano una particella grande e la chiudono in un vacuolo; nella pinocitosi la membrana ingloba una goccia di liquido. Nell'esocitosi una vescicola si fonde con la membrana plasmatica e ne riversa il contenuto all'esterno. In tutti i casi l'esterno della cellula è in alto, il citoplasma in basso. Schema non in scala.

4.5.1 Uno schema per orientarsi

La Tabella 4.1 riassume tutti i meccanismi del capitolo.

Tabella 4.1 I modi in cui le sostanze attraversano la membrana plasmatica.

Meccanismo	Rispetto al gradiente	Proteine di membrana	Consumo di energia	Esempi
diffusione semplice	secondo gradiente	no	no	O_2, CO_2
osmosi	secondo gradiente (dell'acqua)	in parte (acquaporine)	no	acqua
diffusione facilitata	secondo gradiente	sì: canali o trasportatori	no	ioni, glucosio
trasporto attivo	contro gradiente	sì: pompe	sì (ATP)	Na^+ e K^+, ioni minerali nelle radici
endocitosi	—	a volte (recettori)	sì	batteri, gocce di liquido, colesterolo
esocitosi	—	—	sì	enzimi digestivi, ormoni, muco

IN SINTESI

Per classificare un trasporto basta rispondere a tre domande.

1. **La sostanza va secondo gradiente?** Sì: è un trasporto passivo (diffusione semplice, osmosi, diffusione facilitata). No: è un trasporto attivo.
2. **Passa da sola fra i fosfolipidi?** Sì: diffusione semplice. No: servono proteine (canali, trasportatori, pompe).
3. **È una particella grande o una gran quantità di materiale?** Allora si muove dentro vescicole: endocitosi in entrata, esocitosi in uscita.

4.6 In laboratorio: misurare l'osmosi

L'osmosi si osserva facilmente anche senza microscopio, pesando un tessuto vegetale prima e dopo averlo immerso in soluzioni diverse. Per confrontare pezzi di massa iniziale diversa non si usa la variazione di massa in grammi, ma la **variazione percentuale di massa**:

$$\text{variazione } \% = \frac{\text{massa finale} - \text{massa iniziale}}{\text{massa iniziale}} \times 100$$

Una variazione positiva indica che il tessuto ha assorbito acqua: la soluzione era ipotonica rispetto alle sue cellule. Una variazione negativa indica che ha perso acqua: la soluzione era ipertonica.

ESEMPIO SVOLTO

La variazione percentuale di massa. Un cilindro di patata ha una massa di 2,50 g. Dopo due ore in una soluzione di saccarosio, asciugato con carta assorbente, pesa 2,30 g. Calcola la variazione percentuale di massa e stabilisci se la soluzione era ipotonica o ipertonica rispetto alle cellule della patata.

Calcolo. variazione = 2,30 g − 2,50 g = −0,20 g; variazione % = (−0,20 g / 2,50 g) × 100 = −8,0 %.

Interpretazione. Il cilindro ha perso l'8,0 % della massa: le sue cellule hanno perso acqua, quindi la soluzione era ipertonica rispetto al loro citoplasma. Il segno «meno» dice da che parte è andata l'acqua.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Cilindri di patata in soluzioni di saccarosio. *Obiettivo*: stimare la concentrazione di saccarosio isotonica rispetto alle cellule della patata.

Materiale: una patata, un foratappi, un coltello, un righello, una bilancia (sensibilità 0,01 g), sette becher con soluzioni di saccarosio allo 0 % (acqua distillata), 5, 10, 15, 20, 25 e 30 % m/V, carta assorbente.

1. Ricava sette cilindri senza buccia, tutti della stessa lunghezza (per esempio 4 cm).
2. Asciuga ogni cilindro, pesalo e mettilo nel becher della sua soluzione, già etichettato.
3. Lascia i cilindri immersi almeno un'ora, meglio una notte, con i becher coperti e alla stessa temperatura.
4. Estrai i cilindri, asciugali tutti nello stesso modo e pesali di nuovo; calcola la variazione percentuale di massa e riporta i dati in un grafico.

Sicurezza: taglia con la patata appoggiata sul tavolo e la lama rivolta lontano dalla mano. Non assaggiare nulla in laboratorio.

Variabili: indipendente, la concentrazione di saccarosio; dipendente, la variazione percentuale di massa; costanti, la patata, le dimensioni dei cilindri, il tempo e la temperatura. Il becher con acqua distillata serve da confronto. Tre cilindri per concentrazione, con la media, danno risultati più affidabili.

Risultati attesi: la Tabella 4.2 e la Figura 4.7 riportano dati di esempio. Il punto in cui la retta che segue i dati incrocia lo zero indica la concentrazione isotonica rispetto alle cellule della patata: qui circa 9 % m/V.

Domande: perché i cilindri devono avere la stessa lunghezza? Perché si usa la variazione percentuale e non quella in grammi?

Tabella 4.2 Dati di esempio di un'esperienza con cilindri di patata (valori illustrativi, non misure reali).

Saccarosio (% m/V)	Massa iniziale (g)	Massa finale (g)	Variazione di massa (%)
0	2,48	2,76	+11,3
5	2,52	2,63	+4,4
10	2,50	2,48	−0,8
15	2,46	2,28	−7,3
20	2,51	2,19	−12,7
25	2,49	2,00	−19,7
30	2,53	1,90	−24,9

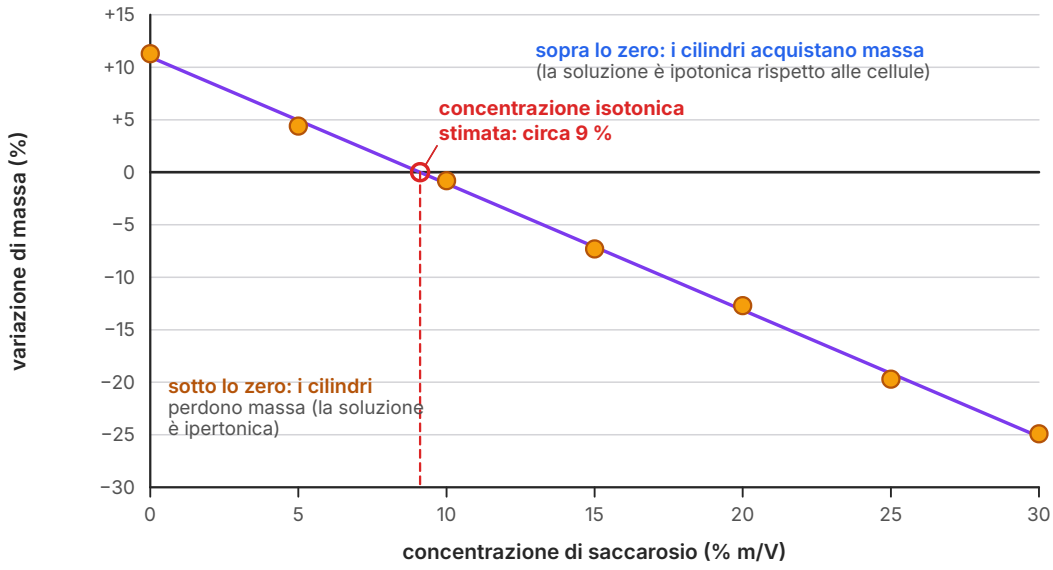


Figura 4.7 Variazione percentuale di massa di cilindri di patata in soluzioni di saccarosio a concentrazioni diverse (dati di esempio della Tabella 4.2). La retta che meglio segue i punti incrocia lo zero a circa 9 % m/V: è la stima della concentrazione isotonica rispetto alle cellule della patata.

ESEMPIO SVOLTO

Stimare la concentrazione isotonica senza grafico. Con i dati della Tabella 4.2, stima la concentrazione isotonica supponendo che, fra due concentrazioni vicine, la variazione di massa cambi in modo proporzionale.

Ragionamento. La variazione cambia segno fra il 5 % (+4,4 %) e il 10 % (−0,8 %): in questo intervallo scende di 4,4 + 0,8 = 5,2 punti. Per arrivare a zero dal 5 % deve scendere di 4,4 punti, cioè 4,4 / 5,2 ≈ 0,85 dell'intervallo.

Risultato. concentrazione isotonica ≈ 5 % + 0,85 × 5 % ≈ 9,2 % m/V, in accordo con il grafico (circa 9 %). Entrambi i metodi danno una stima, non un valore esatto.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

L'uovo senza guscio. *Obiettivo*: osservare l'osmosi in una «cellula» visibile a occhio nudo, misurandone la massa.

1. Immergi un uovo crudo in aceto bianco per uno o due giorni, finché il guscio non si è sciolto (le bollicine sono anidride carbonica, prodotta dalla reazione fra l'acido dell'aceto e il carbonato di calcio). Restano le membrane dell'uovo, che si comportano come una membrana semipermeabile.
2. Sciacqua delicatamente l'uovo, asciugalo e pesalo.
3. Immergilo in acqua distillata per un giorno, poi asciugalo e pesalo di nuovo.
4. Trasferiscilo in uno sciroppo molto concentrato di zucchero (o di glucosio) per un giorno; asciugalo e pesalo.

Sicurezza: l'uovo crudo può contenere batteri come la salmonella: lavati le mani dopo averlo toccato e non mangiare nulla. Attenzione: senza guscio l'uovo si rompe facilmente.

Risultati attesi: in acqua distillata l'uovo si gonfia, perché l'acqua entra; nello sciroppo si affloscia, perché l'acqua esce. Le membrane trattengono quasi del tutto le proteine dell'albume e lo zucchero.

Domande: l'acqua distillata è ipotonica o ipertonica rispetto all'albume? E lo sciroppo? Perché per confrontare le due fasi conviene usare la variazione percentuale di massa?

SINTESI

- La membrana plasmatica ha una permeabilità selettiva: decide che cosa entra e che cosa esce.
- Modello a mosaico fluido (Singer e Nicolson, 1972): doppio strato fosfolipidico, teste idrofile verso l'acqua e code idrofobe all'interno, con proteine integrali e periferiche; i componenti si spostano lateralmente.
- Il colesterolo regola la fluidità delle membrane animali; le catene di zuccheri rivolte verso l'esterno formano il glicocalice, che serve al riconoscimento fra cellule.
- Nella diffusione una sostanza si sposta secondo gradiente fino a un equilibrio dinamico; la velocità cresce con la temperatura e con il gradiente.
- O_2 e CO_2 attraversano la membrana per diffusione semplice, passando fra i fosfolipidi; ioni e molecole idrofile grandi no.
- L'osmosi è la diffusione dell'acqua attraverso una membrana semipermeabile: l'acqua si sposta dalla soluzione ipotonica a quella ipertonica. I tre termini descrivono sempre un confronto fra due soluzioni.
- In soluzione ipotonica un globulo rosso si gonfia e può scoppiare, una cellula vegetale diventa turgida; in soluzione ipertonica il globulo rosso si raggrinzisce e la cellula vegetale va in plasmolisi.
- Nella diffusione facilitata canali (come le acquaporine) e trasportatori fanno passare sostanze specifiche secondo gradiente, senza consumo di energia.
- Nel trasporto attivo le proteine spostano sostanze contro gradiente consumando ATP: la pompa sodio-potassio porta 3 Na^+ fuori e 2 K^+ dentro per ogni ATP.
- Particelle grandi e liquidi entrano per endocitosi (fagocitosi, pinocitosi, mediata da recettori) ed escono per esocitosi, dentro vescicole, con consumo di energia.
- La variazione percentuale di massa di un tessuto in soluzioni diverse permette di stimare la concentrazione isotonica.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Nel modello a mosaico fluido, le code idrofobe dei fosfolipidi sono rivolte:

   A. verso il liquido extracellulare
   B. verso il citoplasma
   C. verso l'interno del doppio strato
   D. verso le catene di carboidrati del glicocalice

2. ● Le catene di carboidrati delle glicoproteine e dei glicolipidi della membrana plasmatica sono rivolte:

   A. verso l'ambiente extracellulare
   B. verso il citoplasma
   C. verso l'interno del doppio strato
   D. in egual misura verso le due facce

3. ● Quale di queste sostanze attraversa la membrana plasmatica per diffusione semplice?

   A. il glucosio
   B. lo ione sodio
   C. una proteina
   D. l'ossigeno

4. ●● Durante la diffusione di un colorante in acqua, il movimento netto delle particelle si arresta quando:

   A. tutte le particelle si fermano
   B. la concentrazione è diventata uniforme
   C. la temperatura scende a 0 °C
   D. le particelle si muovono tutte nello stesso verso

5. ● L'osmosi è:

   A. il passaggio del soluto attraverso una membrana semipermeabile
   B. il trasporto di ioni con consumo di ATP
   C. l'ingresso di particelle grandi dentro vescicole
   D. la diffusione dell'acqua attraverso una membrana semipermeabile

6. ●● Un globulo rosso viene posto in acqua distillata. Che cosa accade?

   A. Si gonfia e può scoppiare.
   B. Si raggrinzisce.
   C. Non cambia, perché l'acqua distillata è isotonica.
   D. Perde acqua e sali minerali.

7. ●● Che cosa hanno in comune la diffusione facilitata e il trasporto attivo?

   A. Entrambi consumano ATP.
   B. Entrambi avvengono contro gradiente.
   C. Entrambi richiedono proteine di membrana.
   D. Entrambi trasportano soltanto acqua.

8. ● A ogni ciclo, la pompa sodio-potassio:
   A. porta 3 Na^+ dentro e 2 K^+ fuori
   B. porta 3 Na^+ fuori e 2 K^+ dentro
   C. porta 2 Na^+ fuori e 3 K^+ dentro
   D. lascia passare Na^+ e K^+ secondo gradiente, senza energia

9. ●● Un globulo bianco che circonda con i suoi pseudopodi un batterio e lo chiude in un vacuolo compie:
   A. un'esocitosi
   B. una pinocitosi
   C. una diffusione facilitata
   D. una fagocitosi

Vero o falso

10. ● La struttura a doppio strato della membrana plasmatica si vede bene con un buon microscopio ottico.

11. ● Nell'osmosi l'acqua si sposta, in prevalenza, verso la soluzione che contiene più soluto.

12. ●● Una soluzione di glucosio al 5 % m/V è ipertonica.

13. ● Le cellule vegetali poste in acqua distillata si gonfiano fino a scoppiare, come i globuli rossi.

14. ●● Nel trasporto attivo una sostanza si sposta contro il proprio gradiente di concentrazione, con consumo di energia.

15. ●● Quando una sostanza ha raggiunto l'equilibrio dinamico, le sue particelle smettono di muoversi.

Applicare

16. ● Un cilindro di patata pesa 3,20 g; dopo un'ora in una soluzione di saccarosio pesa 2,88 g. Calcola la variazione percentuale di massa e stabilisci se la soluzione era ipotonica o ipertonica rispetto alle cellule della patata.

17. ● La soluzione A contiene 2 g di cloruro di sodio in 100 mL; la soluzione B è la soluzione fisiologica (0,9 % m/V). Le due soluzioni sono separate da una membrana permeabile solo all'acqua. Quale soluzione è ipertonica rispetto all'altra? In quale verso si sposta l'acqua?

18. ● Quanti grammi di cloruro di sodio servono per preparare 500 mL di soluzione fisiologica allo 0,9 % m/V?

19. ●● Un uovo senza guscio pesa 72,0 g. Dopo un giorno in acqua distillata pesa 81,4 g; dopo un altro giorno in uno sciroppo di zucchero pesa 63,5 g. Calcola la variazione percentuale di massa in ciascuna delle due fasi (rispetto alla massa all'inizio della fase) e spiega il segno dei risultati.

20. ●● In un certo intervallo di tempo una pompa sodio-potassio compie 150 cicli. Quanti ioni Na^+ porta fuori e quanti ioni K^+ porta dentro? Quante molecole di ATP consuma? Quante cariche positive in più escono rispetto a quelle che entrano?

21. ●●● Indica il tipo di trasporto in ciascuna situazione: (a) la CO_2 esce da una cellula muscolare; (b) il glucosio, più concentrato nel plasma, entra in un globulo rosso legandosi a una proteina che cambia forma; (c) una cellula della radice assorbe ioni potassio da un terreno in cui sono meno concentrati che nella radice; (d) una cellula del pancreas libera enzimi digestivi contenuti in vescicole.

22. ●●● In un'esperienza con cilindri di carota la variazione di massa è +3,6 % in una soluzione di saccarosio al 5 % m/V e −2,4 % in una al 10 % m/V. Supponendo che, fra queste due concentrazioni, la variazione cambi in modo proporzionale, stima la concentrazione isotonica rispetto alle cellule della carota.

Leggere dati e figure

23. ● Osserva la Figura 4.4. In quale soluzione la cellula vegetale è in plasmolisi? Quale struttura si allontana dalla parete, e perché la parete invece non cambia forma?

24. ●● Usa la retta della Figura 4.7, che passa per +11,0 % a 0 % di saccarosio e scende di circa 1,2 punti percentuali per ogni punto di concentrazione. Prevedi la variazione di massa di un cilindro in una soluzione di saccarosio al 12 % m/V e di' se il cilindro assorbirebbe o perderebbe acqua.

25. ●●● Osserva la Figura 4.3. Spiega perché il livello del ramo destro sale. Che cosa si osserverebbe, alla fine, se la membrana fosse permeabile anche al saccarosio?

26. ●●● Si misura la velocità con cui due sostanze, X e Y, entrano in una cellula, aumentando la loro concentrazione esterna (la concentrazione interna resta bassa). Per X la velocità vale 2, 4, 6 e 8 unità alle concentrazioni 1, 2, 3 e 4; per Y vale 3, 5, 6 e 6 unità alle stesse concentrazioni. Quale sostanza entra probabilmente per diffusione semplice e quale grazie a una proteina trasportatrice? Motiva la risposta.

Indagare e argomentare

27. ●● Perché la marmellata, che contiene molto zucchero, si conserva a lungo anche dopo l'apertura del vasetto (in frigorifero), mentre una purea di frutta senza zucchero ammuffisce presto? Spiega usando l'osmosi.

28. ●●● Progetta un esperimento per verificare se la temperatura influisce sulla velocità di diffusione di un colorante in acqua. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, le variabili da mantenere costanti e come misureresti il risultato.

29. ●● Perché nelle flebo si usa la soluzione fisiologica e non l'acqua distillata? Che cosa accadrebbe ai globuli rossi nel secondo caso?

Approfondimento

30. ●● Gorter e Grendel osservarono che i lipidi estratti dalle membrane dei globuli rossi, stesi in uno strato di una sola molecola, coprivano una superficie circa doppia di quella dei globuli rossi. Quale conclusione ne trassero, e perché?

PER APPROFONDIRE

- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: il capitolo sulla struttura e la funzione delle membrane, con molte illustrazioni dei tipi di trasporto.
- [ALB] B. Alberts et al., *Essential Cell Biology*: i capitoli sulle membrane e sul trasporto, per chi vuole vedere come si studiano canali e pompe.
- [SAD] D. Sadava et al., *Life: The Science of Biology*: il capitolo sulle membrane cellulari, con la storia degli esperimenti che hanno portato al modello a mosaico fluido.

Glossario del capitolo

Acquaporina
Proteina canale della membrana plasmatica che lascia passare rapidamente l'acqua.

Diffusione facilitata
Passaggio di una sostanza attraverso la membrana, secondo gradiente e senza consumo di energia, grazie a una proteina canale o trasportatrice.

Diffusione semplice
Passaggio di una sostanza attraverso la membrana direttamente fra i fosfolipidi, secondo gradiente; riguarda molecole piccole e senza carica come O_2 e CO_2.

Endocitosi
Ingresso nella cellula di particelle grandi o di liquido, racchiusi in una vescicola formata dalla membrana plasmatica; comprende fagocitosi e pinocitosi.

Equilibrio dinamico
Condizione in cui le particelle continuano a muoversi ma, in media, ne passano tante in un verso quante nel verso opposto: non c'è movimento netto.

Esocitosi
Uscita di sostanze dalla cellula: una vescicola si fonde con la membrana plasmatica e ne riversa il contenuto all'esterno.

Fagocitosi
Forma di endocitosi in cui la cellula ingloba con gli pseudopodi una particella solida grande, come un batterio.

Glicocalice
Insieme delle catene di carboidrati di glicoproteine e glicolipidi sulla faccia esterna della membrana; serve al riconoscimento fra cellule.

Gradiente di concentrazione
Differenza di concentrazione di una sostanza fra due zone vicine.

Membrana semipermeabile
Membrana che lascia passare l'acqua ma non il soluto.

Modello a mosaico fluido
Modello della membrana (Singer e Nicolson, 1972): un doppio strato fosfolipidico fluido in cui sono immerse proteine.

Osmosi
Diffusione dell'acqua attraverso una membrana semipermeabile, dalla soluzione ipotonica verso quella ipertonica.

Permeabilità selettiva
Proprietà della membrana plasmatica di lasciar passare alcune sostanze e non altre, regolando quantità e direzione del passaggio.

Plasmolisi
Distacco della membrana plasmatica dalla parete in una cellula vegetale che perde acqua in una soluzione ipertonica.

Pompa sodio-potassio
Proteina di trasporto attivo che, per ogni ATP consumato, porta 3 Na^+ fuori dalla cellula e 2 K^+ dentro.

Proteina integrale
Proteina inserita nel doppio strato fosfolipidico, che in genere lo attraversa da parte a parte.

Soluzione ipertonica
Soluzione che contiene più soluto di un'altra con cui viene confrontata; i termini *ipotonica* (meno soluto) e *isotonica* (stessa quantità) si usano allo stesso modo.

Trasporto attivo
Passaggio di una sostanza attraverso la membrana contro gradiente, compiuto da proteine che consumano energia (ATP).

Turgore
Pressione esercitata dal contenuto di una cellula vegetale contro la parete, quando la cellula ha assorbito acqua.

Soluzioni

1. C. Le code idrofobe restano all'interno, lontane dall'acqua; le teste idrofile sono rivolte verso le due facce.

2. A. Il glicocalice si trova solo sulla faccia esterna, dove serve al riconoscimento.

3. D. L'O_2 è una molecola piccola e senza carica: passa fra i fosfolipidi. Glucosio e ioni richiedono proteine; le proteine entrano per endocitosi.

4. B. All'equilibrio dinamico le particelle continuano a muoversi, ma non c'è più movimento netto.

5. D. Nell'osmosi è l'acqua, non il soluto, ad attraversare la membrana.

6. A. L'acqua distillata è ipotonica rispetto al citoplasma: l'acqua entra e la cellula, senza parete, può scoppiare (emolisi).

7. C. Entrambi usano proteine; solo il trasporto attivo consuma ATP e va contro gradiente.

8. B. Tre ioni sodio escono e due ioni potassio entrano, contro gradiente, per ogni ATP.

9. D. La fagocitosi è l'endocitosi di particelle solide grandi.

10. F. La membrana è spessa circa 5–10 nm, molto meno del limite di risoluzione del microscopio ottico (circa 0,2 µm): il doppio strato si osserva solo al microscopio elettronico.

11. V. L'acqua si sposta dalla soluzione ipotonica a quella ipertonica.

12. F. «Ipertonica» è un confronto: una soluzione al 5 % m/V è ipertonica rispetto a una più diluita e ipotonica rispetto a una più concentrata. Senza un termine di paragone l'affermazione non ha senso.

13. F. La parete di cellulosa resiste alla pressione: la cellula diventa turgida, ma non scoppia.

14. V.

15. F. Le particelle continuano a muoversi; cessa solo il movimento netto, perché in ogni verso ne passano in media tante quante nel verso opposto.

16. variazione = 2,88 g − 3,20 g = −0,32 g; variazione % = (−0,32 / 3,20) × 100 = −10,0 %. Il cilindro ha perso acqua: la soluzione era ipertonica rispetto alle cellule della patata.

17. A contiene 2 g in 100 mL, cioè il 2 % m/V, più dello 0,9 % di B: A è ipertonica rispetto a B (e B ipotonica rispetto ad A). L'acqua si sposta in prevalenza da B verso A.

18. Lo 0,9 % m/V significa 0,9 g in 100 mL; in 500 mL servono 0,9 g × 5 = 4,5 g di cloruro di sodio.

19. Prima fase: (81,4 − 72,0) / 72,0 × 100 = +13,1 %: l'acqua distillata è ipotonica rispetto all'uovo, l'acqua entra. Seconda fase: (63,5 − 81,4) / 81,4 × 100 = −22,0 %: lo sciroppo è ipertonico rispetto all'uovo, l'acqua esce.

20. Na^+ portati fuori: 3 × 150 = 450; K^+ portati dentro: 2 × 150 = 300; ATP consumati: 150 (una molecola per ciclo). Escono 450 − 300 = 150 cariche positive in più di quante ne entrino.

21. (a) diffusione semplice, secondo gradiente, fra i fosfolipidi; (b) diffusione facilitata mediante una proteina trasportatrice, secondo gradiente; (c) trasporto attivo, contro gradiente, con consumo di ATP; (d) esocitosi.

22. Fra il 5 % e il 10 % la variazione scende di 3,6 + 2,4 = 6,0 punti; per arrivare a zero dal 5 % deve scendere di 3,6 punti, cioè 3,6 / 6,0 = 0,6 dell'intervallo. Concentrazione isotonica ≈ 5 % + 0,6 × 5 % = 8,0 % m/V.

23. Nella soluzione ipertonica. Si stacca dalla parete la membrana plasmatica, insieme al citoplasma, perché il vacuolo e il citoplasma perdono acqua e si contraggono; la parete di cellulosa è rigida e conserva la sua forma.

24. variazione ≈ 11,0 − 1,2 × 12 = 11,0 − 14,4 = −3,4 % (dal grafico, circa −3,5 %). Il valore è negativo: il cilindro perderebbe acqua, perché al 12 % la soluzione è ipertonica rispetto alle cellule della patata (la concentrazione isotonica è circa 9 %).

25. Il saccarosio non può attraversare la membrana, l'acqua sì: l'acqua passa in prevalenza dal ramo con acqua pura a quello con la soluzione, il cui livello sale finché il peso della colonna in più non bilancia il flusso. Se la membrana fosse permeabile anche al saccarosio, questo diffonderebbe verso sinistra finché la concentrazione non fosse uguale nei due rami: alla fine i due livelli sarebbero uguali (al più si vedrebbe un dislivello temporaneo all'inizio).

26. Per X la velocità cresce in proporzione alla concentrazione (raddoppia se la concentrazione raddoppia): è il comportamento della diffusione semplice. Per Y la velocità cresce sempre meno e poi resta costante a 6: i trasportatori sono tutti occupati (saturazione), quindi Y entra grazie a una proteina trasportatrice.

27. *Traccia*. Nella marmellata la concentrazione di zucchero è molto alta: l'ambiente è fortemente ipertonico rispetto al citoplasma di batteri e muffe. Le loro cellule perdono acqua per osmosi (le cellule dei funghi e dei batteri possono andare in plasmolisi) e non riescono a crescere e a moltiplicarsi. Nella purea senza zucchero l'ambiente non è ipertonico e i microrganismi crescono.

28. *Traccia*. Variabile indipendente: la temperatura dell'acqua (per esempio 10 °C, 25 °C, 50 °C, misurata con un termometro). Variabile dipendente: il tempo che il colorante impiega a colorare uniformemente l'acqua (oppure il diametro della macchia colorata dopo un tempo fissato). Costanti: volume d'acqua, tipo di recipiente, quantità e tipo di colorante, modo di immetterlo (una goccia, senza agitare). Ripetere ogni prova almeno tre volte e fare la media. Risultato atteso: la diffusione è più rapida a temperatura più alta.

29. *Traccia*. La soluzione fisiologica (0,9 % m/V di cloruro di sodio) è isotonica rispetto al sangue: non provoca flussi netti d'acqua e i globuli rossi conservano la loro forma. L'acqua distillata è ipotonica: l'acqua entrerebbe nei globuli rossi, che si gonfierebbero e potrebbero scoppiare (emolisi).

30. Conclusero che nella membrana i lipidi sono disposti in due strati sovrapposti: se lo strato singolo copre una superficie doppia di quella delle cellule, ogni porzione di membrana deve contenere due strati di molecole lipidiche.