Il potenziale dell'acqua e le sue componenti

NEGLI ORGANISMI VEGETALI

Come possiamo descrivere e quantificare lo stato idrico di una pianta?





Contenuto di acqua (assoluto) = $\frac{\text{Peso fresco – Peso secco}}{\text{Peso fresco}} \times 100$

Contenuto relativo di acqua = $\frac{\text{Peso fresco – Peso secco}}{\text{Peso turgido – Peso secco}} \times 100$

È una misura del deficit di acqua rispetto
alla condizione ottimale (cioè quella di pieno turgore)

Cioè = $\frac{\text{Contenuto assoluto di acqua}}{\text{Contenuto assoluto di acqua in condizioni di pieno turgore}}$

In realtà, le attività metaboliche della pianta e i processi di trasporto dell'acqua non sono determinati dal contenuto di acqua, ma dallo **stato energetico dell'acqua** nella pianta e nell'ambiente circostante

L’acqua nelle piante: stato termodinamico e trasporto

Equazioni fenomenologiche che descrivono il trasporto spontaneo/passivo di materia, sia essa acqua, elettroni ecc…, riconducibili a:

Flusso (F) = Forza traente x Conduttanza (K)

Flusso = V/t

Conduttanza (K) = fattore di proporzionalità che dipende dalle caratteristiche fisiche del sistema/mezzo

K = 1/R
R = resistenza

Quale natura ha la forza traente nel caso dell’acqua?
Perché l’acqua si sposta da un punto A ad un punto B?

I processi come le reazioni biochimiche e il trasporto a lunga distanza di acqua e soluti sono guidati da un input di energia libera

Energia libera di Gibbs (G) = l'energia di un sistema disponibile per la conversione in lavoro, a temperatura e pressione costanti

In altre parole, rappresenta il potenziale per compiere il lavoro (compreso il lavoro associato allo spostamento d'acqua)

Come possiamo quantificare l'energia libera (o meglio, le variazioni di G) di una sostanza?

POTENZIALE ELETTROCHIMICO

$$\mu = \mu_0 + RT \ln a + P\bar{V} + zEF + mgh$$

μ_0 = potenziale in condizioni standard

R = costante dei gas
T = T assoluta in K
a = attività (per soluzioni diluite corrisponde alla concentrazione)
P = pressione
V = volume molare della sostanza

z = carica elettrica della sostanza
E = potenziale elettrico
F = costante di Faraday

m = massa della sostanza
g = accelerazione di gravità
h = altezza alla quale si trova la sostanza

N.b.: il potenziale è un concetto relativo, perché sempre relazionato al potenziale della stessa sostanza in condizioni «standard» (decise per convenzione)

Potenziale elettrochimico di una sostanza (μ_i)

=

Energia libera per mole di sostanza (J mol^{-1})

$$\mu_i = \mu_i^* + f_{concentrazione} + f_{elettrico} + f_{pressione} + f_{gravità}$$

$$\mu_i = \mu_i^* + RTlna_i + zFE + PV + mgh$$

Potenziale elettrochimico di una sostanza (μ_i)

=

Energia libera per mole di sostanza (J mol^{-1})

$$\mu_i = \mu_i^* + f_{concentrazione} + f_{elettrico} + f_{pressione} + f_{gravità}$$

$$\mu_i = \mu_i^* + RT\ln a_i + zFE + PV + mgh$$

Nel caso dell'acqua non è presente la componente elettrica ($f_{elettrico}$), quindi:

Potenziale elettrochimico dell'acqua, μ_w

$$\mu_w = \mu_w^* + f_{concentrazione} + \cancel{f_{elettrico}} + f_{pressione} + f_{gravità}$$

$$\mu_w = \mu_w^* + RT\ln a_w + \cancel{zFE} + PV_w + mgh$$

Potenziale chimico dell'acqua, μ_w

$$\mu_w = \mu_w^* + f_{pressione} + f_{concentrazione} + f_{gravità}$$

$$\mu_w = \mu_w^* + PV_w + RT\ln a_w + mgh$$

Potenziale chimico dell'acqua, μ_w

$$\mu_w = \mu_w^* + f_{pressione} + f_{concentrazione} + f_{gravità}$$

$$\mu_w = \mu_w^* + PV_w + RT\ln a_w + mgh$$

Nel caso dell'acqua:

$RT\ln a_w/V = \pi$ da cui $\mathbf{RT\ln a_w = \pi V_w}$
dove π è il potenziale osmotico (MPa)

V_w: volume molare dell'acqua = 18 cm^3 mol^{-1}

R = 8.314 J mol^{-1} K^{-1} ovvero 0.008314 L MPa mol^{-1} K^{-1}

T = temperatura (K)

Nota: $a_w = P/P_0$, dove P è la pressione di vapore della soluzione, e P_0 è la pressione di vapore dell'acqua pura
a_w è compresa tra 0 e 1
a_w è influenzata solo dalla presenza di soluti

Potenziale chimico dell'acqua, μ_w

$$\mu_w = \mu_w^* + f_{pressione} + f_{concentrazione} + f_{gravità}$$

$$\mu_w = \cancel{\mu_w^*} + PV_w + RT\ln a_w + mgh$$

Per convenzione, il potenziale chimico μ_w^* dell'acqua pura a pressione atmosferica e a 25 °C (condizione standard) è pari **a zero**

Nel caso dell'acqua:

$RT\ln a_w/V = \pi$ da cui $\mathbf{RT\ln a_w = \pi V_w}$
dove π è il potenziale osmotico (MPa)

V_w: volume molare dell'acqua = 18 $cm^3\ mol^{-1}$

R = 8.314 J $mol^{-1}\ K^{-1}$ ovvero 0.008314 L MPa $mol^{-1}\ K^{-1}$

T = temperature (K)

Nota: $a_w = P/P_0$, dove P è la pressione di vapore della soluzione, e P_0 è la pressione di vapore dell'acqua pura
a_w è influenzata solo dalla presenza di soluti

Potenziale chimico dell'acqua, μ_w

$$\mu_w = \mu_w^* + f_{pressione} + f_{concentrazione} + f_{gravità}$$

$$\mu_w = \cancel{\mu_w^*} + PV_w + RT\ln a_w + mgh$$

Per convenzione, il potenziale chimico μ_w^* dell'acqua pura a pressione atmosferica e a 25 °C (condizione standard) è pari **a zero**

Quindi…

$$\mu_w = PV_w + \pi V_w + mgh$$

Nel caso dell'acqua:

$RT\ln a_w/V = \pi$ da cui $\mathbf{RT\ln a_w = \pi V_w}$
dove π è il potenziale osmotico (MPa)

V_w: volume molare dell'acqua = 18 $cm^3\ mol^{-1}$

R = 8.314 J $mol^{-1}\ K^{-1}$ ovvero 0.008314 L MPa $mol^{-1}\ K^{-1}$

T = temperature (K)

Nota: $a_w = P/P_0$, dove P è la pressione di vapore della soluzione, e P_0 è la pressione di vapore dell'acqua pura
a_w è influenzata solo dalla presenza di soluti

Problema: il potenziale chimico è un parametro difficilmente misurabile

Come faccio a stimare nella pratica lo stato idrico di una cellula/un organo etc. vegetale?
Come stimo il movimento dell'acqua in un sistema vegetale?

$\mu_w = V_w P + \pi V_w + mgh$

Potenziale dell'acqua (Ψ) = potenziale chimico dell'acqua per unità di volume molare (V_w):

$\mu_w/V_w = V_w P/V_w + \pi V_w/V_w + mgh/V_w$

$\Psi = P + \pi + \rho gh$

$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_g$

$\frac{J\ mol^{-1}}{m^3\ mol^{-1}} = \frac{N\ m}{m^3} = \frac{N}{m^2}$ = Pa (Pascal, unità di misura della pressione)

(V_w: volume molare dell'acqua = 18 $cm^3\ mol^{-1}$ = 18 * $10^{-6}\ m^3\ mol^{-1}$)

1 MPa = 10 bar
1 bar = 0.1 MPa
1 bar = 0.9869 atm

Per soluzioni diluite:
$\pi = -RTc_s$ (sempre ≤ 0)

Potenziale dell'acqua o potenziale idrico (Ψ_w)

Potenziale chimico dell'acqua diviso il volume molare dell'acqua

Il potenziale dell'acqua è l'energia, per unità di volume, necessaria per spostare l'acqua a T costante (= isotermicamente) da un punto iniziale del sistema al punto di riferimento

E' una misura dell'energia libera dell'acqua rispetto all'energia libera dell'acqua pura (a 25 °C e a P atmosferica)

A cosa serve la misura di Ψ_w?

Valutare lo stato idrico della pianta

Definire la direzione del flusso di acqua attraverso le membrane cellulari, i tessuti e gli organi della pianta

$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_g$$

Ψ_w dipende dalla pressione, dalla concentrazione, e dalla gravità

Ψ_p Potenziale di pressione (P)

(o PRESSIONE IDROSTATICA)

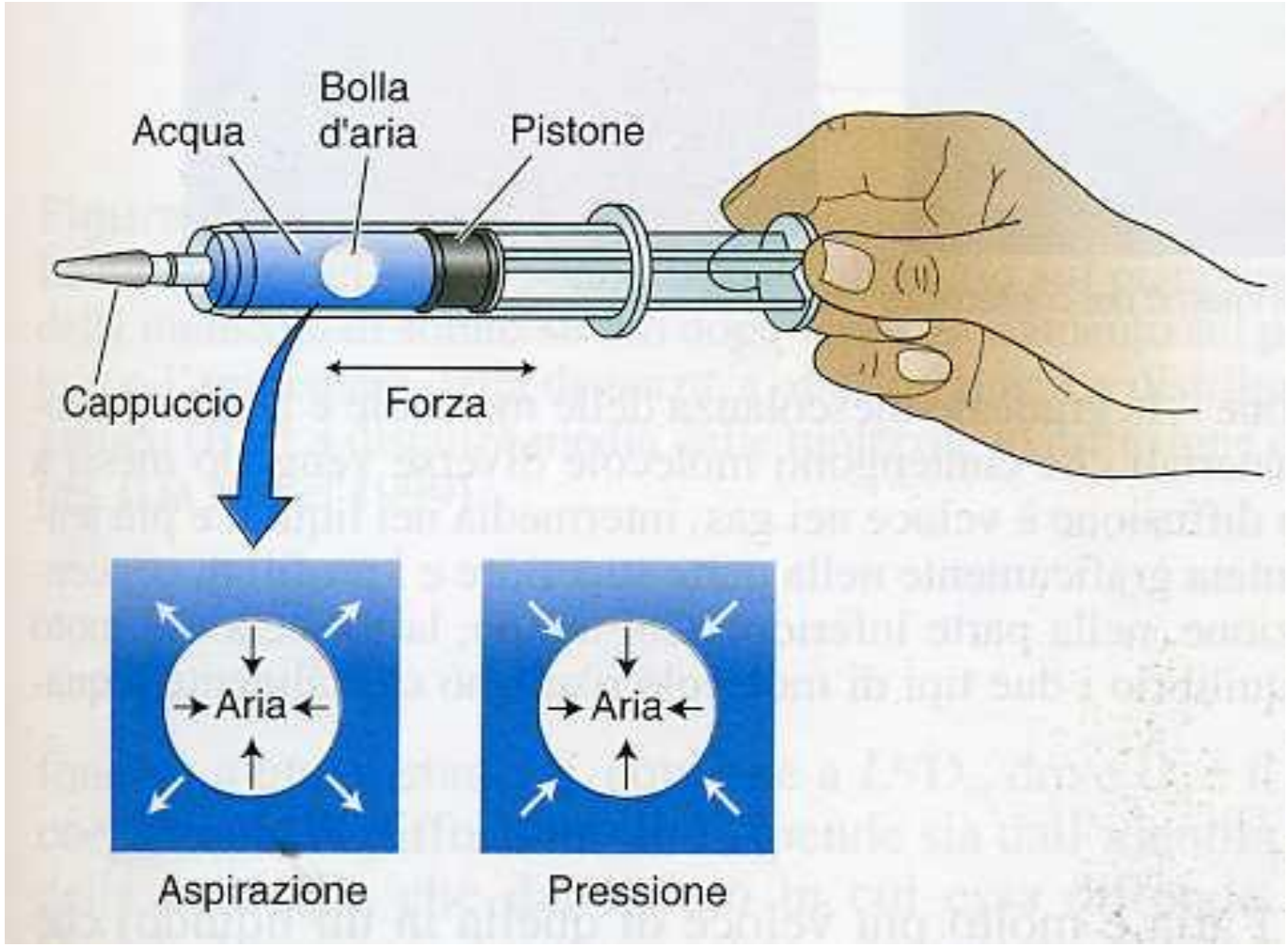
$$P = P_{assoluta} - P_{atmosferica}$$

Ψ_p può essere positivo, uguale a zero o negativo

Pressione idrostatica positiva = pressione di turgore
(all'interno delle cellule vegetali vive, mediamente da 0 a circa 2.0 MPa)

Pressione idrostatica negativa = tensione
(nello xilema, che è privo di protoplasto, da 0 a -10 MPa, nel suolo da 0 a -20 MPa)

Pressioni idrostatiche positive e negative



Il potenziale dell'acqua (senza soluti) alla pressione atmosferica è uguale a 0 MPa

$P = P_{assoluta} - P_{atmosferica}$

<u>Nello stato standard</u>:

$P_{assoluta} = P_{atmosferica} = 0.1$ MPa

↓

Quindi

$P = 0$; $\Psi = 0$ MPa

<u>Nel vuoto:</u>

$P_{assoluta} = 0$

↓

Quindi

$P = -0.1$ MPa; $\Psi = -0.1$ MPa

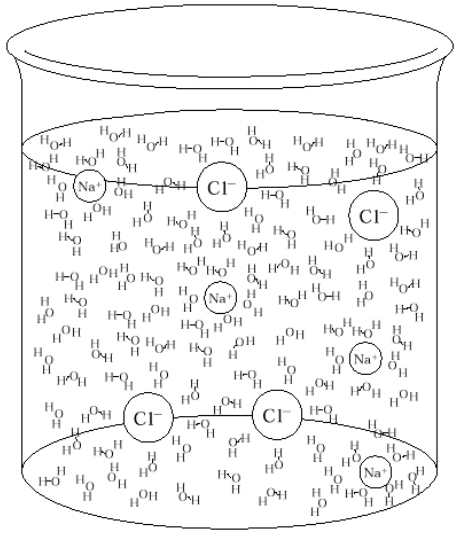


Ψ_s
Potenziale di soluto o Potenziale osmotico

Rappresenta l'effetto dei soluti disciolti sul potenziale dell'acqua

In una **soluzione:**

Ψ_s è sempre < 0



Nota

π (oppure Ψs) $= RTln a_w/V$

a_w = attività dell'acqua = P/P_0, dove P è la pressione di vapore della soluzione, e P_0 è la pressione di vapore dell'acqua pura

a_w è influenzata solo dalla presenza di soluti

In una soluzione a_w è sempre < 1, quindi…. matematicamente **$\Psi_s < 0$**

In base all'**equazione di van't Hoff**

$$\pi = -RTC_s$$

R = costante dei gas (8.32 J mol^{-1} K^{-1})
T = temperatura assoluta
C_s = concentrazione di soluti espressa come osmolalità (moli di soluti totali disciolti in 1 L di acqua)

Nota: per soluzioni diluite, π dipende solo dal numero di particelle di soluto per unità di volume e NON dalla natura del soluto!

I soluti RIDUCONO IL POTENZIALE DELL'ACQUA poichè diminuiscono l'energia libera dell'acqua, cioè la sua capacità di compiere un lavoro

Miscelare soluti e acqua aumenta l'entropia del sistema!

Diminziuone dell'energia libera rispetto a quella dell'acqua nello stato standard (acqua pura)

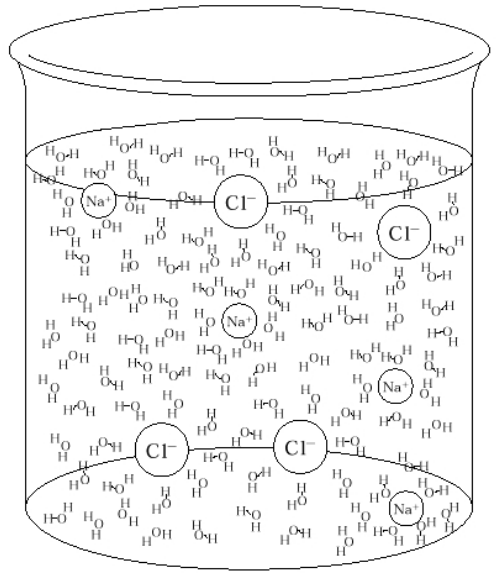


TABELLA 3.2
Valori di *RT* e del potenziale osmotico di soluzioni a varie temperature

Temperatura (°C)	RT* (L MPa mol^{-1})	Potenziale osmotico (MPa) di soluzioni con concentrazione di soluto in mol l^{-1} d'acqua			Potenziale osmotico dell'acqua di mare (MPa)
		0,01	0,10	1,00	
0	2,271	–0,0227	–0,227	–2,27	–2,6
20	2,436	–0,0244	–0,244	–2,44	–2,8
25	2,478	–0,0248	–0,248	–2,48	–2,8
30	2,519	–0,0252	–0,252	–2,52	–2,9

* R = 0.0083143 L MPa mol^{-1} K^{-1}.

A 20 °C
Soluzione 1 M di saccarosio → π = -2.44 MPa
Soluzione 1 M di NaCl → π = -4.88 MPa
Soluzione 0.5 M di NaCl → π = -2.44 MPa

$$\pi = -RTC_s$$

Ψ_g

Rappresenta l'effetto della gravità su Ψ_w

La componente del potenziale dell'acqua in funzione della gravità dipende dalla densità dell'acqua (ρ_w), dall'accelerazione di gravità (g) e dall'altezza (h) dell'acqua rispetto allo stato di riferimento

$$\Psi_g = \rho_w g h$$

$$\rho_w g = 0.01 \text{ MPa m}^{-1}$$

per piccole altezze (e tanto più a livello cellulare) è trascurabile

Nelle piante (ma non solo) l'acqua si muove passivamente da zone a energia libera maggiore (= maggiore potenziale dell'acqua) a zone a energia libera minore (= minore potenziale dell'acqua).

$$\Psi_{iniziale} > \Psi_{finale}$$

Non ci sono 'pompe' metaboliche che spostano l'acqua da una parte all'altra della pianta, e il potenziale dell'acqua delle singole cellule tende sempre ad equilibrarsi con il potenziale dell'acqua del mezzo che le circonda.

L’acqua si muove per
flusso di massa, diffusione, o per osmosi

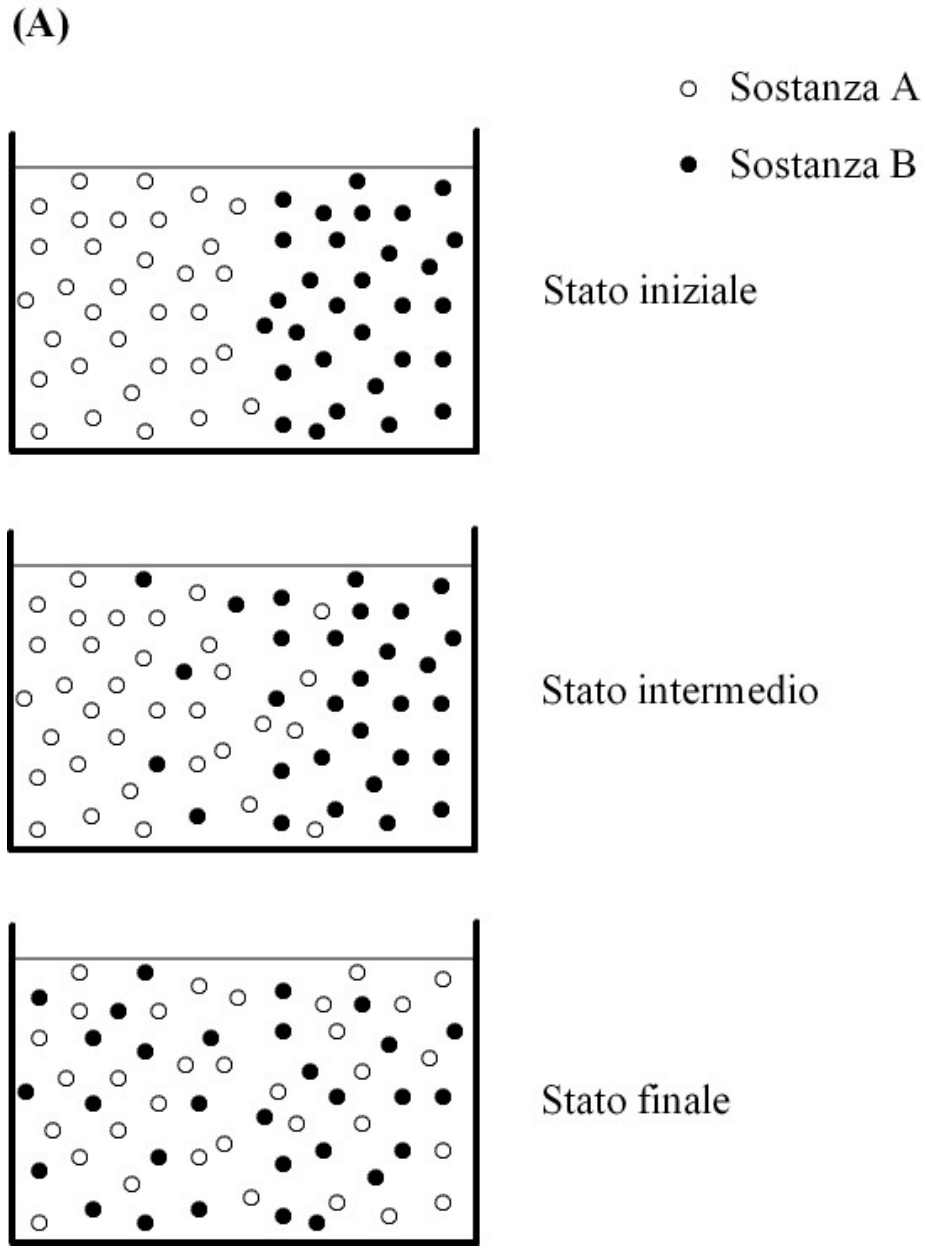
da punti a potenziale dell’acqua
maggiore verso punti a potenziale
dell’acqua **minore**

1- Flusso di massa: tutte le molecole di acqua (e i soluti in essa disciolti) si muovono in gruppo in risposta a potenziali di pressione





2- Diffusione

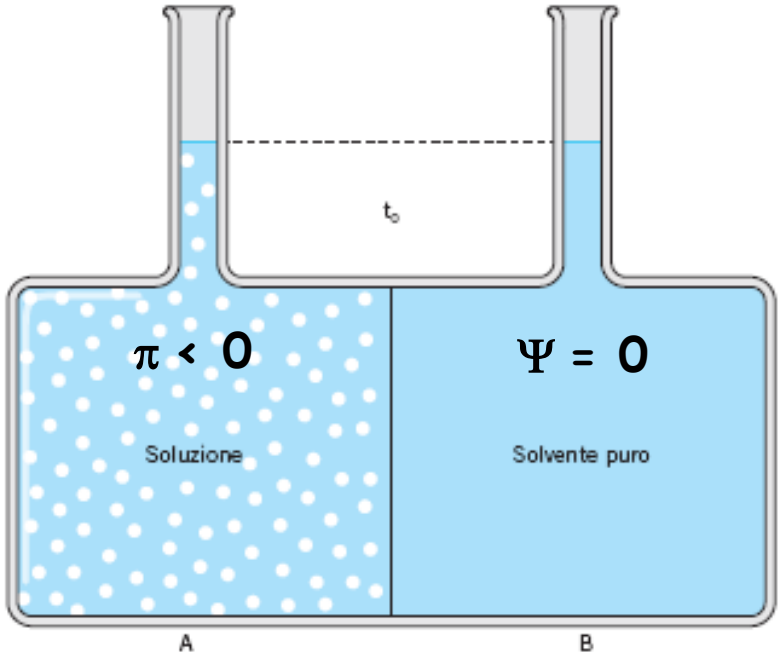


Descrizione quantitativa del processo di diffusione:
Prima legge di Fick

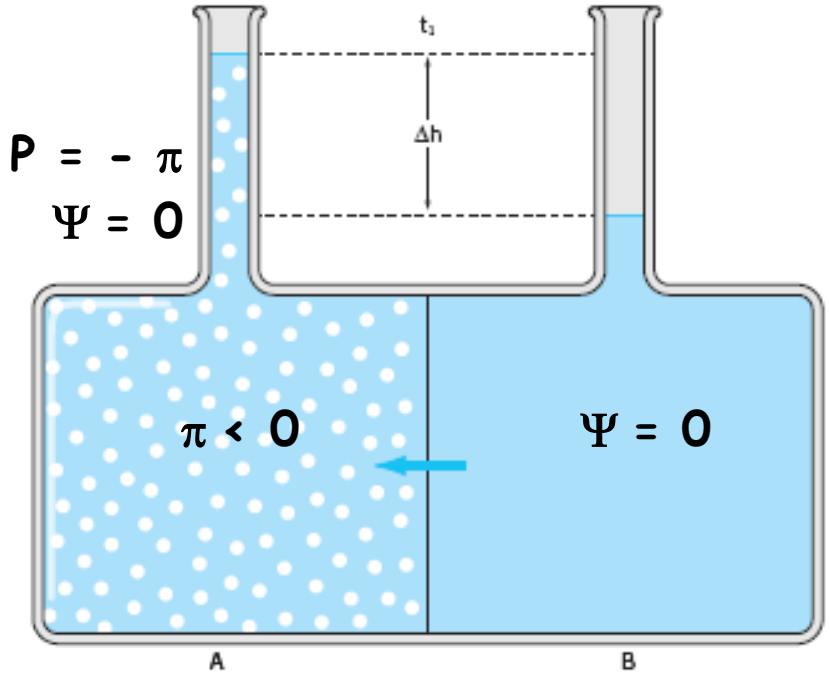
$$F = -D\,A\,\frac{\Delta C}{\Delta x}$$

D= coefficiente di diffusione
ΔC= gradiente di concentrazione
Δx= lunghezza del cammino di diffusione

3- Osmosi



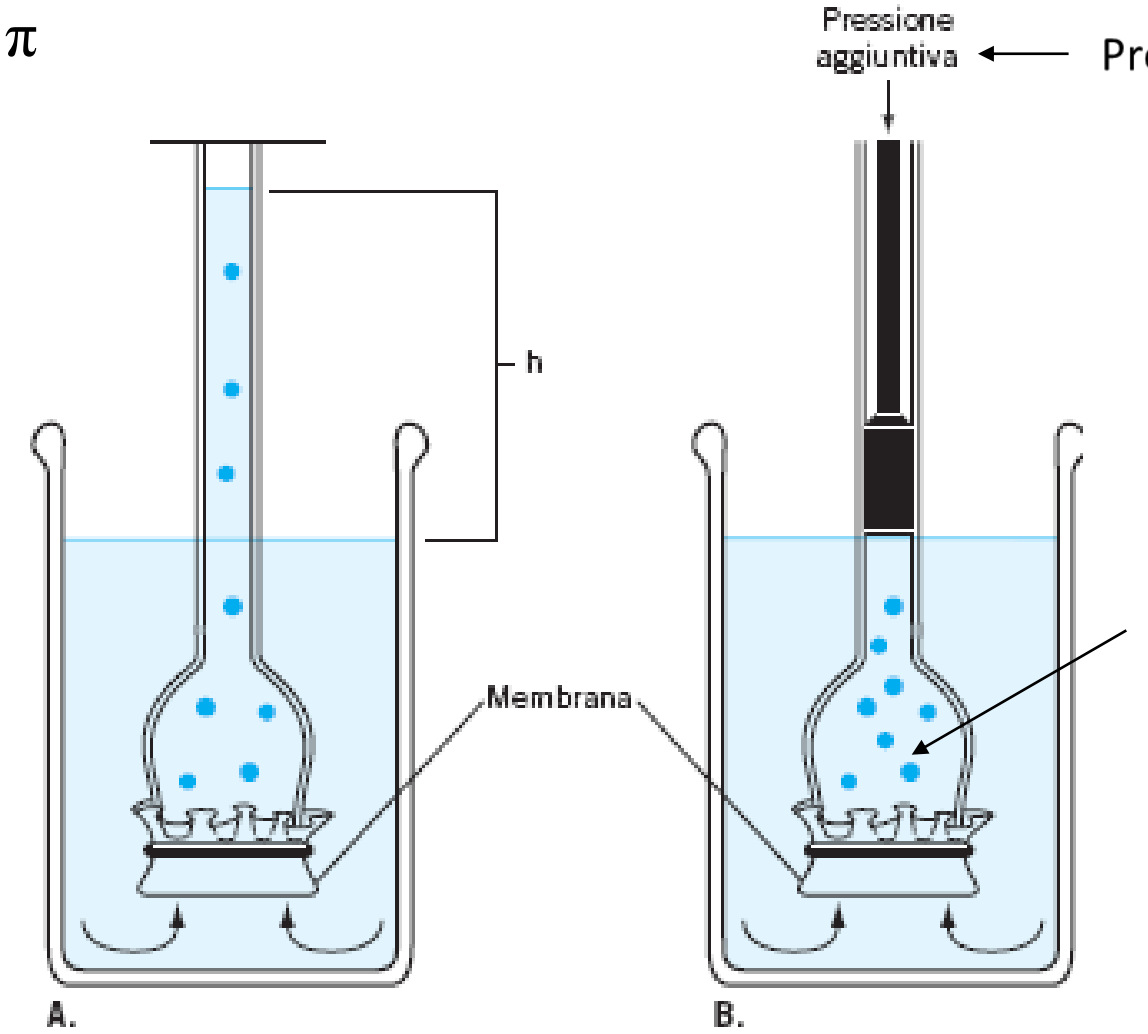
$\Psi = P + \pi$



Tutte le membrane cellulari sono membrane selettivamente permeabili

Problema terminologico: pressione osmotica vs potenziale osmotico

Pressione osmotica = - π



La soluzione possiede un potenziale osmotico (Ψs oppure π), non una pressione osmotica

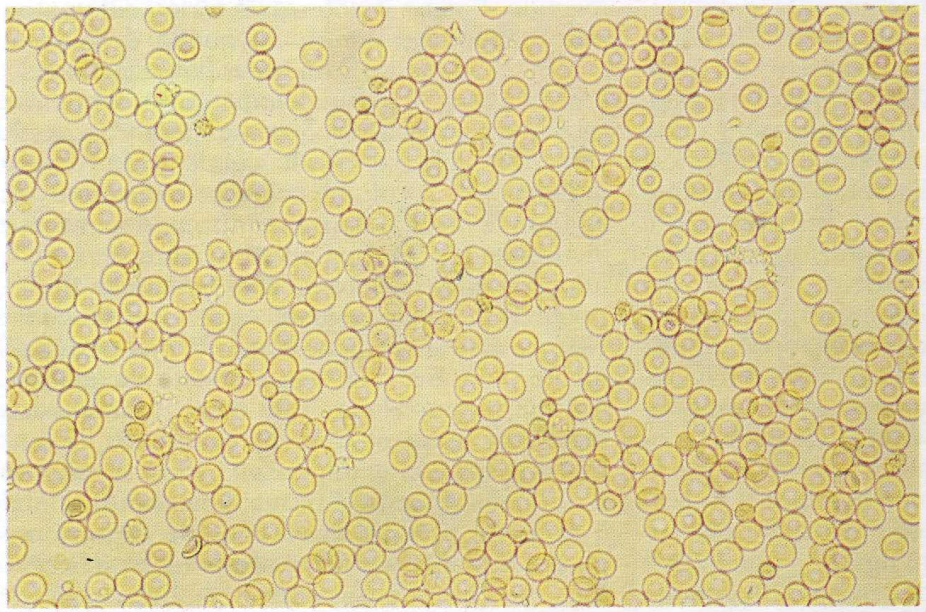
$\pi \leq 0$

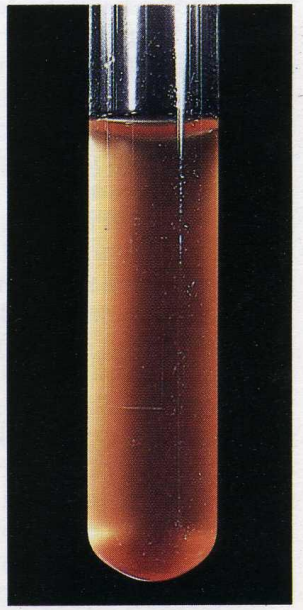
A livello di singola cellula, Ψ_g è trascurabile e pertanto:

$$\Psi_{cell} = \Psi_p + \Psi_s = P + \pi$$

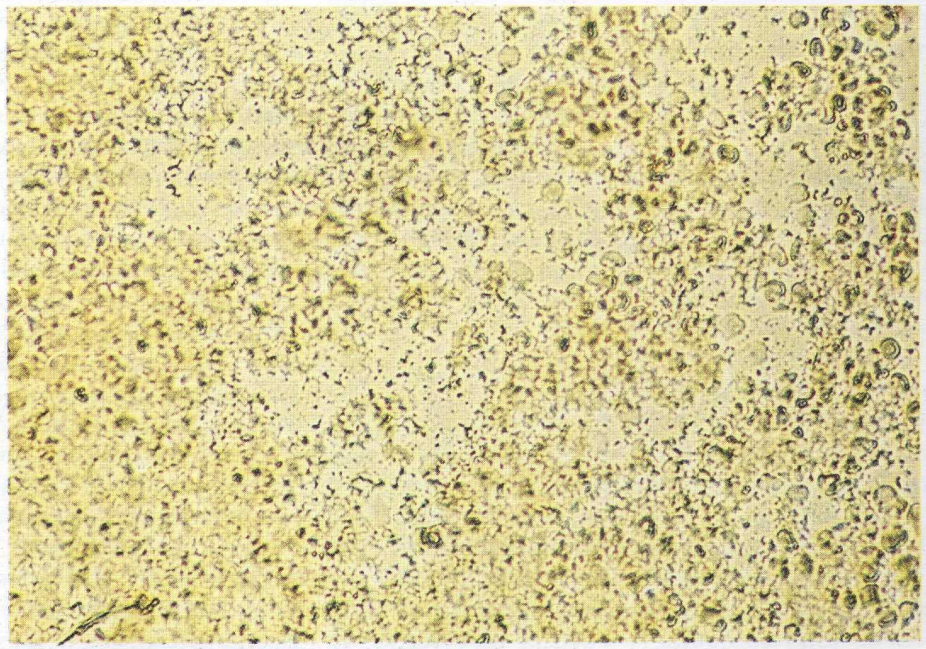
Tranne in casi particolari (es: pressione radicale), nelle piante $\Psi \leq 0$, cioè la sommatoria delle componenti del potenziale dell'acqua è pari a 0 o negativa

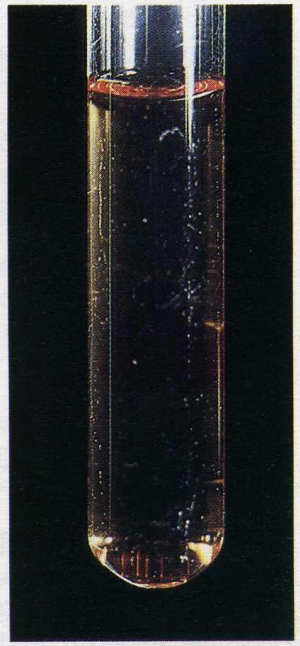
Da cosa sono determinati P e π a livello cellulare?





Soluzione isotonica





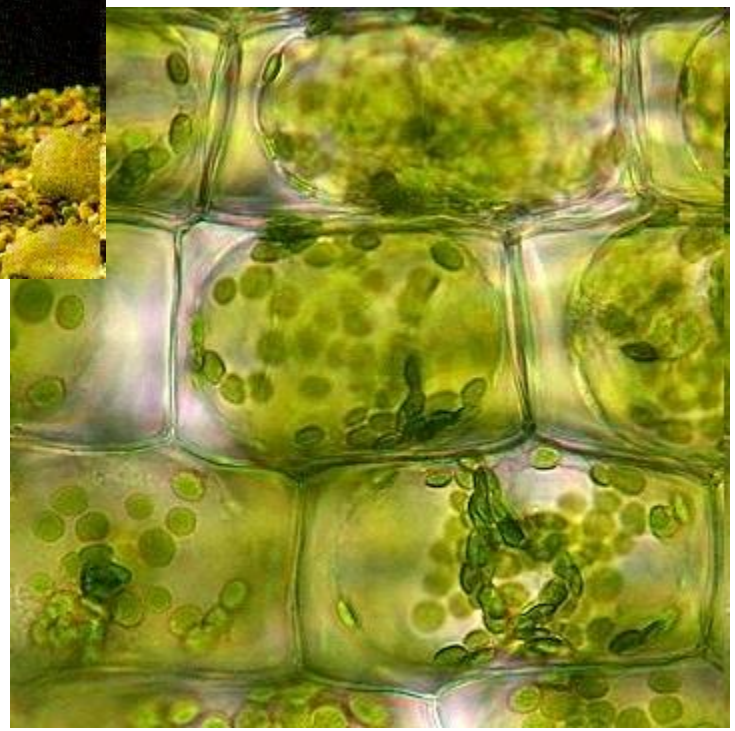
Acqua distillata

Cellule di foglia
di *Elodea canadensis*

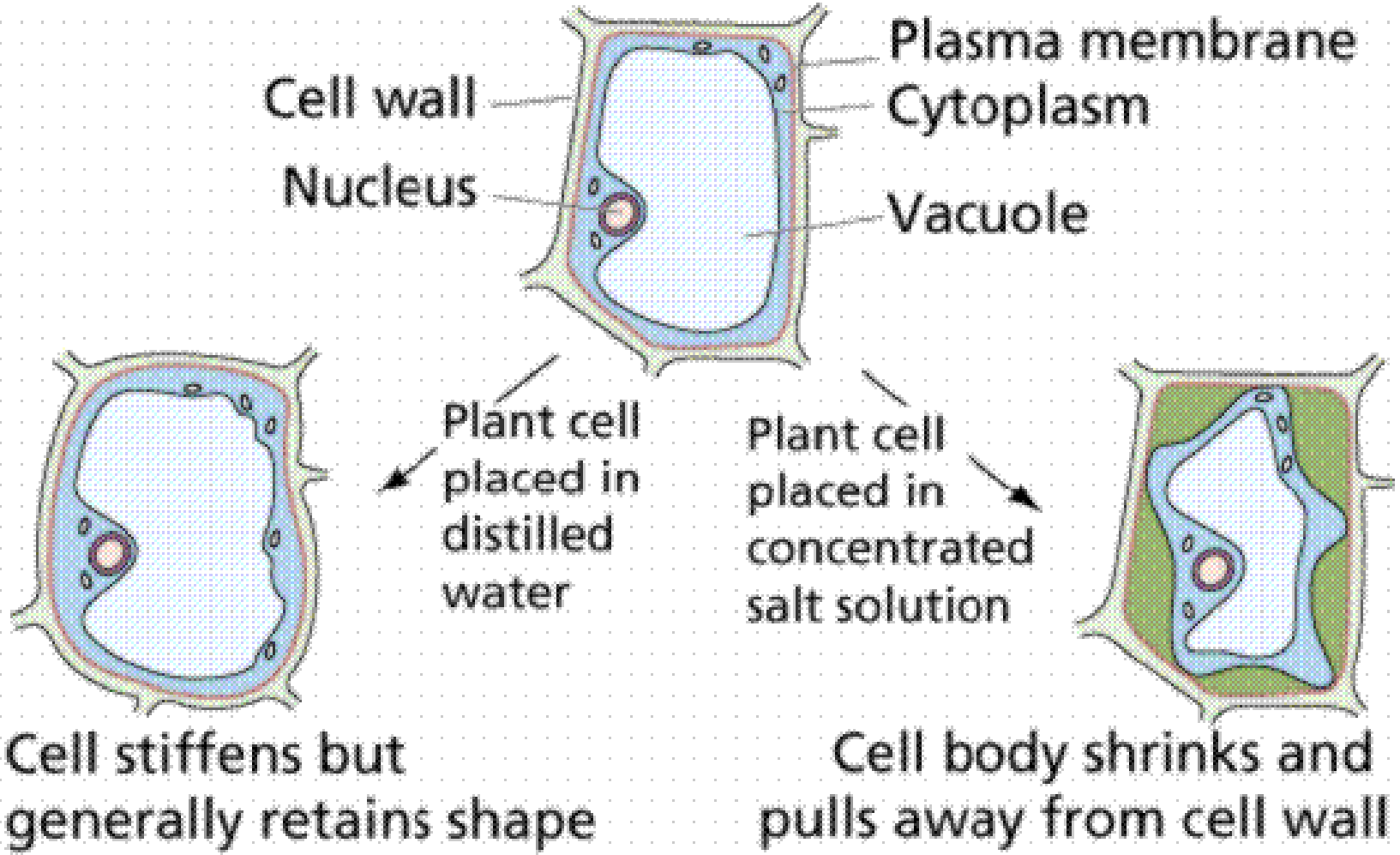




Acqua distillata



Soluzione di saccarosio al 20%


Cell wall
Nucleus
Plasma membrane
Cytoplasm
Vacuole
Plant cell placed in distilled water
Plant cell placed in concentrated salt solution
Cell stiffens but generally retains shape
Cell body shrinks and pulls away from cell wall

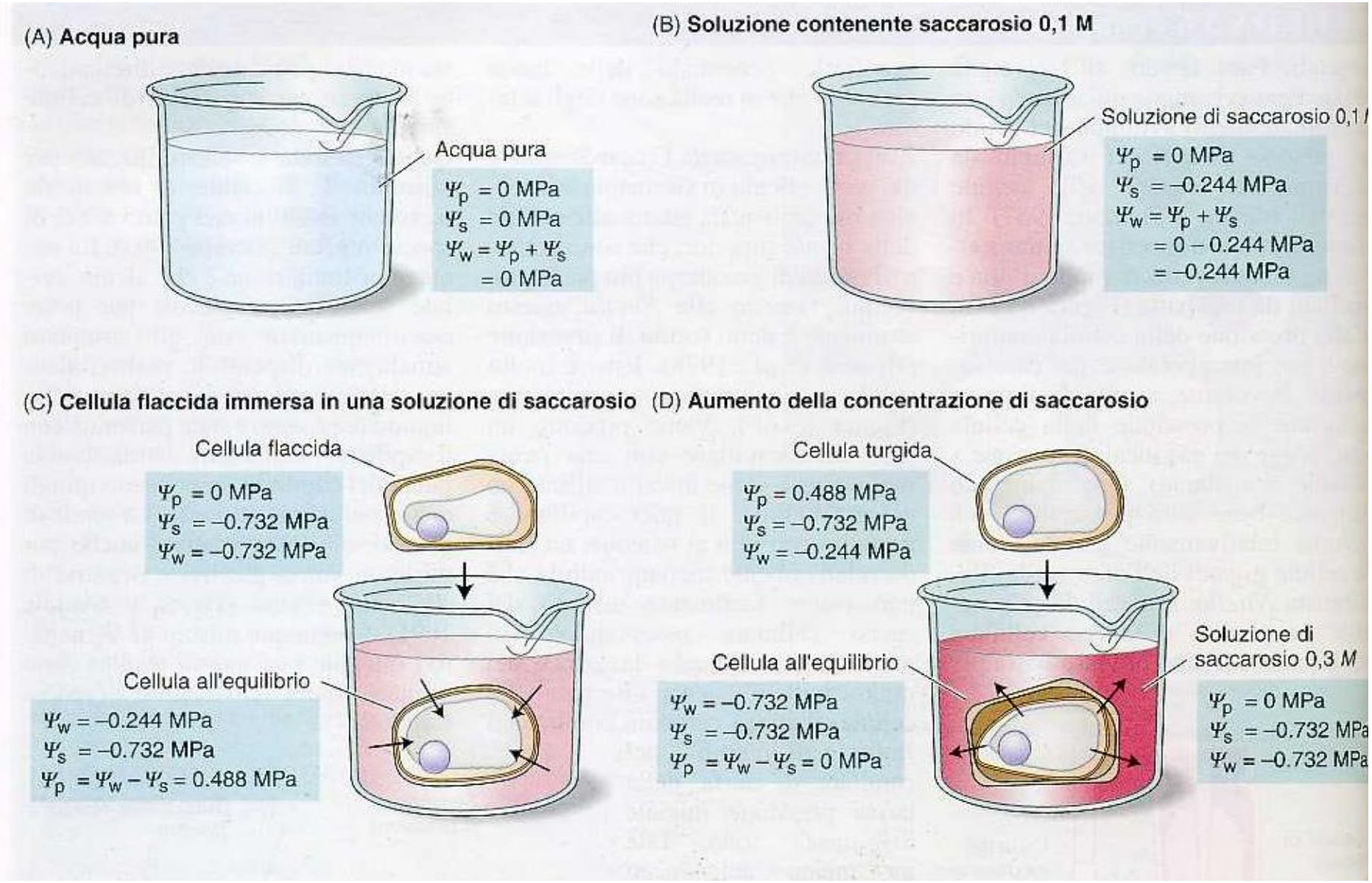
$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s$$

Cellula ‘flaccida’
Ψ_p = 0 MPa
Ψ_s = -1.5 MPa
Ψ_w = -1.5 MPa



Cellula turgida
Ψ_p = 1.4 MPa
Ψ_s = -1.4 MPa
Ψ_w = 0 MPa

Reidratazione di tessuti vegetali: l’acqua si muove spontaneamente da Ψ maggiori a Ψ minori


(A) Acqua pura
Acqua pura
Ψ_p = 0 MPa
Ψ_s = 0 MPa
$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s$
= 0 MPa
(B) Soluzione contenente saccarosio 0,1 M
Soluzione di saccarosio 0,1 M
Ψ_p = 0 MPa
Ψ_s = –0.244 MPa
$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s$
= 0 – 0.244 MPa
= –0.244 MPa
(C) Cellula flaccida immersa in una soluzione di saccarosio
Cellula flaccida
Ψ_p = 0 MPa
Ψ_s = –0.732 MPa
Ψ_w = –0.732 MPa
Cellula all'equilibrio
Ψ_w = –0.244 MPa
Ψ_s = –0.732 MPa
$\Psi_p = \Psi_w - \Psi_s$ = 0.488 MPa
(D) Aumento della concentrazione di saccarosio
Cellula turgida
Ψ_p = 0.488 MPa
Ψ_s = –0.732 MPa
Ψ_w = –0.244 MPa
Cellula all'equilibrio
Ψ_w = –0.732 MPa
Ψ_s = –0.732 MPa
$\Psi_p = \Psi_w - \Psi_s$ = 0 MPa
Soluzione di saccarosio 0,3 M
Ψ_p = 0 MPa
Ψ_s = –0.732 MPa
Ψ_w = –0.732 MPa

Riassumendo...

L’acqua si sposta in risposta a differenze di potenziale dell’acqua, secondo modalità di flusso di massa, diffusione, osmosi.

La differenza di potenziale permette di prevedere in che direzione si sposta l’acqua

La velocità di trasporto dipende dalla forza motrice (gradiente di Ψ) e dalle caratteristiche fisiche del mezzo

Flusso = forza motrice x conduttanza

$$F = \Delta\Psi \times K$$

Flusso = forza motrice / resistenza

$$F = \Delta\Psi / R$$