

SUOLO

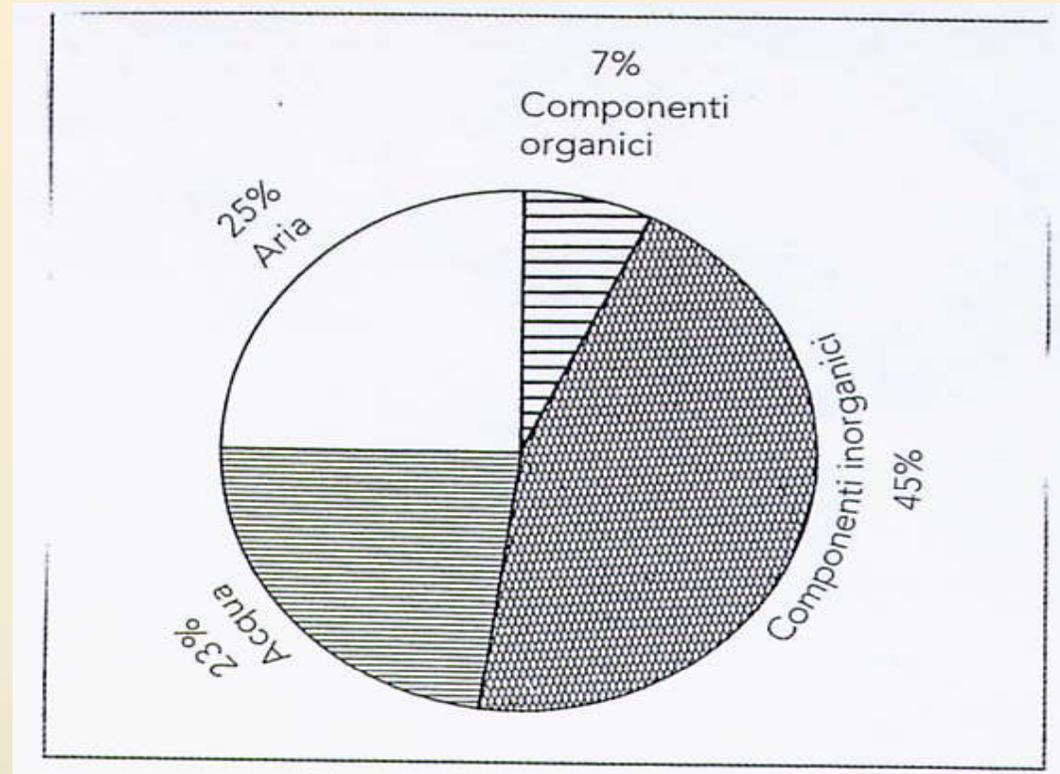
→ **Mezzo nutritivo per la pianta**

→ **Materiale eterogeneo** costituito da tre fasi:

1. Fase solida = principale riserva nutritiva

- sostanze organiche da spoglie animali e vegetali
- sostanze inorganiche derivanti dai minerali

Gli elementi nutritivi del terreno sono nel terreno sottoforma disciolta o chimicamente legata.



2. Fase liquida è la **soluzione del suolo** = l'acqua circolante nel suolo con disciolti gas (O_2 e CO_2) e solidi presenti nel suolo

I nutrienti trasportati sono presenti soprattutto in forma **ionica**.

La soluzione del suolo non è omogenea

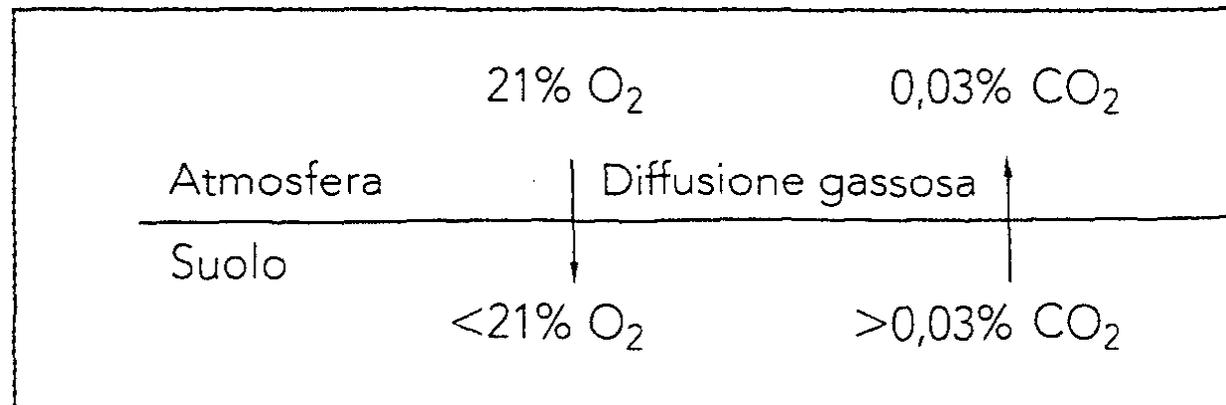
la sua concentrazione e composizione varia facilmente

3. Fase gassosa del suolo = aria tellurica

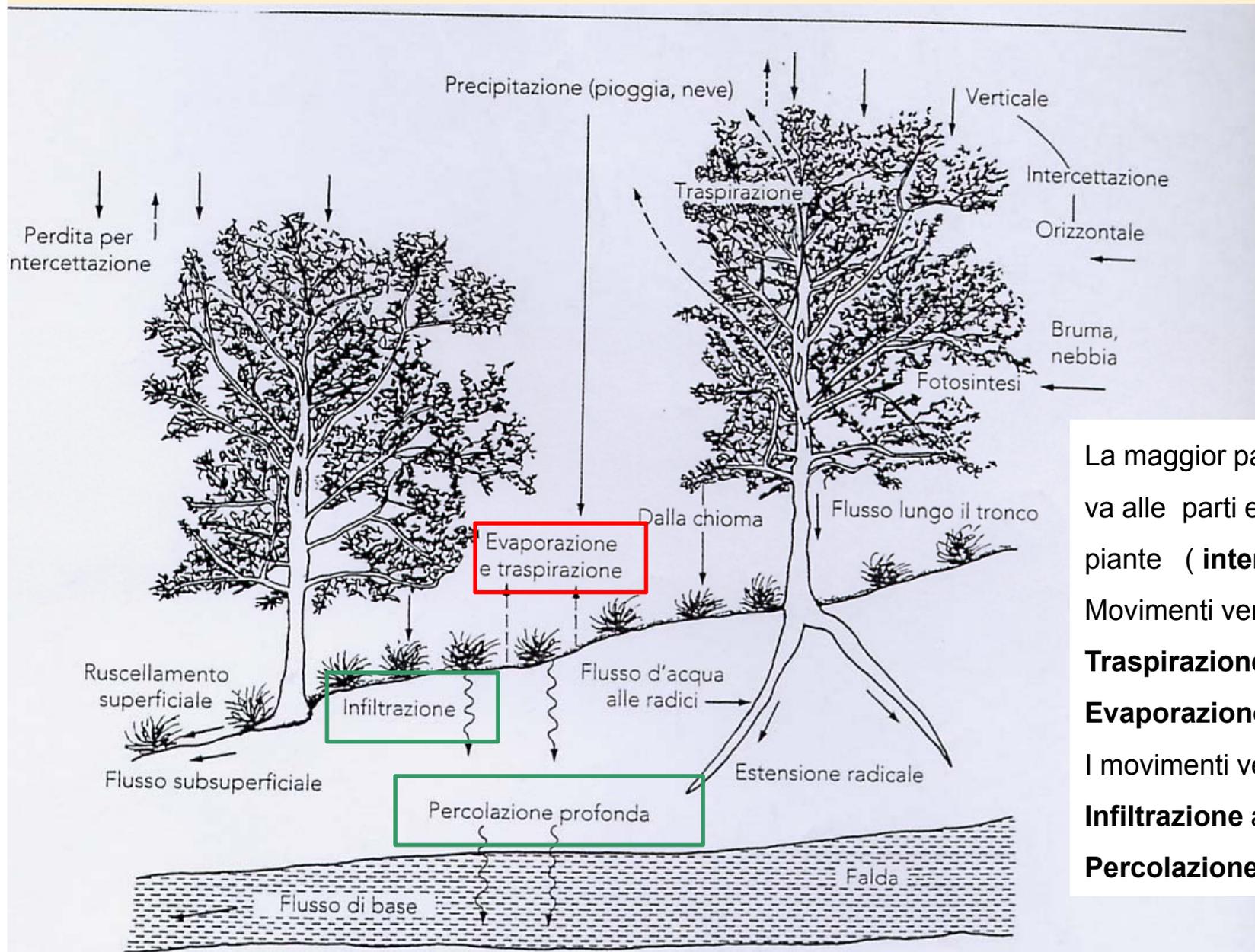
responsabile dello scambio gassoso

fra gli organismi viventi del suolo e l'atmosfera
(batteri, funghi, animali)

Direzione della diffusione gassosa tra suolo e atmosfera



CICLO IDROLOGICO = Movimenti dell'acqua



La maggior parte dell'acqua va alle parti epigee delle piante (**intercettazione**)

Movimenti verso l'alto:

Traspirazione

Evaporazione

I movimenti verso il basso

Infiltrazione a cui segue

Percolazione

La **disponibilità** di acqua nel suolo dipende da :

- Quantità di acqua presente (concentrazione)
- Forza con cui le molecole di acqua sono trattenute dalle particelle del suolo



RITENZIONE

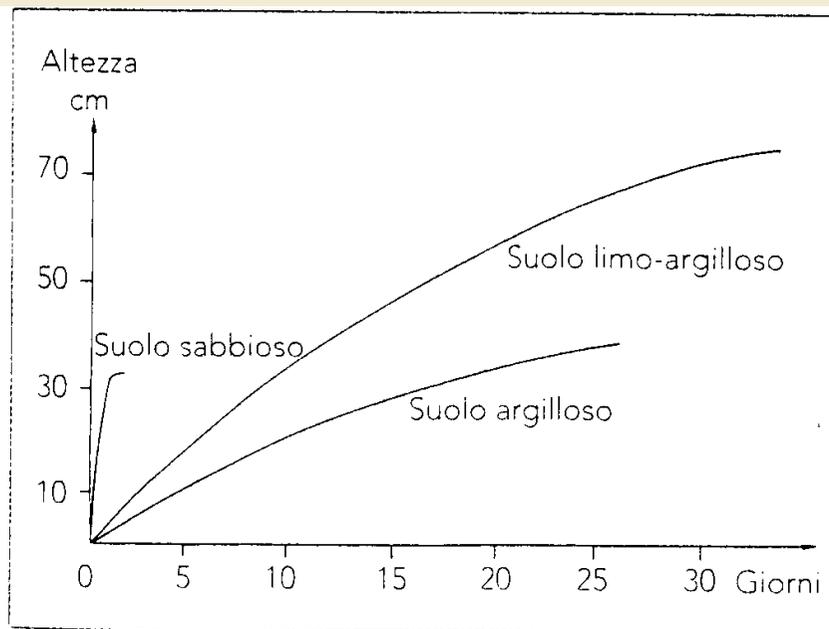
Forze di adesione

Con cui le superfici solide attraggono le molecole di acqua

Forze di coesione

Con cui i dipoli di acqua si legano reciprocamente

L'acqua fissata per adesione è in grado di legare per coesione dipoli H_2O a distanza crescente dalla superficie solida



Acqua CAPILLARE è presente nei

pори capillari e può risalire

- L'altezza della risalita è inversamente proporzionale al diametro dei pori

- La risalita presuppone esistenza di acqua libera, cioè in presenza di falda.

PUNTI CARATTERISTICI NEL RAPPORTO ACQUA – SUOLO dopo un apporto idrico

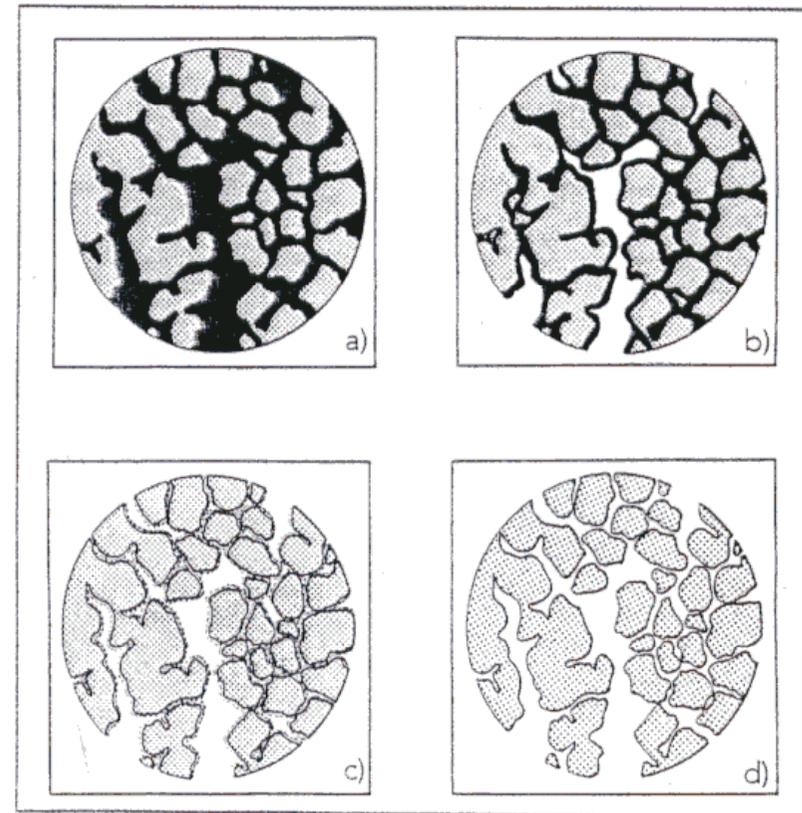
1. **Capacità idrica massima** U_{max}
quantità massima di acqua che un suolo
può contenere ma non trattenere

2. **Capacità di campo** U_{cc}
quantità di acqua trattenuta quando viene
meno acqua gravitazionale e movimenti
verso il basso

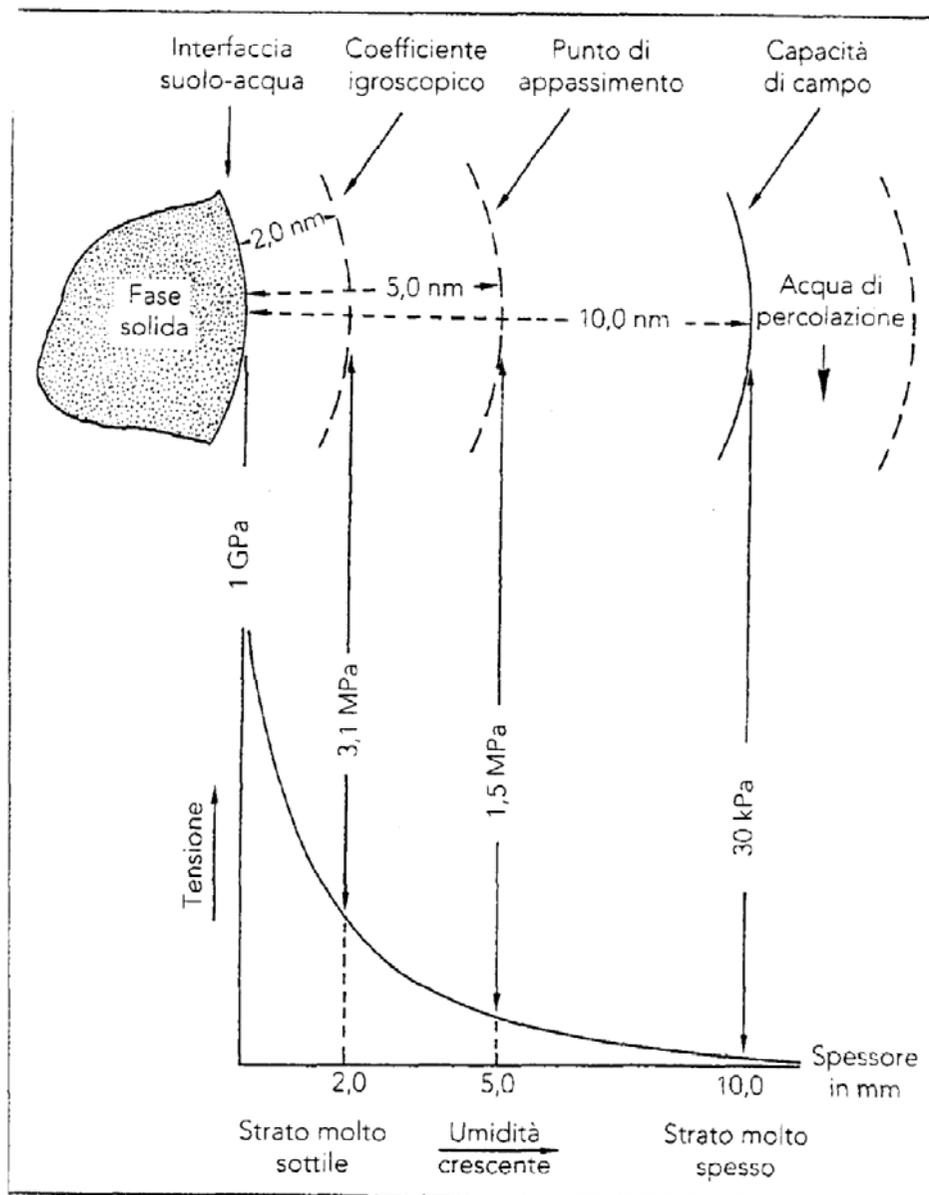
3. **Punto di Appassimento** U_{pa}
Umidità percentuale immobilizzata nei
micropori più piccoli

4. **Coefficiente Igroscopico** $C.I.$
residuo di acqua allontanabile solo con
riscaldamento in stufa a $105^{\circ}C$

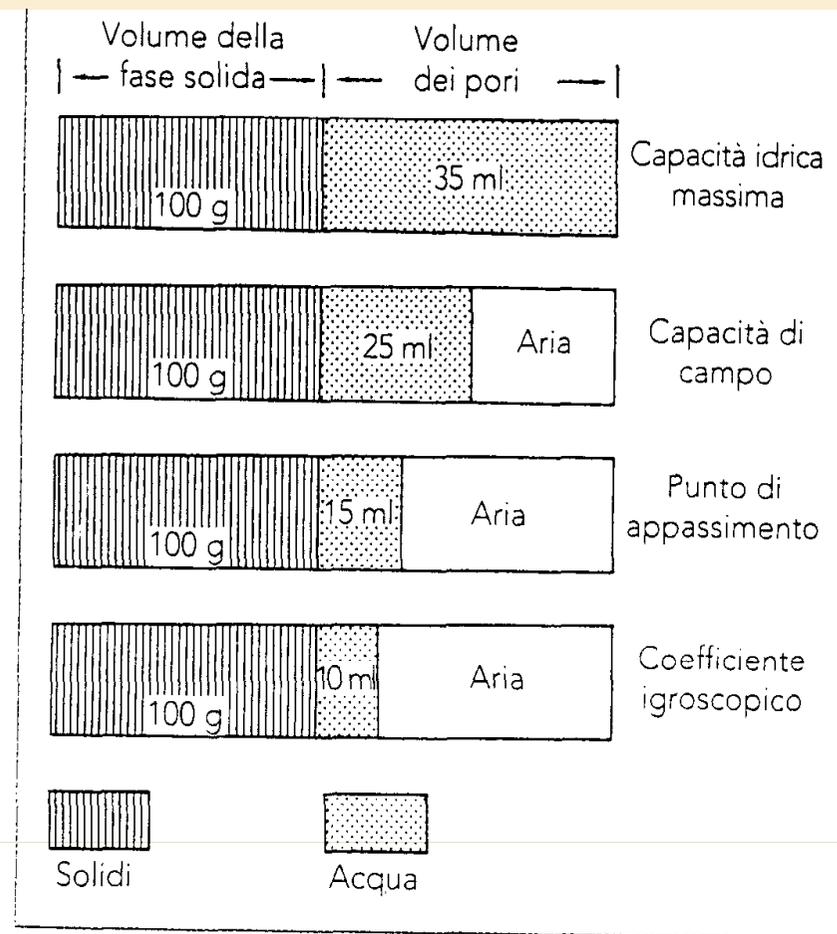
Schematizzazione di un suolo



- a) Suolo completamente saturo
- b) Alla capacità di campo
- c) Al punto di appassimento
- d) Secco in stufa a $105^{\circ}C$



Volumi occupati dalle fasi solida, liquida e gassosa ai punti caratteristici del rapporto acqua - suolo

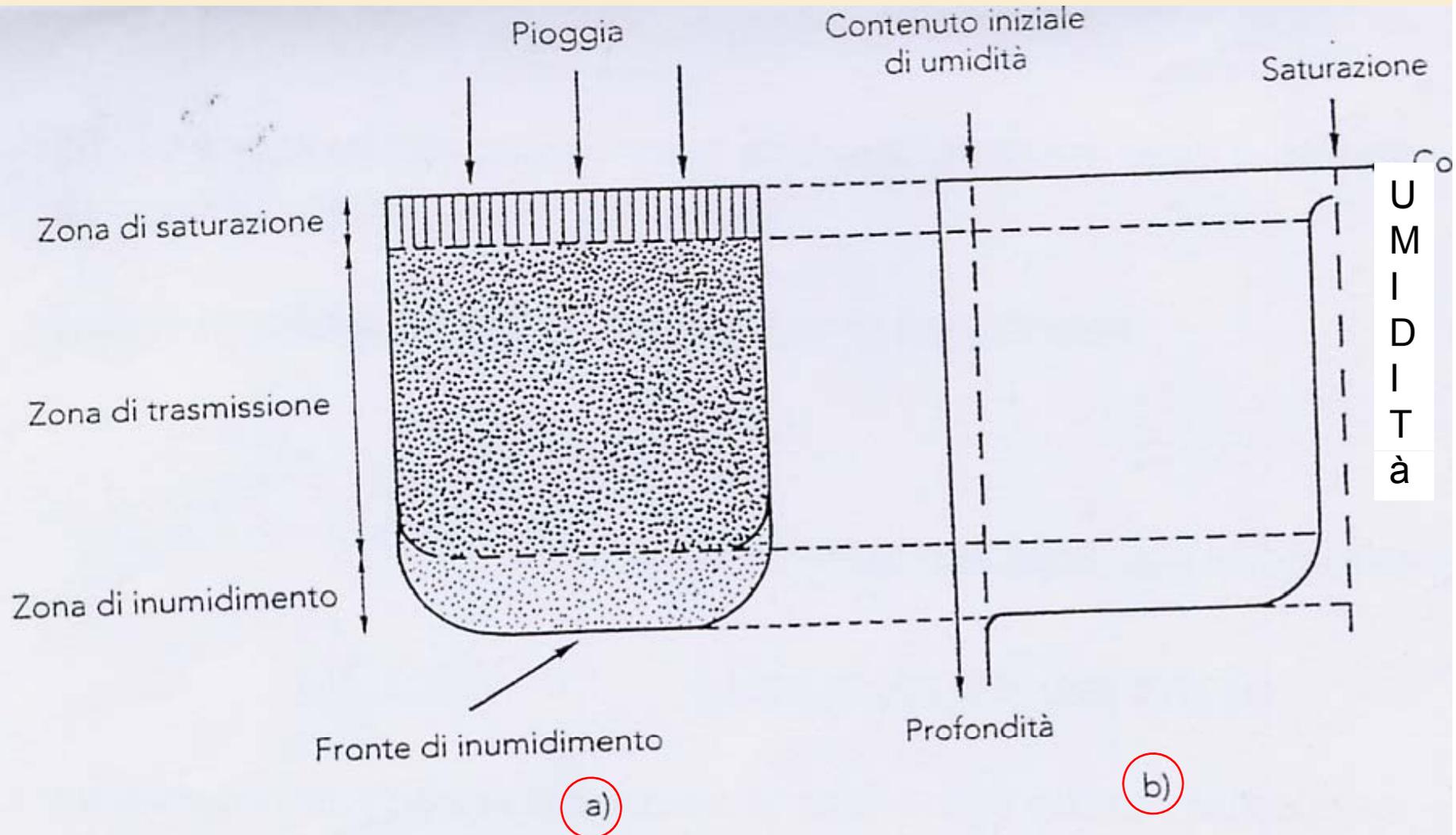


Rapporto tra **spessore** degli strati e **tensione** con cui questi sono trattenuti sulle superfici dei costituenti solidi

Profilo idrico del suolo = La determinazione del contenuto di acqua alle diverse profondità per tempi variabili dall'inizio dell'apporto idrico

Profilo idrico nel corso del movimento di infiltrazione

- a) Sezione schematica del profilo
- b) Variazione del contenuto di acqua in funzione della profondità



La quantità di acqua compresa fra quella alla capacità di campo e quella al punto di appassimento, costituisce la **RISERVA UTILE (RU)** del suolo,

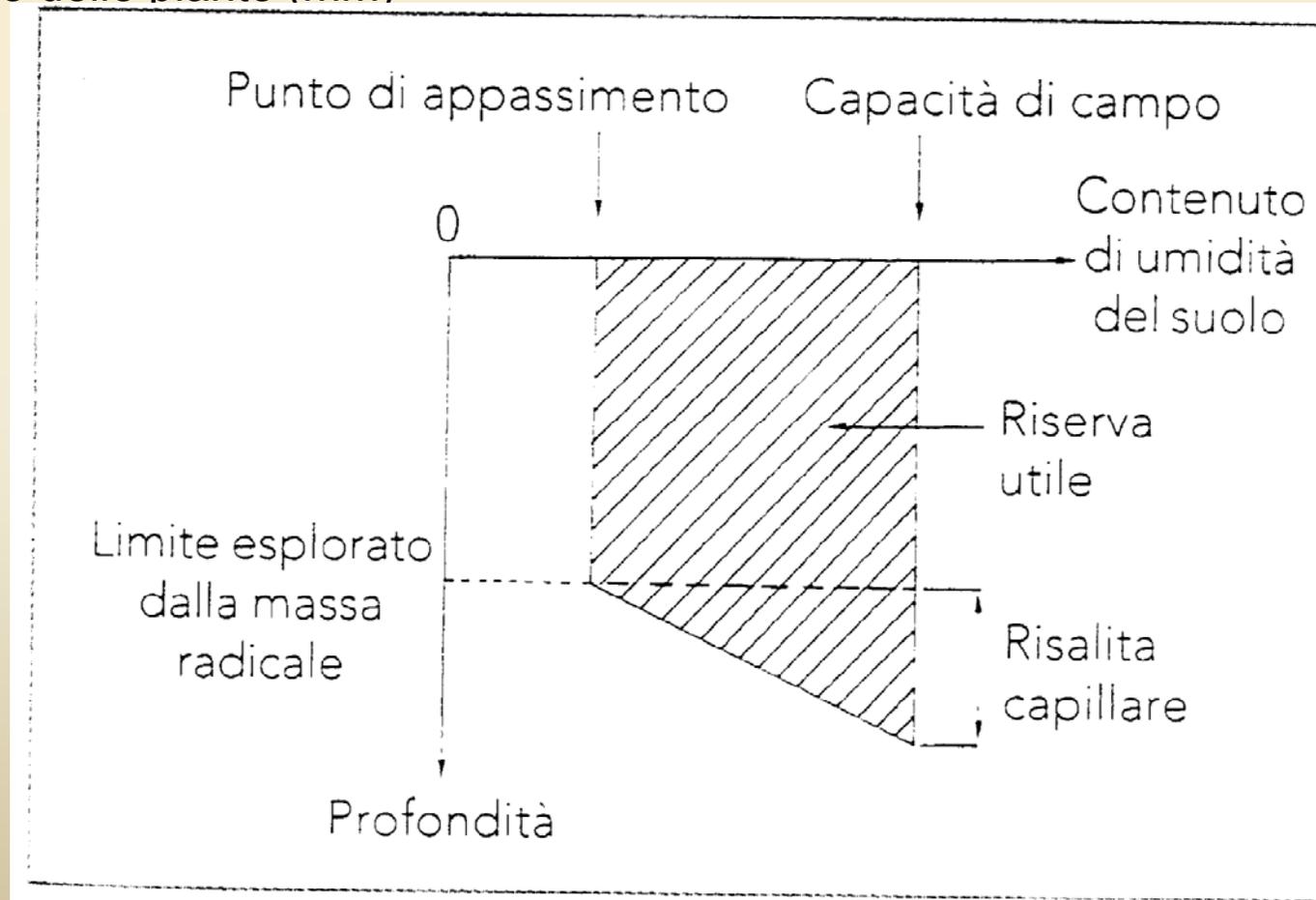
espressa in mm di acqua

$$RU = (U_{cc} - U_{pa}) P$$

è l'acqua disponibile per la pianta. **P** rappresenta la profondità raggiunta dall'apparato radicale delle piante (mm)

La riserva utile :

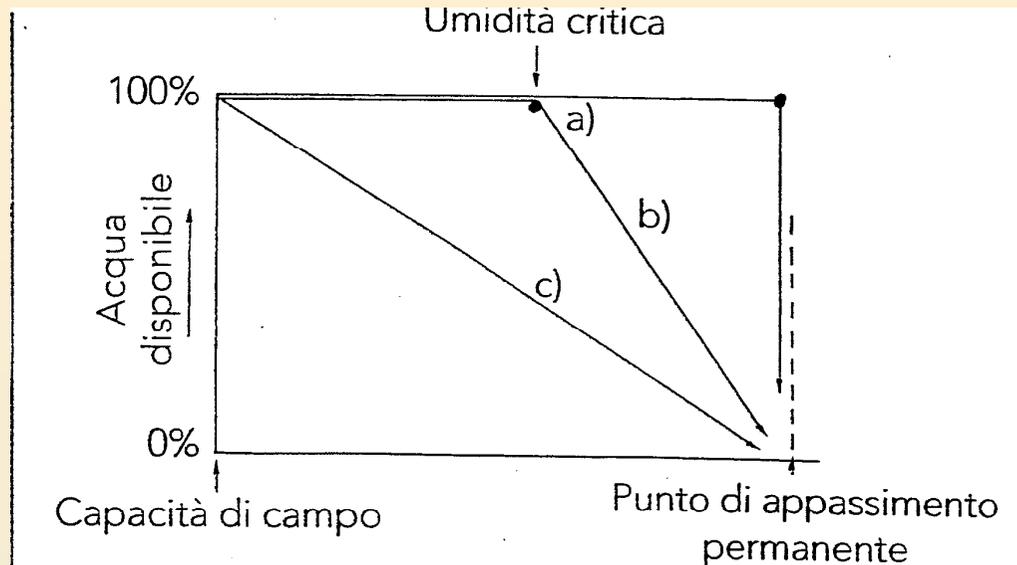
- Consente alle colture di soddisfare più o meno il loro fabbisogno idrico anche in periodi di difficoltà climatiche
- **varia con la tessitura del suolo**



Le piante non riescono a utilizzare con uguale facilità la riserva utile.

Si distinguono 3 casi determinati da :

a) Identica disponibilità per le piante per la quantità di acqua compresa fra capacità di campo e punto di appassimento



- b) Identica disponibilità fino all'umidità critica (contenuto di acqua al di sotto del quale si verifica una diminuzione di produzione)
- c) Disponibilità gradualmente decrescente con il diminuire della quantità di acqua del suolo

Distinzione fra una **Riserva Facilmente Utilizzabile (RFU)** e una frazione delle RU più difficilmente accessibile (curva b)

$$RFU = \alpha RU$$

α = coefficiente numerico compreso fra 1/3 e 2/3 in funzione della coltura e del valore di evapotraspirazione del suolo considerato

I **MOVIMENTI** dell' H_2O nel suolo: *ritenzione, cessione e utilizzazione di H_2O* ,

si esprimono come *energia potenziale = capacità di compiere lavoro*

$\psi_t =$ **Potenziale idrico** = Potenziale totale dell' H_2O nel suolo è una misura riferita a uno standard:

L' H_2O pura $\longrightarrow \psi_t = 0$ a $p = 1$ atm libera da ogni forza di repulsione e attrazione

ψ_t di un suolo ha sempre valore negativo $\psi_t < 0$



$$\psi_t = \psi_m + \psi_g + \psi_s < 0$$

$\psi_m =$ **potenziale di matrice**

espressione delle forze di ritenzione esercitate dalle particelle del suolo

$\psi_g =$ **potenziale gravitazionale**

lavoro necessario per mantenere l'acqua a una certa h contro forza di gravità

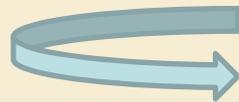
$\psi_s =$ **potenziale osmotico o di soluto** determinato dalle specie ioniche presenti

il potenziale idrico è espresso da un valore di pressione, in **bar**

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa}$$

La pressione atmosferica normale è pari a:

$$1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$$



$$1 \text{ bar} = 0,9869 \text{ atm}$$

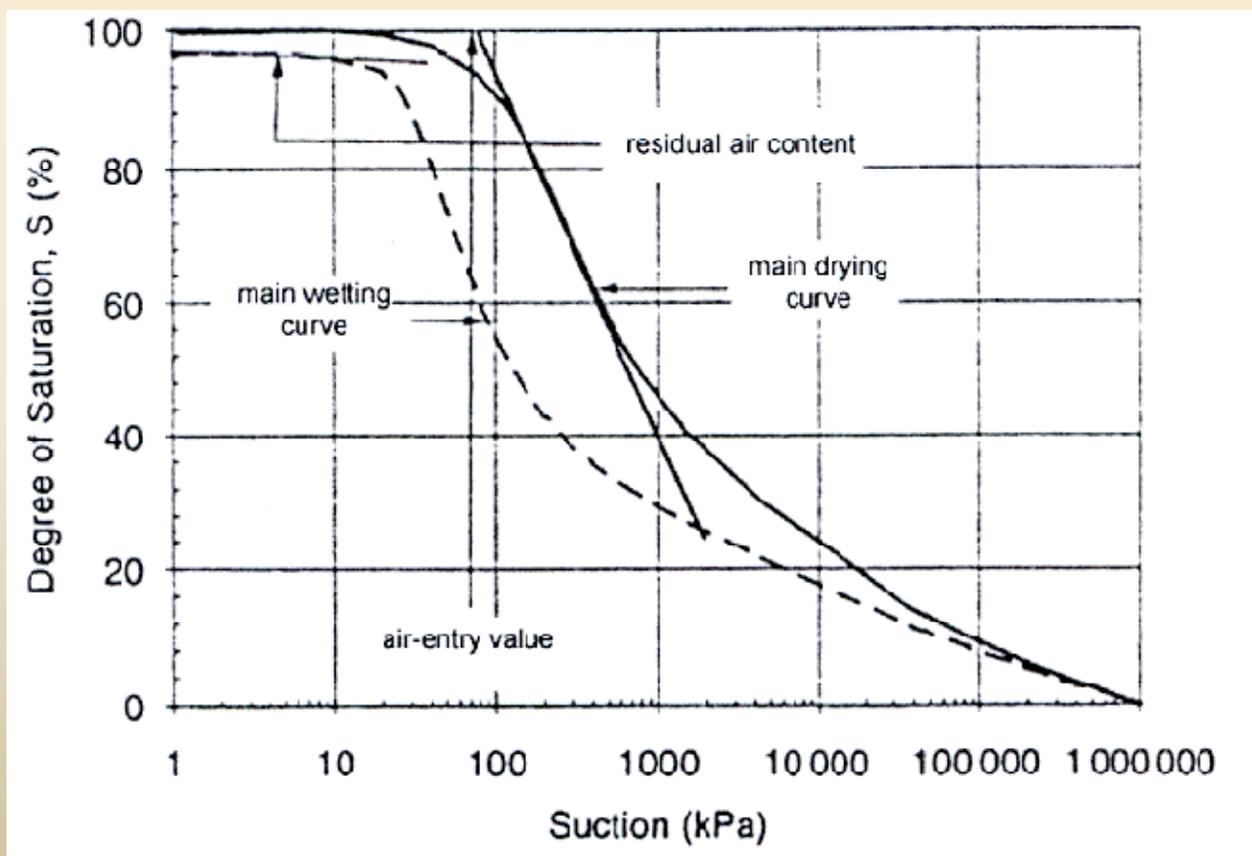
- il **potenziale matriciale** è dovuto alla tensione matriciale, ossia alla pressione negativa che la matrice solida del terreno esercita sull'acqua (acqua adsorbita sui colloidi o trattenuta per capillarità); la tensione matriciale si esercita perciò quando la porosità del terreno è occupata dall'acqua solo in parte (**terreno non saturo**)
- quando il **terreno è saturo**, la pressione esercitata è positiva:
pressione idrostatica

L'energia con cui l' H_2O è trattenuta dal suolo è la :

Tensione dell' H_2O o Suzione del suolo. I valori di tensione sono positivi e indicano la direzione verso cui agiscono le forze di ritenzione.

Tensione dell' H_2O e Potenziale idrico del suolo sono numericamente uguali ma di segno opposto. Si può costruire un grafico in cui il contenuto di umidità del suolo viene messo in relazione con la tensione di ritenzione espressa come potenziale idrico:

CURVE DI RITENZIONE



Dalla curva risulta:

- Al diminuire del contenuto di acqua aumenta la tensione, si abbassa il valore del potenziale idrico

- L' H_2O disponibile per la pianta è data dalla differenza fra l' H_2O alla capacità di campo e il punto di appassimento:

H_2O assorbibile =

$U_{cc} - U_{pa}$

L' H₂O si muove nel suolo verso strati più secchi con $\Psi <$

Quando fra due punti $\Delta \Psi = 0 \longrightarrow$ non c'è movimento di H₂O

Alla capacità di campo, il potenziale dell' H₂O è compreso fra $- 0.1$ e $- 0.5$ bar

Il valore varia in funzione della tessitura e composizione del suolo:

A parità di tensione, il contenuto di H₂O è più alto nei suoli argillosi rispetto ai sabbiosi

Costituzione del terreno	Contenuto di acqua (g di H ₂ O per 100 g di terreno secco)		
	Cap. idrica ritenzione	Capacità di campo	Punto di appassimento
Torboso	120-150	80-90	45-50
Argilloso	50-60	30-35	15-20
Medio impasto	25-30	12-15	8-10
Sabbioso	10-20	5-10	1-3

Nei terreni a più elevata capacità di ritenzione, le piante possono soffrire di aridità anche quando vi sia ancora H₂O in notevole quantità, ma non disponibile.

Per uno stesso valore di ψ



Diverso contenuto di H_2O

Le piante all'inizio assorbono acqua debolmente legata

Bassi valori di tensione

poi quella trattenuta più fortemente fino al

punto di appassimento

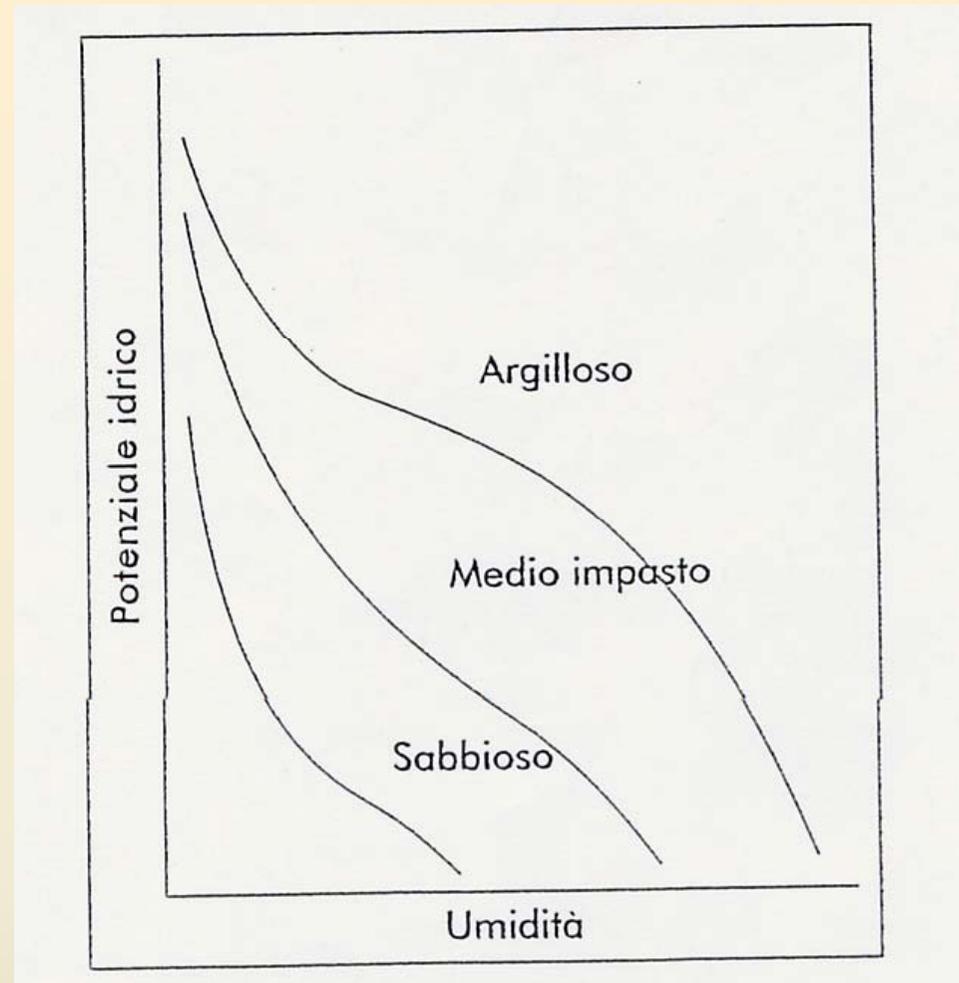
reversibile



Elevati valori di tensione

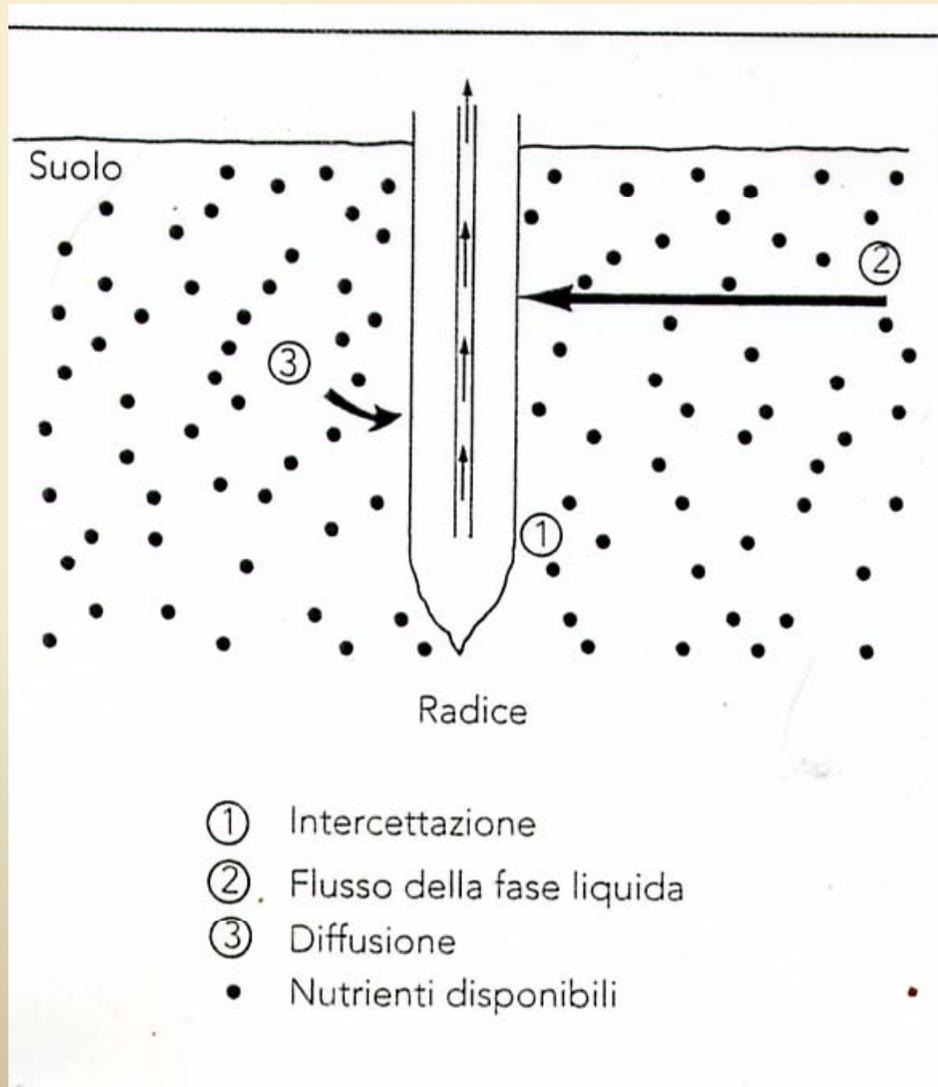
permanente

Le radici non assorbono più H_2O



MOBILIZZAZIONE DEI NUTRIENTI verso le superfici radicali

Gli elementi effettivamente disponibili si muovono fino alle radici
tramite 3 meccanismi :

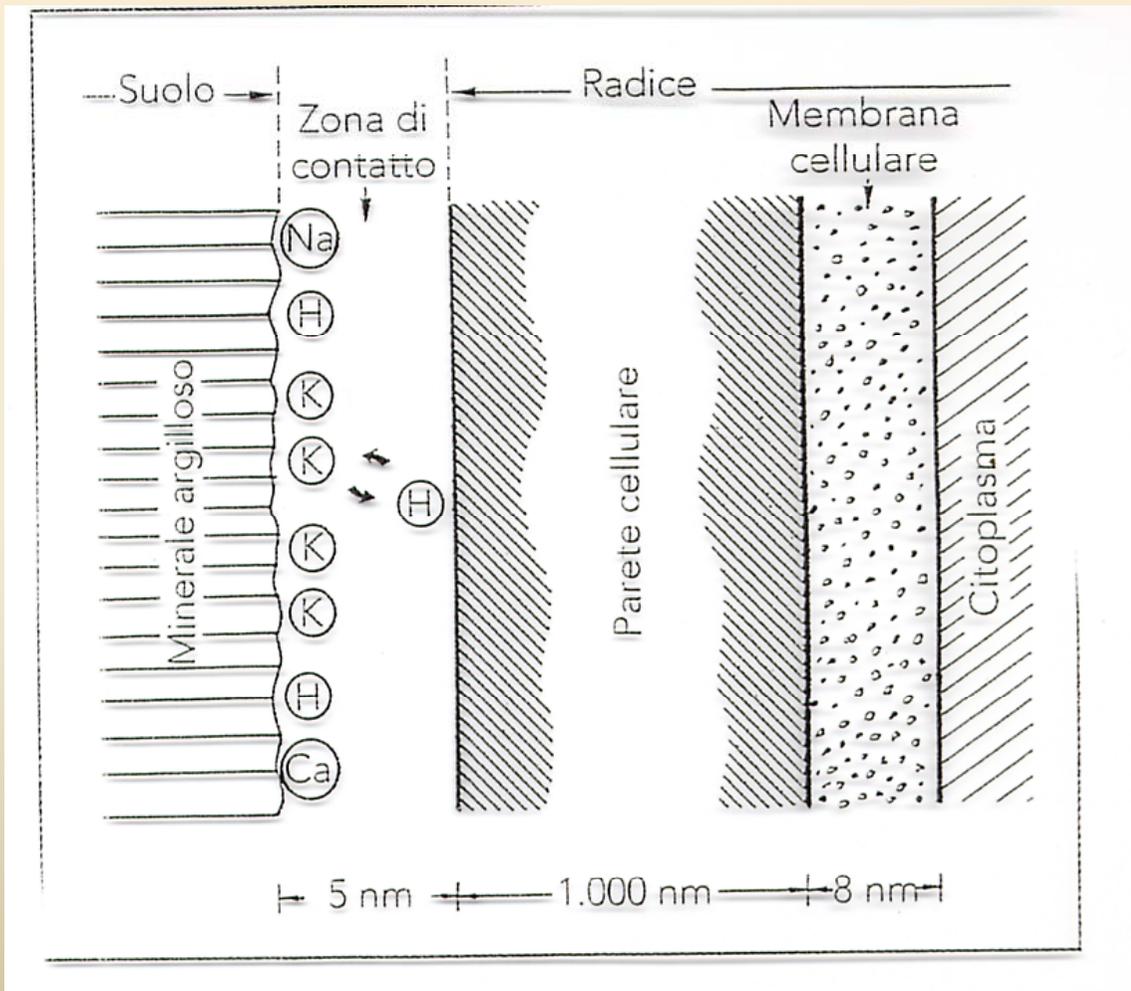


- 1) INTERCETTAZIONE RADICALE
- 2) DIFFUSIONE
- 3) FLUSSO DI MASSA

Intercettazione radicale = scambio per contatto fra 2 superfici solide

Dipende da:

- Quantità di nutrienti disponibili nel volume di suolo esplorato dalle radici
- Densità della massa radicale rispetto al volume del suolo



La **mobilità** dei nutrienti si esprime meglio con gli altri 2 meccanismi

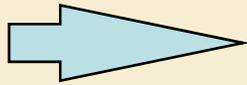
DIFFUSIONE = movimento molecolare in un mezzo statico



Tendenza ad annullare ogni differenza nella concentrazione degli elementi presenti nel mezzo

Le radici assorbendo

abbassamento della concentrazione ionica in prossimità della superficie radicale

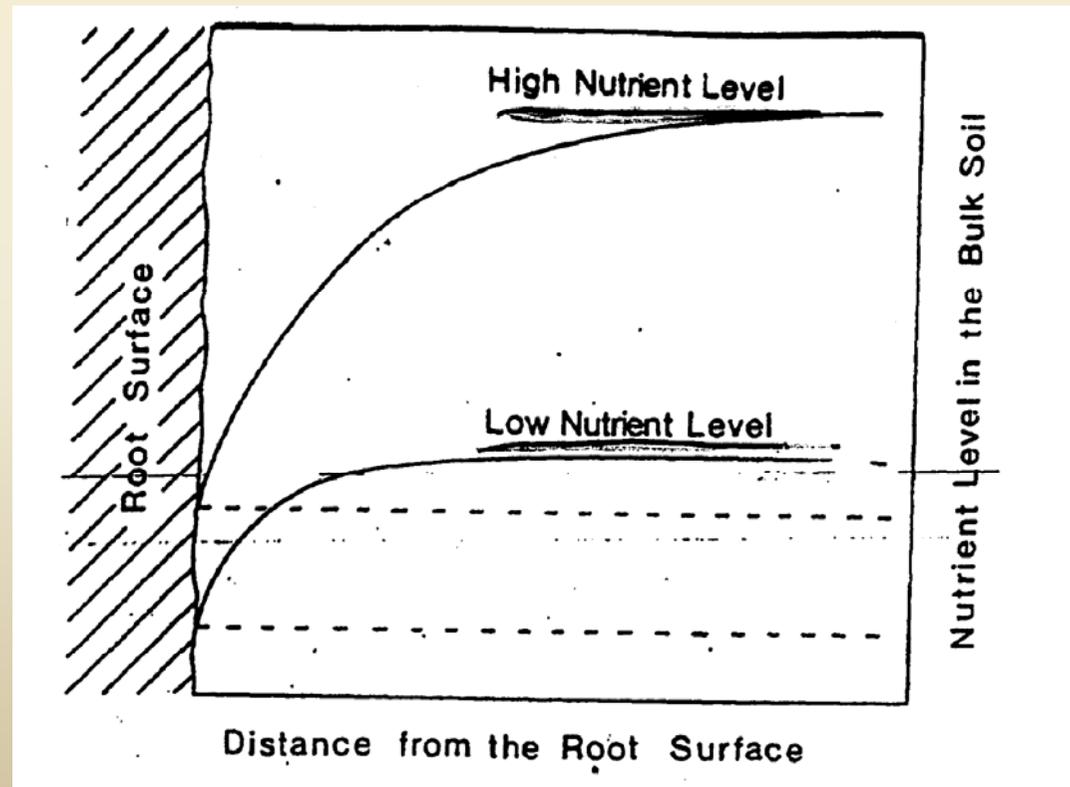


Creazione della ZONA DI CARENZA = zona di gradiente ionico

L'**esistenza** della zona di carenza garantisce il flusso ionico verso la radice

L'**estensione** della zona di carenza (4 – 10 nm) dipende dal livello dei nutrienti presenti nel suolo

La **velocità del movimento di diffusione** è direttamente proporzionale al gradiente ionico e inversamente proporzionale alla distanza



ASPETTO QUANTITATIVO

La diffusione segue la I^a legge di Fick

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

J è la **quantità di soluto** diffusa x unità di sezione x unità di tempo

La costante di proporzionalità **D** si chiama **coefficiente di diffusione** dipende da :

- Natura della specie chimica diffusibile
- Contenuto di acqua nel suolo
- Tortuosità del cammino di diffusione

dC/ dx = gradiente di concentrazione nella direzione x

Il segno negativo in questa espressione indica che la direzione della diffusione è opposta a quella del gradiente di concentrazione

- Tanto maggiore è la concentrazione ionica iniziale



Maggiore è il gradiente di concentrazione

- Se la velocità di assorbimento radicale >> Velocità di rifornimento dal suolo



Elevato gradiente di concentrazione

L'estensione della zona di carenza corrisponde al massimo sviluppo radicale

Non c'è linearità fra densità delle radici e assorbimento dei nutrienti:

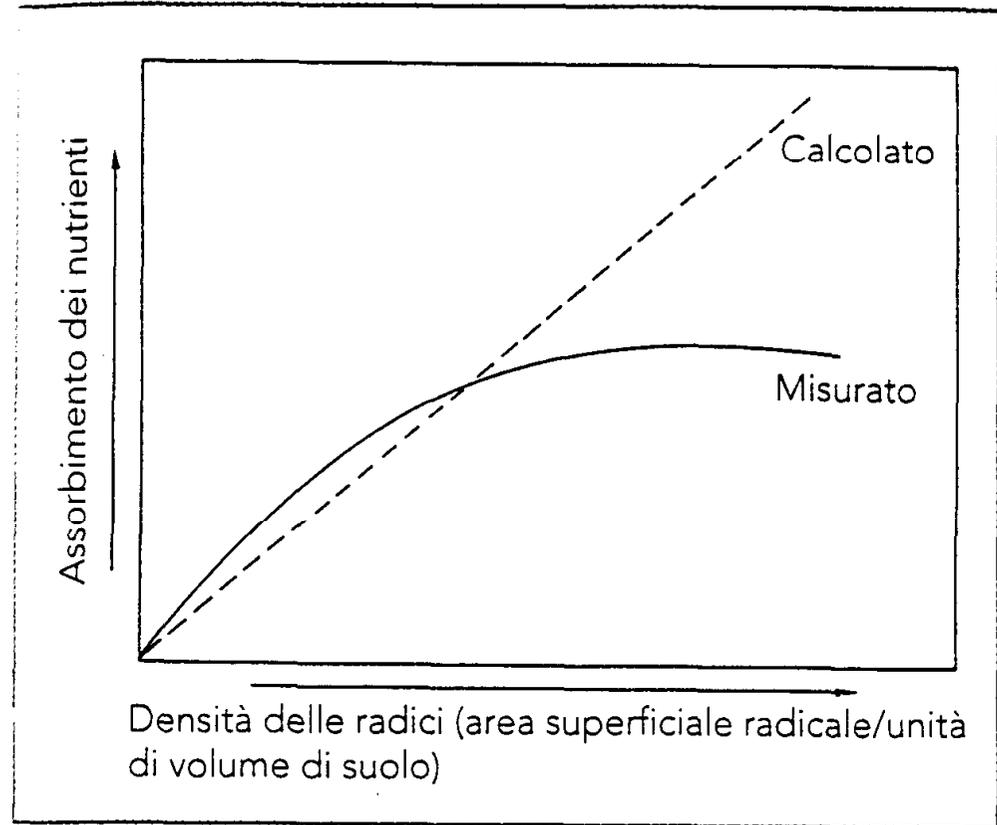
Elevata densità radicale



Sovrapposizione delle zone di carenza competizione per i nutrienti



Diminuzione dell'assorbimento



FLUSSO DI MASSA = movimento della fase liquida con le sostanze in essa disciolte

Dipende:

- Concentrazione di ogni specie ionica in soluzione
- Coefficiente di traspirazione =
quantità di H₂O utilizzata dalla pianta per la produzione di 1 Kg di sostanza secca

In un suolo alla **capacità di campo** :



elevato valore di ψ

Flusso di H₂O continuo

approvvigionamento idrico uniforme

Una **diminuzione di ψ** comporta:

La quantità di H₂O assorbita $>$ Quantità di H₂O apportata per flusso di massa

Essiccamento della superficie del suolo



Impedimento del flusso

Le condizioni di umidità influenzano i rapporti fra **diffusione e flusso di massa**

In generale:

Il flusso dei nutrienti verso le radici avviene **contemporaneamente** per flusso di massa e per diffusione

Il **flusso di massa** fornisce elevate quantità di elementi mobili e con elevata concentrazione in soluzione

La **diffusione** è il processo dominante quando:

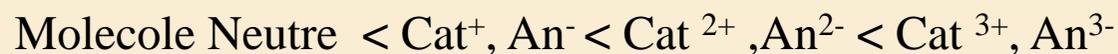
- La traspirazione è bassa
- La richiesta di un elemento è elevata e la sua concentrazione in soluzione è bassa

Nutriente	Quantità necessaria per realizzare una produzione di 9.500 kg/ha di granella	Quantità mediamente disponibile per		
		Intercettazione	Flusso della fase liquida	Diffusione
Azoto	190	2	150	38
Fosforo	40	1	2	37
Potassio	195	4	35	156
Calcio	40	60	150	0
Magnesio	45	15	100	0
Zolfo	22	1	65	0

Caratteristiche chimico-fisiche delle specie ioniche

che influenzano l'assorbimento:

1. VALENZA dello ione Diminuzione dell'assorbimento:



2. DIMENSIONE dello ione :

Correlazione negativa fra *raggio ionico* e *velocità di assorbimento*

- Relazione tra valore del raggio ionico e velocità di assorbimento di alcuni cationi monovalenti.

Catione	Raggio ionico (*) (nm),	Velocità di assorbimento $\mu\text{mol/g}$ di sostanza fresca \cdot 3 ore)
Litio	0.380	2
Sodio	0.360	15
Potassio	0.330	26
Cesio	0.310	12

* Il raggio ionico idratato

Meccanismi di interazione ionica

1. **COMPETIZIONE** : **inibizione** dell'assorbimento
di uno ione in seguito alla presenza di un altro ione

fra *CATIONI*:

- Rb^+ e K^+ **competizione specifica** per il sistema di trasporto :
Il raggio del Rb^+ idratato e del K^+ sono simili
- NH_4^+ e K^+ La selettività dei siti di legame della membrana è
funzione solo di caratteristiche chimico-fisiche degli ioni
- Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} **competizione aspecifica** per le cariche negative all'interno

fra *ANIONI*

- $SO_4^{=}$ e $MoO_4^{=}$
 - $SO_4^{=}$ e $SeO_4^{=}$
 - $PO_4^{=}$ e $AsO_4^{=}$
 - Cl^- e NO_3^-
- stesso sistema di trasporto**

- Competizione PO_4^- e AsO_4^-

Piante As tolleranti hanno sviluppato un sistema di uptake del P ad alta affinità e indotto dalla carenza di P:

Soppressione dell'uptake di As per competizione con P

- Competizione fra Cl^- e NO_3^-

Nei terreni salini un aumento di NO_3^-

Miglioramento dello stato nutrizionale della pianta

Previene la tossicità da Cl^- in piante sensibili

- **Competizione fra NH_4^+ e NO_3^-**

L'ammonio reprime velocemente l'assorbimento di nitrato

Il nitrato non ha effetto sull'assorbimento di ammonio

2. SINERGISMO :

stimolazione dell'assorbimento di uno ione in seguito alla presenza di un altro ione

Il *Calcio* è un esempio di sinergismo

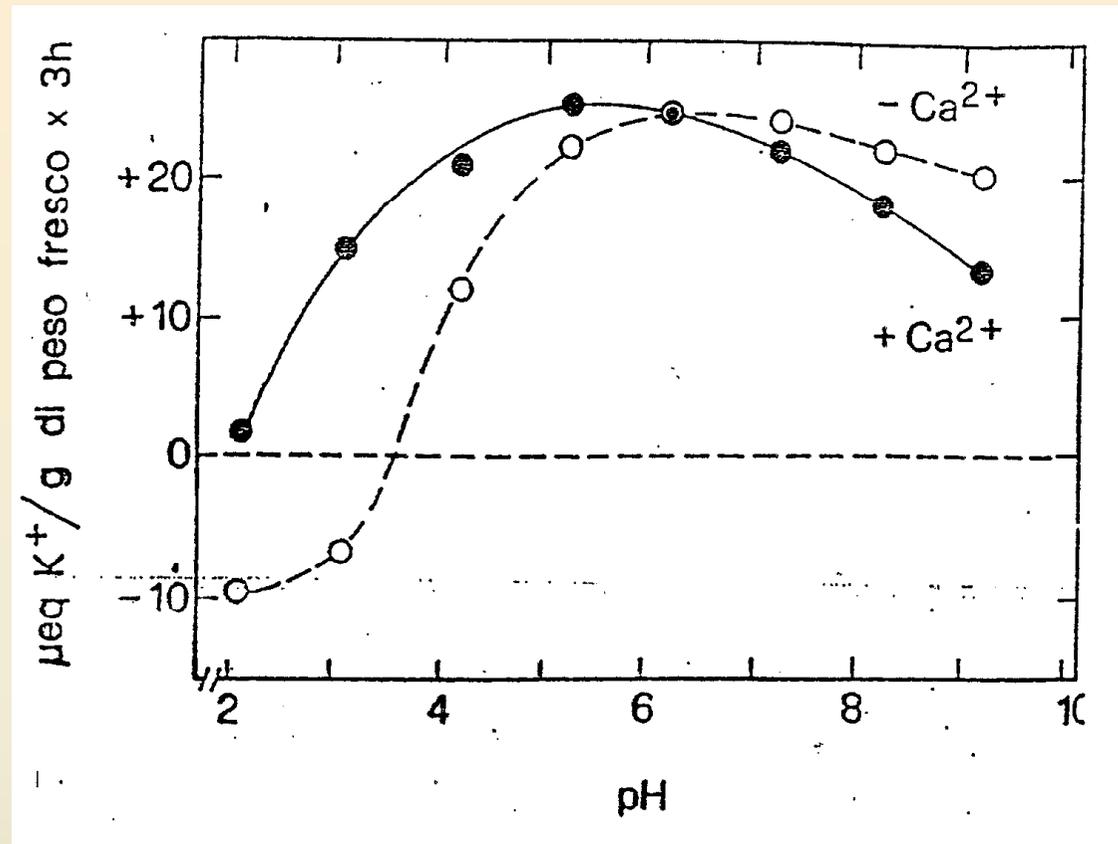
3. RELAZIONI CATIONI-ANIONI

Il Ca^{2+} è un esempio di sinergismo: stimola l'assorbimento di cationi e anioni

- a basso pH

Favorisce l'uptake di K^+

Contrasta l'effetto negativo degli H^+ sull'integrità di membrana
e sul funzionamento della pompa protonica



- a pH elevati

competizione fra K^+ e Ca^{++}

- Il valore di pH che segna la transizione da effetto sinergico a effetto competitivo sull'assorbimento del K^+ non è un valore fisso ma dipende dalla specie vegetale

Nel rapporto K^+ / Na^+ \longrightarrow il Ca^{++} favorisce il K^+

È importante nei suoli salini

Viene favorito l'antiporto K^+ / Na^+ \longrightarrow efflusso di Na^+

Tab. 15.3 - Effetto di Ca^{2+} sulla selettività radicale K^+/Na^+ in piante di mais e di barbabietola da zucchero (modificata da Marschner, 1986).

Soluzione esterna (10 meq/l di NaCl e KCl)	Velocità di assorbimento (μ eq/g di sostanza fresca \cdot 4 ore)					
	Mais			Barbabietola da zucchero		
	Na^+	K^+	$Na^+ + K^+$	Na^+	K^+	$Na^+ + K^+$
- Calcio	9.0	11.0	20.0	18.8	8.3	27.1
+ Calcio (1 meq/l di $CaCl_2$)	5.9	15.0	20.9	15.4	10.7	26.1

COMPETIZIONE IONICA

Effetto di K^+ e Ca^{2+} sull'assorbimento di Mg^{2+} marcato (^{28}Mg) in piantine di orzo (*) (modificata da Marschner, 1986).

	Assorbimento di Mg^{2+} ($\mu eq Mg^{2+} / 10g$ di sostanza fresca $\cdot 8$ ore)		
	$MgCl_2$	$MgCl_2 + CaSO_4$	$MgCl_2 + CaSO_4 + KCl$
Rodici	165	115	15
Germogli	88	25	6.5

Il Mg^{2+} ha un legame debole sui siti di scambio della membrana a causa di un elevato mantello di idratazione



La velocità di assorbimento dipende:

- ❖ Dalla concentrazione delle specie cationiche
- ❖ Dalla concentrazione **individuale** di ogni catione
- ❖ Dall'efficienza del meccanismo di uptake

Competizione efficace di K^+ e Ca^{2+} con il Mg^{2+}

The effect of an increasing Mg application on the content of various species in sunflower plants (SCHARRER and JUNG [1955])

	K	Na	Ca	Mg	Sum
	me/100 g DM				
Mg_1	49	4	42	49	144
Mg_2	57	3	31	61	152
Mg_3	57	2	23	68	150

Aumentando la concentrazione di Mg^{2+} :

Aumento del Mg^{2+} interno

Diminuzione di Ca^{2+} e Na^+

Il K^+ resta invariato

La somma totale dei cationi resta costante

Competizione NH_4^+ - NO_3^-

L' NH_4^+ è assorbito di preferenza ritardando e inibendo
l'uptake del NO_3^-

Il rapido influsso di NH_4^+ nel citoplasma:

→ Soddisfa l'esigenza di N della pianta

→ Depolarizzazione della membrana

Soppressione uptake di NO_3^-
tramite simporto $\text{NO}_3^- / \text{H}^+$



RELAZIONI CATIONI-ANIONI

Effect of the Accompanying Ion on the Rate of K^+ and Cl^- Uptake by Maize Plants"

Concentration ($meq\ l^{-1}$)	Uptake rate ($\mu eq\ g^{-1}\ fresh\ wt\ h^{-1}$)			
	K^+ from		Cl^- from	
	KCl	<u>K_2SO_4</u>	KCl	<u>$CaCl_2$</u>
0.2	1.6	1.6	0.8	0.7
2.0	2.7	1.9	2.0	1.0
20.0	5.7	2.2	4.3	2.1

"Recalculated from Lüttge and Laties (1966).

Le Piante tramite l'assorbimento radicale rimuovono cationi e anioni in modo disuguale

- 
 necessità di
 - Compensazione di cariche elettriche
 - Regolazione del pH cellulare

Bilanciamento ionico e regolazione del pH cellulare si realizzano con

1. **Accumulo o degradazione all'interno di anioni di acidi organici**
2. **Invio all'esterno di H^+ o OH^- (HCO_3^-)**

Relationship between Cation–Anion Uptake and Organic Acid Content in Isolated Barley Roots^a

External solution (meq l ⁻¹)	Uptake ($\mu\text{eq g}^{-1}$ fresh wt)		Change in organic acid ($\mu\text{eq g}^{-1}$ fresh wt)	¹⁴ CO ₂ Fixation (relative)
	Cations	Anions		
2 K_2SO_4	17 ↑	1	+15.1 ↑	145 ↑
1 KCl	28	29	-0.2	100
1 $CaCl_2$	1	15 ↑	-9.7	60 ↓

^aBased on Hiatt (1967a, b) and Hiatt and Hendricks (1967).

Assorbimento di Cationi > Anioni



- Aumento del pH citoplasmatico
- Aumento delle cariche ⊕

Sintesi e traslocazione

di Acidi Organici
(RCOO⁻)



Bilanciamento di cariche ⊕

Accumulo nel vacuolo delle cariche ⊕ in eccesso:

Cotrasporto RCOO⁻/ CAT⁺



Liberazione di H⁺

regolazione pH citoplasmatico

Assorbimento di Anioni > Cationi

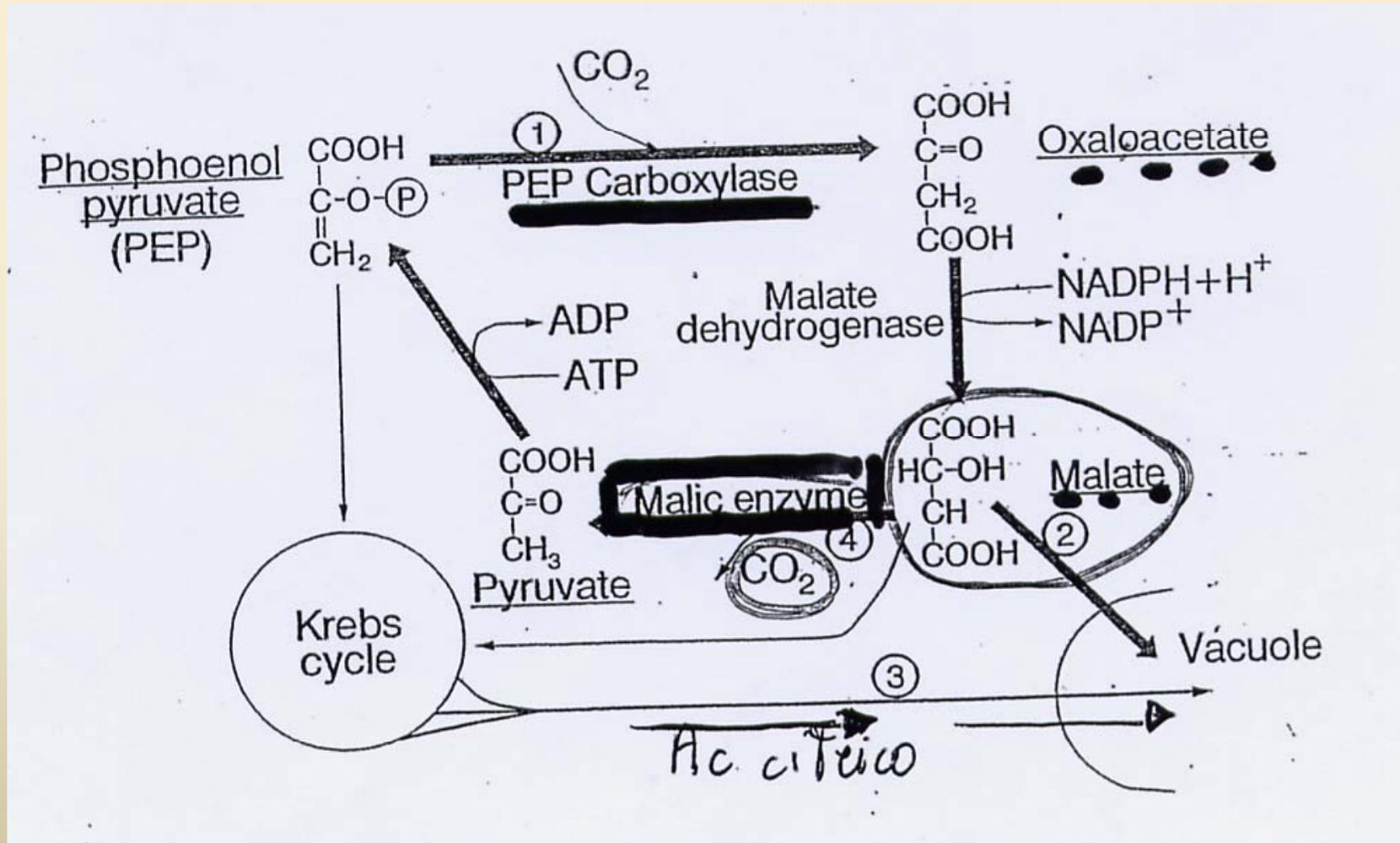


- Diminuzione pH citoplasmatico
- Aumento cariche ⊖ all'interno

Decarbossilazione degli acidi organici

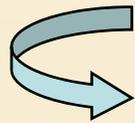


La sintesi e degradazione del malato avviene nel *citoplasma*
 ed è regolata da *variazioni di pH*



Assorbimento di \oplus \longrightarrow Elevato pH

Attivazione PEPc

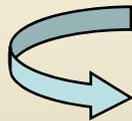


Aumento della fissazione di CO_2

Sintesi di Ossalacetato e malato

Assorbimento \ominus \longrightarrow Diminuzione del pH

Inattivazione PEPc



Attivazione dell'enzima Malico

Decarbossilazione del malato

Liberazione di CO_2 e HCO_3^- all'esterno