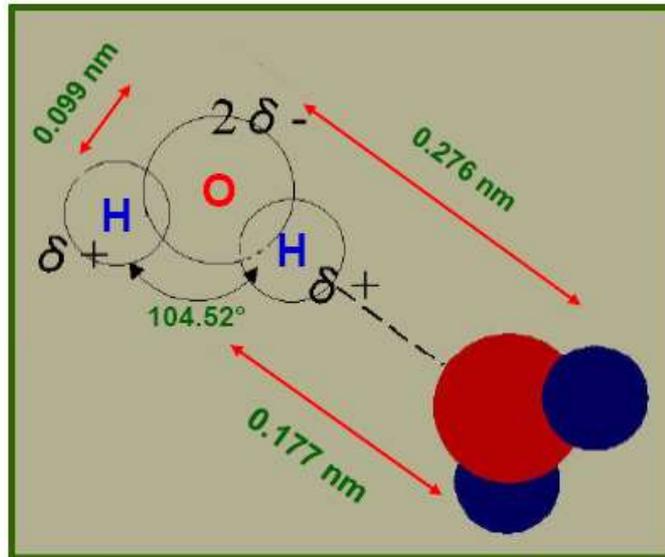
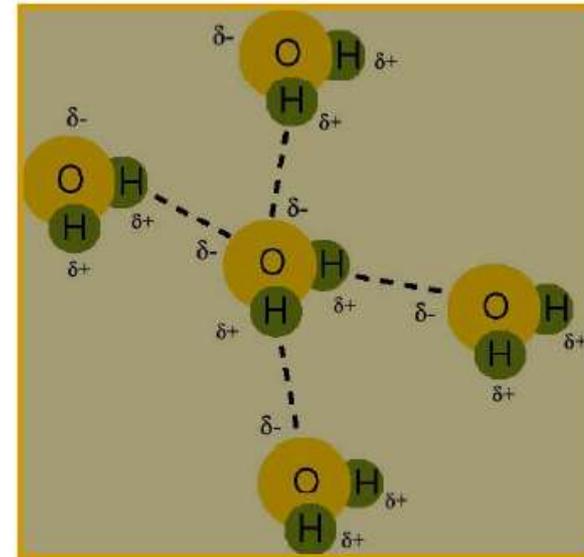


# Fase liquida del suolo

# L'acqua è una molecola elettricamente neutra, ma con un dipolo interno



Caratteristiche fisiche di due molecole d'acqua unite da legame a idrogeno



Molecole d'acqua unite da legami a idrogeno

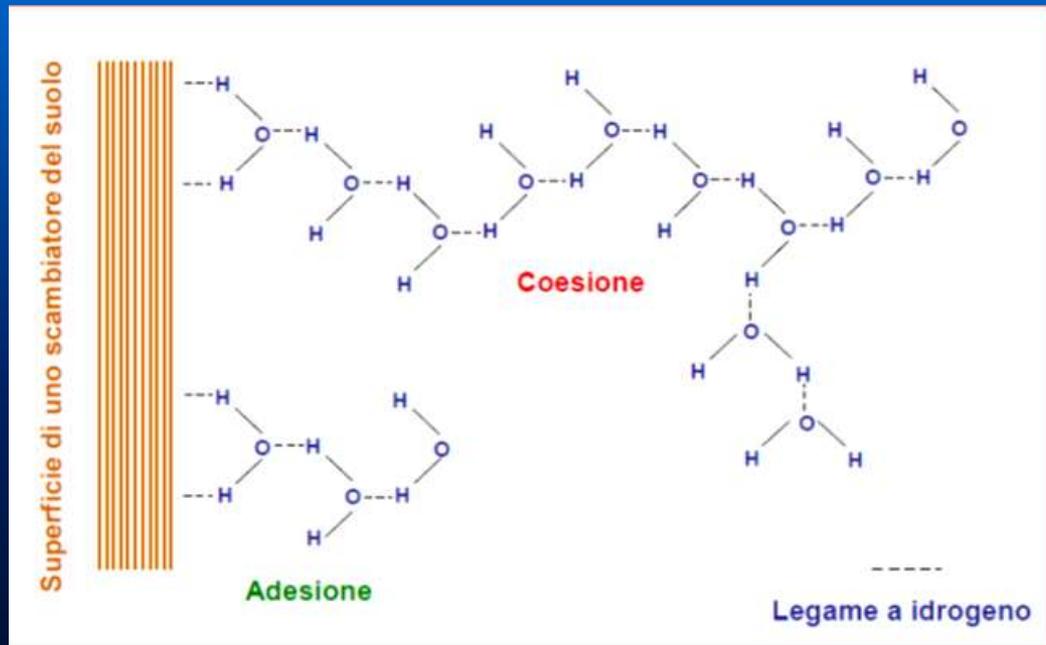
L'acqua, per peculiare struttura della sua molecola, è caratterizzata da momento dipolare. I due legami O:H, perfettamente equivalenti, formano un angolo di circa  $105^\circ$ . Non coincidendo nella molecola il baricentro delle cariche positive ( $\delta^+$ ) con il baricentro delle cariche negative ( $\delta^-$ ), si origina un dipolo con momento dipolare 1.85 debye.

L'energia del legame a idrogeno è compresa tra  $0.5$  e  $10 \text{ kcal mol}^{-1}$ . La formazione di legami idrogeno viene detta *cooperativa*.

# L'acqua è una molecola elettricamente neutra, ma con un dipolo interno

Due forze consentono al suolo di trattenere quantità variabili di acqua:

- la forza di adesione, con cui le superfici solide attraggono molecole di  $H_2O$
- la forza di coesione, con cui i dipoli di  $H_2O$  si attraggono fra loro



L'acqua fissata per **adesione** all'interfaccia suolo-acqua è capace di legare per **coesione** altre molecole di  $H_2O$  a distanza progressivamente crescente dalle superfici solide. Congiuntamente queste due forze rendono il suolo capace di trattenere percentuali diverse di umidità e di controllarne il movimento e l'utilizzazione.

# Azione delle forze di adesione e di coesione



*(da Weil & Brady, 2017)*

Everyday evidences of the forces of cohesion and adhesion

# Acqua del suolo

1. è un agente essenziale per lo svolgimento dei processi fisici, chimici e biologici attivi nella pedosfera
2. costituisce un potente agente di pedogenesi e determina i caratteri morfologici e costitutivi del profilo per erosione, infiltrazione, percolazione, risalita, ristagno
3. alimenta l'evapotraspirazione
4. condiziona la presenza dell'aria tellurica, lo stato termico ed il colore del suolo
5. solubilizza e mobilizza sia i nutrienti (essenziali e benefici) sia i contaminanti (organici ed inorganici)

L'acqua del suolo non circola liberamente, ma la sua permanenza e i suoi spostamenti nel suolo dipendono da forze fisiche esercitate sul volume di  $H_2O$ : forze superficiali di adesione, di coesione, di tensione superficiale e forza gravitazionale

# Acqua del suolo

La fase liquida del suolo è in realtà una soluzione diluita costituita da molecole di acqua e sostanze in essa disciolte, o presenti in sospensione, che rivestono un'importanza decisiva per il sostenimento del *soil biota* e delle piante coltivate.

## Pore Water Composition

**CATIONS**  $\text{Al}^{3+}$   
 $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$   
 $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , etc.  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , etc.

**ANIONS**  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{=}$ ,  $\text{HCO}_3^-$

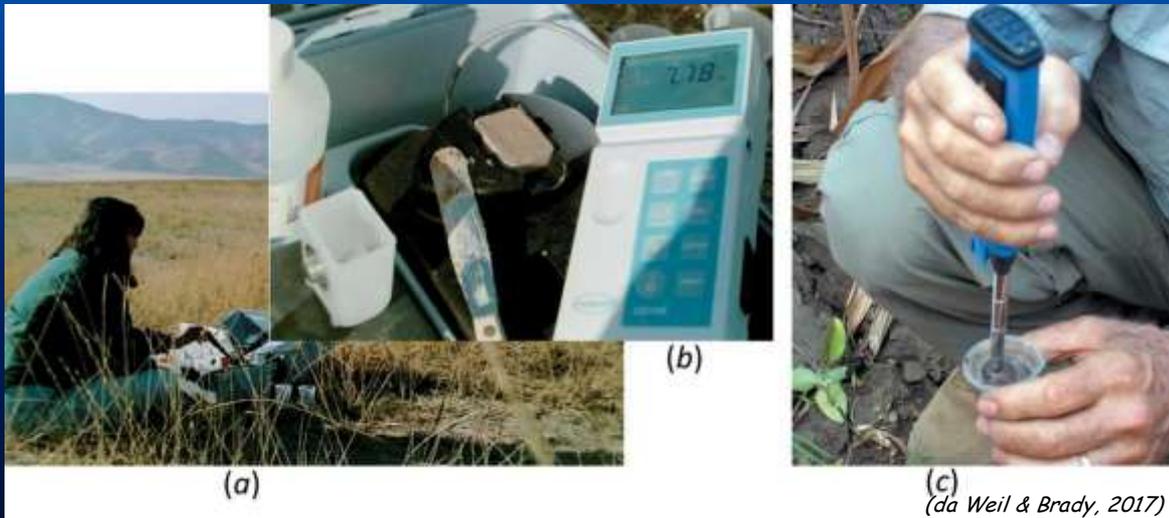
**ORGANIC COMPOUNDS** (dissolved & colloidal)

**DISSOLVED GASES** (esp.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ )

**SUSPENDED CLAY PARTICLES**

# Acqua del suolo

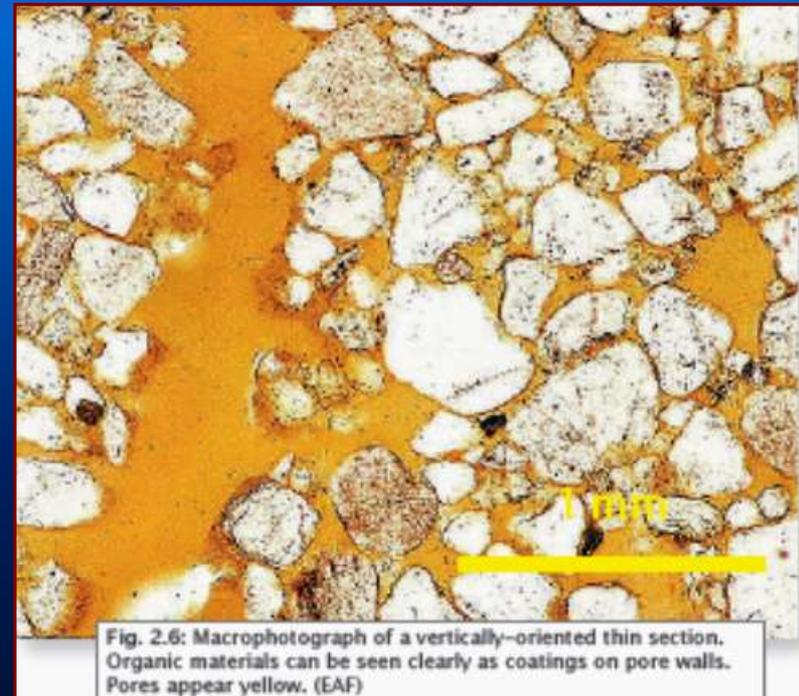
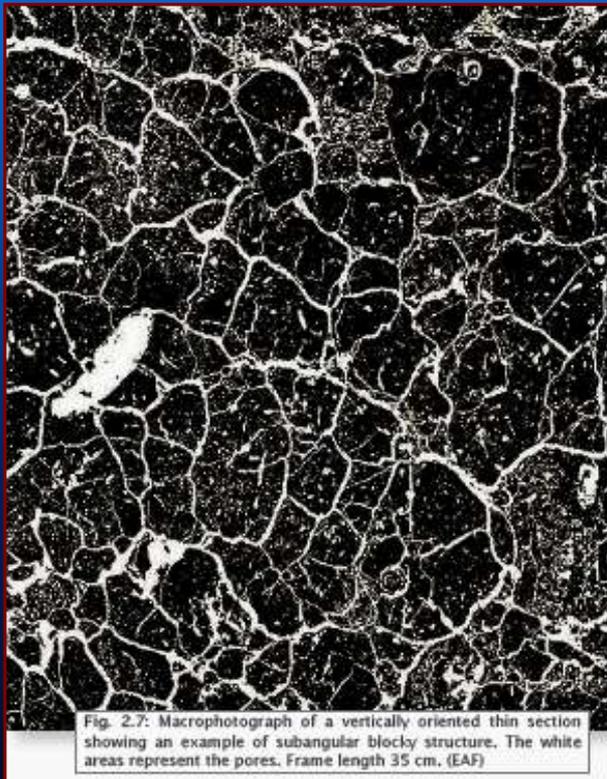
La conducibilità elettrica dell'estratto acquoso di suolo rappresenta una stima indiretta degli ioni (elettroliti di II specie) presenti nell'acqua ed è correlata alla pressione osmotica esercitata dalla soluzione nel suolo nei confronti degli organismi viventi. Fornisce una misura della concentrazione, non della composizione salina.



Viene misurata con il conduttimetro su un estratto di pasta satura ( $CE_e$ ), o sull'estratto acquoso di suolo (p/v) 1:1 ( $CE_{1:1}$ ), 1:2 ( $CE_{1:2}$ ) o 1:5 ( $CE_{1:5}$ ).

I suoli salini presentano un valore della conducibilità elettrica dell'estratto di pasta satura ( $CE_e$ )  $> 4 \text{ dS m}^{-1}$ .

# L'acqua compete con la fase gassosa per occupare uno stesso spazio fisico del terreno: la porosità



La distribuzione, la ritenzione e la mobilità della fase liquida nel suolo è dovuta alla morfologia, alla dimensione e alla continuità dei pori che la contengono (e la **trattengono**).

# Classificazione dei pori del terreno sulla base delle loro caratteristiche e funzioni

## Tipo di pori

## Caratteristiche

## Funzioni

### Macropori ( $\Phi > 80 \mu\text{m}$ )

Sono costituiti dalle spaccature visibili, dai cunicoli prodotti dall'attività della meso- e macrofauna e dai vuoti lasciati dopo la decomposizione delle radici più grosse. Le forze capillari sono trascurabili rispetto alla forza gravitazionale e l'acqua in essi contenuta viene persa rapidamente dal profilo sotto l'azione della forza di gravità.

Aerazione,  
drenaggio,  
penetrazione  
di radici,  
habitat per  
la pedofauna

### Mesopori (80-30 $\mu\text{m}$ ) pori della riserva idrica

Sono i pori che vengono occupati dalla microfauna e dai peli radicali. Le forze capillari sono abbastanza forti da permettere la risalita dell'acqua dalla falda per un'altezza compresa tra i 6 ed i 60 cm se i pori costituiscono un sistema idraulicamente continuo. Quando i mesopori sono completamente pieni di acqua il terreno si trova alla "capacità di campo". Importante per le relazioni suolo-acqua-pianta.

Trattengono  
nel suolo  
l'acqua  
disponibile  
per le piante

# Classificazione dei pori del terreno sulla base delle loro caratteristiche e funzioni

## Tipo di pori

## Caratteristiche

## Funzioni

**Micropori**  
(30-5  $\mu\text{m}$ )  
pori della  
riserva idrica

Non consentono il drenaggio gravitazionale dell'acqua che rimane disponibile per le piante ed i microrganismi. Sono abitati da batteri, archea e ife fungine. Quando i micropori sono vuoti il suolo si trova al "punto di appassimento".

Trattengono nel suolo l'acqua disponibile per le piante

**Ultramicropori**  
(5-0,1  $\mu\text{m}$ )

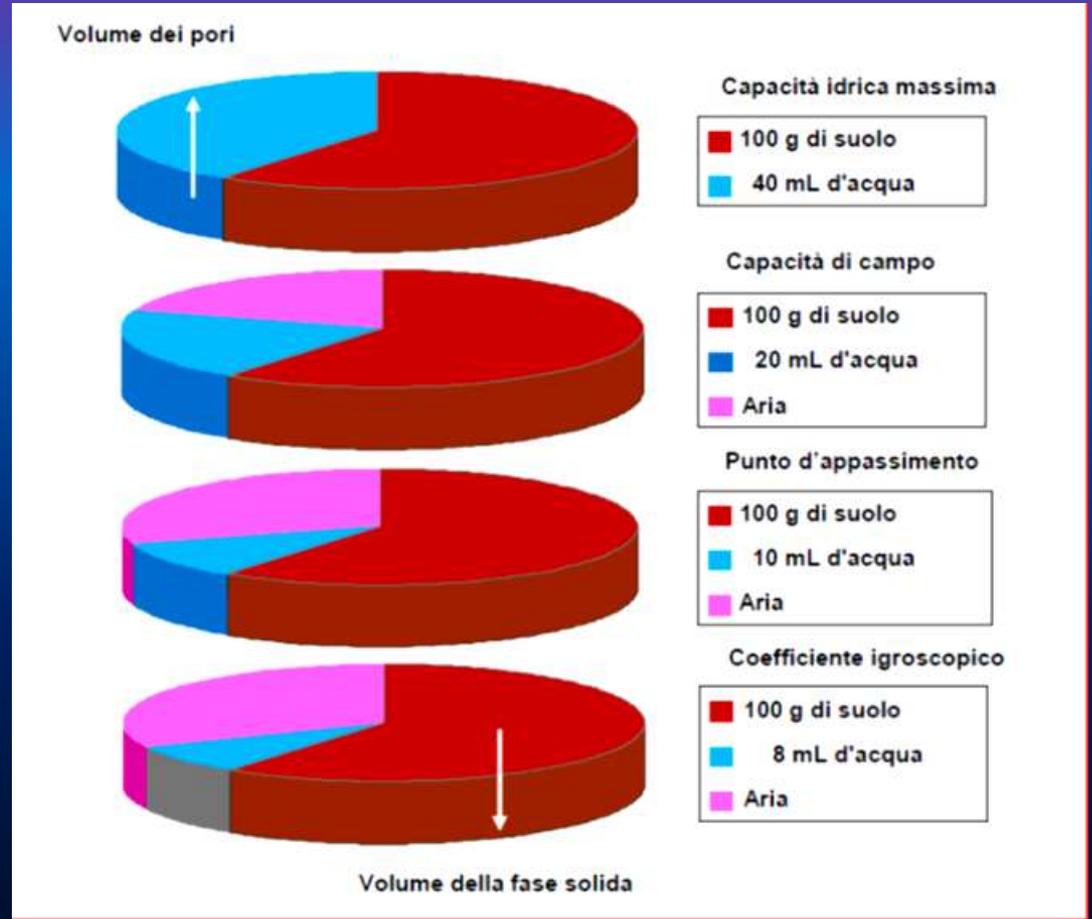
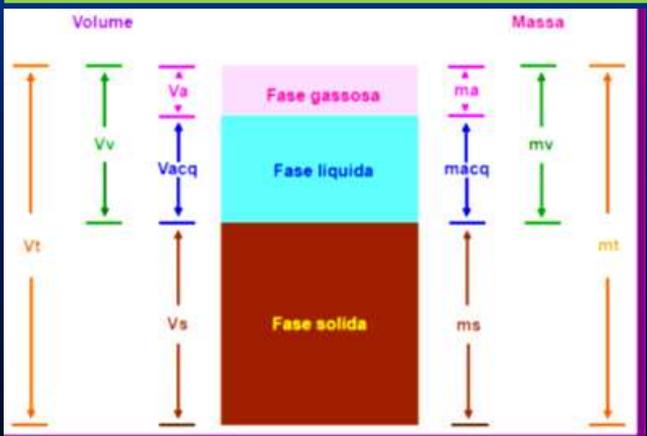
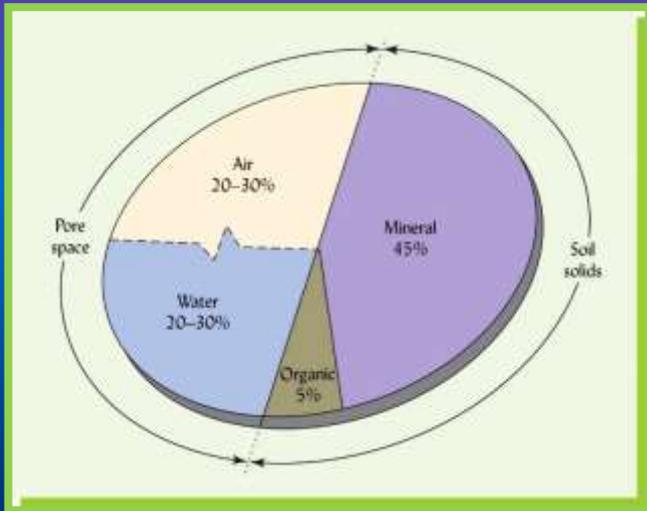
**Criptopori**  
( $\Phi < 0,1 \mu\text{m}$ )

L'acqua è così fortemente trattenuta da non essere disponibile per le piante. Questi pori sono così piccoli che la maggior parte dei microrganismi non può penetrare al loro interno. Le più piccole molecole che diffondono all'interno di questi pori sono così protette dalla decomposizione microbica finché non diffondono all'esterno.

Acqua non disponibile

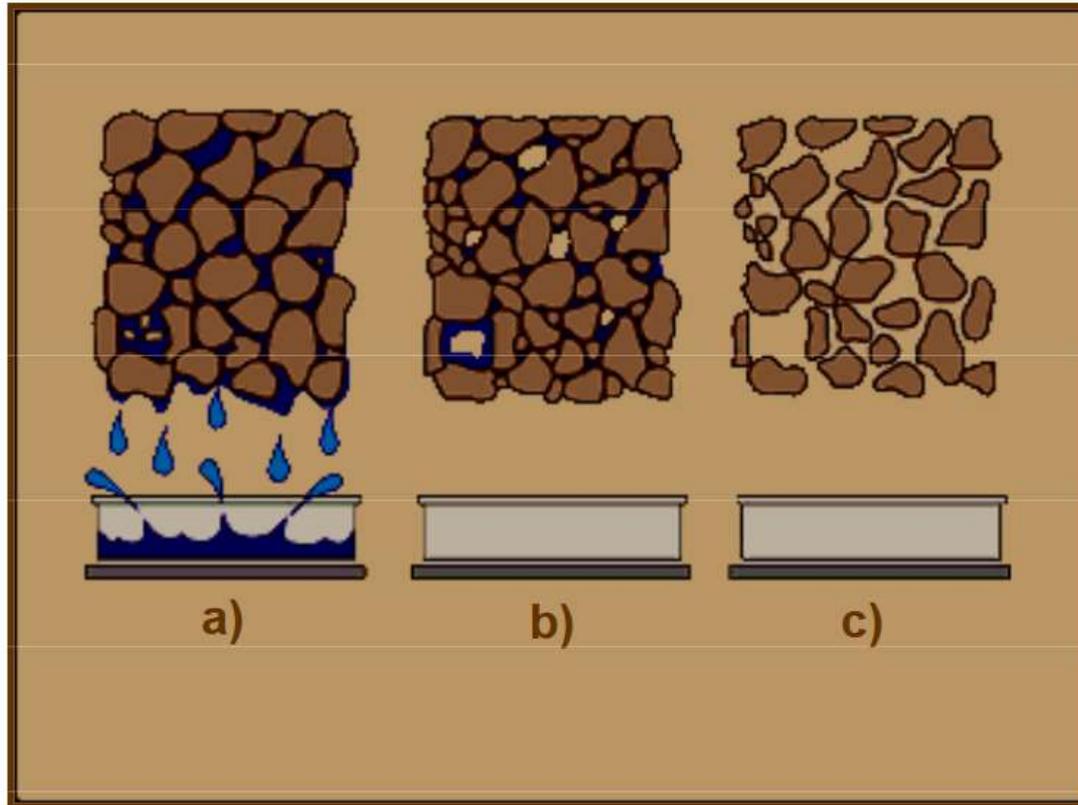
Ospitano molecole organiche a basso PM e soluti adsorbiti

# Pori del suolo e contenuto idrico



Nel suolo esistono forme o frazioni idriche a diversa mobilità perché diverso è il diametro dei pori che contengono la fase liquida.

# Pori del suolo e le forme idriche



Schematizzazione di un suolo:

- a) Alla capacità idrica massima. Tutti i pori sono pieni d'acqua
- b) Alla capacità di campo. Nei pori è trattenuta acqua utilizzabile dalle piante
- c) Al punto di appassimento. L'umidità ancora presente non è utilizzabile dalle piante

In relazione al diametro dei pori occupati dalla fase liquida, si identificano 3 frazioni idriche a diversa mobilità (o disponibilità): acqua gravitazionale, acqua capillare, acqua igroscopica. Esiste anche l'acqua costituzionale.

# Le frazioni idriche del suolo: l'acqua costituzionale

Non è contenuta nei pori, ma è parte integrante la componente minerale del suolo.

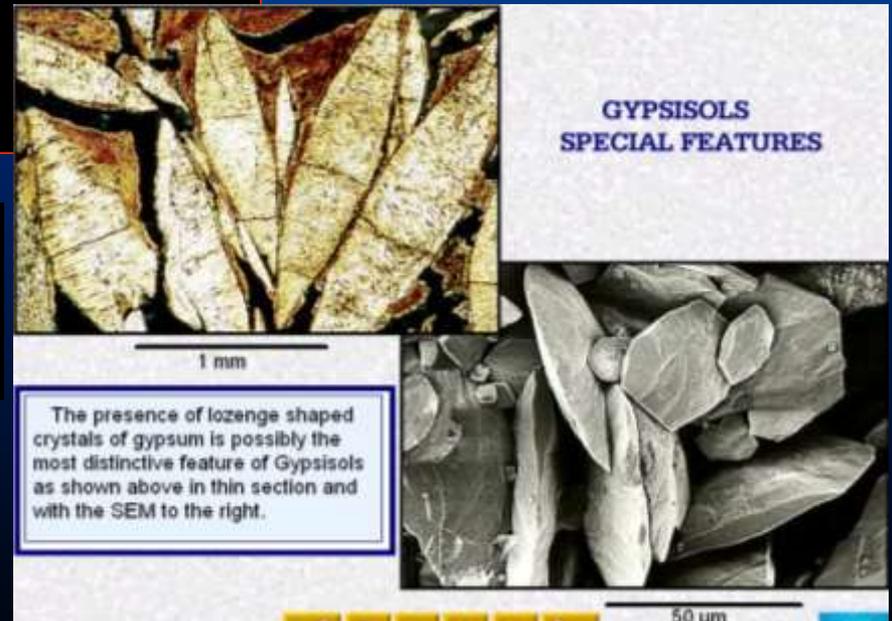
E' parte integrante della fase inorganica del terreno, è presente come molecola costitutiva della struttura cristallina di molti minerali.

Gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

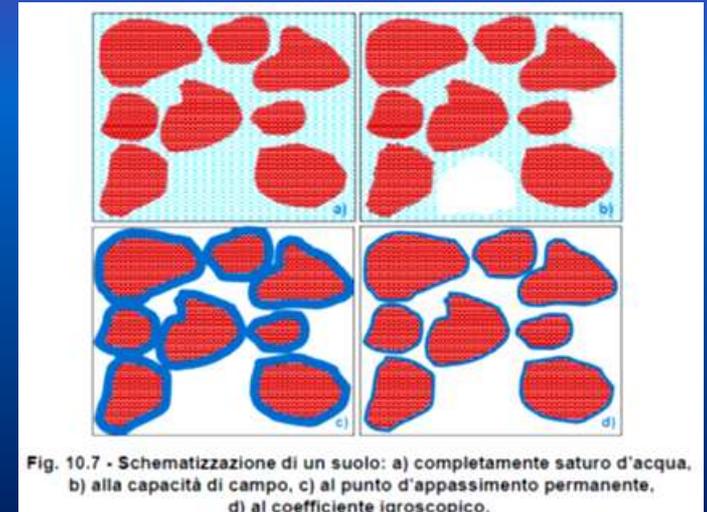
Epsomite ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )

Carnallite ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )

Utilizzazione estremamente limitata o addirittura impossibile

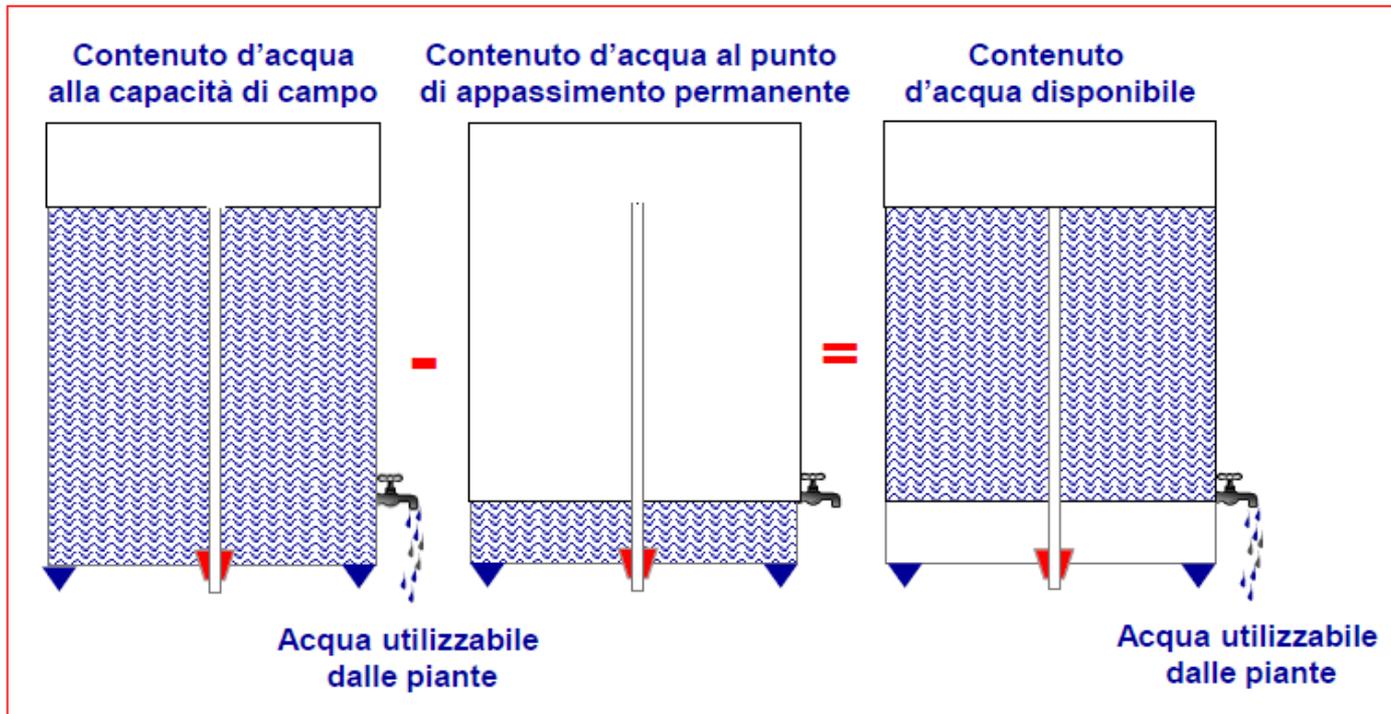


# Pori del suolo e contenuto idrico



Nei rapporti acqua-suolo si identificano condizioni idrologiche corrispondenti alle frazioni idriche.

# Pori del suolo e contenuto idrico



10.9 - Schematizzazione del rapporto tra l'acqua presente nel suolo alla capacità di campo e al punto d'appassimento permanente. La quantità d'acqua disponibile per le piante è uguale alla quantità d'acqua alla capacità di campo meno la quantità d'acqua al punto d'appassimento permanente.

# Pori del suolo e contenuto idrico

**TABELLA 2.14** Valori indicativi dei parametri idraulici espressi in % del volume di suolo e Riserva Utilizzabile massima in mm e riferita allo spessore di 1 m di profondità

Tessitura suolo	CIM (%)	CC (%)	PA (%)	ADM (%)	RUm (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
Sabbioso	40	10	4	6	600
Sabbioso franco	42	14	7	7	700
Franco sabbioso	45	20	10	10	1.000
Franco	46	27	12	15	1.500
Franco limoso	50	32	16	16	1.600
Franco limoso argilloso	47	36	20	16	1.600
Franco argilloso	46	34	20	14	1.400
Franco sabbioso argilloso	40	27	15	12	1.200
Argilloso sabbioso	43	30	20	10	1.000
Argilloso limoso	48	36	22	14	1.400
Argilloso	47	36	23	13	1.300

Legenda: CIM = capacità idraulica massima; CC = capacità di campo; PA = punto di appassimento; ADM = acqua disponibile massima; RUm = Riserva Utilizzabile massima.

**I rapporti acqua-suolo ed il volume di acqua disponibile sono influenzati dalla classe tessiturale, dal contenuto di sostanza organica e dalla struttura del suolo.**

# Sostanza organica e contenuto idrico

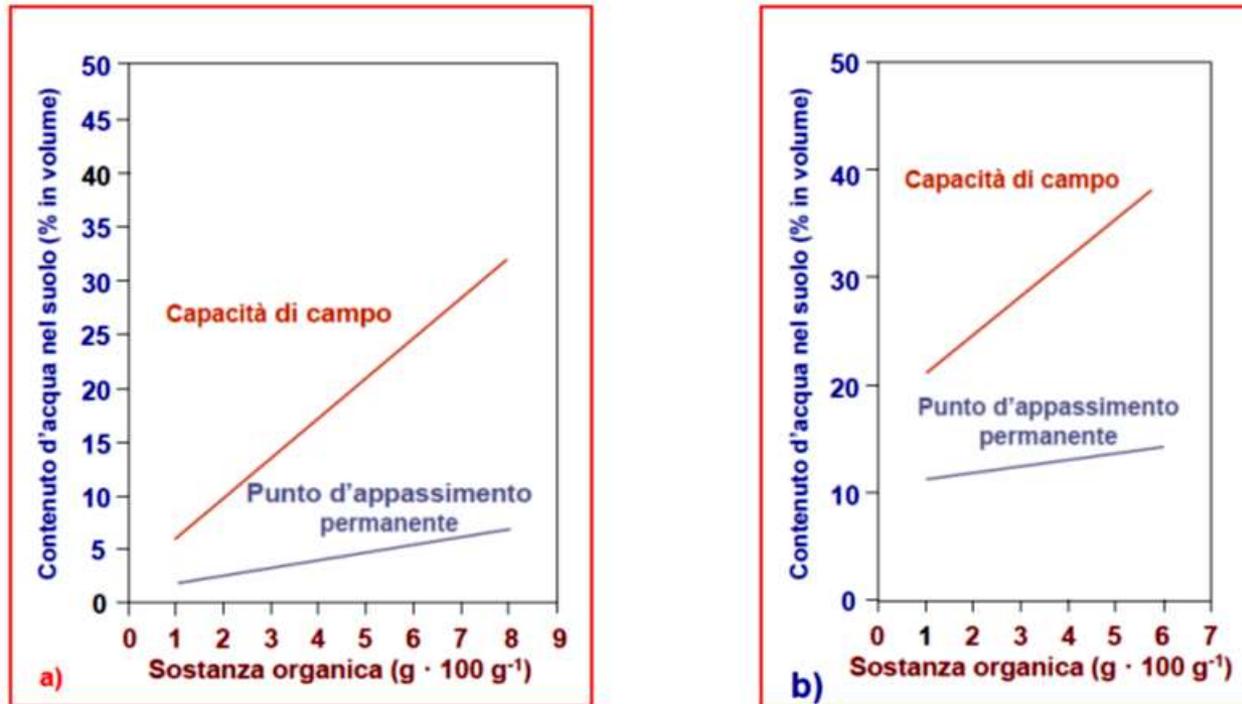


Fig. 10.11 - Effetto della sostanza organica sul contenuto d'acqua alla capacità di campo e al punto d'appassimento permanente in suoli di tessitura sabbiosa a) e in suoli di tessitura franco-limoso b). La distanza tra i due segmenti indica l'incremento della quantità d'acqua disponibile per le piante al variare del contenuto di sostanza organica(modificata da Huntington, 2006).

La sostanza organica aumenta la ritenzione idrica del suolo agendo sia direttamente (per via della sua reattività superficiale e igroscopicità) sia indirettamente (agevolando la genesi della struttura).

## La riserva idrica

La quantità di acqua compresa tra quella alla capacità di campo e quella al punto di appassimento, considerata la profondità raggiunta dall'apparato radicale delle piante, consente di valutare **la riserva utile (RU)** del suolo, espressa in millimetri di acqua:

$$RU = (U_{vcc} - U_{vpa}) \cdot P$$

dove:

■  $U_{vcc}$  e  $U_{vpa}$  = umidità volumica alla capacità di campo e al punto di appassimento

■  $P$  è la profondità considerata, espressa in millimetri

La riserva utile varia notevolmente con la tessitura del suolo, oscillando, per una profondità di 40 centimetri, da 0 a 100 mm. La riserva idrica permette alle colture di soddisfare più o meno completamente il loro fabbisogno idrico quando non risulta possibile ripristinare con intervento irriguo il contenuto di acqua disponibile.

# Calcolo della riserva idrica utile in un suolo agrario

Tab.10.5 - Contenuto d'acqua disponibile e riserva utile a diversi intervalli di profondità in un Mollisuolo di tessitura franco argillosa.

Profondità	Intervallo di profondità	Contenuto d'acqua			Riserva utile	
		Capacità di campo	Punto di appassimento	Acqua disponibile		
metri	metri	% in volume			m · profondità (m)	m <sup>3</sup> · ha <sup>-1</sup>
0-0,30	0,30-0 = 0,30	35,7	16,7	35,7-16,7 = 19,0	0,30 · 0,190 = 0,057	0,057 m · 10000 m <sup>2</sup> = 570
0,30-0,60	0,30	36,7	20,0	16,7	0,050	500
0,60-0,90	0,30	34,2	18,4	15,8	0,047	470
0,90-1,20	0,30	31,8	19,0	12,8	0,038	380
1,20-1,50	0,30	29,2	17,4	11,8	0,035	350
1,50-1,80	0,30	29,2	17,4	11,8	0,035	350
<b>Totale</b>					<b>0,262</b>	<b>2620</b>

Tenuto conto che il volume di un prisma con base di 1 ettaro e altezza di 1 millimetro misura 10 m<sup>3</sup>, vale la relazione: 1 millimetro di pioggia = 10 m<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup> d'acqua .

# Contenuto idrico del suolo

Due importanti modalità sono utilizzate per descrivere la quantità di acqua presente nel suolo



Contenuto idrico

Potenziale idrico

Gravimetrico ( $W$ )

Volumetrico ( $\theta$ )

Energetico

Contenuto idrico gravimetrico ( $W$ ) o volumetrico ( $\theta$ ).

Esprime la quantità di acqua presente nel terreno per unità di peso ( $W$ ), o di volume ( $\theta$ ), e viene sperimentalmente determinata accertando la perdita di peso di un suolo umido per essiccamento a  $105^\circ C$  fino a massa costante (gravimetrico), o mediante misure di pieno campo (volumetrico).

$$W = \frac{M_{acqua}}{M_{suolo}} \cdot 100 \quad \theta = \frac{V_{acqua}}{V_{suolo}} \cdot 100 \quad \theta = W \cdot \rho_{app}$$

$$WFPS = \frac{\text{Porosità occupata dall'acqua}}{\text{Porosità totale}} = \frac{\theta}{P} = \frac{W \cdot \rho_{app}}{P}$$

# Il potenziale totale dell'acqua nel suolo

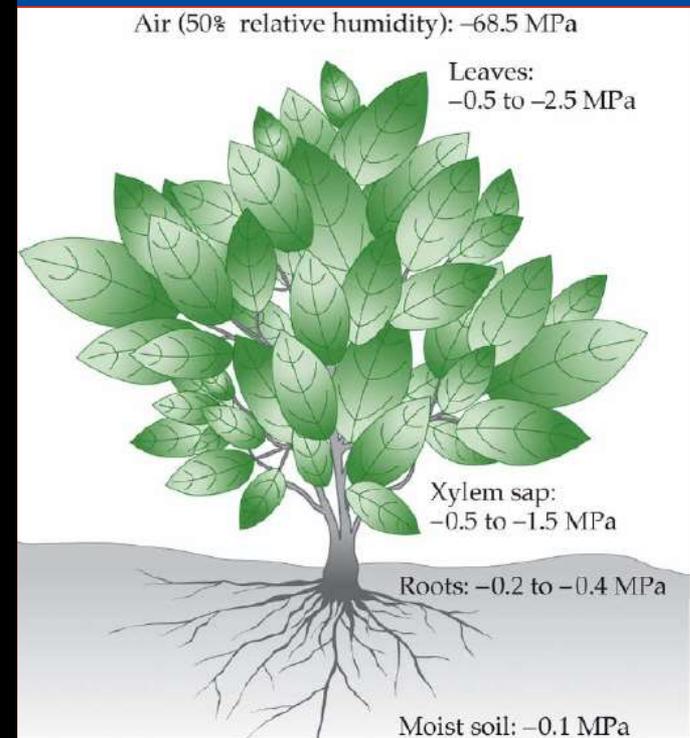
**Il suolo non contiene semplicemente l'acqua, ma la trattiene.**

Considerando che la tensione nel sistema acqua-suolo condiziona il comportamento dell'acqua, riducendone l'energia libera, è possibile descrivere i fenomeni relativi alla ritenzione, alla cessione e alla mobilità della fase liquida in termini di **energia potenziale** (attitudine a compiere lavoro).

Il potenziale totale dell'acqua nel suolo ( $\Psi_+$ ) è misura dell'energia specifica dell' $H_2O$  riferita all'acqua pura e libera da ogni forza di attrazione o di repulsione e sottoposta alla pressione di 1 bar (100 kPa) (stato standard). All'acqua allo stato standard si attribuisce un valore di potenziale idrico pari a 0 bar. Nelle condizioni che si accertano normalmente nel suolo, il potenziale totale dell'acqua assume valori negativi.

# Il potenziale totale dell'acqua nel suolo ( $\Psi$ )

- Misura lo stato energetico dell'acqua del suolo (lavoro da compiere per asportare l'unità di volume di acqua)
  - Si esprime in **bar** ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ), o in atm ( $1 \text{ atm} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ )
  - Si tratta di una pressione negativa (tensione o suzione)
- 
- Le piante percepiscono *non quanta acqua è presente nel terreno, ma con quanta energia essa è trattenuta* (potenziale idrico)
  - Esprime il lavoro che le piante debbono compiere per estrarre l'acqua dal terreno
  - L'acqua fluisce *spontaneamente* da zone ad elevato a zone a basso potenziale idrico
  - Allo stato standard (acqua 'libera' e pura) è attribuito **potenziale zero bar**



# Classificazione dell'acqua del suolo

In funzione del potenziale idrico totale, l'acqua nel suolo può essere classificata come:

**acqua libera:** frazione idrica con  $\Psi_{\pm}$  pari a 0 bar

**acqua gravitazionale:** la frazione idrica con  $\Psi_{\pm}$  compreso tra 0 e -0.3 bar (suolo franco) che corrisponde, rispettivamente, allo stato dell'acqua in un suolo alla capacità idrica massima (CIM) ed alla capacità di campo (c.c.) (completo svuotamento dei macropori, o pori di trasmissione). Non è trattenuta nel suolo.

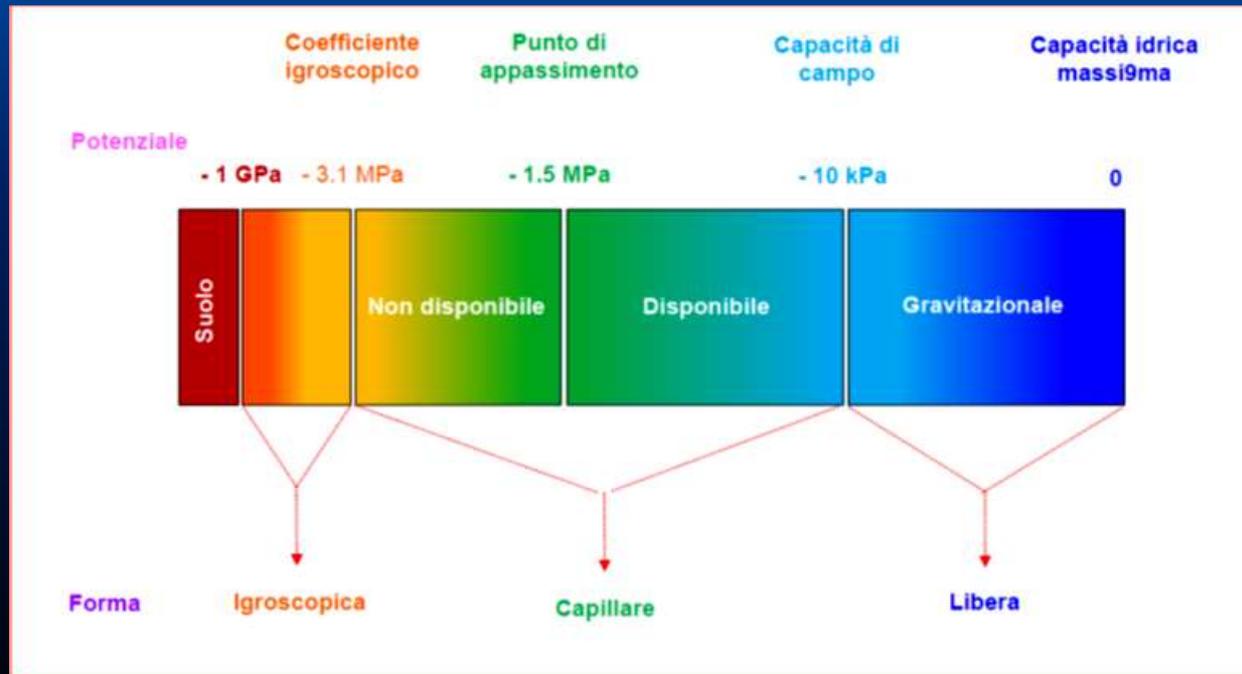
**acqua capillare:** frazione idrica con  $\Psi_{\pm}$  tra -0.3 e -15 bar, cioè tra il potenziale dell'acqua alla **capacità di campo** (c.c.) e quello assunto al **punto di appassimento** (p.a.). Rappresenta l'acqua contenuta nei pori capillari di diametro compreso tra 80 e 5  $\mu\text{m}$ . E' detta anche acqua disponibile e può essere utilizzata dalle piante. Piante xerofile possono estrarre l'acqua fino a  $\Psi_{\pm}$  -31 bar (coefficiente igroscopico).

**acqua igroscopica:** frazione idrica con  $\Psi_{\pm} < -31$  bar contenuta negli ultramicropori e nei criptopori. Non è disponibile per le piante.

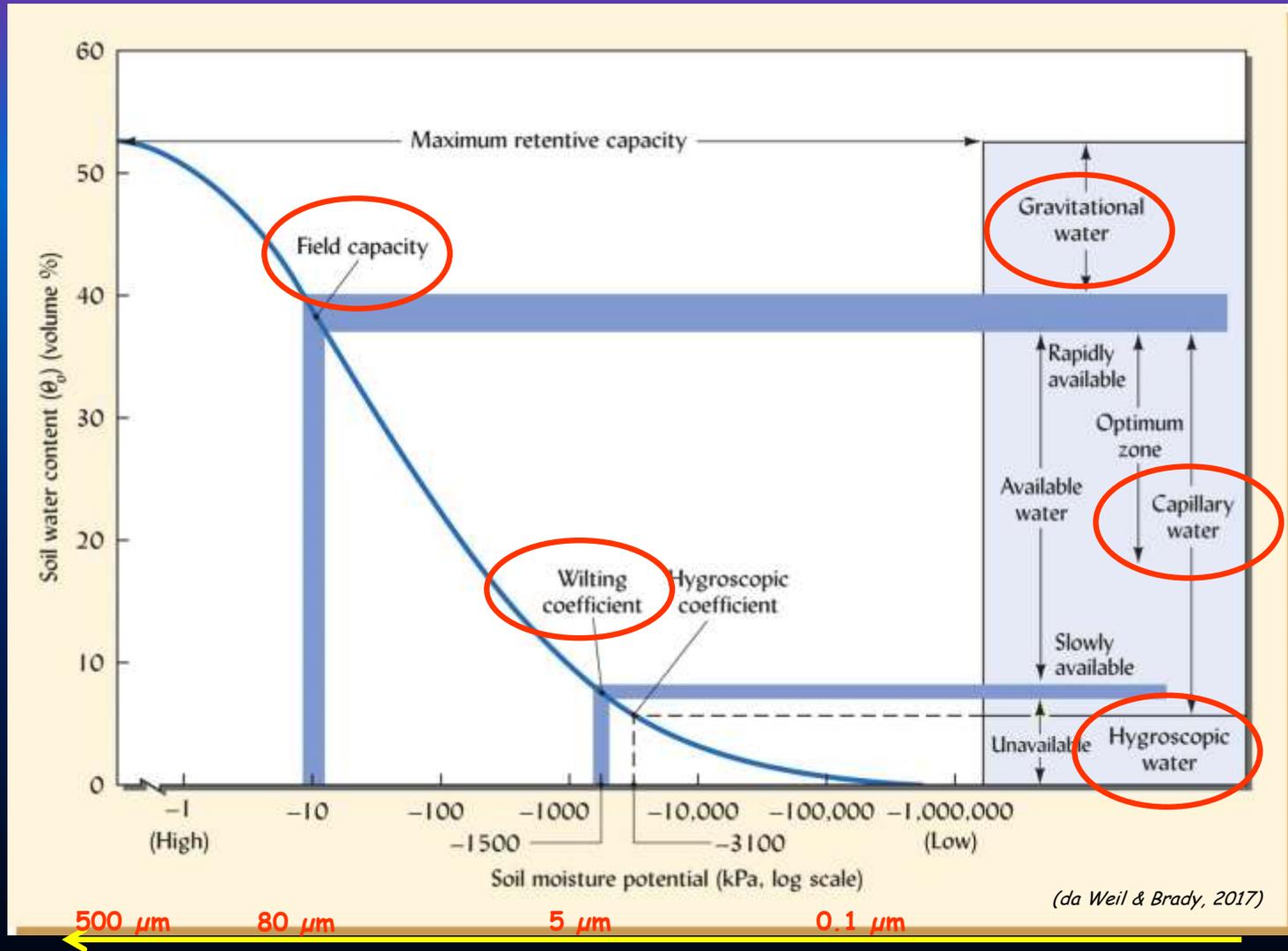
# Classificazione dell'acqua del suolo

In funzione del potenziale idrico totale, l'acqua nel suolo può essere classificata come:

- acqua gravitazionale
- acqua capillare
- acqua igroscopica



La relazione tra potenziale dell'acqua e contenuto di umidità in un suolo è espressa graficamente dalla curva di ritenzione idrica, o curva potenziometrica



$\varnothing$  pori

La curva del  $\psi$  è determinata empiricamente per ciascun tipo di suolo

# Curva di ritenzione idrica nel suolo

Alla capacità di campo il contenuto di acqua nel suolo, in funzione della tessitura, si trova a potenziale compreso tra - 10 kPa e - 50 kPa (- 10 kPa per i suoli sabbiosi, - 30 kPa per i suoli a tessitura franca, - 50 kPa per i suoli argillosi).

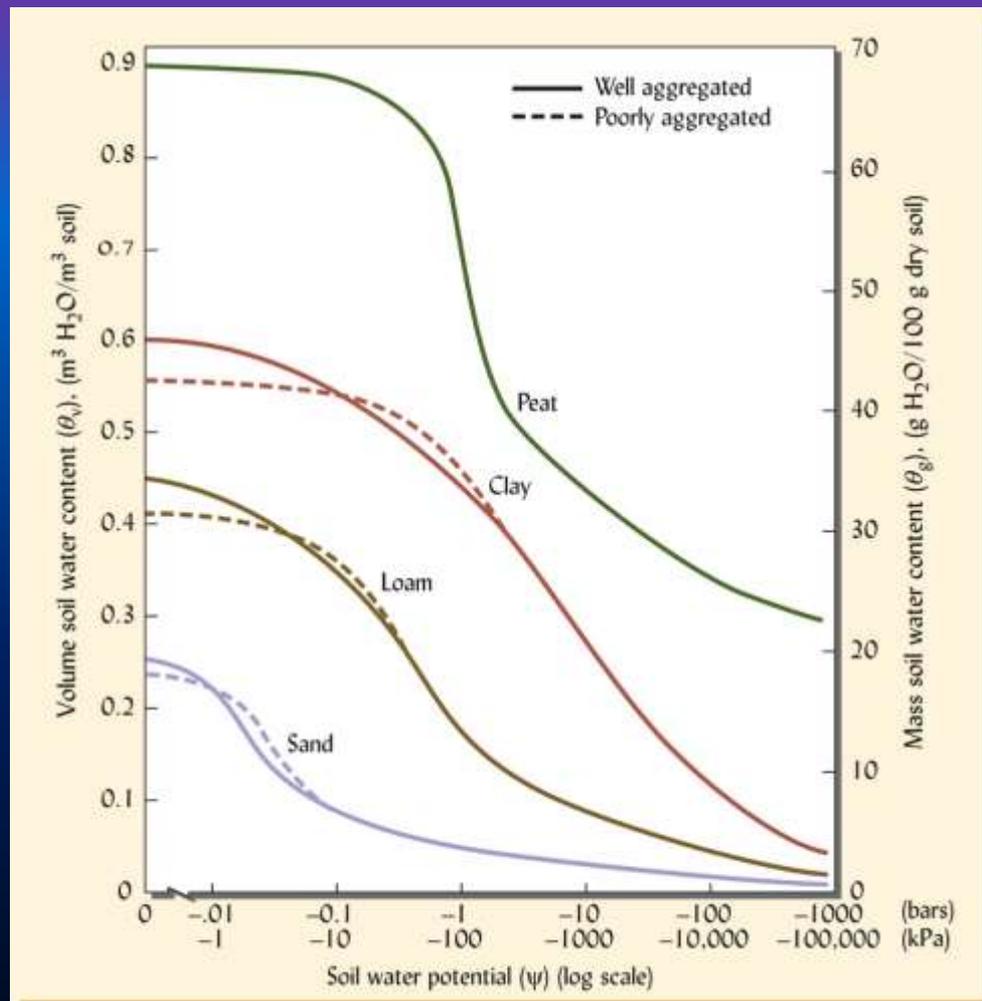
Al punto di appassimento il potenziale, dopo graduale diminuzione, raggiunge un valore di - 1.5 MPa.

L'apparato radicale della maggior parte delle piante non è in grado di rimuovere dal suolo questa ridotta quantità d'acqua. Al coefficiente igroscopico il potenziale dell'acqua si riduce a - 3.1 MPa.

Non essendo pienamente utilizzabile l'acqua che il suolo perde sotto l'azione della forza di gravità e che trattiene con tensione molto elevata, risulta disponibile per le piante una quantità d'acqua compresa tra quella alla capacità di campo e quella al punto di appassimento.

**L'acqua disponibile** dipende essenzialmente dal contenuto percentuale di argilla.

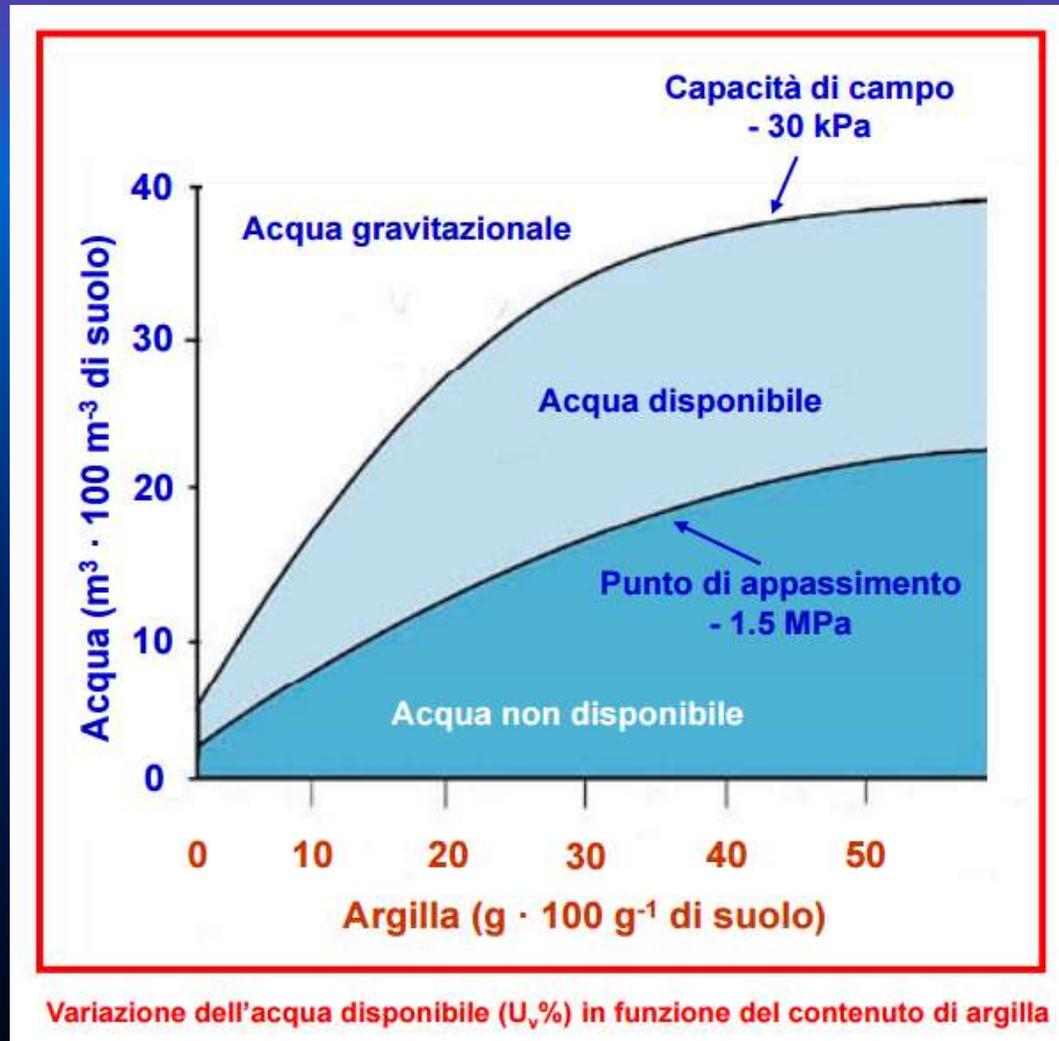
Il contenuto idrico di un suolo alla capacità di campo e al punto di appassimento varia in funzione di tessitura, SOM e struttura



(da Weil & Brady, 2017)

Per esaltare la funzionalità biologica, occorre che l' $\text{H}_2\text{O}$  occupi il 50- 60% della porosità (WFPS=50-60%)

Il contenuto idrico di un suolo alla capacità di campo e al punto di appassimento varia in funzione di tessitura, SOM e struttura



Suoli sabbiosi < suoli limosi < suoli argillosi e ricchi di humus

# Componenti del potenziale idrico totale ( $\Psi_t$ )

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_s + \Psi_p$$

$\Psi_G$

Rappresenta il lavoro necessario per mantenere l'acqua del terreno ad una certa altezza contro l'azione del campo gravitazionale terrestre.

$\Psi_M$

E' determinato dalle forze di ritenzione dei costituenti solidi della matrice del suolo sull' $H_2O$ . In condizioni di non saturazione l' $H_2O$  fluisce spontaneamente da zone di suolo umido a secco attraverso i meso e i micropori. Dipende dalla granulometria.

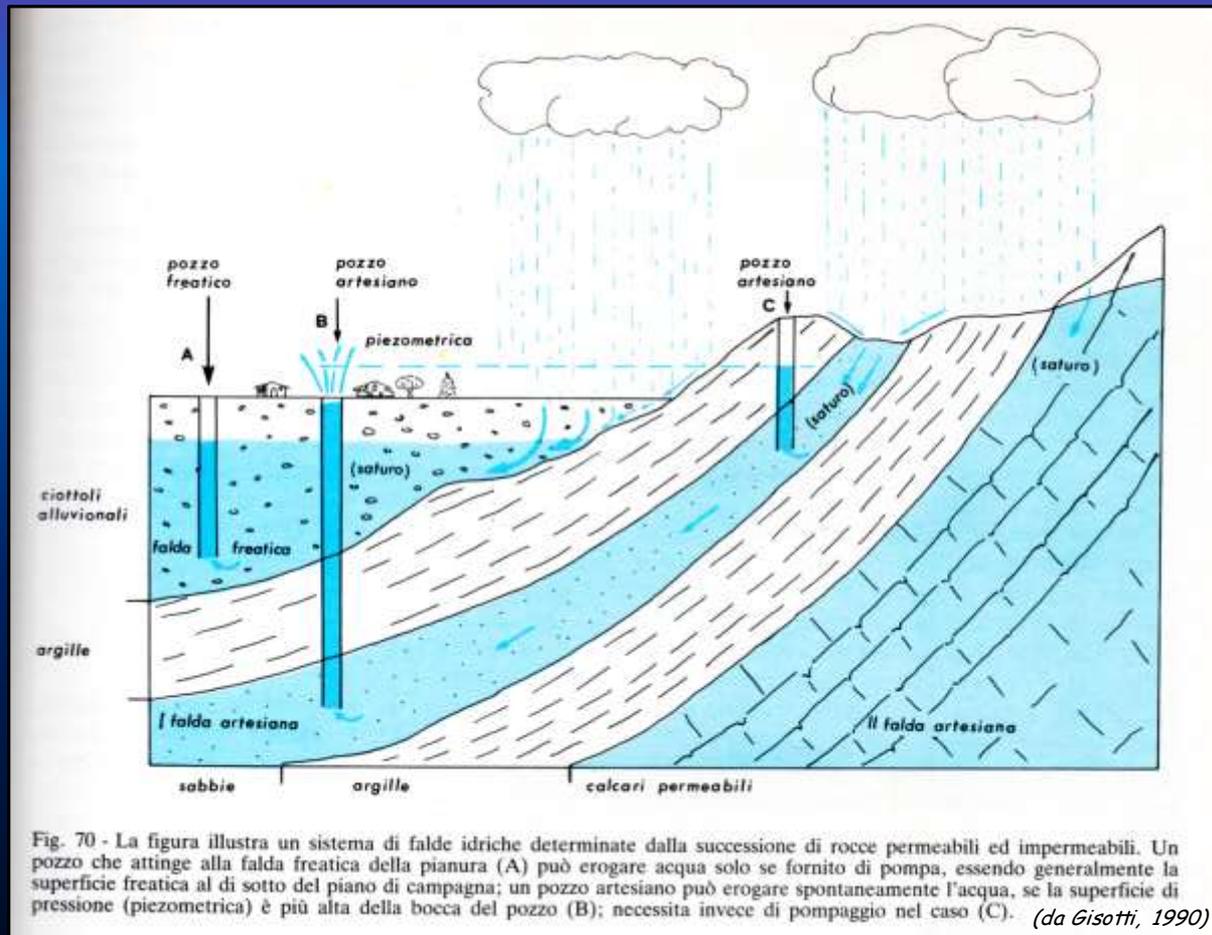
$\Psi_S$

E' generato dalla concentrazione di soluti nell' $H_2O$  del suolo. Rappresenta il lavoro necessario per spostare l'acqua da zone a maggiore a quelle a minore concentrazione di soluti. Diviene significativo soprattutto nei suoli salini dove vale la relazione:  
 $\Psi_s \text{ (bar)} = -0.39 CE_e \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$ .

$\Psi_P$

E' determinato dalla pressione imposta dall' $H_2O$  del suolo in particolari situazioni. Generalmente è pari a 0 bar, ma possono esserci delle eccezioni ( $> 0$  bar) (suoli con falda artesiani).

# Il potenziale idrico totale ( $\Psi_t$ ) nel suolo



Zone del suolo idraulicamente sature ed insature

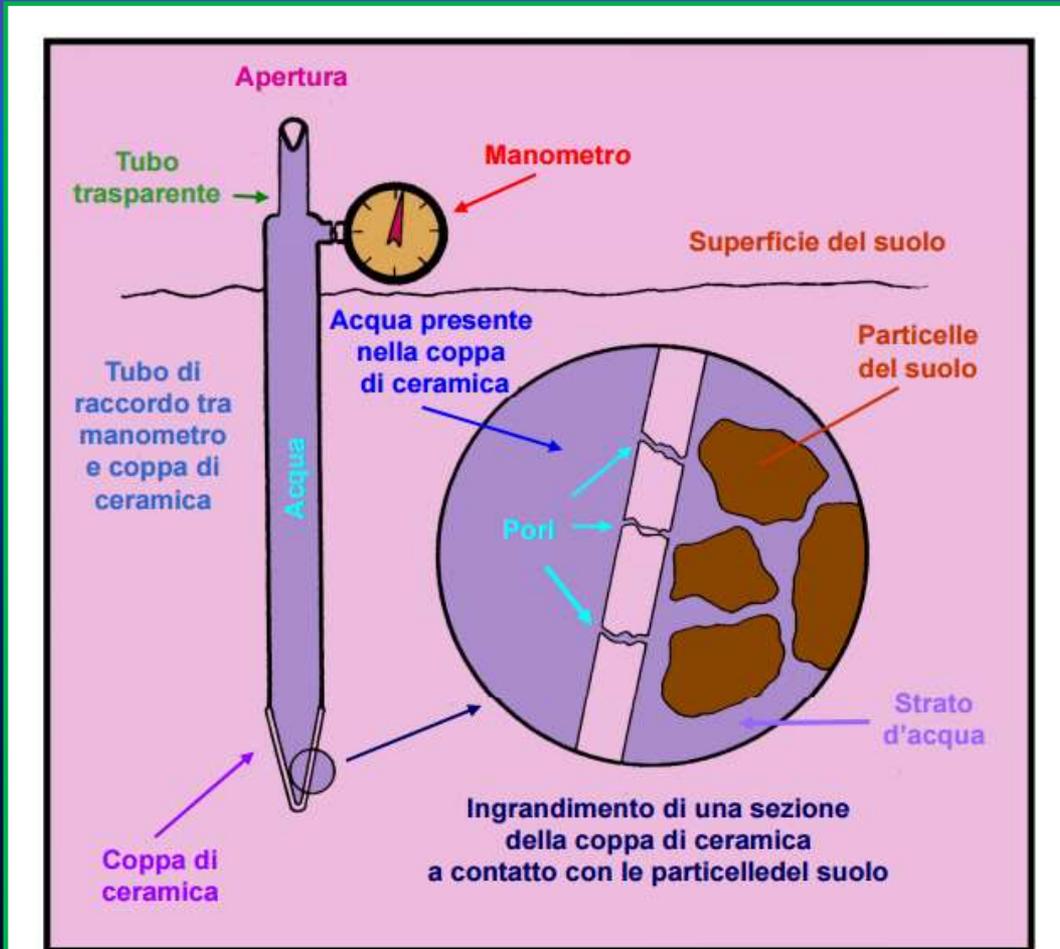
# Determinazione del contenuto d'acqua del suolo

*More than one method may be needed to cover the entire range of soil moisture conditions.*

Method	Measures soil water		Useful range, kPa	Used mainly in		Comments
	Content	Potential		Field	Lab	
1. Gravimetric	x		0 to <-10,000		x	Destructive sampling; slow (1 to 2 days) unless microwave used. The standard for calibration.
2. Neutron scattering	x		0 to <-1,500	x		Radiation permit needed; expensive equipment; not good in high-organic-matter soils; requires access tube.
3. Time domain reflectometry (TDR)	x		0 to <-10,000	x	x	Can be automated; accurate to $\pm 1$ to 2% volumetric water content; very sandy or salty soils need calibration; requires wave guides; expensive instrument.
4. Capacitance sensors	x		0 to <-1,500	x		Can be automated; accurate to $\pm 2$ to 4% volumetric water content; sands or salty soils need calibration; simple, inexpensive sensors and recording instruments.
5. Resistance blocks		x	-90 to <-1,500	x		Can be automated; not sensitive near optimum plant water contents, may need calibration.
6. Tensiometer		x	0 to -85	x		Can be automated; accurate to $\pm 0.1$ to 1 kPa; limited range; inexpensive; needs periodic servicing to add water.
7. Thermocouple psychrometer		x	50 to <-10,000	x	x	Moderately expensive; wide range; accurate only to $\pm 50$ kPa.
8. Pressure membrane apparatus		x	50 to <-10,000		x	Used with gravimetric method to construct drier part of water characteristic curve.
9. Tension table		x	0 to -50		x	Used with gravimetric method to construct wetter part of water characteristic curve.

*(da Weil & Brady, 2017)*

# Determinazione tensiometrica del contenuto d'acqua nel suolo



Schematizzazione di un tensiometro inserito verticalmente nel suolo. viene riportato l'ingrandimento di una sezione della coppa di ceramica porosa a contatto con l'acqua presente (modificata da Donahue et al., 1977)

# Determinazione tensiometrica del contenuto d'acqua nel suolo



Fig. 10.23 - Tensiometro utilizzato per misurare il potenziale dell'acqua in pieno campo.

# Determinazione tensiometrica del contenuto d'acqua nel suolo



# SPAC: Continuum suolo-pianta-atmosfera

Concetto proposto da  
J.R. Phillip nel 1966

La pianta è un  
"anello del  
sistema idraulico"  
che collega l' $H_2O$   
del terreno con il  
vapore acqueo  
dell'atmosfera

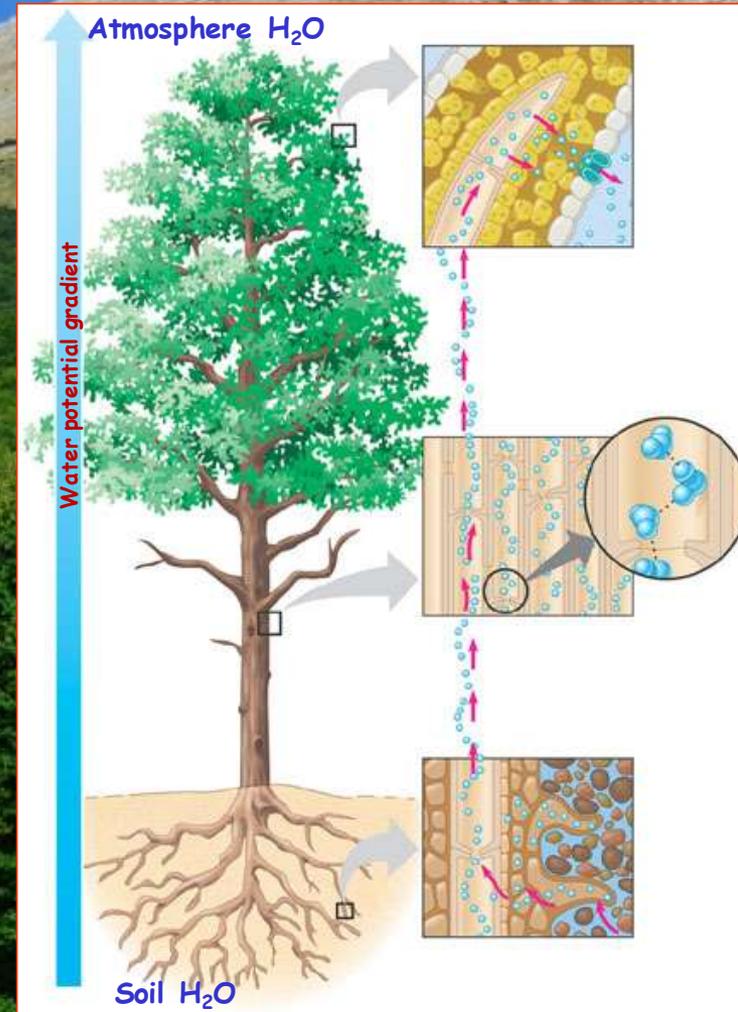
atmosfera

foglia

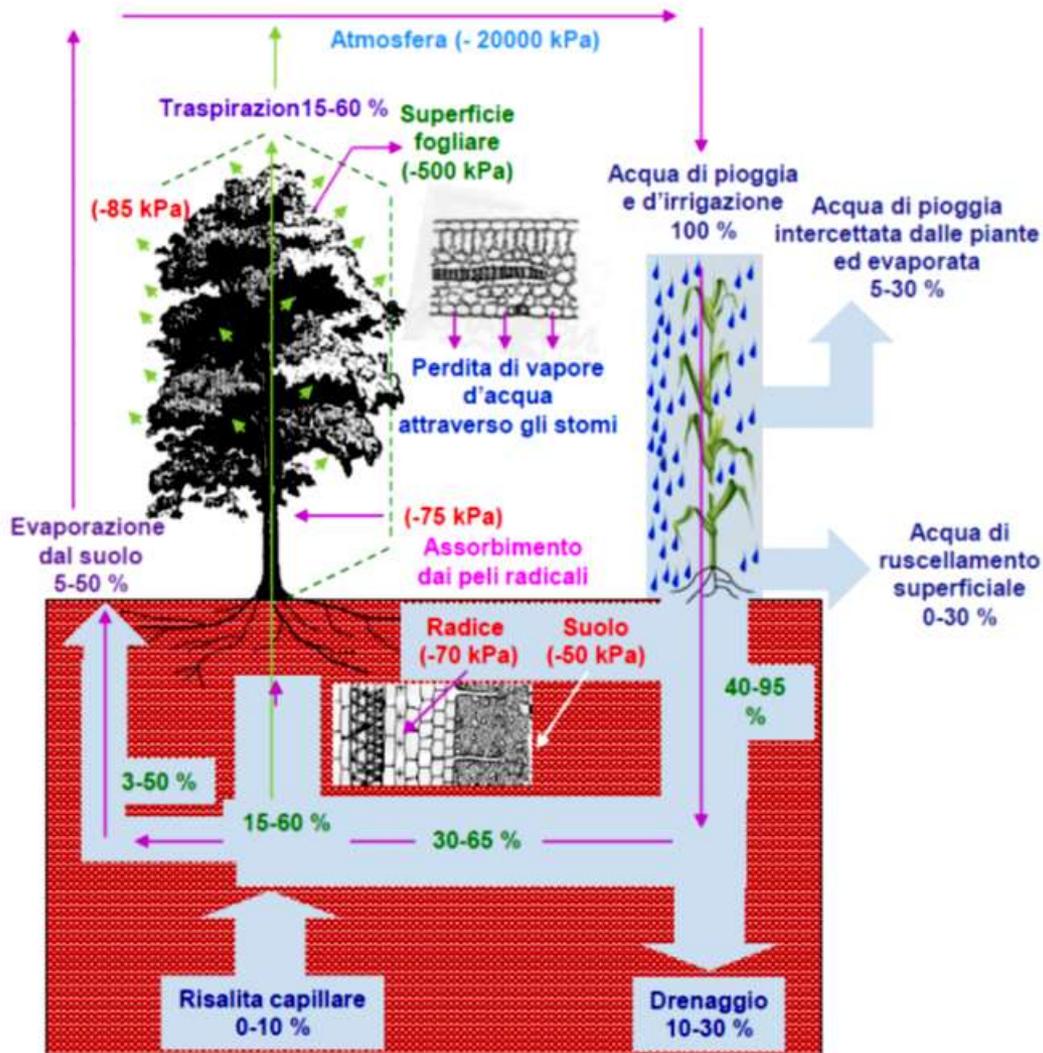
fusto

radice

suolo



# SPAC: Continuum suolo-pianta-atmosfera



L'acqua si sposta spontaneamente attraverso il sistema seguendo un gradiente decrescente di energia potenziale.

L'acqua deve superare punti di resistenza che ne controllano lo spostamento:

- il trasferimento dal suolo nella radice assorbente
- il transito lungo lo xilema, la stele e le foglie
- l'allontanamento dagli stomi verso l'atmosfera

L'assorbimento, il trasferimento e il movimento dell'acqua nel sistema SPAC sono controllati da:

- fattori pedologici
- tratti morfo-fisiologici della pianta
- condizioni climatiche

# SPAC: Continuum suolo-pianta-atmosfera

L'acqua "cade" dal suolo nell'atmosfera

Water potential gradient

Air outside  $\Psi = - 20000.00$  kPa

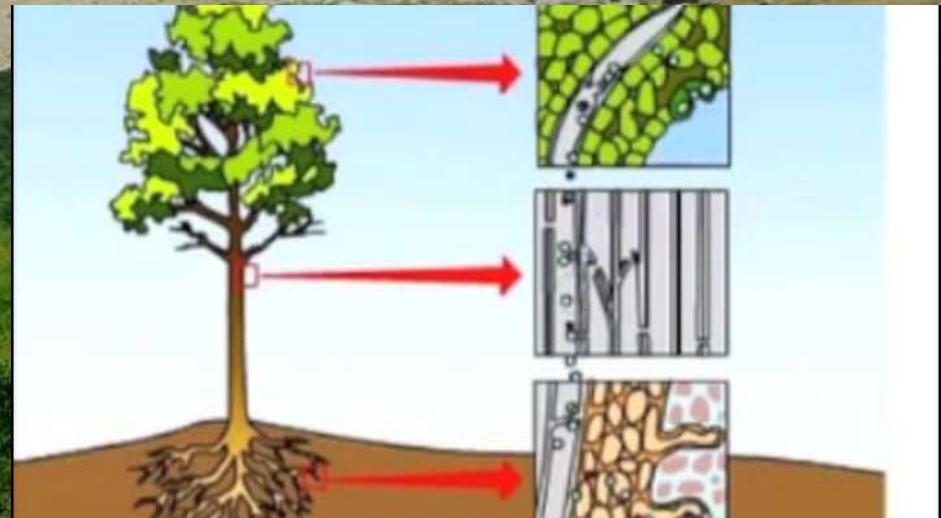
Leaf  $\Psi$  (air spaces) = - 500.0 kPa

Leaf  $\Psi$  (cell walls) = - 85.0 kPa

Trunk xylem  $\Psi = - 75.0$  kPa

Root xylem  $\Psi = - 70.0$  kPa

Soil  $\Psi = - 50.0$  kPa



L'acqua si sposta spontaneamente seguendo un gradiente decrescente di energia potenziale.