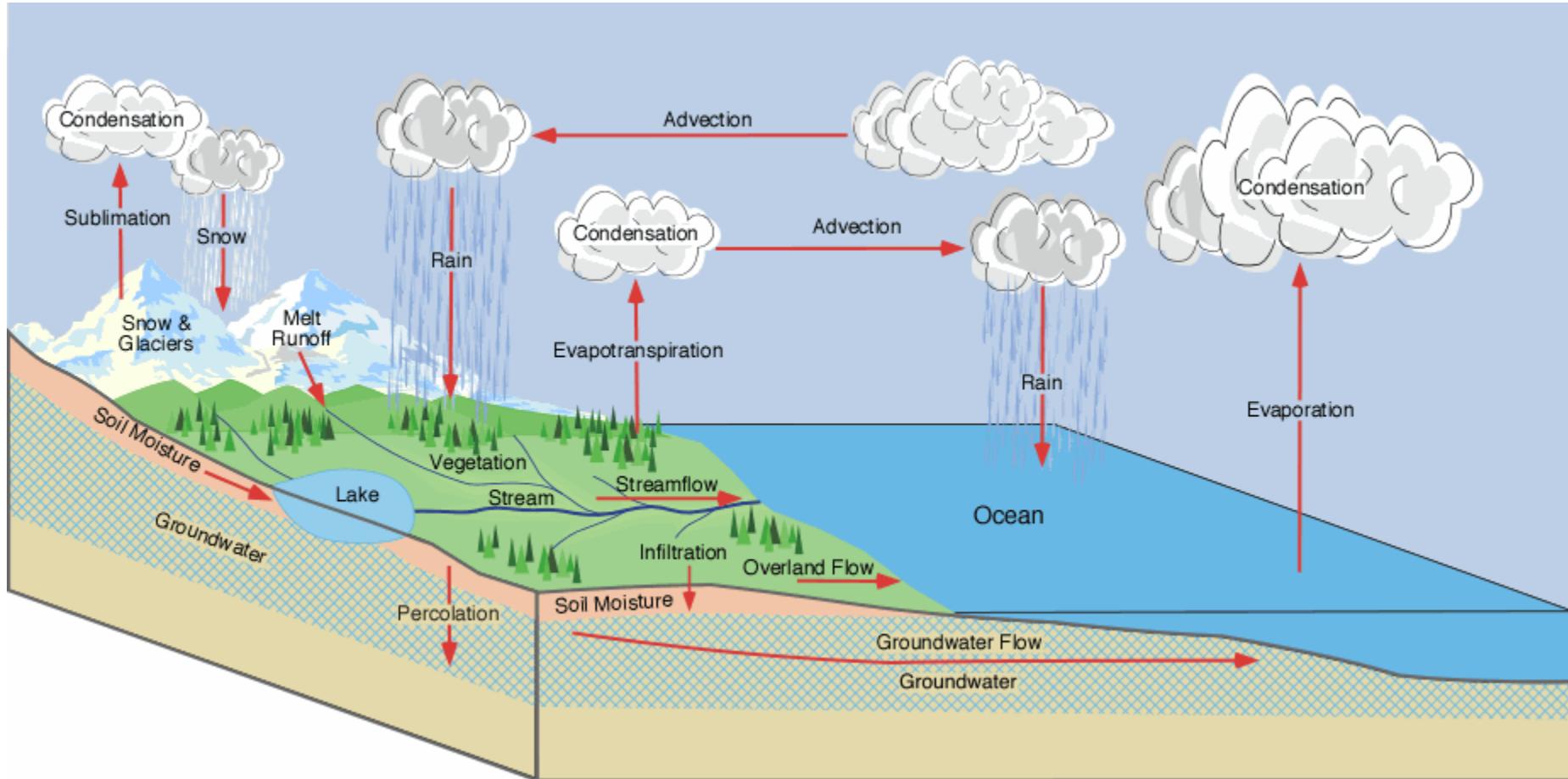


Scienze e Tecnologie per i Beni Culturali

Corso di Geologia Applicata

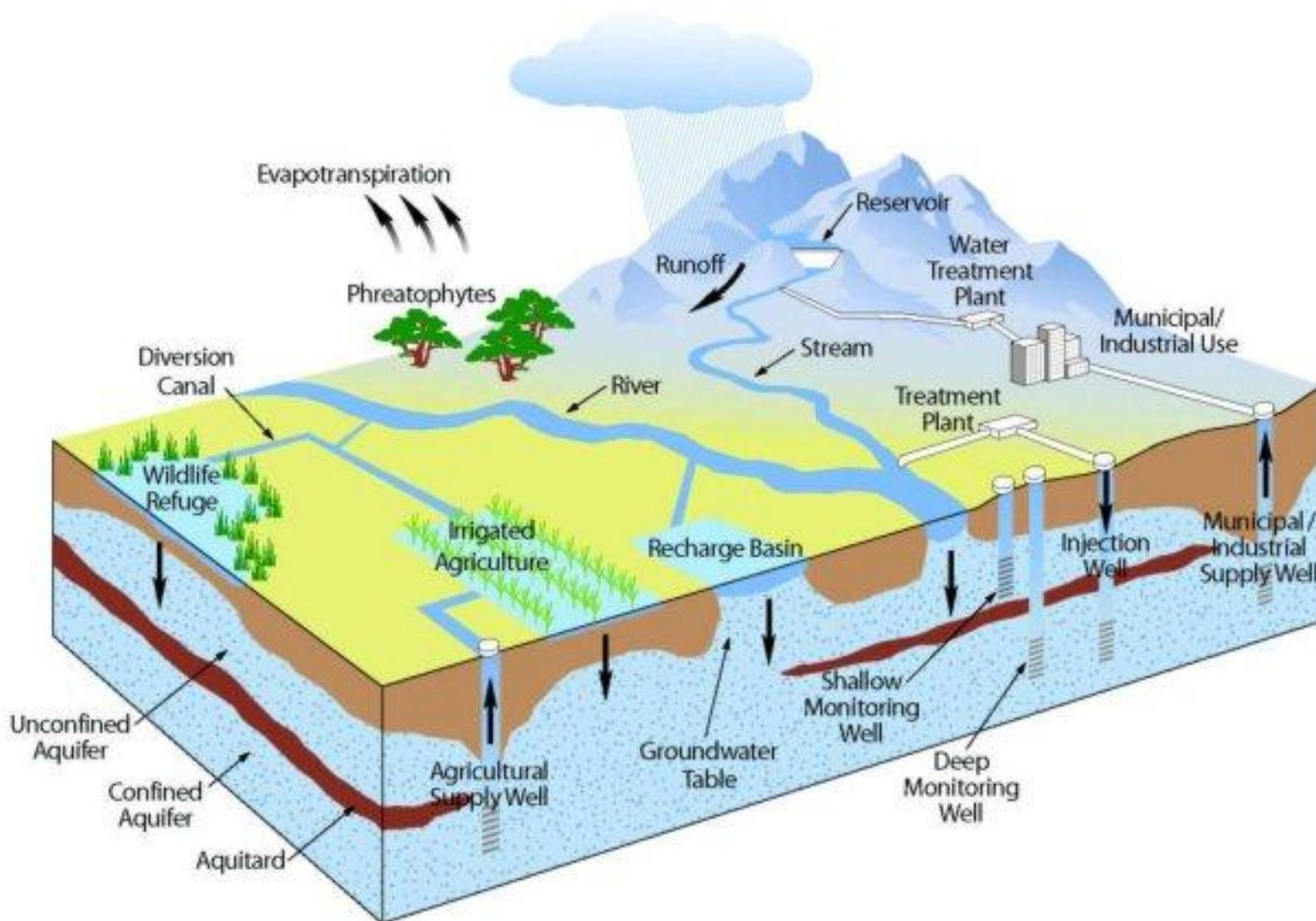
Dott. Maria Chiara Turrini

L'acqua nel terreno

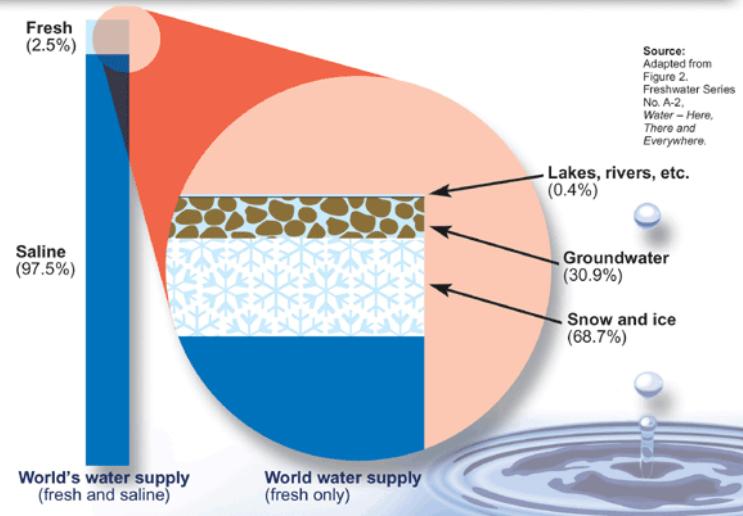


Componenti del ciclo idrologico

Interazione tra il ciclo naturale dell'acqua e le attività antropiche



Groundwater and the world's freshwater supply



La maggior parte dell'acqua è immagazzinata negli oceani.

La maggior parte dell'acqua dolce è immagazzinata nei ghiacciai, circa il 30% è acqua sotterranea e solo lo 0.4% è libera (fiumi e laghi)

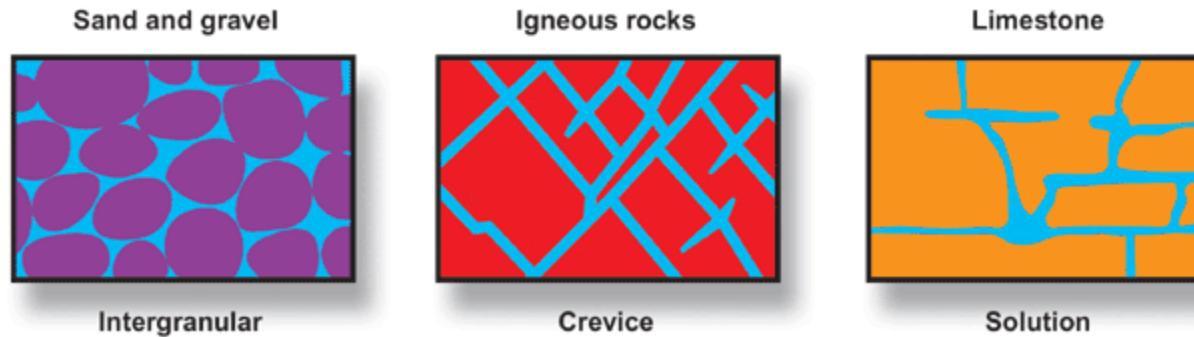
Circa l'85% di tutta l'acqua che evapora annualmente nell'atmosfera proviene dai mari ($\sim 500.000 \text{ km}^3$). Il restante 15% deriva dall'evaporazione delle acque superficiali continentali e, per la maggior parte, dalla traspirazione delle piante (evapotraspirazione). Dall'atmosfera l'acqua ricade poi, come pioggia o neve, sulla superficie terrestre. Il continuo trasferimento dell'acqua, sotto forma di vapore, all'atmosfera e il successivo ricondensarsi del vapore che ricade sulla terra come precipitazioni costituisce il **ciclo dell'acqua**.

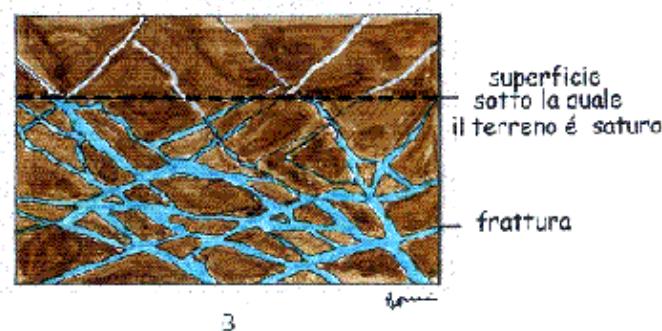
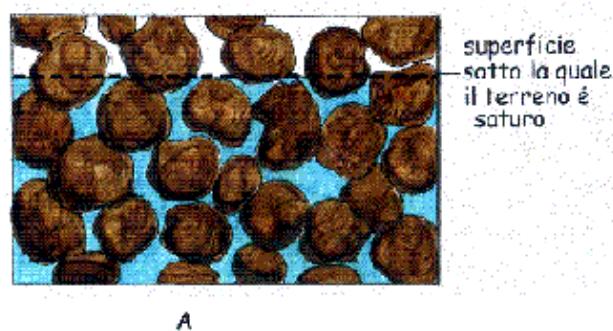
Il terreno è costituito da materiale solido in cui ci sono sempre degli **spazi vuoti**, di varie forme e dimensioni e di varia origine.

Anche la quantità di spazi vuoti è variabile. In questi spazi c'è **aria** e vi può entrare e circolare **l'acqua**.

Se il materiale solido che costituisce un **terreno** è di tipo granulare, fra un granulo e l'altro vi sono degli spazi vuoti chiamati **pori**.

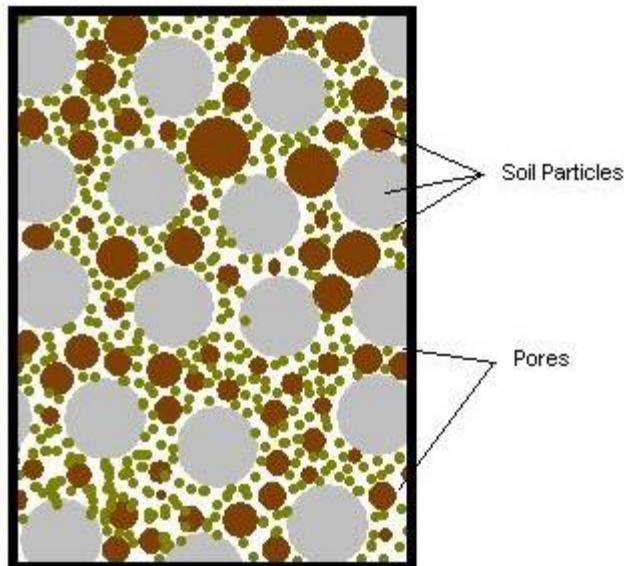
Quando, invece, il terreno è costituito da **roccia**, non vi sono pori e gli eventuali vuoti presenti possono essere costituiti solo da **fratture** che si creano, per varie cause, nella roccia compatta.



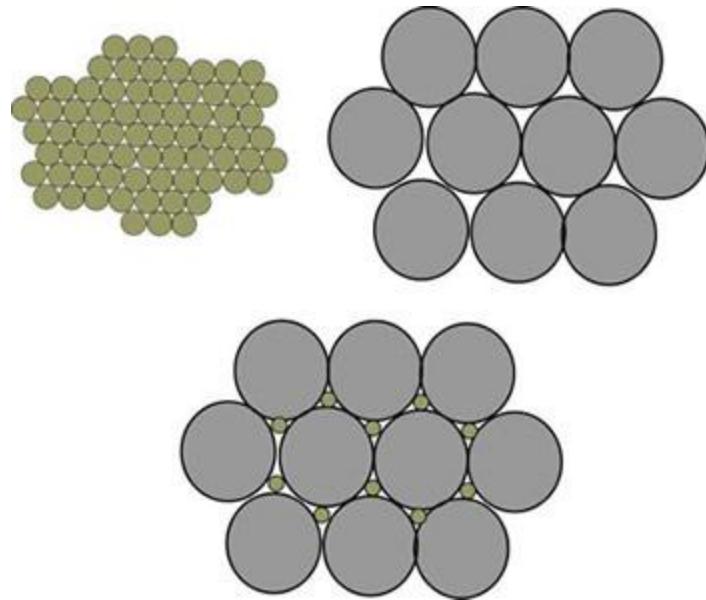


A) terreno granulare

B) terreno costituito da roccia fratturata.

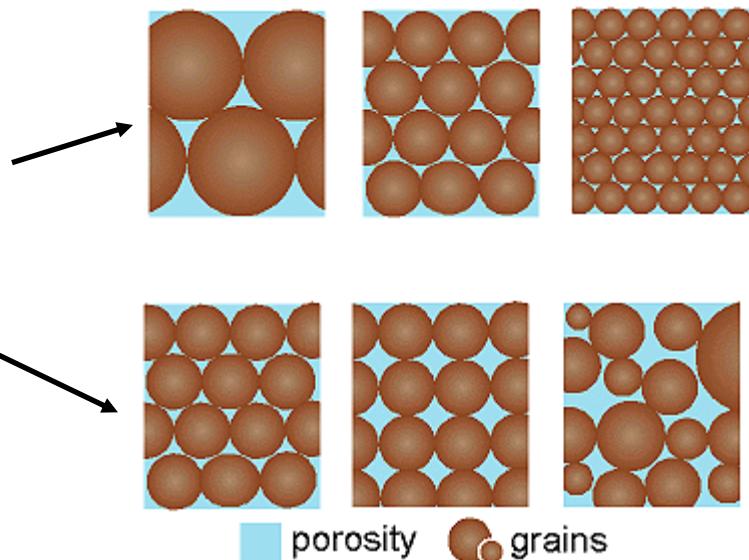


Gli spazi tra le particelle di terra vengono definiti “vuoti” o “pori”. Questi rappresentano il luogo in cui l’acqua può essere contenuta. Di conseguenza la struttura della terra è molto importante per definire quanta acqua può contenere



Small soil particles pack together more closely than large particles, leaving many small pores. Large soil particles pack together less densely, leaving fewer, but larger, pores. In reality, most soils are a mixture of particle sizes. Soils with a greater range of particle sizes will generally have a lower porosity, because the different-sized particles can fill in all the "gaps", as shown here.

Different grain sizes and packing arrangements result in different porosity values. Top: individual pore spaces decrease in size with decreasing grain size. Bottom: porosity varies with packing (arrangement) of grains



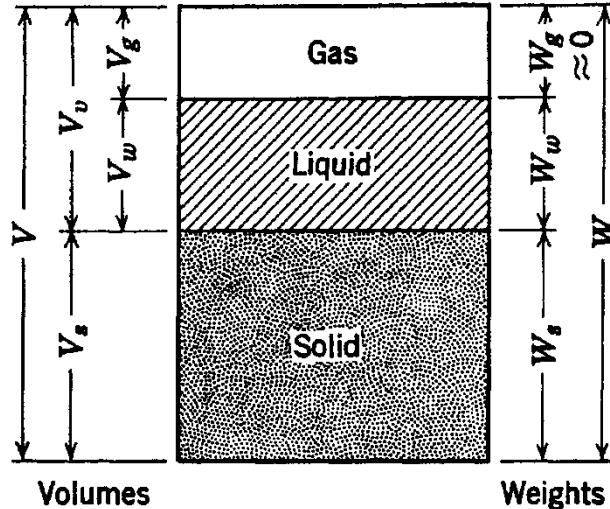
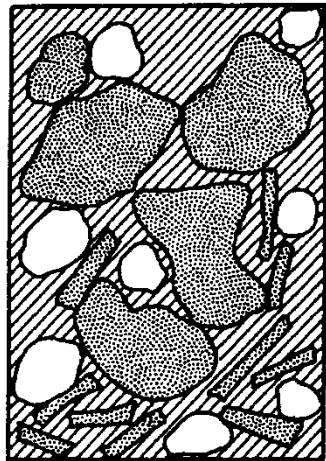
Porosity is a measure of the void spaces in a material, and is measured as a fraction, between 0–1, or as a percent between 0–100%

Porosity of some common sediments and rocks

Soil: 55%

Gravel & sand: 20-50%

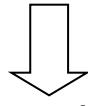
Clay: 50-70%



Natura multifase del terreno

- Fase minerale: scheletro minerale (V_s)

- Fase fluida: fluido nei pori (V_v)



Liquido (acqua V_w)
Gas (aria V_g)

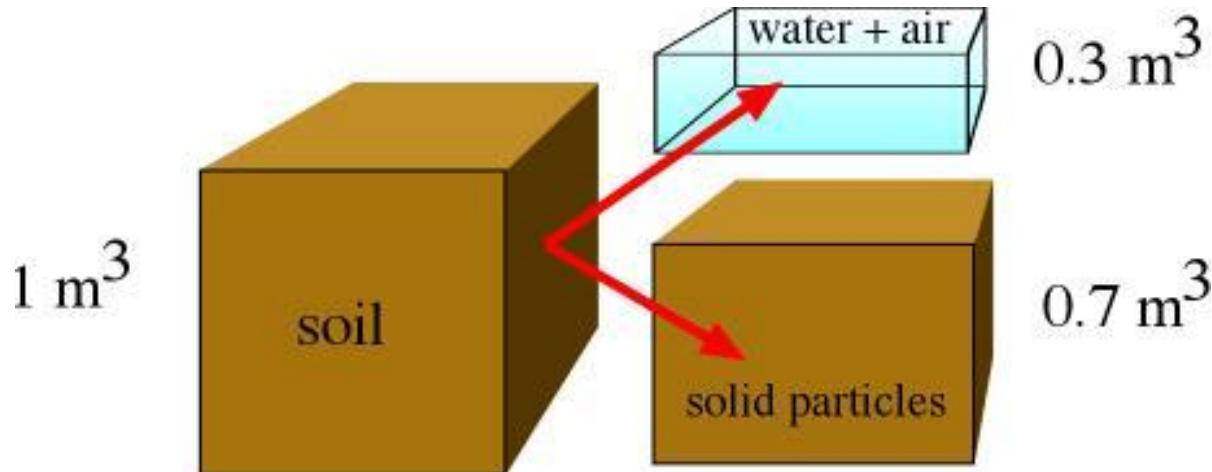
Porosità
$$n = \frac{V_v}{V}$$

Indice dei vuoti
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Grado di saturazione
$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad e = \frac{n}{1-n}$$

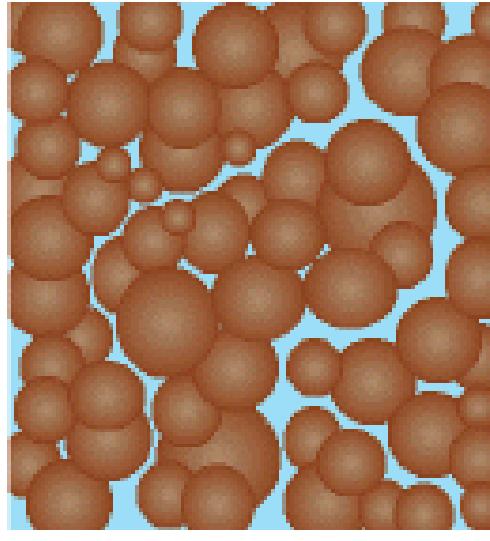
If the solid portion of the soil could be completely compacted, so all the air and water were squeezed out of it, it would have zero porosity. In this figure, one cubic meter of soil contains 0.7 cubic meters of soil particles, and therefore 0.3 cubic meters are occupied by either water or air (voids).



$$\text{Porosity} = \text{void volume} / \text{soil volume}$$
$$\text{Porosity} = 0.3 \text{ m}^3 / 1 \text{ m}^3$$
$$\text{Porosity} = 0.3$$

$$\text{Void ratio} = \text{void volume} / \text{solid volume}$$
$$\text{Void ratio} = 0.3 \text{ m}^3 / 0.7 \text{ m}^3$$
$$\text{Void ratio} = 0.43$$

Permeability is a measure of the ability of a material (typically, a rock or unconsolidated material) to transmit fluids



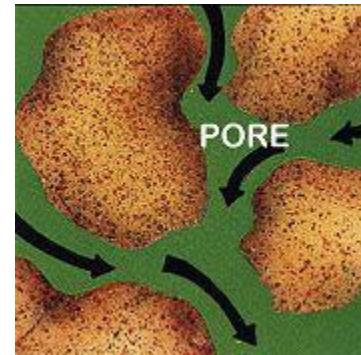
Simple animation of flow of groundwater between connected pore spaces. Permeability is greater (flow is faster) through the wider passage on the right. Note that not all pore spaces are interconnected

La capacità di un terreno di farsi attraversare dall'acqua si chiama permeabilità.

Se i vuoti presenti nel terreno sono costituiti da pori, si parla di permeabilità per porosità o **permeabilità primaria**, in quanto i vuoti si formano contestualmente alla deposizione della terra;

se i vuoti sono costituiti da fratture, si parla, invece, di permeabilità per fratturazione o **permeabilità secondaria**, in quanto i vuoti si formano dopo la formazione della roccia che li contiene.

Un terreno è permeabile solo se i vuoti comunicano tra loro permettendo quindi il movimento dell'acqua.

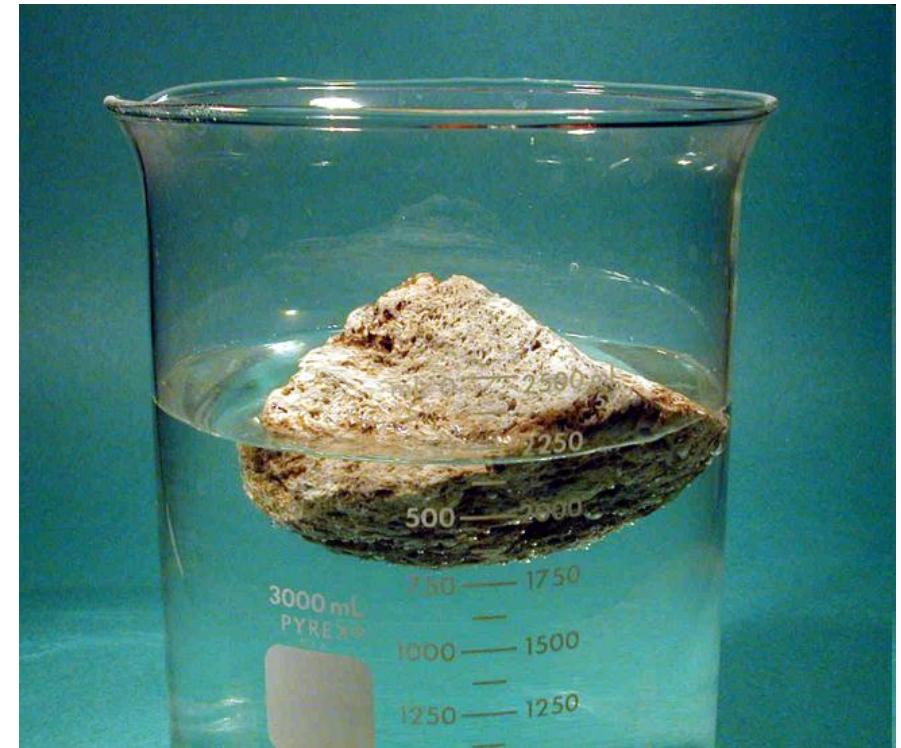


a. high porosity / low permeability
(limited flow channels)

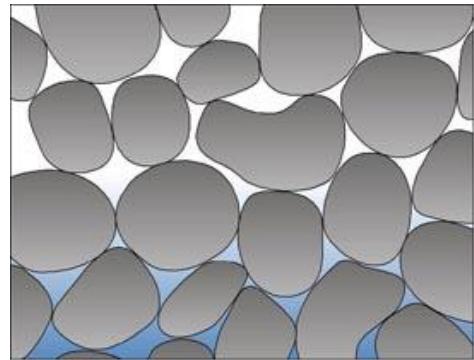
b. high porosity / impermeable
(pores not connected)



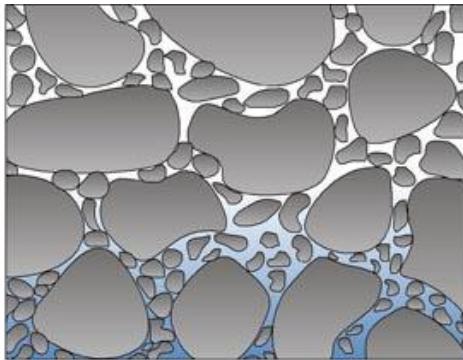
c. low porosity / high permeability
(high density of flow channels)



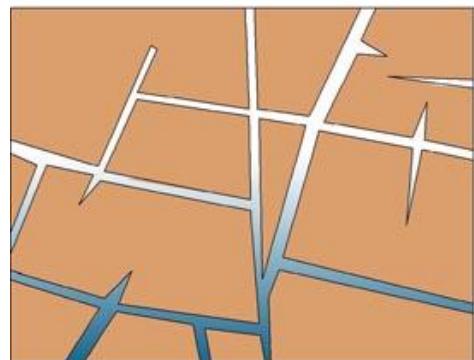
Un esempio di roccia molto porosa ma poco permeabile è dato dalla pomice, in cui soltanto pochi dei pori presenti sono tra loro collegati



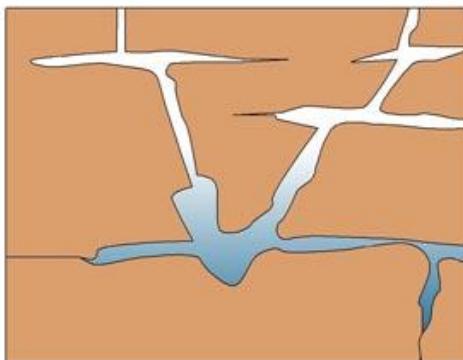
Well-sorted sedimentary material
(Alluvium of the South Platte River)



Poorly sorted sedimentary material
(Dawson, Denver, Arapahoe aquifers)



Fractured crystalline rocks
(Pikes Peak Granite)



Soluble rock-forming material
(Leadville Limestone)

Connections between pore spaces are wider in coarse-grained sediment (sand, gravel) and rock (sandstone, conglomerate) and are narrower in fine-grained materials (silt, clay, shale, mudstone).

However, not all pore spaces may be connected while others may contain clay minerals that can expand in the presence of water to block passageways and reduce permeability.

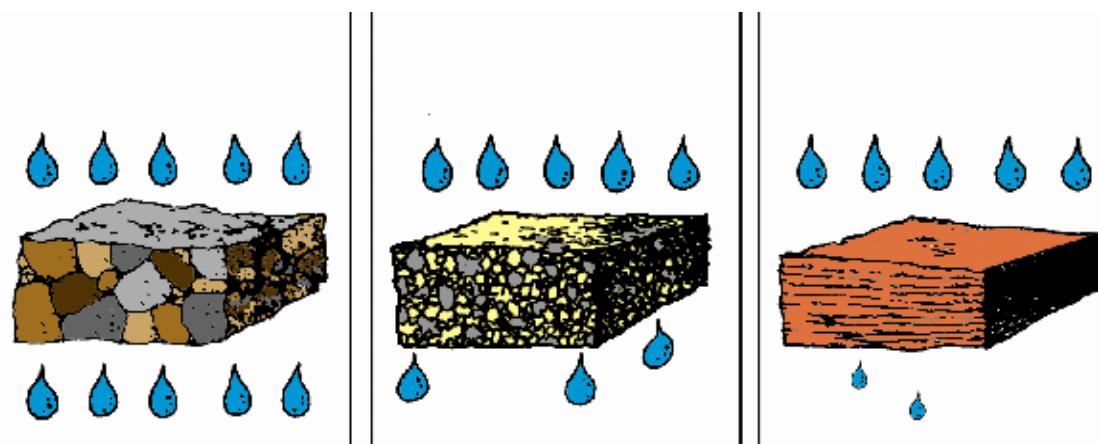
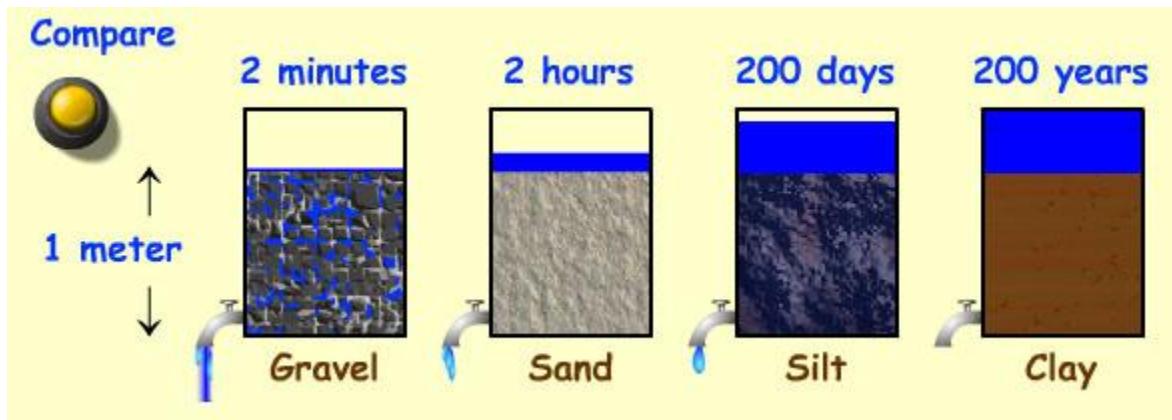
Surface water films in fine-grained materials may fill the narrow connections between pore spaces blocking the passage of groundwater.

I terreni costituiti da granuli grossolani sono molto permeabili; ciò significa che l'acqua vi si infiltra facilmente e non tende a rimanere in superficie.

Nei terreni costituiti da granuli molto piccoli, per esempio i terreni argillosi, l'acqua filtra con molta più difficoltà; quindi, dove ci sono questi terreni è più facile per l'acqua rimanere in superficie.

Per quanto riguarda i terreni costituiti da roccia compatta, a fronte di una quasi totale impermeabilità del materiale roccia, la permeabilità varia a seconda della quantità e delle dimensioni delle fratture e di quanto queste fratture si intersecano.

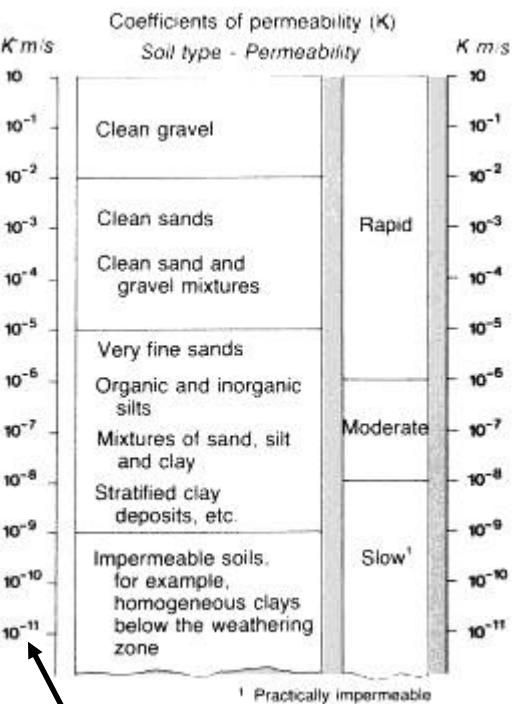
Non esistono terreni perfettamente impermeabili, ma solo terreni (argille) con permeabilità bassissima e quindi, in tempi molto lunghi, anche le argille possono essere attraversate dai fluidi (problemi di inquinamento).



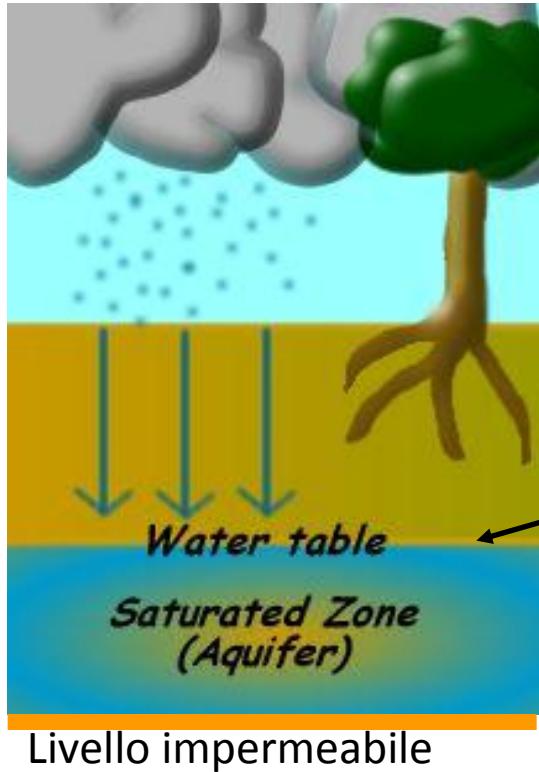
GRAVEL
Rapid drainage

FINE SAND
Moderate drainage

CLAY

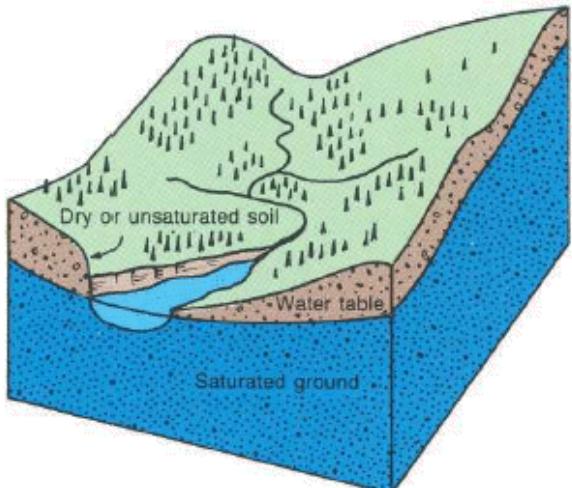


3 cm in 100 anni

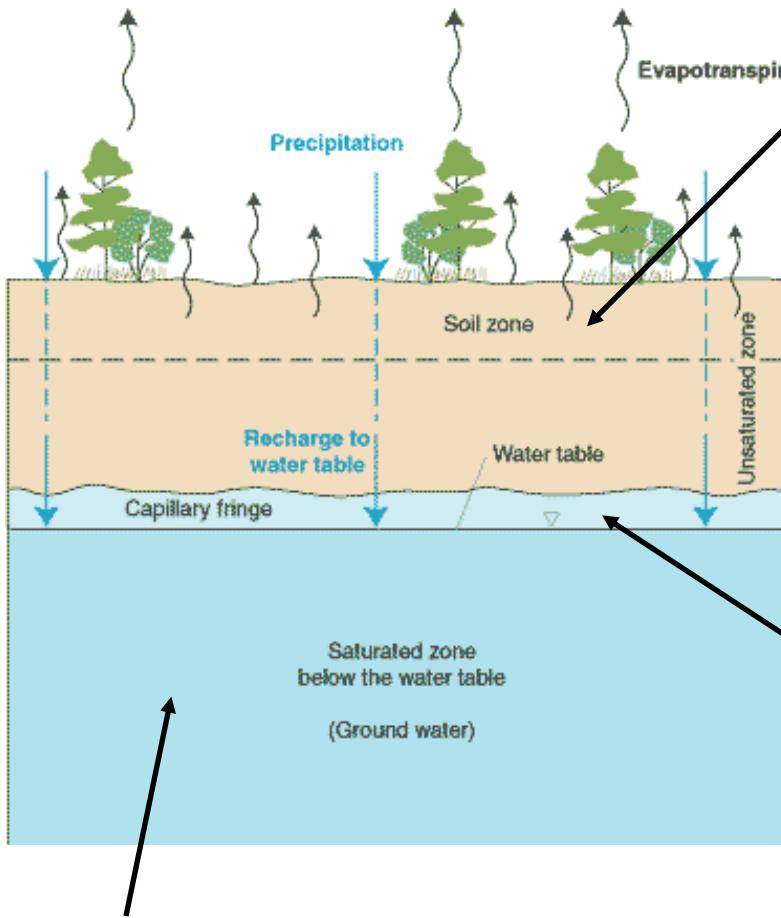


This diagram shows how water from precipitation filters down to the saturated zone. The **water table (superficie freatica)** separates the saturated zone from the unsaturated ground above.

Superficie freatica



Ground water (acqua sotterranea) is that part of precipitation that infiltrates through the soil to the water table. The unsaturated material above the water table contains air and water in the spaces between the rock particles and supports vegetation. In the saturated zone below the water table, ground water fills in the spaces between rock particles and within bedrock fractures.



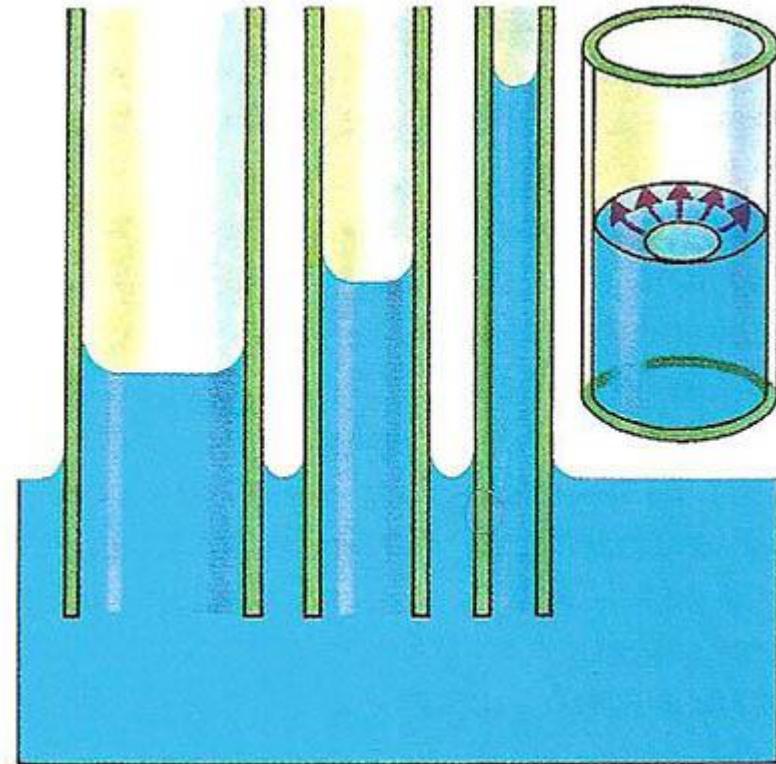
Zona satura: gli spazi tra le particelle di terra sono riempiti di acqua, che può essere emunta attraverso un pozzo.

Zona insatura: gli spazi tra le particelle di terra sono riempiti sia di acqua che di aria. L'acqua presente in questa zona non può essere emunta con un pozzo. Forze capillari.

Tra le due zone esiste una terza zona detta **frangia capillare**, in cui l'acqua riempie i pori, ma non può essere emunta per via delle forze di attrazione capillare

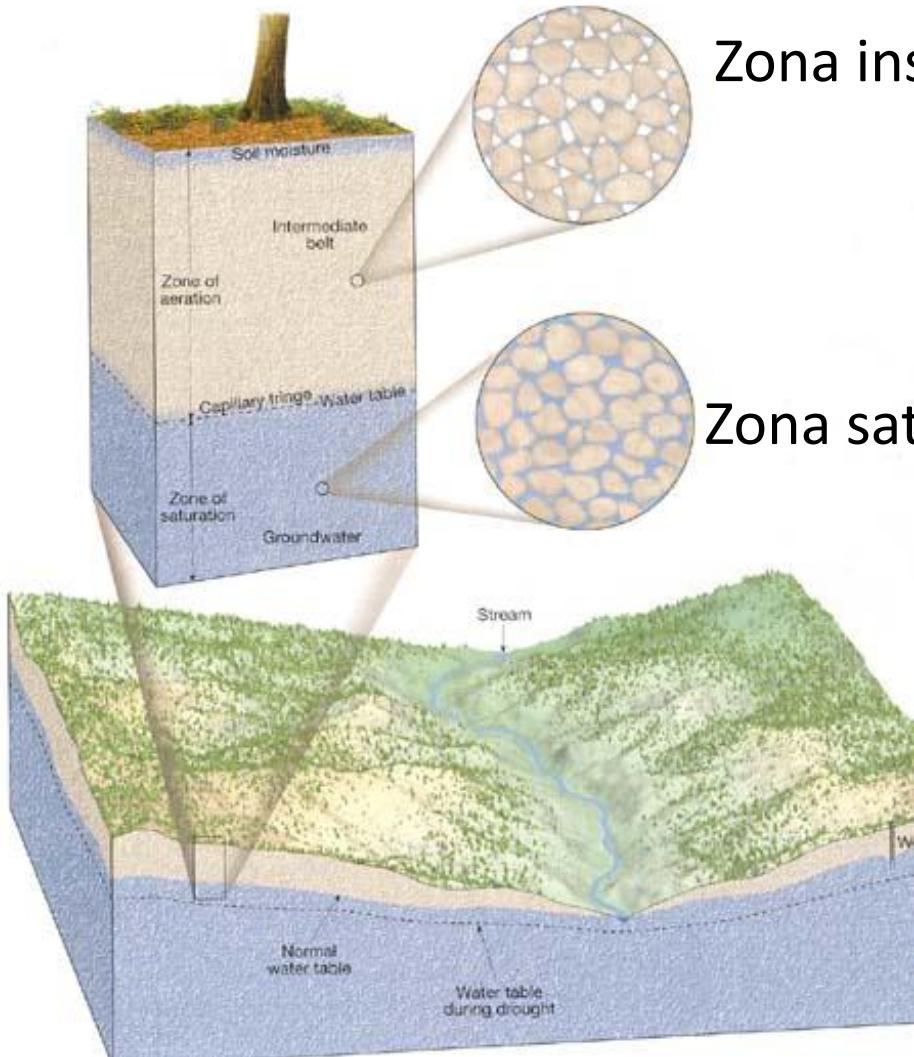
Also called capillarity, the name given to various surface tension phenomena in which the surface of a liquid confined in a narrow-bore tube rises above or is depressed below the level it would have if it were unconfined. When the attraction between the molecules of the liquid and those of the tube exceeds the combined effects of gravity and the attractive forces within the liquid, the liquid rises in the tube until equilibrium is restored.

Capillary action is very important in nature, particularly in the transport of fluids in plants and through the soil.



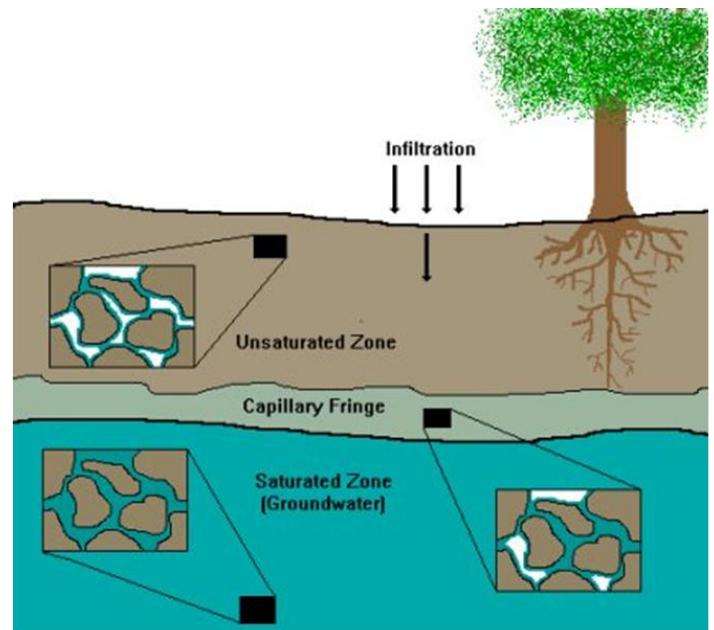
The cohesion between a liquid and a solid results in the liquid surface curving near the solid, to meet it at a definite angle. Water curves upward against glass, and the force of cohesion is exerted along the water surface, tending to lift it. The lifting force is proportional to the circumference of the water surface; in a narrow tube this force becomes powerful enough to lift a tall column of water.

http://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/capillary_action.html

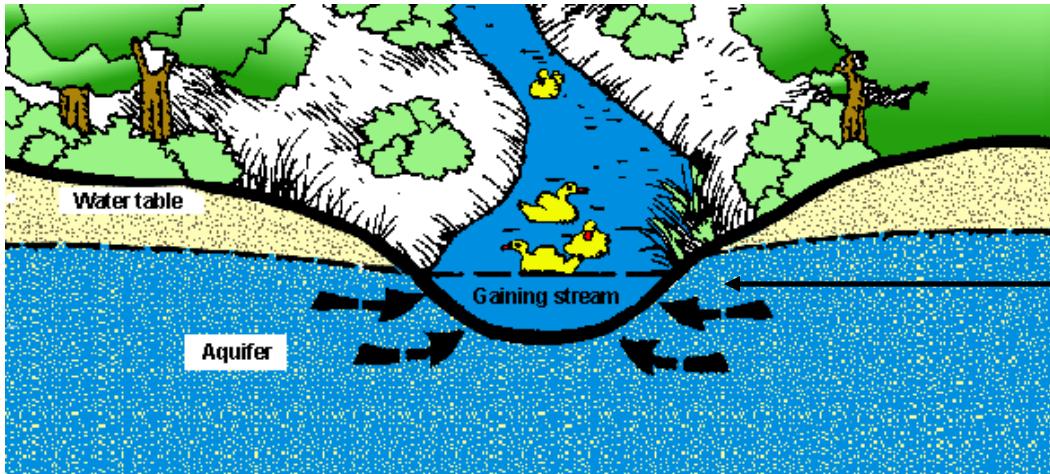


Zona insatura

Zona satura



Unsaturated and saturated zones below the earth's surface. The two zones are separated by the capillary fringe zone, which is a few centimeters thick.

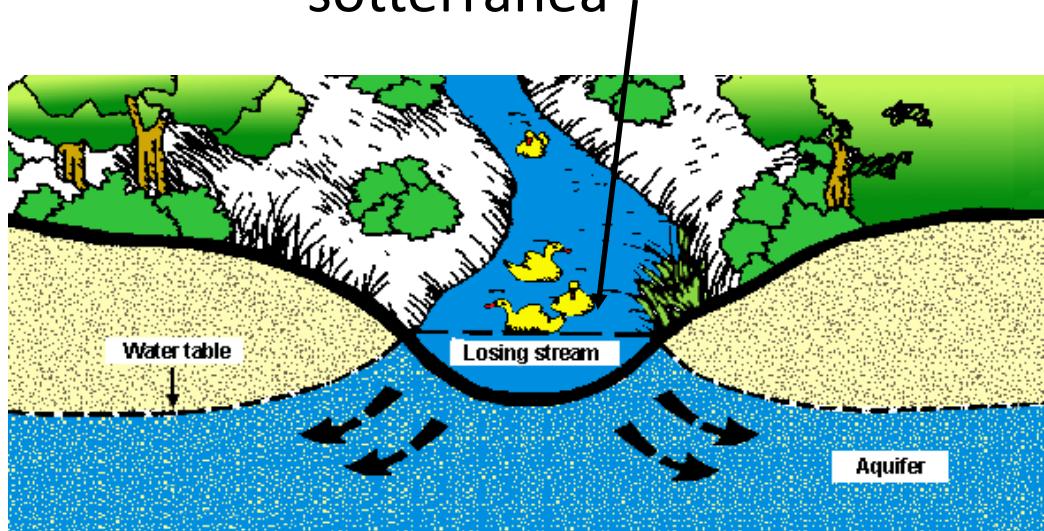


L'acqua superficiale e l'acqua sotterranea sono connesse.

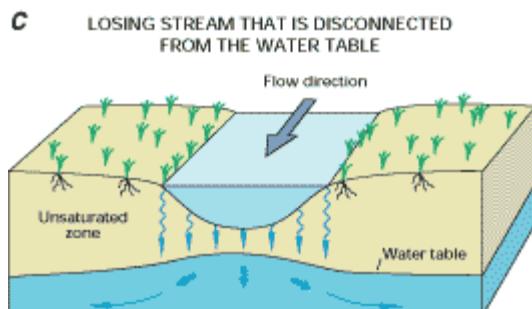
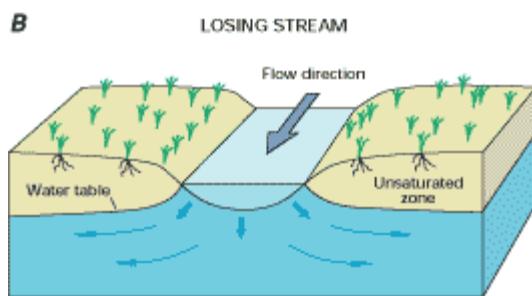
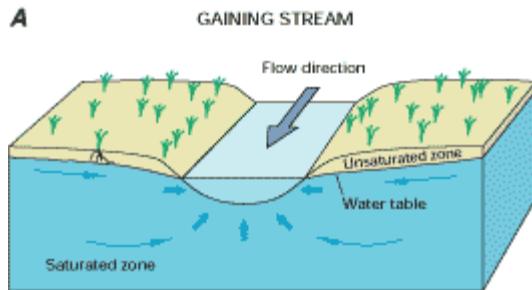
A volte l'acqua superficiale drena quella sotterranea

In altri casi l'acqua superficiale alimenta quella sotterranea

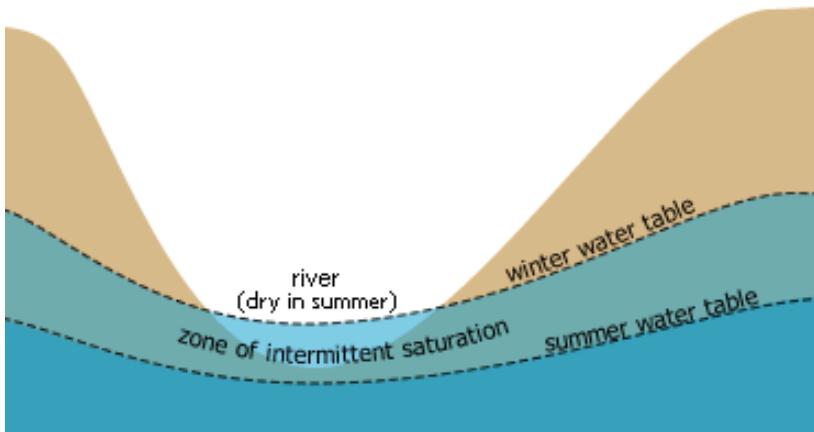
This interaction is not limited to streams. Most all lakes, ponds, or wetlands are connected to the ground water, and what happens to one can affect the other.



Interaction of streams and ground water

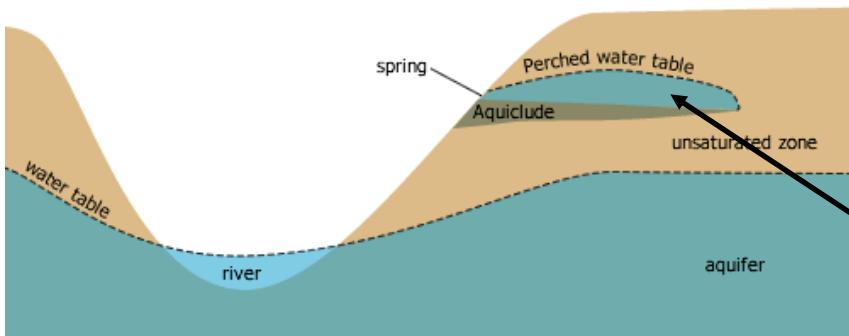


Gaining streams (A) receive water from the ground-water system, whereas losing streams (B) lose water to the ground-water system. For ground water to discharge to a stream channel, the altitude of the water table in the vicinity of the stream must be higher than the altitude of the stream-water surface. Conversely, for surface water to seep to ground water, the altitude of the water table in the vicinity of the stream must be lower than the altitude of the stream surface. Some losing streams (C) are separated from the saturated ground-water system by an unsaturated zone.



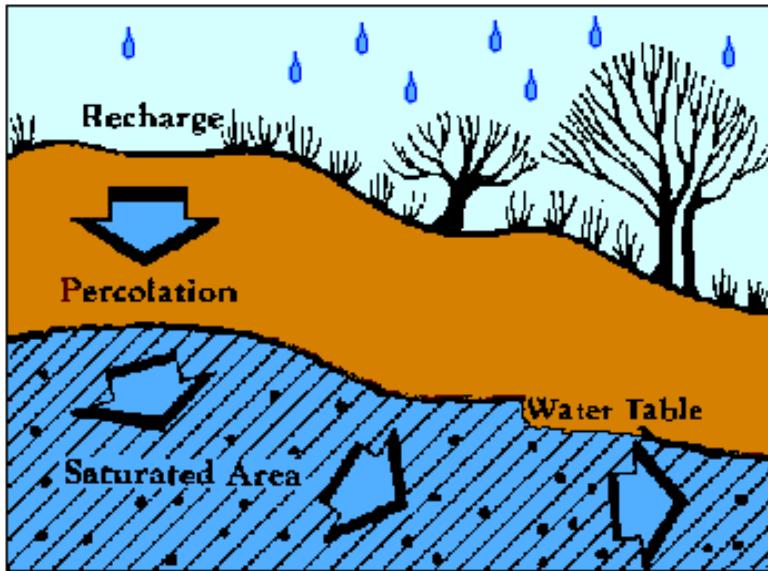
Oscillazione stagionale della falda freatica.

Durante la stagione secca i fiumi possono prosciugarsi



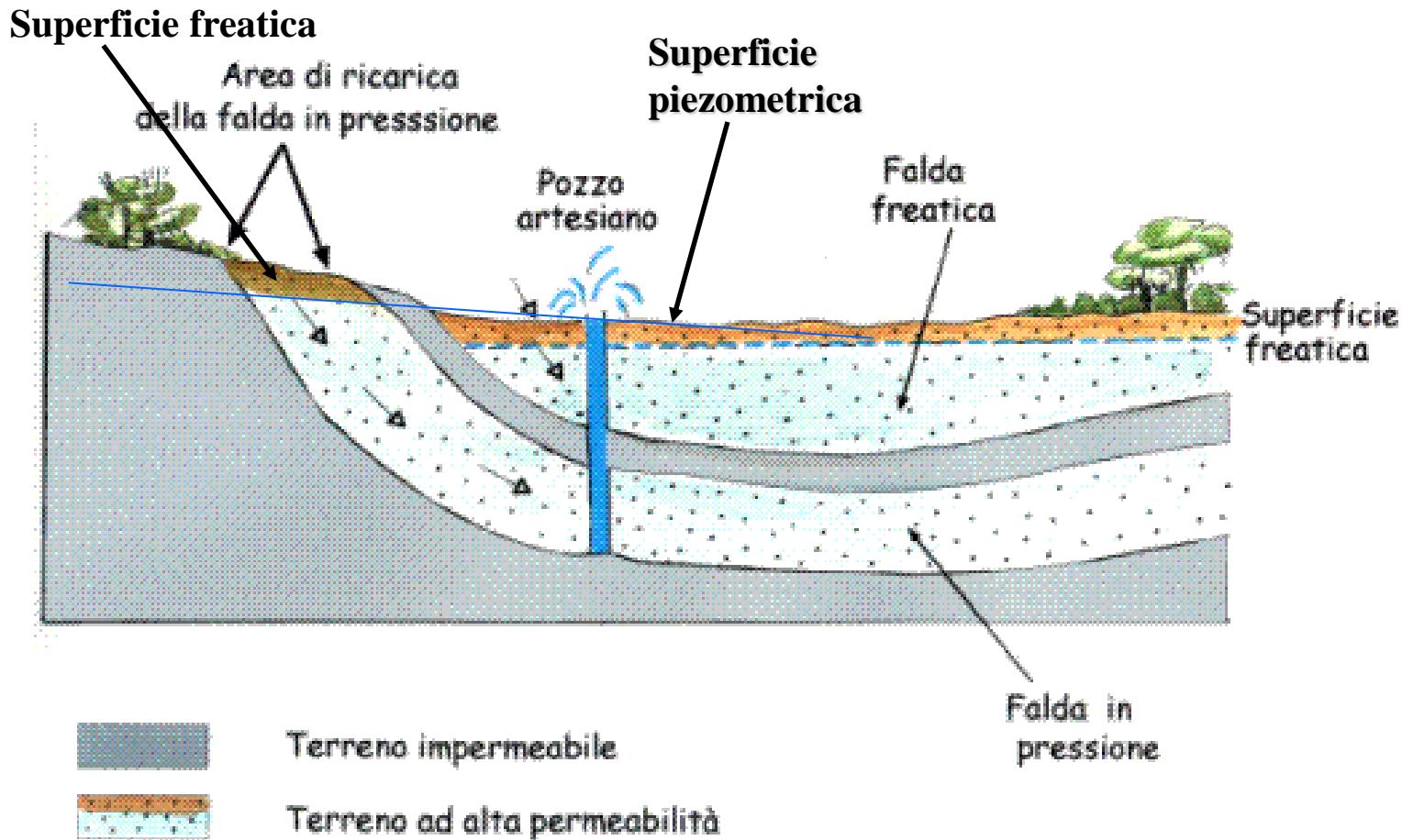
La superficie freatica segue la forma della superficie topografica, attenuandola.

In figura anche una falda sospesa



A portion of the water that falls as precipitation infiltrates into the ground and becomes groundwater. This is known as recharge. The area where permeable soil allows water to seep into the ground is known as the recharge area.

L'area di ricarica della falda freatica è quella in cui la superficie freatica è più alta



L'acqua che si infiltra nel terreno e si muove nel sottosuolo costituisce le **"falde idriche"** sotterranee

Le frecce nere indicano l'acqua che si infiltra e si muove nel terreno.

Un **acquifero** è una roccia fratturata o un terreno sciolto che può immagazzinare acqua, farla circolare e restituirla in quantità apprezzabili.

Un acquifero è delimitato, almeno nella parte inferiore, da uno strato di terreno a bassissima permeabilità (impermeabile).

L'acqua si muove all'interno degli acquiferi, anche se molto lentamente.

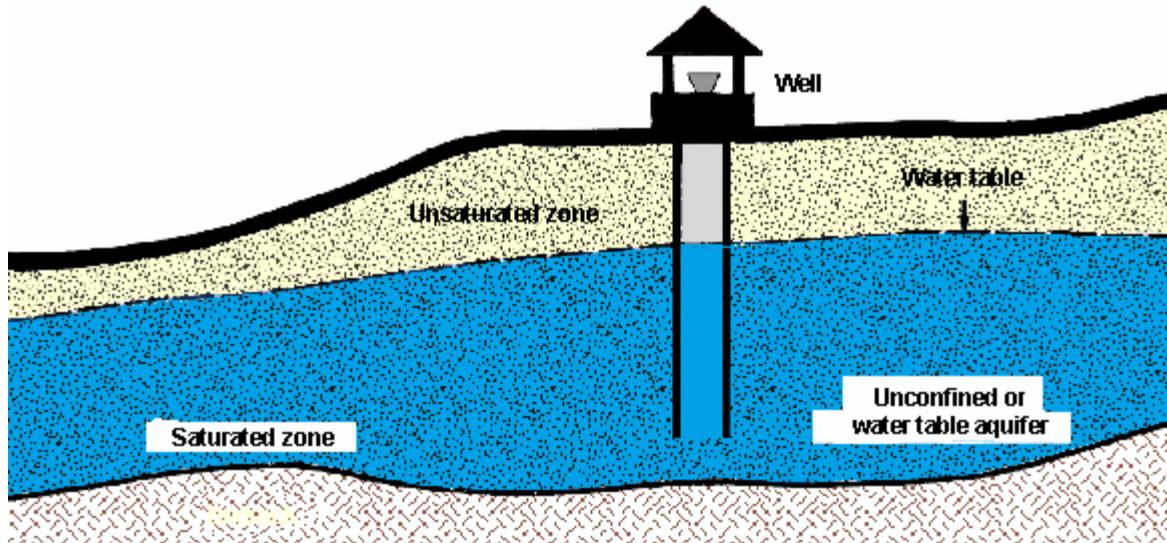
Si chiamano **falde freatiche**, o libere, quelle contenute in acquiferi alimentati direttamente dall'acqua piovana che si infiltra dalla superficie e penetra nel terreno permeabile, finché non incontra uno strato di materiale impermeabile.

Si chiamano falde in pressione, o **falde confinate**, quelle che sono delimitate sia nella parte inferiore che in quella superiore da uno strato impermeabile.

L'acqua che alimenta queste falde è quella che si infiltra dove il terreno permeabile che costituisce l'acquifero viene a trovarsi in superficie e, quindi, può ricevere acqua. Pertanto, la **zona di ricarica** di una falda in pressione può trovarsi anche molto distante dalla falda stessa. Si parla di falda "in pressione" perché l'acqua all'interno della falda è effettivamente sottoposta ad una certa pressione, dovuta al principio dei vasi comunicanti, grazie alla quale può risalire spontaneamente all'interno di un foro scavato nell'acquifero che la contiene.

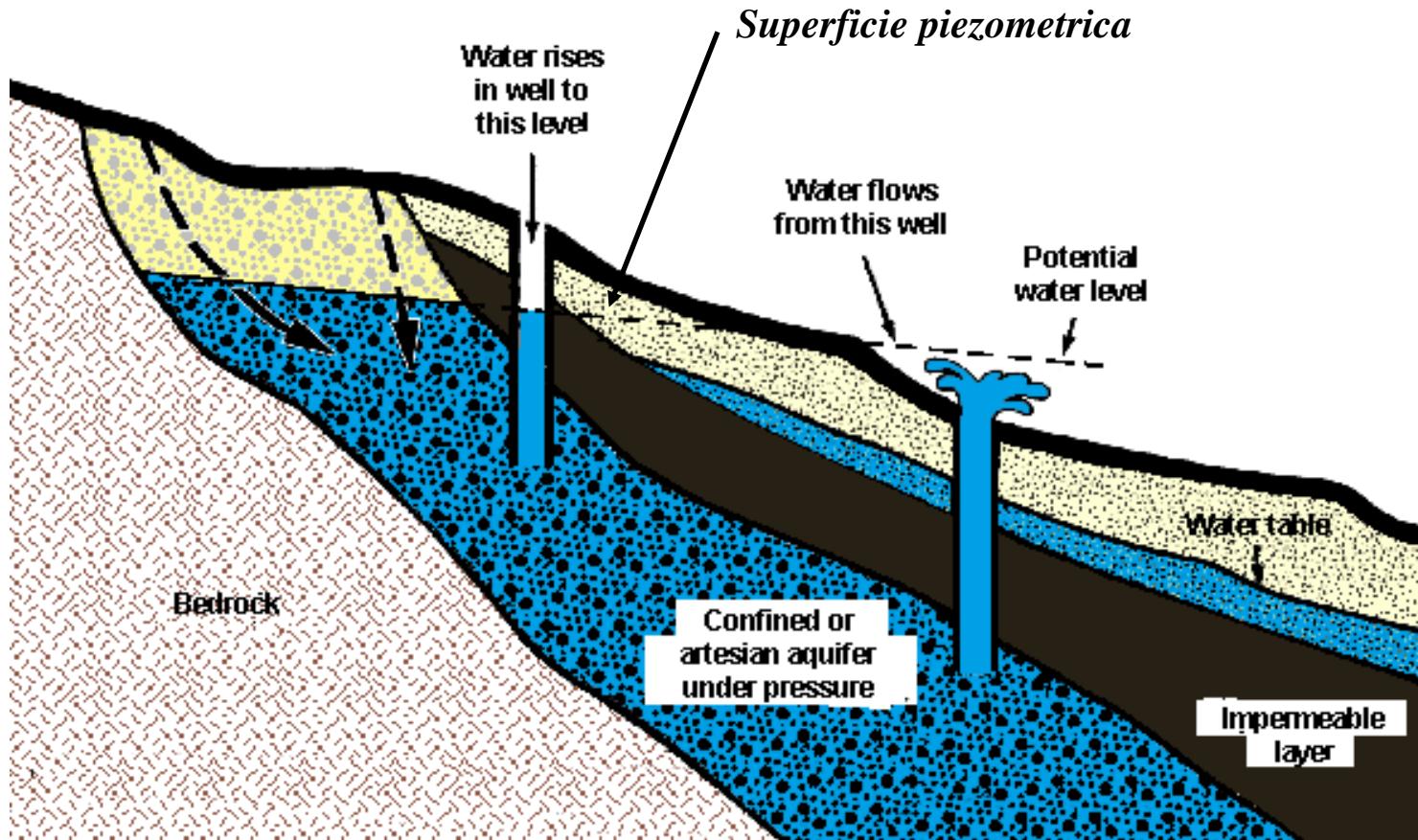
L'acqua contenuta in entrambi i tipi di acquifero può essere estratta tramite pozzi.

L'acqua contenuta nelle falde in pressione riesce talvolta a risalire spontaneamente, all'interno del pozzo, fino in superficie, senza quindi dover essere estratta tramite pompe. In questo caso, si parla di **falda artesiana** e pozzo artesiano.



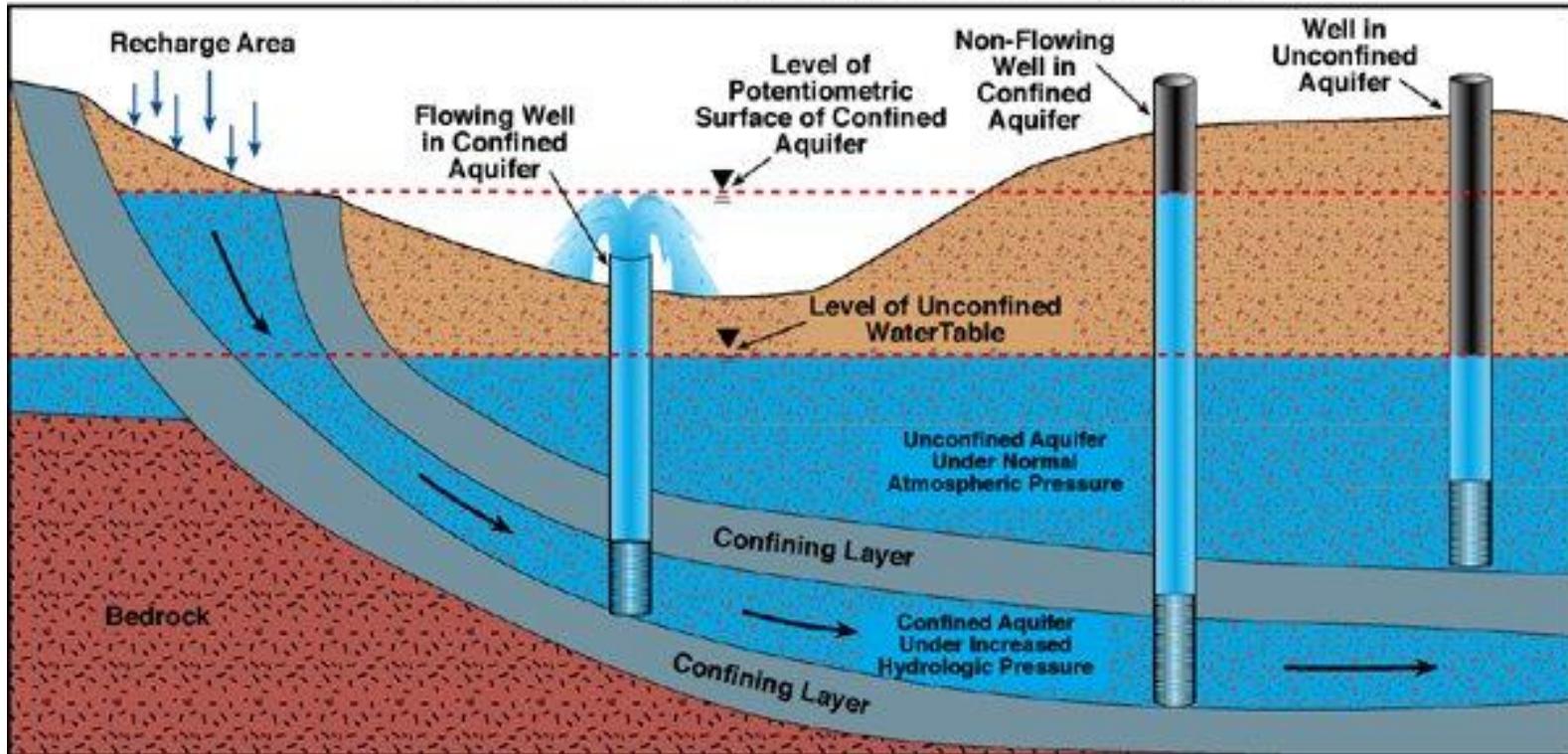
Il livello statico di un pozzo che emunge acqua da una falda freatica è uguale a quello della falda stessa.

Per livello statico si intende il livello dell'acqua nel pozzo quando non si ha emungimento



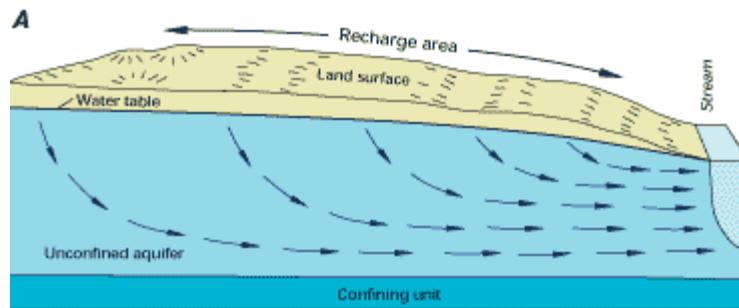
Il livello statico di un pozzo che emunge acqua da una falda confinata è più alto del livello dell'acqua nell'acquifero in quanto tende ad equilibrarsi con il livello della falda nella zona di ricarica per il principio dei vasi comunicanti

Potentiometric Surface and Flowing Wells

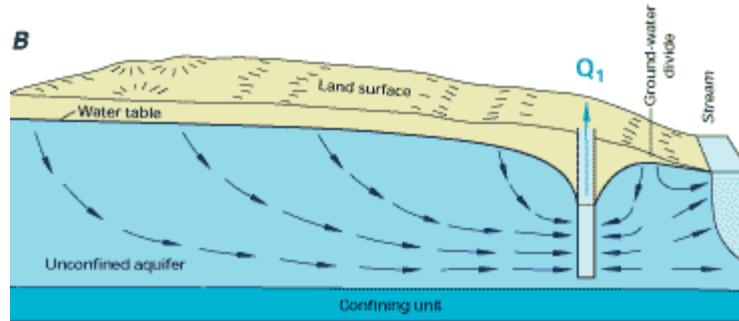


Confined and unconfined aquifers and related water tables

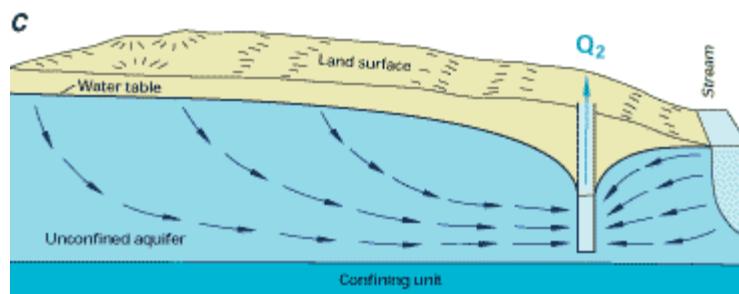
Relazione tra la falda e un pozzo in funzione



L'acqua meteorica che cade sull'area di ricarica, si infiltra ad alimentare la falda freatica e poi si dirige al fiume con percorsi sotterranei

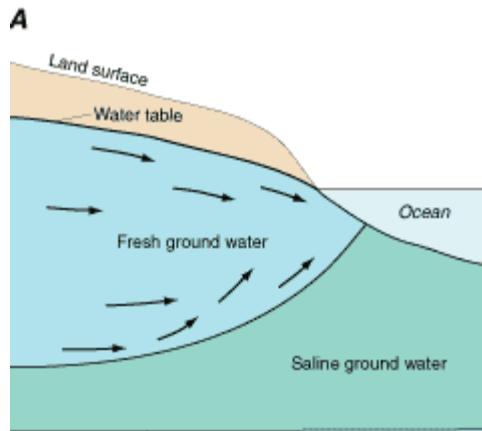


Se il pozzo pompa con una portata continua, il flusso sotterraneo si modifica e solo la parte di falda che si trova a destra dello spartiacque sotterraneo viene drenata dal fiume

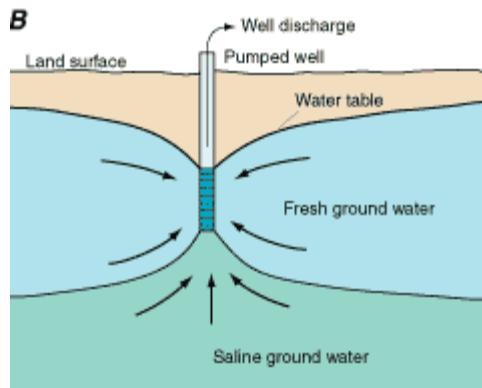


Nel caso in cui la portata del pozzo sia superiore, allora verrà emunta anche acqua dal fiume

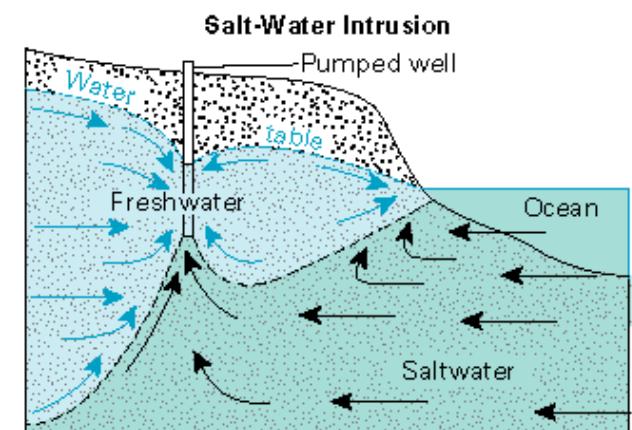
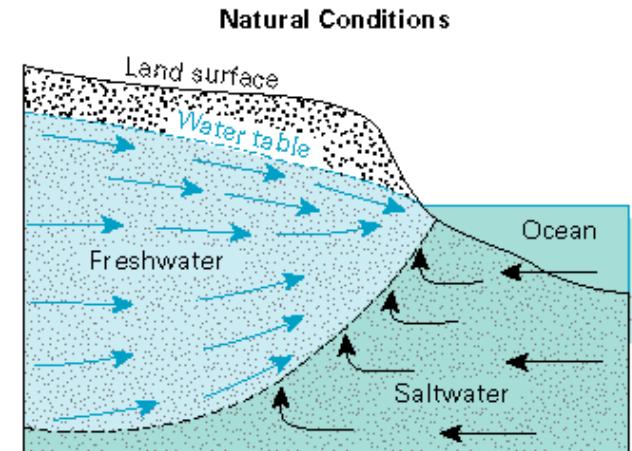
Relazione tra la falda di acqua dolce e il cuneo salino

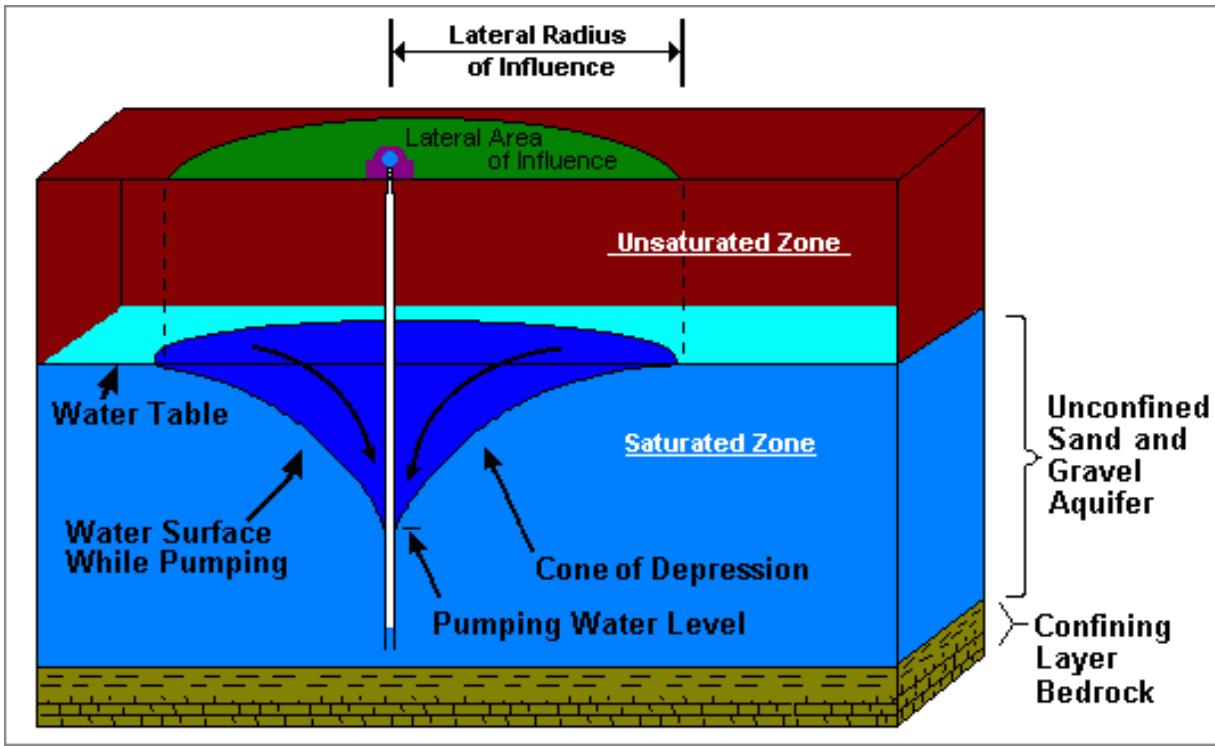


(A) In coastal areas, fresh ground water discharges to the surrounding saline surface-water bodies by flowing over the denser saline ground water.



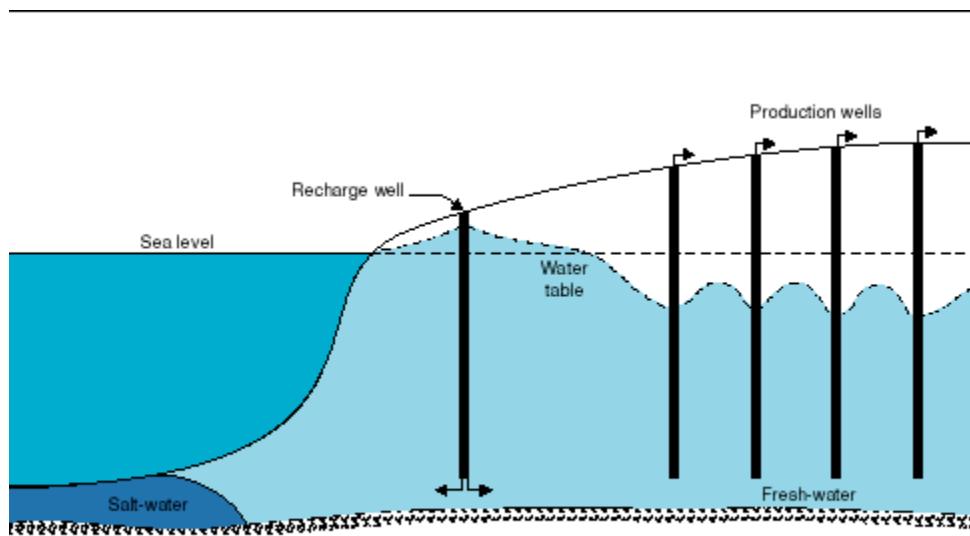
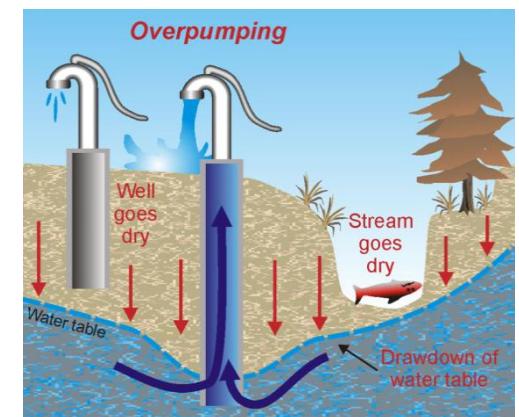
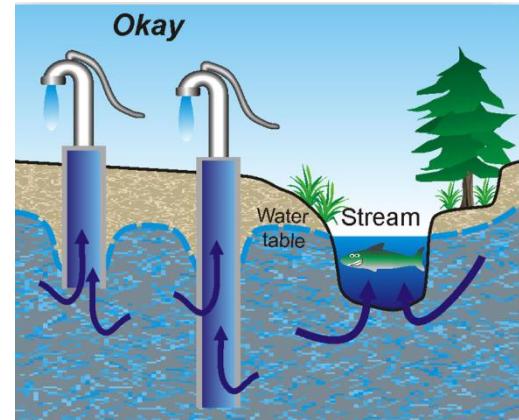
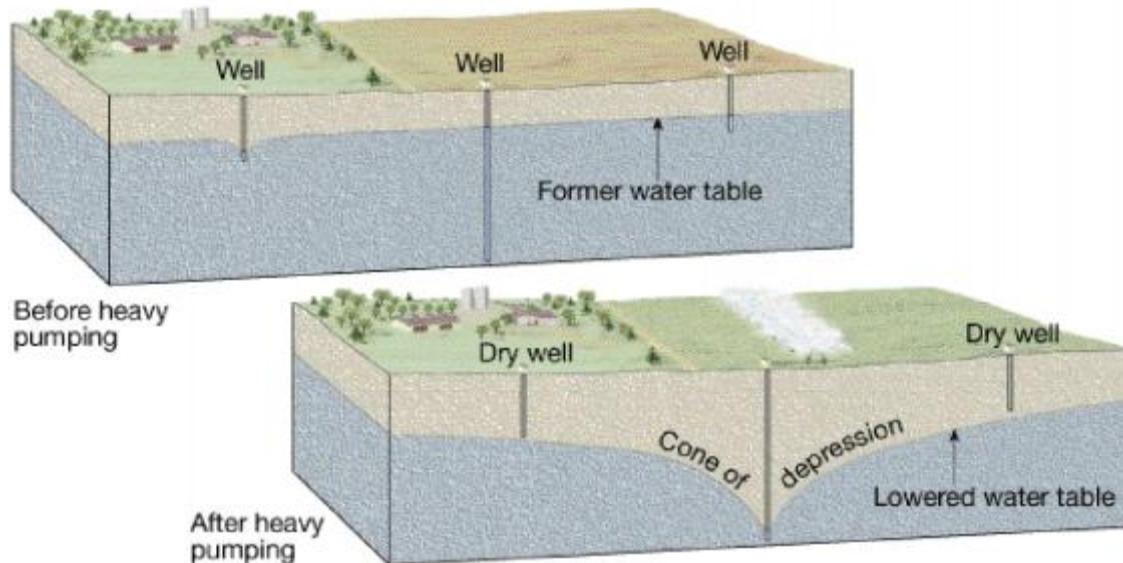
(B) In both coastal and inland areas, large drawdowns in an individual well can cause underlying saline water to migrate upward into the well and cause contamination of the water being discharged.





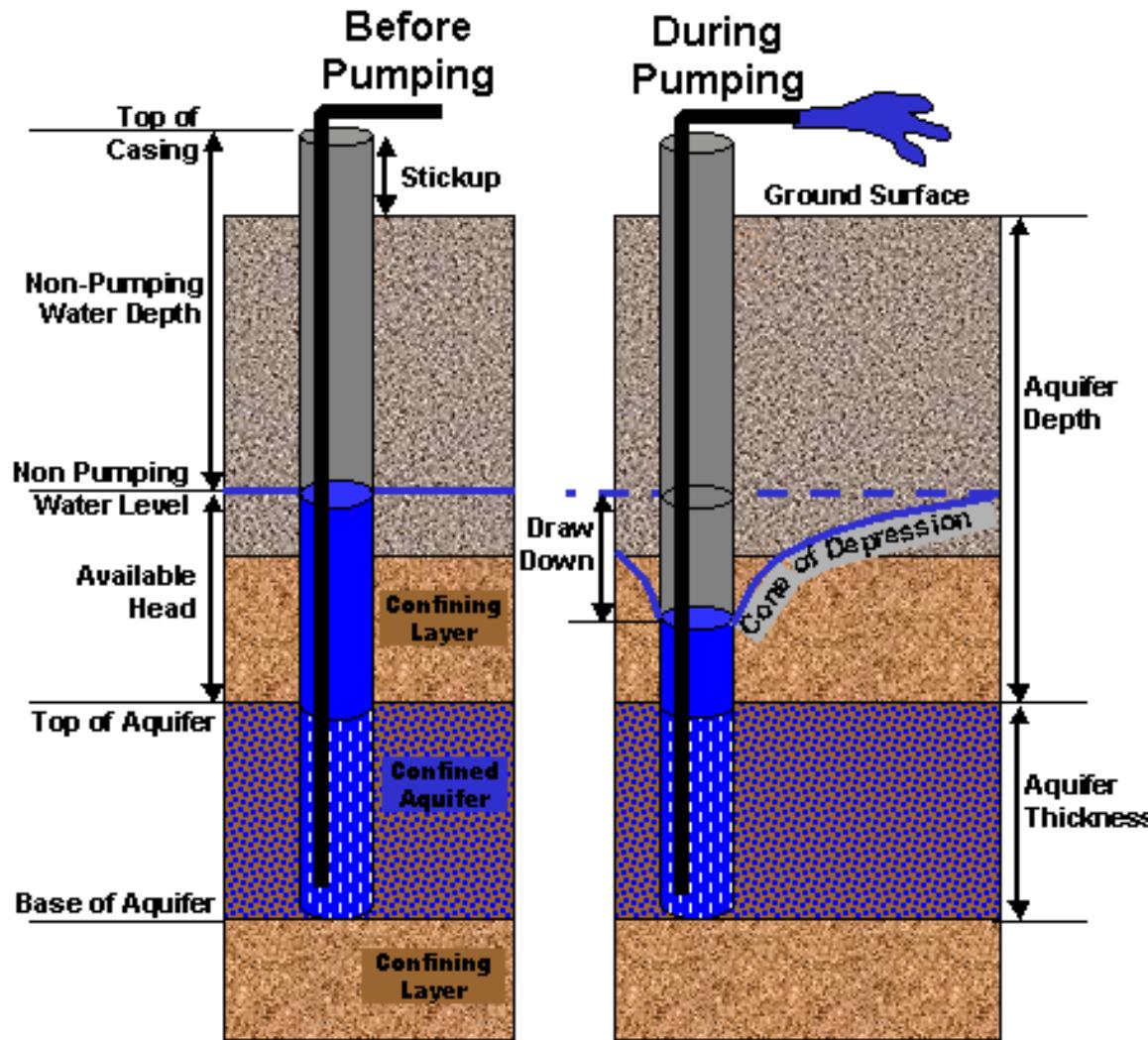
Un pozzo in funzione crea nella falda emunta un abbassamento del livello (falda freatica) o della pressione (falda confinata), tutt'intorno al pozzo stesso (**cono di depressione**)

Illustration of drawdown and recovery terms and processes. The figure is not to scale, and is intended to represent the basic concepts, not the relative or absolute magnitudes. Drawdown near the well can be a number of tens of meters, and the zone of influence can be greater than a mile.

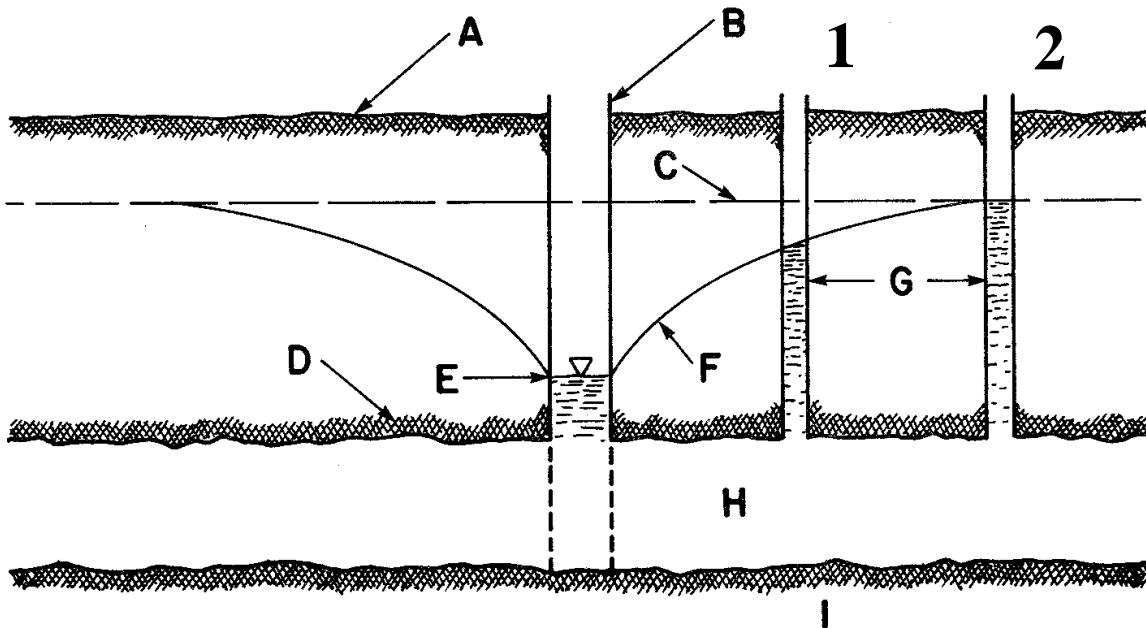


Deep recharge well creates groundwater ridge.

Estraendo l'acqua con i pozzi da un acquifero non confinato si agisce fisicamente sul livello dell'acqua nel terreno



Cono di depressione in una falda confinata



A = superficie del terreno

B = pozzo che prende acqua dall'acquifero confinato

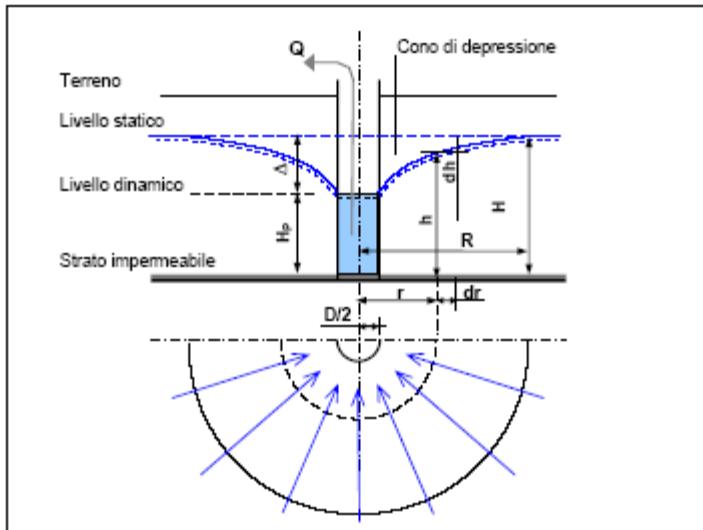
C = superficie piezometrica prima del pompaggio

F = superficie piezometrica durante il pompaggio

H = falda confinata

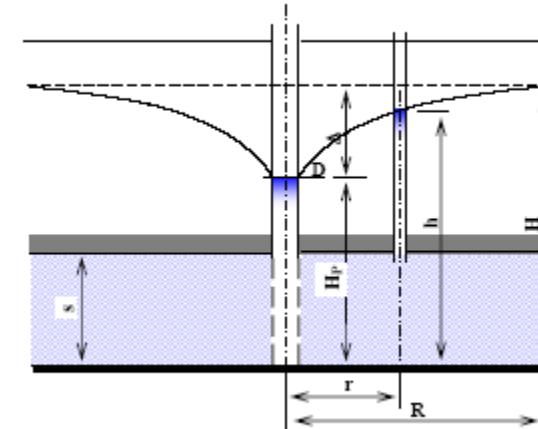
1 e 2 = piezometri

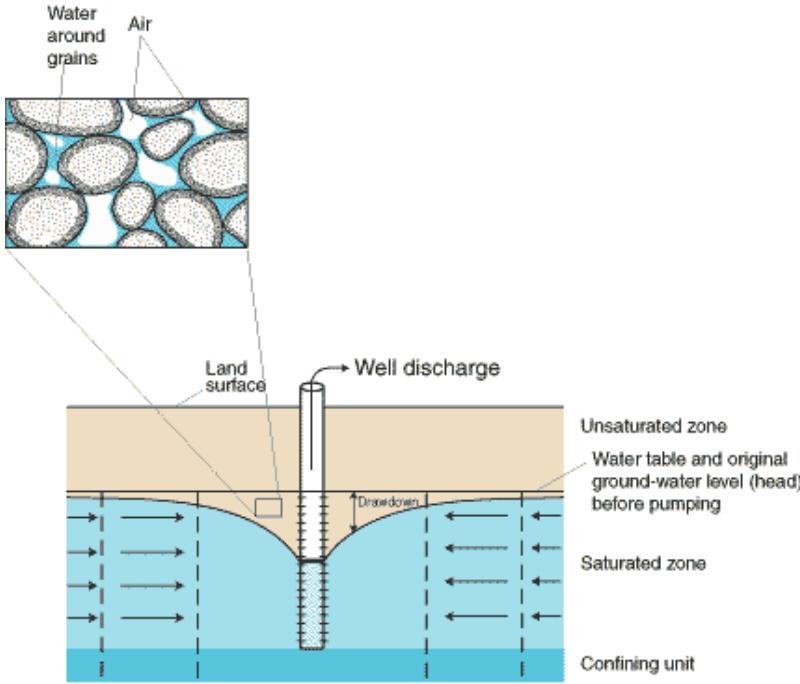
Estraendo acqua da un acquifero confinato si agisce sulla pressione dell'acqua, ma non sul livello dell'acqua nell'acquifero che resta la quota di base dello strato confinante superiore (D)



Cono di depressione per un pozzo in falda freatica

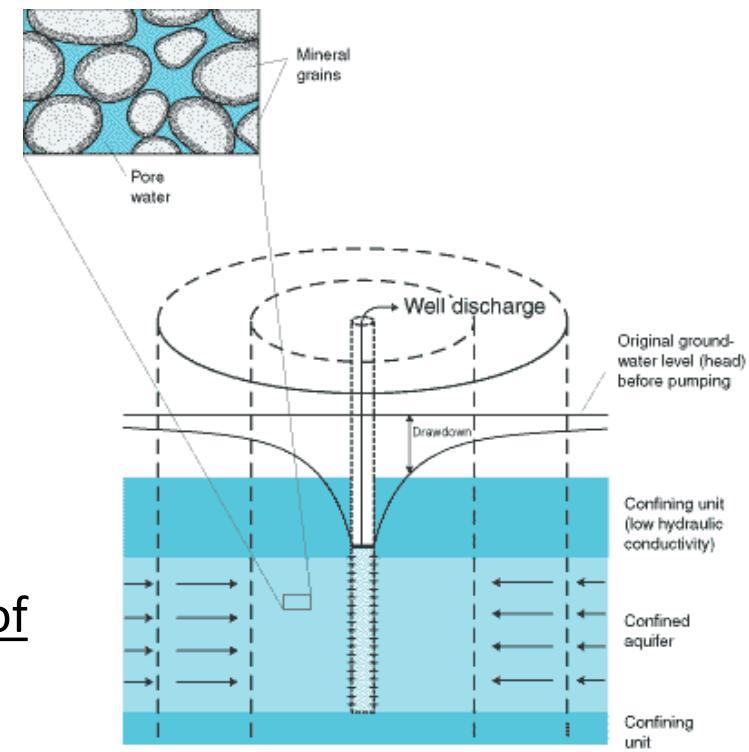
Cono di depressione per un pozzo in falda confinata



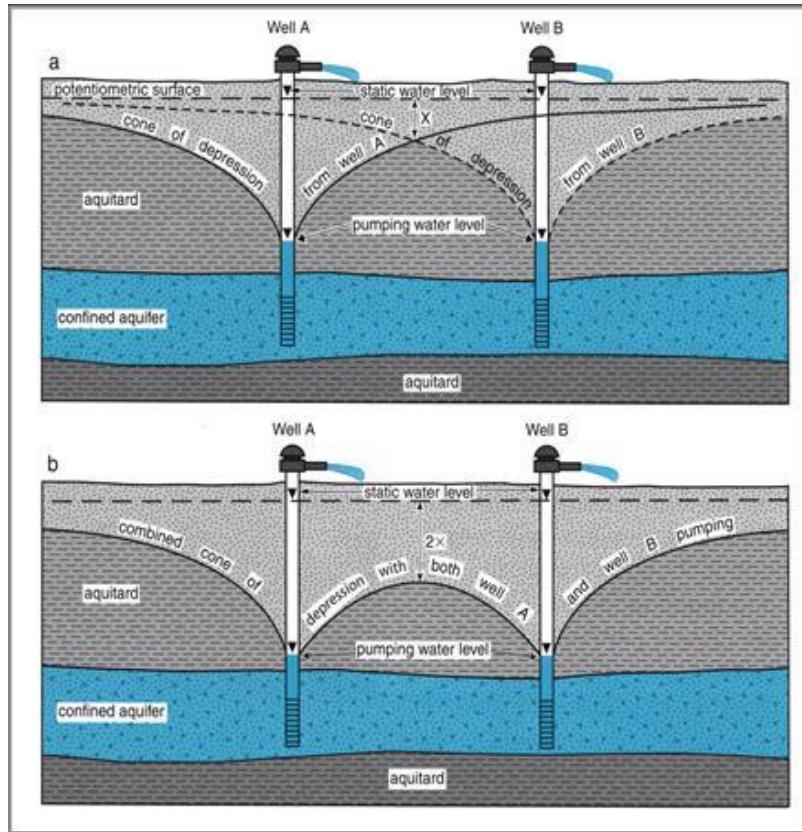


Pumping a single well in an idealized unconfined aquifer. Dewatering occurs in cone of depression of unconfined aquifers during pumping by wells (saturated thickness of aquifer decreases).

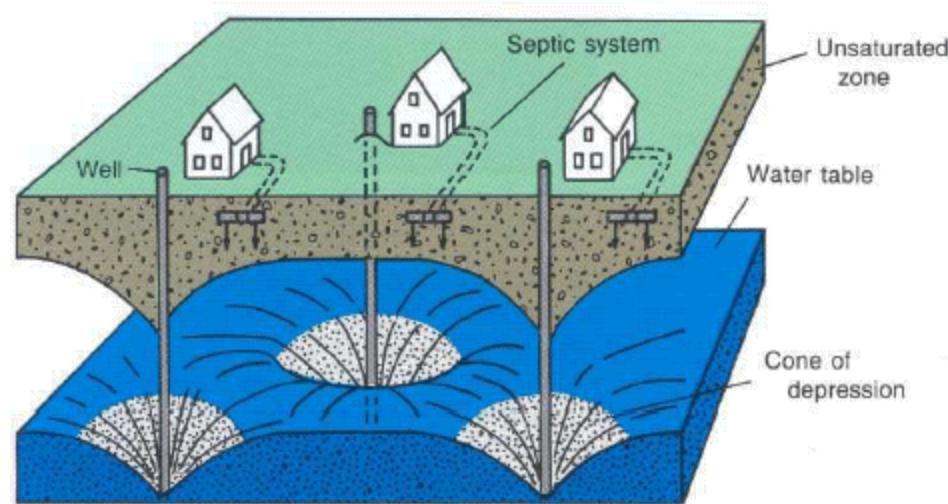
Pumping a single well in an idealized confined aquifer. Confined aquifers remain completely saturated during pumping by wells (saturated thickness of aquifer remains unchanged)



Falda confinata



Falda freatica



Effetto combinato dei coni di depressione di più pozzi in azione

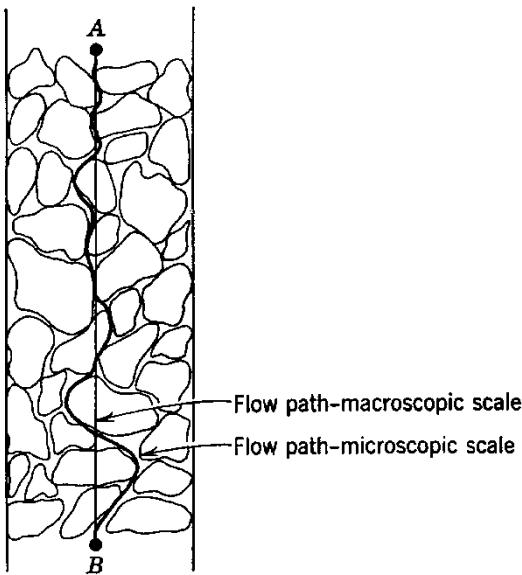


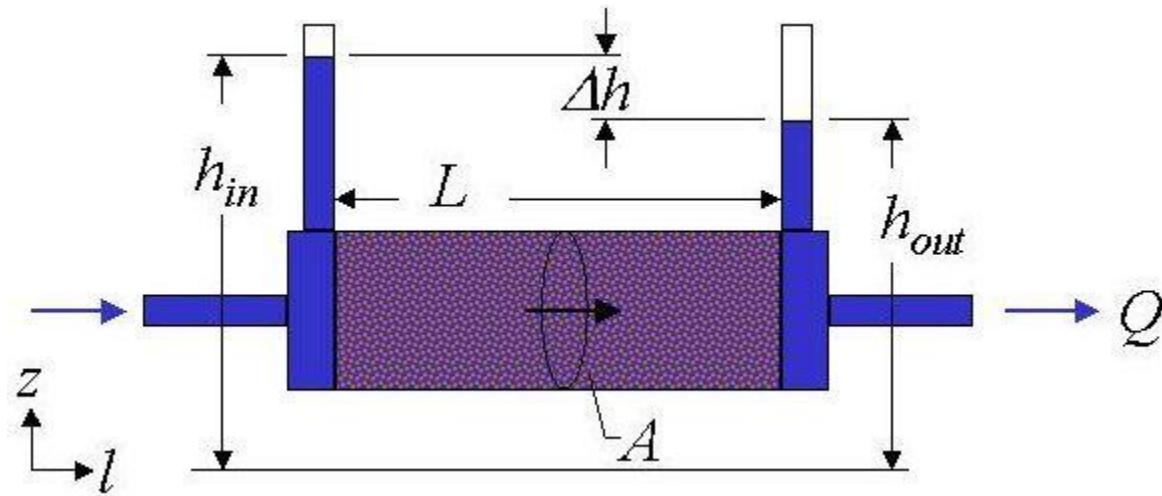
Fig. 17.1 Flow path in soil.

Se i pori della terra rappresentata nella figura sono interconnessi, l'acqua può fluire dal punto A al punto B.

Nella realtà una goccia d'acqua si sposterà da A a B non in linea retta e a velocità costante, ma avrà un percorso più complesso che dipenderà dai contatti tra i granuli e con una velocità che varierà in funzione delle dimensioni dei pori

Tuttavia, per semplificare il problema, in idrogeologia il flusso dell'acqua può essere considerato andare in linea retta da A a B e con velocità costante

<http://www.idrogeologia.net/schede-idrogeologia/idrogeologia-teoria/coefficiente-permeabilita/coefficiente-permeabilita.php>



$$Q = AK \frac{\Delta h}{L}$$

where,

Q = volumetric flow rate (m^3/s)

A = flow area perpendicular to L (m^2)

K = hydraulic conductivity (m/s)

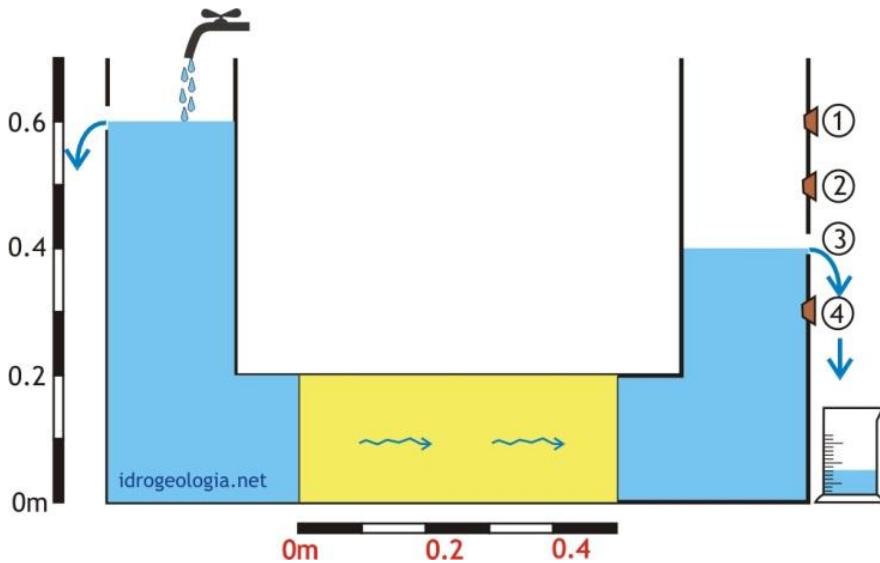
l = flow path length (m)

h = hydraulic head (m)

Δ = denotes the change in h over the path

L

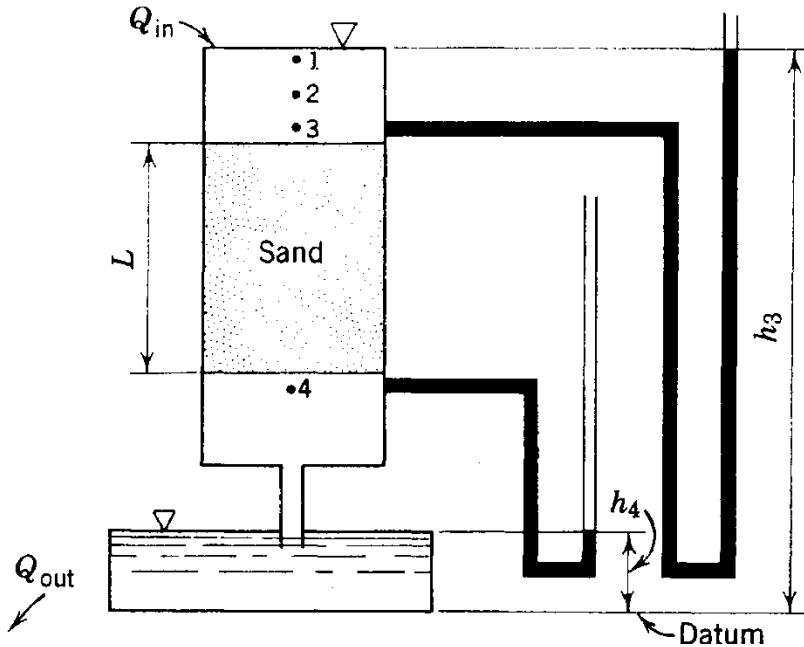
$\Delta h/L = i$ = hydraulic gradient



Rapporto tra portata di filtrazione e gradiente idraulico

Il cilindro verticale di destra è munito di 4 sfioratori, posti ad una quota di 0.3, 0.4, 0.5 e 0.6 metri dalla base dell'apparecchio, che possono essere aperti o chiusi. L'acqua in uscita dagli sfioratori può essere raccolta in un recipiente graduato e la portata di filtrazione misurata mediante metodo volumetrico.

Nelle condizioni iniziali si immagina che sia aperto il primo sfioratore e in queste condizioni il livello dell'acqua nel tubo verticale di sinistra è uguale al livello dell'acqua nel tubo verticale di destra. Visto che non esiste differenza di carico idraulico fra le estremità del cilindro di sabbia, non si può innescare alcun fenomeno di filtrazione e la portata defluita attraverso il provino è nulla. Se si apre il secondo sfioratore l'acqua, nel cilindro di destra si abbassa e di conseguenza fra le estremità del cilindro si genera una differenza di carico idraulico, che nel caso dell'esempio risulta di 0.1 metri. La differenza di carico idraulico innesca un processo di filtrazione e l'acqua defluita può essere misurata tramite il recipiente graduato. Procedendo in modo analogo si aprono il terzo e poi il quarto sfioratore e si osserva che all'aumentare della differenza di carico idraulico fra le estremità del cilindro aumenta la portata di filtrazione.



Legge di Darcy

$$Q = k \cdot \frac{h_3 - h_4}{L} \cdot A = k \cdot i \cdot A$$

$$\text{dove } i = \frac{h_3 - h_4}{L} = \frac{\Delta h}{L}$$

Q = portata (m^3/sec)

k = conducibilità idraulica

h_3 = altezza raggiunta dall'acqua in un tubicino inserito nella parte superiore della sabbia

h_4 = altezza raggiunta dall'acqua in un tubicino inserito nella parte inferiore della sabbia

L = lunghezza del campione di sabbia

A = sezione del campione di sabbia

i = gradiente idraulico

La **legge di Darcy** descrive il moto di un fluido in un mezzo poroso. Essa asserisce che in un acquifero teorico (poroso, continuo, isotropo e poggiante su un substrato impermeabile) di sezione **A** e nel quale la falda defluisca in moto laminare, la portata **Q** è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'acquifero **L** ed è direttamente proporzionale alla perdita di carico piezometrico **Δh**, cioè

$$Q = k \times A \times i$$

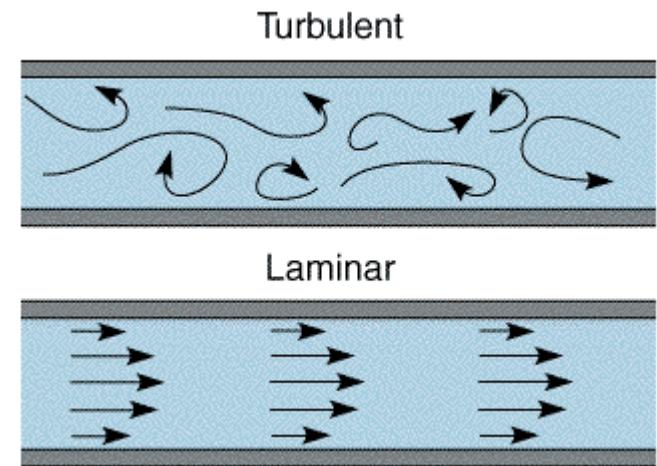
dove

k = coefficiente di permeabilità
(o conducibilità idraulica)

i = gradiente idraulico

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Scritta in altri termini diventa $v = k \times i$
dove **v** è la velocità apparente del fluido o velocità darcyana.



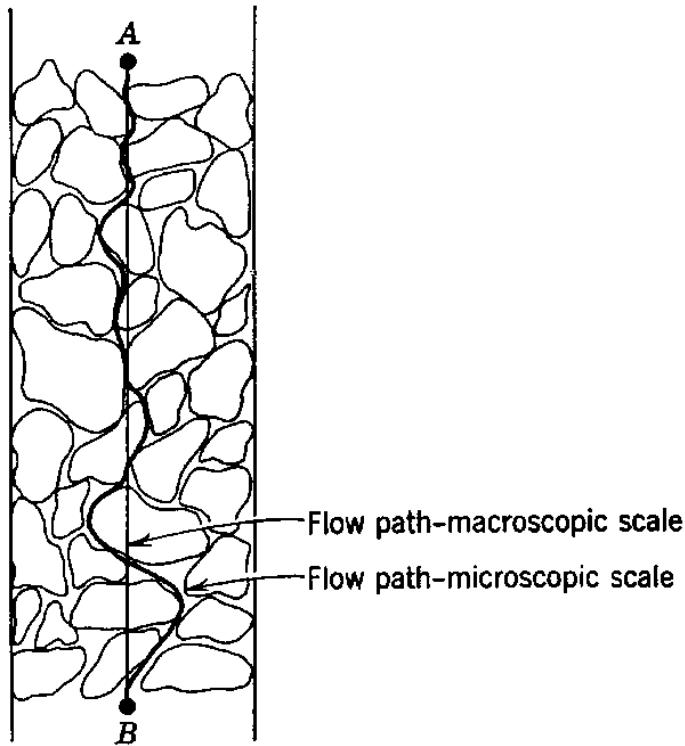


Fig. 17.1 Flow path in soil.

$$v = k \times i$$

v è la velocità apparente con cui l'acqua percorre il tratto AB a livello macroscopico.

Non è la velocità reale

Coefficiente di permeabilità k , (L,T⁻¹): quantità d'acqua passante in condizioni di flusso laminare nell'unità di tempo attraverso una sezione unitaria di un mezzo poroso, sotto un gradiente idraulico unitario e condizioni di temperatura standard (usualmente 20°).

$$k = \frac{v}{i}$$

Poiché i è adimensionale in quanto dato dal rapporto tra 2 lunghezze, k assume l'unità di misura di v , quindi k è una velocità e nel caso in cui, come da definizione, $i=1$, allora $k=v$

Si è visto sperimentalmente che la legge di Darcy resta valida in una certa gamma di velocità.

In particolare essa non è verificata nei moti turbolenti, (ad esempio nei flussi veloci attraverso tubi aperti), né in quelli estremamente lenti, come in certe argille a bassa permeabilità.

Essa non è inoltre applicabile nei mezzi non saturi (ad esempio il terreno tra la superficie del terreno ed il tetto della falda freatica).

La velocità darcyana è definita come flusso attraverso area unitaria del mezzo poroso, e nell'esperimento di Darcy, l'area della sezione è tutta quella del campione.

Se immaginiamo il mezzo poroso come una scatola, il flusso darcyano è la velocità con la quale il fluido scorre da una faccia a quella opposta della scatola, senza fornire indicazioni su quanto succede all'interno.

Dato che il campione è poroso l'acqua si sposta attraverso i canalicoli ed attorno alle particelle solide con una velocità maggiore, poiché la sezione libera è minore.

Quindi, la velocità darcyana è minore rispetto a quella reale.