

UTILIZZO E CARATTERISTICHE DEI TRACCIANTI NEGLI STUDI IDROGEOLOGICI

dr Alessio Fileccia

Le immagini ed i testi rappresentano una sintesi, non esaustiva, dell'intero corso di Idrogeologia tenuto presso il Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine dell'Università di Trieste. Il programma completo prevede, oltre agli argomenti in elenco e per ogni capitolo, una serie di esercizi con applicazione delle formule analitiche, la descrizione di alcuni software specifici per geostatistica, prove di portata, modellistica ed un'uscita con prove pratiche in un campo pozzi. Le lezioni sono periodicamente aggiornate e controllate. Per una versione definitiva, informazioni, segnalazione di errori o commenti, rivolgersi a:

Dr Alessio Fileccia (geofile@libero.it)

Per scaricare l'intero corso: www.disgam.units.it/didattica/insegnamenti-13.php

(figure e foto sono dell'autore, se non diversamente specificato)

Bibliografia

Autore	Anno	Titolo	Editore
Bianucci G.	1985	La chimica delle acque sotterranee	Hoepli
Celico Pietro		Prospezioni idrogeologiche (I-II)	Liguori
Cerbini Gianni	1992	Il manuale delle acque sotterranee	Geo-graph
Chiesa Guido	1994	Inquinamento delle acque sotterranee	Hoepli
Chiesa Guido	1992	Glossario di idrogeologia	Geo-graph
Davis S.N., Campbell D.J., Bentley H.W., Flynn T.J.	1985	Ground water tracers	National Water Well Association
Sauty J.P.	1978	Identification des paramètres du transport hydrodispersif dans les aquifères par interprétation de traçages en écoulement cylindrique convergent ou divergent (Journal of hydrology, n 39, p- 69-103)	Journal of hydrology
Todd David Keith	1980	Groundwater hydrology	J. Wiley and Sons

Bibliografia e parte introduttiva

- **geometria e caratteristiche degli acquiferi**
- **piezometria e direzioni di flusso**

Programmazione di una prova di tracciamento

Modalità di spostamento degli inquinanti in acquiferi porosi

Acquiferi porosi (parametri idrodispersivi)

- **Metodo di Sauty**

Prove di tracciamento

Premessa

Acquiferi porosi (parametri idrogeologici)

- **Flusso naturale**
- **Flusso indotto**
- **Flusso naturale ed indotto**
 - **Punto di diluizione**
 - **Flusso naturale, sonda direzionale**
 - **Flusso naturale, diagrafie di velocità**

Acquiferi fratturati

- **Richiami teorici**
- **I traccianti artificiali**

PARTE INTRODUTTIVA

I traccianti (*dye in inglese*) sono sostanze naturali od artificiali utilizzate negli studi idrogeologici essenzialmente per:

- Determinare i parametri fondamentali del flusso idrico: velocità, conducibilità idraulica, porosità
- Determinare i parametri idrodispersivi (coefficiente di dispersione e dispersività)

La loro utilità si rivela pertanto sia negli studi generali sugli acquiferi sia in quelli per conoscere l'estensione del plume inquinante.

In tutte le prove in sito, è necessario conoscere anticipatamente i seguenti aspetti, almeno in forma generica:

Geometria e caratteristiche dell'acquifero
Piezometria e direzioni di flusso sotterraneo
Caratteristiche chimico fisiche del tracciante

Riguardo all'ultimo punto è importante che la sostanza:

- Non sia tossica, anche a basse concentrazioni
- Non reagisca con la frazione solida dell'acquifero (deve essere trasportato solo per convezione)
- Non modifichi la porosità e conducibilità idraulica dell'acquifero
- Sia facilmente rilevabile
- Non sia presente già nell'acquifero a concentrazioni elevate

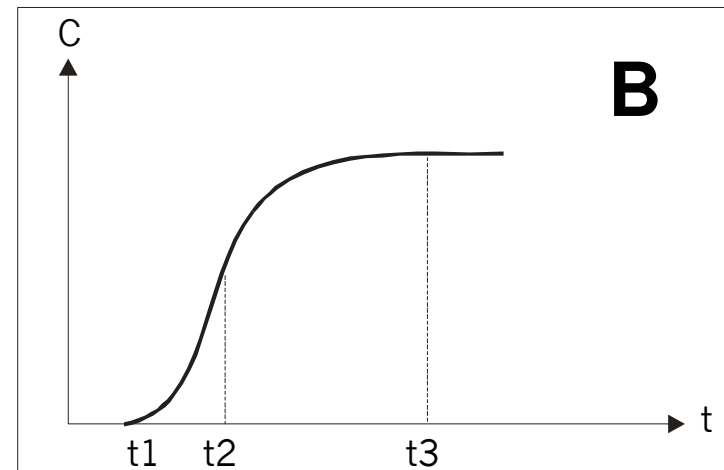
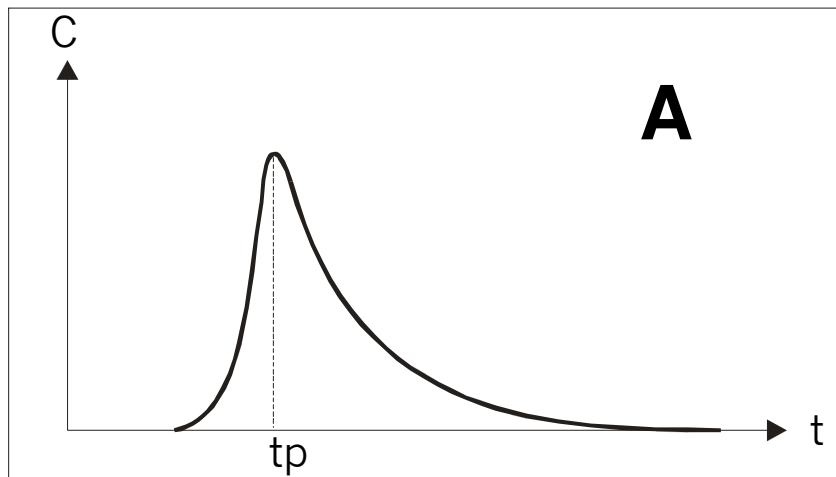
Alcuni traccianti, sono utilizzati su acque superficiali con lo scopo di ricavare la portata del corso d'acqua, anche se bisogna notare che non sempre le sostanze usate per le acque superficiali sono indicate anche per quelle sotterranee.

In via schematica l'uso dei traccianti è abbastanza semplice: una sostanza è immessa in un punto a monte del flusso sotterraneo e rilevata dopo qualche tempo, in un punto a valle.

In pratica esistono numerose varianti al metodo generale e quello che in certi casi rende errate le conclusioni o falsa leggermente i dati, è il modello idrogeologico sul quale è stata basata la prova od il tipo non adatto di sostanza tracciante.

Come accennato, il caso più semplice prevede un punto d'immissione ed uno di rilevazione; l'immissione può essere di due tipi:

Immissione	Istantanea (piccole quantità di tracciante in breve tempo)	A
	Continua (grandi quantità di tracciante a lungo)	B



Metodi d'immissione e rilevazione

METODOLOGIA	CARATTERISTICHE	PARAMETRO ricavato
Immissione e rilevazione del tracciante nello stesso punto	Misure in un unico pozzo (<i>borehole dilution</i>)	Velocità darcyana ed effettiva
	Immissione in pozzo e pompaggio dopo qualche tempo	Velocità effettiva, gradiente
	Uso di un tracciante radioattivo e misure con sonda	Direzione di flusso
	Misura delle correnti verticali con sonde fisse a diverse quote	Velocità verticale
	Diagrafie di velocità con sonda mobile radioattiva	Velocità
Immissione in un punto e rilevazione in un secondo, a valle	Flusso naturale	Velocità effettiva
	Flusso indotto con pompaggio	Porosità efficace (o cinematica) dispersività
Immissione in un punto e rilevazione in più pozzi a valle	Flusso indotto in pompaggio	Porosità efficace (o cinematica) dispersività longitudinale e trasversale

(Idrogeologia: Uso dei traccianti in idrogeologia)

Ricostruzione della geometria e caratteristiche dell'acquifero

Stratigrafia (a scala decimetrica)
Estensione verticale ed orizzontale dei diversi terreni
Presenza di barriere sepolte (permeabili od impermeabili)
Direzione, numero ed estensione delle principali fratture o cavità carsiche

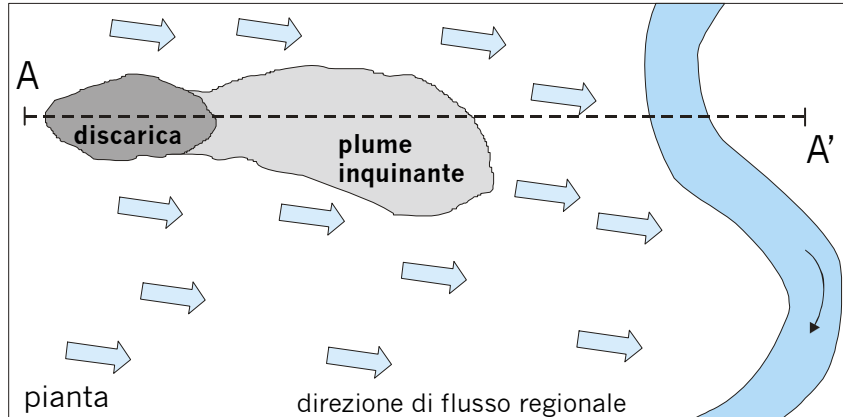
Piezometria e direzioni di flusso sotterraneo

Quote e direzioni di deflusso della falda da testare
Limiti idraulici dell'acquifero
Punti d'immissione e/o drenaggio delle acque (artificiali o naturali)
Punti d'acqua in genere

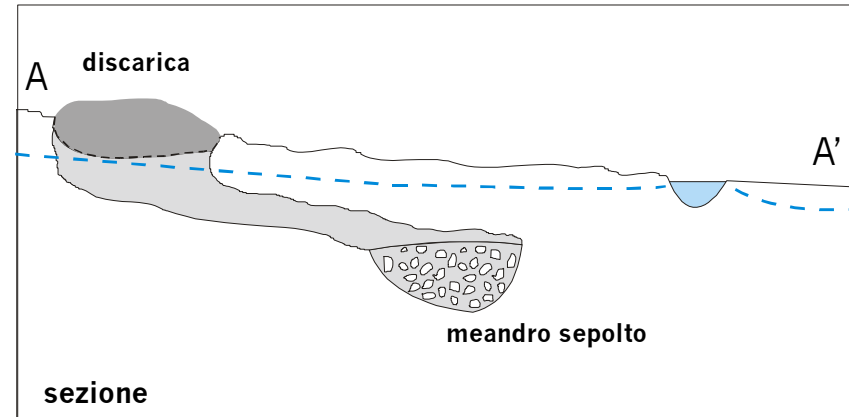
Nel caso di prove su acquiferi fratturati, a differenza di quanto succede per quelli porosi, è proprio la direzione di flusso sotterranea il parametro da ricercare

Importanza della ricostruzione geologica del sito

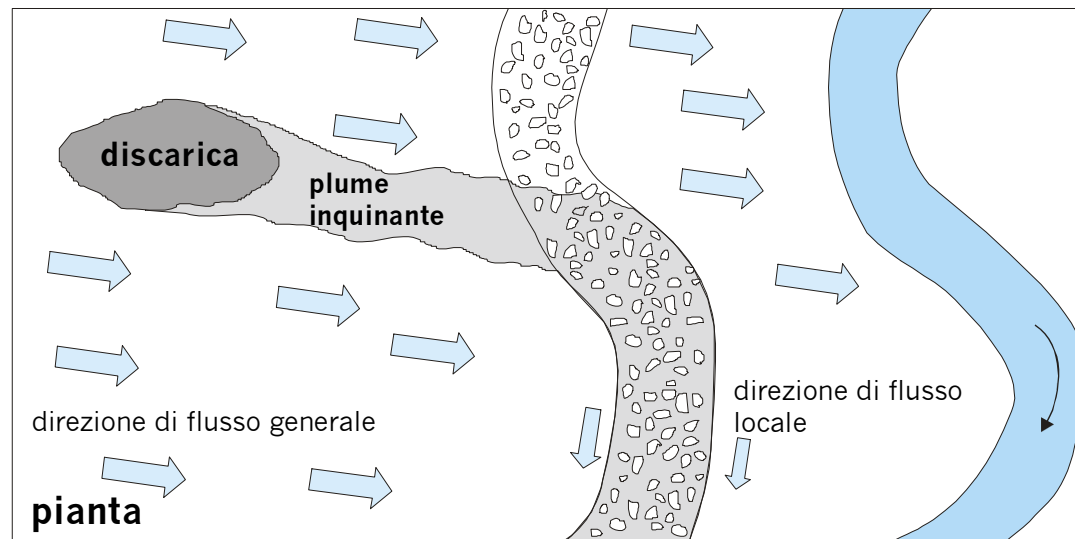
Ricostruzione idrogeologica approssimata



Ricostruzione stratigrafica lungo A-A'



Situazione idrogeologica reale



PROGRAMMAZIONE DI UNA PROVA DI TRACCIAMENTO

Parametro da ricercare	Tipo di tracciante
Direzione di flusso	Conservativo
Velocità	Conservativo
Porosità	Conservativo
Coefficiente di dispersione	Conservativo
Coefficiente di distribuzione	Non conservativo
Geometria del plume	Costituente del plume
Ricarica	Isotopo ambientale
Età dell'acqua	Radionuclidi

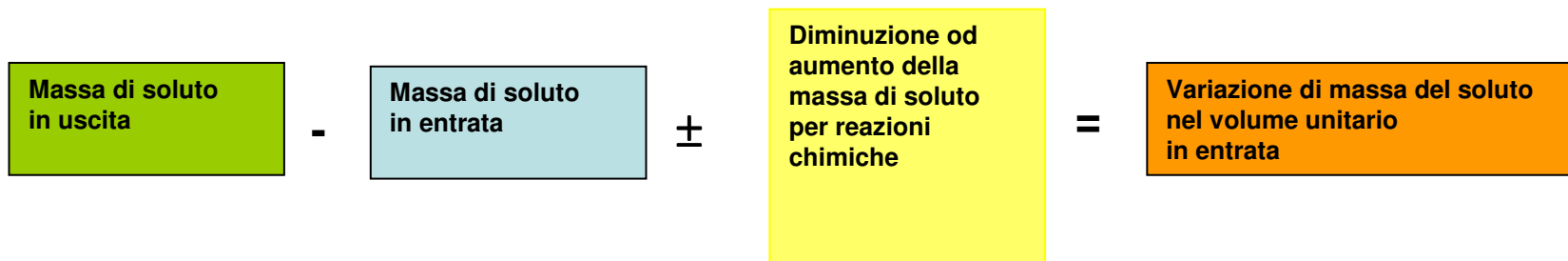
Tipo di acquifero	Tipo di tracciante
Carsico / fratturato	Fluoresceina, tynopal, leucophor, spore, tritio, onda di pressione
Poroso	Sale, cloruro di litio, isotopo, temperatura (con K molto elevato si possono usare anche traccianti ottici)

Modalità di spostamento degli inquinanti in acquiferi porosi

Il trasporto di un deposito chimico in falda è di solito descritto ricorrendo, come per il flusso idrico, al principio di conservazione di massa.

Nel caso in cui i processi principali siano ridotti a convezione (o advezione) e dispersione, la diminuzione o l'aumento della massa di soluto nel volume unitario, avviene per reazioni chimiche o decadimento radioattivo.

Considerando l'elemento unitario di volume:

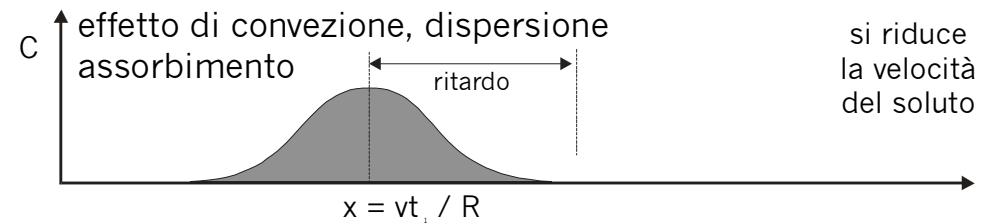
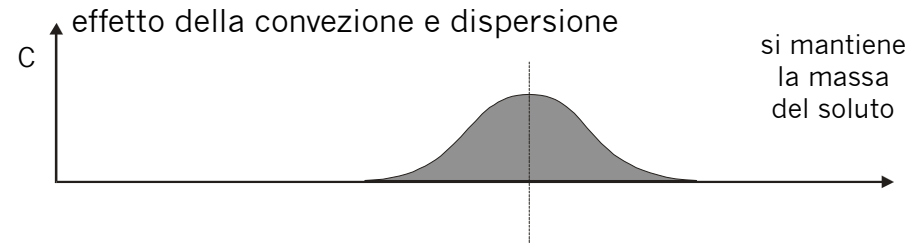
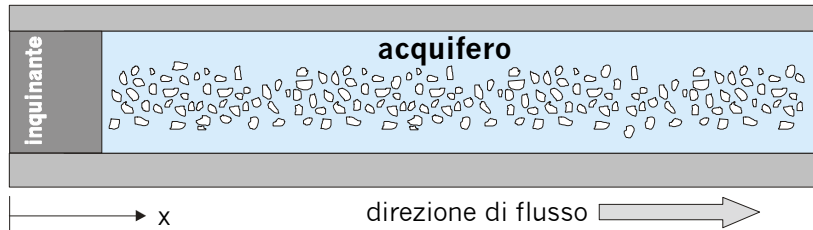


Nella figura seguente sono schematizzate le principali modalità di trasporto dovute all'interazione tra acquifero e composti chimici (flusso mono dimensionale).

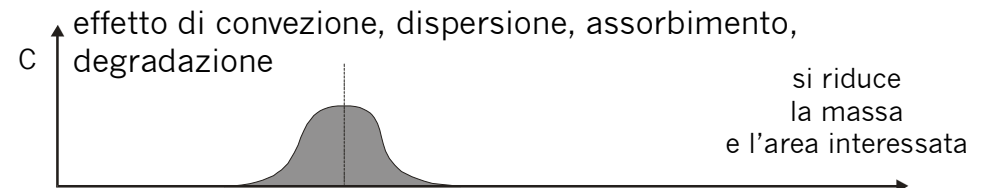
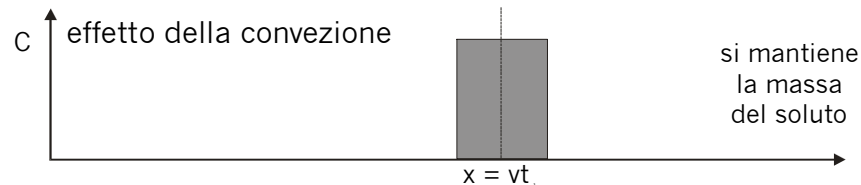
E' da notare come convezione e dispersione mantengano la massa di soluto, l'assorbimento riduca la velocità di trasporto e la degradazione la massa di soluto e quindi anche l'area interessata.

Azione dei fenomeni di convezione, dispersione, assorbimento, degradazione sul trasporto di un inquinante nell'acquifero

(Kinzelbach, ridisegnato)



Distribuzione dell'inquinante al tempo t_1



Vediamo ora più in dettaglio, come si evolvono i diversi fenomeni ed alcune semplici schematizzazioni analitiche.

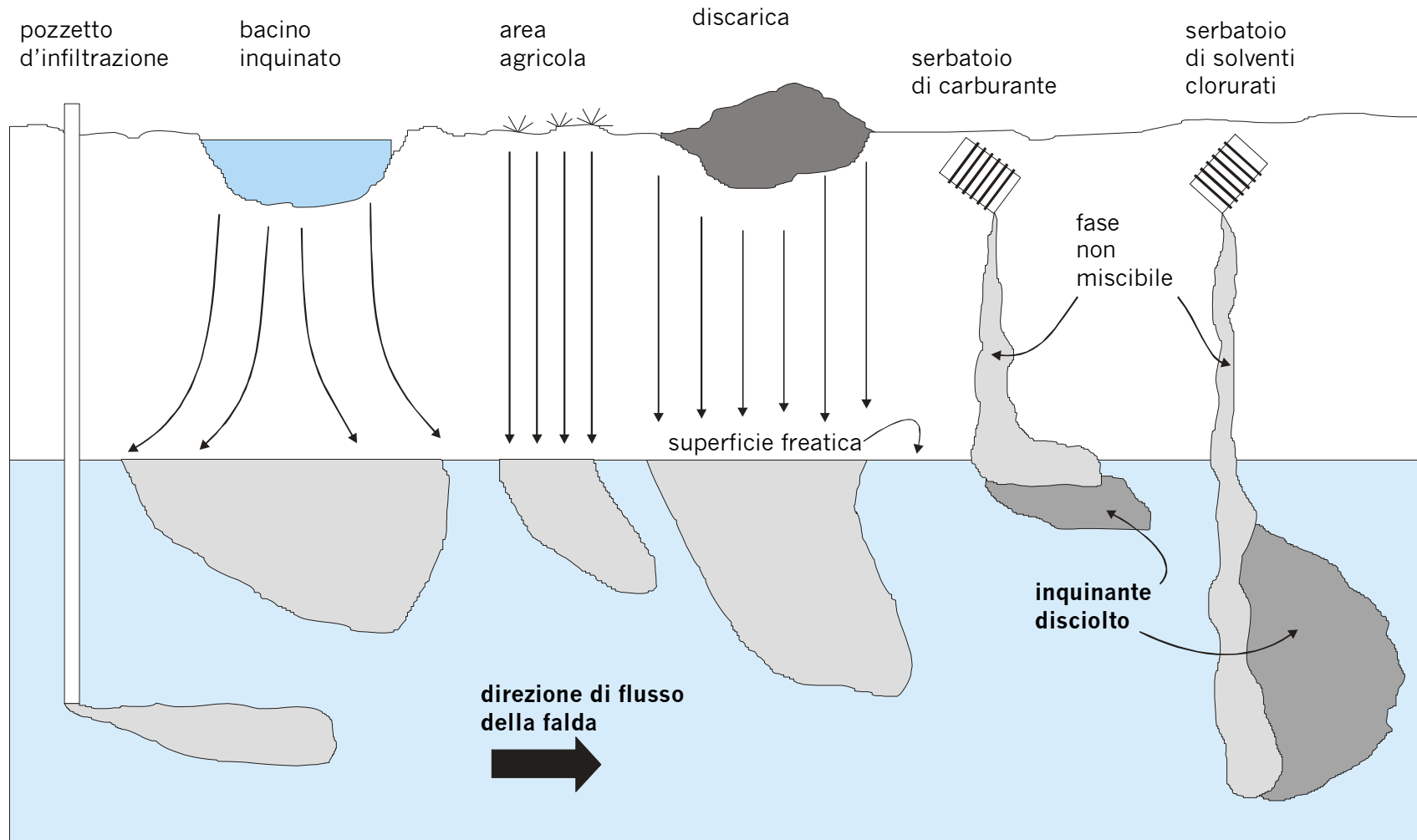
Nelle due figure seguenti sono rappresentate alcune cause d'inquinamento d'acque sotterranee, sia puntuale sia diffuso e come varia la morfologia del plume in base alle caratteristiche granulometriche dei materiali.

In termini generali, le sostanze artificialmente introdotte in falda subiscono un lento trasporto in senso sub orizzontale mentre nella zona non satura superiore, sono in parte filtrate ed adsorbite ed il loro movimento è quasi esclusivamente verticale.

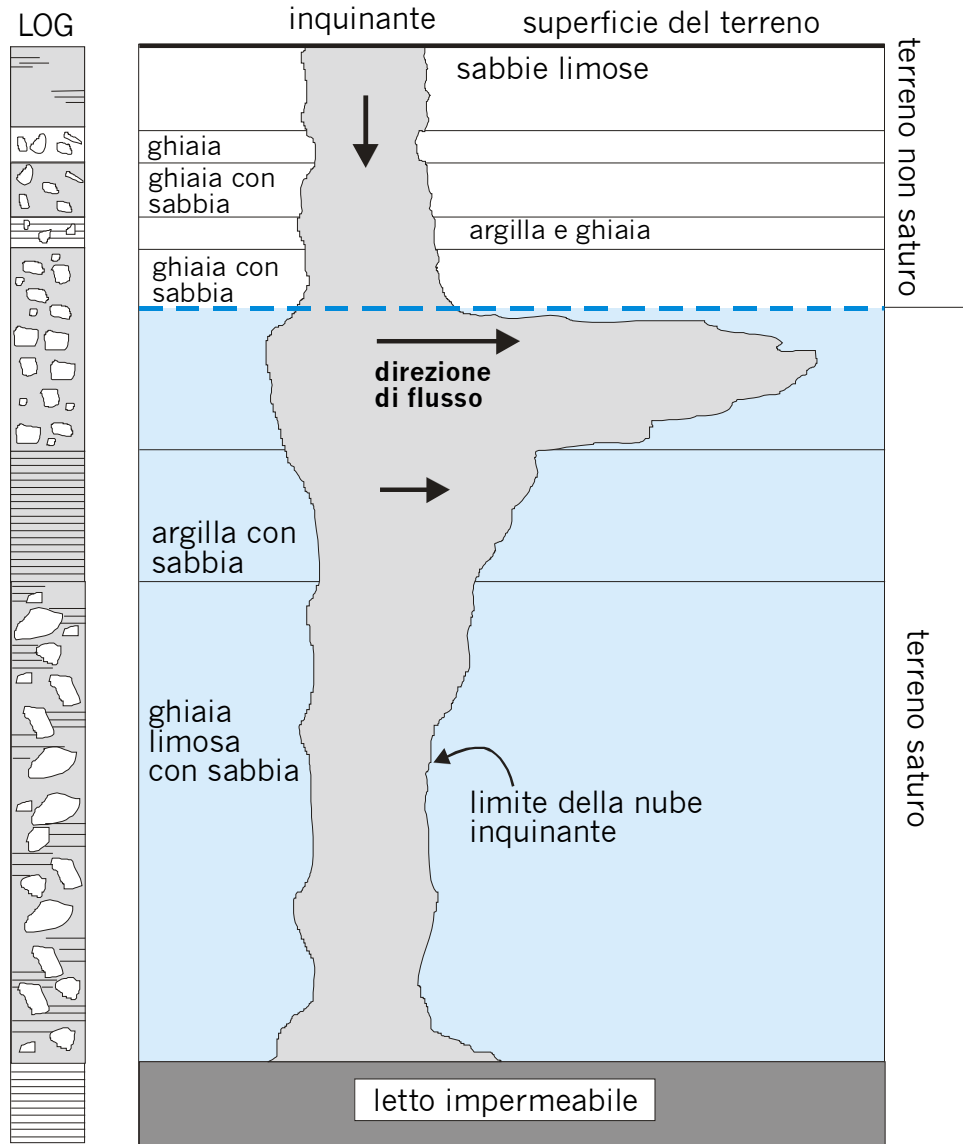
Data la complessità di questi fenomeni, anche qui sono previste ipotesi semplificative della situazione reale, per l'applicazione dei metodi matematici:

- In genere ed in prima fase, si considerano solo i fenomeni di trasporto, passando poi anche agli altri processi (dispersione, assorbimento, degradazione) ma solo nella parte satura in falda; i complicati processi che accadono nel non saturo sono, per semplicità, considerati come termine sorgente (*source term*)
- La densità del soluto può influenzare il campo di moto, si considerano pertanto i soluti idrodinamicamente inattivi, con densità basse e tali da non influenzare il flusso
- La scala orizzontale del trasporto è molto maggiore dello spessore d'acquifero, il campo di flusso è quindi bidimensionale; in situazioni vicine alle sorgenti di contaminazione od in presenza di forti eterogeneità stratigrafiche, la concentrazione verticale non può essere considerata con un valore medio ed il problema va quindi affrontato con dei modelli tridimensionali

Sorgenti d'inquinamento delle falde idriche



(Kinzlbach)



Distribuzione verticale dell'inquinamento in base alla diversa granulometria

Esempio di distribuzione di una contaminazione, su piano verticale, attraverso livelli a differente permeabilità. Le frecce indicano direzioni e valori relativi della velocità dell'inquinante.

Tutti gli studi sul trasporto richiedono come dati di partenza, la velocità di flusso e quindi i carichi idraulici e la porosità efficace dell'acquifero.

Bear, fu uno dei primi che si dedicò a descrivere questi fenomeni e gran parte delle conoscenze odierne derivano dai suoi lavori.

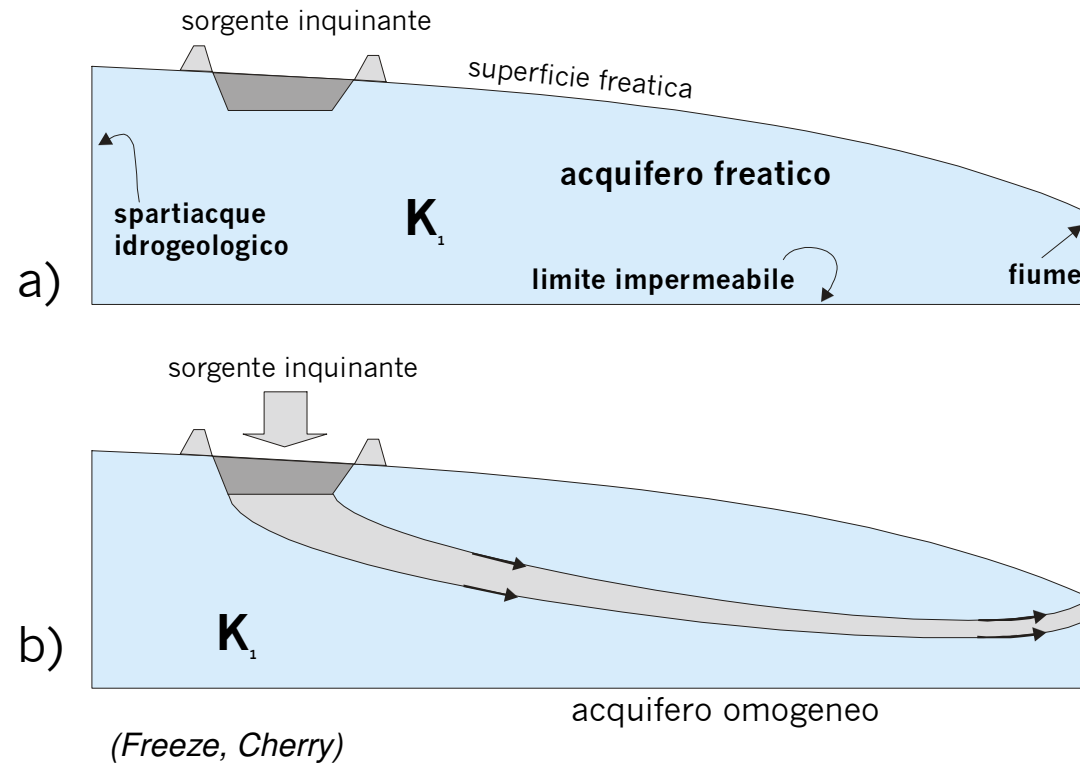
Convezione

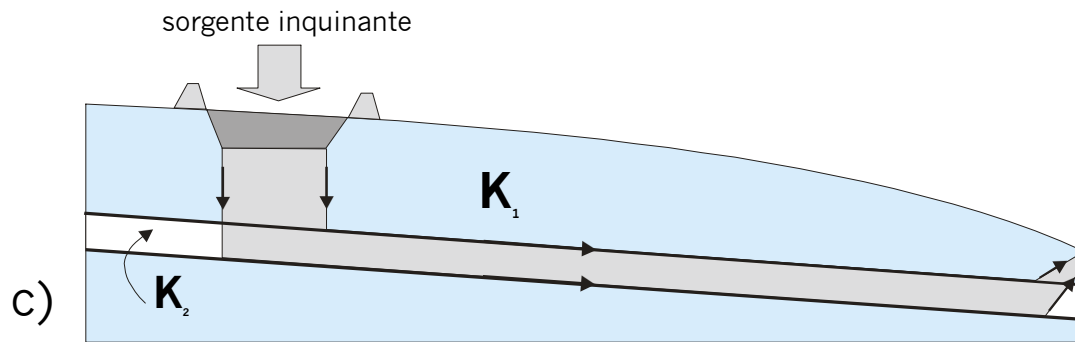
La rappresentazione dei fenomeni di trasporto per convezione (advezione) è la più semplice e più precisa, perchè la sostanza è trasportata ad una velocità uguale a quella dell'acqua di falda e quindi segue la legge di Darcy ($v = k_i / n_e$).

Questo non ci esime dal considerare tutte le altre caratteristiche idrogeologiche, come ad esempio le variazioni di conducibilità idraulica che, nei mezzi eterogenei provocano una deviazione delle linee di flusso.

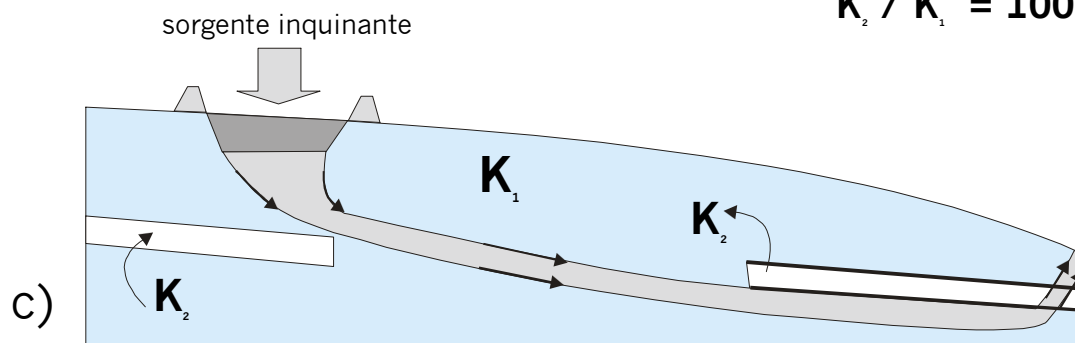
Per illustrare il fenomeno si veda la figura seguente.

Effetto della stratificazione sulle linee di flusso, in falda freatica e moto permanente

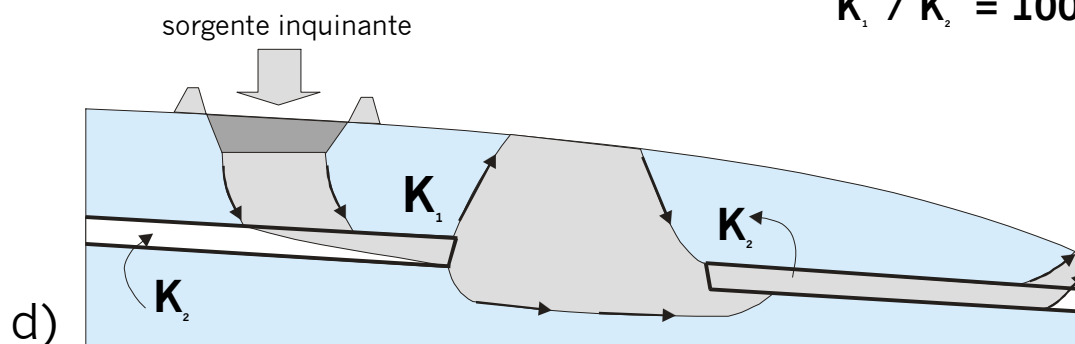




$$K_2 / K_1 = 100$$



$$K_1 / K_2 = 100$$



(Freeze, Cherry)

$$K_2 / K_1 = 100$$

Effetto della stratificazione sulle linee di flusso, in falda freatica e moto permanente
(Freeze, Cherry ridisegnato)

Per semplicità, il composto non reagisce con il terreno e non è considerato il fenomeno della dispersione.

Dispersione

A livello microscopico, le variazioni di velocità si trasmettono diversamente tra i pori del sedimento secondo uno schema determinato dalla granulometria, orientamento delle particelle, e tortuosità dei pori.

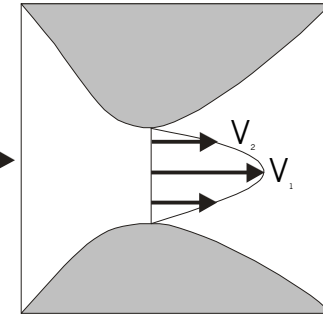
A causa dell'eterogenità locale le particelle di soluto, allontanandosi dalla sorgente, pur non reagendo con il mezzo, si espandono nell'acquifero occupando un volume via via maggiore a valle del flusso e quindi diminuendo la concentrazione generale dello stesso.

Durante questo processo varia, per attrito, la velocità di spostamento del soluto, vi è un diverso tragitto attraverso i granuli e gli stessi passaggi sono più o meno tortuosi. Tutto questo ha come conseguenza la variazione di velocità longitudinale, trasversale e verticale del soluto.

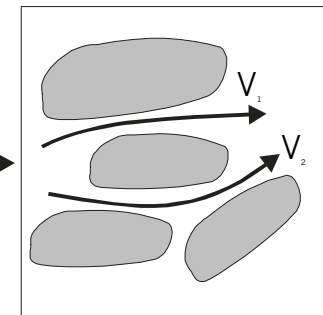
il fenomeno di dispersione, nel trasporto di un soluto, si verifica a livello granulare per:

- attrito tra i granuli
- differenza di percorso
- tortuosità dei pori

Dispersione longitudinale

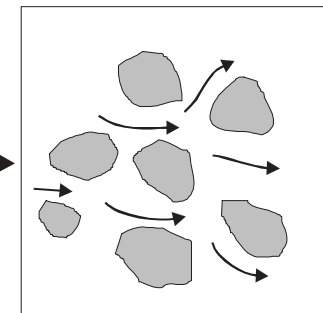


V_1 maggiore di V_2



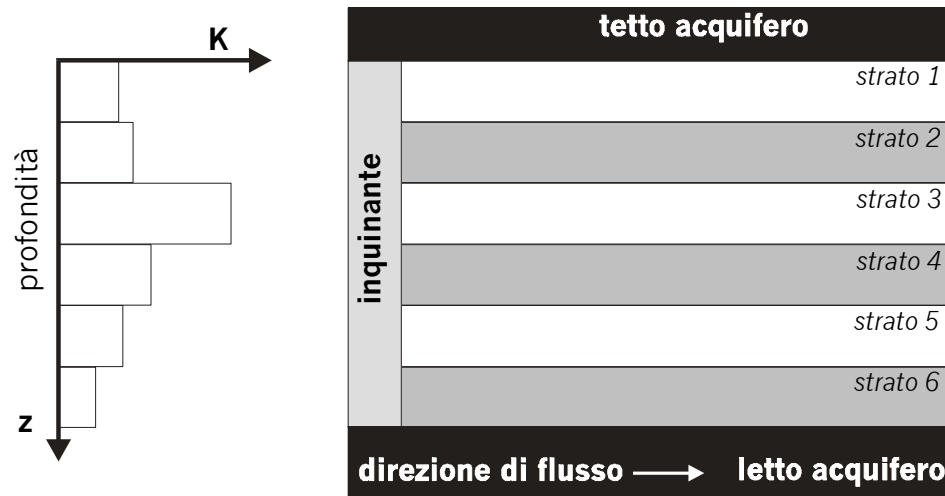
V_1 maggiore di V_2

Dispersione trasversale

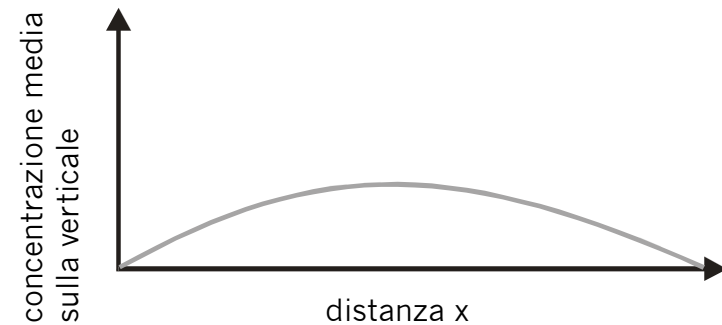
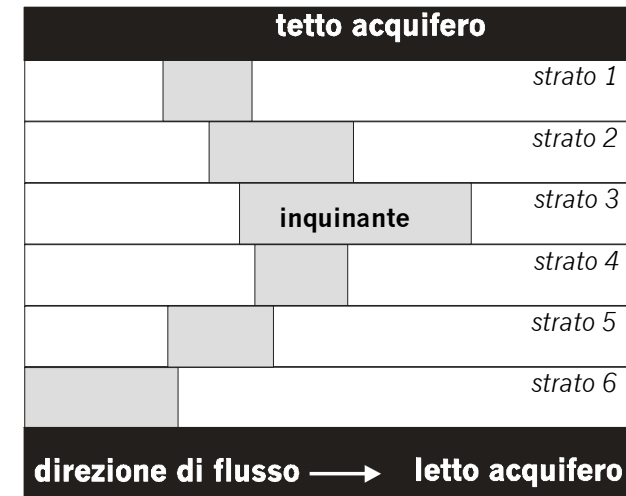


V_1 diverso da V_2

Distribuzione dell'inquinante al tempo $t = 0$



Distribuzione dell'inquinante al tempo t_1 , maggiore di 0



Rappresentazione dei processi di macrodispersione dovuti ad un acquifero stratificato (Kinzelbach)

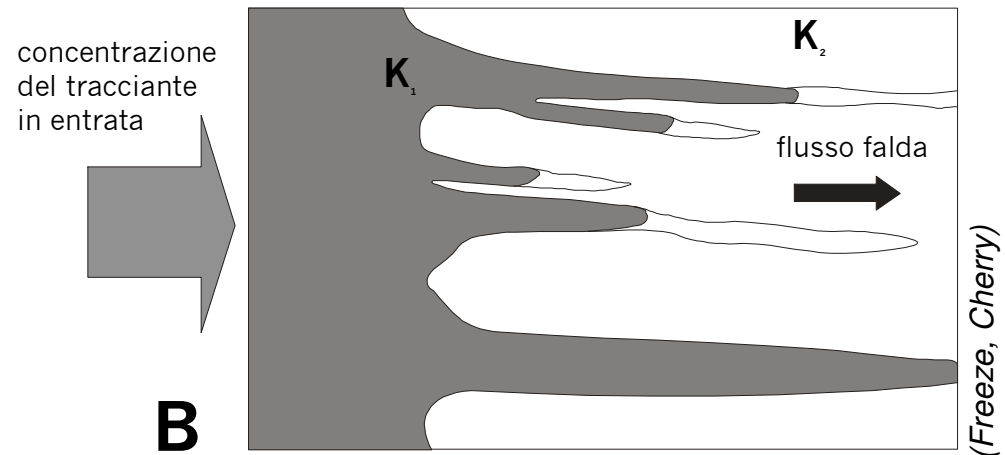
(Idrogeologia: Uso dei traccianti in idrogeologia)

Esiste pertanto, e va sempre valutata, una notevole diversità di comportamento del soluto in mezzi a diversa conducibilità idraulica

Spostamento di una nube contaminante soggetta a fenomeni di dispersione idrodinamica



a seguito della presenza di lenti a diversa permeabilità, il tracciante raggiunge distanze maggiori in alcuni livelli piuttosto che in altri



mezzo a permeabilità variabile ($K_1 > K_2$)

La descrizione matematica dei fenomeni di dispersione riguarda soprattutto i mezzi isotropi omogenei in condizione di flusso permanente e per sostanze non reattive, ed è contraddistinta da un coefficiente di dispersione idrodinamica D_i , che descrive la variazione di soluto attorno al valore medio e permette di ricavare la concentrazione a diverse distanze dalla fonte, nonché la geometria del plume:

$$D_i = \alpha v + D$$

Con:

$$v = k_i / n_e$$

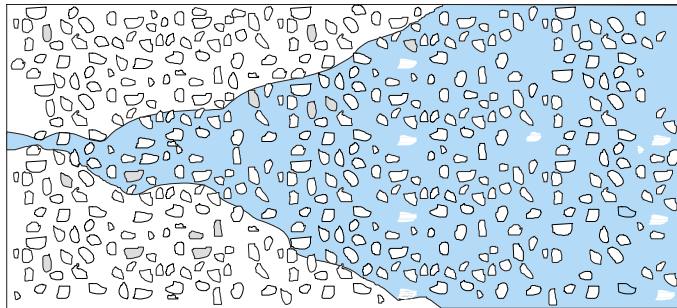
α = dispersività

D = coefficiente di diffusione molecolare

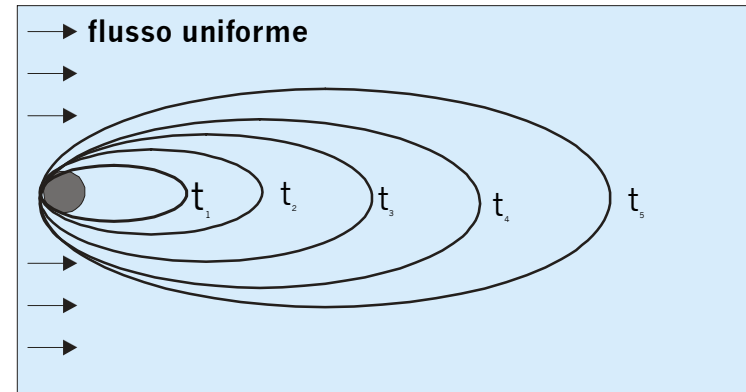
La dispersione è un fenomeno che avviene a livello microscopico, ed è causato sia da una diffusione molecolare (dovuta al moto browniano delle molecole di fluido) sia da un mescolamento idrodinamico durante il moto laminare.

Il risultato è una geometria a forma di triangolo del soluto, con il vertice al punto d'ingresso in falda, nel caso d'iniezione continua, o con una serie d'ellissoidi nel caso d'iniezione singola.

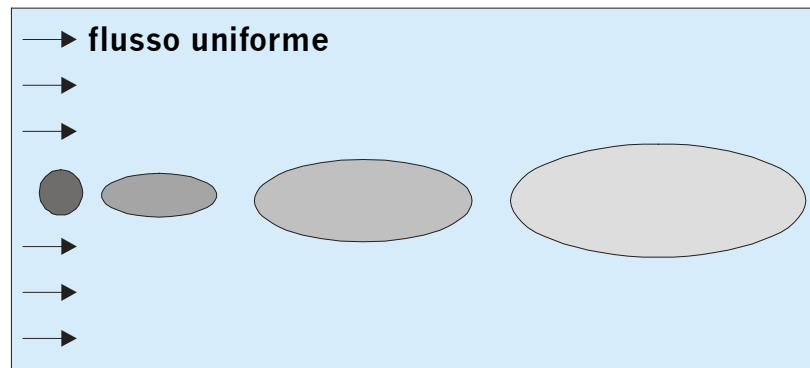
In situazioni con velocità di flusso elevate, la diffusione molecolare è in genere trascurabile.



dispersione di un tracciante lungo il flusso di falda, in un mezzo poroso



iniezione continua di un inquinante, da una sorgente puntiforme e morfologia del plume in tempi diversi



iniezione istantanea di un inquinante, da una sorgente puntiforme e modificazione del plume per effetto della dispersione

Negli acquiferi la dispersione si verifica quando vengono a contatto fluidi con caratteristiche diverse od un unico fluido passa attraverso i canalicoli di un terreno poroso.

Considerando un moto bidimensionale, l'allargamento del plume è in genere maggiore in senso longitudinale che in senso trasversale al moto e la massa di sostanza allontanandosi dalla sorgente, occupa uno spazio via via maggiore, diminuendo la propria concentrazione.

Negli studi di laboratorio si è visto poi, che la dispersività (α), la cui unità di misura è una lunghezza, varia nelle tre direzioni ortogonali.

Si parla, in genere, di dispersività longitudinale, trasversale, ed anche verticale. La prima varia tra 0,1 e 10 mm, mentre la seconda si mantiene più piccola di un fattore 5 o 20.

Considerando situazioni reali in campagna, i valori di queste due grandezze aumentano molto, a causa delle eterogeneità a piccola scala, ed in bibliografia si ritrovano ad esempio, dispersività longitudinali tra 0,1 e 500 m.

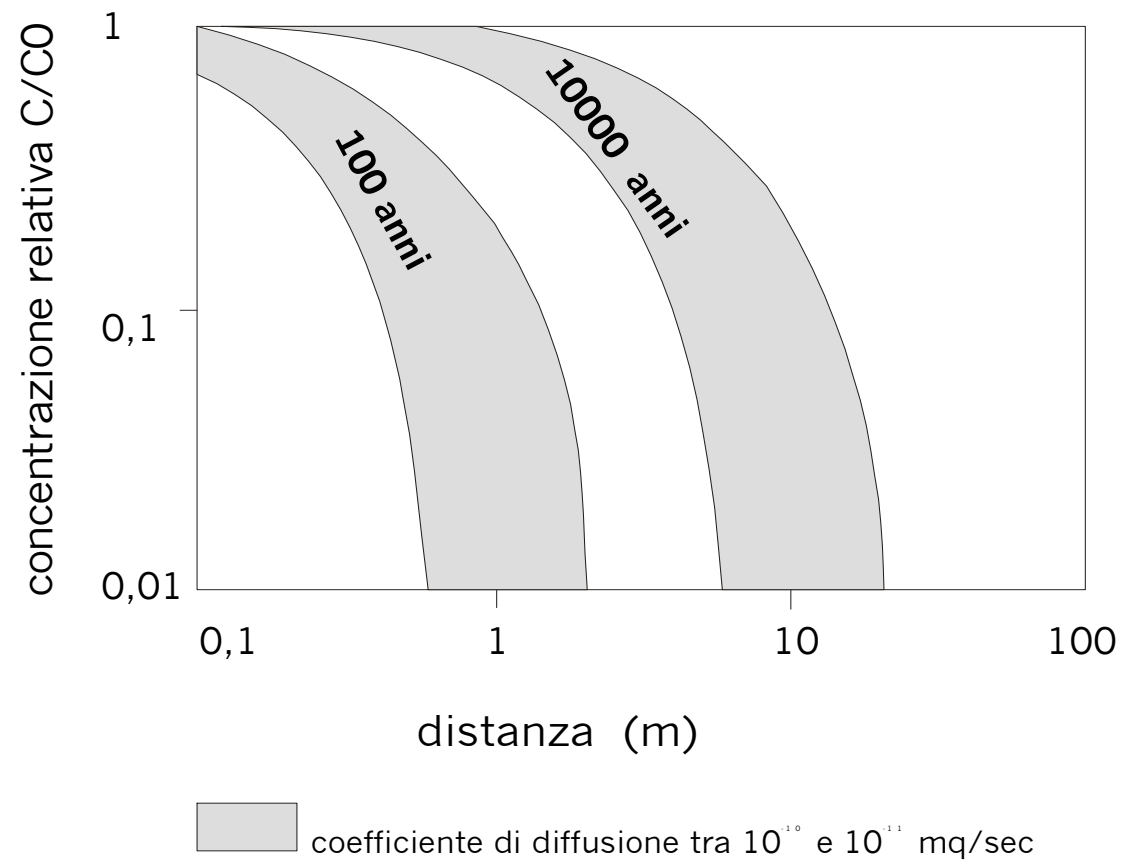
In situazioni con velocità di flusso elevate ($v > 1$ m/g), la diffusione molecolare è in genere trascurabile ed, in effetti, il suo valore è dell'ordine di 10^{-9} m² /sec.

Nello studio del fenomeno è quindi spesso sufficiente ricavare i parametri di dispersività longitudinale e trasversale (quelli nel piano orizzontale):

α_L e α_T da cui risalire ai valori di dispersione:

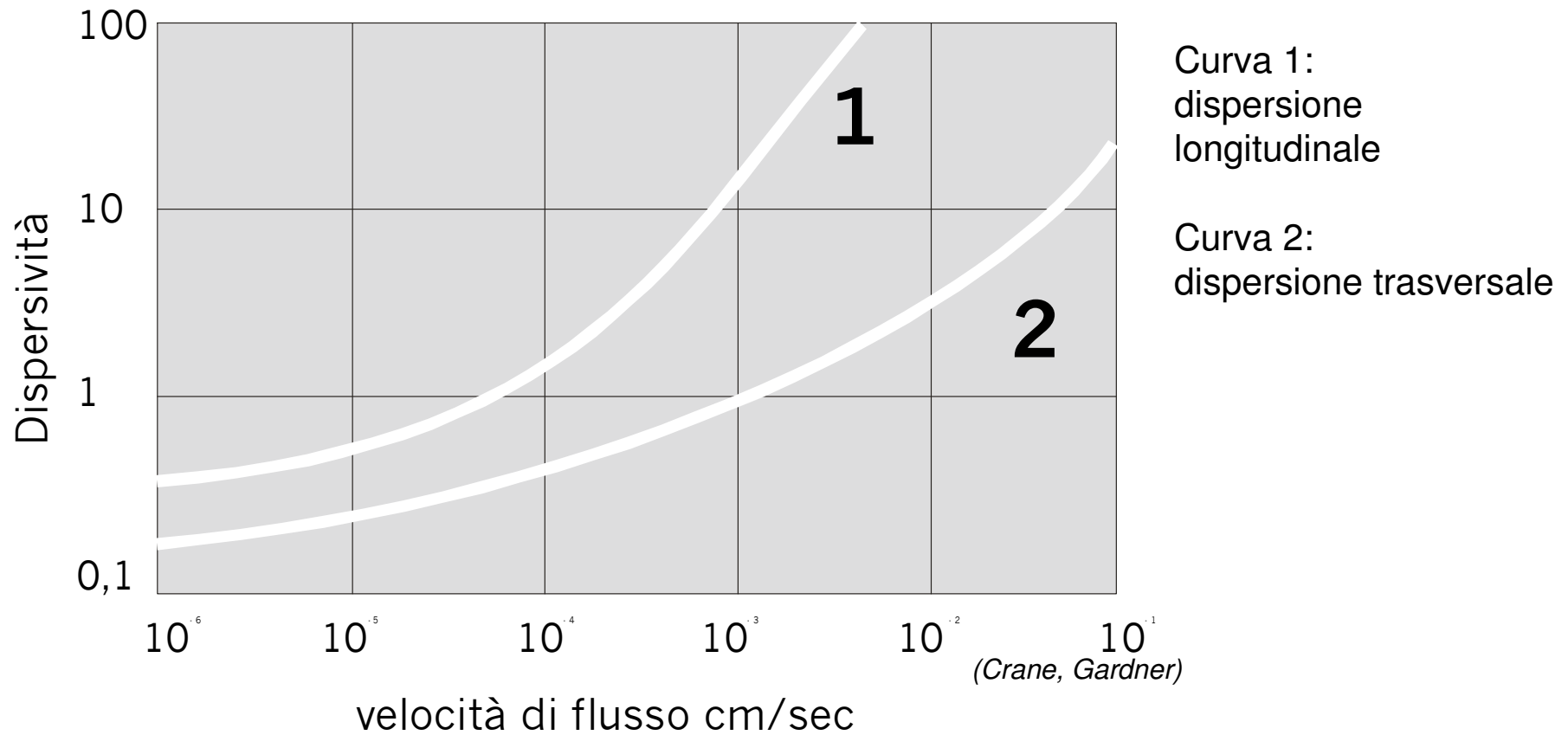
$$DL = \alpha_L v_e ; DT = \alpha_T v_e$$

Diffusione monodimensionale



posizione di un fronte di contaminazione che si sposta solo per diffusione molecolare, da una sorgente $C = C_0$ al tempo t maggiore di 0 (Freeze, Cherry)

Relazioni tra dispersione longitudinale e trasversale (da misure in laboratorio)



Assorbimento

Questo processo indica che una parte del soluto è trattenuta tra i pori dell'acquifero, assorbita dalla matrice e non contribuendo al calcolo della concentrazione.

Tale fenomeno causa un ritardo ed un rallentamento nel processo di trasporto.

La velocità effettiva di flusso è pertanto sostituita da v_e / R .

Il parametro R è definito come fattore di ritardo, ed è uguale ad 1 nel trasporto per convezione.

Esso dipende dal coefficiente di distribuzione della sostanza inquinante, K_d (ricavabile da tabelle), dalla densità e porosità efficace del mezzo e vale:

$$R = 1 + K_d \rho(1 - m_e) / m_e$$

Decadimento

Se l'inquinante è non conservativo, ma soggetto a degradazione, il tasso di decadimento (σ) è proporzionale alla concentrazione presente (C):

$$\sigma = \lambda C m_e$$

dove λ è la costante di decadimento per la specifica sostanza.

Da notare che se $\lambda = 0$ l'inquinante resta in falda non degradato.

PROVE DI TRACCIAMENTO

Una prima distinzione riguarda il tipo di acquifero su cui sono effettuate: poroso o fratturato.

Nel primo caso è quasi sempre possibile ricostruire la curva di restituzione del tracciante, mentre nel secondo, molto spesso si ricava una velocità approssimata del flusso od in certi casi la sola conferma o meno della comunicazione diretta tra punto d'immissione e punto di sbocco.

L'immissione istantanea del tracciante in falda, determina dopo qualche tempo, al punto di misura, una curva di restituzione caratteristica ed in genere dalla forma a campana.

In ordinata si trova la sola concentrazione od il rapporto C/C_0 ed in ascissa il tempo.

A seconda del valore di t considerato, si possono calcolare diversi valori di velocità.

Se la curva ha una forma molto piatta è consigliabile indicare sempre il valore scelto di t per calcolare la velocità.

Acquiferi porosi

(misura dei parametri idrogeologici)

I piezometri devono essere vicini tra loro

Si usa con valori di K elevati

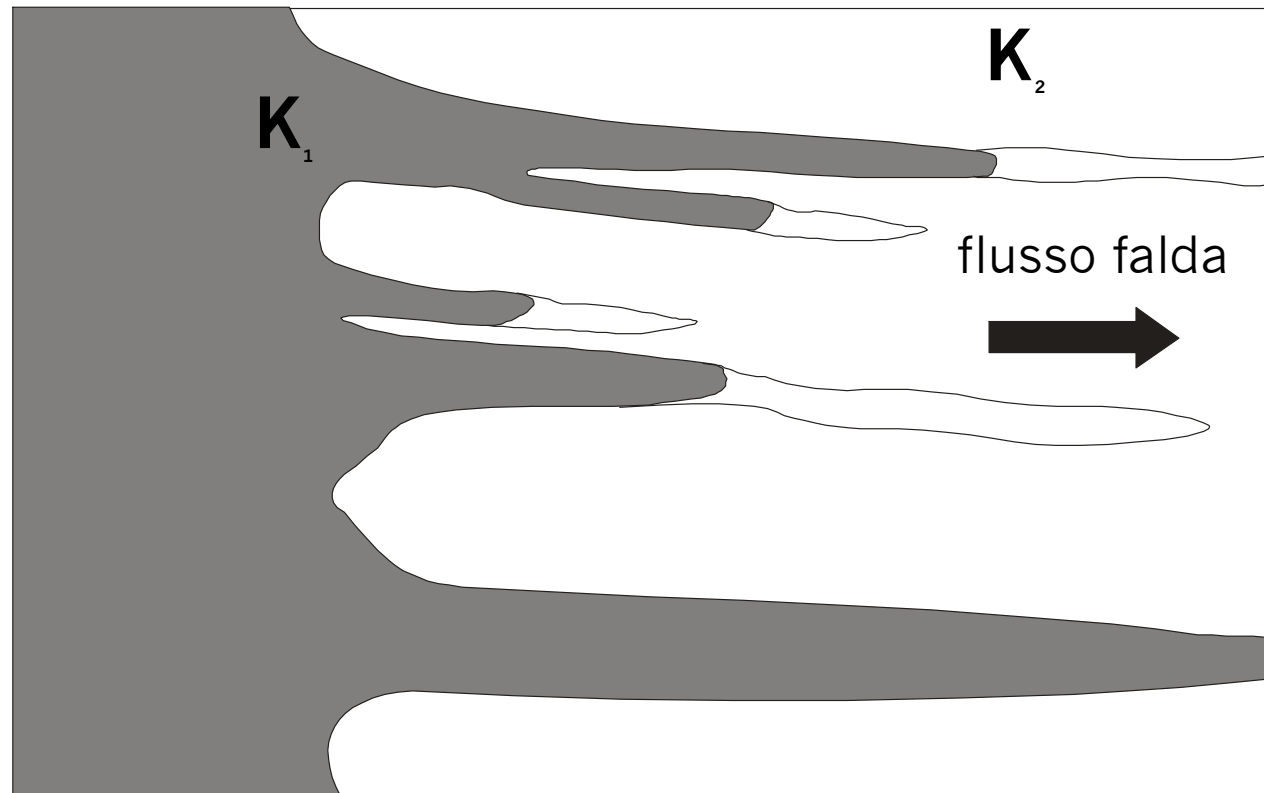
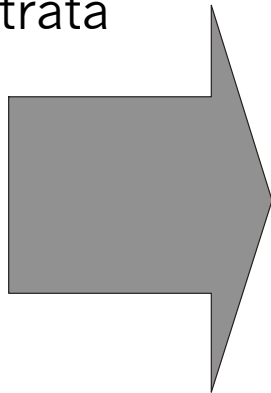
È necessario essere sicuri della direzione di flusso
e posizionare i due pozzi lungo di essa

Il tracciante deve essere conservativo

Si deve conoscere bene la stratigrafia

I filtri dei due piezometri devono essere nello stesso livello stratigrafico

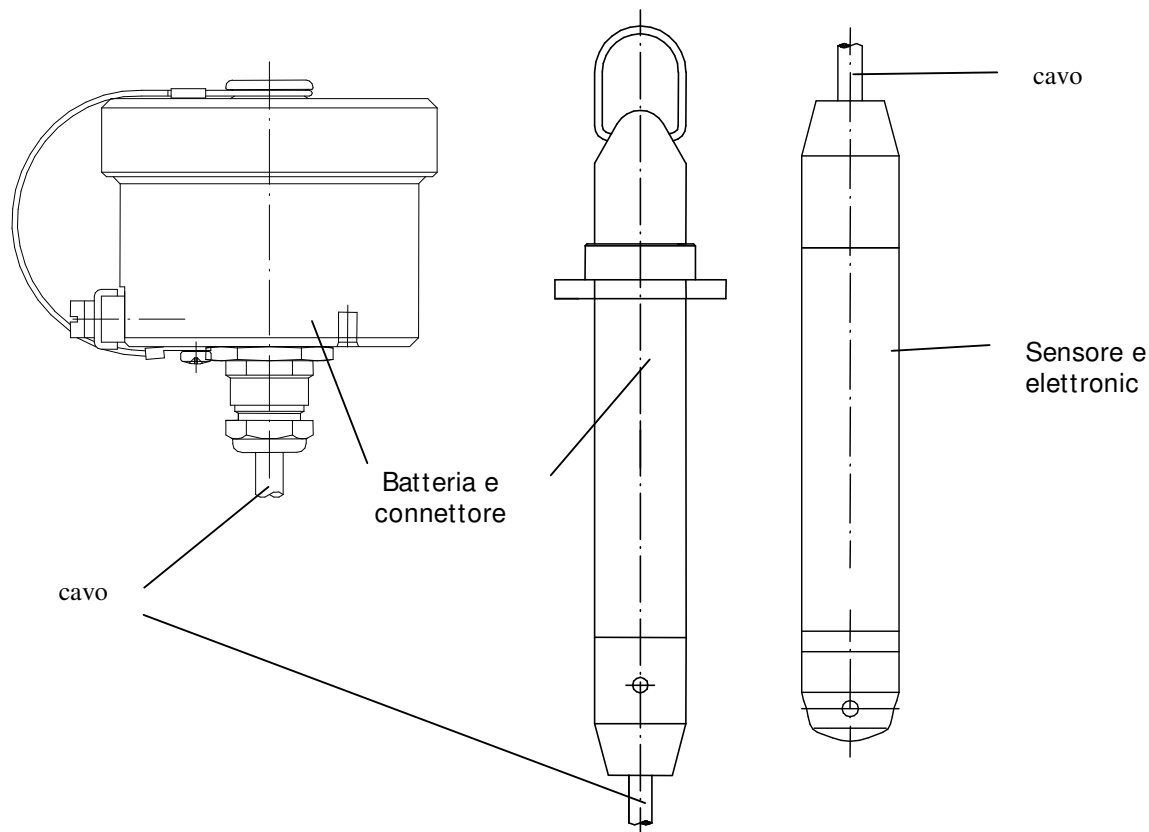
concentrazione
del tracciante
in entrata



mezzo a permeabilità variabile ($K_1 > K_2$)

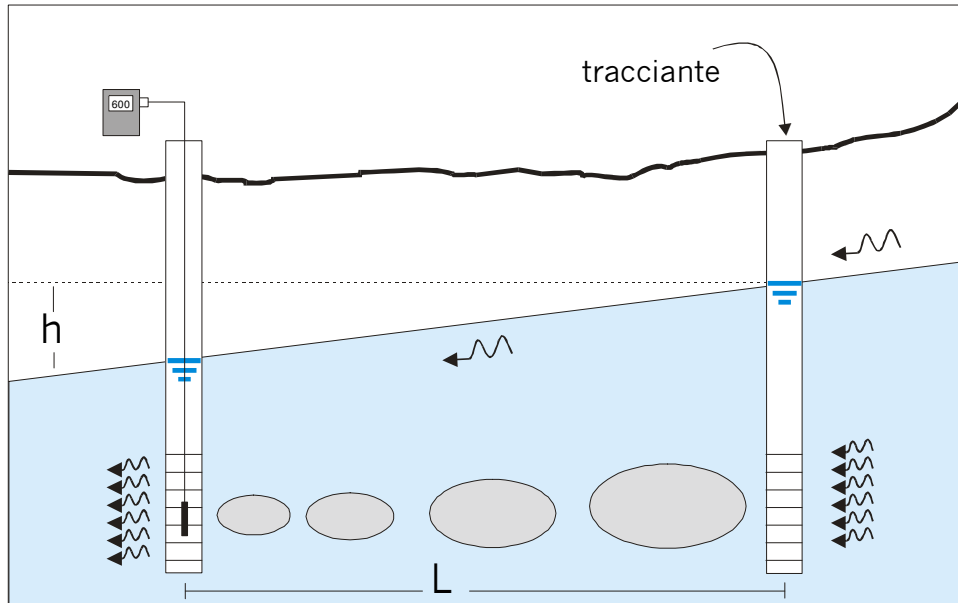
a seguito della presenza di lenti a diversa permeabilità, il tracciante raggiunge distanze maggiori in alcuni livelli piuttosto che in altri

Per tenere sotto controllo una falda si ricorre sempre più di frequente alle sonde di misura del livello con l'abbinamento anche di altri parametri (temperatura, conducibilità, ossigeno disciolto ecc.). Tali strumenti rilevano a scadenze prefissate il parametro richiesto, scaricandolo in un data logger che può registrare migliaia di misure (oltre 100000 dati in alcuni modelli). Il trasduttore di livello è calato nel pozzo, molto al di sotto della quota piezometrica e registra la pressione del fluido come l'altezza d'acqua sovrastante il sensore. Per calcolare anche la variazione di pressione barometrica che agisce sulla falda e quindi anche sul sensore immerso, si utilizza un secondo trasduttore calato nel pozzo e fuori dell'acqua. Alcuni strumenti utilizzano invece un tubicino in teflon, di diametro molto piccolo che collega il sensore con la superficie.



Le sonde automatiche per il monitoraggio di livello e temperatura sono composte da due parti, collegate con un cavo: Una parte sommersa che contiene il sensore e la relativa elettronica. Una parte esterna, che contiene la batteria e il connettore per la connessione con il PC. Anche qui il connettore, quando non viene usato, viene protetto da un coperchio a perfetta tenuta.

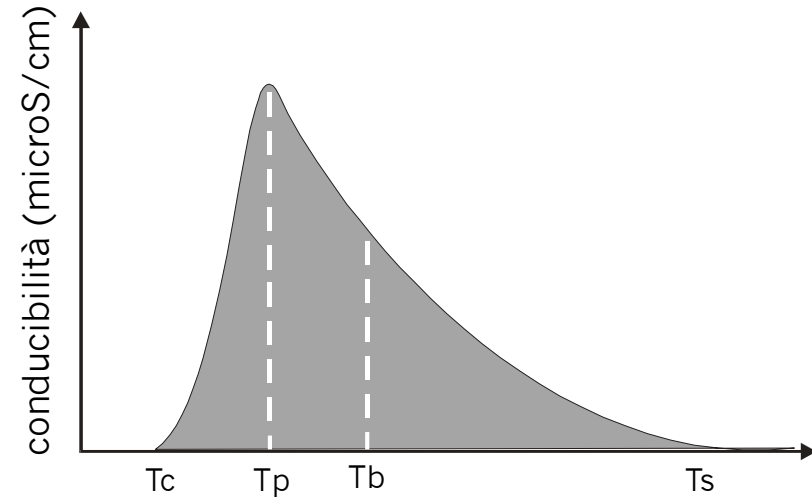
(per gentile concessione di STS, Milano)



Usando i vari tempi si ottengono diversi valori di velocità:

- velocità massima x/t_c
- velocità modale x/t_p
- velocità mediana x/t_m
- velocità minima x/t_s

Prova di tracciamento



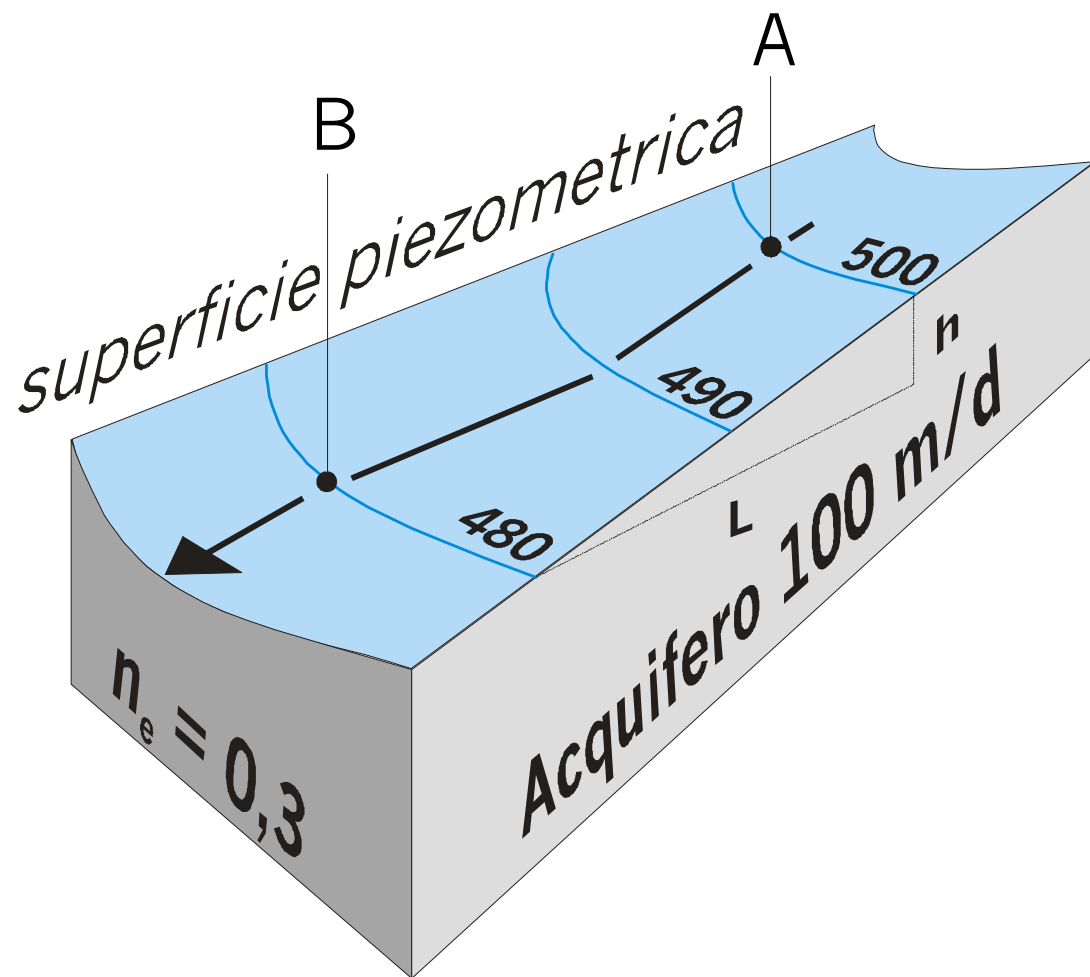
Immissione istantanea e rilevazione del passaggio di tracciante (curva di restituzione)

T_c = tempo di comparsa

T_p = tempo di picco

T_m = tempo di baricentro

T_s = tempo di sparizione



Calcolo della velocità effettiva

Dovendo calcolare la velocità della falda tra due punti A e B sulla sua superficie, si applica la legge di Darcy:

$$h/L = i \text{ (gradiente della falda)}$$

se $L = 1000 \text{ m}$; $i = 20/1000 = 0,02$

$$v = K h/L$$

(portata unitaria, specific discharge)

$$v = 100 \times 0,02 = 2$$

la velocità effettiva è

$$v_e = K i / n_e$$

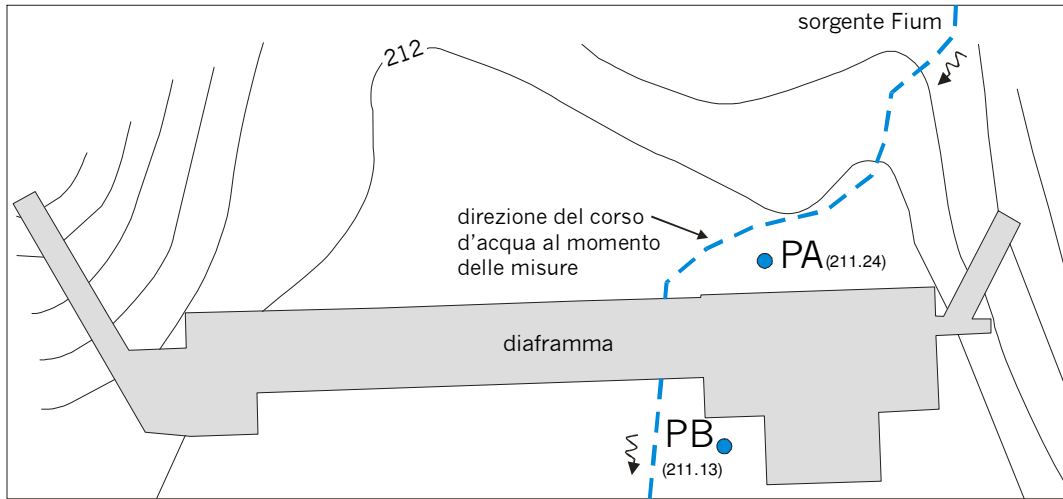
$$v_e = 2 / 0,3 = 6,6 \text{ m/d}$$

Il tempo impiegato da una particella fluida (o da un tracciante che si sposta solo per convezione) da A a B è:

B è:

$$t = s/v$$

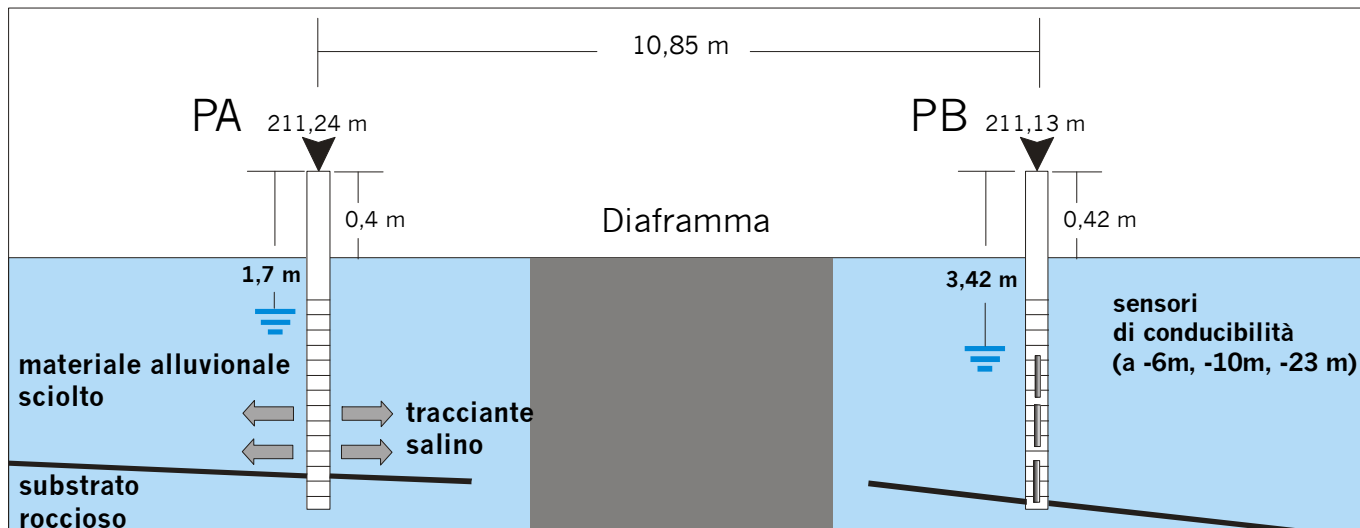
$$t = 1000/6,6 = 150 \text{ giorni}$$



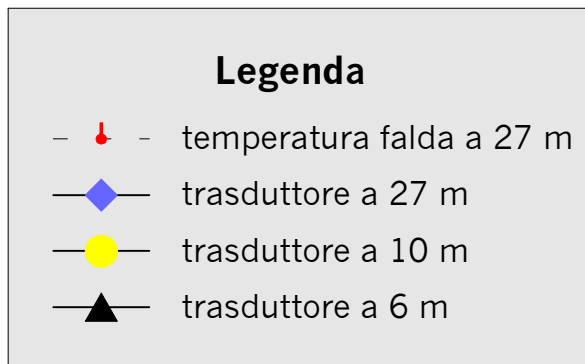
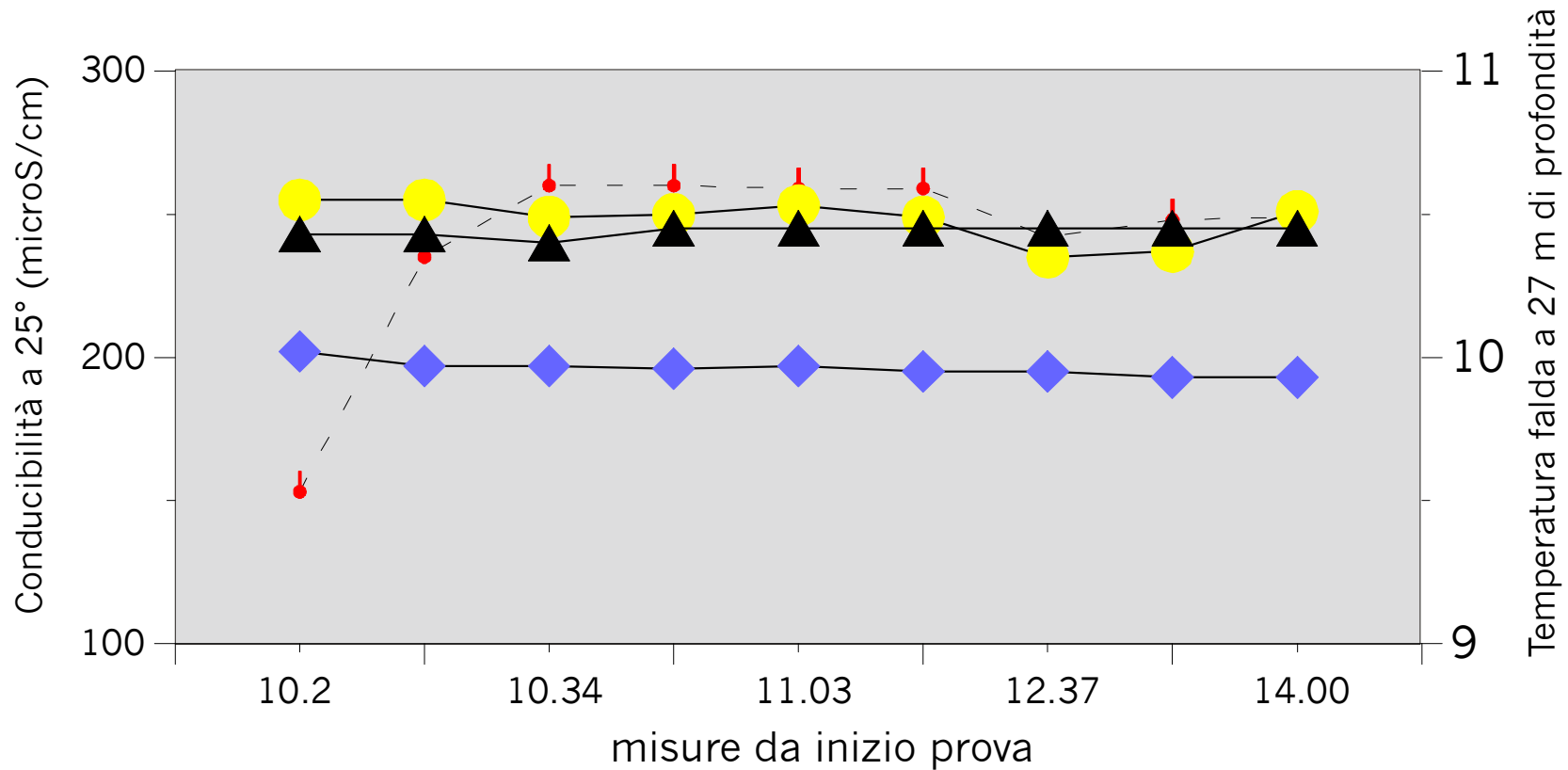
Utilizzo di sonde multiparametriche in una prova di tracciamento

Diaframma di contenimento della Sorgente Fium, BL, (*Studio Fileccia*)

in alto planimetria con ubicazione dei piezometri (PA e PB) perforati a cavallo del diaframma. In basso schema della prova, lungo un piano verticale. Il tracciante salino è stato immesso da PA, a monte del flusso di falda, e da una profondità di circa 22-26 m. Al fondo, i valori sono rimasti pressochè costanti durante tutta la prova (12400 microS/cm). I sensori di conducibilità sono stati posizionati nel piezometro PB, a valle, alle quote di 6, 10, 27 m sotto la bocca pozzo. Le misure si sono protratte per circa 10 ore senza segnalare aumenti di conducibilità nel PB, riconducibili ad un passaggio di sale.



(Idrogeologia:
Uso dei traccianti
in idrogeologia)



Utilizzo di sonde multiparametriche in una prova di tracciamento

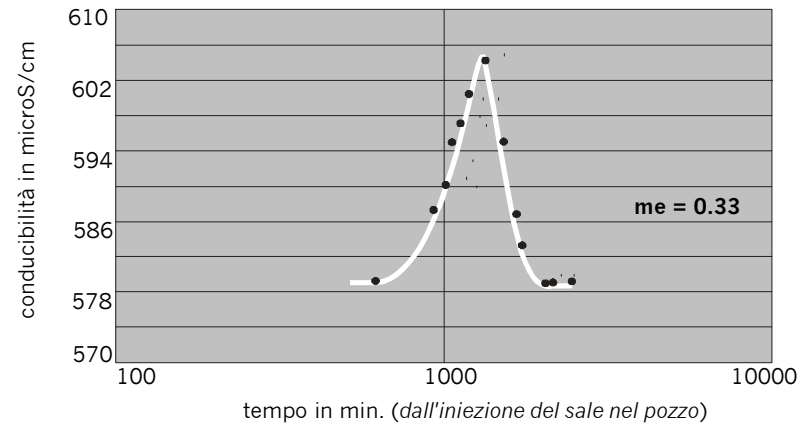
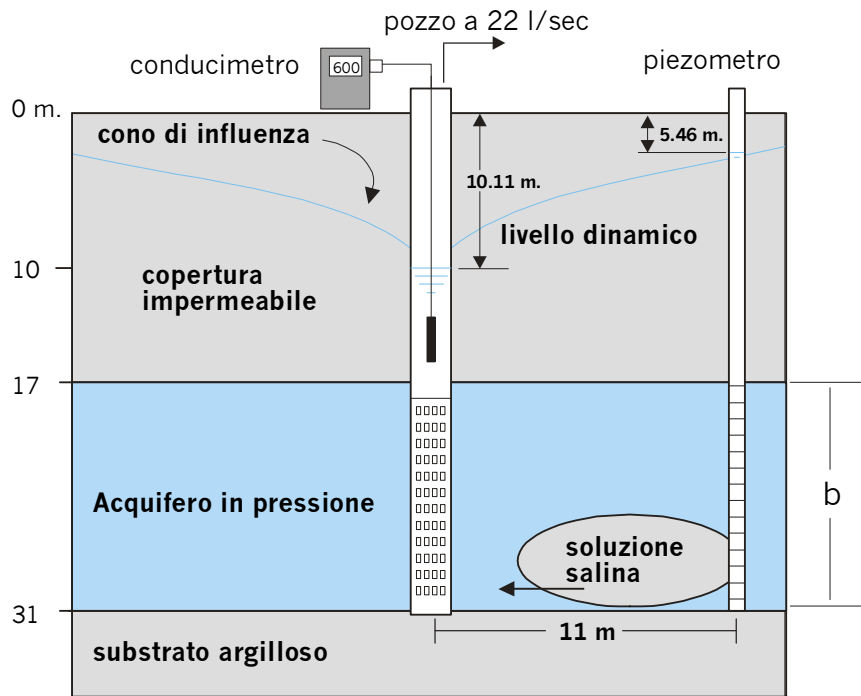
Valori di conducibilità alle varie quote nel piezometro a valle del diaframma. Captazione sorgente Fium, BL (Studio Fileccia)

Captazione della sorgente Fium (BL)



(Progetto SGI, Padova)

Flusso indotto



elaborazione dei dati ottenuti
e costruzione della curva di esaurimento.

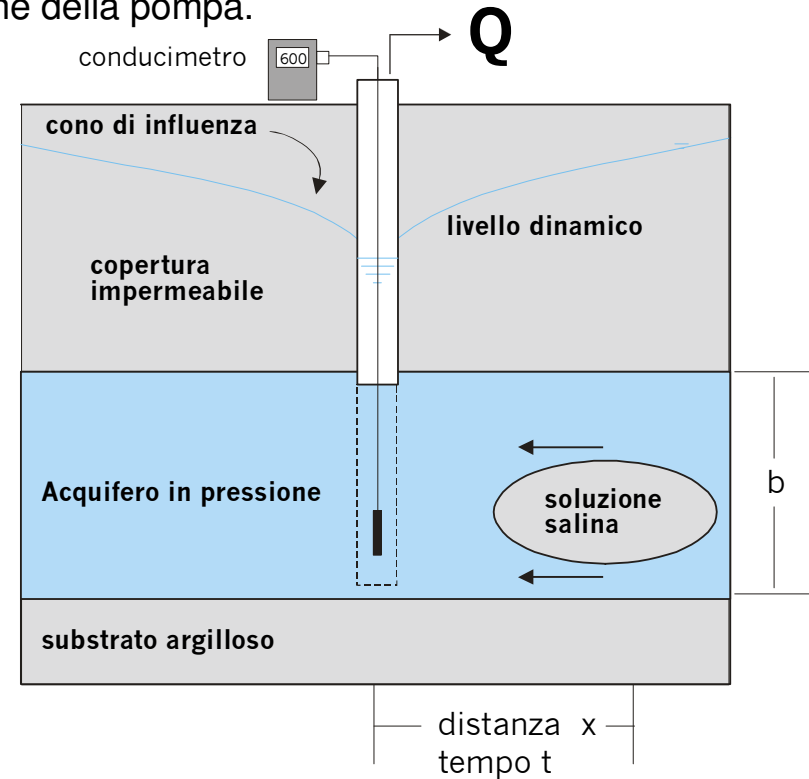
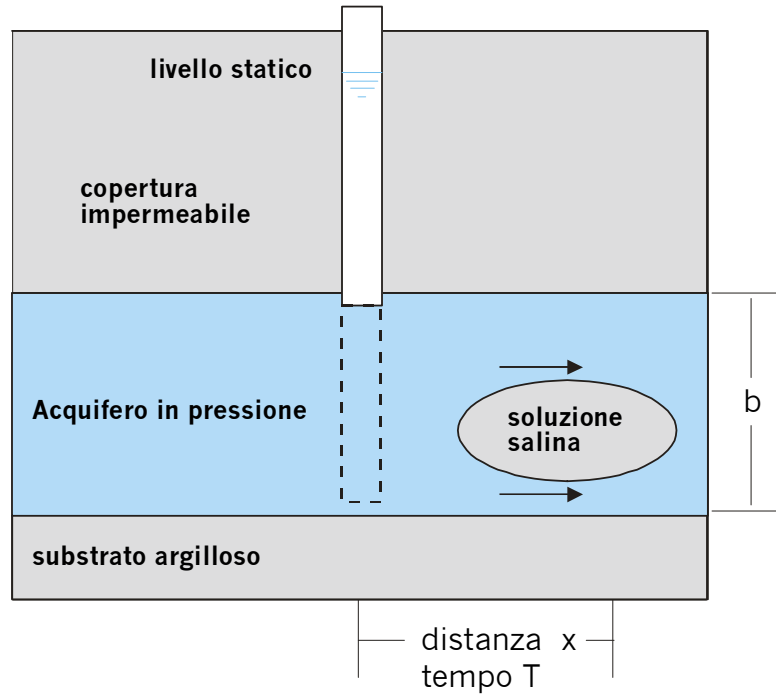
La prova serve per ottenere il valore della porosità efficace. Da un piezometro viene immessa una soluzione salina, mentre un vicino pozzo è in pompaggio. Il gradiente dinamico provoca dopo un certo tempo, l'arrivo del tracciante nel pozzo, che viene misurato tramite un conducimetro. Conoscendo il volume di acqua pompato durante la prova (Q), lo spessore di acquifero saturo (b), ed il tempo di arrivo del sale (t), si ottiene la porosità dalla relazione:

$$n = \frac{Q t}{\pi r^2 b}$$

Flusso naturale ed indotto

Il metodo si basa sul fatto che nella prima fase la soluzione si allontana dai filtri in un tempo T , trasportata dalla falda, quindi ritorna ai filtri in un tempo minore t , per azione della pompa.

In entrambi i casi la distanza percorsa x è la stessa.



La prova serve per ottenere il valore della velocità effettiva. Dal pozzo è immessa una soluzione salina, che viene poi recuperata con una pompa. Conoscendo il volume di acqua pompato durante la prova (V), la portata estratta (Q), lo spessore di acquifero saturo (b), il tempo di arrivo del sale, t e quello T , durante il quale la soluzione ha viaggiato in falda ad una distanza x dal pozzo, si ottiene la velocità dalla relazione:

$$V = Qt = x^2 \pi n_e b \quad \text{da cui:}$$

$$x^2 = V / \pi n_e b \quad x = \sqrt{V / \pi n_e b}$$

$$v_e = x/T \quad \text{cioè sostituendo: } v_e = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{Qt}{b \pi n_e}}$$

Metodo del punto di diluizione

Consiste nel diluire un tracciante in un piezometro, ricostruendo la curva di variazione della concentrazione nello stesso.

La prova permette di ottenere la velocità effettiva della falda, essendo questa in relazione alla diluizione che subisce il tracciante nel pozzo.

Nei casi d'eterogeneità verticale, l'immissione avviene in corrispondenza del livello in cui si vuole misurare la velocità di flusso, è necessario pertanto un'opportuna filtrazione del pozzo e preferibilmente un packer.

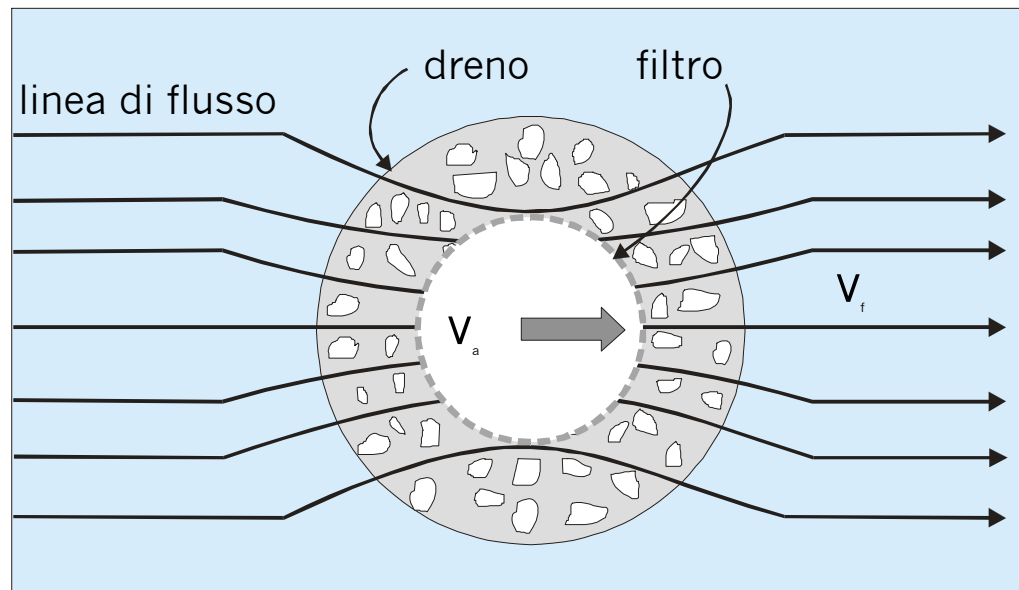
Nel tratto di filtro, il tracciante è immesso rapidamente e mescolato a mano a mano che si diluisce in falda.

L'effetto del dreno attorno al filtro causa una deviazione dei filetti fluidi e può falsare leggermente i risultati, si utilizzano pertanto dei coefficienti correttivi (Drost, Halevy).

V_a = velocità apparente, al
centro del pozzo

V_f = velocità di filtrazione

(Freeze, Cherry)



Intercettando più orizzonti si possono determinare velocità di filtrazione a diverse quote e questo è importante negli studi sulla propagazione degli inquinanti; Tre condizioni sono richieste per la validità della prova (Moser):

Regime permanente

Moto laminare

**Distribuzione uniforme del tracciante attorno ai filtri,
con diminuzione della concentrazione causata solo dal flusso
della falda, all'interno del volume filtrato**

In regime stazionario e flusso laminare, la concentrazione del tracciante nel tempo, diminuisce con la seguente relazione:

$$dC/C = - A \text{ va } dt/V$$

va = velocità apparente nel pozzo
 C = concentrazione del tracciante
 A = sezione perpendicolare al flusso
 (l x d)
 V = volume di pozzo marcato
 (in corrispondenza dei filtri)
 t = tempo

In un'immissione istantanea la velocità darcyana (vd) si ottiene dalla formula:

$$vd = - \frac{V}{\alpha A t} \ln C / C_0$$

d = diametro rivestimento
 l = altezza parte filtrata
 A = ld
 V = $\pi d^2 l / 4$

Quindi:

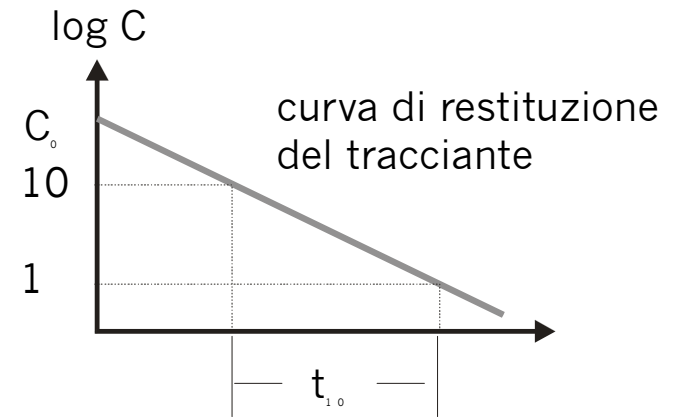
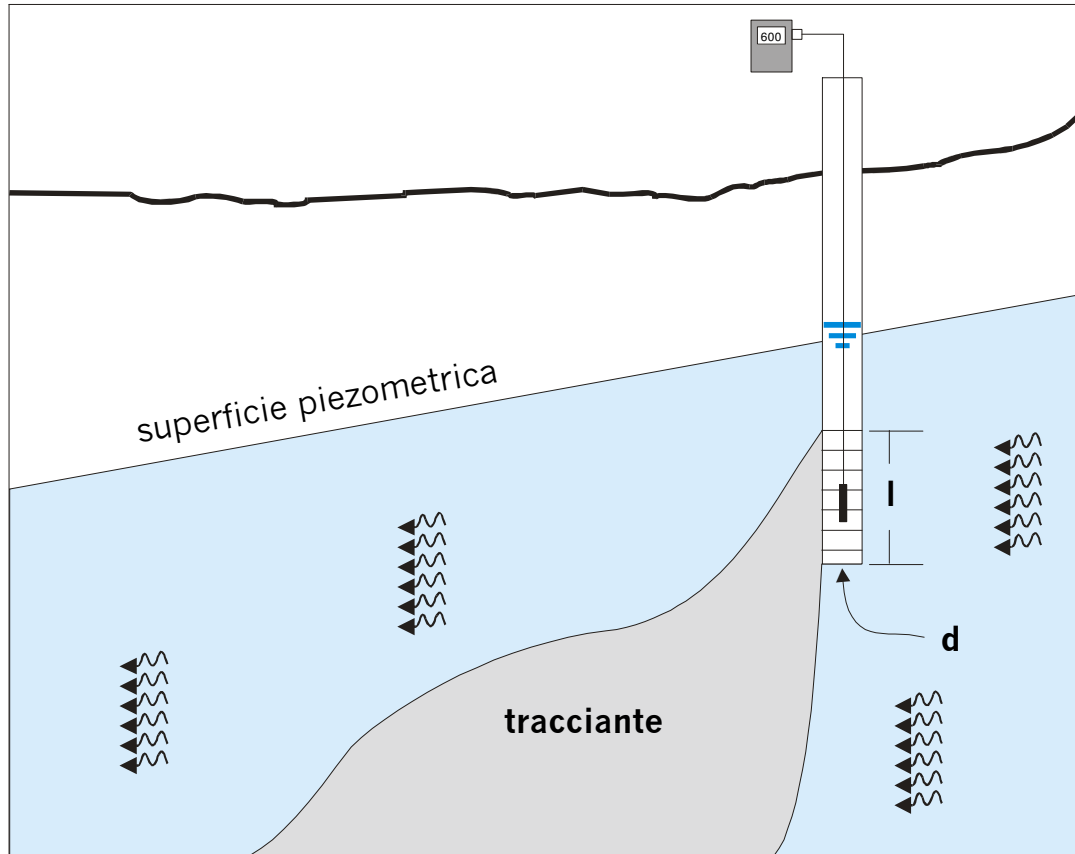
$$vd = (\pi d \ln C / C_0) / 4\alpha t_{10}$$

oppure con l'ordinata in scala log10 ed utilizzando un'intervallo C / C₀ pari ad un ciclo logaritmico (log₁₀ C / C₀ = 1)

$$vd = 2,3 V / \alpha A t_{10}$$

Il coefficiente α varia in base ai diametri foro – rivestimento e rapporti di conducibilità idraulica dreno – acquifero (K1 – K). In genere con K1 >> K, $\alpha = 2$ (Gaspar).

Metodo del punto di diluizione



$$V_d = 2,3 V / \alpha A t_{1.0}$$

Flusso naturale, sonda direzionale

Il metodo prevede una sonda in grado di iniettare neutroni e misurare la variazione di concentrazione nel tempo.

La sonda è collegata ad un sistema di orientazione in testa pozzo e permette di ricavare la direzione di flusso.

Flusso naturale, diagrafie di velocità

Si utilizza un pozzo filtrato, per tutto il tratto d'acquifero, in cui è diluito un tracciante radioattivo.

Con una sonda mobile che misura i c.p.s. (impulsi al secondo), si possono ricavare le velocità di flusso a varie quote e con due sonde fisse, quelle verticali.

Acquiferi porosi

(misura dei parametri idrodispersivi)

Con queste prove si ottengono valori relativi alla dispersività longitudinale e trasversale:

$$DL = \alpha L v_e$$

$$DT = \alpha T v_e$$

Con DL ,DT dispersione longitudinale e trasversale

αL , αT dispersività longitudinale e trasversale

V_e ,velocità effettiva di flusso

Il coefficiente di diffusione molecolare è in genere piccolo ($10^{-9} - 10^{-10}$) e trascurabile con velocità di flusso $<$ di 1 m/giorno.

Metodo di Sauty

Questo metodo può essere utilizzato con pozzo di emungimento e piezometro, in regime di flusso perturbato, con pozzo a monte ed uno o più pozzi a valle, in regime naturale.

Nel primo caso si ricava solo αL negli altri, anche αT .

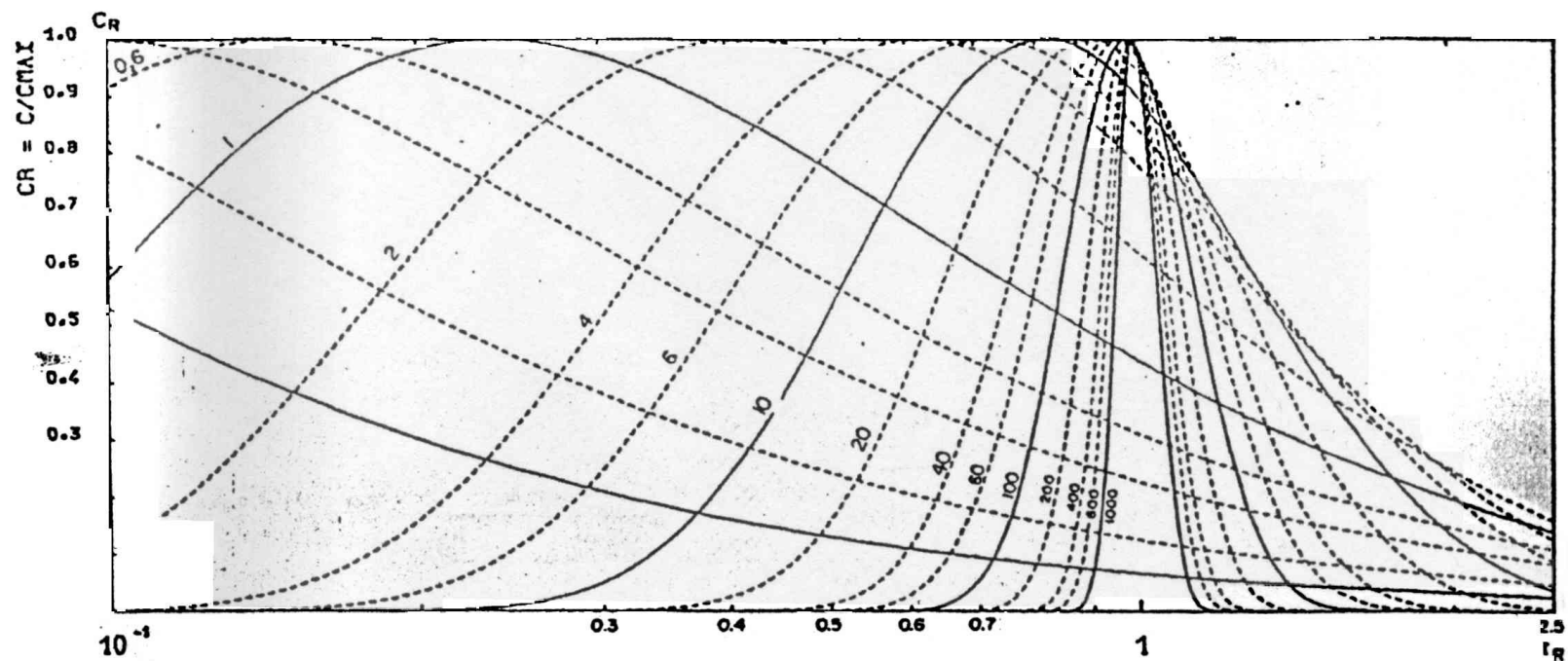
Per l'elaborazione si utilizzano dei grafici di raffronto (Sauty) ai quali sovrapporre la curva di restituzione del tracciante, ottenuta dal pozzo a valle, od in pompaggio. Dalla curva che meglio si sovrappone si ottiene un numero (numero di Peclet) che dà il rapporto:

$$P = r/\alpha$$

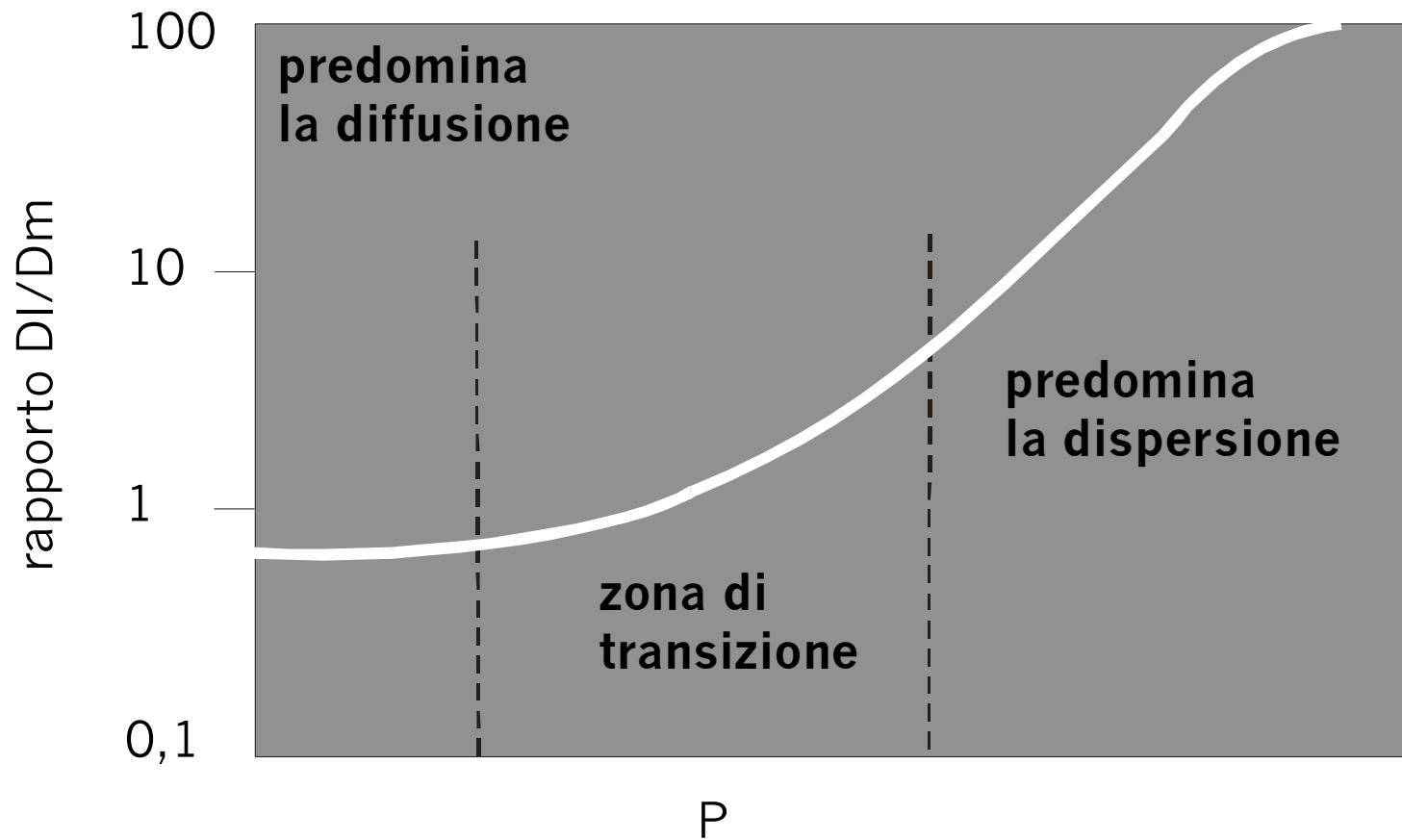
dove r è la distanza pozzo – piezometro ed α la dispersività.

In corrispondenza di $t_r = 1$ della curva standard ricavare il valore di t_c (della curva di campagna) per ottenere la porosità efficace (fig 37).

Grafico di Sauty, per iniezione istantanea e flusso convergente, con pozzo in pompaggio (Sauty)



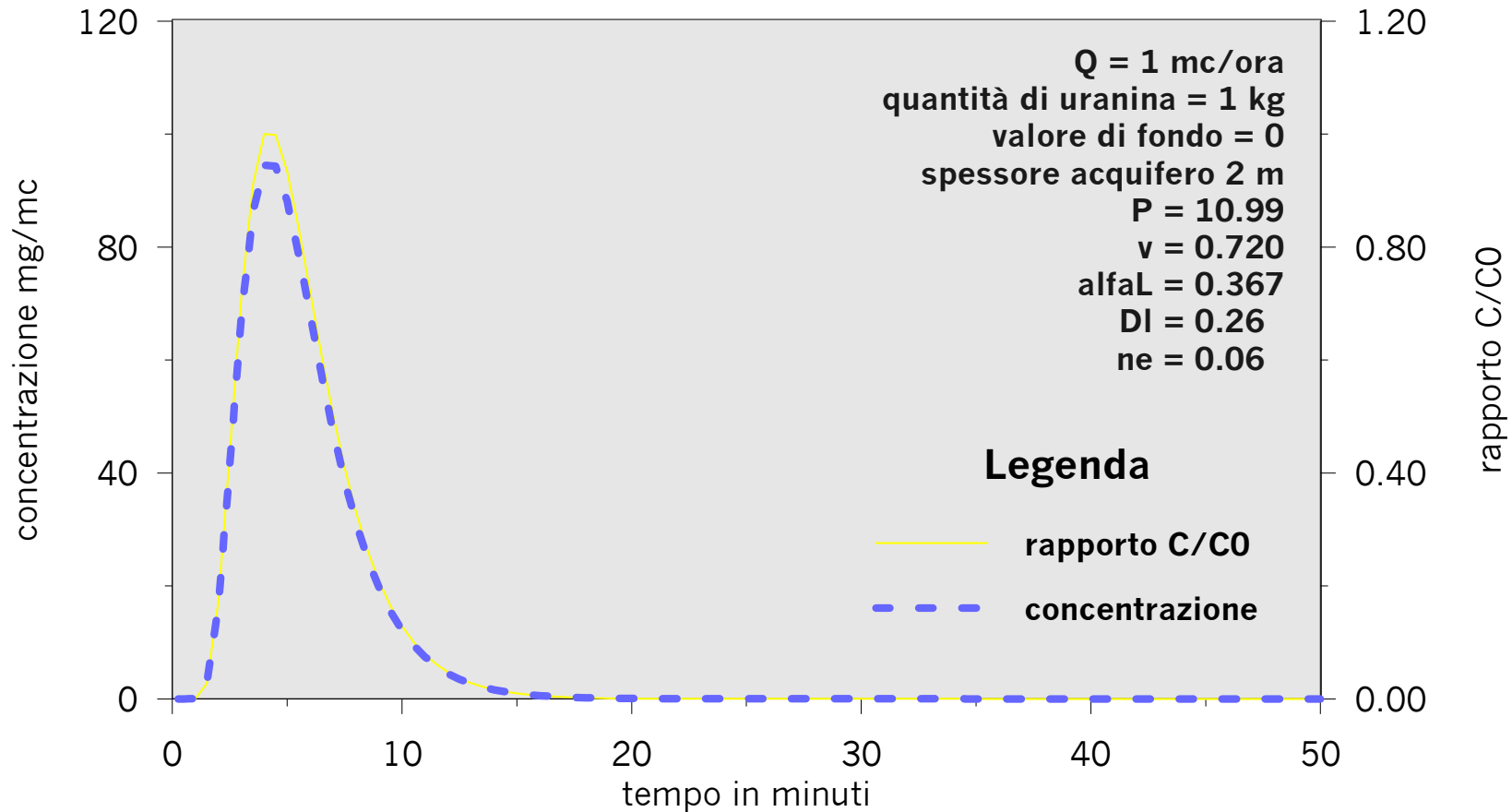
(Idrogeologia: Uso dei traccianti in idrogeologia)



relazione tra il numero di Peclet ed il rapporto tra dispersione longitudinale e diffusione molecolare in una sabbia uniforme (*Perkins, Johnston*)

Prova di porosità

calcolo della porosità efficace e della dispersività longitudinale
Iniezione istantanea (Dirac)



I parametri di dispersività sono stati calcolati sia con il metodo grafico di Sauty sia con un software che simula il fenomeno come monodimensionale

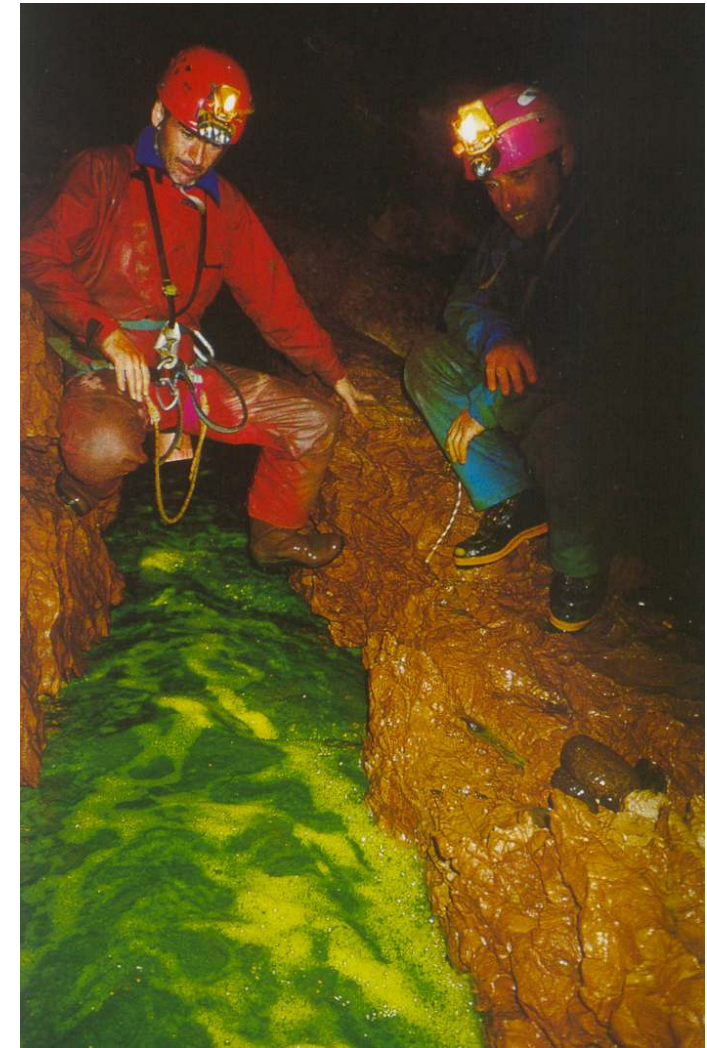
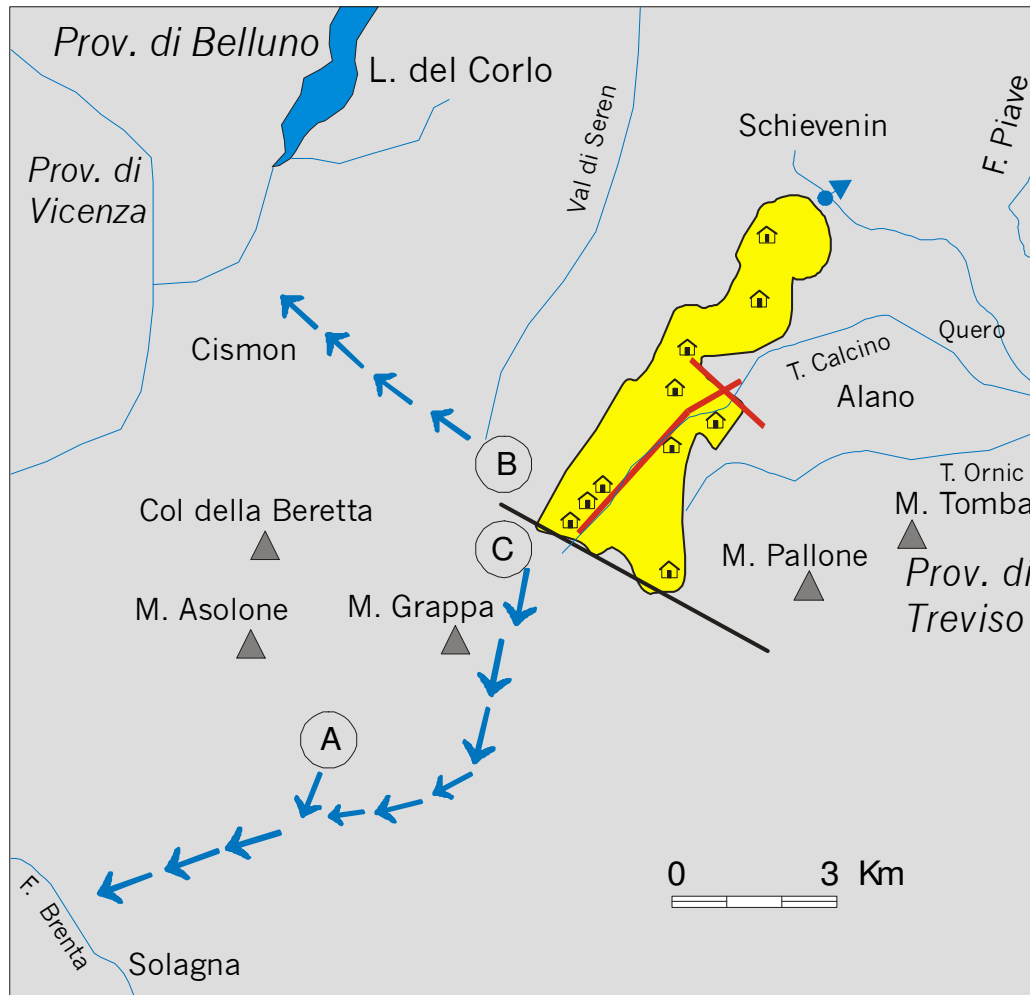
Prova di colorazione con fluoresceina



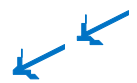
La prova è stata effettuata nell'ambito dello studio per la delimitazione del bacino idrogeologico di una sorgente carsica. Sono stati utilizzati 5 kg di fluoresceina immessi in un torrente sotterraneo a 450 m di profondità. La sostanza è stata evidenziata a circa 10 km di distanza dopo una ventina di giorni (*Studio Fileccia*)

Sorgente Tegorzo ed area del bacino idrogeologico

Corso d'Idrogeologia: Uso dei traccianti in idrogeologia



Immissione di fluoresceina



flusso sotterraneo



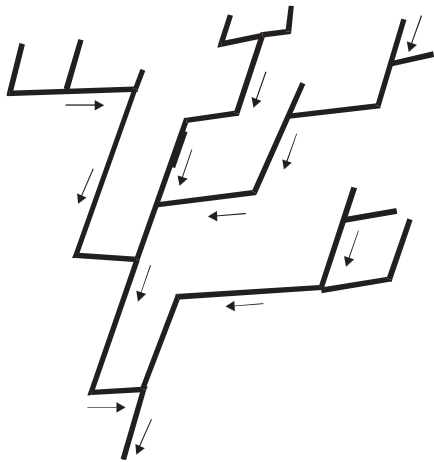
faglia






malga

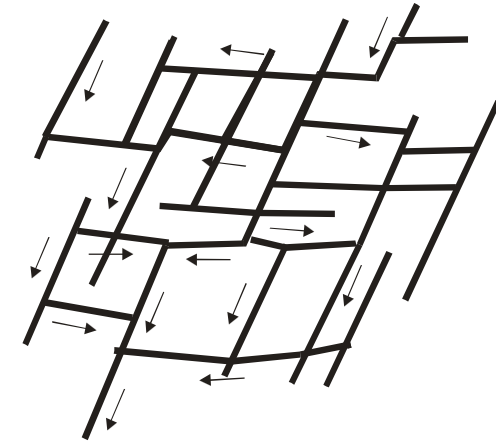
Prove di tracciamento e percorso sotterraneo da Abisso M. Oro (A); da Val Piana (B); da Abisso Spaurazzo (C)

Sistemi di circolazione in acquiferi fratturati e carsici (Vigna)






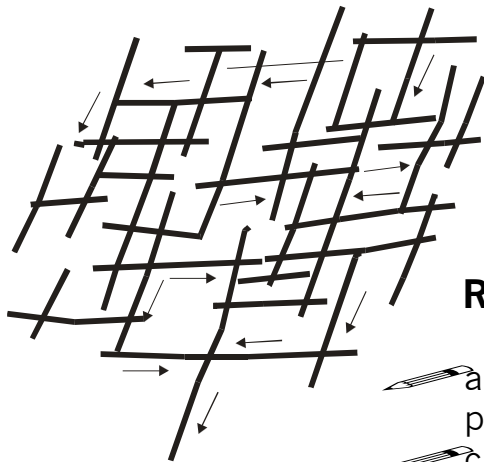
Rete a primario dominante

-  importanti vie di drenaggio preferenziale
-  organizzazione della rete di drenaggio
-  condotti sifonanti ma assenza di una zona satura tradizionale






Rete a dreni interdipendenti

-  numerose vie di drenaggio interdipendenti
-  circolazione semidispersiva nella rete di condotti e fratture
-  presenza di zone sature con più "sersem"



Rete a circolazione dispersiva

-  assenza di vie di drenaggio preferenziale
-  circolazione dispersiva nella rete di fratture
-  presenza di una zona satura tradizionale