

Corso di Idrogeologia Applicata
Dr Alessio Fileccia

Processi d'inquinamento degli acquiferi

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)

Processi d'inquinamento degli acquiferi

Con questo titolo si intendono tutte le modifiche chimico fisiche provocate artificialmente alle acque sotterranee.

Un classico esempio è quello della trasmissione di malattie:

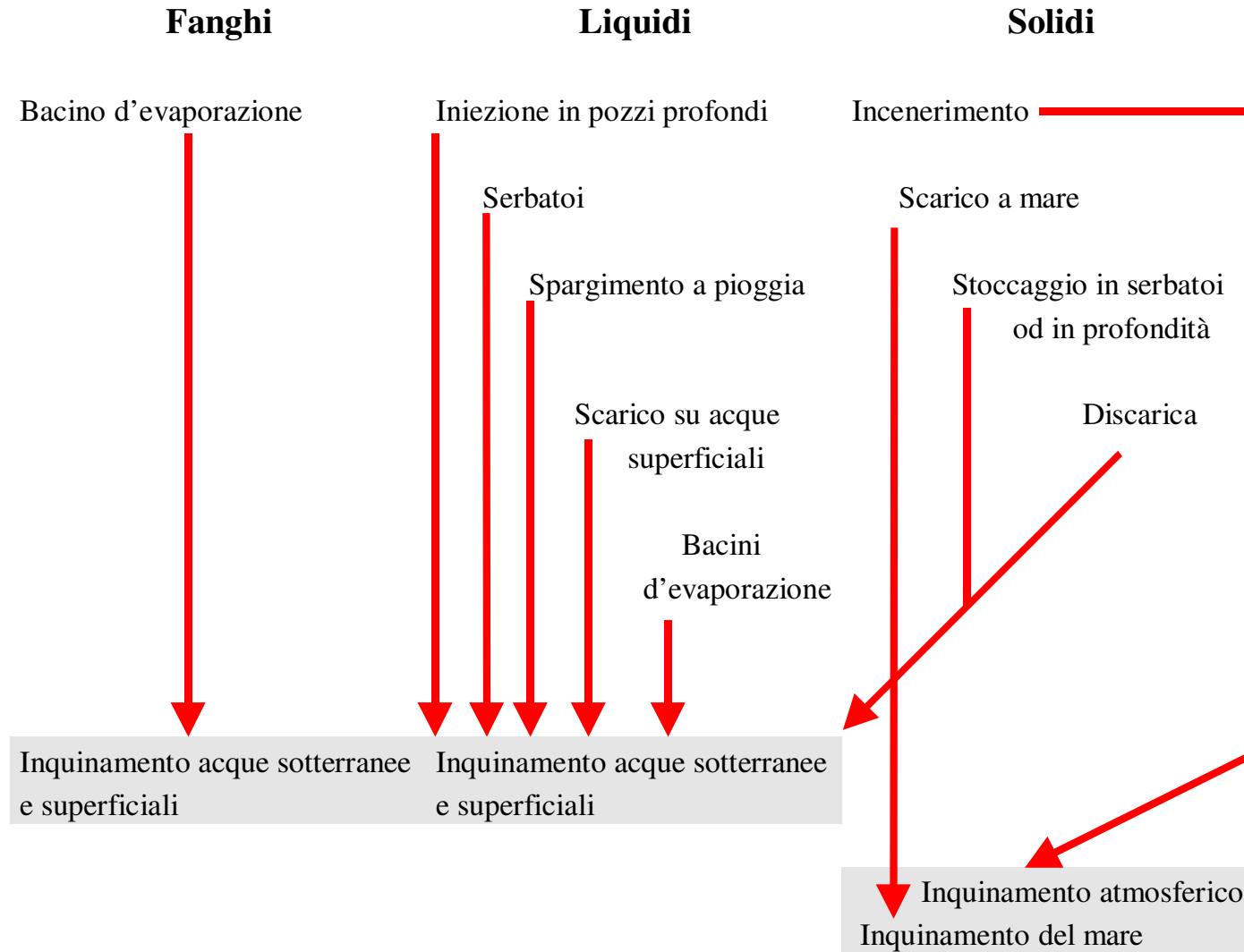
nel 1854 il dr J. Snow, nel tentativo di ricercare le cause d'espansione del colera a Londra, notò che più di 500 persone che abitavano nel raggio di 80 m da un pozzo d'acqua potabile, morirono nell'arco di 10 giorni. A seguito di ciò, fu sufficiente rendere inservibile la pompa per bloccare l'epidemia in breve tempo.

Le sostanze inquinanti che interessano gli acquiferi, si presentano in genere, sotto tre stati d'aggregazione:

liquido, solido e misto (fango)

Per ognuno di essi sono disponibile alternative di stoccaggio, per quella frazione di rifiuto che non è più possibile recuperare o riciclare in qualche modo.

Tipo di rifiuto e smaltimento



(Idrogeologia: Processi d'inquinamento degli acquiferi)

Le principali attività umane o strutture di stoccaggio che, a causa di un'errata gestione, provocano l'ingresso o lo spostamento dei contaminanti nel sottosuolo, si possono ridurre alle seguenti:

- Agricoltura
- Insediamenti civili
- Discariche di rifiuti
- Scarichi industriali
- Serbatoi di liquidi pericolosi e/o di carburanti
- Attività mineraria
- Strade di grande traffico
- Sovrapompaggio in zona costiera

Fortunatamente il terreno, soprattutto se poroso, effettua un'attenuazione del fenomeno, in molti casi rimuovendo o bloccando il composto chimico estraneo.

Tale comportamento dipende sia dal tipo d'inquinante sia dalla situazione idrogeologica e si esplica mediante una serie di processi, presenti tutti od in parte:

- Filtrazione (blocco delle particelle solide)
- Assorbimento (operato soprattutto da: argille, ossidi od idrossidi metallici, materia organica)
- Processi chimici vari
- Decomposizione microbiologica
- Diluizione

Per formulare valide previsioni sulle direzioni che seguiranno i composti e sul grado d'attenuazione nel tempo, è necessario effettuare una corretta ricostruzione delle loro caratteristiche e dell'ambiente in cui si spostano.

Al termine di queste indagini sarà possibile ricorrere all'aiuto dei metodi numerici che, tramite una schematizzazione del flusso e del trasporto permetteranno di:

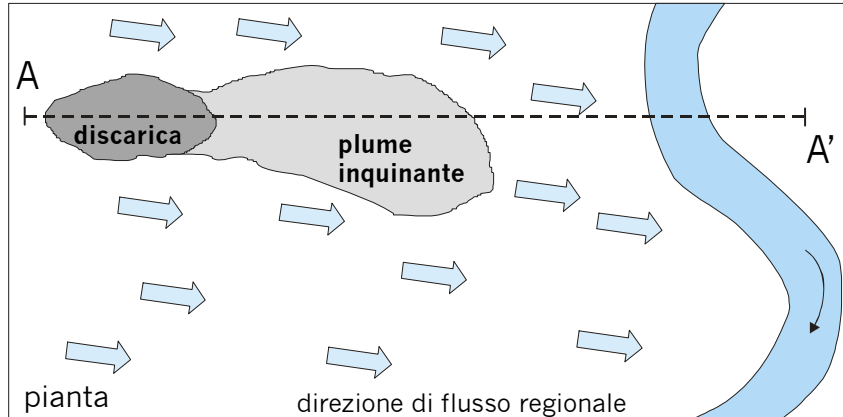
- Formulare le previsioni sulle direzioni di spostamento
- Formulare le previsioni sulle concentrazioni dei composti a medio e lungo termine
- Programmare il monitoraggio
- Programmare tecnicamente ed economicamente le soluzioni più adatte al recupero e/o bonifica dei siti

Approccio di studio dei fenomeni d'inquinamento

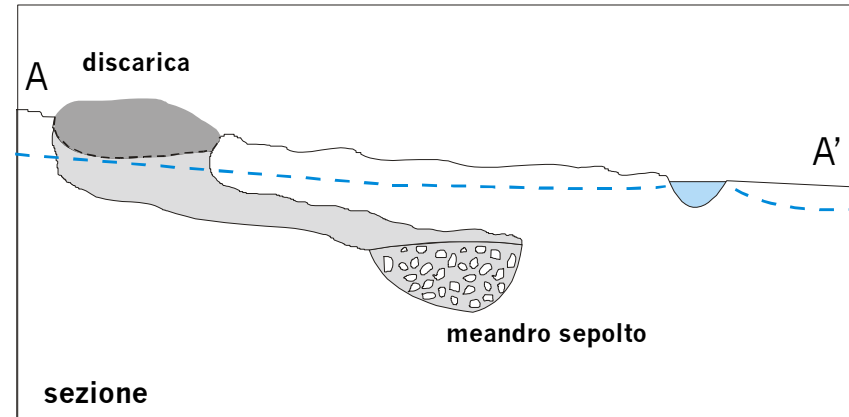
Idrogeologico	Chimico
Ricostruzione della geometria dell'acquifero	Tipologia dell'inquinamento (diffuso, concentrato) e della sorgente
Componenti del bilancio di flusso (entrate, uscite, punti di misura)	Tipologia delle sostanze e parametri caratteristici
Modello numerico del flusso	Interazione composti-acquifero
Modello numerico del flusso e trasporto Taratura del modello Monitoraggio Progettazione interventi	

Importanza della ricostruzione geologica del sito

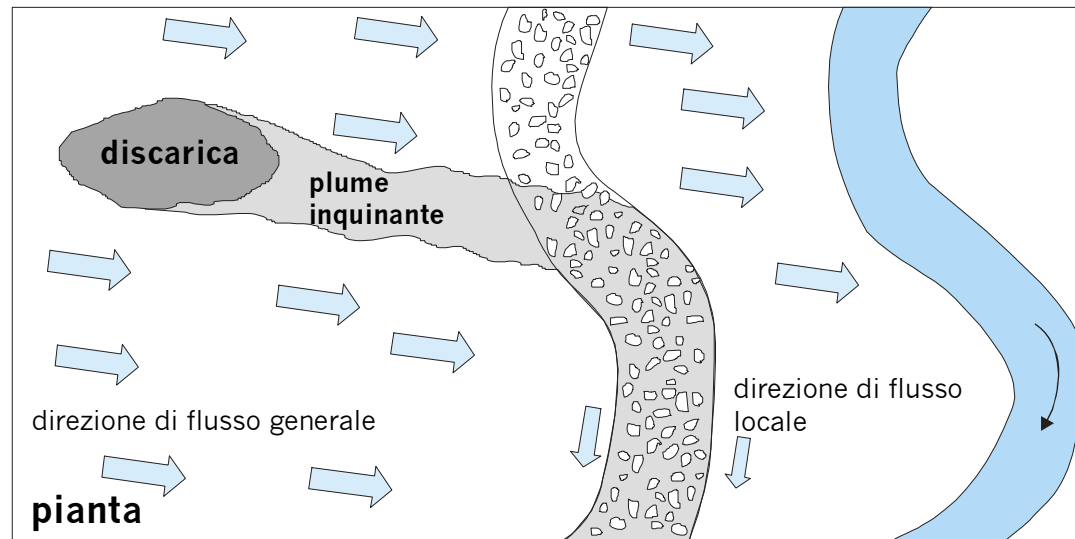
Ricostruzione idrogeologica approssimata



Ricostruzione stratigrafica lungo A-A'



Situazione idrogeologica reale



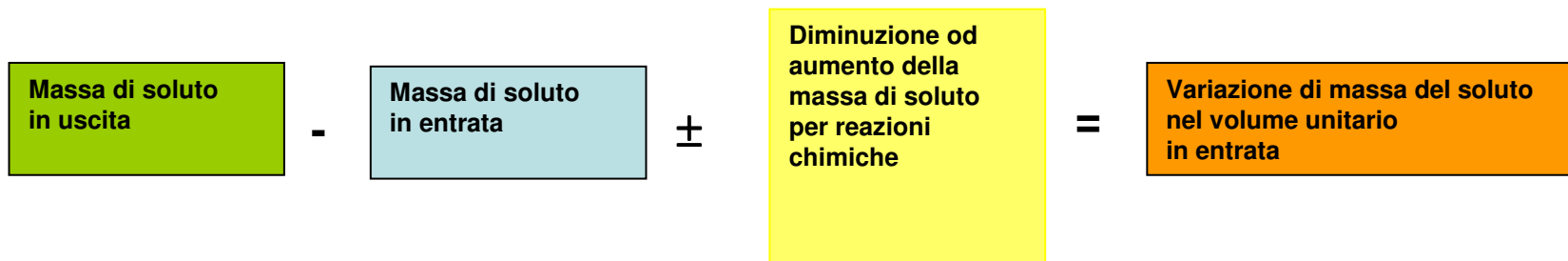
(Idrogeologia: Processi d'inquinamento degli acquiferi)

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.

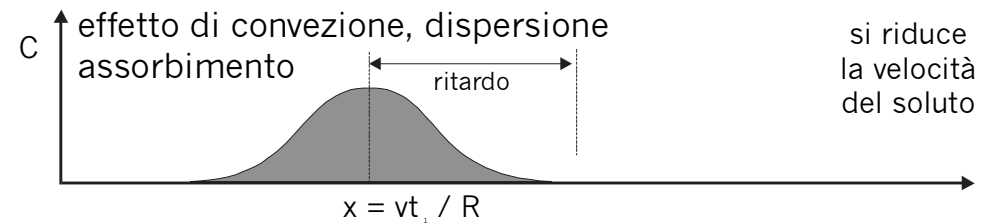
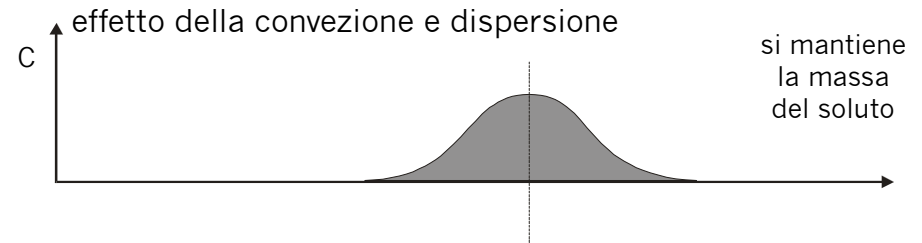
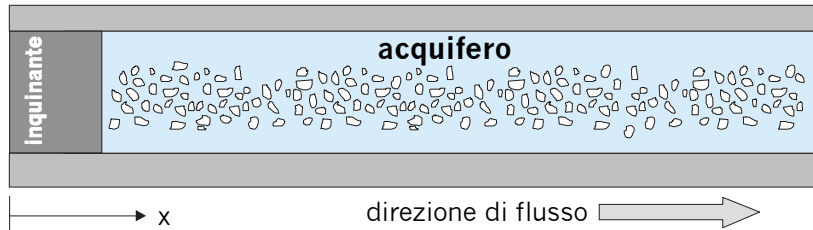
Considerando l'elemento unitario di volume:



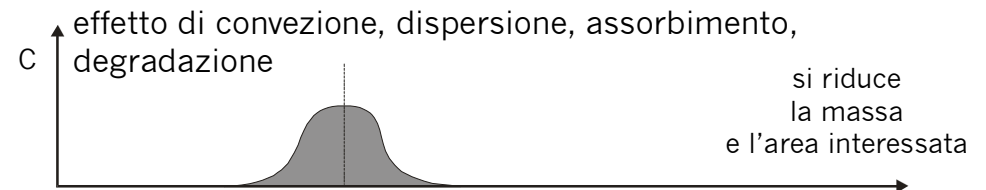
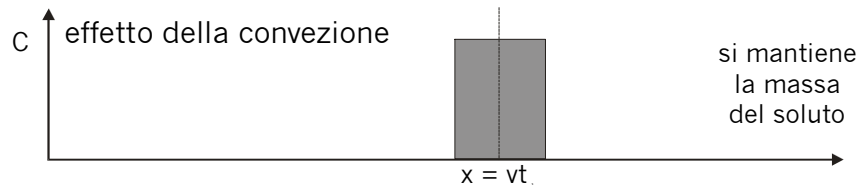
Nella figura seguente sono schematizzate le principali modalità di trasporto dovute all'interazione tra acquifero e composti chimici (flusso mono dimensionale).

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)



Distribuzione dell'inquinante al tempo t_i



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

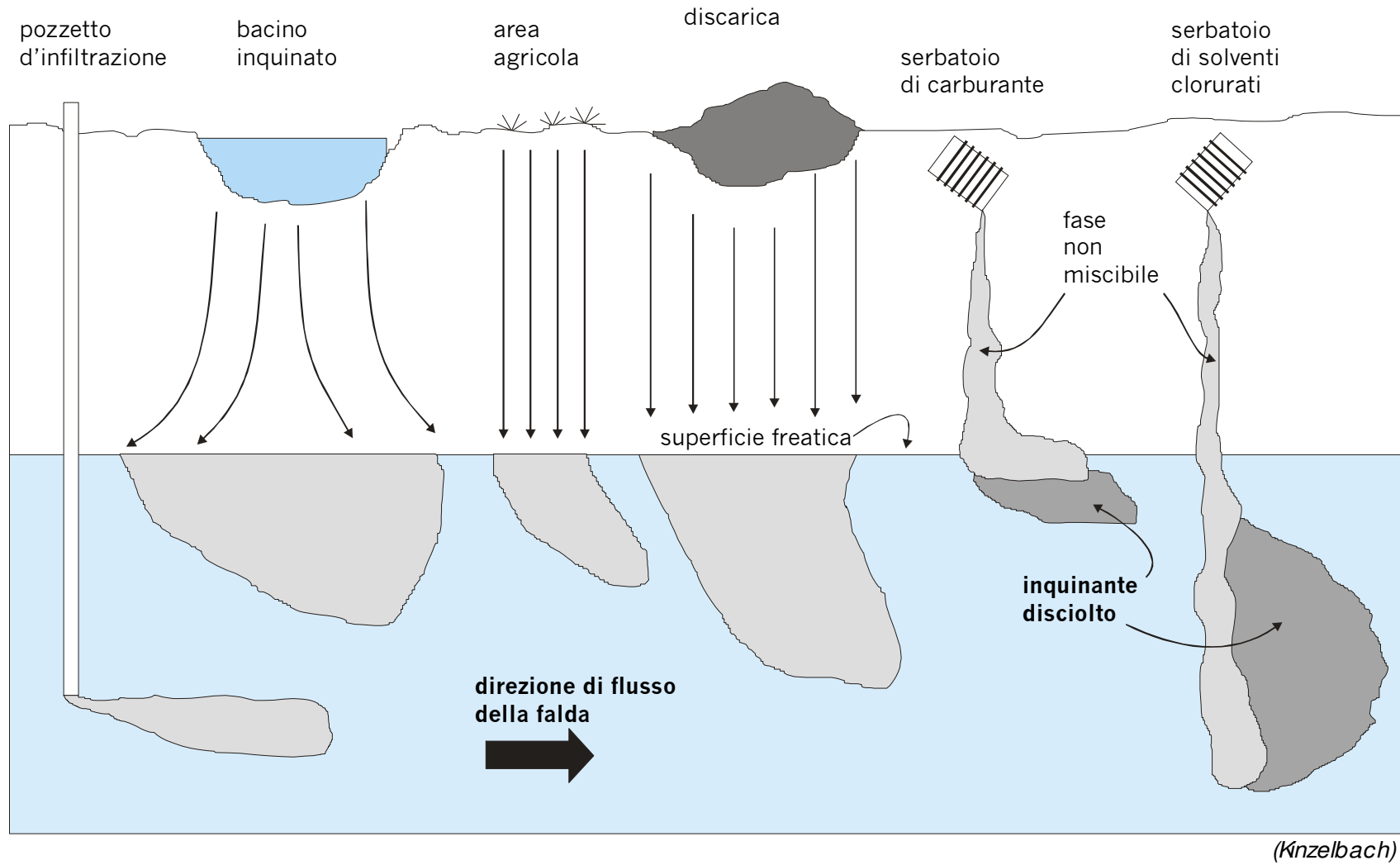
Nelle due figure seguenti sono rappresentate alcune cause d'inquinamento d'acque sotterranee, sia puntuale sia diffuso e come varia la morfologia del plume in base alle caratteristiche granulometriche dei materiali.

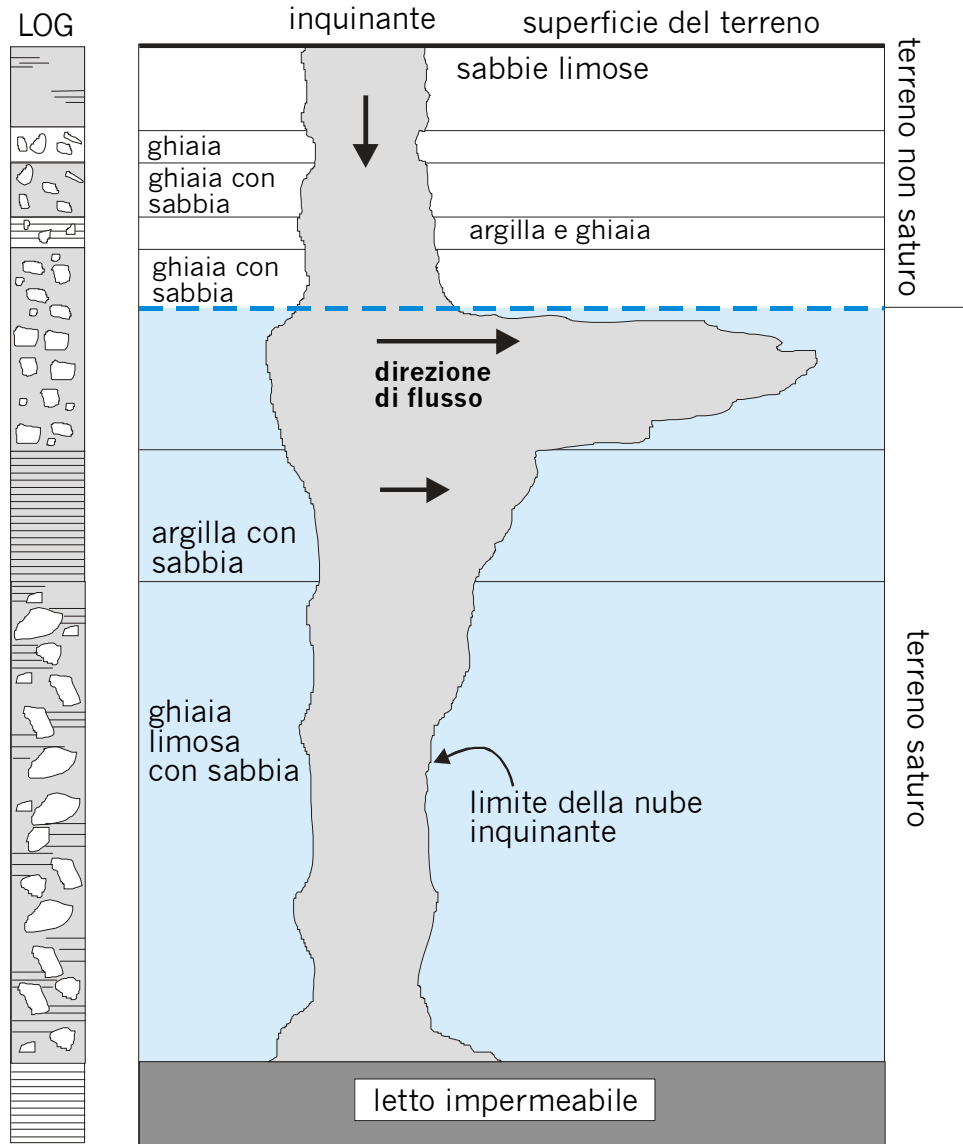
In termini generali, le sostanze artificialmente introdotte in falda subiscono un lento trasporto in senso sub orizzontale mentre nella zona non satura superiore, sono in parte filtrate ed adsorbite ed il loro movimento è quasi esclusivamente verticale.

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 per convezione, 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





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.

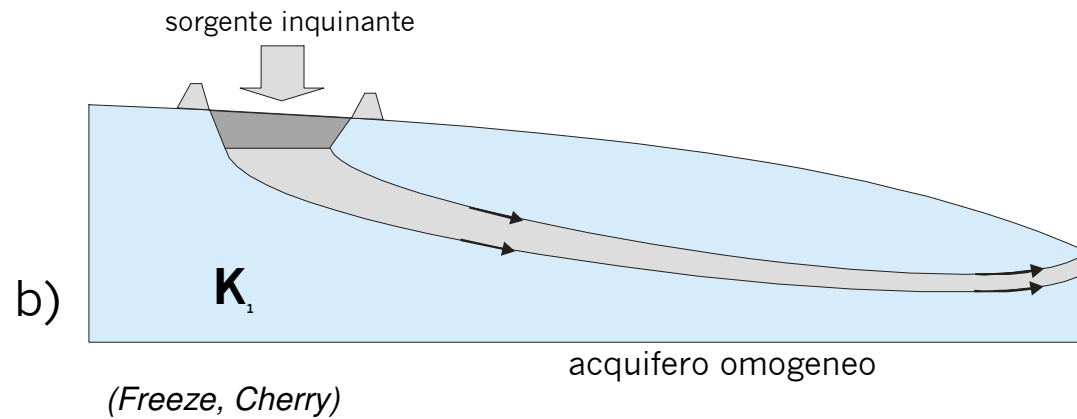
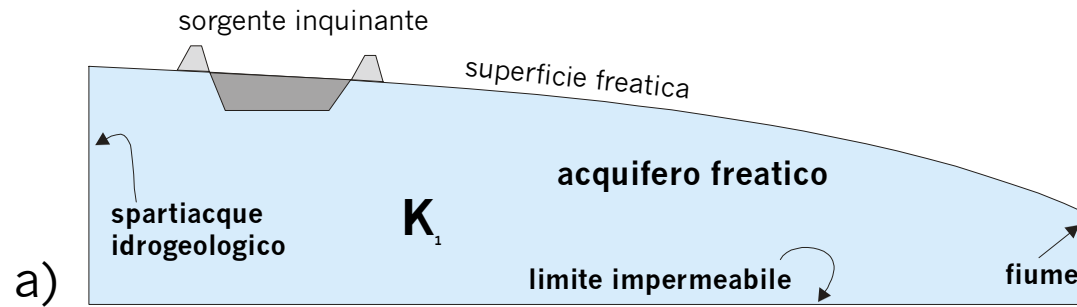
Convezione

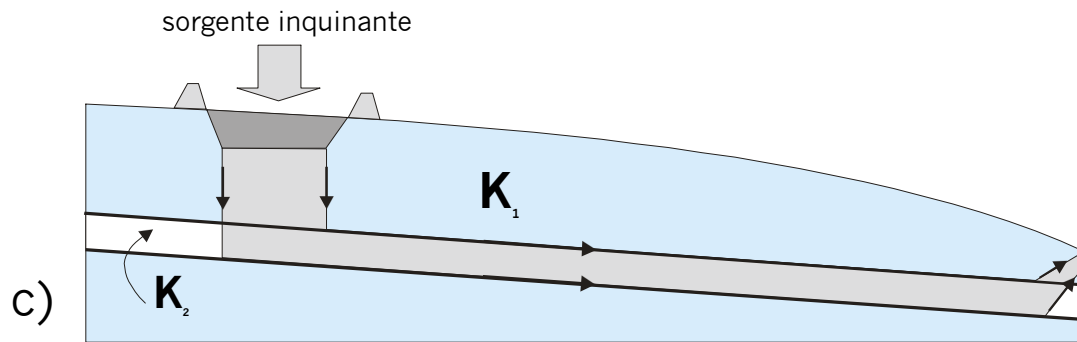
La rappresentazione dei fenomeni di trasporto per convezione (advezione) è la più semplice e più precisa, perchè la sostanza è trasportata ad una velocità uguale a quella dell'acqua di falda e quindi segue la legge di Darcy ($v = k_i / n_e$).

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.

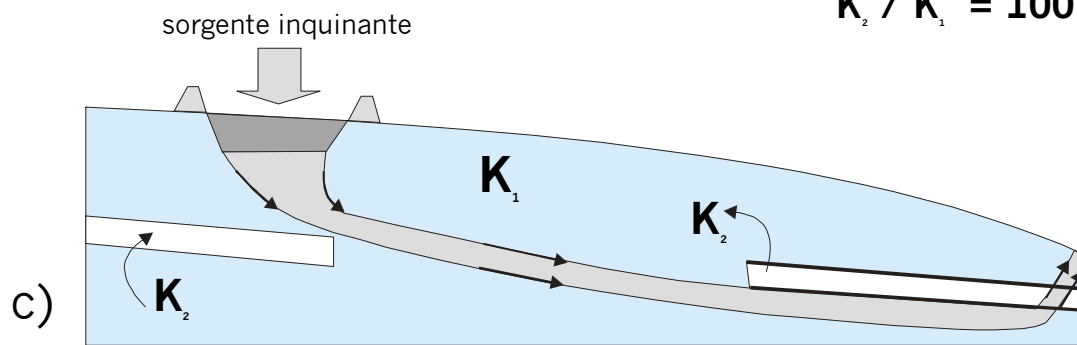
Per illustrare il fenomeno si veda la figura seguente.

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

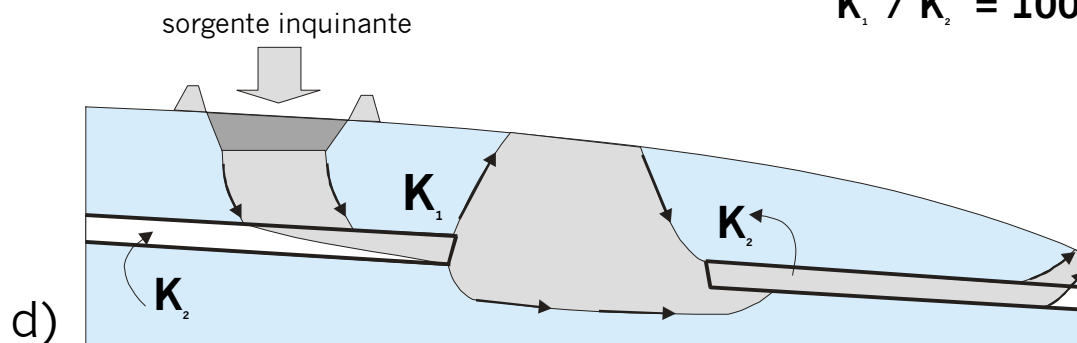




$$K_2 / K_1 = 100$$



$$K_1 / K_2 = 100$$



(Freeze, Cherry)

$$K_2 / K_1 = 100$$

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

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.

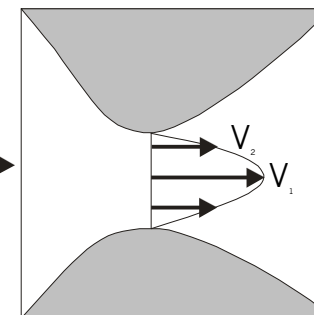
A causa dell'eterogenità locale le particelle di soluto, allontanandosi dalla sorgente, pur non reagendo con il mezzo, si espandono nell'acquifero occupando un volume via via maggiore a valle del flusso e quindi diminuendo la concentrazione generale dello stesso.

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.

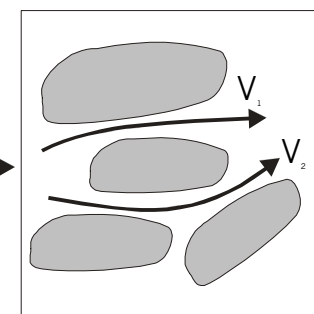
il fenomeno di dispersione, nel trasporto di un soluto, si verifica a livello granulare per:

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

Dispersione longitudinale

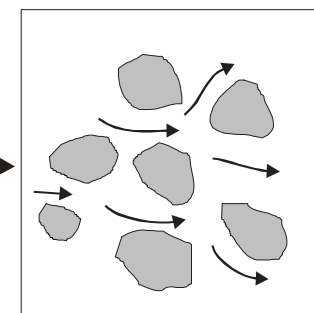


V_1 maggiore di V_2



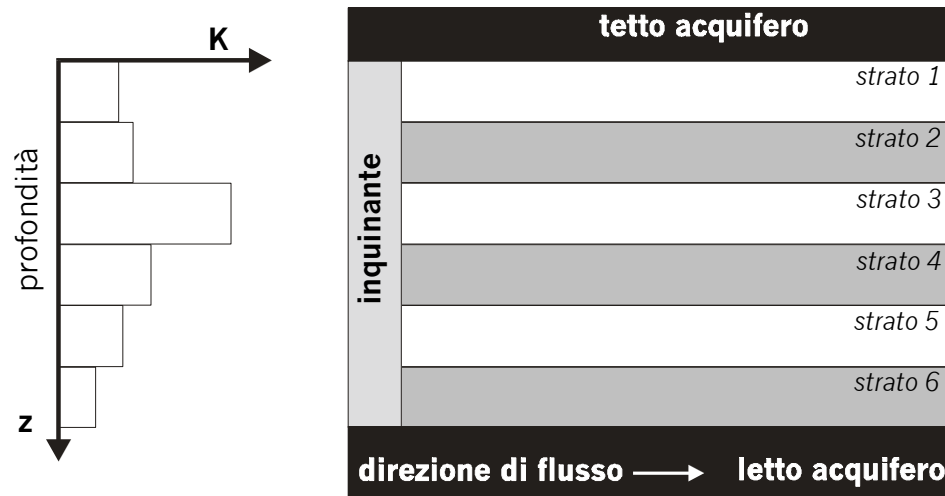
V_1 maggiore di V_2

Dispersione trasversale

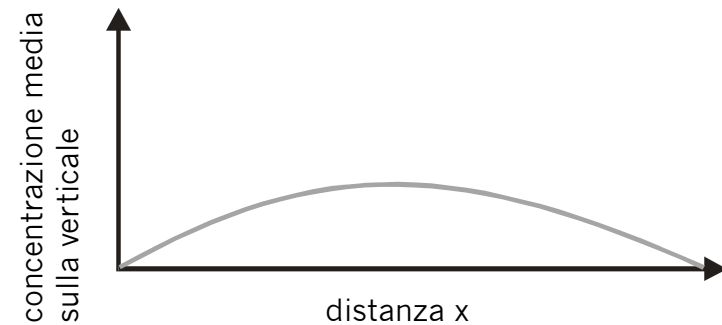
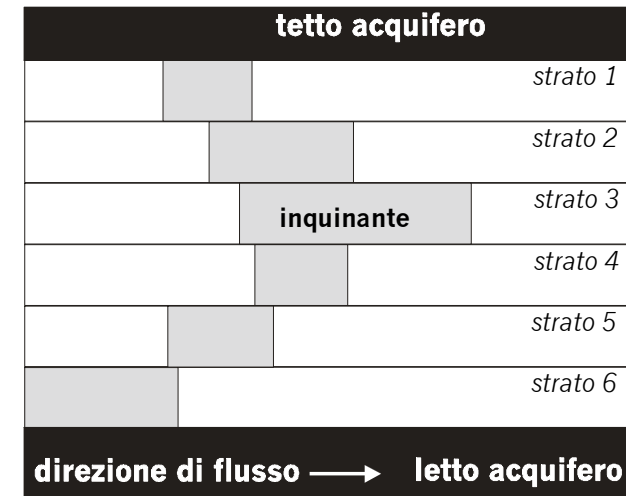


V_x diverso da V_y

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: Processi d'inquinamento degli acquiferi)

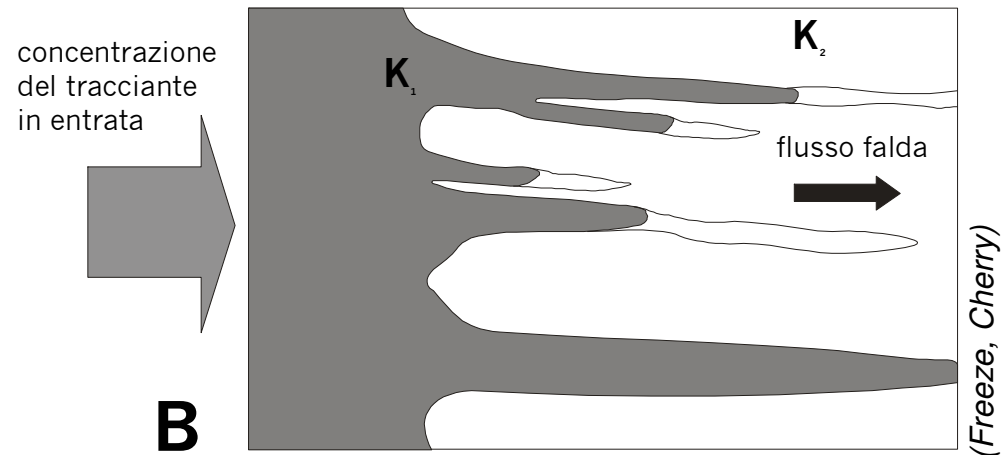
Esiste pertanto, e va sempre valutata, una notevole diversità di comportamento del soluto in mezzi a diversa conducibilità idraulica

Spostamento di una nube contaminante soggetta a fenomeni di dispersione idrodinamica



mezzo a permeabilità costante

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 ($K_1 > K_2$)

18

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:

$$D_i = \alpha v + D$$

Con:

$$v = k_i / n_e$$

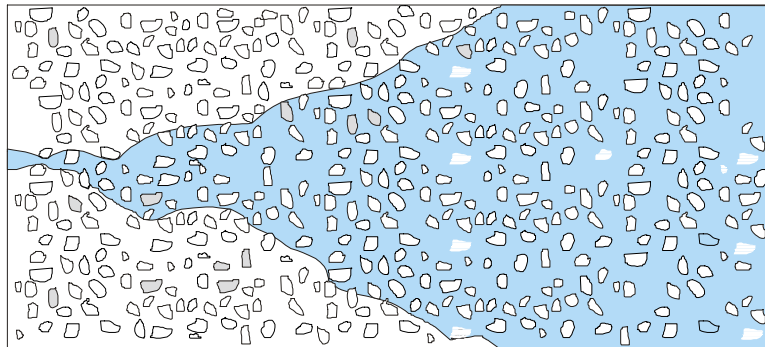
α = dispersività

D = coefficiente di diffusione molecolare

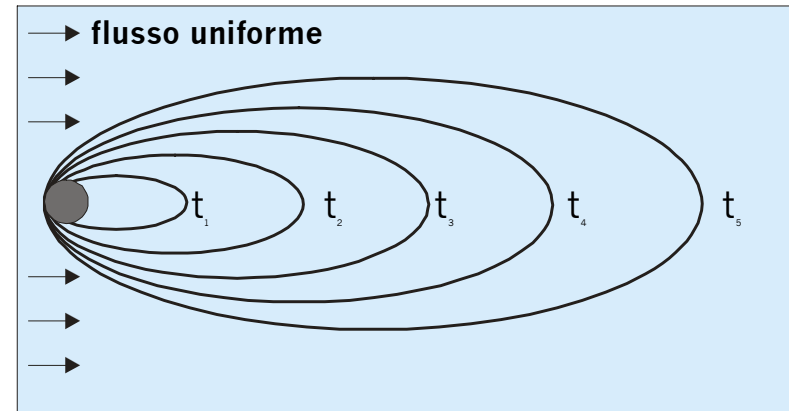
La dispersione è un fenomeno che avviene a livello microscopico, ed è causato sia da una diffusione molecolare (dovuta al moto browniano delle molecole di fluido) sia da un mescolamento idrodinamico durante il moto laminare.

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.

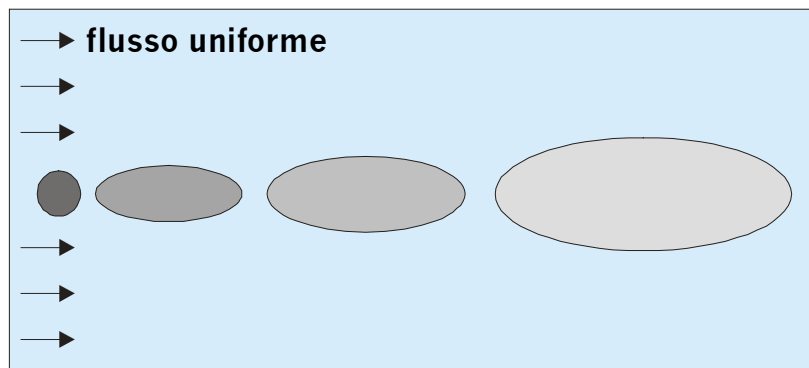
In situazioni con velocità di flusso elevate, la diffusione molecolare è in genere trascurabile.



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.

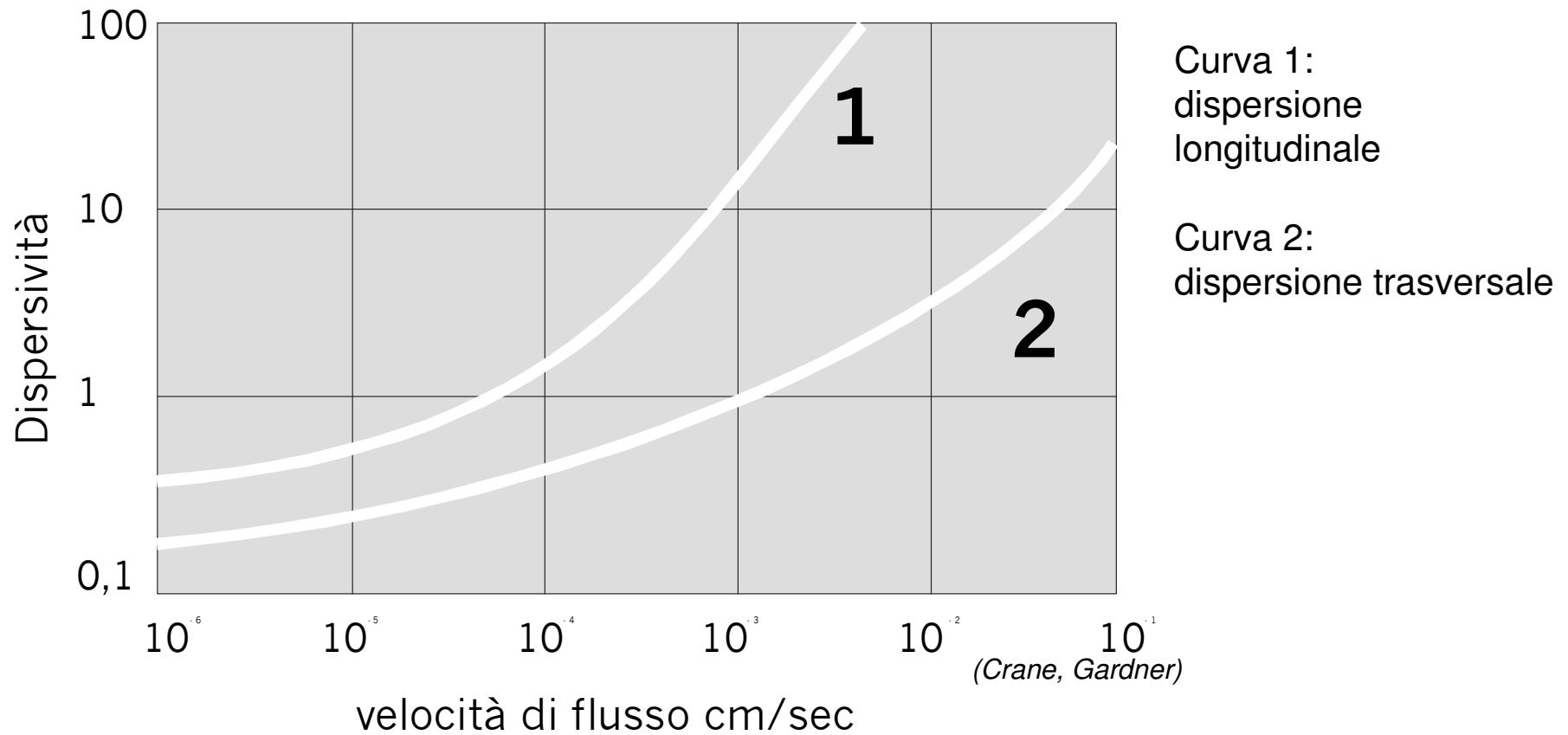
In situazioni con velocità di flusso elevate ($v > 1$ m/g), la diffusione molecolare è in genere trascurabile ed, in effetti, il suo valore è dell'ordine di 10^{-9} m² /sec.

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:

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

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.