

**Corso di laurea specialistica in  
Ingegneria delle Acque e della Difesa del Suolo**

*Corso di*

**GESTIONE delle  
RISORSE IDRICHE**  
*a.a. 2003-2004*

*Prof. Luca Lanza*

**Dipartimento di Ingegneria Ambientale - DIAM**



## ➤ L'inquinamento delle falde acquifere

*A seguito della crescente domanda d'acqua dolce e con l'intensificazione dell'uso dell'acqua, il problema della qualità delle acque diviene un fattore spesso decisivo per lo sviluppo e l'uso delle risorse idriche.*

In particolare l'inquinamento delle falde acquifere richiede grande attenzione per

- le basse velocità dell'acqua
- il rischio di interazione con la matrice solida.

*Una volta che le acque di falda sono state inquinate, il ripristino delle condizioni originali di assenza di inquinamento è un processo normalmente molto lento e difficile.*

Acqua **INQUINATA** → situazione in cui la qualità dell'acqua si è deteriorata fino al punto di risultare pericolosa per il consumo umano.

Tuttavia ... *anche in condizioni indisturbate o senza l'intervento dell'uomo, l'acqua di falda contiene di per sé una certa quantità di sostanze in soluzione, che talvolta raggiungono valori tali da renderla inutilizzabile per alcune tipologie d'uso.*

**INQUINANTE** = sostanza disciolta trasportata dall'acqua e/o accumulata nella falda, indipendentemente dal fatto che la sua concentrazione raggiunga livelli di pericolo per il consumo umano.

## ➤ Le fonti di inquinamento

### ✓ AMBIENTALE

Inquinamento dovuto all'ambiente in cui si realizza il flusso delle acque sotterranee.  
*(ad es., nell'attraversare rocce di tipo particolare, l'acqua può disciogliere piccole ma talvolta significative quantità di minerale).*

### ✓ CIVILE

Inquinamento dovuto alla rottura accidentale di fognature, al percolamento dalle fosse settiche, alla ricarica dell'acquifero con acqua di scarico della depurazione.  
*(normalmente a questo tipo di inquinamento sono dovute le contaminazioni di carattere biologico – batteri e virus).*

### ✓ INDUSTRIALE

Inquinamento dovuto agli scarichi dei processi industriali e/o degli insediamenti produttivi, infrastrutture, ecc.

*(non è facile separare questo tipo di inquinamento dal precedente, poiché spesso si verificano nello stesso sistema di scarico, tuttavia in questo caso gli inquinanti sono anche costituiti da metalli pesanti, idrocarburi, sostanze altamente tossiche o radioattive).*

### ✓ AGRICOLO

Inquinamento dovuto all'acqua di irrigazione ed all'acqua di pioggia che dilava i fertilizzanti, gli erbicidi/pesticidi, ecc., e giunge alla falda attraverso la zona insatura.

# IL TRASPORTO DEGLI INQUINANTI

## ➤ I processi di trasporto nelle acque sotterranee

*Si tratta di processi di trasporto di massa, dove la massa considerata è quella di una certa sostanza, ad es. un soluto, che viene trasportata dall'acqua attraverso gli spazi interstiziali di un mezzo poroso, sia nella zona satura sia nella zona insatura.*

I meccanismi che consentono il trasporto di un inquinante in un mezzo poroso sono:



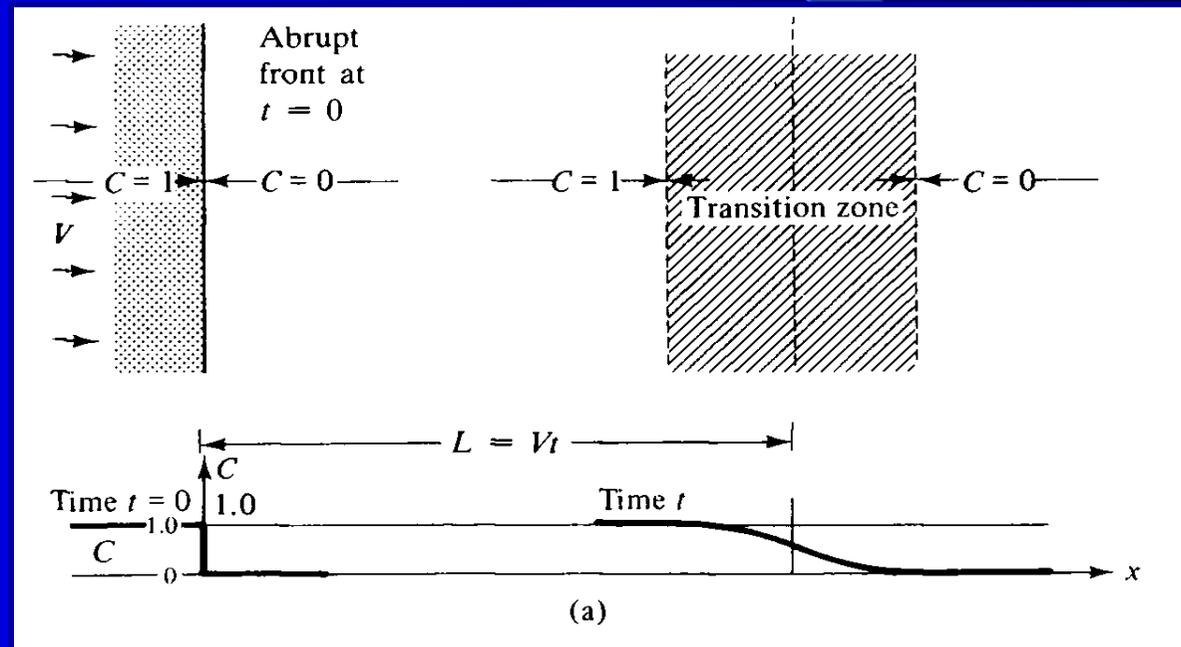
Solo in alcune situazioni la zona di transizione tra due porzioni dell'acquifero caratterizzate da diverse condizioni di qualità può essere schematizzata come un fronte netto.

## ➤ La dispersione idrodinamica

Si consideri una situazione di flusso saturo in un mezzo poroso, con una porzione del dominio fluido che contiene una certa massa di soluto (detto anche tracciante).

Il tracciante, ovvero una porzione identificabile dello stesso fluido, può essere determinata in base alla sua densità, concentrazione di un certo inquinante, colore, conducibilità elettrica, ecc.

Primo esperimento:



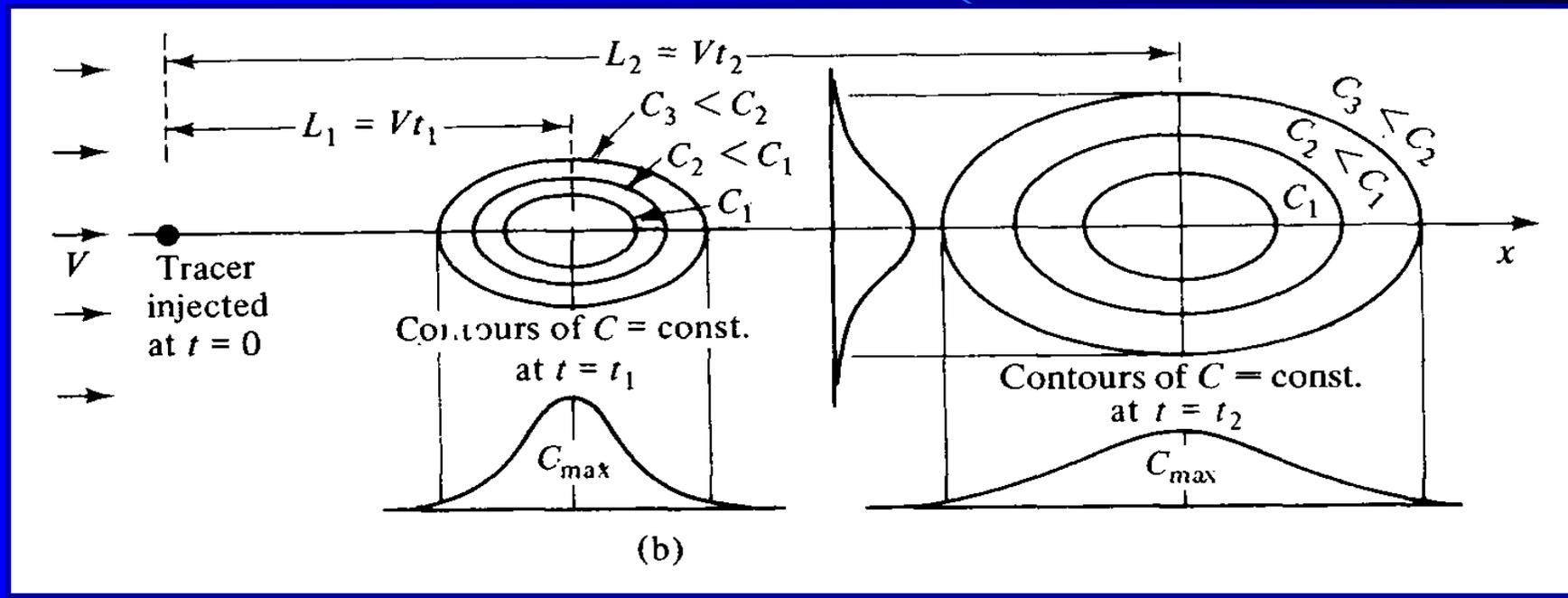
Un fronte netto separa al tempo  $t = 0$  la porzione occupata dal tracciante ( $C = 1$ ) da quella occupata da acqua pulita ( $C = 0$ ). In caso di flusso uniforme con velocità  $V$ , normale al fronte iniziale, la legge di Darcy consente di calcolare la nuova posizione del fronte come  $x = Vt$ .

Tuttavia, se si misura la concentrazione in un certo numero di pozzi di osservazione, si osserva che tale fronte non esiste, ma si verifica una transizione graduale dalla zona con  $C = 1$  a  $C = 0$ .

L'esperienza dimostra che al passare del tempo l'ampiezza della zona di transizione aumenta, e tale ampliamento non può essere spiegato dal movimento medio dell'acqua.

## ➤ La dispersione idrodinamica

Secondo esperimento:



Consideriamo l'iniezione di una certa quantità di soluto nel punto  $x = 0$  al tempo  $t = 0$ . Utilizzando la velocità media e quindi l'equazione di Darcy, ci si aspetta che il tracciante si sposti come un volume di forma fissa, che raggiunge il punto  $x = Vt$  all'istante  $t$ .

Anche in questo caso le osservazioni sperimentali mostrano che il tracciante si espande non soltanto nella direzione del flusso (medio) uniforme ma anche in direzione normale ad essa. L'area occupata dal tracciante ha forma ellittica (curve di uguale concentrazione). Anche tale comportamento non può essere spiegato con il moto medio uniforme.

## ➤ La dispersione idrodinamica

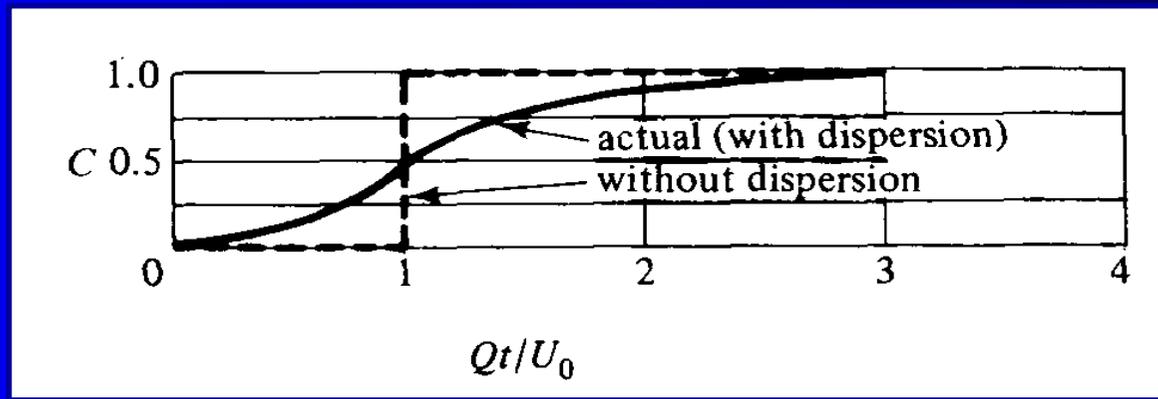
Tale fenomeno di dispersione in un mezzo poroso è detto **DISPERSIONE IDRODINAMICA**.

Il fenomeno è non permanente ed irreversibile → non è possibile ripristinare la distribuzione iniziale del tracciante invertendo la direzione del moto uniforme.

Il fenomeno della dispersione può essere dimostrato anche con un semplice esperimento.

Si consideri il moto permanente di filtrazione satura in una colonna omogenea di sabbia, in cui ad un certo istante  $t = 0$  viene immesso del NaCl nella colonna.

Si misuri al termine della colonna la concentrazione  $C = C(t)$  del tracciante immesso e la si rappresenti in un grafico, in termini della cosiddetta curva di breakthrough.



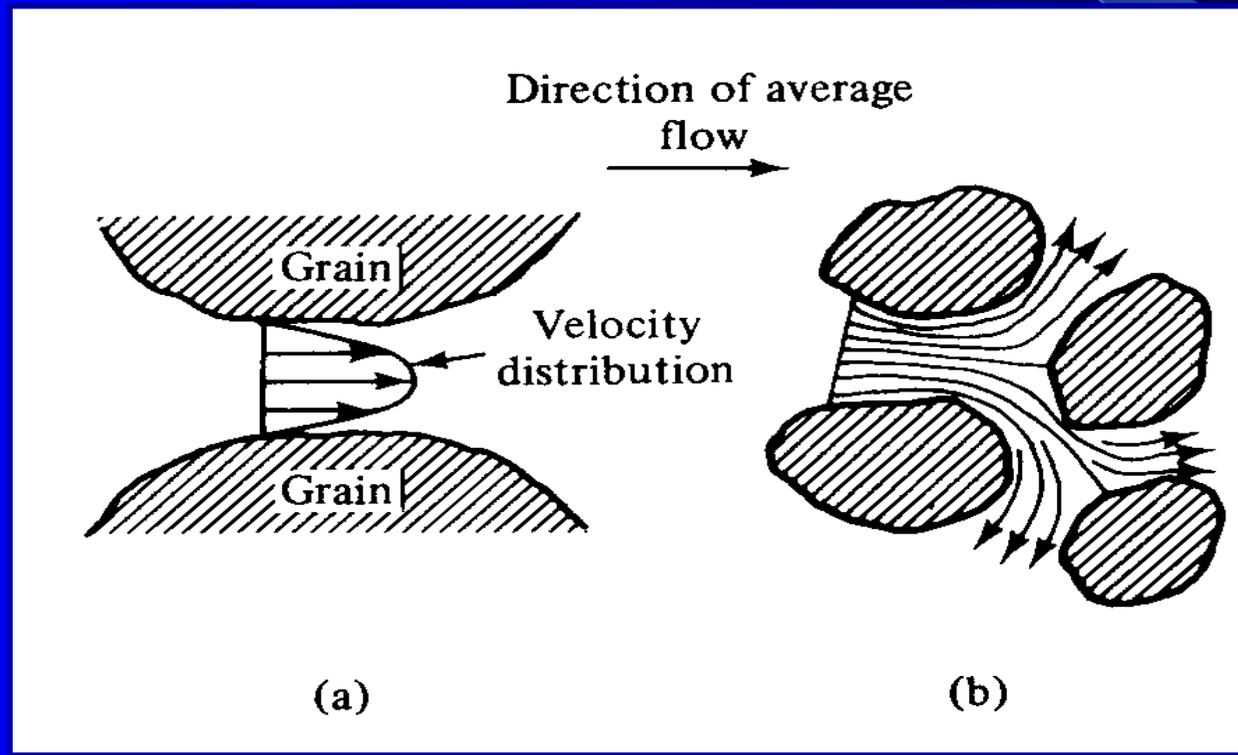
$U_0$  è il volume dei meati e  $Q$  è la portata costante.

In assenza di dispersione la curva dovrebbe avere la forma di uno scalino (linea tratteggiata). In realtà assume una conformazione ad S come illustrato in figura.

## ➤ La dispersione idrodinamica

Per spiegare tali fenomeni bisogna ragionare a livello microscopico, ovvero all'interno dei meati.

La velocità varia in effetti in direzione e modulo nella sezione di ciascun meato. Normalmente si assume velocità zero a contatto con la parete e velocità massima in qualche punto interno.



A causa della forma degli spazi interstiziali, le linee di corrente variano nello spazio rispetto alla direzione media del flusso. Questo fenomeno provoca la dispersione delle particelle di tracciante che occupano una porzione sempre più estesa del dominio fluido.