

Corso di Idrogeologia Applicata
Dr Alessio Fileccia

Reticoli di flusso

Costruzione delle carte piezometriche *(e loro interpretazione)*

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:

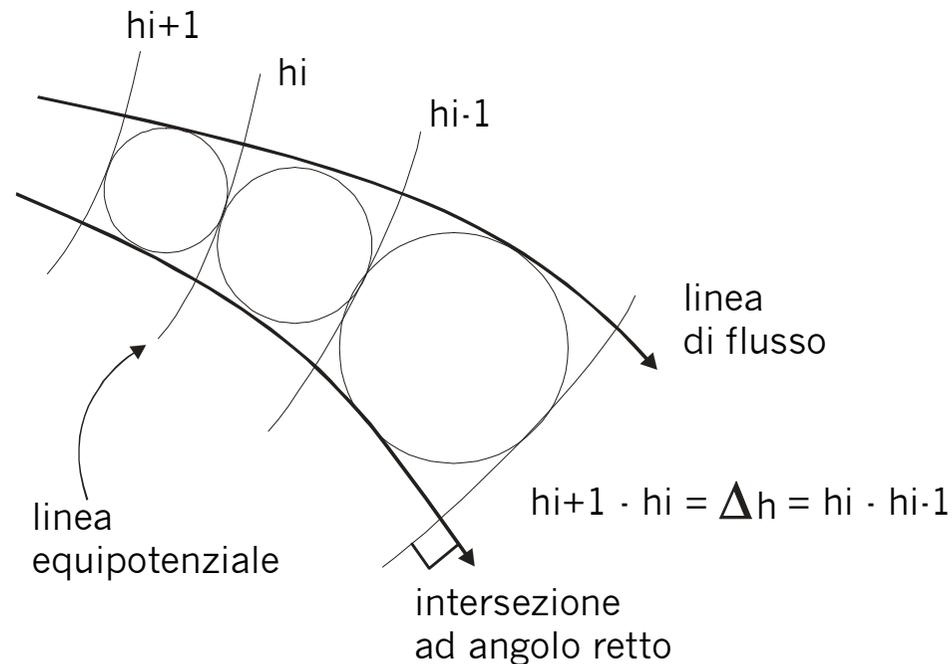
Dr Alessio Fileccia (geofile@libero.it)

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

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

Reticoli di flusso

I reticoli di flusso costituiscono un metodo per rappresentare il campo di moto e per analizzare le velocità di flusso e la distribuzione della trasmissività in un acquifero. Un reticolo di flusso è una serie di linee equipotenziali e di flusso, tra loro perpendicolari. Le linee equipotenziali collegano punti con lo stesso carico idraulico. La linea di flusso è una linea immaginaria che rappresenta il percorso di una particella fluida in movimento nell'acquifero. *(Il potenziale è una grandezza fisica misurabile in ogni punto di un sistema di flusso, in cui il movimento avviene da punti a maggiore potenziale verso punti a minor potenziale; Hubbert 1940)*



Le carte piezometriche ed i reticoli di flusso si costruiscono mediante:

- misure manuali od automatiche di livello statico in campagna
- utilizzo di un software d'interpolazione dei dati di campagna
- utilizzo di un modello numerico od analitico

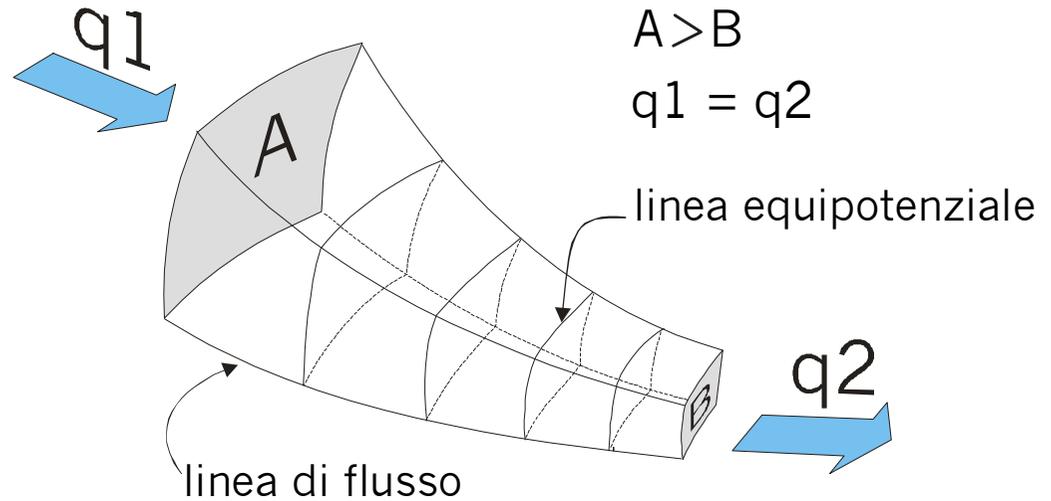
Proprietà dei reticoli di flusso:

- il vettore velocità è tangente alla linea di flusso; non c'è flusso attraverso una linea di corrente (è un limite impermeabile), esso è perpendicolare ad una linea equipotenziale ed è diretto verso i carichi idraulici più bassi (nei mezzi omogenei ed isotropi linee di flusso ed equipotenziali sono perpendicolari tra loro e formano maglie quadrate o rettangolari, questo non avviene invece nei mezzi anisotropi)
- La differenza di carico idraulico tra due linee equipotenziali è costante, esse sono parallele ai limiti a carico fisso e perpendicolari a quelli a flusso nullo
- la legge di rifrazione è valida al passaggio tra limiti geologici (vedi avanti)

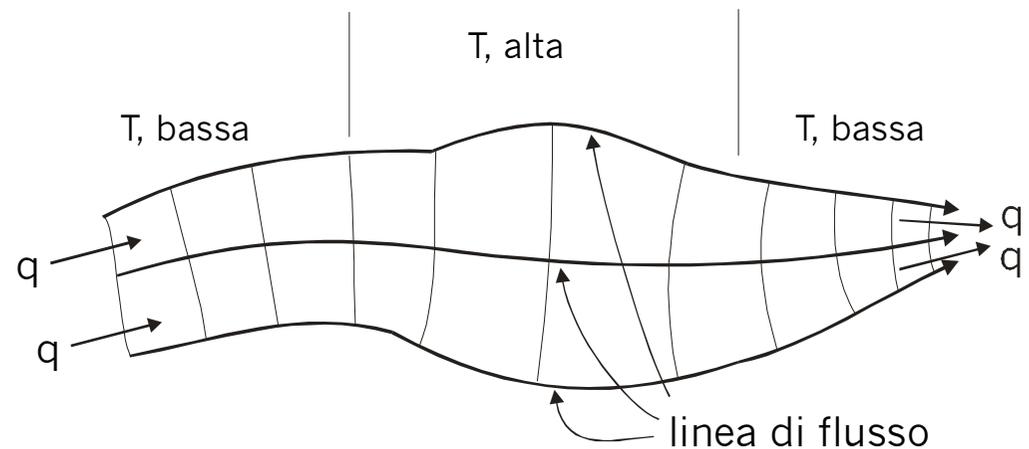
Se dobbiamo analizzare una rappresentazione planimetrica della piezometria (es.: carta delle isofreatiche) la portata va calcolata attraverso una sezione di acquifero di spessore unitario.

Se invece dobbiamo analizzare una rappresentazione in verticale della piezometria (profilo di flusso) la portata va calcolata attraverso una sezione di acquifero di larghezza unitaria.

All'interno di un tubo di flusso, la portata rimane costante, dato che non vi è travaso di acqua attraverso due linee di flusso.



Le portate attraverso i segmenti del reticolo di flusso sono uguali. Le varie forme delle zone quadrangolari del reticolo, sono una conseguenza delle variazioni di trasmissività (se il substrato è orizzontale)



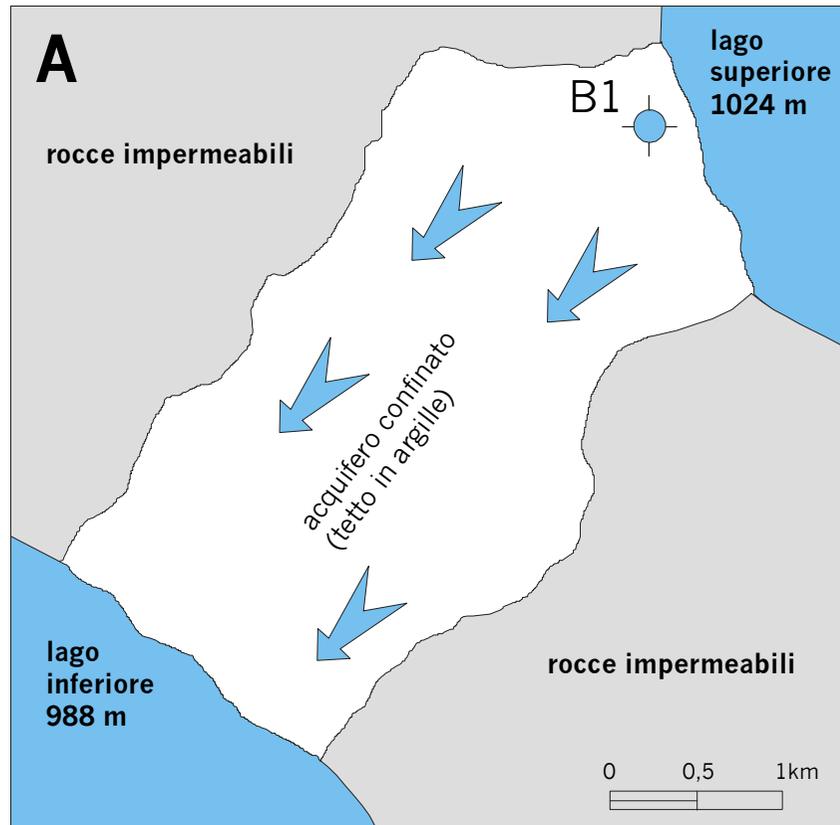
Vediamo ora come costruire un reticolo di flusso mediante l'applicazione di un caso pratico. La figura riporta due bacini idrici a quote diverse, tra i quali esiste un acquifero confinato con $K = 7,3 \cdot 10^{-6}$ m/sec, mentre la sua potenza, misurata nel sondaggio B1, è di 14,6 m.

Una delle prime cose da fare è analizzare i limiti idrodinamici al contorno, cioè:

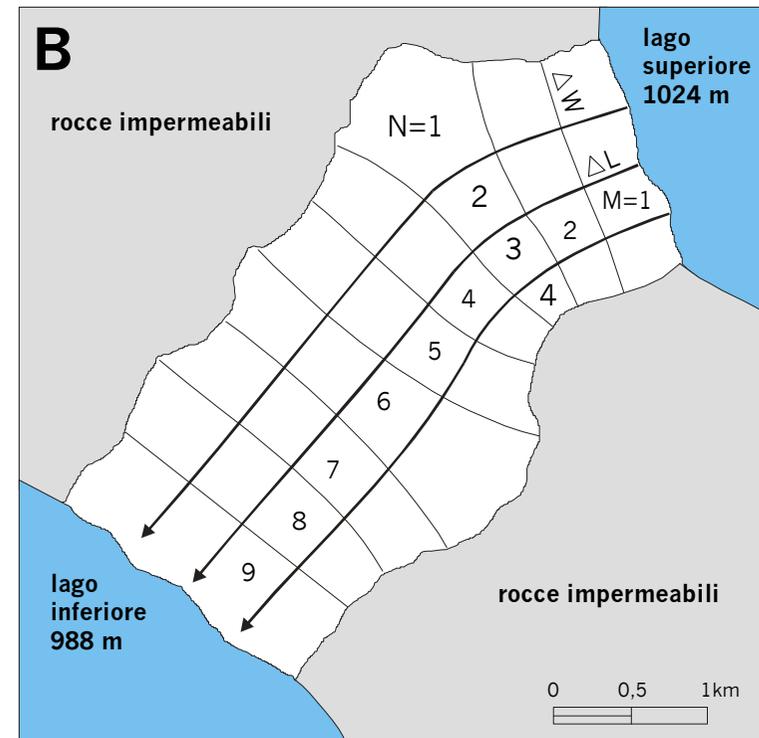
1. Le superfici equipotenziali a contatto tra i due laghi e l'acquifero
2. I limiti tra acquifero ed i depositi impermeabili

Si inizia tracciando le linee di flusso equidistanti, tra i due laghi, quindi, iniziando da quello a carico idraulico maggiore, si tracciano le equipotenziali, ad esse perpendicolari. Il reticolo così ottenuto richiede vari aggiustamenti, alla fine deve soddisfare i seguenti requisiti:

- In ogni quadrangolo può essere inserito un cerchio tangente ai lati
- Si possono disegnare le normali al punto di mezzo dei lati dei quadrati, per poi costruire linee di flusso più fitte ed un'altra serie di quadrangoli più piccoli
- Linee di flusso ed equipotenziali sono perpendicolari



Schizzo geologico tra due bacini idrici a quote differenti. Esempio per il calcolo della portata dell'acquifero mediante la costruzione del reticolo di flusso. B1: pozzo stratigrafico da cui risulta uno spessore di acquifero di 14,6 m.



$$A = 1 N \Delta W$$

$$v = K \frac{\Delta H}{M \Delta L}$$

$$\Delta W \div \Delta L$$

In un mezzo isotropo le dimensioni delle maglie sono simili e quindi applicando la relazione di Darcy $q = KiA$, si ottiene:

$$q = K \Delta H \frac{N}{M} \frac{\Delta W}{\Delta L} \quad \text{con} \left(\frac{\Delta W}{\Delta L} \div 1 \right)$$

NOTA:

L'equazione semplificata vista in precedenza va utilizzata con cautela, solo in casi di sistemi semplici (omogenei ed isotropi), con un limite di ricarica ed uno di recapito. Con strutture idrogeologiche più complesse è più appropriato usare la relazione di Darcy e Kamenski e sommare le diverse portate.

Analisi della trasmissività

Le carte piezometriche, sono anche utili per studiare le variazioni di trasmissività (o conducibilità idraulica) in una regione e quindi pianificare indagini ulteriori, come ad esempio la perforazione di pozzi di sfruttamento o l'infissione di piezometri. Nella figura B precedente la spaziatura delle isopieze aiuta a scegliere la zona più adatta per ubicare un pozzo, segnalando le zone a maggiore trasmissività.

Analogamente se conosciamo il valore di K, ottenuto da prove in sito, in una zona dell'acquifero, possiamo facilmente ricavarlo anche in altre aree, semplicemente calcolando i gradienti, ed applicando il principio di continuità.

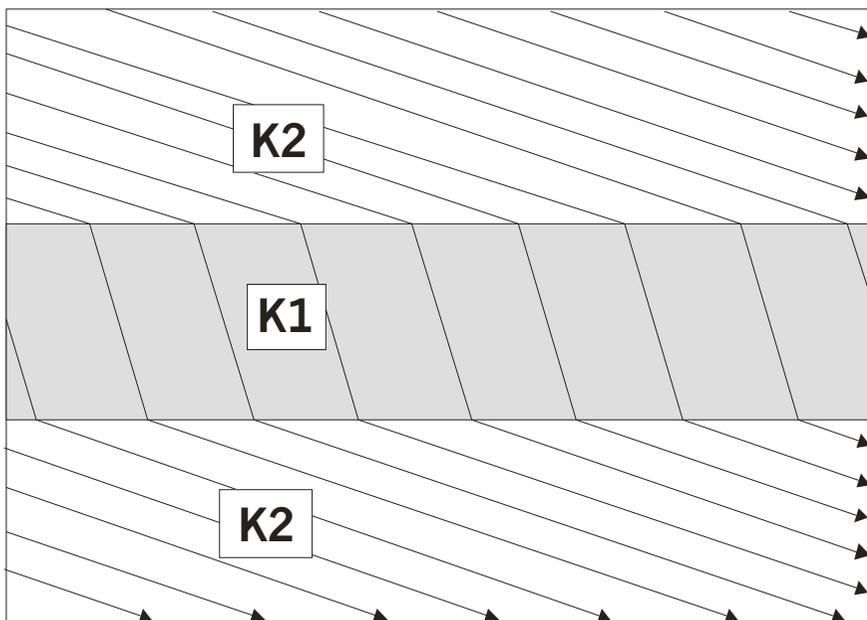
Per ogni tubo di flusso infatti:

$$K_1 / K_2 = i_2 / i_1$$

Flusso attraverso limiti a diversa permeabilità

Quando una linea di flusso passa da una zona di acquifero con K1 ad un'altra con K2 si verifica una deviazione di percorso, che si può valutare ricorrendo al principio di continuità ed in base ai due valori di K; in pratica ricorrendo ad uno schema analogo a quello di rifrazione dei raggi luminosi.

Rifrazione delle linee di flusso



$$K2/K1 = 10$$

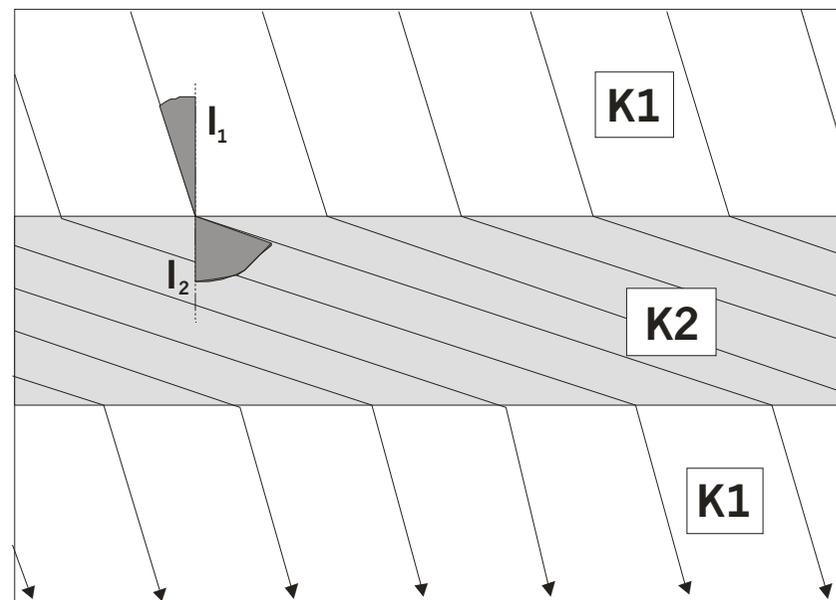
A destra, un livello di materiale fino (K2) è situato tra due livelli più grossolani (K1).

In entrambi i casi si nota come le linee di flusso tendono a restare negli strati a maggiore permeabilità e come sia sufficiente un contrasto di due ordini di grandezza per deviare quasi a 90° le linee di flusso. La deviazione del flusso si ricava in base ai valori di K e degli angoli di incidenza I1-I2:

$$K1/K2 = \tan I1/\tan I2$$

Rifrazione di linee di flusso, attraverso due mezzi a diversa permeabilità. A sinistra, un livello grossolano (K2) è situato tra due livelli più fini (K1)

(Hubbert, 1940)



$$K2/K1 = 10$$

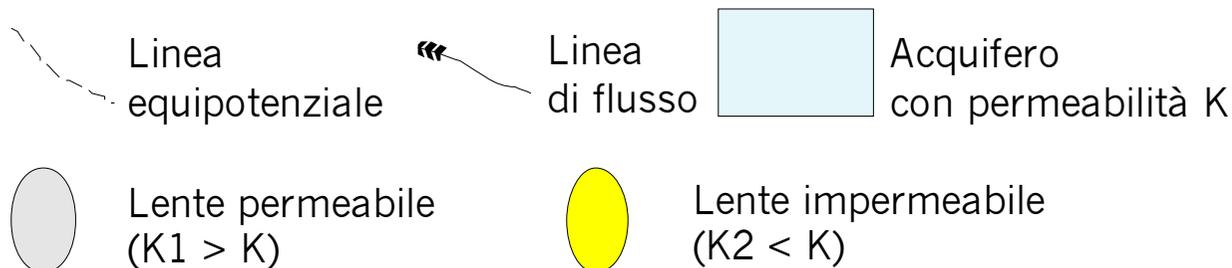
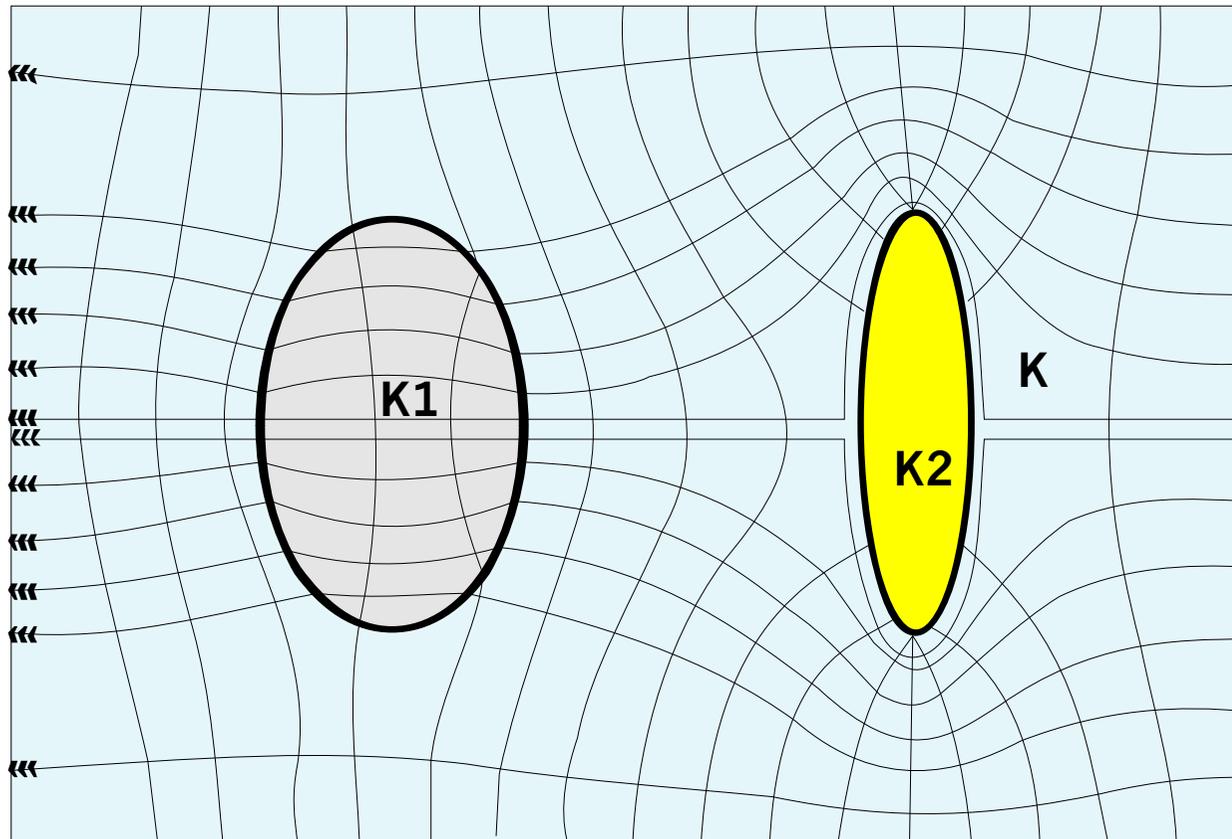
Rifrazione delle linee di flusso

Nella figura è rappresentato uno schema di flusso bidimensionale da destra a sinistra.

Nell'acquifero vi sono due intercalazioni a diversa permeabilità: in giallo la lente più impermeabile ed in grigio quella più permeabile.

Le linee di flusso tendono ad entrare nel mezzo più permeabile con un moto laminare e scarsa tendenza al mescolamento.

L'entità della deviazione è regolata dalla diversa permeabilità dei mezzi.



Calcolo della portata di una falda

Questo procedimento è importante per valutare in prima approssimazione le quantità idriche disponibili. Il calcolo si effettua una volta ottenuta una carta piezometrica dell'acquifero. A seconda della morfologia di questa superficie si possono avere falde cilindriche, paraboliche, iperpoliche, radiali. Se possibile è consigliabile semplificare la situazione naturale ed applicare le relazioni:

$$Q = T i W$$

quando le linee di flusso sono parallele o subparallele

e

$$Q = T i (W_1 - W_2) / (\ln W_1 - \ln W_2) \quad \text{relazione di Kamenski}$$

nel caso di falde radiali

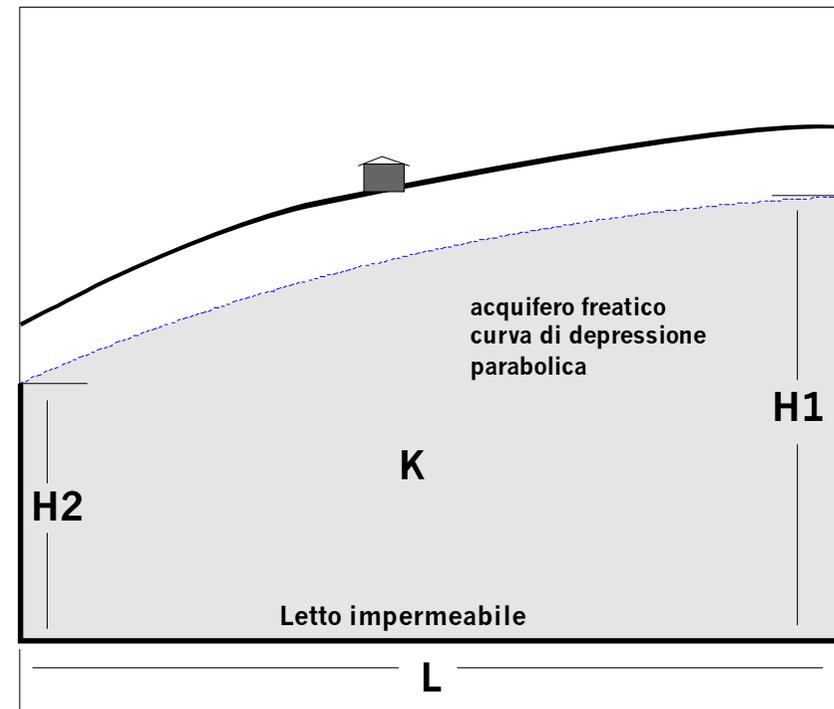
W_1 = larghezza dell'acquifero a monte, lungo il tubo di flusso (m)

W_2 = larghezza dell'acquifero a valle, lungo il tubo di flusso (m)

K è la permeabilità media dell'acquifero confinato di spessore medio B ; ($T = KB$)

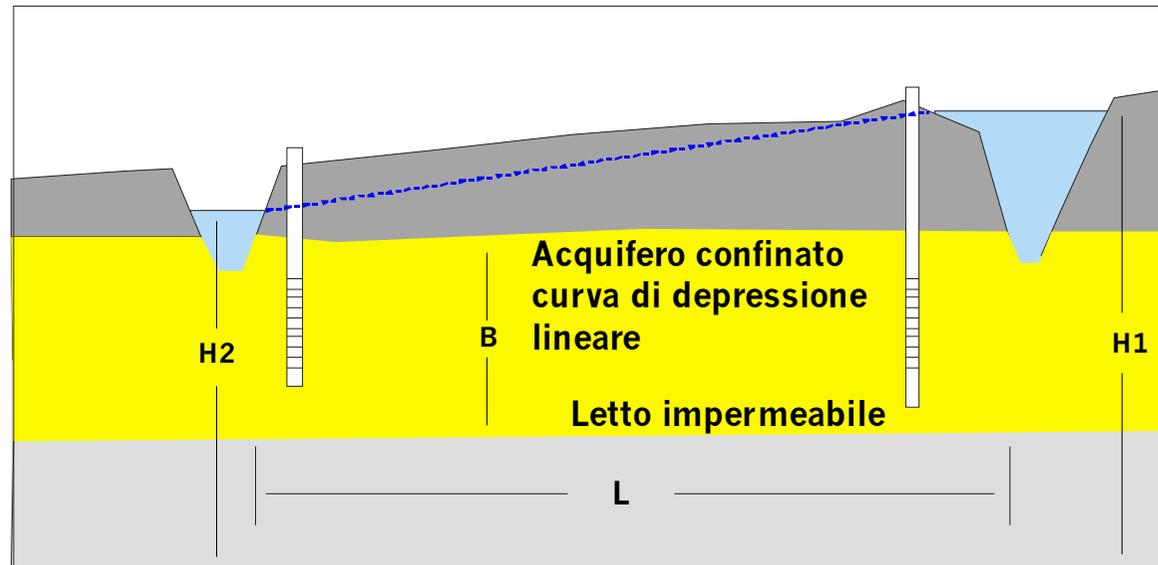
Se l'acquifero è freatico, come spessore si considera un valore medio e la portata su di una sezione unitaria diventa:

$$Q = K (H1^2 - H2^2)/2L$$



L'acquifero confinato ha in genere spessore costante e la portata su di una sezione unitaria è:

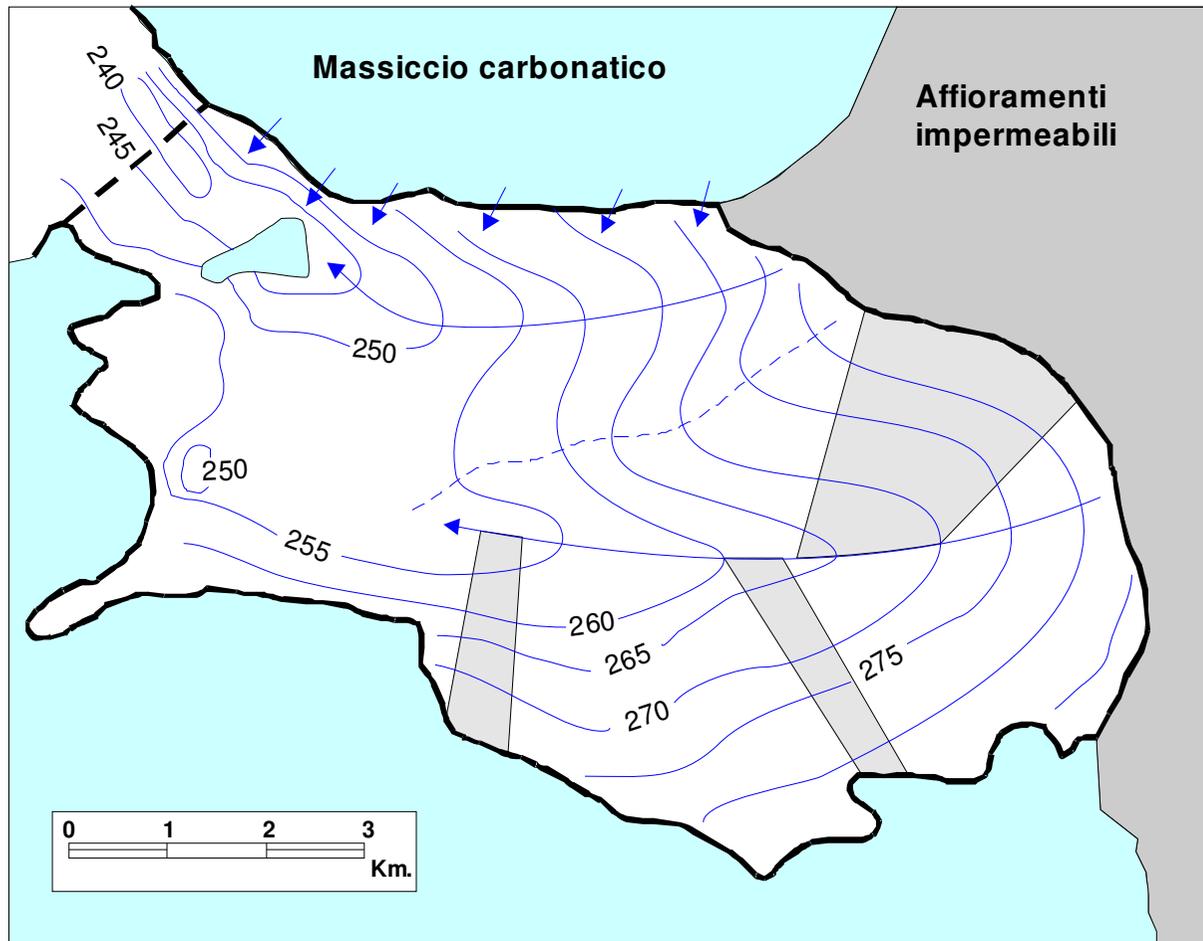
$$Q = KB (H1 - H2)/L$$



Metodo dei settori

Per calcolare la portata della falda attraverso una sezione, si tracciano gli assi di drenaggio e gli spartiacque, dividendo l'acquifero in settori più o meno omogenei, delimitati da linee di flusso. A seconda del tipo di settore (radiale o cilindrico), si applica una delle relazioni precedenti (formula classica di Darcy, o Kamenski). La portata complessiva si ottiene dalla somma delle singole portate

(da Celico sempificato)



(Idrogeologia: reticoli di flusso e carte piezometriche)

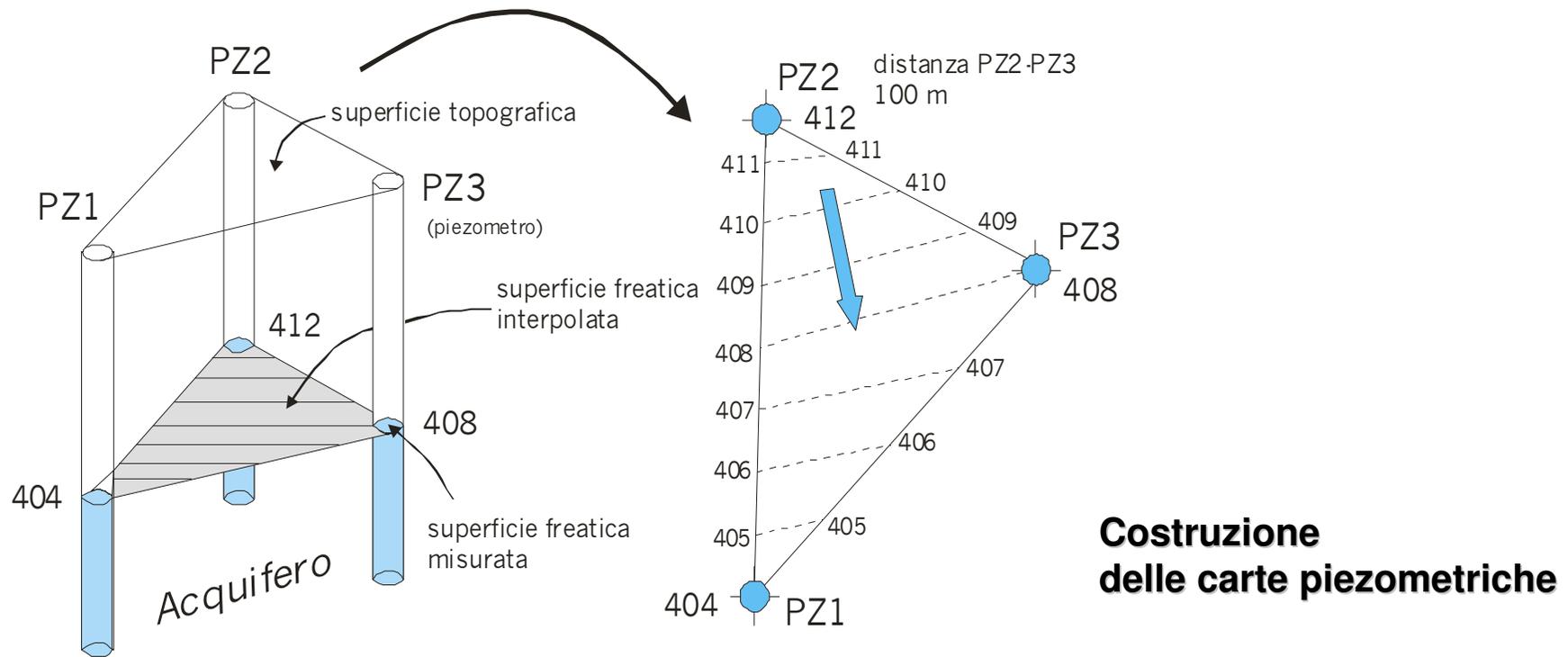


Fig. A: costruzione delle isofreatiche mediante interpolazione grafica; B: procedura per ricavare le quote di falda tra i punti d'acqua misurati (PZ1 - PZ2 - PZ3); unire i punti d'acqua con dei segmenti e costruire un reticolo a maglia triangolare; misurare sulla carta la lunghezza dei segmenti che uniscono i punti d'acqua; riportare questa lunghezza al dislivello piezometrico;

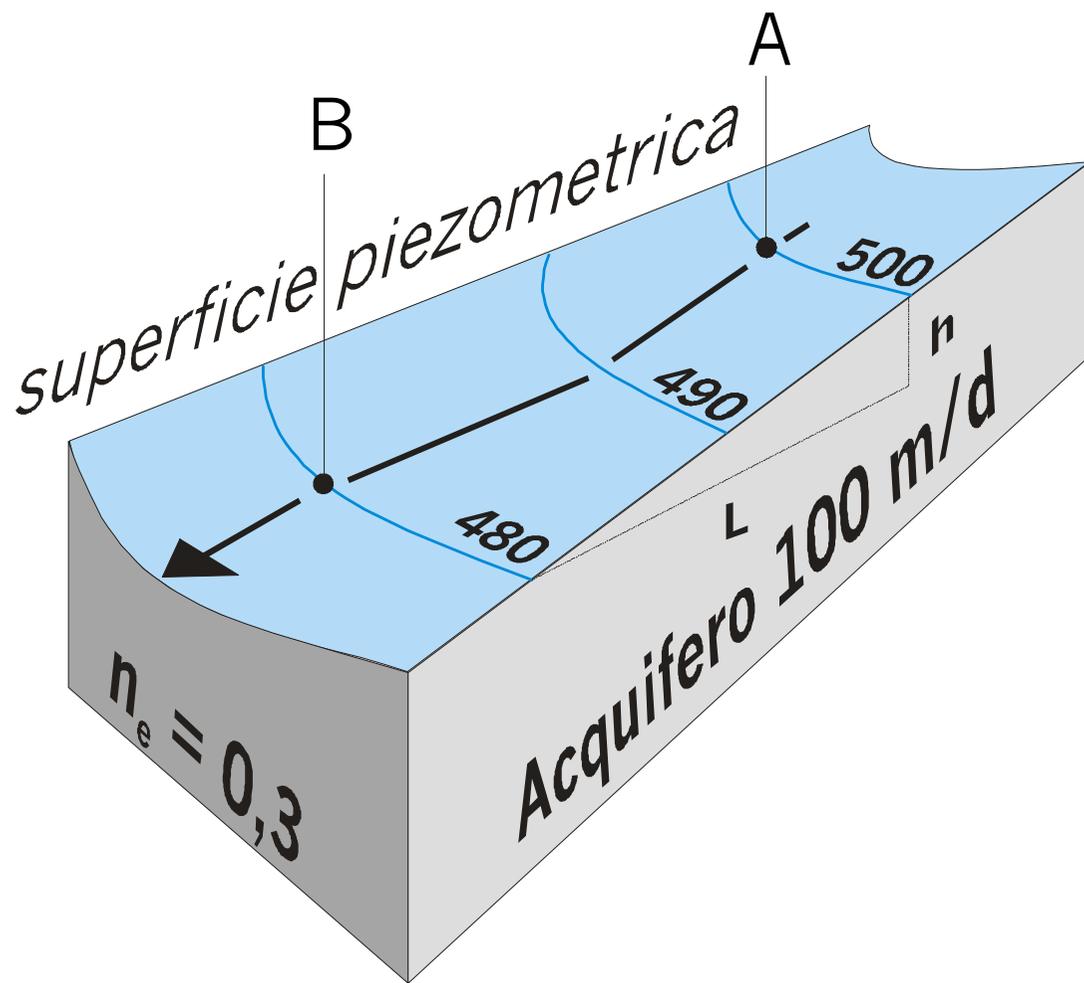
Ad esempio le isofreatiche con equidistanza un metro, tra PZ1 e PZ2 (dislivello 8 m), si ricavano:

Lunghezza tratto planimetrico PZ1 - PZ2 = 6,1 cm

Distanza tra le isofreatiche 1 m: $8/6,6 = 1/x$

Da cui $x = 6,6/8$ e $x = 0,825$ cm

Sul segmento che unisce PZ1 a PZ2 si segnano i trattini corrispondenti al passaggio delle isofreatiche 1 m ogni 0,825 cm; analogamente le isofreatiche tra PZ1 e PZ3 sono intervallate, lungo il segmento PZ1 - PZ3, di 1,525 cm e quelle tra PZ3 e PZ2 di 1,13 cm



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

$$v_e = K i / n_e$$

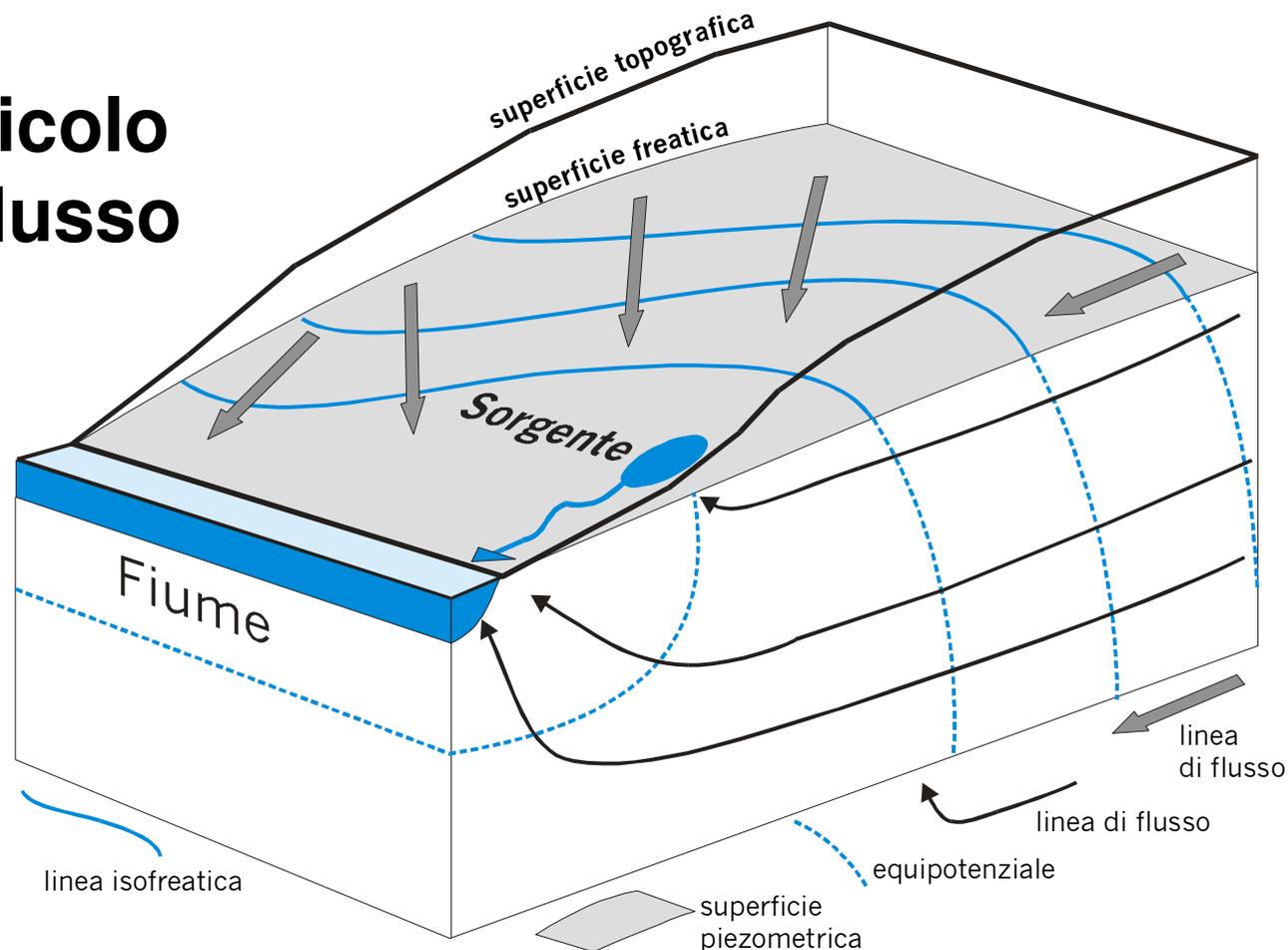
$$v_e = 2 / 0,3 = 6,6 \text{ m/d}$$

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

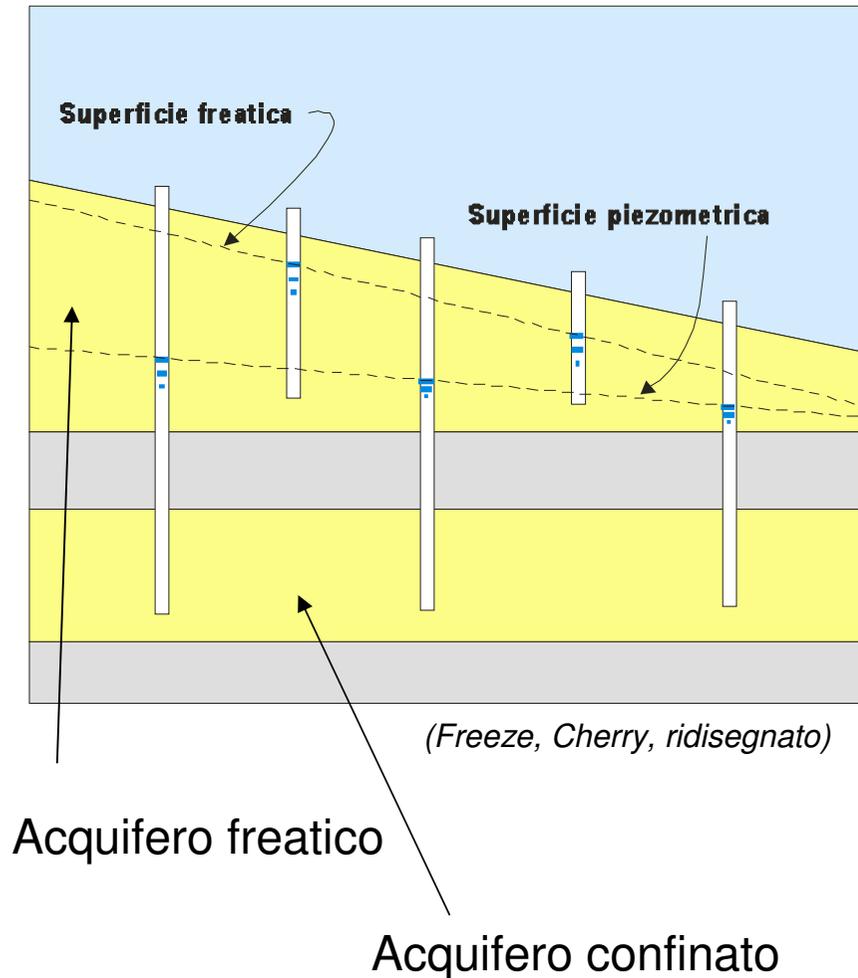
$$t = s/v$$

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

Reticolo di flusso



Una carta della falda freatica o di una superficie piezometrica, è una visione bidimensionale dell'acquifero e lo spostamento della falda in un acquifero isotropo è perpendicolare alle linee di quota di questa superficie, lungo la direzione di massima pendenza del gradiente idraulico. L'acquifero è una struttura tridimensionale ed una visione più completa considera anche le variazioni nel carico idraulico al suo interno. Punti di uguale carico idraulico sono evidenziati attraverso superfici equipotenziali. Sul piano orizzontale, queste costituiscono le linee equipotenziali e sono rappresentate, nel caso di acquifero freatico, dalle isofreatiche (tratto azzurro in figura). Il flusso idrico in un acquifero isotropo è sempre perpendicolare alle superfici equipotenziali, e questo percorso costituisce la linea di flusso. Un sistema di superfici equipotenziali e linee di flusso è chiamato: reticolo di flusso. Dato che l'acqua si muove da punti a potenziale più elevato verso punti a potenziale più basso, se questo aumenta in profondità, allora l'acqua sotterranea si sposta verso la superficie (Hubbert 1940)

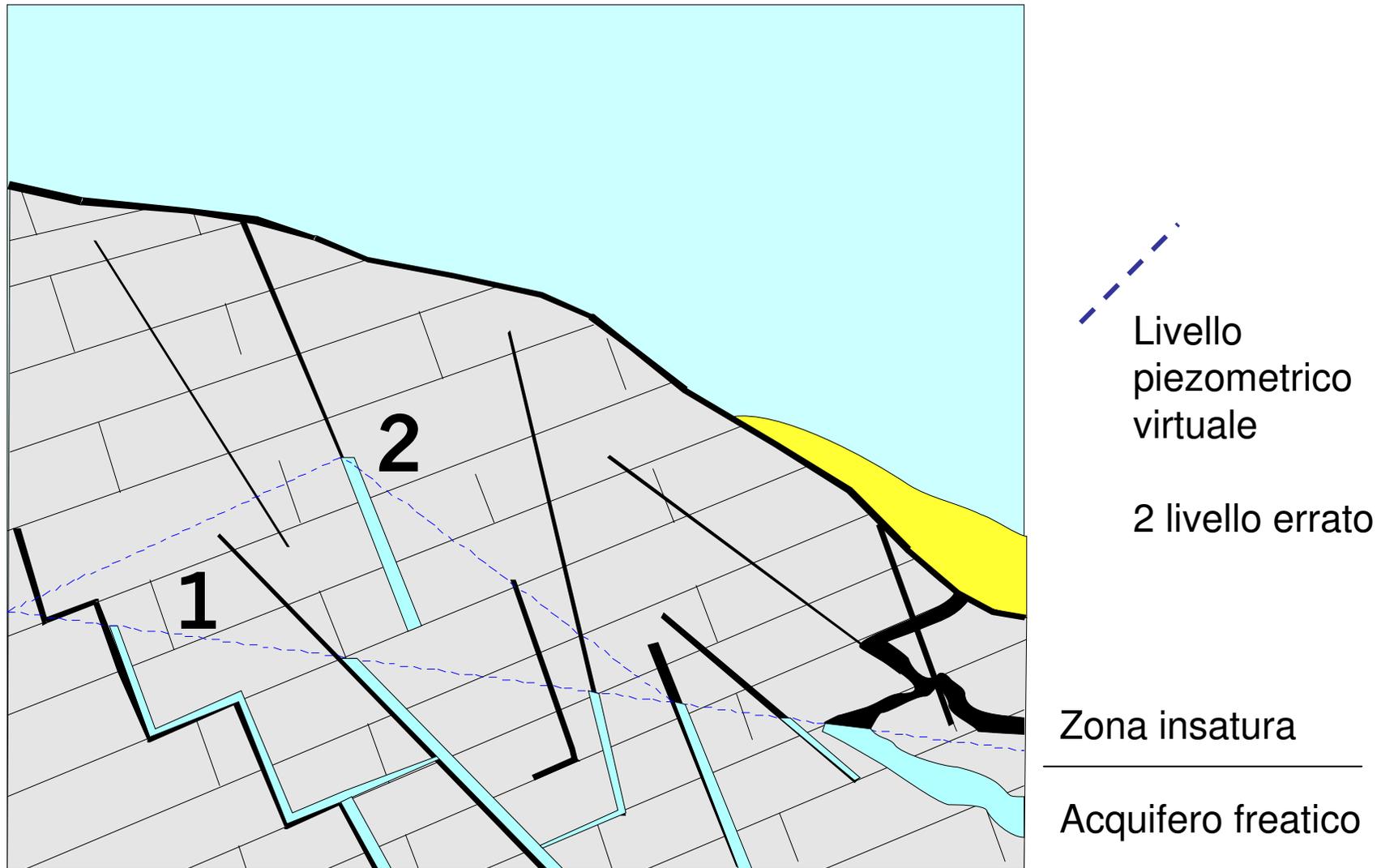


Superficie piezometrica (o potenziometrica)

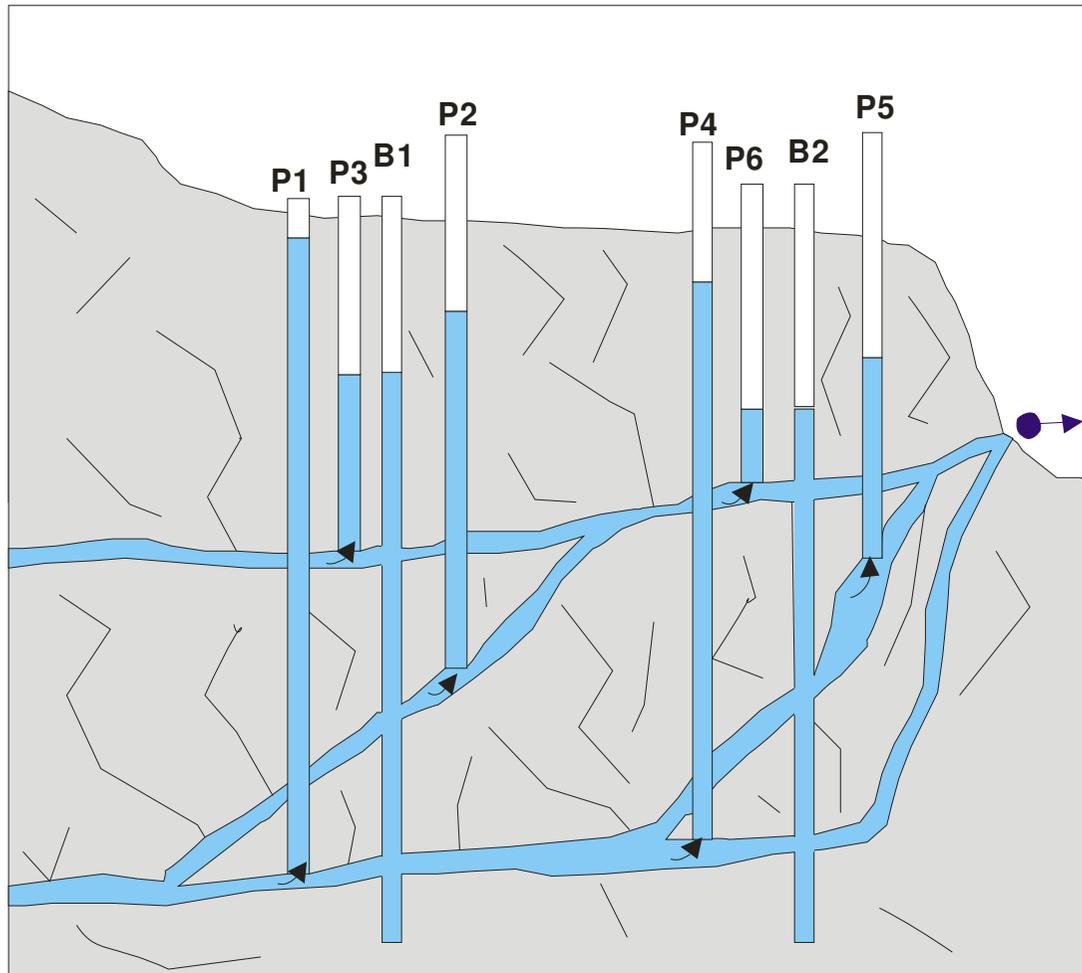
Una definizione generale è che la superficie piezometrica è quella immaginaria coincidente con il livello di pressione idrostatica dell'acquifero confinato: Il livello a cui risale l'acqua in un pozzo è quello della superficie piezometrica. Questa definizione è rigorosamente valida per flusso orizzontale in acquiferi orizzontali, quindi con $K_h \gg K_v$.

Alcuni studi idrogeologici contengono carte piezometriche basate su quote di falda prese in pozzi il cui filtro è all'incirca alla stessa profondità, ma che non sono associati ad un ben definito sistema acquifero. Questo tipo di superficie piezometrica è essenzialmente una carta delle isolinee del carico idraulico su di un piano orizzontale, tagliata attraverso la distribuzione tridimensionale del carico idraulico che esiste in tutta l'area rappresentata. Se vi sono componenti verticali del flusso, come succede spesso, i calcoli e le valutazioni effettuate possono differire molto dalla realtà. E' anche facile confondere la superficie freatica con quella piezometrica, in quelle zone dove coesistono entrambi i tipi di acquiferi.

Superficie piezometrica in acquiferi fratturati



(Idrogeologia: reticoli di flusso e carte piezometriche)



Rappresentazione schematica del flusso in un acquifero carsico con alimentazione da carico piezometrico maggiore (a sinistra) verso un carico piezometrico minore (a destra).

I pozzi B1-B2 filtrano tutte le gallerie a varie quote, gli altri filtrano solo dal fondo tubo.

La pressione nelle gallerie profonde è superiore a quella delle gallerie superiori

(Kupusovic, 1989 modificato)

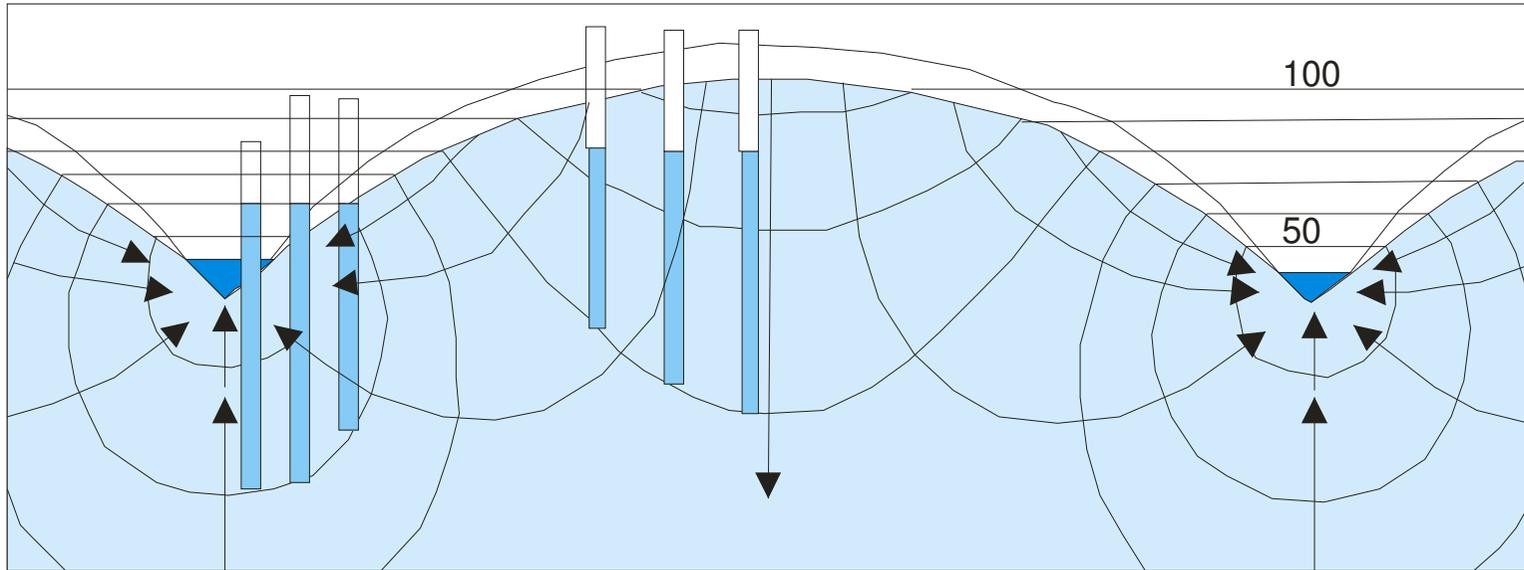
Come collegare i livelli piezometrici dei diversi pozzi ?

Potenziale e flusso sotterraneo

1. l'acqua sotterranea scorre verso punti a carico piezometrico più basso
2. le zone di ricarica sono quelle in cui l'energia potenziale (carico piezometrico) diminuisce con la profondità
3. le zone di recapito sono quelle in cui l'energia potenziale (carico piezometrico) aumenta con la profondità
4. Una linea equipotenziale unisce punti di uguale carico piezometrico
5. le linee di flusso sono normali alle superficie equipotenziali
6. nelle zone di ricarica le linee di flusso divergono
7. nelle zone di recapito le linee di flusso convergono
8. le equipotenziali tendono ad essere perpendicolari alle barriere impermeabili (e le linee di flusso sono parallele)
9. le equipotenziali tendono ad essere parallele alle zone di alimentazione (e le linee di flusso perpendicolari)
10. le linee di flusso sono oblique rispetto alla superficie di falda freatica nelle situazioni di ricarica o recapito
11. le linee di flusso sono rifratte attraverso gli strati a diversa permeabilità
12. uno spartiacque idrogeologico è una limite a flusso zero

Linee di flusso convergenti
nelle zone di recapito

Linee di flusso divergenti
nelle zone di ricarica

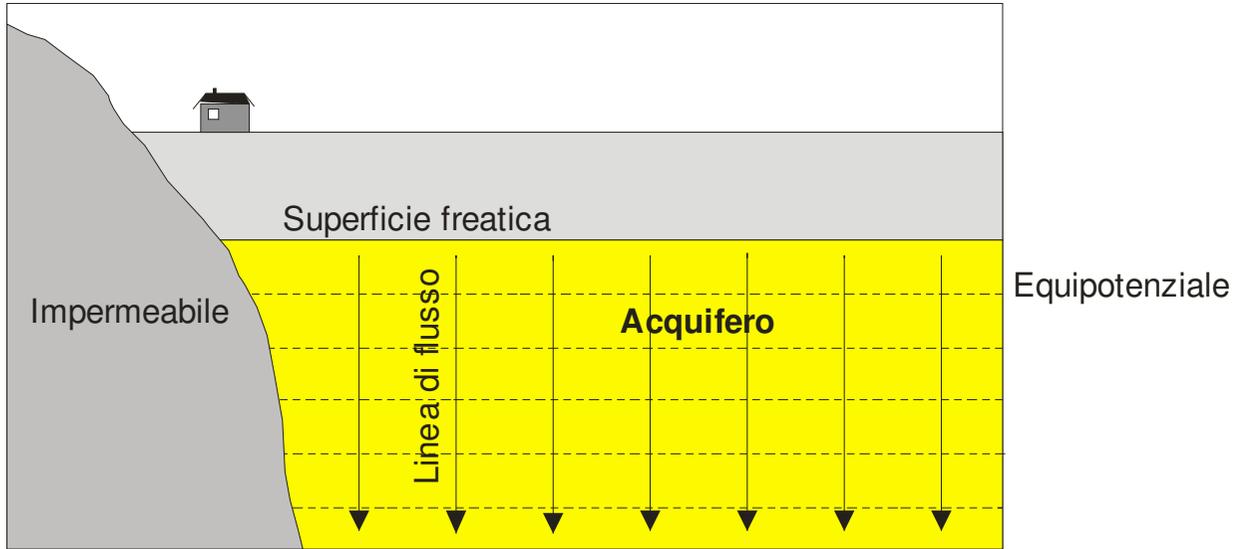


Il potenziale aumenta
verso il basso

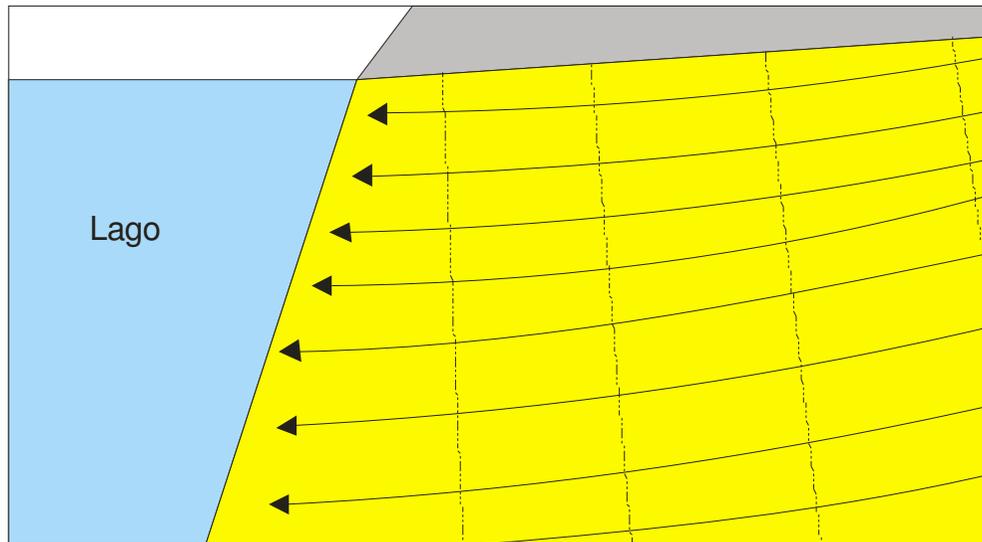
Il potenziale diminuisce
verso il basso

(Hubbert, modificato)

Flusso verso le zone
a carico piezometrico minore



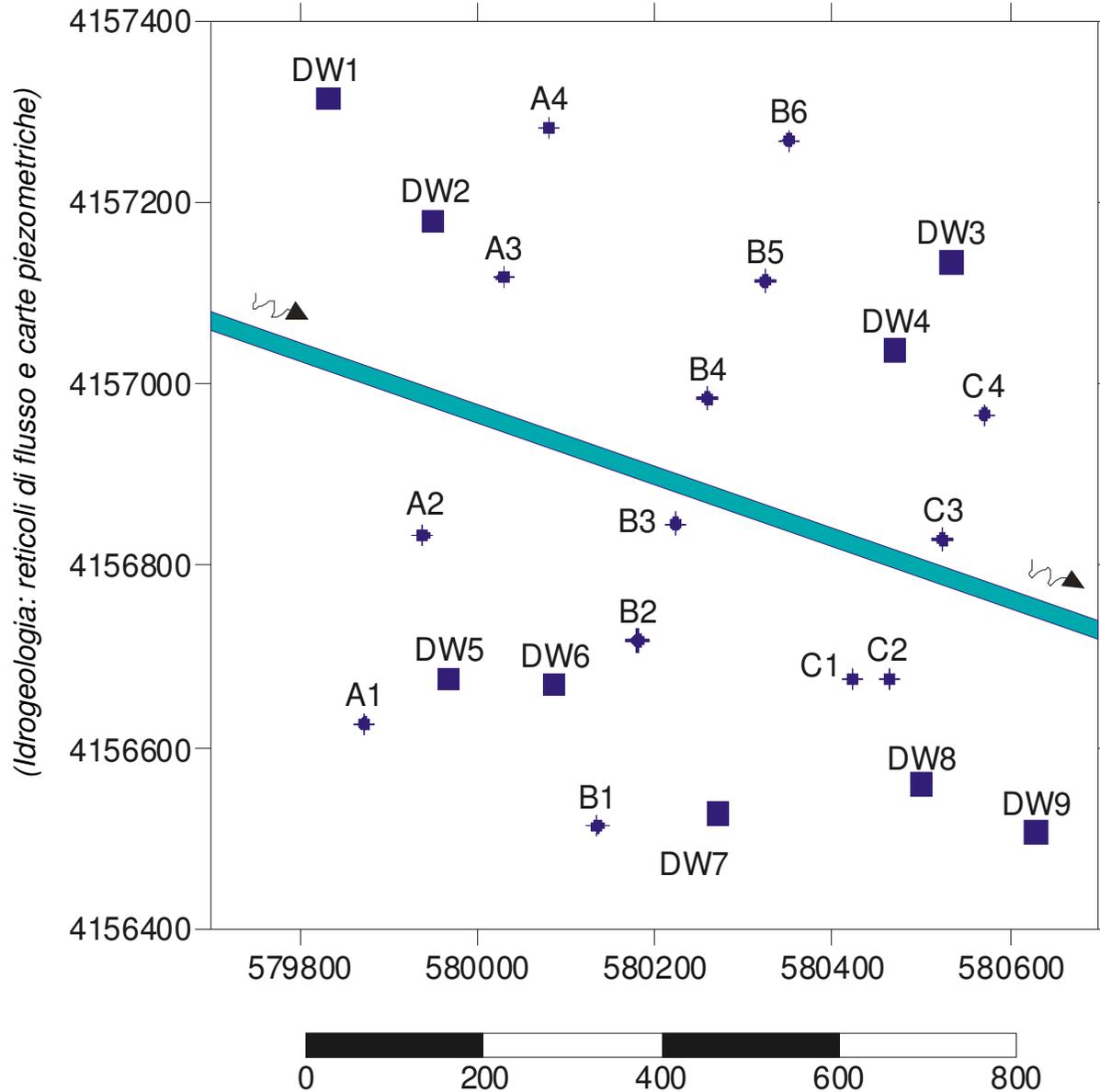
Limite a flusso zero



Limite a carico fisso

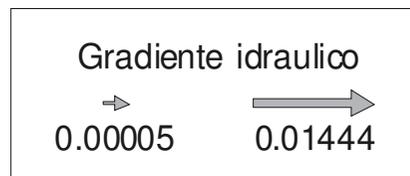
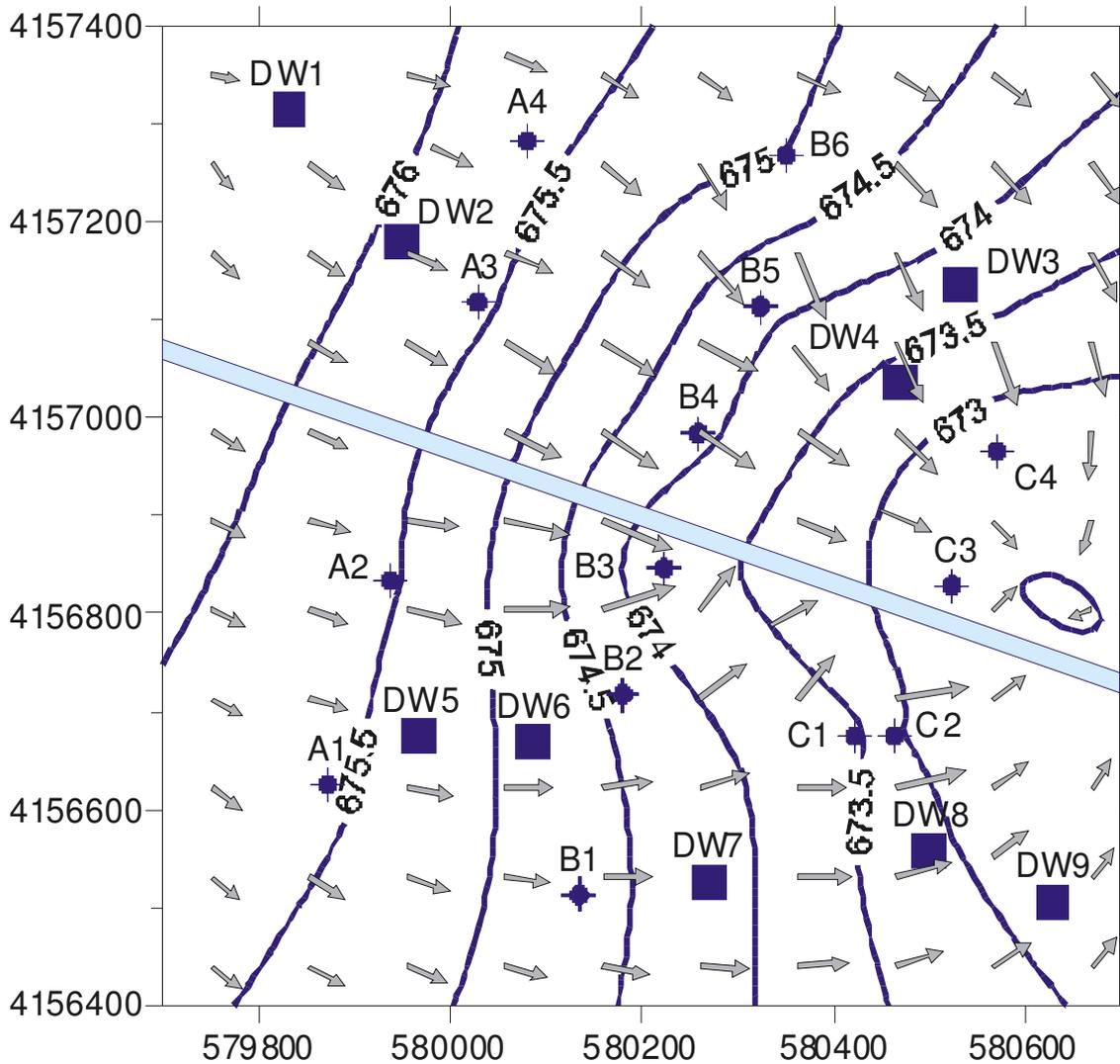
Costruzione di una carta piezometrica

(valutazioni sulla ricarica e geometria di un plume inquinante)



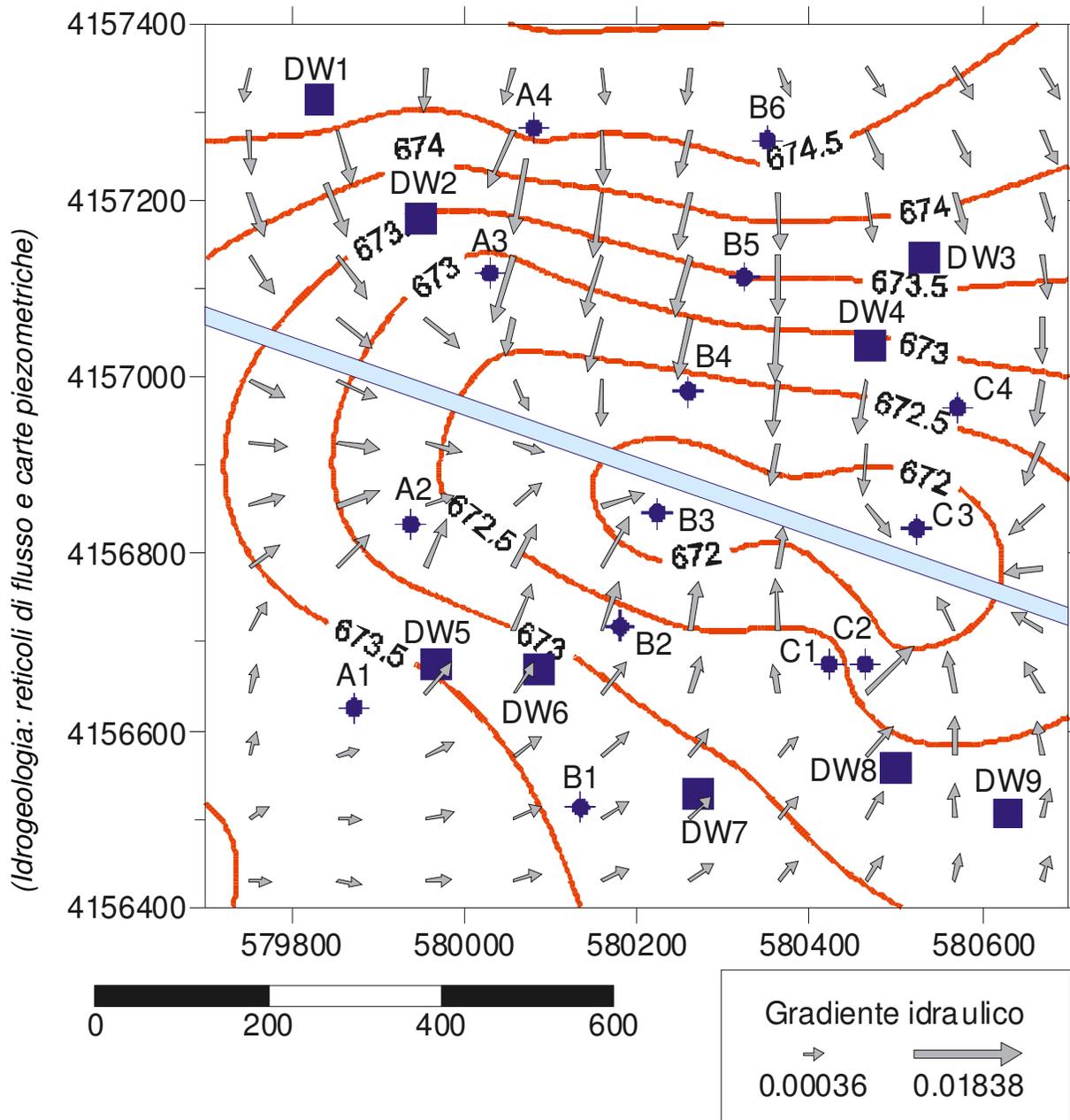
La posizione della falda nell'acquifero freatico alluvionale è registrata in 14 piezometri e 9 pozzi privati. Il fiume scorre da W verso E nel centro dell'area. Vi sono a disposizione due serie di misura in piena ed in magra. Le figure seguenti mostrano la piezometria ricavata mediante software di interpolazione e come il loro esame può aiutare a comprendere meglio l'estensione della zona di ricarica e la geometria di un eventuale plume inquinante proveniente dal pozzo DW7.

(Idrogeologia: reticoli di flusso e carte piezometriche)



Piezometria dell'acquifero freatico in fase di piena

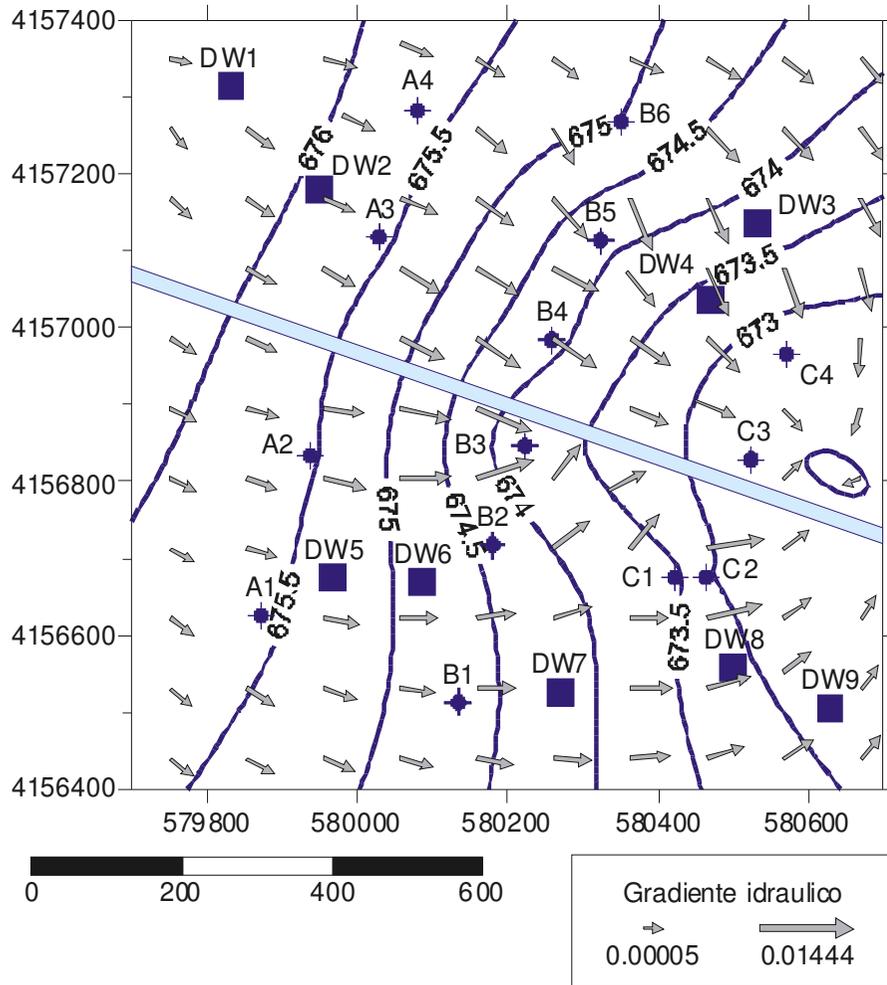
Nota: spiegate perché alcune isofreatiche non sono plausibili; La valutazione finale del calcolo eseguito dal programma va effettuata adottando criteri Idrogeologici; è corretto correlare la piezometria a destra del fiume con quella a sinistra ?; Cosa si dovrebbe conoscere circa i rapporti idraulici tra corso d'acqua e falda ?



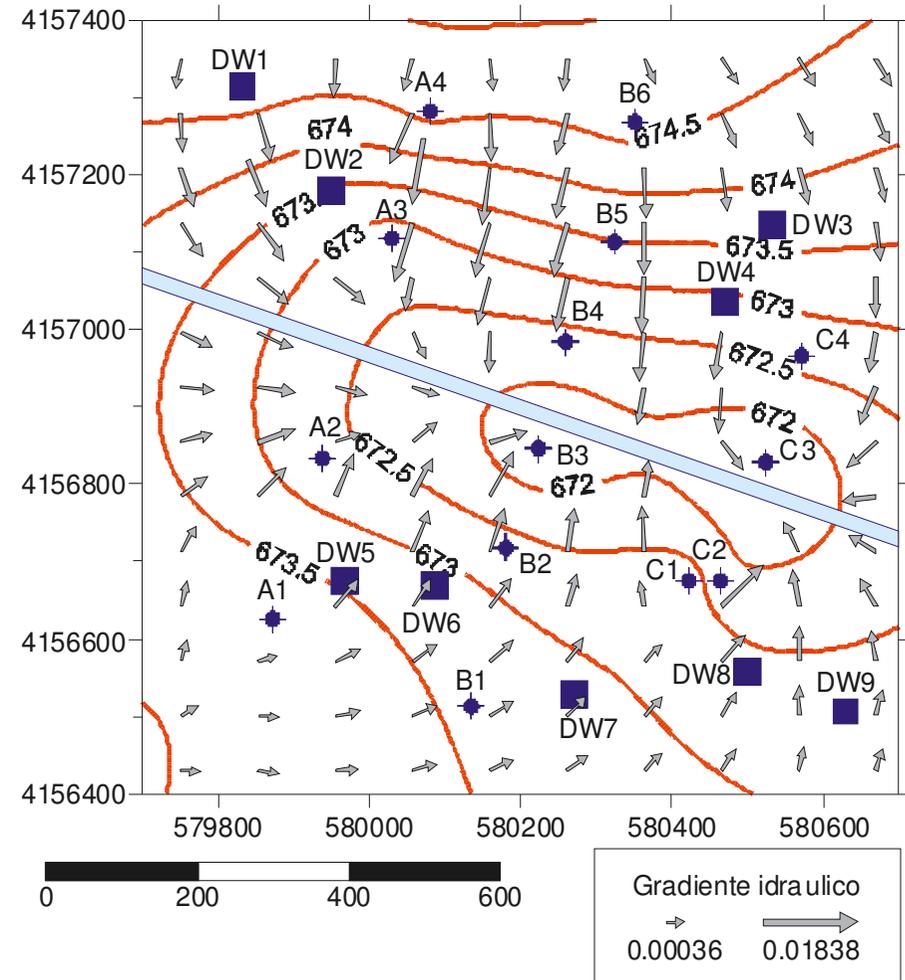
Piezometria dell'acquifero freatico in fase di magra

Nota: spiegate perché alcune isofreatiche non sono plausibili; La valutazione finale del calcolo eseguito dal programma va effettuata adottando criteri Idrogeologici; è corretto correlare la piezometria a destra del fiume con quella a sinistra ?; Cosa si dovrebbe conoscere circa i rapporti idraulici tra corso d'acqua e falda ?

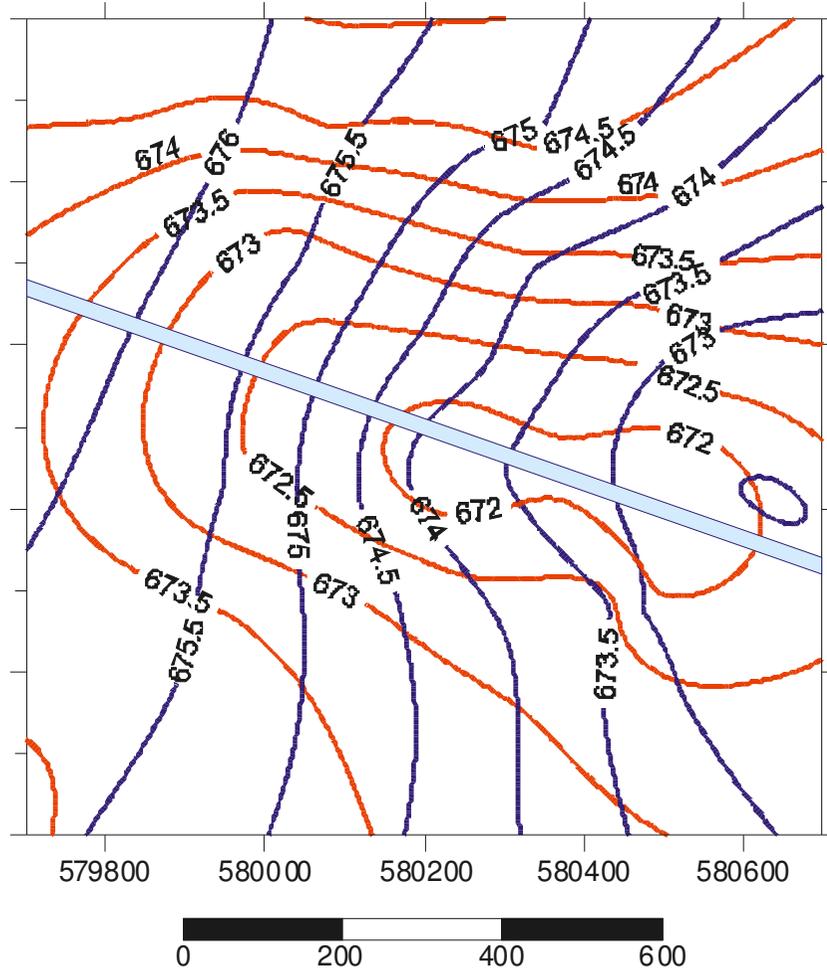
Piezometria dell'acquifero freatico in fase di piena



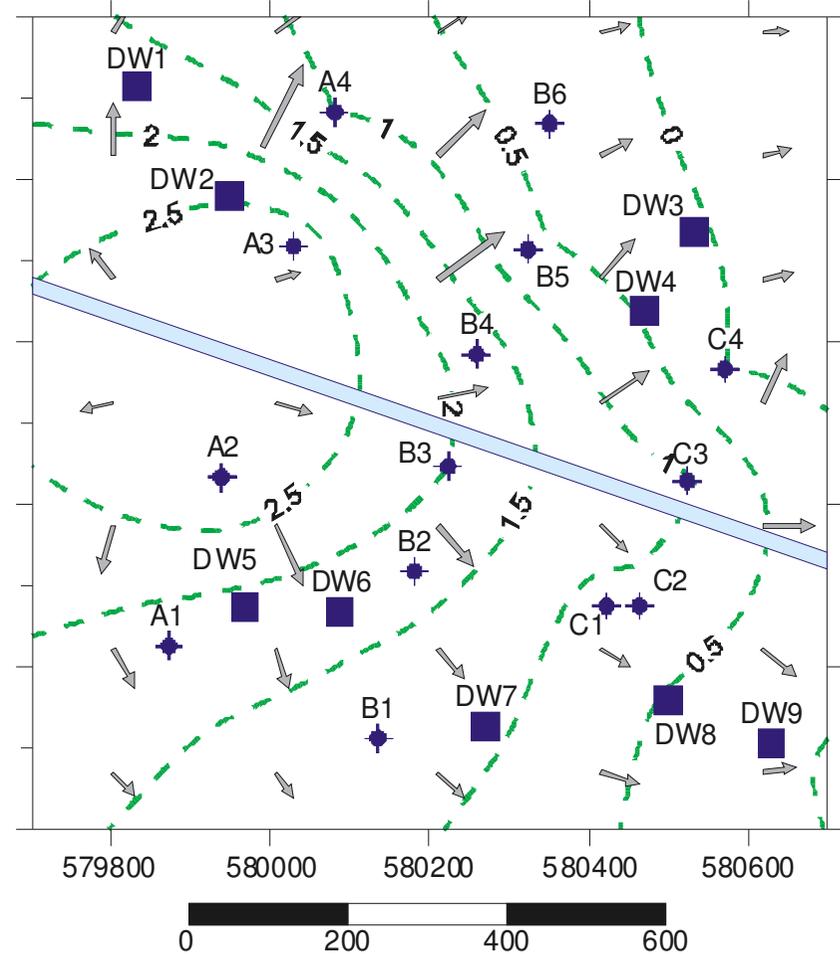
Piezometria dell'acquifero freatico in fase di magra



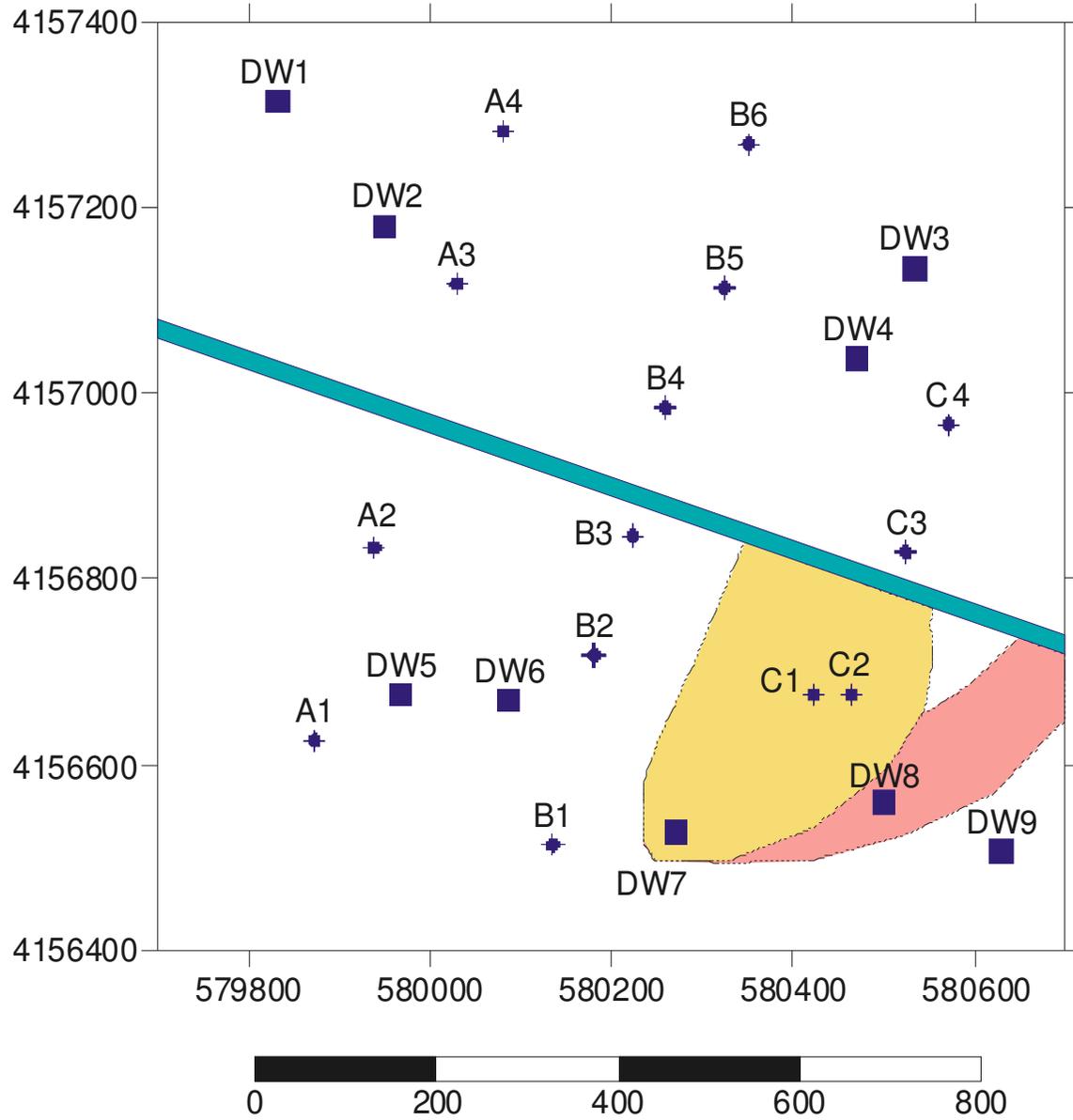
Piezometria di piena e magra sovrapposte



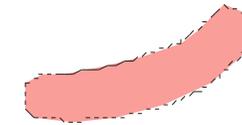
Linee di uguale oscillazione (aree di ricarica e recapito)



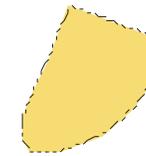
Geometria del plume inquinante



Esempio per inquinamento proveniente dal pozzo DW7



Geometria del plume in fase di piena della falda



Geometria del plume in fase di magra della falda

L'estensione effettiva dell'area contaminata è quella totale dei due pennacchi di inquinamento

Alcune domande di ripasso

Cosa sono le linee isopiezometriche, le linee di flusso e come si costruiscono ?

Cos'è la soggiacenza e come si calcola ?

Come si calcola il gradiente idraulico di una falda ?

Come si costruisce il profilo di depressione e quali informazioni fornisce sul rapporto alimentazione drenaggio ?

Come varia il profilo in base a K ?, a Q ?, ad S ?

Come si può calcolare la porosità di un acquifero con le carte piezometriche ?