

# Le carte piezometriche

## (Teoria e pratica nella costruzione e interpretazione)

Alessio Fileccia\*

### Definizione e scopi

L'inventario delle risorse idriche permette di elaborare dei dati di sintesi locali e regionali la cui espressione più nota è la Carta Piezometrica.

Questo utile prodotto dà la possibilità al geologo di valutare dal punto di vista qualitativo e quantitativo l'entità delle risorse e la loro vulnerabilità. Ricordiamo che la superficie piezometrica è una superficie immaginaria ottenuta correlando i livelli statici di pozzi che filtrano lo stesso acquifero confinato.

Per una definizione più precisa si vedano i lavori di Custodio, Llamas, Freeze..., in questa sede è importante sottolineare che quanto detto è valido nel caso teorico di un acquifero omogeneo infinitamente esteso, a debole spessore ed in assenza di componente verticale di flusso ( $V_z = 0$ ).

La Carta rappresenta tramite curve di livello (isopieze), la morfologia della superficie della falda idrica in un determinato periodo, analogamente alle isoipse delle carte topografiche.

Essendo basata su misure discrete, la sua attendibilità e quindi le valutazioni possibili, dipende da numerosi fattori tra cui:

- 
- numero delle misure
- distribuzione spaziale
- eterogeneità dell'acquifero rappresentato
- possibilità di cartografie di supporto (carte geologiche, delle isopache, delle isobate, idrochimiche, di resistività, ecc.)

Quando tutto questo è disponibile possiamo ricavare interessanti informazioni su:

- profondità della tavola d'acqua
- direzioni di flusso sotterraneo
- gradienti idraulici
- tipo di falda

- profilo di depressione
- zone di ricarica e recapito
- eterogeneità dell'acquifero
- limiti al contorno
- zone di sovrasfruttamento idrico
- zone di ingressione di acque salmastre

### La cartografia idrogeologica

Il termine Carta Idrogeologica, racchiude diverse tipologie che da un punto di vista pratico possono descrivere sia caratteristiche di conducibilità idraulica dei terreni sia idrauliche, od entrambe.

Data la difficoltà e l'incertezza di rappresentare la superficie piezometrica di un acquifero roccioso fratturato, caratteristica frequente nelle zone collinari e montane, in queste zone si ricorre ad una classifica dei materiali dal punto di vista qualitativo in base alla diversa conducibilità idraulica.

La Carta rappresenta quindi aree a diverso colore a cui corrisponde, ad esempio, una conducibilità idraulica alta, media o bassa; oltre a questo saranno evidenziati principali punti d'acqua naturali ed artificiali e le sorgenti.

In questo tipo di cartografia mancano in genere le linee isopieze.

Nelle zone di pianura, costituite da materiali sciolti granulari è in genere possibile ricavare una superficie piezometrica e la carta prende quindi il nome di Carta Piezometrica, termine generale, o Carta delle Isofreatiche, se rappresenta l'acquifero libero superiore; anche in questo caso saranno riportati i punti d'acqua ed in particolare i pozzi.

Dove esistono acquiferi sovrapposti, saranno rappresentate con diversa simbologia le varie superfici piezometriche e direzioni di flusso, anche utilizzando più carte.

\* Geologo libero professionista, Treviso

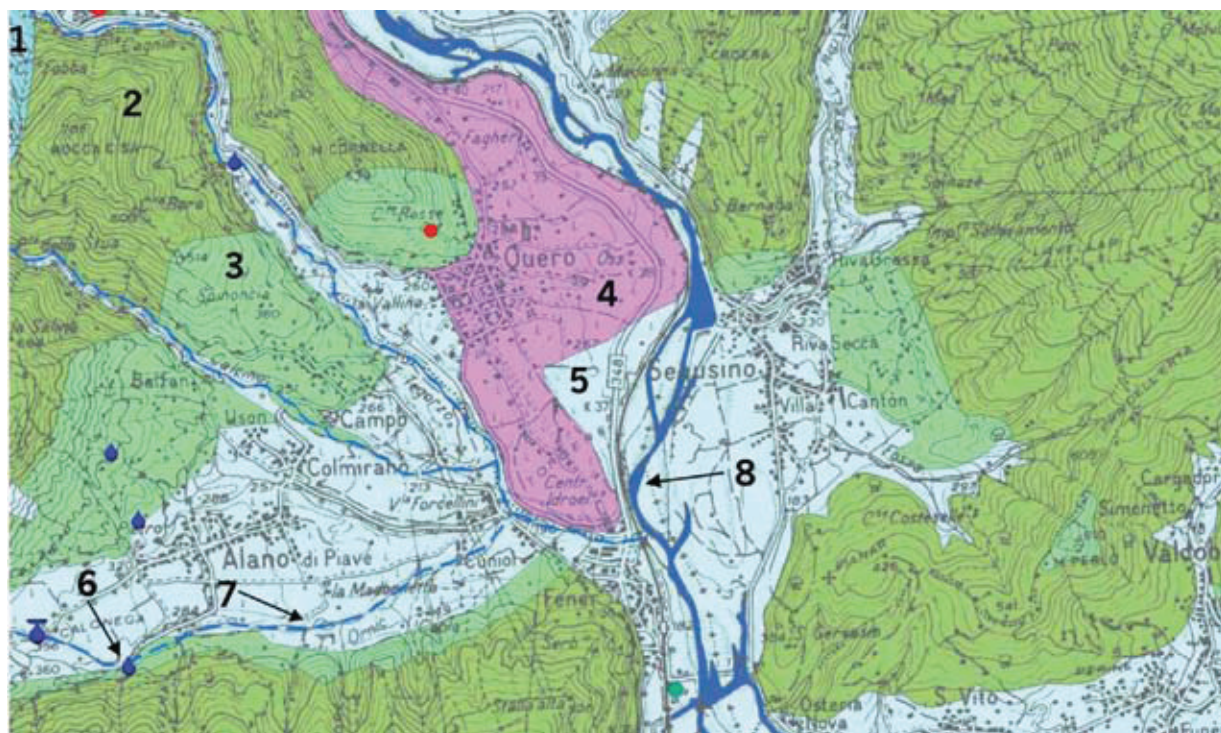


Fig. 1. Particolare della Carta Idrogeologica dei M. Grappa e Cesen, originale alla scala 1:50000 (A. Fileccia per Regione Veneto, 2006) 1: formazioni calcaree fratturate, K medio-elevato; 2: formazioni calcaree fratturate, K medio; 3: formazioni calcareo marnose fratturate, K basso; 4: depositi sciolti morenici, K basso; 5: depositi sciolti alluvionali, K elevato; 6: sorgente captata; 7: corso d'acqua temporaneo; 8: corso d'acqua perenne



Fig.2: Particolare della Carta Geologica del Veneto, originale alla scala 1:250000 (Regione Veneto, 1988); Si tratta di una cartografia geologica con informazioni di tipo idrogeologico nelle zone di pianura; 1: formazioni calcaree; 2: formazioni conglomeratiche; 3: formazioni marnose; 4: depositi grossolani sciolti; 5: depositi medio fini sciolti; 6: linea isofreatica e quota slm; 7: direzione di flusso sotterranea; 8: limite superiore della zona delle risorgive; 9: faglia sepolta

### Come si costruisce una Carta Piezometrica

Il lavoro passa attraverso due fasi principali, quella di campagna e quella di ufficio che possono succedersi e ripetersi anche più volte.

La parte iniziale prevede la raccolta dei dati sui pozzi e sorgenti presso vari uffici, seguita da una prima visita sul terreno per georeferenziare i punti, verificarne l'attendibilità e soprattutto controllare se siano misurabili con il freatometro.

In questa fase si effettua anche un'inchiesta sul posto che in genere permette di ritrovare altri dati; viene quindi costruita una prima rete di misura ed una scheda tipo.

I punti della rete di misura, di cui possono far parte pozzi, sorgenti, fiumi e bacini in contatto idraulico con l'acquifero, vengono quindi quotati con un grado di precisione che dipende dal particolare progetto, dalla distanza reciproca e dall'accidentalità del terreno.

In certi casi può essere sufficiente la quota ricavata dalla carta topografica, in altri una misura strumentale con livello o GPS differenziale.

L'ultima fase è quella di ufficio che prevede l'omogeneizzazione dei dati e la preparazione di un tabulato con l'elenco dei punti d'acqua, le coordinate x, y, z la profondità di falda misurata dal punto di riferimento e la quota di falda sul mare come illustrato nel fac-simile in basso.

misurate derivino da punti d'acqua che filtrano lo stesso acquifero ed i corpi idrici superficiali appartengano allo stesso bacino.

### Misura dei livelli piezometrici in campagna

Le informazioni sui punti d'acqua vanno raccolte su schede che è consigliabile predisporre per il particolare progetto di volta in volta e che devono evidenziare, anche con fotografie, il punto di riferimento quotato (P.R.) dal quale sono state effettuate le misure di profondità del livello statico (L.S.)<sup>1</sup> (fig. 3).

La misura vera e propria del livello statico si esegue con il freatometro costituito da una piattina con due sottili fili in acciaio, marcata ogni centimetro ed un puntale elettrico all'estremità, che emette un segnale quando quest'ultimo tocca l'acqua.

Sulla scheda va inoltre segnata la profondità del pozzo e quella dei filtri, questi ultimi indicano, infatti, la quota della superficie equipotenziale di misura.

È interessante a questo punto esaminare la fig. 4 A, che mostra uno schema dei rapporti tra superfici equipotenziali, linee di flusso, profondità dei filtri, ecc. Nelle zone di ricarica il flusso è verso il basso, le linee di corrente sono divergenti, il potenziale diminuisce in profondità (vedi livelli di PZ3-4), nelle zone di recapito il flusso

Committente:					Progetto:			
Data:					Località:			
2-3 posizione in coordinate chilometriche sistema Gauss Boaga ovest								
4 = quota piano campagna; 5 = altezza riferimento sopra p.c.; 6 = altezza riferimento sul mare								
7 = livello statico dal riferimento; 8 = livello statico sul mare								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sigla	x	y	z = p.c.	h rif. su p.c.	h rif. s.l.m.	L.S. da rif	L.S. slm	Note
P1	1749095	5075535	58.074	0.51	58.584	-25.5	33.084	

Terminata questa fase si riportano i punti d'acqua (p1-p2 ecc.) su di una carta topografica con, a fianco, le quote di falda della colonna 8 e si può iniziare la procedura di interpolazione come spiegato più avanti.

In assenza di pozzi si può lo stesso ricostruire una carta piezometrica, utilizzando i livelli statici presi da laghi, fiumi, zone umide, a patto di assicurarsi che le quote

è verso l'alto, le linee di corrente sono convergenti, il potenziale diminuisce verso la superficie (vedi livelli di PZ1-2). I piezometri misurano il carico idraulico corrispondente alla superficie equipotenziale che passa per il

1. Questa fase è importante dato che il pozzo sarà misurato più volte nel corso del tempo e da operatori diversi.

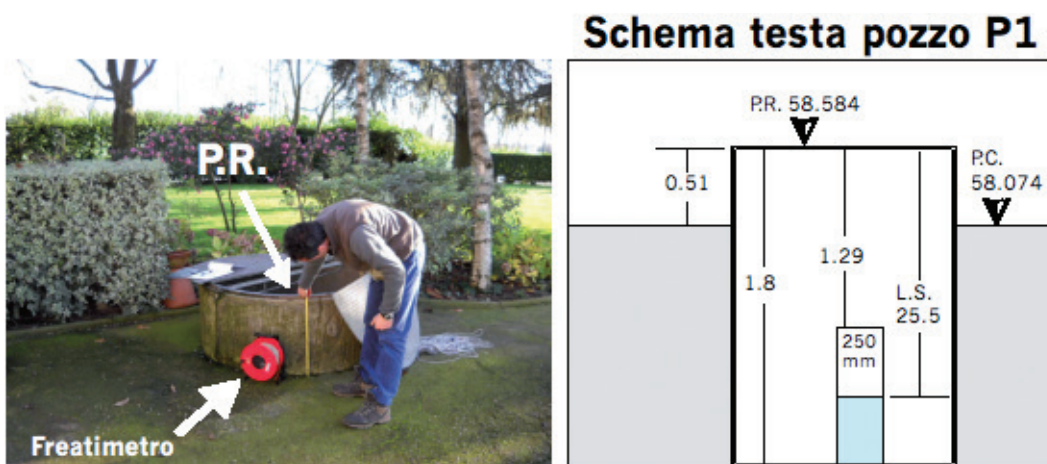


Fig.3. Monografia del pozzo e dati da acquisire

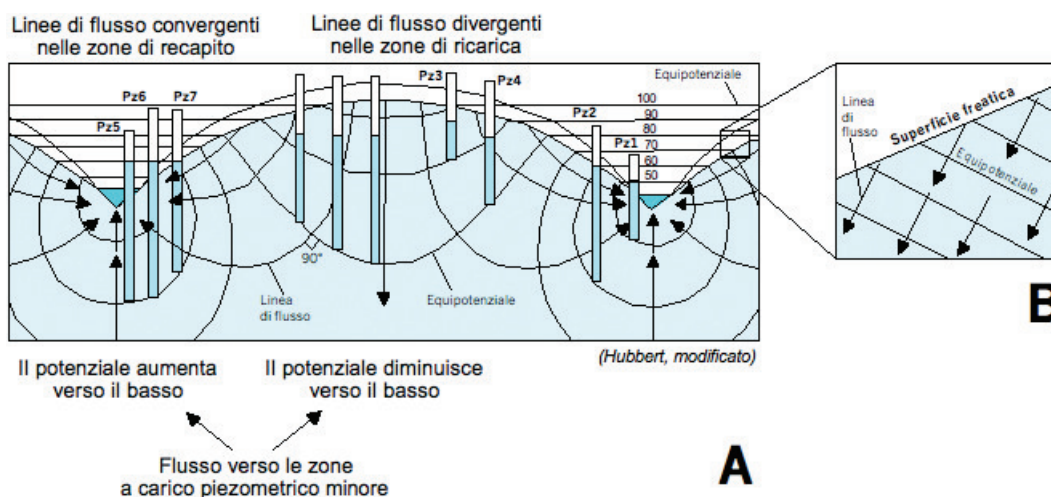


Fig. 4. Schema dei rapporti tra aree di ricarica e recapito, vedi testo (ridisegnata da Hubbert, 1940)

filtra; se i piezometri filtrano la stessa superficie equipotenziale il carico misurato è lo stesso (PZ5-6-7).

La superficie freatica corrisponde ad una linea equipotenziale solo in caso di falda orizzontale ( $z = 0$ ), in tutti gli altri i casi non è né una linea di corrente né di potenziale ma semplicemente la superficie per cui  $p = 0$  (fig. 4 B).

**Determinazione della quota del punto d'acqua mediante livellazione**

Qualora il progetto richieda una certa precisione (ad esempio in zona di bassa pianura o pozzi molto ravvicinati) si ricorre a misure di quota con GPS differenziale o livello automatico o stazione totale laser.

In questo articolo descriviamo il metodo più semplice, quello della livellazione dal mezzo, che permette errori di chiusura di 1-2 mm/km, più che sufficienti nelle indagini idrogeologiche.

È necessaria almeno una stadia, una piastra con supporto centrale a testa emisferica su cui appoggiare la stadia ed un autolivello (fig. 4).

Si inizia appoggiando la stadia ad un punto (1) la cui quota è nota o fissata arbitrariamente (lo strumento permette di ricavare i dislivelli tra punti e non le quote assolute).

Si effettua la messa in bolla e quindi una lettura che dà l'altezza in cm della linea di mira sopra il punto (lettura indietro  $L_i$ ), senza spostare lo strumento si sposta la stadia nel punto seguente (2) e si effettua una seconda lettura (lettura avanti  $L_a$ ), la differenza tra le due letture corrisponde alla differenza di quota di terreno tra i punti 1 e 2 e conoscendo al quota assoluta di 1 si ricava quella di 2; la procedura si ripete poi spostando lo strumento e mantenendo fissa la stadia in 2.

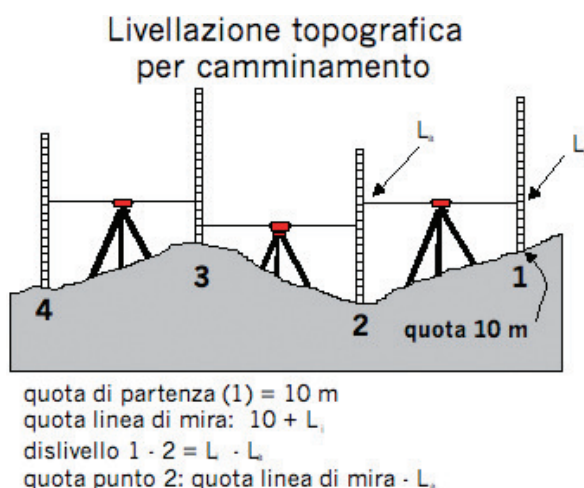


Fig. 5. Schema esecutivo di una livellazione dal mezzo per camminamento

### Tracciamento delle linee isopiezometriche

Le Carte Piezometriche si possono tracciare mediante quattro metodologie fondamentali:

1. metodo del triangolo (interpolazione grafica)
2. utilizzo di un software di interpolazione
3. costruzione del reticolo di flusso
4. simulazione mediante modello numerico

In questo capitolo descriveremo il primo metodo, quello più utilizzato nella fase di approccio di studio e la cui conoscenza è importante per valutare e correggere l'interpretazione con software (2), in un altro articolo è riportato anche il metodo 3.

- È necessario disporre di una carta topografica su cui sono riportati i punti d'acqua; in mancanza si possono riportare su di un foglio bianco alla scala di lavoro

- sovrapporre un foglio trasparente ed unire i punti d'acqua vicini tra loro disegnando un reticolo a maglia triangolare in base alle differenze di quota piezometrica e spaziatura scegliere l'equidistanza, misurare sulla carta la lunghezza dei segmenti che uniscono i punti d'acqua e 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

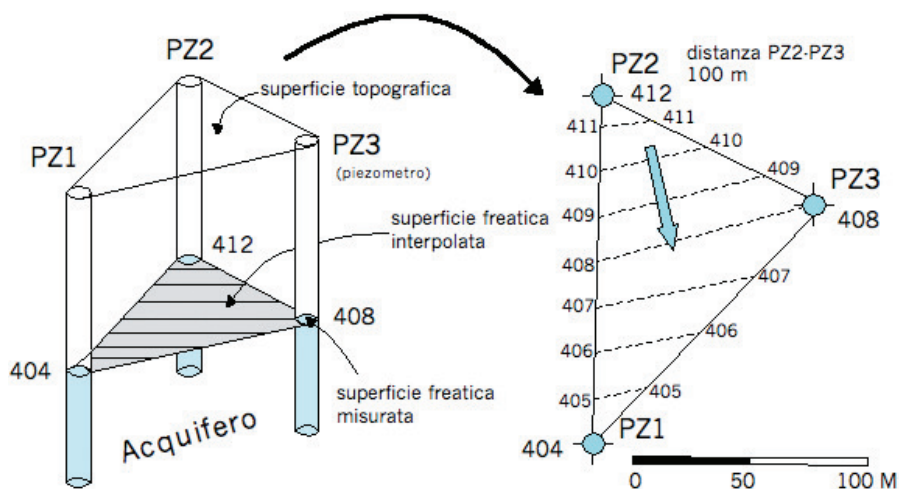


Fig. 6. Schema per il tracciamento delle isopiezometriche

PZ3 sono intervallate, lungo il segmento PZ1 - PZ3, di 1,525 cm e quelle tra PZ3 e PZ2 di 1,13 cm. La procedura va ripetuta su ogni segmento che unisce i diversi punti d'acqua (pozzi) e la carta apparirà come una serie di linee spezzate che andranno opportunamen-

te arrotondate, prima a mano e poi con curvilinee. La direzione del flusso sotterraneo si determina tracciando la linea di corrente, normale alle isopieze, lungo la direzione di massima pendenza; il flusso sotterraneo si muoverà verso le quote piezometriche più basse.

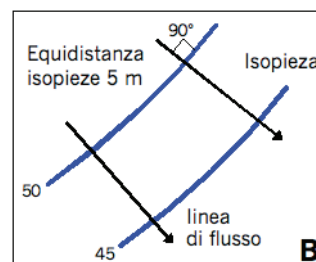
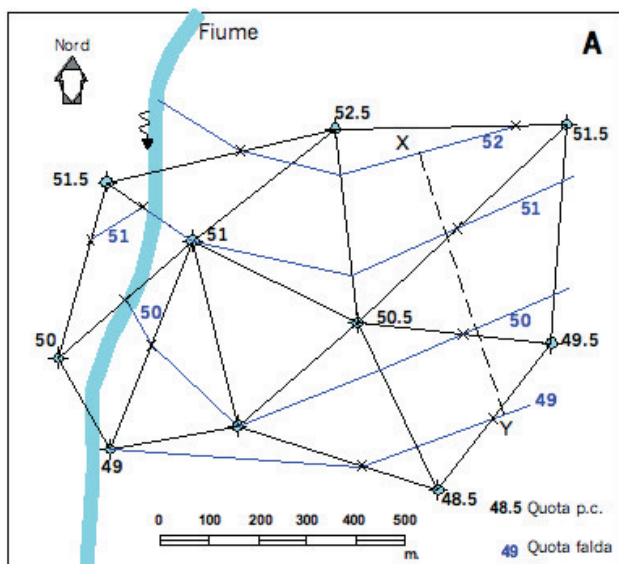


Fig. 7. a: i punti d'acqua vanno uniti con un reticolo a maglia triangolare e per i vari segmenti che si ottengono si applica la procedura di costruzione delle isopieze (od isofreatiche) in blu e descritta alla pagina precedente. b: terminologia

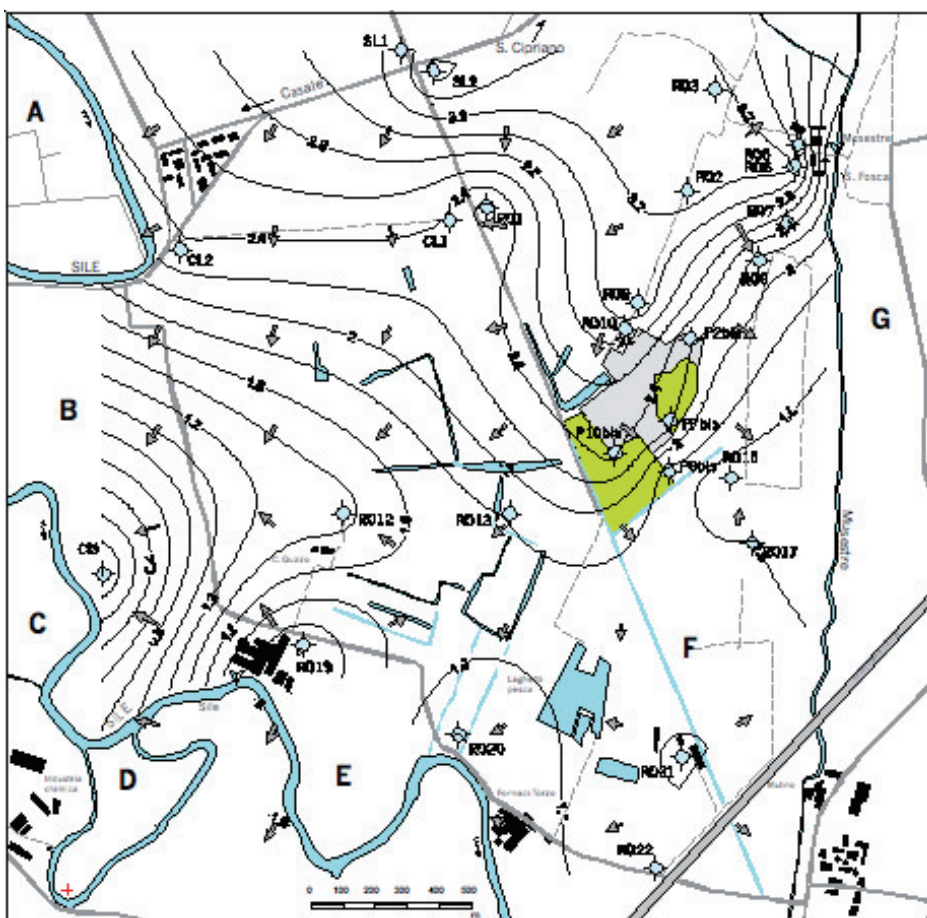


Fig. 8. Esempio di carta delle isofreatiche ottenuta con software di interpolazione, sono ben visibili le direzioni di flusso, gli assi di alimentazione e drenaggio ed il ruolo di ricarica – recapito svolto dai corsi d'acqua (Piano di caratterizzazione di discariche di rifiuti, Treviso, A. Fileccia, misure nov. 2000)

In pratica sono in genere sufficienti 5-10 linee di corrente, si inizia dalle quote maggiori tracciando gli assi di drenaggio od alimentazione in corrispondenza delle zone in cui le isopieze sono a maggiore curvatura e si passa poi alle altre zone.

Consigli:

- non estendere l'interpretazione ad aree dove non vi sono pozzi o punti d'acqua in collegamento idraulico con la falda (ad esempio A - B - C - D - E - F - G in fig. 8)
- valutare idrogeologicamente le isopieze concentriche, che in genere vanno evitate (bull's eye degli inglesi)
- a meno di validi motivi idrogeologici non correlare le misure attraverso le due rive di corsi d'acqua
- le isopieze sono sempre parallele ad un limite permeabile e perpendicolari ad un limite impermeabile
- nel passare attraverso mezzi eterogenei (a diversa K) le linee di flusso seguono la legge di rifrazione
- la possibilità di avere delle stratigrafie precise aiuta ad una migliore rappresentazione delle isopieze ed anche a correggere l'interpretazione via software

A lavoro completato si potranno ottenere delle carte come quelle in figg. 8-9, in cui si possono riconoscere i seguenti lineamenti:

- linea isopieza e quota sul mare
- soggiacenza della falda (differenza tra quota topografica e quota dell'isopieza nel punto considerato)
- equidistanza isopieze (0.2 m in fig. 8)
- punto d'acqua misurato (pozzo)
- direzione di flusso sotterraneo (perpendicolare all'isopieza e diretta verso la diminuzione di gradiente idraulico)
- zona di drenaggio (area depressa dove convergono le linee di flusso)
- zona di alimentazione (area sopraelevata dove divergono le linee di flusso)

La carta deve inoltre riportare la data delle misure.

Il termine Carta Piezometrica o Carta delle Equipotenziiali o dei Livelli Statici è quello più appropriato rispetto a Carta della Falda Freatica.

I carichi idraulici totali che sono quelli rilevati in campagna ed interpolati, derivano da pozzi

con filtri a diverse profondità sotto il livello statico e ricordiamo che questi punti di misura rappresentano solo alcune delle infinite equipotenziiali che possono o meno essere vicine alla superficie freatica.

### Interpretazione delle carte piezometriche

Le elaborazioni che si possono fare su di una carta piezometrica sono diverse, sia di tipo qualitativo sia quantitativo, rivediamole insieme.

#### *Profondità della superficie piezometrica (Carta della Soggiacenza)*

Per ogni punto d'acqua si calcola la differenza tra quota topografica e quota della falda, si può quindi costruire un secondo elaborato che è la Carta della Soggiacenza. La costruzione si effettua nello stesso modo della Carta delle Isopieze ma in questo caso le normali alle linee di uguale soggiacenza non vanno tracciate, perché in genere sono senza significato.

#### *Determinazione del gradiente idraulico medio*

Il gradiente idraulico medio ( $i$ ) viene calcolato su di un profilo determinato da un piano verticale passante per una linea di flusso (linea con la maggior pendenza).

Nel caso dell'esempio rappresentato nella figura 7A, il gradiente idraulico esistente tra i punti X ed Y è dato dalla seguente equazione:

$$i = \frac{(HX - HY)}{L} = \frac{(52 - 49)}{570} = 0,0052$$

Dove:

$i$  = gradiente idraulico medio

$L$  = distanza in scala ( $L = 620m$ )

$HX, HY$  = quota della superficie piezometrica rispettivamente in X ed Y

Come ulteriore applicazione citiamo il calcolo della velocità media di flusso delle acque sotterranee nell'acquifero delle Sabbie Verdi del Bacino di Parigi (fig. 10).

La distanza degli affioramenti orientali (Puisaye, Champagne) dalla regione parigina ammonta mediamente a 150 km e la differenza di livello piezometrico ricavata dalle curve si aggira sui 90 m, quindi il gradiente idraulico medio è  $i = 90/150000 = 6 \times 10^{-4}$

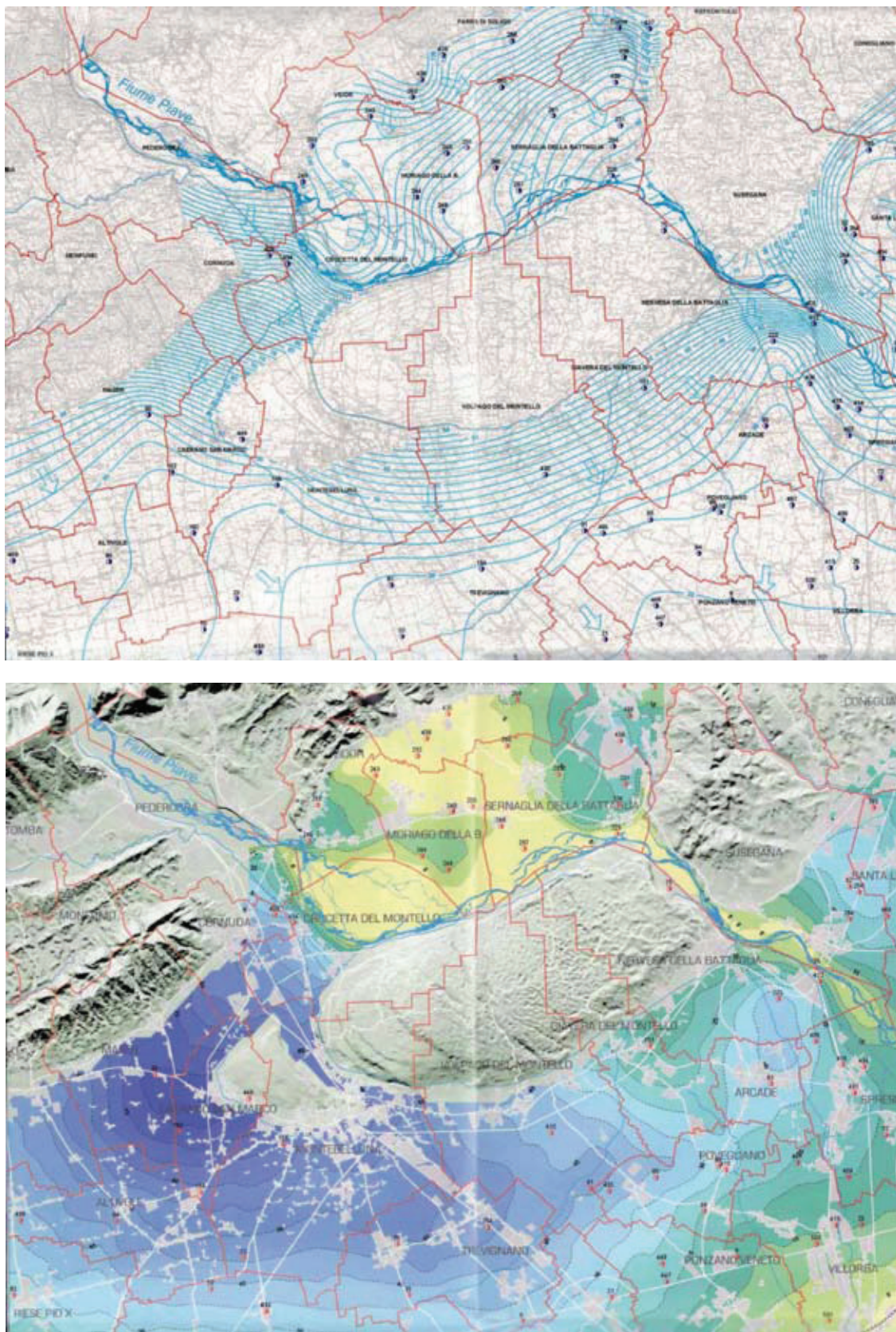


Fig. 9. In alto Carta delle Isofreatiche della provincia di Treviso ed in basso la Carta della Soggiacenza derivata (M. Mazzola, 2003); le zone in blu, e verde sono quelle con falda freatica più profonda



Il coefficiente di conducibilità idraulica è di  $3 \times 10^{-5}$  m/s, mentre la porosità efficace ( $m_e$ ) è del 20%, dunque la velocità effettiva media del flusso ( $V_e$ ) si determina come di seguito:

$$(V_e = K_i/m_e)$$

$$V_e = (3 \times 10^{-5} \times 6 \times 10^{-4}) \times 100/20$$

$$= 9 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

$$V_e = 0,007 \text{ m/giorno}$$

$$= 2,8 \text{ m/anno}$$

A livello preliminare il calcolo della direzione di flusso e del gradiente idraulico è una fase importante in molte ricerche idrogeologiche. Nello studio per la definizione delle zone di protezione di pozzi per acqua potabile, questi due dati servono per ricavare l'ampiezza del fronte di richiamo; così come nella progettazione delle bonifiche è importante definire direzione e forma del plume inquinante per posizionare la

barriera idraulica o per programmare cadenza ed ubicazione dei punti di campionamento della falda.

In molti casi pratici in cui non vi è la possibilità di eseguire numerose indagini in sito, può essere necessario stimare gradiente e direzione di flusso sulla base di pochi pozzi.

In precedenza abbiamo visto che per definire questi due parametri sono necessari almeno tre punti, basandoci sull'esemplificazione che la tavola d'acqua sia schematizzabile ad una superficie piana, in realtà non è così, almeno non ovunque, e quindi se il metodo dei tre punti od in ogni caso un metodo d'interpolazione è accettabile in generale, in pratica dobbiamo valutare il margine d'incertezza chiedendoci:

- l'ipotesi di una falda piana introduce un errore accettabile?
- che margine di errore introduce nel calcolo del gradiente, la distanza reciproca tra i pozzi della rete di misura, in relazione alla scala di lavoro?

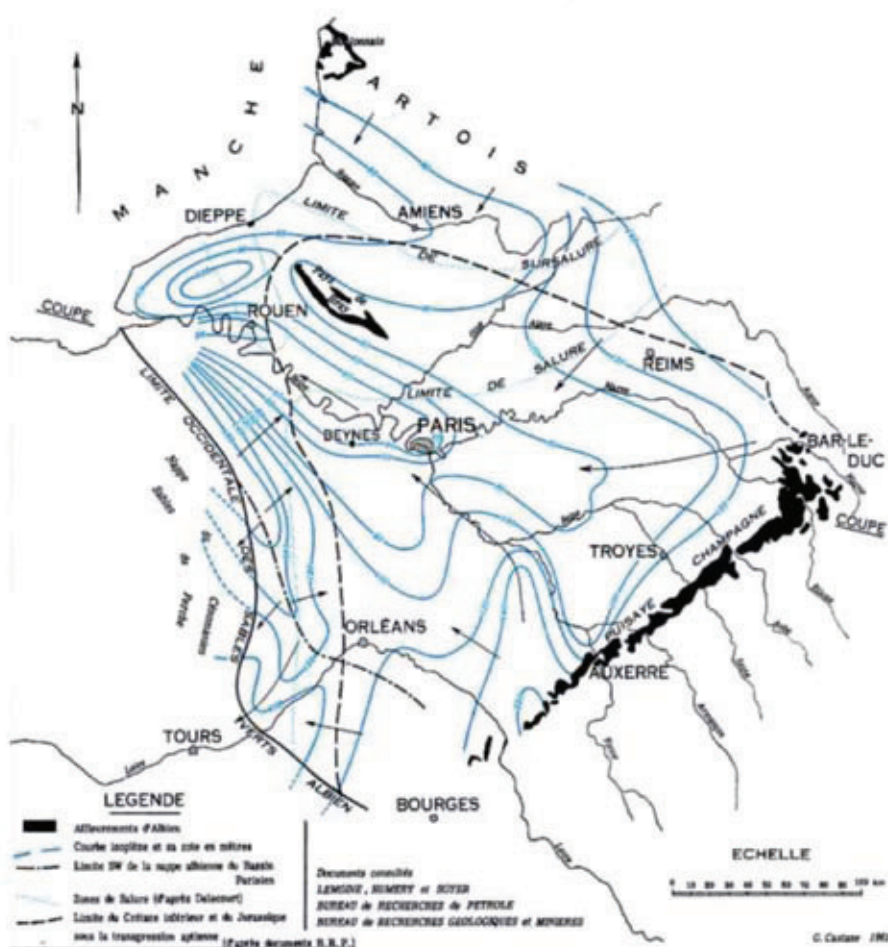


Fig. 10. Bacino di Parigi, Carta delle isopieze dell'acquifero sabbioso (Castany, 1961)

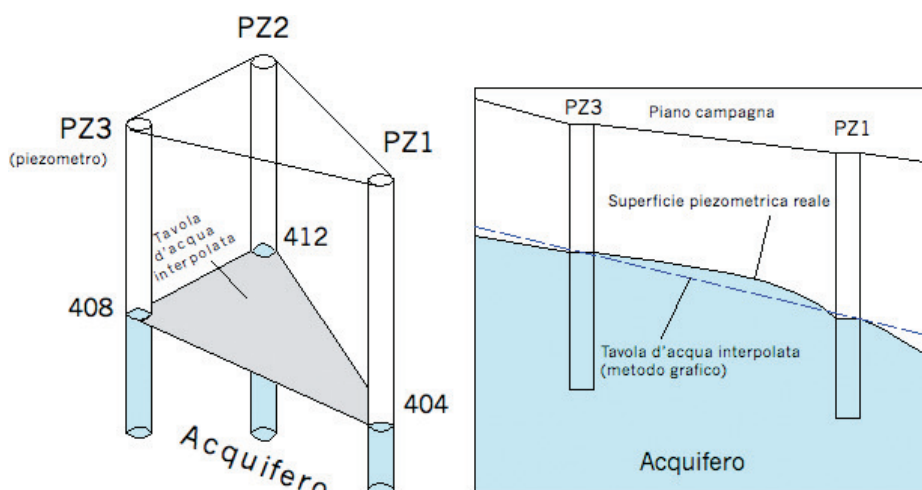


Fig. 11. Differenza tra superficie freatica calcolata con il metodo grafico e reale

Quanto detto è particolarmente vero per gli acquiferi freatici dove la variazione del carico idraulico non è lineare ma parabolica (fig. 11).

Un'approssimazione del profilo di depressione basato sulla misura dei livelli nei tre pozzi, introduce un errore nella stima del gradiente, che dipende dalla spaziatura dei pozzi e dalla curvatura della superficie freatica.

La seconda domanda riguarda la distribuzione spaziale della conducibilità idraulica, caratteristica comune alla maggioranza degli acquiferi.

L'eterogeneità dei materiali contribuisce, infatti, a variare la distribuzione del carico piezometrico all'interno di un acquifero.

Alcuni autori (Bryce, Cole, Dagan, Silliman) hanno cercato di approfondire questo argomento, utilizzando soprattutto metodi statistici, giungendo a queste considerazioni:

- negli acquiferi liberi la capacità di stimare grandezza e direzione del gradiente idraulico dipende dall'andamento non lineare del profilo di depressione e dall'eterogeneità dei materiali
- la prima caratteristica (non linearità) porta a sottolineare che il metodo dei tre punti introduce una distorsione del valore di gradiente per pozzi poco distanti tra loro; tale differenza si riduce aumentando la distanza tra i punti di misura
- la presenza di eterogeneità porta ad errori nella valutazione della direzione di flusso; questo implica che il metodo dei tre punti va utilizzato con notevole senso critico nel caso di forti variazioni stratigrafiche

- nella stima di un flusso regionale, in assenza di forti zone di ricarica o recapito locali è abbastanza corretto utilizzare tre punti d'acqua per calcolare gradiente e direzione di flusso
- un ordine di grandezza di questi errori può essere il seguente (Silliman, Frost 1995):
  - errore trascurabile nel calcolo della direzione di flusso, con tre pozzi a distanza reciproca di circa 100 -1500 m
  - errore trascurabile nel calcolo del gradiente, con tre pozzi a distanza reciproca di circa 200 – 3000 m
- una rete di misura più fitta aumenta la precisione del valore di questi due parametri

### Determinazione delle zone di ricarica e recapito

Un acquifero sotterraneo svolge due importanti funzioni che sono quelle di raccogliere e trasmettere l'acqua attraverso i pori della roccia. La trasmissione avviene dalle aree di ricarica (entrata) verso quelle di recapito (uscita) e la variazione di immagazzinamento, in condizioni di equilibrio è zero.

$$\Delta S = \text{ricarica} - \text{recapito} = \text{entrate} - \text{uscite} = 0 \quad (\text{entrate} = \text{uscite})$$

Le zone di ricarica sono situate dove l'acqua entra nell'acquifero ed in genere questo si verifica in aree topograficamente elevate<sup>22</sup> (fig. 10, colline di Bar le Duc).

Altri punti sono costituiti da infiltrazioni di acque me-

2 In molte zone a clima semiarido e topografia non accentuata è frequente la situazione in cui la superficie freatica segue la topografia con andamento più dolce.

teoriche, di corsi d'acqua, laghi o bacini in genere, aree umide, acquiferi confinanti e ricariche artificiali.

Le analisi chimiche mostrano che il contenuto di sali disciolti aumenta in genere con la profondità.

Le zone di recapito sono situate ai punti di uscita dell'acqua sotterranea, quali sorgenti e zone di filtrazione di fiumi, laghi od aree paludose, come ad esempio, il corso della Senna tra Parigi e Dieppe in fig.10.

Queste zone sono spesso topograficamente depresse e caratterizzate da specchi d'acqua più o meno estesi.

I prelievi artificiali dovuti a pozzi o dreni costituiscono un tipo particolare di zona di recapito (fig. 12).

Costruendo carte piezometriche in diversi regimi della falda, si possono ricavare le oscillazioni e, oltre alla

quantità delle riserve sfruttabili (vedi oltre), anche una migliore definizione delle aree di recapito e ricarica, le prime riconducibili a quelle a maggiore oscillazione.

Nelle applicazioni ambientali la procedura permette di ricavare indirettamente anche le zone a diversa vulnerabilità intrinseca dell'acquifero.

Nell'esempio in fig. 13, tratto da Brassington, la zona di ricarica è situata nell'angolo di sud ovest mentre quella di recapito a nord est, mentre la sola lettura delle carte piezometriche avrebbe dato un'interpretazione diversa.

### Determinazione del tipo di falda

La forma della superficie piezometrica permette di distinguere diversi tipi di falda.

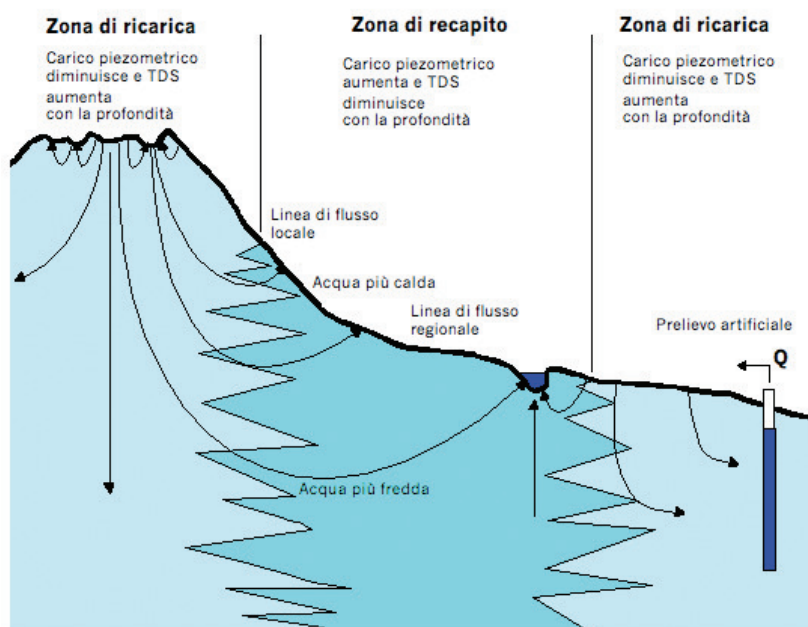


Fig.12. Aree di recapito e ricarica e linee di flusso

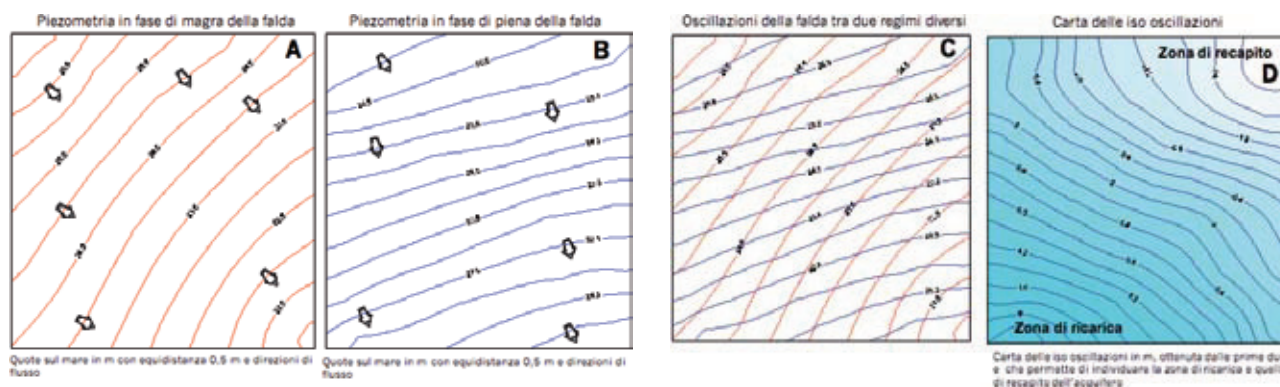


Fig. 13: le carte in due periodi diversi di regime piezometrico (A-B) mostrano altrettante direzioni di flusso sotterraneo.

Il passaggio intermedio si ottiene dalla sovrapposizione delle due carte ( C ). Unendo i punti di uguale variazione piezometrica nel periodo considerato si ottiene la carta D che indica un'area di ricarica nella zona di sud est, alquanto diversa da un esame della sola piezometria (ridisegnato da Brassington, 1990)

Se consideriamo un piano verticale:

- falde a superficie curva (cilindrica, parabolica, iperbolica)
- falde a profilo lineare (pendenza costante)

Se consideriamo un piano orizzontale:

- falde a linee di flusso parallele
- falde radiali

**Le falde a superficie curva** sono caratterizzate da una superficie piezometrica spesso cilindrica le cui generatrici sono orizzontali e perpendicolari al flusso, dunque all'asse della corrente (fig. 14). Il flusso a due dimensioni

può essere analizzato in un piano, passante per una linea di corrente.

L'intersezione della superficie piezometrica con il piano definisce una curva che rappresenta il profilo di depressione della falda. Nella falda cilindrica i profili di depressione lungo linee di corrente parallele sono identici.

**Il profilo lineare** è spesso una caratteristica di falde confinate, caratterizzate da linee di flusso parallele ed isopieze equidistanti.

**Le falde a linee di flusso parallele** possono avere sia un profilo di depressione lineare che curvo e quindi appartenere a falde freatiche od artesiane.

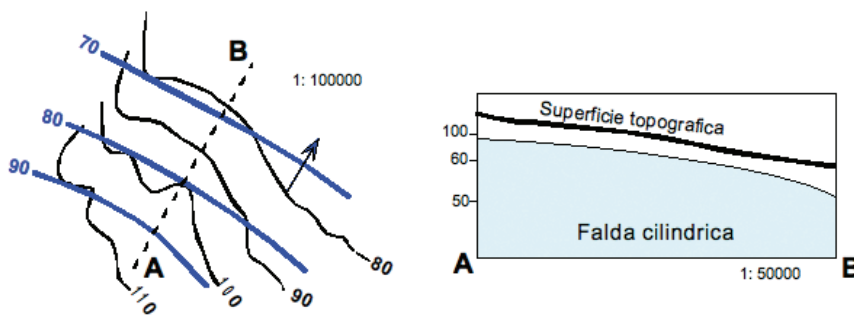


Fig.14. Profilo di depressione di una falda cilindrica

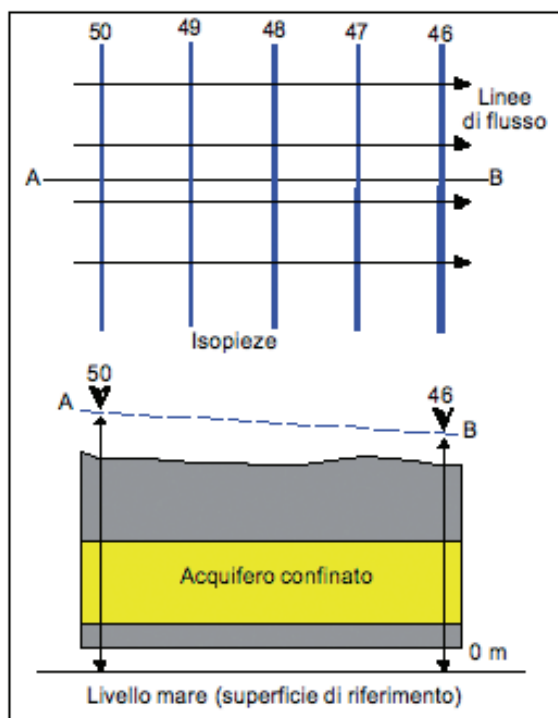


Fig. 15. Falda a linee di corrente parallele e profilo lineare

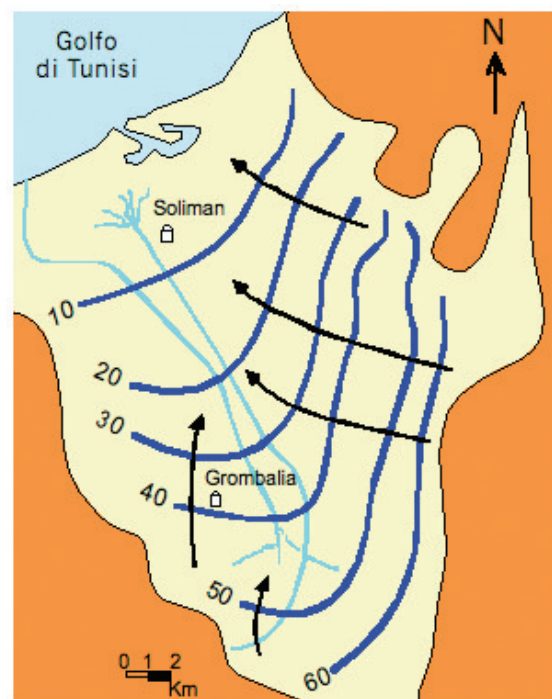


Fig. 16. Falda radiale a filetti convergenti della piana di Grombalia, Tunisia, è visibile l'area montana, marrone che costituisce la zona di ricarica e l'area di recapito, costituita dai due corsi d'acqua (ridisegnato da G. Castany, 1961)

**Le falde radiali:** le falde cilindriche rappresentano una situazione ideale che raramente si può riscontrare nelle falde idriche che si osservano in natura. Generalmente, la superficie piezometrica reale ha una forma conica, parabolica o iperbolica. Le linee di corrente sono convergenti e/o divergenti (fig. 16), ed il flusso va analizzato in tre dimensioni, i profili di depressione lungo piani verticali e paralleli non sono uguali.

### Interpretazione del profilo di depressione

L'interpretazione del profilo di depressione permette di ricavare dati riguardanti:

- regime
- variazioni di conducibilità idraulica dei terreni attraversati dal flusso sotterraneo
- portata della falda
- struttura dell'acquifero

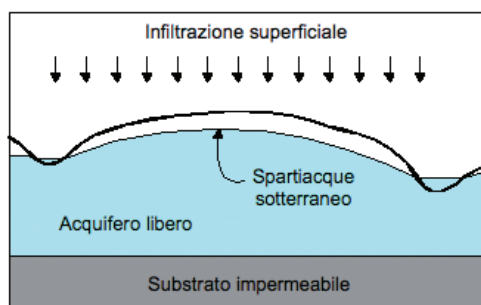


Fig. 17. Profilo di depressione ellittico dovuto alla presenza di due limiti a carico fisso (zone di recapito)

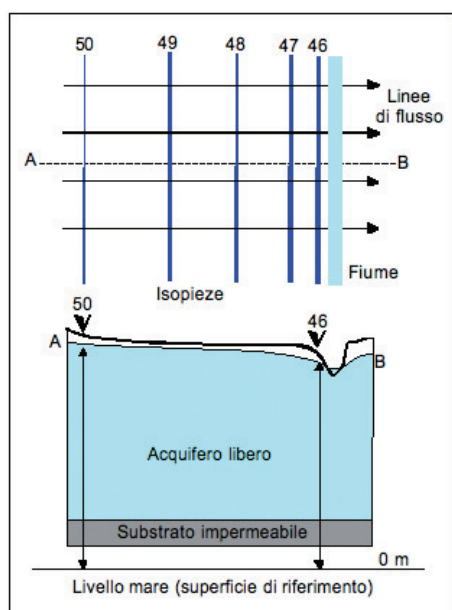


Fig. 18. Profilo di depressione parabolico per la presenza di un fiume drenante (limite di recapito)

Un profilo a pendenza costante per un lungo tratto, può indicare una falda confinata (fig. 15) e/o una certa omogeneità dell'acquifero, mentre uno curvo indica la presenza di variazioni di conducibilità idraulica, vicinanza con limiti di recapito/ricarica, variazioni di regime ecc. (figg. 17-18)

### Profilo di depressione e conducibilità idraulica dell'acquifero

Le equazioni che descrivono i profili di depressione tengono conto del coefficiente di conducibilità idraulica. In generale e grazie ai deboli gradienti che vi sono in natura, l'applicazione della legge di Darcy dà risultati con un'approssimazione sufficiente all'interpretazione delle carte piezometriche.

Prendiamo su due linee di corrente che determinano un tubo di flusso, due sezioni ad esse normali  $S_1$  e  $S_2$  (fig. 19), se tra esse non vi sono prelievi od immissioni ed applicando il principio di continuità le portate unitarie che le attraversano sono uguali, cioè:

$$V_1 = k_1 i_1 = V_2 = k_2 i_2 \text{ e:}$$

$$k_1/k_2 = i_2/i_1$$

$i_1$  e  $i_2$ , sono i gradienti idraulici determinati dalla distanza delle curve isopieze

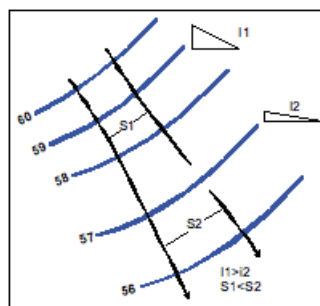


Fig. 19. Calcolo della conducibilità idraulica tramite il profilo di depressione

Il gradiente idraulico, quindi la pendenza del profilo di depressione, risulta essere nel caso

in cui si abbia portata costante, inversamente proporzionale al coefficiente di conducibilità idraulica della legge di Darcy, così, a portata costante, le variazioni di conducibilità idraulica inducono dei cambiamenti di pendenza della superficie piezometrica: più la conducibilità idraulica è elevata minore è la pendenza del profilo, maggiore è la pendenza minore è la conducibilità idraulica.

Nella maggior parte dei casi, gli acquiferi presentano delle variazioni importanti di conducibilità idraulica che si traducono sulla morfologia della superficie piezometrica e di conseguenza sul profilo di depressione, con il risultato di produrre una cartografia caratterizzata da continue variazioni di direzione di flusso e distanza tra le linee isopieze.

Se la conducibilità idraulica decresce nel senso del flusso, la pendenza del profilo di depressione aumenta e la sua curvatura è accentuata. Questo cambiamento si traduce in un infittirsi delle curve isopieze (fig.20). Un esempio di ciò è rappresentato da un complesso di terrazzi alluvionali lungo il fianco di una vallata, in cui la granulometria diminuisce dai versanti al centro fino ad arrivare ad argille. Al contrario se la conducibilità idraulica cresce nel senso del flusso, la pendenza del profilo diminuisce e le isopieze sono più distanziate (fig.21).

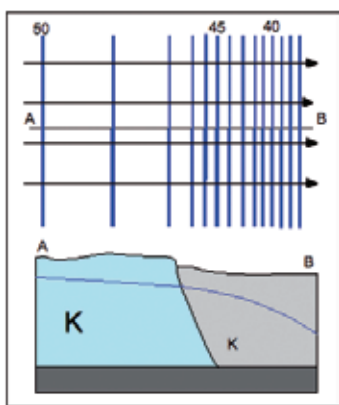


Fig. 20. Diminuzione di conducibilità idraulica nel senso del flusso sotterraneo. Con il substrato orizzontale, le linee isopieze (in blu) si infittiscono quando il flusso attraversa un terreno a conducibilità idraulica minore

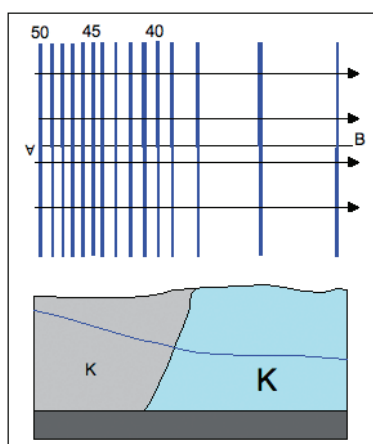


Fig. 21. Se la conducibilità idraulica aumenta nel senso del flusso le isopieze sono più distanziate

**Profilo di depressione e variazioni di portata dell'acquifero (alimentazione - drenaggio)**

In condizioni di regime permanente, la posizione della superficie libera (tavola d'acqua) rappresenta l'equilibrio tra il flusso in entrata e quello in uscita (verso il fiume in fig. 22)

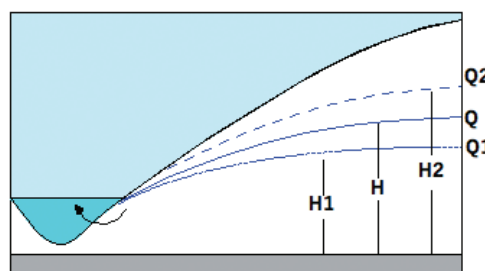


Fig. 22. Variazione del gradiente con la portata di alimentazione

Consideriamo ora due periodi di un anno idrologico normale, con un acquifero omogeneo ed un substrato orizzontale: se la portata in ingresso aumenta (da Q1 a Q2), il livello passa da H1 ad H2, con un aumento del gradiente idraulico.

Al contrario durante la fase di magra quando l'alimentazione diminuisce da Q2 a Q1, la falda si abbassa e di conseguenza si appiattisce anche il gradiente idraulico. L'entità del gradiente (H2-H1) è regolata dalla conducibilità idraulica dell'acquifero soprattutto in vicinanza della riva del fiume; quando (H2-H1) è alto il ritardo nel flusso verso il fiume è elevato, viceversa quando (H2-H1) è basso la risposta di livello che si ha nel fiume è più veloce.

Applicando la legge di Darcy durante due regimi idrologici diversi, attraverso due sezioni uguali (S1, S2) e supponendo la conducibilità idraulica costante si ottiene:

$$Q1 = ki_1 S_1$$

$$Q2 = ki_2 S_2$$

$$\text{Da cui } Q1/Q2 = i_1 / i_2$$

La pendenza del profilo di depressione, tenendo costanti tutti gli altri fattori, è dunque direttamente proporzionale alla portata che attraversa una determinata sezione. L'aumento della portata nel senso del flusso si traduce dunque in un infittirsi delle isopieze e ovviamente la sua diminuzione corrisponde ad un aumento della distanza tra le curve.

La portata, in una determinata sezione di falda, è funzione dell'alimentazione e del drenaggio e quest'ultimo rappresenta la somma di tutte le uscite dal sistema; a loro volta le condizioni di alimentazione e drenaggio influenzano la forma della superficie piezometrica e permettono di ricavare i livelli di piena e magra e la portata sotterranea.

La portata del drenaggio (in uscita) può essere calcolata trascurando le perdite sotterranee e per evapotraspirazione. Questo parametro è costituito da un contributo naturale (sorgenti) e/o artificiale (pozzi, canali), ed è relativamente costante paragonata agli altri elementi del bilancio.

La portata di alimentazione (in entrata) è più difficile da stimare perché dipende dalle precipitazioni, dall'evapotraspirazione e soprattutto dall'ordine di grandezza dell'infiltrazione efficace, che a sua volta dipende dalla conducibilità idraulica, dal tipo di suolo, acclività ecc.

Sia  $Q$  la portata del flusso influenzato dalle caratteristiche idrogeologiche dell'orizzonte acquifero attraverso una sezione trasversale data;  $Q_A$  l'apporto dell'alimentazione e  $Q_D$  la perdita dovute al drenaggio, se le caratteristiche idrogeologiche e soprattutto la conducibilità idraulica restano costanti, l'influenza di questi fattori sul profilo di depressione può essere schematizzata come segue:

$Q = Q_A = Q_D$  – Profilo di depressione non influenzato determinato unicamente dalle caratteristiche idrogeologiche del terreno acquifero.

$Q = Q_A > Q_D$  – elevazione del livello piezometrico;

$Q = Q_A < Q_D$  – abbassamento del livello piezometrico;

Lo studio delle isopieze ci permette dunque, conoscendo i dati di conducibilità idraulica, di localizzare le zone di alimentazione e di drenaggio, povere o ricche in risorse acquifere. Le zone dove la portata di drenaggio è superiore a quella dell'alimentazione appariranno (in carta) come delle depressioni della superficie piezometrica mentre le zone di alimentazione importanti, come delle superfici convesse.

### Profilo di depressione e struttura del mezzo acquifero

Le variazioni di struttura del mezzo acquifero possono riguardare sia la sezione di flusso sia la morfologia del substrato lungo un percorso sotterraneo.

Una riduzione di larghezza (restringimento) o di altezza del complesso acquifero, con gli altri fattori costanti,

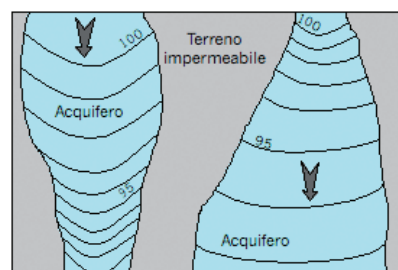


Fig. 23. Spaziatura delle isopieze e variazione di sezione

aumenta il gradiente idraulico, dunque la pendenza del profilo di depressione e determina il ravvicinamento delle curve isopieze (fig. 23).

### Fig. 23: Spaziatura delle isopieze e variazione di sezione

Un aumento di sezione provoca una diminuzione del gradiente idraulico, quindi il profilo di depressione si appiattisce e le curve isopieze si allargano.

Spesso una rottura di pendenza in superficie si rileva anche sulla superficie piezometrica.

Un aumento di pendenza nel senso del flusso (depressione) determina un aumento della sezione e quindi anche un appiattimento del profilo con allontanamento delle isopieze, mentre invece un improvviso sollevamento del substrato produce un loro avvicinamento.

Per riassumere:

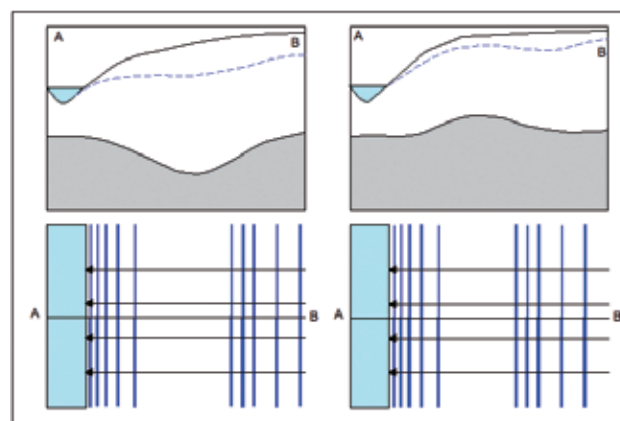


Fig. 24. Variazione della spaziatura delle isopieze con la morfologia del substrato

La superficie piezometrica delle falde acquifere dipende dai livelli di alimentazione e drenaggio, i quali determinano la quota massima e minima del profilo di depressione; il profilo di depressione tra questi due punti è determinato dalle caratteristiche idrogeologiche della falda acquifera e dal rapporto alimentazione-drenaggio.

Caratteristiche	Variazione	Pendenza del profilo	Spaziatura delle curve isopieze
conducibilità idraulica	cresce decrece	diminuisce aumenta	aumenta diminuisce
portata	cresce decrece	aumenta diminuisce	diminuisce aumenta
sezione	cresce decrece	diminuisce aumenta	aumenta diminuisce

In generale si può pertanto affermare che la pendenza del profilo di depressione aumenta in funzione della portata e diminuisce quando la conducibilità idraulica o la sezione aumentano.

Una carta piezometrica rappresenta uno schema del movimento della falda idrica in due dimensioni e va associata sempre ad una ricostruzione anche su di un piano verticale (ad. Es. mediante profili di depressione). La rappresentazione del flusso nelle tre dimensioni è fondamentale per comprendere la dinamica degli acquiferi ed i limiti delle carte piezometriche.

Quanto detto fino ad ora va considerato anche con la struttura e tipo di permeabilità dell'acquifero (primaria, secondaria).

Negli acquiferi fessurati (o carsici) è frequente il caso che il particolare sistema di fratture non permetta la circolazione nel senso indicato dalle isopieze ma può essere determinato solo con l'uso di traccianti.

La carta piezometrica mostra pertanto in queste situazioni, le zone a diverso carico idraulico, e non sempre le diverse direzioni di flusso.

**Analisi quantitativa delle superfici piezometriche**

Si tratta di un passo ulteriore reso possibile da una carta piezometrica e che permette di valutare in prima approssimazione le quantità idriche disponibili.

In precedenza abbiamo fatto notare come a seconda della morfologia si possono avere falde cilindriche, paraboliche, iperpoliche, radiali. In molti casi dove i gradienti sono bassi, e le linee di flusso sono parallele o subparallele, il calcolo può essere semplificato applicando la relazione di Darcy:

$Q = T i W$   
 (dove T è la trasmissività, KB, i il gradiente e W la larghezza dell'acquifero)

Nel caso invece di falde radiali a filetti convergenti o divergenti, è più appropriata la relazione di Kamenski

$Q = T_i (W1 - W2) / (\ln W1 - \ln W2)$

W1= larghezza dell'acquifero a monte, lungo il tubo di flusso (m)

W2= 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)

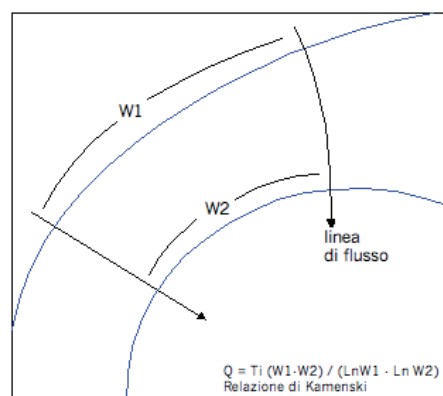


Fig. 25. Applicazione della formula di Kamenski a una falda radiale

Una soluzione pratica interessante è quella del metodo dei settori, fig. 26 (Celico): 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 ottenute da ogni settore.



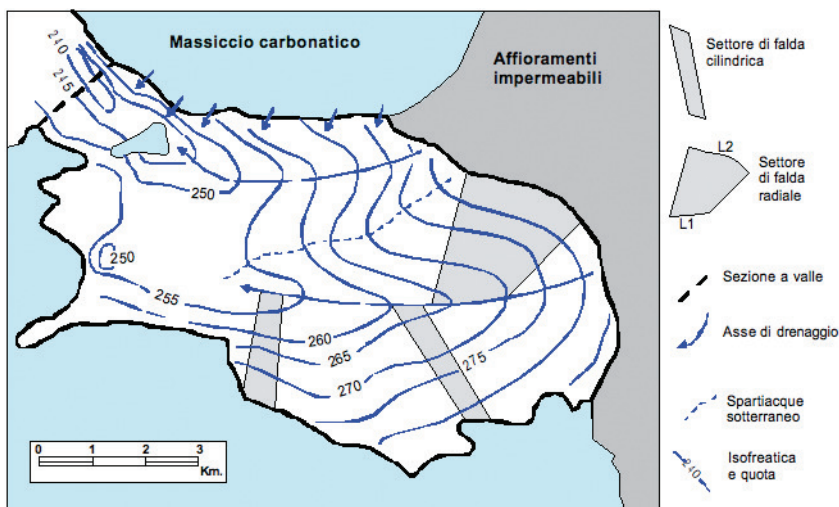


Fig. 26. Metodo dei Settori (Celico, semplificato)

### Riserve e risorse

Un altro dato importante ricavabile dalle carte piezometriche riguarda le risorse idriche rinnovabili e disponibili ad un utilizzo immediato.

Se consideriamo un anno idrologico normale, l'acquifero raggiunge un livello piezometrico di piena (tarda primavera) ed uno di magra (invernale).

Tale differenza alle nostre latitudini può essere di qualche metro ed il volume annualmente rinnovato dipende quindi dalla porosità efficace od immagazzinamento e costituisce la riserva regolatrice.

Il volume contenuto al di sotto dei minimi piezometrici costituisce invece la riserva geologica.

Costruendo almeno due carte piezometriche relative al livello minimo e massimo della falda e conoscendo le variazioni di porosità efficace sull'intera area, insieme

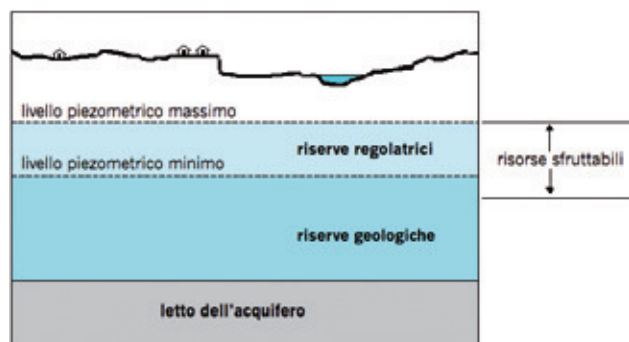


Fig. 27. schema delle riserve e risorse disponibili in una falda alluvionale; in una zona temperata a media e forte precipitazione, le risorse sfruttabili non devono sorpassare quelle rinnovabili annualmente e solo in casi eccezionali sorpassarle; in una zona arida o semiarida è fondamentale regolare i prelievi anche molto al di sotto delle riserve regolatrici dato il lento tasso di rinnovamento

ad una corretta delimitazione dell'acquifero, si possono valutare le riserve regolatrici.

Citiamo un classico esempio dello studio delle variazioni della superficie piezometrica (Mégnyen) per il bacino della Vanne. La superficie media del bacino è di 480 km<sup>2</sup>, l'oscillazione media (tra massimo e minimo) della superficie piezometrica nel corso dell'anno idrologico è di 5 m e la porosità efficace di 0,02.

Dalla definizione di porosità efficace  $m_e = Vv/V$ , abbiamo che:

$$Vv = \text{riserve regolatrici} = V \times m_e$$

$$[(480 \times 10^6) \times 5] \times 0,02 = 48 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Questo valore rappresenta la quantità massima disponibile durante l'anno ed è dato dalla somma di tutti i prelievi artificiali, e naturali.

### Bibliografia

- Brassington Rick, 1988, *Field Hydrogeology*, Open Univ. Press J.Wiley and Sons
- Castany G., 1982, *Idrogeologia*, Flaccovio
- Celico Pietro, 1986, *Prospezioni idrogeologiche (I-II)*, Liguori
- Cerbini Gianni, 1992, *Il manuale delle acque sotterranee*, Geo-graph
- Chiesa Guido, 1992, *Glossario di idrogeologia*, Geo-graph
- Civita Massimo, 1994, *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica*, Pitagora
- Custodio, Llamas, 1996, *Idrologia Sotterranea*, Flaccovio
- Todd David Keith, 1980, *Groundwater hydrology*, J. Wiley and Sons