

VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE

dr geol. Alessio Fileccia, dr geol. Luigi Zoppis

L'articolo era inserito in un corso sui modelli numerici bidimensionali tenuto dagli autori nel 1993 a Cagliari. Parte del testo e figure sono state aggiornate nel 2009, ed utilizzate per le lezioni del corso di Idrogeologia Applicata presso il DISGAM di Trieste.

Indice	pagina
Introduzione.....	2
Ricostruzione della geometria dell'acquifero.....	2
Carte relative alla configurazione geometrica dell'acquifero.....	5
Carte relative alle caratteristiche fisiche ed ai parametri idraulici dell'acquifero.....	7
Determinazione delle caratteristiche idrogeologiche	8
a) Inventario dei punti d'acqua.....	8
b) Piezometria.....	8
c) Prove di portata nei pozzi (senza piezometri).....	9
d) Prove di portata nei pozzi (con piezometri).....	11
e) Investigazioni idrochimiche.....	11
f) Osservazioni periodiche.....	12
Ricostruzione del sistema idrogeologico.....	13
a) ricarica dell'acquifero.....	13
b) flusso delle acque sotterranee.....	14
c) portate in uscita dall'acquifero.....	15
Bilancio idrogeologico di un acquifero.....	15
Programmazione dello sfruttamento di un acquifero (safe yield).....	20
Bibliografia.....	22
Appendice: Esempio di individuazione dell'area di ricarica della falda.....	23

Introduzione

Gli studi e le investigazioni idrogeologiche hanno lo scopo di definire la presenza, la quantità e la qualità delle risorse idriche sotterranee di una data zona, e di determinare quale sia la porzione di esse che può essere estratta senza causare un impoverimento dell'acquifero e/o un deterioramento della qualità delle acque.

La valutazione delle risorse idriche sotterranee non è, in genere, una valutazione esatta. Tutte le varie formule fisiche che vengono utilizzate a tale scopo, hanno una validità limitata, a causa delle troppe assunzioni teoriche effettuate, che semplificano le condizioni idrogeologiche naturali ed a causa della impossibilità di calcolare alcune quantità con un grado di accuratezza accettabile.

Un solo metodo, in generale, non è sufficiente per ottenere una soddisfacente ricostruzione del sistema idrogeologico ma è necessaria l'applicazione di vari metodi ed un controllo incrociato degli stessi per giungere ad una valutazione accettabile del sistema.

Qui di seguito vengono descritte alcune procedure normalmente usate nelle investigazioni idrogeologiche, secondo la sequenza temporale più logica, per giungere alla determinazione quantitativa e qualitativa della possibilità di sfruttamento di un acquifero.

Ricostruzione della geometria di un acquifero

La ricostruzione della geometria di un acquifero è il primo e forse il più importante passo di ogni investigazione idrogeologica.

Tale ricostruzione necessita lo studio stratigrafico e strutturale del sistema idrogeologico in considerazione, e viene effettuata attraverso rilevamenti geologici di campagna (integrati preferibilmente da indagini foto geologiche), indagini geofisiche e perforazione di pozzi di esplorazione. Il risultato di tali investigazioni sarà la conoscenza delle profondità, spessori e giacitura delle rocce che costituiscono l'acquifero, ossia la rappresentazione nelle tre dimensioni.

Una cartografia geologica a scala adeguata costituisce l'informazione di base per illustrare la geologia di un'area. La cartografia geologica ufficiale esistente in Italia, alla scala 1:100000, costituisce la base per un primo approccio allo studio geologico-strutturale dell'area in esame. Per quanto concerne lo studio delle acque sotterranee, non sono necessarie carte di grande dettaglio, ma sono in genere sufficienti delle carte foto geologiche (ottenute per interpretazione di fotografie aeree, a scala generalmente compresa fra 1:40000 e 1:60000) completate con dei controlli puntuali di campagna.

Il passo immediatamente successivo per la definizione della geometria di un acquifero è la costruzione di sezioni geologiche, che illustrano l'andamento in profondità delle varie unità litostratigrafiche, suddivise secondo le loro proprietà idrogeologiche.

In ogni caso, la ricostruzione della geometria di un acquifero effettuata con i soli sistemi geologici deve essere considerata a livello di ipotesi di lavoro, che sarà confermata soltanto dopo l'esecuzione di ulteriori indagini, più precise ma anche più costose, quali sono le investigazioni geofisiche e le perforazioni esplorative.

I differenti tipi di investigazioni geofisiche da impiegare per le ricerche idrogeologiche in una data zona vengono selezionati in funzione delle condizioni geologiche e stratigrafiche.

Poiché tutti i metodi geofisici sono basati sulla variazione e sul contrasto di alcuni parametri caratteristici delle rocce e dei fluidi in esse contenuti (per esempio conduttività elettrica, velocità delle

onde sismiche, densità o simili), la conoscenza delle condizioni stratigrafiche permette quello più idoneo od una loro combinazione.

I metodi geofisici generalmente usati nelle investigazioni per acque sotterranee sono i metodi geoelettrici ed i metodi sismici a rifrazione.

Si preferiscono in genere i metodi geoelettrici a causa del loro basso costo anche se l'accuratezza dei risultati non è sempre soddisfacente, data la possibilità di differenti interpretazioni degli stessi dati di campagna.

I metodi sismici, d'altra parte, anche se danno dei risultati senz'altro più precisi e attendibili, hanno dei costi in genere troppo elevati, senza contare le attuali difficoltà per l'ottenimento delle licenze per l'uso degli esplosivi.

I metodi geoelettrici, pertanto, rimangono, al giorno d'oggi quelli preferiti per lo studio delle acque sotterranee.

Tali metodi si basano sulla misura della resistività apparente delle varie formazioni, che è determinata principalmente della qualità e quantità dei fluidi in esse contenuti. La resistività infatti di una data unità litostratigrafica è il risultato della combinazione fra la resistività della roccia e la resistività del fluido contenuto nei suoi pori.

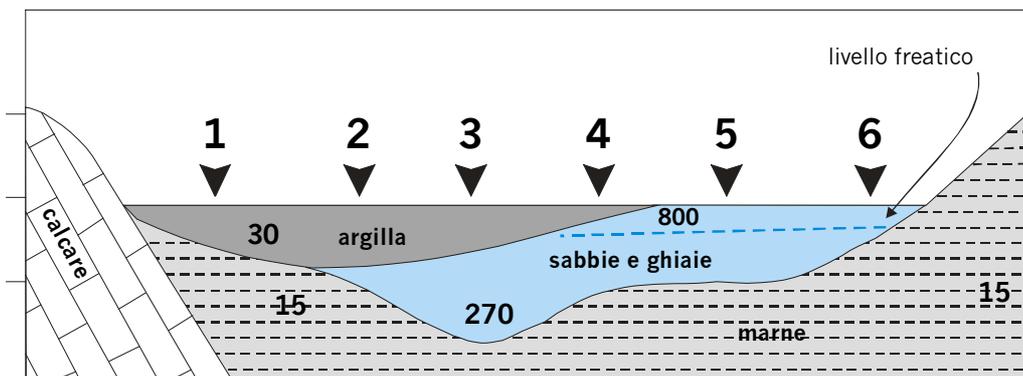
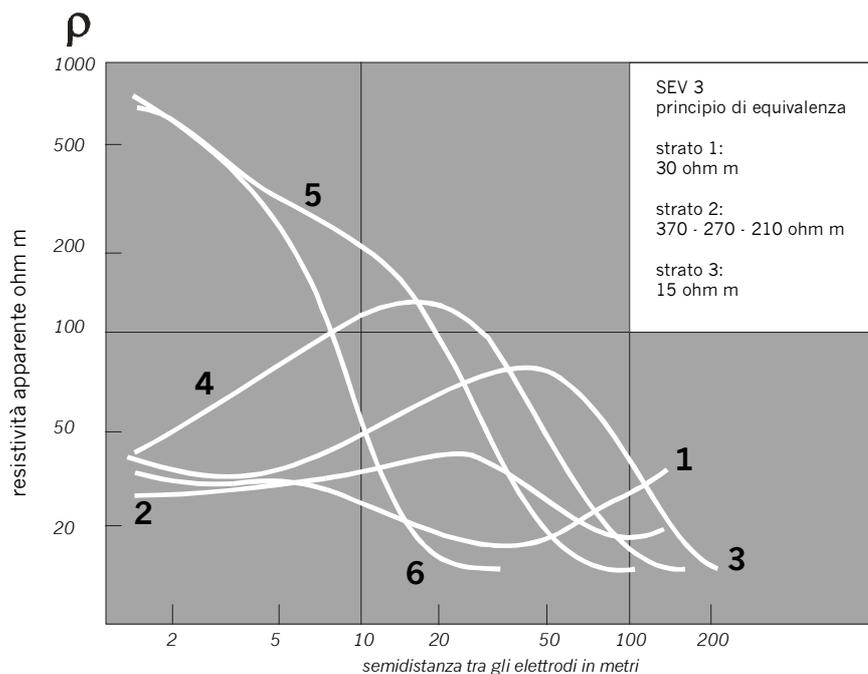
Esecuzione di un sondaggio elettrico verticale, mediante stendimento sul terreno di una linea elettrica a corrente continua da 250 V (Progetto MAE per fornitura idrica in Thailandia, A. Fileccia)



I migliori risultati si ottengono quando vi è un forte contrasto di resistività, come per esempio in presenza di acque salate, che hanno una resistività molte volte inferiore a quella delle acque dolci; essi possono essere di difficile interpretazione quando siamo in presenza di differenti tipi di rocce saturate di acque con salinità leggermente diversa, poiché si possono avere, in tali casi, resistività apparenti molto simili per differenti unità litostratigrafiche.

Di notevole aiuto in questi casi, che d'altronde sono i più comuni, è la preventiva conoscenza della salinità delle acque sotterranee contenute nelle diverse formazioni e la possibilità di effettuare delle calibrazioni in pozzi a stratigrafia nota.

Fig. 1: Esempio di curve elettrostratigrafiche (in alto) e corrispondenti successioni litologiche (in basso)



Il sistema più diretto, comunque, per lo studio di un acquifero è senz'altro la perforazione di pozzi di esplorazione, da cui si può ottenere una precisa ricostruzione di tutta la serie stratigrafica attraversata, sempreché i dati siano raccolti da personale specializzato. E' quindi imperativo che ogni perforazione esplorativa sia costantemente seguita da un geologo, poiché la mancanza di dati stratigrafici o peggio

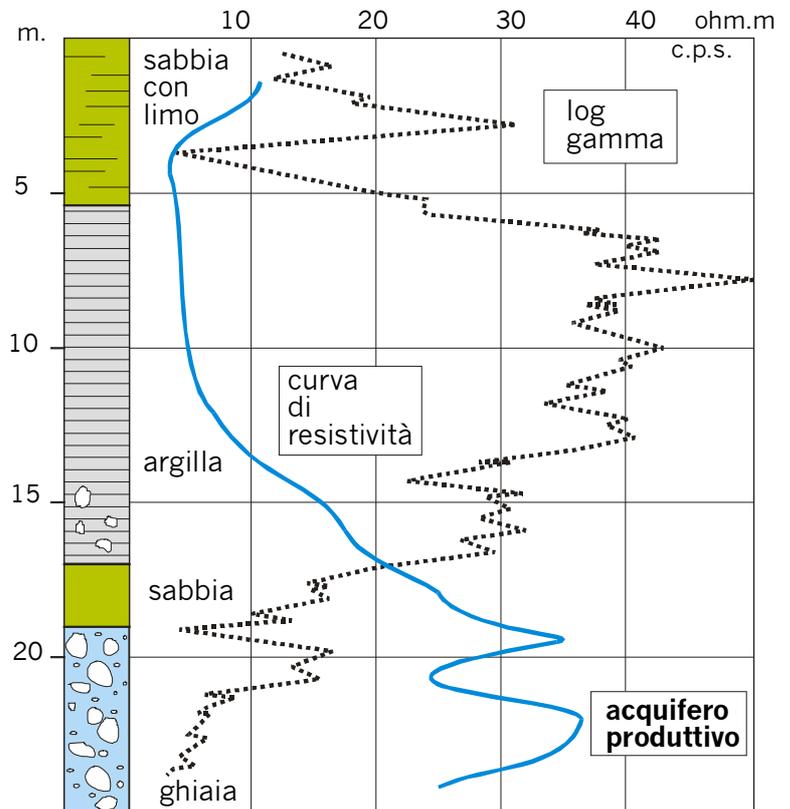
ancora, l'erronea informazione stratigrafica può vanificare il costoso investimento fatto per perforare un pozzo.

Informazioni erranee, infatti, sulla posizione degli strati più permeabili che costituiscono i livelli acquiferi, rendono incerte le correlazioni fra i vari pozzi ed errate le calibrizioni geofisiche, senza contare che possono indurre ad un errato posizionamento dei filtri, con effetti negativi sulla produttività dei pozzi stessi.

Le varie operazioni da effettuare per ottenere tutte le informazioni possibili dalla perforazione dei pozzi di esplorazione, possono essere così elencate:

- raccolta e studio dei campioni di roccia;
- ricostruzione delle sequenze stratigrafiche, da effettuare in base allo studio dei campioni;
- registrazione dei tempi di perforazione, che dà sempre utili informazioni sulla sequenza delle differenti formazioni rocciose;
- carotaggi elettrici e nucleari, che costituiscono il mezzo più esatto per ricostruire la stratigrafia di un pozzo;
- analisi di laboratorio nei campioni raccolti, per effettuare le correlazioni stratigrafiche.

Fig. 2: Esempio di log elettrico in pozzo utilizzato per definire con maggiore dettaglio i vari passaggi di facies; a sinistra la colonna stratigrafica ed a destra la curva di resistività e quella γ ; le argille producono una forte emissione di radiazioni gamma, mentre i depositi granulari hanno una resistività maggiore (EEC, Rural Water Supply in Liberia, A. Fileccia)



Per mezzo di una interpretazione ed integrazione di tutte le informazioni ottenute con i vari sistemi descritti (studio stratigrafico – geofisica – perforazione di pozzi esplorativi) si può ottenere una sufficiente rappresentazione geometrica del sistema acquifero.

Le rappresentazioni bidimensionali date dalle sezioni geologiche e geofisiche, integrate dalle informazioni puntuali ottenute dai pozzi e inquadrare dalle carte geologiche, possono essere usate per ottenere una rappresentazione tridimensionale del sistema acquifero.

I risultati di una tale interpretazione vengono generalmente presentati per mezzo delle seguenti carte:

Carte relative alla configurazione geometrica dell'acquifero

Permettono di determinare le dimensioni e il volume dell'acquifero. La rappresentazione dei dati spaziali avviene utilizzando tre tipi di curve:

- curve isoipse, che uniscono punti di uguale altitudine e rappresentano la morfologia della superficie considerata;
- curve isobate, che uniscono punti di uguale profondità misurata rispetto al piano di campagna e individuano nel sottosuolo la superficie da rappresentare;
- curve isopache, che uniscono punti di uguale spessore dell'acquifero.

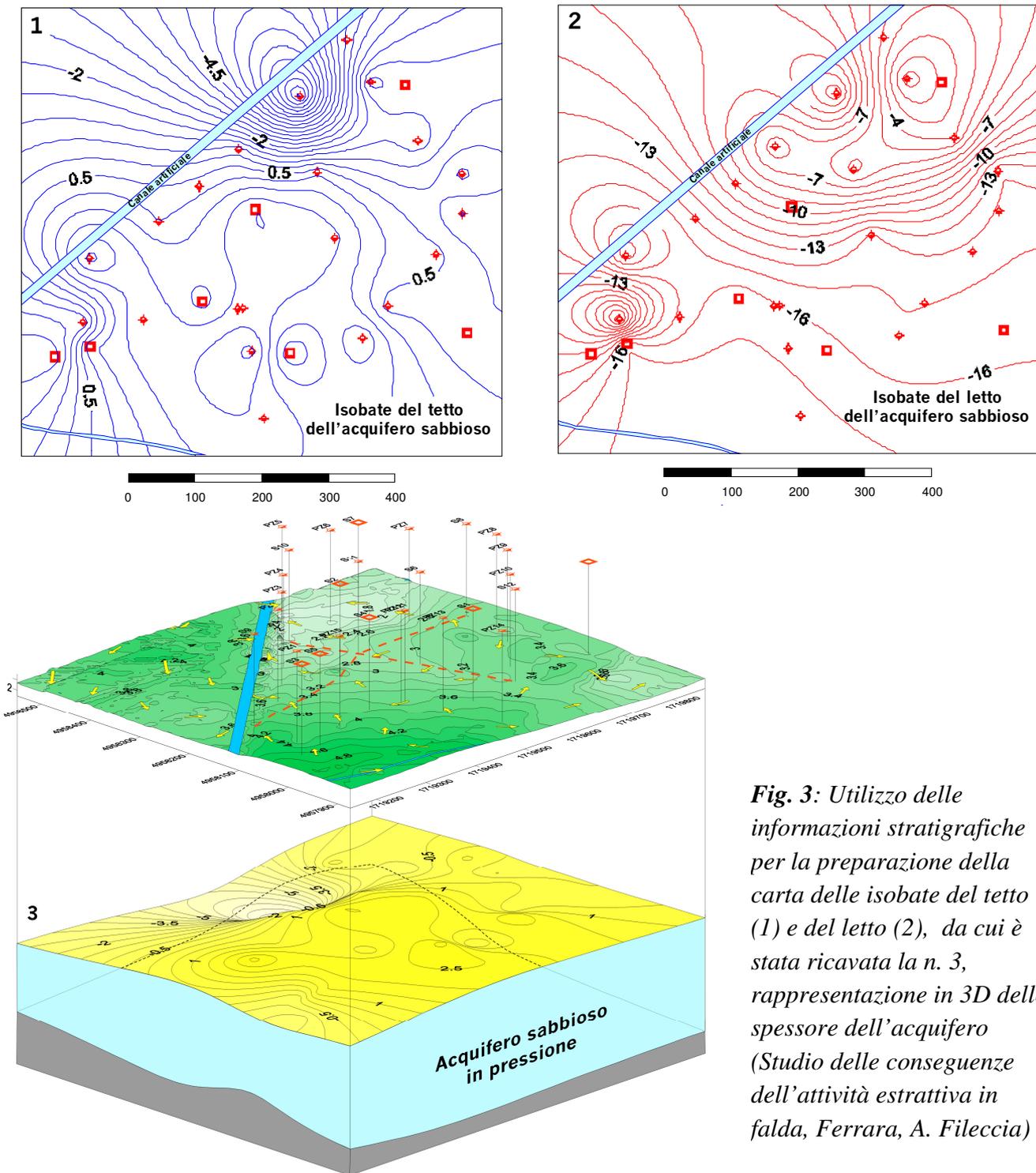


Fig. 3: Utilizzo delle informazioni stratigrafiche per la preparazione della carta delle isobate del tetto (1) e del letto (2), da cui è stata ricavata la n. 3, rappresentazione in 3D dello spessore dell'acquifero (Studio delle conseguenze dell'attività estrattiva in falda, Ferrara, A. Fileccia)

Le caratteristiche geometriche dell'acquifero sono rappresentate mediante le seguenti carte:

- carte della superficie del substrato, che individuano le quote del letto delle formazioni acquifere mediante una rappresentazione a curve isoipse o isobate;
- carte del limite superiore dell'acquifero, che individuano la morfologia del tetto delle formazioni acquifere mediante una rappresentazione a curve isoipse o isobate;
- carte dello spessore dell'acquifero, che si ottengono dalle due precedenti con una rappresentazione a curve isopache.

Queste carte permettono di calcolare il volume dell'acquifero e quindi di valutare il volume delle risorse

Carte relative alle caratteristiche fisiche e ai parametri idraulici dell'acquifero

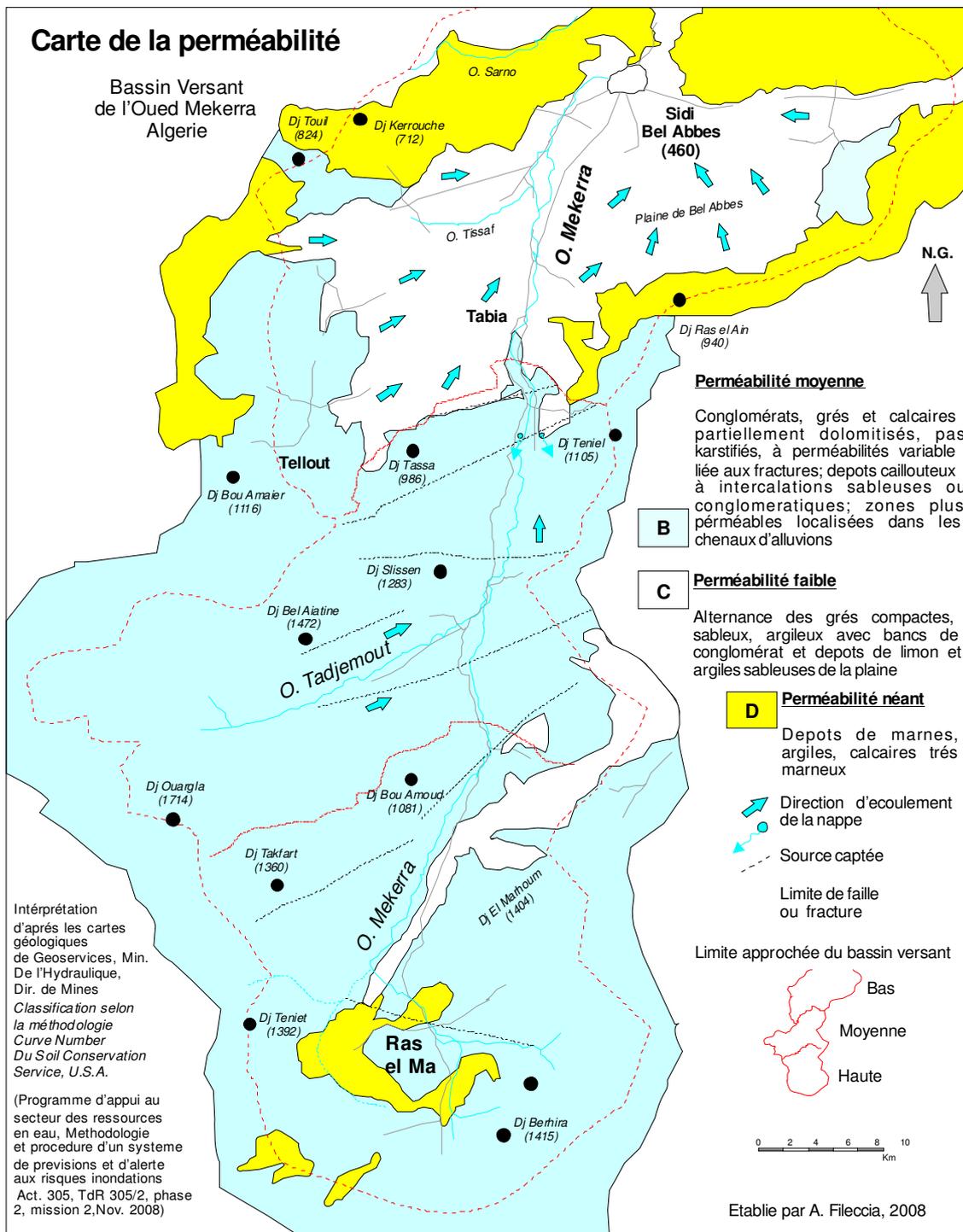


Fig. 4: Uno dei primi passi degli studi è costituito dall'elaborazione dei dati bibliografici, completata in loco mediante un rilevamento a fini idrogeologici; la carta della permeabilità nella figura in alto, evidenzia le diverse litologie in base alla loro attitudine a lasciarsi attraversare dalle acque sotterranee e costituisce un'importante ausilio per indirizzare le ricerche in prima fase. (Europeaid, Safège, Bruxelles; Progetto per la mitigazione delle piene del fiume Mekerra, Algeria, carta semplificata)

In queste carte sono rappresentati per zone, estrapolando i dati dei sondaggi, misure, campionamenti e prove idrogeologiche “in situ”, informazioni e valori riguardanti le litologie, la granulometria delle rocce sciolte, la fatturazione delle rocce compatte, valutata attraverso un’analisi strutturale degli affioramenti, il coefficiente di permeabilità K, la trasmissività T e il coefficiente di immagazzinamento S.

Le Carte della Permeabilità, ad esempio, migliorano la comprensione dell’idrogeologia di una zona, unendo diverse litologie e dividendole in base alle loro caratteristiche idrauliche. In questo modo si focalizzano meglio le indagini rendendole fruibili anche a specialisti in campi diversi.

Determinazione delle caratteristiche idrogeologiche di un acquifero

Le investigazioni che vengono elencate in questo capitolo si riferiscono alla definizione delle caratteristiche idrodinamiche di un acquifero e delle proprietà chimiche delle acque in esso contenute.

Lo scopo principale di tali investigazioni è quello di:

- ricostruire e studiare l’andamento della superficie piezometrica e delle sue fluttuazioni nel tempo;
- determinare i parametri idraulici di un acquifero (permeabilità, trasmissività, coefficiente di immagazzinamento) e la loro distribuzione areale;
- determinare le caratteristiche chimiche delle acque.

Tali investigazioni sono:

a) Inventario dei punti d’acqua

L’inventario dei punti d’acqua è la prima operazione da fare in ogni studio idrogeologico. Tale operazione consiste nella raccolta diretta di tutte le informazioni possibili su pozzi e sorgenti esistenti nell’area considerata e nel riportare la loro esatta posizione sulle carte topografiche.

b) Piezometria

In termini precisi, la superficie freatica di un acquifero (*water table*) è la superficie superiore della zona satura di un acquifero freatico, o libero, mentre la superficie piezometrica è quella superficie immaginaria che unisce i vari livelli raggiunti dall’acqua in pozzi che filtrano il medesimo acquifero.

In pratica, comunque, il termine superficie piezometrica viene usato per ambedue i casi.

La ricostruzione della superficie piezometrica viene generalmente effettuata sulla base di dati raccolti durante l’inventario dei punti d’acqua, raccordando con linee equipotenziali i dati del livello statico misurati nei vari pozzi, come quota assoluta.

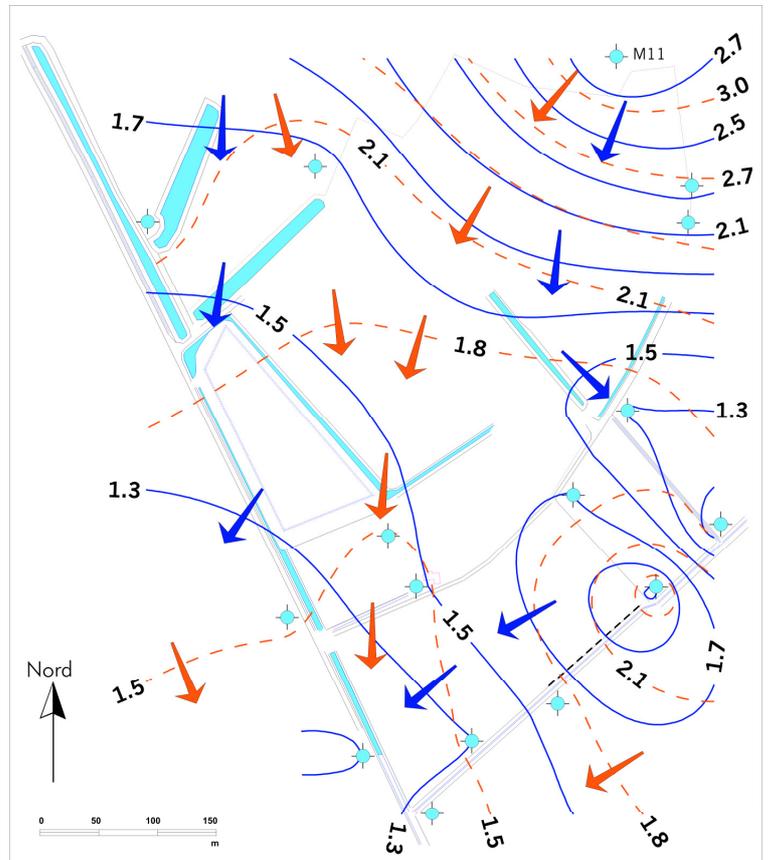
Tale superficie viene riferita ad un dato periodo, che è quello nel quale sono state effettuate le misure. (Per costruire una superficie piezometrica valida le misure nei vari pozzi devono essere effettuate nel più breve intervallo di tempo possibile, non più di 1-2 giorni in genere).

Le carte della superficie piezometrica di un acquifero ed i suoi cambiamenti con il tempo nella forma e nelle quote, forniscono informazioni essenziali su numerose caratteristiche dell’acquifero, quali le direzioni preferenziali di scorrimento delle acque sotterranee, la posizione degli spartiacque sotterranei, l’interscambio con le acque superficiali, la ricarica annuale, ecc.

Le carte piezometriche possono presentare notevoli variazioni nella disposizione e nella forma delle curve piezometriche, a seconda della geometria dell’acquifero (del serbatoio) e della posizione, e quota, dei punti di ricarica e di emungimento.

Quando si ha, in certe zone, a parità di altre condizioni, un aumento della spaziatura delle linee piezometriche, questo indica generalmente un aumento della trasmissività in quella zona. Al contrario, una diminuzione della spaziatura indica generalmente una diminuzione della trasmissività. In altre parole, i gradienti piezometrici sono inversamente proporzionali alla trasmissività.

Fig. 5: Piezometria dell'acquifero freatico (isopieze e direzioni di flusso in blu) e dell'acquifero semiconfinato sottostante (in rosso); si tratta di una zona in bassa pianura, le quote delle isopieze sono in metri (equidistanza 0,3m per la falda in pressione e 0,2 m per quella superficiale); la non coincidenza delle direzioni di flusso è probabilmente dovuta ad eteropie laterali degli strati; i piezometri filtrano i due acquiferi separatamente (Progetto di bonifica per una ex area di discarica, Treviso, A.Fileccia)



c) Prove di portata nei pozzi (senza l'ausilio di piezometri)

L'esecuzione di prove di portata nei pozzi riveste particolare importanza negli studi idrogeologici non solo per l'ovvia ragione di determinare, in questa maniera, la produttività dei singoli pozzi, ma in particolare per ottenere i parametri idraulici dell'acquifero, necessari per la valutazione delle risorse.

Gli scopi delle prove di portata sono i seguenti:

- controllare che il pozzo sia stato costruito a regola d'arte;
- definire la produttività del pozzo;
- determinare la trasmissività dell'acquifero.

Le determinazioni che vengono effettuate per mezzo delle prove di portata si riferiscono esclusivamente alle caratteristiche del pozzo o dell'acquifero nelle sue immediate vicinanze.

Le prove che vengono più comunemente effettuate sono le seguenti:

- prova a portata variabile (*step drawdown test*): consiste nell'esecuzione di almeno tre periodi di pompaggio consecutivi, di 1-2 ore ognuno, a portata crescente. Questa prova viene utilizzata per determinare quali siano gli abbassamenti nel pozzo dovuti alla trasmissività dell'acquifero e quali al sistema di costruzione del pozzo stesso. Tale prova serve quindi per valutare le caratteristiche del pozzo.

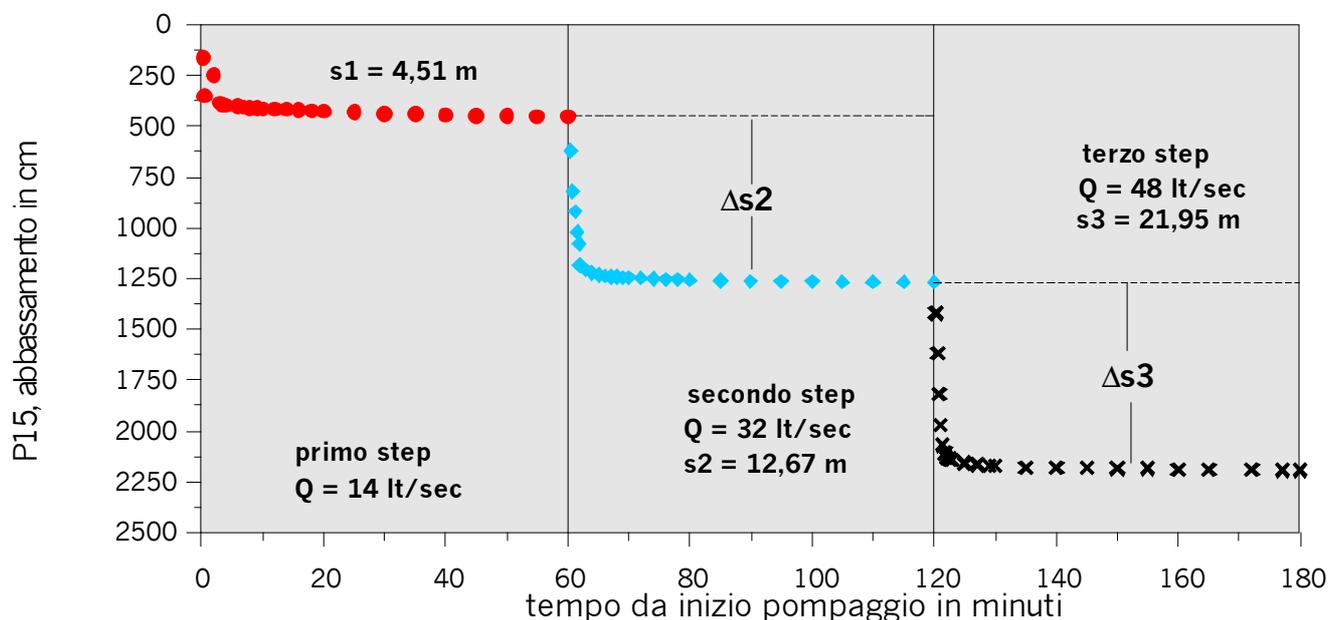


Fig. 6: Esempio di restituzione dei dati durante una prova di portata a gradini, rispettivamente di 14, 32, 48 lt/s; il test permette di ricavare importanti informazioni sulla qualità costruttiva del pozzo ed una valutazione della trasmissività dell'acquifero (Ottimizzazione dei prelievi di un campo pozzi, Padova, A. Fileccia)

- prova a portata costante (*constant rate test*): consiste nel pompare il pozzo ad una portata costante, generalmente vicina alla portata massima del pozzo, per un periodo di tempo necessario a raggiungere una ragionevole stabilizzazione del livello dinamico. La durata di questo tipo di prova varia in genere dalle 24 alle 72 ore e può essere ridotta se prima di tale periodo si ottiene una stabilizzazione certa del livello di pompaggio.

- prova di risalita (*recovery test*): viene effettuata di seguito alla prova a portata costante, dopo aver cessato il pompaggio; essa viene continuata per un periodo massimo di 24 ore o fino a che il livello dell'acqua nel pozzo ha raggiunto la quota iniziale, di prima che iniziasse il pompaggio.

I grafici degli abbassamenti ottenuti durante le prove a portata costante o degli abbassamenti residui durante la risalita, rispetto al tempo, permettono di calcolare la trasmissività dell'acquifero, che può essere definita come il prodotto della conducibilità idraulica per lo spessore della porzione satura dell'acquifero.

La trasmissività è quindi la quantità di acqua che fluisce attraverso un prisma d'acquifero di base unitaria, sotto un gradiente unitario: $T = kh = (m/s)m = m^2/s$.

d) Prove di portata nei pozzi (con piezometri)

La realizzazione di prove di portata mediante l'ausilio di piezometri consente di determinare, oltre alla trasmissività T dell'acquifero, il valore del coefficiente di immagazzinamento S , che può essere definito come il volume d'acqua rilasciato o immagazzinato da un prisma unitario di acquifero, in corrispondenza di un abbassamento o di un innalzamento unitario della superficie piezometrica.

Negli acquiferi freatici, il valore del coefficiente di immagazzinamento coincide con la porosità efficace. Negli acquiferi in pressione l'espulsione dell'acqua è legata all'interazione elastica reciproca tra le molecole d'acqua e le particelle della matrice solida. Poiché il modulo di elasticità dell'acqua è molto piccolo, il volume d'acqua liberato da una falda in pressione è molto minore rispetto a quello liberato da una falda freatica, a parità di altre condizioni.

Negli acquiferi confinati il valore del coefficiente di immagazzinamento risulta da 100 a 1000 volte più piccolo di quello della porosità efficace. I valori medi variano tra 0.2 e 0.01 per le falde libere e tra 0.001 e 0.0001 per le falde in pressione.

Le procedure per l'esecuzione delle prove sono le stesse usate per la prova a portata costante e la prova di risalita nei pozzi, con la sola differenza che la variazione dei livelli dinamici nel tempo viene registrata contemporaneamente nel pozzo di pompaggio e nei piezometri.

In via teorica, per ottenere buoni risultati, i piezometri dovrebbero essere più di uno, in quanto l'accuratezza delle determinazioni aumenta con l'aumentare del numero di questi; in pratica però, per ovvie ragioni economiche, non si può avere quasi mai più di 1 o 2 piezometri a disposizione.

d) Investigazioni idrochimiche

La determinazione delle caratteristiche chimiche di un'acqua sotterranea, oltre ad essere indispensabile per determinare se essa può essere usata per scopi potabili o irrigui o industriali, è di fondamentale importanza nella definizione di tutto il sistema idrogeologico, dove possono coesistere acque sotterranee di diversa origine e natura.

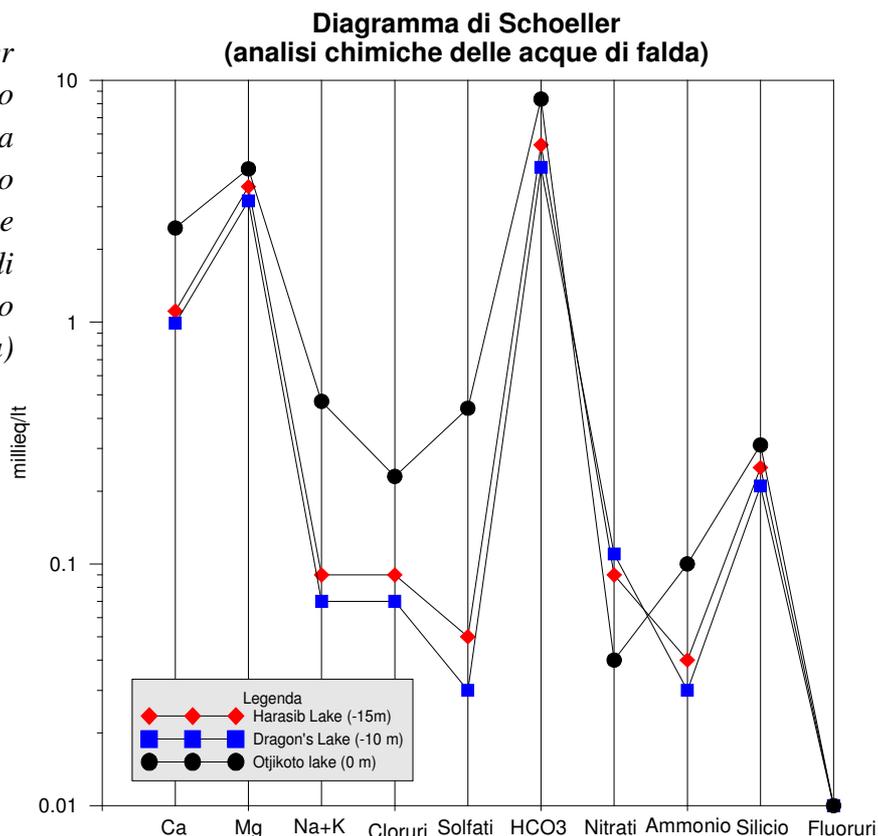
Le investigazioni idrochimiche normalmente effettuate sono:

- riconoscimento preliminare: generalmente eseguito durante l'inventario dei punti d'acqua, che consiste nella determinazione in campagna della temperatura, conducibilità elettrica e del valore del pH;
- analisi di laboratorio: effettuate su campioni prelevati da sorgenti o pozzi durante le prove di portata, consistenti nella determinazione dei diversi componenti fisici, chimici e batteriologici.

Per la definizione del tipo chimico di acqua, per lo studio del sistema idrogeologico, sono in genere sufficienti alcune determinazioni di base, quali Ca, Mg, Na, K, SO_4 , Cl, HCO_3 e contenuto totale dei sali disciolti.

Per la determinazione della potabilità devono essere ricercati anche altri elementi, quali NO_3 , NH_4 , Fe, Mn, F, ecc. Particolare attenzione deve essere posta alla determinazione degli indici di contaminazione microbica (coliformi e streptococchi fecali).

Fig. 7: Diagramma di Schoeller, per alcune sorgenti carsiche; l'andamento simile delle variazioni in meq/lt, indica la sostanziale omogeneità per quanto riguarda l'area di ricarica delle diverse sorgenti, pur situate a vari km di distanza (Studio dell'acquifero carsico di Otavi, Namibia, A. Fileccia)



e) Osservazioni periodiche

Le determinazioni indicati ai punti precedenti permettono la definizione delle caratteristiche idrogeologiche e idrochimiche di un sistema idrogeologico in un dato momento, ma non forniscono sufficienti informazioni sulla dinamica di tale sistema, specialmente per prevedere eventuali modifiche dello stesso causate da una variazione del regime di sfruttamento.

Deve essere infatti ricordato che un sistema idrogeologico è un sistema dinamico, alla costante ricerca di un equilibrio che viene continuamente modificato dalla variazione di una notevole quantità di fattori.

Alcune variazioni possono avere effetti trascurabili, come per esempio le variazioni barometriche o quelle dovute alle maree, mentre altre sono molto importanti, come le variazioni stagionali delle precipitazioni o le estrazioni dai pozzi di produzione.

A causa di ciò, si rendono necessarie alcune osservazioni periodiche delle caratteristiche di un acquifero. Queste dovranno essere effettuate almeno per un intero anno idrologico al fine di avere una minima conoscenza del comportamento di un acquifero in condizioni normali; se poi tale acquifero deve essere studiato in dettaglio per programmare dei nuovi sfruttamenti, allora dovrà essere instaurato un vero e proprio sistema di monitoraggio.

Le caratteristiche più importanti di un acquifero, da tenere sotto osservazione per giungere ad una sufficiente conoscenza della sua evoluzione e comportamento nel tempo, sono:

- livelli piezometrici, da rilevare con frequenza almeno mensile, in una serie di opportuni pozzi di osservazione;
- portata delle sorgenti, siano esse puntuali o lineari, da effettuare anch'essa con frequenza almeno mensile;
- qualità chimica delle acque, da effettuare con frequenza almeno stagionale (2-4 volte l'anno) per una conoscenza generale dell'acquifero o con una frequenza molto superiore (anche fino a registrazioni continue) per problemi speciali, quali l'intrusione di acque marine o l'inquinamento da sostanze varie.

Ricostruzione del sistema idrogeologico

La ricostruzione del sistema idrogeologico è praticamente la sintesi di tutte le informazioni ottenute per mezzo delle investigazioni precedentemente descritte.

Il primo passo in tale ricostruzione è la determinazione dei limiti naturali del sistema, intendendo con tale definizione o degli spartiacque sotterranei continui o degli affioramenti di rocce impermeabili o zone di emergenza delle acque (mari, laghi, fiumi).

Da ricordare che i limiti di un sistema idrogeologico raramente possono coincidere con i limiti di un bacino idrografico e solo per caso, ma questo è ovvio, possono coincidere con limiti amministrativi.

Il secondo passo è la ricostruzione del ciclo idrogeologico del sistema, che consiste nella determinazione della ricarica dell'acquifero, del flusso delle acque sotterranee e della discarica dell'acquifero.

a) **Ricarica dell'acquifero**

Il tipo più comune di ricarica è dato dall'infiltrazione delle precipitazioni sugli affioramenti di rocce permeabili (ricarica diretta).

La quantità d'acqua che si infiltra nel sottosuolo, penetra in profondità e raggiunge effettivamente l'acquifero (infiltrazione efficace) è solo una parte dell'infiltrazione totale in quanto molta è perduta per evaporazione dagli strati più superficiali e per traspirazione dalle piante (evapotraspirazione).

L'equazione che regola il bilancio idrologico medio annuo di un sistema acquifero può essere scritta come segue:

$$P = E_e + I_e + R$$

nella quale:

P precipitazioni totali medie annue su tutta la superficie permeabile del sistema (in mm)

E_e evapotraspirazione effettiva, espressa in mm, che comprende l'evapotraspirazione dal terreno e la traspirazione dalle piante

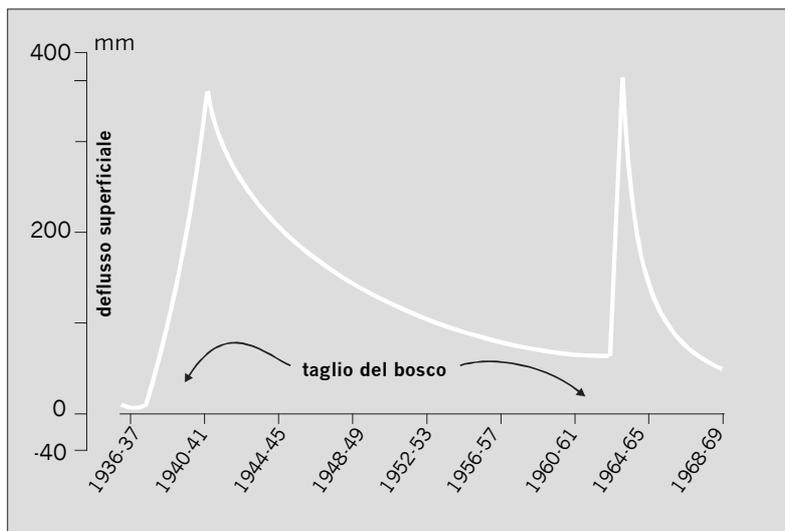
I_e infiltrazione efficace (ricarica diretta), espressa in mm

R quantità di acqua che scorre in superficie e si perde fuori dal sistema (scorrimento superficiale), espressa in mm

Il ruscellamento superficiale (R) è molto influenzato dalla litologia, tipo di suolo, inclinazione dei versanti (pendii dolci lo ostacolano, mentre quelli molto inclinati lo aumentano) e tipo di copertura

vegetale. Si veda ad esempio il famoso caso della figura seguente, dove è evidente il ruolo svolto dagli alberi ad alto fusto nel ridurre il ruscellamento e quindi anche l'erosione dei versanti.

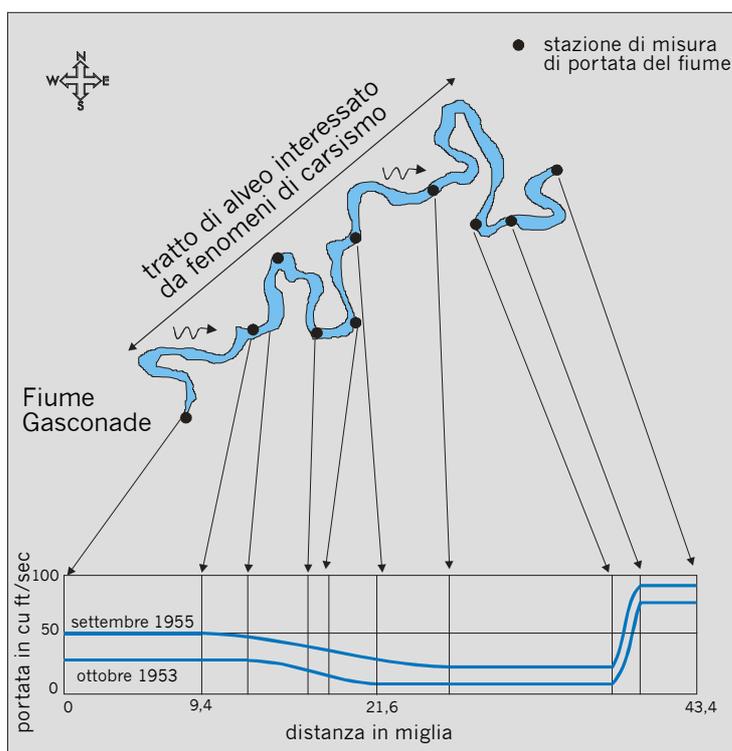
Fig. 8: Relazione tra copertura boschiva e ruscellamento superficiale. Il taglio degli alberi ad alto fusto (1936-37) innesca il dilavamento dei versanti ed un aumento della portata dei fiumi al fondovalle; il fenomeno si riduce nel tempo fino al seguente disboscamento nel periodo 1963-64 (Swank, Helvey, modificato)



Altro tipo di ricarica può avvenire attraverso il letto dei fiumi, per infiltrazione delle acque superficiali, specialmente in paesi aridi, in occasione di eventi di piena (ricarica indiretta).

Infine si possono avere apporti da altri sistemi contigui, specialmente conseguenti a intensi pompaggi, che deprimono i livelli piezometrici, favorendo il richiamo di altre acque da unità idrogeologiche confinanti.

Fig. 9: La misura della portata del fiume, a monte ed a valle della zona di assorbimento (area carsica), indica il valore della ricarica della falda. Nelle varie stazioni la portata del fiume si riduce considerevolmente da ovest verso est, La perdita di acqua per infiltrazione, determinata infittendo le sezioni di misura, fornisce anche un'indicazione dell'intensità del carsismo. (Skelton, modificato)



b) Flusso delle acque sotterranee

Lo scorrimento delle acque sotterranee avviene secondo direzioni perpendicolari alle curve isopiezometriche; tale scorrimento in un dato acquifero viene studiato per mezzo delle carte

piezometriche. La velocità effettiva è comunque difficilmente determinabile; un suo ordine di grandezza può essere ottenuto per mezzo della seguente equazione: $v_e = (K/u_e) i$, nella quale la velocità effettiva (v_e) è data dal rapporto fra permeabilità (K) e porosità effettiva (u_e), moltiplicato per il gradiente piezometrico (i). Valori più esatti si ottengono comunque dalla misura diretta della velocità vera, mediante l'uso di adeguati traccianti. Dai risultati di varie misure effettuate, si può stabilire che, nei mezzi permeabili per porosità (e non per fatturazione), per gradienti dell'ordine dell'1%, le velocità vere delle acque sotterranee possono variare dai 10 m/anno in sabbie fini a 300 m/anno in sabbie grossolane.

La misura della portata di una falda attraverso una sezione di lunghezza L nota è possibile utilizzando la relazione di Darcy, scritta nella forma: $Q = T L i$, dove T rappresenta la trasmissività dell'acquifero (m^2/s), L rappresenta la larghezza della sezione (m) e i rappresenta il gradiente idraulico.

La trasmissività si può ricavare dall'esecuzione di prove di portata, mentre il gradiente idraulico si calcola utilizzando le carte piezometriche.

c) Portate in uscita dall'acquifero

Il calcolo delle portate in uscita da un acquifero deve tenere conto sia delle uscite naturali legate alla sua configurazione idrogeologica, sia di quelle artificiali legate ad un eventuale sfruttamento delle risorse idriche sotterranee.

Le uscite naturali sono rappresentate generalmente dalle sorgenti, dal drenaggio causato dai fiumi e dalle perdite a mare (o, in casi particolari, a laghi), dall'evaporazione da zone paludose (le famose *sebkas* dei paesi aridi) o dal travaso in unità idrogeologiche adiacenti.

Le uscite artificiali sono dovute alle estrazioni attraverso pozzi perforati, gallerie drenanti, trincee drenanti e simili. La determinazione di tali estrazioni dovrebbe, in teoria, essere una delle determinazioni più semplici e precise da realizzare, ma in pratica è alquanto difficile e approssimata, a causa della difficoltà di censire tutti i punti di prelievo (pubblici e privati) e di stabilire le quantità estratte da ognuno di essi.

Bilancio idrogeologico di un acquifero

Il bilancio idrogeologico di un acquifero viene calcolato sulla base della valutazione delle portate in ingresso ed in uscita dal sistema sotterraneo.

La determinazione più approssimata della ricarica totale può essere effettuata, in bacini semplici e ben definiti, determinando la quantità totale di acqua rilasciata annualmente dalle sorgenti, se esistono, essendo tale quantità approssimativamente uguale alla ricarica. Non sempre però possiamo essere in presenza di tali casi favorevoli, per cui molto spesso per tale determinazione dobbiamo ricorrere a sistemi indiretti.

Uno di questi è la determinazione dell'infiltrazione efficace (I_e) per differenza dalla formula della ricarica annuale precedentemente illustrata, che può essere riscritta come $I_e = P - (E_e + R)$.

Tale valore è in genere moltiplicato per un fattore (coefficiente di infiltrazione potenziale, c.i.p.) che tiene conto della tipologia di terreno in superficie.

Tabella dei valori di coefficiente d'infiltrazione potenziale, da utilizzare per il calcolo dell'infiltrazione efficace (Autori vari)

Litologia	c.i.p. %	Litologia	c.i.p. %
Calcari	90 – 100	Lave	90 – 100
Calcari dolomitici	70 – 90	Depositi piroclastici	50 – 70
Dolomie	50 – 70	Piroclastiti e lave	70 – 90
Calcari marnosi	30 – 50	Rocce intrusive	15 – 35
Detriti grossolani	80 – 90	Rocce metamorfiche	5 – 20
Depositi alluvionali	80 – 100	Sabbie	80 – 90
Depositi argillosi	5 – 25	Sabbie argillose	30 – 50

Le precipitazioni medie annuali (P) possono essere facilmente dedotte dalle registrazioni delle stazioni pluviometriche esistenti o dalle carte delle isoiete; ugualmente i valori del ruscellamento (R) possono essere dedotti dalle varie misure idrometriche esistenti (annali idrografici) o da misure da effettuare appositamente in corsi d'acqua che escono dal bacino considerato.

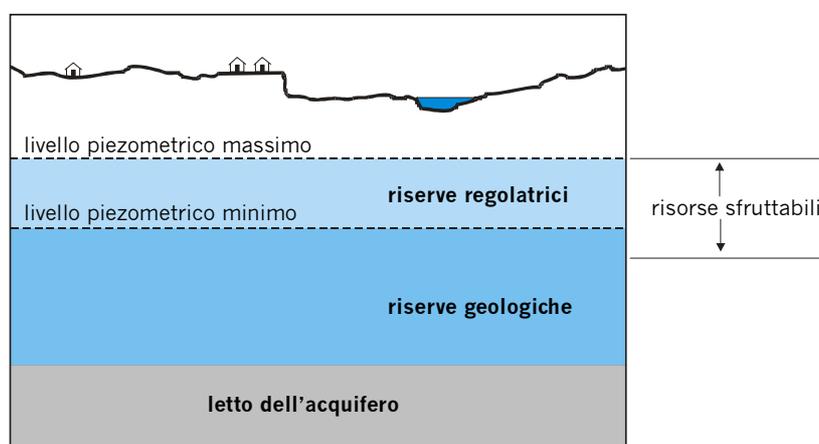
Più approssimativo è in genere il calcolo dell'evapotraspirazione; infatti i parametri che controllano tale valore sono talmente numerosi (temperatura, precipitazioni e loro distribuzione nel tempo, umidità dell'aria e del terreno, insolazione, venti, tipo di vegetazione, ecc.), che una formula universalmente valida non è ancora stata trovata.

Vengono pertanto usate alcune formule empiriche (Coutagne, Turc, ecc.) che danno, in funzione generalmente della piovosità e della temperatura media, dei valori approssimativi, validi per alcune regioni climatiche, o formule più sofisticate (Tornthwaite, Blaney and Criddle, ecc.) che considerano vari altri fattori, ma con risultati non molto più affidabili.

La determinazione dell'evapotraspirazione quindi è sempre indicativa e deve essere adottata con tutte le riserve del caso.

Un altro sistema abbastanza valido per determinare la ricarica annuale è lo studio delle fluttuazioni piezometriche dell'acquifero, se queste sono state regolarmente registrate in un numero adeguato di pozzi di osservazione. Infatti se tali condizioni esistono, si possono ricostruire delle carte piezometriche per i periodi di massima e di minima quota dell'acquifero, dalle quali si può calcolare il volume interessato da tali variazioni che, moltiplicato per la porosità effettiva della roccia serbatoio, dà il valore della ricarica avvenuta nel periodo considerato (si veda l'esempio in appendice e le figure seguenti).

Fig.10 : L'oscillazione dei livelli piezometrici nell'anno idrologico permette di ricavare le riserve regolatrici, cioè i volumi idrici massimi che è possibile utilizzare; solo in rari casi si può intaccare anche una parte delle riserve geologiche, visto il loro lento tasso di rinnovamento.



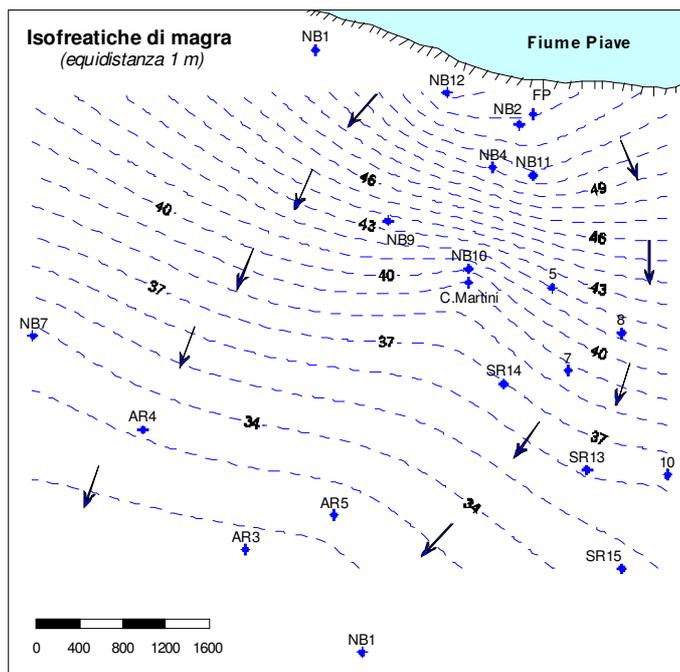


Fig. 11: La redazione di una carta piezometrica di piena (in alto) e di magra (in basso) in diversi periodi dell'anno, permette di ricavare l'entità della ricarica e quindi anche della risorsa rinnovabile a breve termine; in questo caso moltiplicando l'area della porzione di acquifero interessata, per l'oscillazione freatica e la porosità efficace media, si ottiene il volume di acqua disponibile o safe yield.

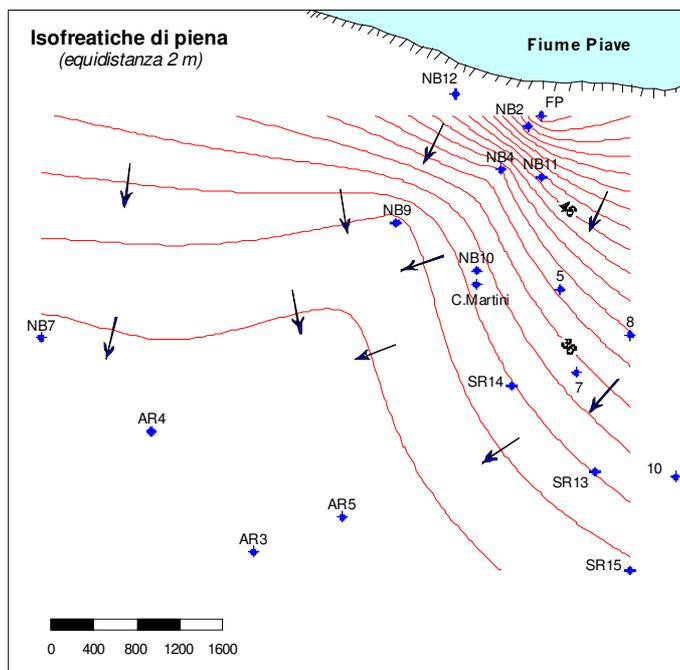
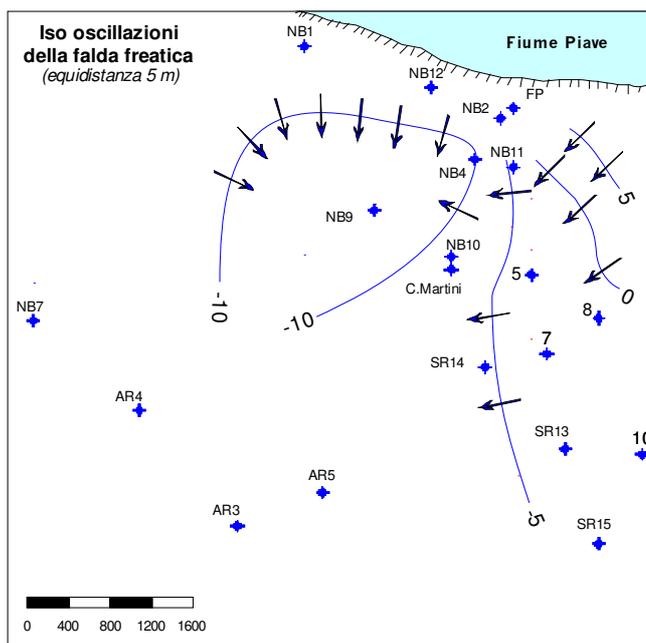
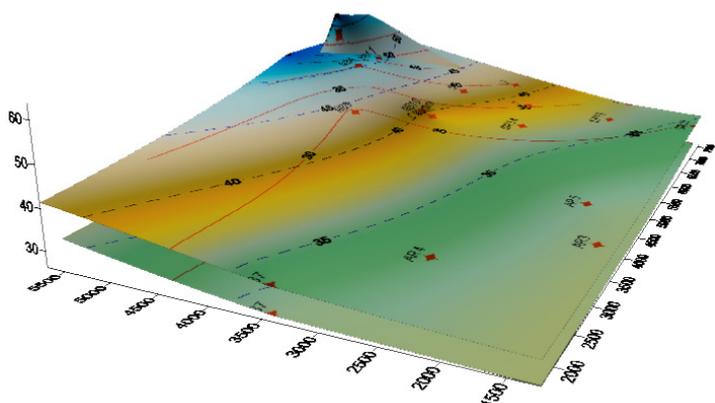


Fig. 12: Un altro vantaggio della compilazione delle carte di piena e magra consiste nell'individuazione delle zone di ricarica; la figura in basso deriva dalle precedenti e riporta le linee di uguale oscillazione freatica nel periodo; le zone che sono state interessate da un'ampiezza maggiore di oscillazione sono quelle da cui proviene la ricarica, in questo caso solo lungo la riva destra del fiume; in basso a sinistra è riportato uno schema in 3D delle due superfici piezometriche. (Studio degli influssi sul regime freatico dei lavori di cava, Treviso, A. Fileccia)



La determinazione della sola ricarica indiretta, ossia della quantità di acqua che può raggiungere l'acquifero a partire da acque superficiali, può essere effettuata con vari sistemi, a partire da misure di portata differenziali lungo i corsi d'acqua per determinare la quantità di scambi falda-fiume, fino ad una analisi delle fluttuazioni piezometriche in corrispondenza di piene particolari (specialmente in paesi aridi, dove tale tipo di ricarica rappresenta spesso l'unica ricarica esistente).

Altri apporti da acquiferi contigui possono essere valutati conoscendo le caratteristiche idrogeologiche di questi (trasmissività, piezometria) tramite l'applicazione della formula di Darcy per la determinazione del flusso di acque sotterranee attraverso la sezione di contatto ($Q = T i L$).

La determinazione delle uscite da un acquifero (discarica) può essere effettuata con vari sistemi, a seconda della loro natura.

Le perdite a mare vengono generalmente calcolate per mezzo della formula di Darcy, conoscendo la trasmissività dell'acquifero nella zona costiera, il gradiente piezometrico e considerano la sezione interessata. Nella stessa maniera possono venire calcolate perdite per evaporazione in zona di palude o di sebka o perdite in laghi o corsi d'acqua. Per quest'ultimo caso, comunque, si possono utilizzare le stesse misure differenziali di portata in alveo, che servono indistintamente per valutare tutti gli scambi falda-fiume.

Una eventuale discarica naturale verso altri acquiferi contigui può essere calcolata come visto per la corrispondente ricarica, per mezzo della nota formula di Darcy, una volta conosciuta la trasmissività ed il gradiente piezometrico nella zona di contatto.

La discarica attraverso le sorgenti può essere facilmente misurata con i consueti sistemi di misura delle acque superficiali. Le estrazioni da pozzi o altre opere devono essere valutate con la maggior precisione possibile anche se, come accennato in precedenza, non è sempre possibile.

Una volta determinati tutti gli elementi del bilancio sia in entrata che in uscita, deve essere verificata la loro corrispondenza.

In particolare, se nel bilancio sono stati considerati tutti gli elementi che lo costituiscono, la somma delle entrate deve essere uguale a quella delle uscite. Se ciò non è vero, si può avere una variazione delle quantità immagazzinate che, se è positiva (entrate superiori alle uscite) può indicare che l'acquifero si trova in una fase in cui recupera precedenti perdite o precedenti insufficienti apporti o sta accumulando riserve; se invece è negativo (entrate inferiori alle uscite) può indicare che l'acquifero si trova in una fase di sovrasfruttamento o di insufficiente ricarica.

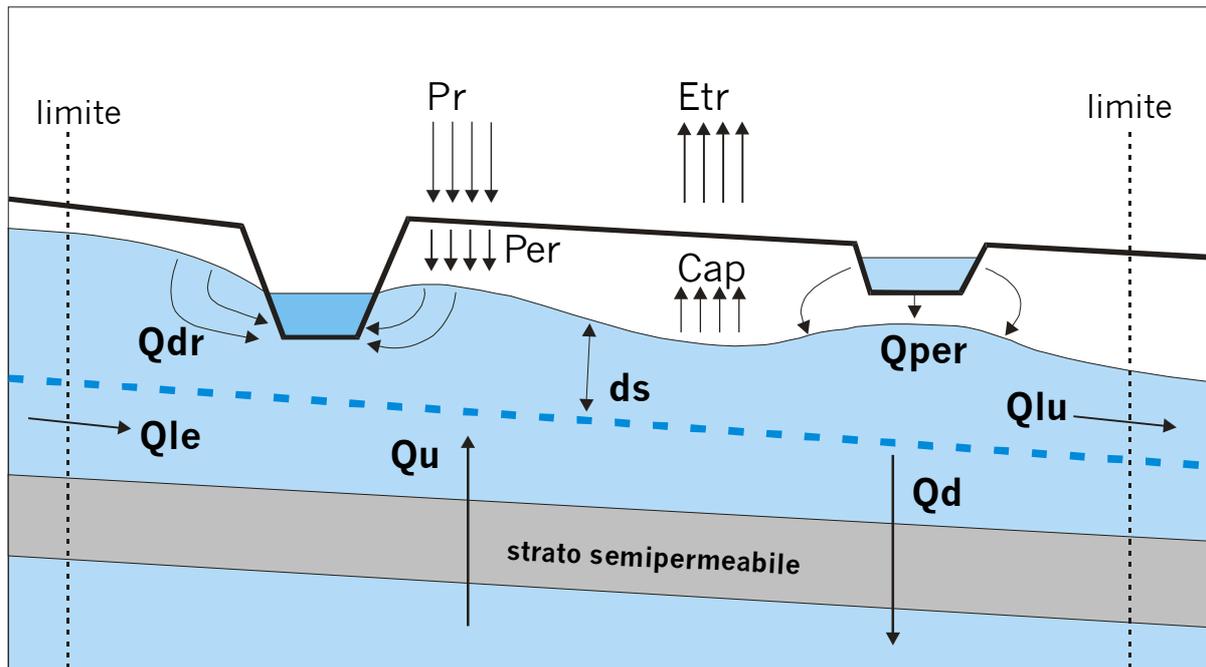
Importante a questo proposito è determinare il periodo al quale il bilancio è riferito, periodo al quale devono essere riferiti tutti gli elementi che compongono il bilancio. Se per esempio viene effettuato un bilancio di un acquifero facendo riferimento (ad es. per le precipitazioni) ad un ipotetico anno medio, e tale acquifero non è in sfruttamento, il bilancio deve essere in equilibrio, altrimenti c'è qualche errore nei calcoli dei vari fattori.

Per un dato anno specifico o per una data serie di anni ben determinati, il bilancio può essere in attivo o in positivo, per una qualsiasi delle ragioni sopra spiegate.

In ogni caso, comunque, la chiusura di un bilancio deve essere sempre confortata dalla situazione piezometrica.

Ad un bilancio negativo infatti deve sempre corrispondere, per lo stesso periodo, una diminuzione delle riserve e quindi un abbassamento dei livelli piezometrici. Ad un bilancio positivo deve sempre corrispondere, per lo stesso periodo, un aumento delle riserve e quindi un innalzamento dei livelli piezometrici. Se i livelli piezometrici rimangono stabili, ossia se non si è verificata alcuna variazione delle riserve per un certo periodo di tempo, il bilancio relativo a quel periodo sarà necessariamente in equilibrio.

Esempio di calcolo di bilancio idrico sotterraneo in una zona alluvionale



$$(Qle + Qu + Per + Qper) - (Etr + Qd + Qdr + Qlu) = ds$$

Fig. 13: Componenti del flusso necessari per il calcolo del bilancio:

Pr = acqua di precipitazione

Per = è la precipitazione efficace, pari all'acqua che ricarica la falda attraverso l'insaturo

Etr = evapotraspirazione da zone con falda subaffiorante (*Cap*), paludose, e coperte da vegetazione

Qper = acqua di percolazione attraverso l'alveo di un corso d'acqua pensile

Qup = flusso in salita proveniente da un acquifero semi confinato

Qd = flusso in discesa dall'acquifero superiore a quello sottostante, attraverso un livello semipermeabile

Qle = portata laterale in entrata

Qlu = portata laterale in uscita

Qdr = flusso di falda verso i corsi d'acqua superficiali

ds = variazione immagazzinamento

(Boonstra, de Ridder, modificato)

Programmazione dello sfruttamento di un acquifero (determinazione del “*Safe Yield*”)

La programmazione dello sfruttamento di un sistema acquifero è la fase più importante e delicata di un’indagine idrogeologica. Infatti, come stato precedentemente indicato, un sistema acquifero è controllato da numerosi fattori, che implicano sia le acque sotterranee che quelle superficiali, e che concorrono a mantenere in equilibrio il sistema.

Un corretto programma di sfruttamento dovrà quindi tener presente tale equilibrio e considerare non soltanto le acque sotterranee, ma le relazioni esistenti tra queste e le acque superficiali e viceversa.

Alcuni autori americani si riferiscono al problema dello sfruttamento ottimale delle risorse sotterranee nell’ambito di un certo bacino di utenza utilizzando il concetto di *safe yield*. Questo termine definisce le potenzialità di sfruttamento nel tempo di un bacino idrogeologico in studio, senza intaccarne le riserve geologiche, cercando di soddisfare, per quanto possibile, le esigenze di approvvigionamento delle utenze sparse nel territorio.

Il *safe yield* di un bacino idrogeologico rappresenta quindi il volume d’acqua che può essere emunto senza indurre nel sistema effetti indesiderati. Il primo aspetto da considerare nel calcolo di questo parametro è rappresentato da un’analisi relativa agli effetti indesiderati, che sono generalmente di natura differente. In generale dovrebbero essere presi in considerazione i seguenti aspetti:

- aspetti di tipo quantitativo, relativi ai volumi d’acqua disponibili nel sottosuolo, che a loro volta sono in relazione con le caratteristiche idrogeologiche del bacino sotterraneo e con le proprietà idrauliche degli acquiferi;
- aspetti di tipo qualitativo, che entrano in gioco in particolari situazioni, quali lo sfruttamento di acquiferi costieri con possibilità di sviluppo di fenomeni di intrusione marina. La valutazione del *safe yield* dipende anche dallo standard qualitativo che è richiesto per l’acqua che si vuole avere a disposizione, che a sua volta dipende dall’uso che dell’acqua si vuole fare;
- aspetti di tipo economico, che diventano decisivi laddove, per situazioni contingenti, il costo di pompaggio delle acque sotterranee diventa eccessivo;
- aspetti di tipo legale, che possono limitare il *safe yield* se esistono interferenze legate all’uso prioritario e/o alla protezione di certe risorse nell’ambito territoriale di studio.

I criteri di base da seguire per valutare le risorse idriche disponibili di un sistema e programmare il loro corretto sfruttamento possono essere così succintamente elencati:

1. la valutazione delle riserve disponibili e la pianificazione del loro sfruttamento deve essere effettuata sempre per un intero sistema idrogeologico e non per una parte soltanto di questo;
2. la quantità d’acqua sotterranea che può essere estratta da un sistema non deve mai essere superiore alla ricarica totale media dello stesso, in modo da mantenere il sistema in equilibrio;
3. ogni programma di sviluppo deve essere realizzato gradualmente, valutando e controllando gli effetti di ogni incremento parziale delle estrazioni;
4. il comportamento idrodinamico di un sistema in sfruttamento deve essere controllato costantemente mediante un sistema di monitoraggio.

Il primo criterio è ovvio, ma è anche quello che viene più frequentemente disatteso. La valutazione delle risorse è il risultato di un bilancio idrologico e questo può essere effettuato solo per un sistema idrogeologico ben definito, quale può essere un bacino idrografico contornato da spartiacque sotterranei e con una ben definita zona di recapito al livello di base del flusso sotterraneo.

Lo studio di un’area delimitata da limiti non naturali (es. amministrativi) può essere giustificato solo per motivi contingenti ma non può essere utilizzato per effettuare delle proiezioni a lungo termine nelle disponibilità idriche sotterranee.

In altre parole è possibile una determinazione anche accurata della quantità d'acqua che fluisce attraverso una data sezione di acquifero (calcolato in base alla trasmissività, gradiente piezometrico e larghezza della sezione, con la nota formula $Q = T L i$), ma tale valutazione riflette delle condizioni momentanee, che possono consentire una soluzione a problemi contingenti, ma non permette una valutazione degli effetti futuri su tutto il sistema.

Il secondo criterio non richiede particolari commenti, poiché è chiaro che non è possibile sfruttare per lungo tempo un acquifero estraendo più acqua di quanta ne viene ricaricata.

Una certa flessibilità, comunque, è consentita data la generalmente grande quantità delle riserve immagazzinate, che possono servire da volano per periodi relativamente brevi. E' possibile pertanto, almeno su base stagionale, estrarre quantità d'acqua superiori alla ricarica media in periodi di maggior necessità, sempreché tali quantità vengano ricostituite da una maggiore ricarica nei periodi di minore richiesta.

Da tener presente comunque che difficilmente l'intero volume della ricarica annua può essere utilizzato, in quanto alcune uscite naturali, come ad esempio il drenaggio dei fiumi, dovranno essere mantenute anche in periodi di magra, onde permettere di avere in essi un costante flusso di acqua corrente.

Il terzo criterio indica come deve essere realizzato un serio sistema di incremento delle estrazioni da un acquifero poiché, anche se la ricarica media è stata definita con un buon grado di accuratezza, lo sviluppo di un acquifero deve essere effettuato per fasi successive, in quanto:

- la determinazione delle caratteristiche idrogeologiche di un sistema è sempre un'approssimazione e alcune condizioni essenziali possono non essere state valutate correttamente. Le prime fasi di sfruttamento possono pertanto fornire valutazioni più precise circa l'intero sistema;
- lo sfruttamento di un acquifero altera l'equilibrio naturale del sistema; tali alterazioni ed il raggiungimento del nuovo equilibrio non sono sempre chiaramente determinabili e possono portare a situazioni impreviste e indesiderate. Uno sviluppo per fasi successive diminuisce tale rischio.

In conclusione quindi ogni pianificazione dello sfruttamento di un acquifero deve prevedere varie fasi successive, ognuna delle quali verrà effettuata basandosi sui risultati ottenuti dalle precedenti.

Il quarto criterio raccomanda la creazione nell'intero sistema idrogeologico in sfruttamento, di un sistema di monitoraggio con il quale poter seguire l'evoluzione delle condizioni idrodinamiche e idrochimiche dell'acquifero o dei vari acquiferi presenti.

I parametri di base che dovrebbero essere periodicamente osservati sono le condizioni piezometriche e la composizione chimica delle acque, da mettere in relazione con le variazioni delle estrazioni e della ricarica. Tali dati devono essere periodicamente analizzati e sintetizzati per un aggiornamento della situazione idrodinamica del sistema.

Tale situazione, almeno per i sistemi di una certa importanza, può essere riprodotta e seguita mediante la creazione dei modelli matematici.

La non osservanza dei criteri di base sovraesposti nello sviluppo dello sfruttamento di un sistema idrogeologico può portare ad un sovrasfruttamento dell'acquifero, i cui effetti più dannosi possono essere così elencati:

- eccessivo abbassamento della superficie piezometrica: un certo abbassamento della superficie piezometrica avviene sempre in ogni zona sottoposta ad un nuovo sfruttamento; se lo sfruttamento è compatibile con la ricarica, l'abbassamento della superficie piezometrica è modesto e si stabilisce rapidamente una nuova posizione di equilibrio. Se lo sfruttamento è

troppo elevato (superiore alla ricarica naturale dell'acquifero) l'abbassamento continuerà senza raggiungere un nuovo equilibrio. Ciò comporterà notevoli inconvenienti sia tecnici che economici ed ambientali, quali diminuzione della portata delle sorgenti e dei pozzi esistenti, fino a raggiungere anche un loro completo esaurimento e diminuzione della quantità d'acqua fluente nei corsi d'acqua che drenano la zona;

- intrusione di acque salate: insieme all'abbassamento della superficie piezometrica potrà aversi, nelle zone costiere, un richiamo di acqua marina verso l'interno degli acquiferi, con notevole deterioramento della qualità delle acque sotterranee;
- fenomeni di subsidenza indotta: l'eccessivo abbassamento della superficie piezometrica in acquiferi con matrice sabbioso-limoso può originare, a causa della presenza di pori lasciati vuoti dall'acqua, la compattazione del materiale, con conseguente abbassamento della superficie topografica e fenomeni di instabilità delle costruzioni.

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

Appendice

Esempio di individuazione della zona di ricarica della falda

(dr. Luigi Zoppis, Congresso AIH, Palermo 1970)

Durante il periodo di studio, 20 pozzi distribuiti sulla pianura di Khulays sono stati messi sotto controllo con misure mensili del livello statico. I pozzi sono stati scelti tra quelli non in uso e più lontano possibile da altri pozzi in pompaggio.

Le osservazioni effettuate hanno fornito dati essenziali su due elementi importanti ai fini del bilancio idrogeologico:

- l'abbassamento della superficie freatica durante la stagione secca, in relazione all'estrazione delle acque sotterranee
- l'innalzamento della superficie freatica in relazione alla ricarica dell'acquifero dovuta all'infiltrazione delle acque di piena durante la stagione delle piogge

I diagrammi delle variazioni di livello in tutti i pozzi in osservazione sono assai simili tra loro. Si nota infatti un regolare progressivo abbassamento del livello statico durante la stagione secca, mentre all'inizio delle prime piene negli wadi si ha un rapido innalzamento che continua per tutto il periodo delle piogge, al termine del quale incomincia un nuovo abbassamento. Dall'analisi di tali diagrammi è stato calcolato, per ogni punto di osservazione, l'effetto della ricarica dovuta alle piene stagionali, espresso come variazione di livello della falda, nonché l'effetto dell'estrazione d'acqua sotterranea durante la stagione secca, espresso come abbassamento medio mensile del livello di falda. Riportando tali dati sulla base topografica, sono state preparate le due carte annesse che esprimono con curve di uguale variazione di livello, gli effetti della ricarica e l'abbassamento medio mensile.

Mettendo in relazione i valori di abbassamento della falda, osservati nei pozzi durante la stagione secca, con la ricarica avvenuta nella successiva stagione delle piogge si è visto che esiste tra loro una relazione lineare. Nelle zone dove l'abbassamento medio mensile è minore c'è stata ricarica più bassa, mentre nelle zone dove è più alto, anche la ricarica è maggiore.

Tale variazione di ampiezza è anche funzione della localizzazione. I pozzi con maggiore abbassamento e ricarica sono, infatti, nelle vicinanze delle zone d'infiltrazione (parte alta degli wadi, vicino ai piedi dei versanti), mentre i pozzi con minori fluttuazioni sono situati nelle zone più distanti dalle aree di ricarica.

(per una esposizione più completa si rimanda agli atti del Convegno citato)

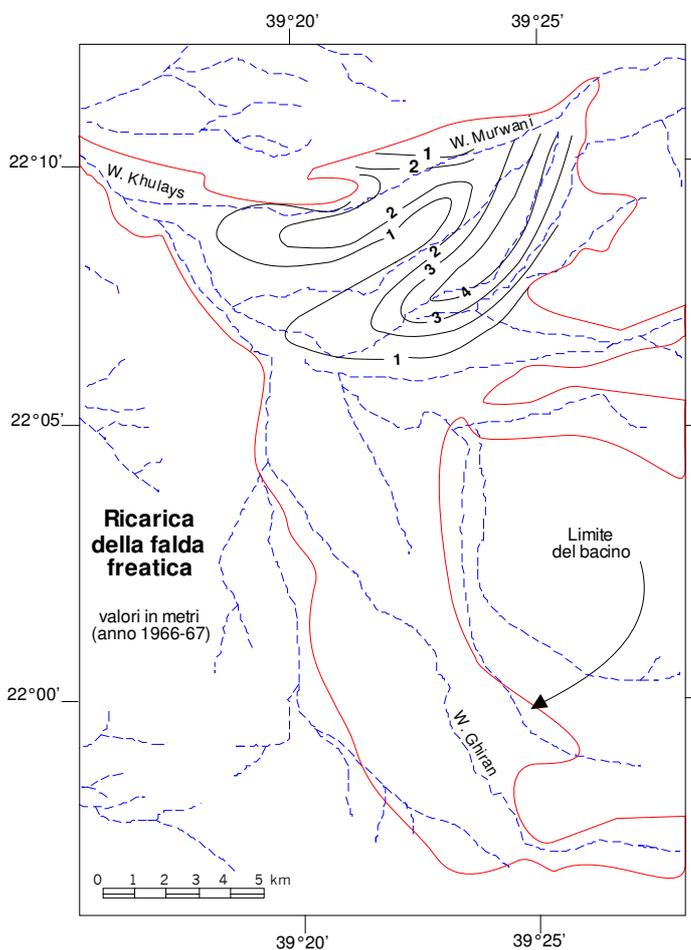
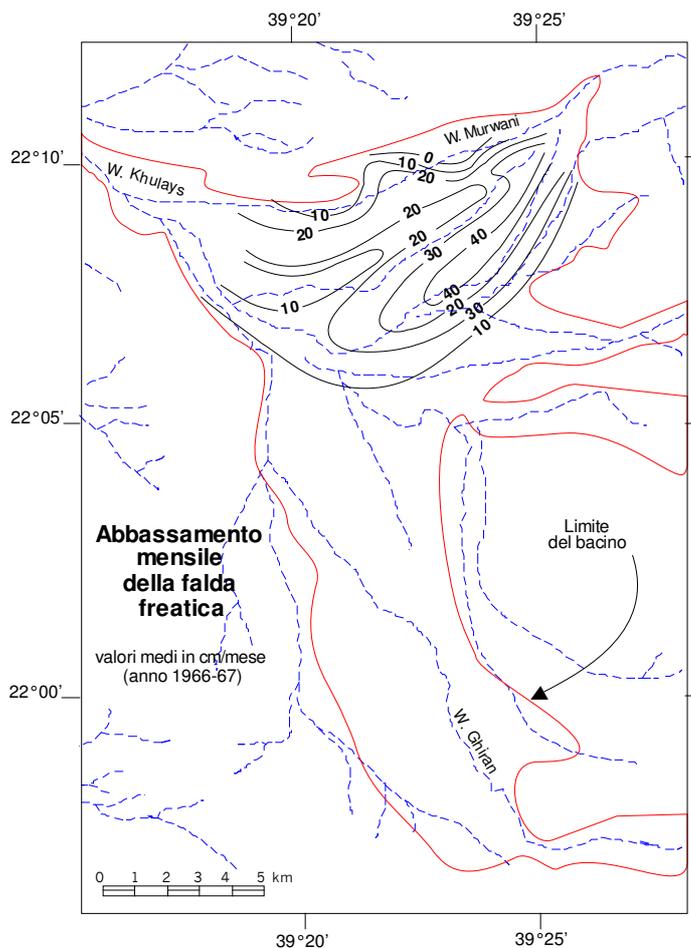


Fig. 14: Nei due periodi in figura sono stati misurate le variazioni di livello statico della falda freatica; in alto durante la stagione secca sono riportate le linee di uguale abbassamento medio mensile in cm, dovuto al pompaggio dei pozzi; in basso sono state ricavate le linee di uguale ricarica della falda durante la stagione piovosa; si nota come le aree con oscillazioni più elevate (zone di ricarica) sono situate vicino al corso degli wadi e poco oltre il loro sbocco dalle valli.
 Da: Esempio di bilancio idrologico per un bacino alluvionale in zona arida, L. Zoppis; Congresso AIH, Palermo 1970, semplificato