

LE PROVE DI POMPAGGIO DEI POZZI PER ACQUA



Argomenti del seminario

- Riferimenti tecnici e bibliografici
- Software commerciali e pubblici
- Tipologie di prova, programmazione delle prove, strumentazione
- Prove a gradini: curva del pozzo, efficienza, stima dei parametri dell'acquifero
- La portata specifica
- Prove di acquifero: interpretazione delle prove in funzione della tipologia di acquifero mediante diverse metodologie
- Curve diagnostiche per acquiferi porosi e fratturati.
- Il raggio di influenza e le interferenze tra pozzi

Scopo del seminario

Aggiungere informazioni di valenza pratica e applicativa alle basi teoriche delle prove di pompaggio, incoraggiando la valutazione critica nelle varie fasi dell'interpretazione. Aggiornare sulle recenti metodologie di interpretazione.

Ricordati, quando commenti l'acque, d'allegar prima la sperienza
e poi la ragione.

Leonardo da Vinci

COMPETENZA DEL GEOLOGO art. 41 D.P.R. 328 05/06/2001

Formano oggetto dell'attività professionale

d) il reperimento, **la valutazione** e gestione **delle georisorse, comprese quelle idriche**, e dei geomateriali d'interesse industriale e commerciale compresa la relativa programmazione, progettazione e direzione dei lavori; l'analisi, la gestione e il recupero dei siti estrattivi dimessi; (comma d) dell'art. 41 DPR 328).

Incluse acque minerali e termali (DPR 09/04/1959 n.128 art. 27, modificato da L. 23/12/2000, n. 388 art. 114).

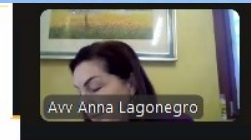
**L'interpretazione delle prove di pompaggio è
(dovrebbe essere) competenza professionale esclusiva.**

Dati di prova	→	interpretazione	→	T, K, r _i
 'tecnico abilitato'		geologo		geologo

Conoscere le equazioni di flusso e saper usare il software è condizione necessaria ma non sufficiente per interpretare le prove di pompaggio.

Nel seguito vedremo che spesso una corretta interpretazione richiede la conoscenza sito-specifica del contesto geologico.

Relazione Idrogeologica



L'idrogeologia costituisce una prestazione specialistica compresa nella geologia e più specificatamente nella relazione geologica, di esclusiva competenza del geologo, che comprende, appunto, tra i suoi contenuti *ex lege* l'idrogeologia

da:



corso di aggiornamento e approfondimento professionale in modalità Webinar

LA PROFESSIONE DI GEOLOGO - MODULO 2

Competenze professionali, Legislazione e Giurisprudenza

Martedì 11 novembre 2025

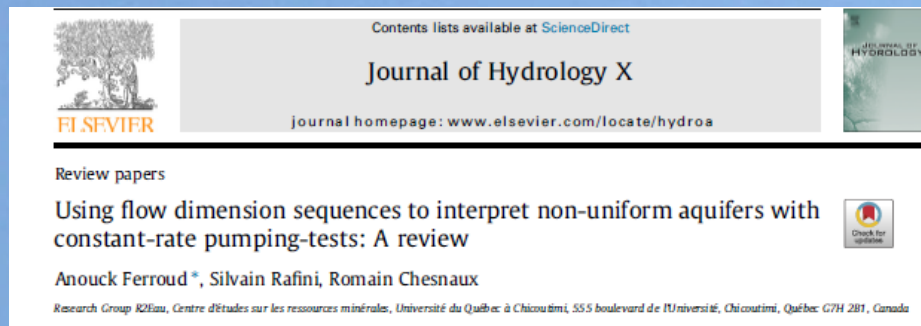
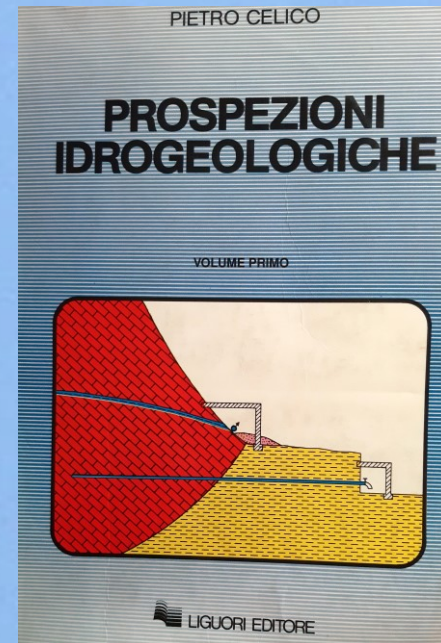
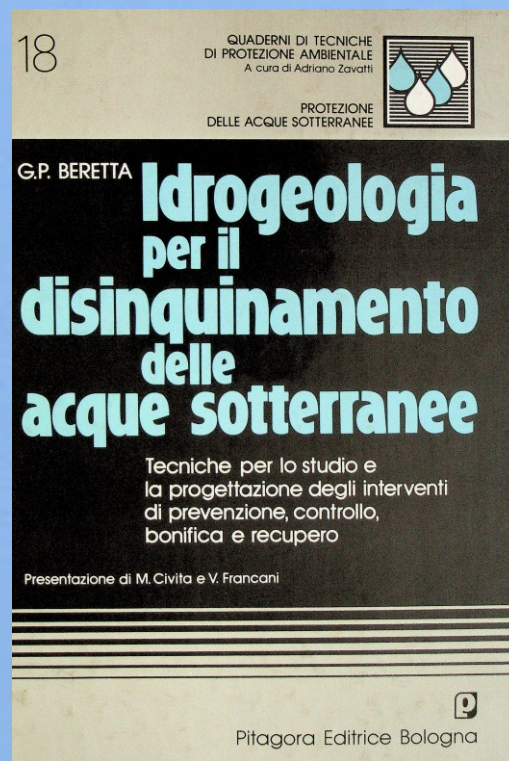
LE COMPETENZE PROFESSIONALI ESCLUSIVE E CONCORRENTI

- *Avv. Anna Lagonegro - Consulente legale dell'Ordine dei Geologi della Lombardia*

«La relazione idrogeologica e le prestazioni necessarie per la sua redazione costituiscono attività compresa nel più complesso ed articolato ambito della materia geologica della quale rappresenta contenuto specialistico di competenza esclusiva della professionalità geologica che confluisce nella relazione geologica»

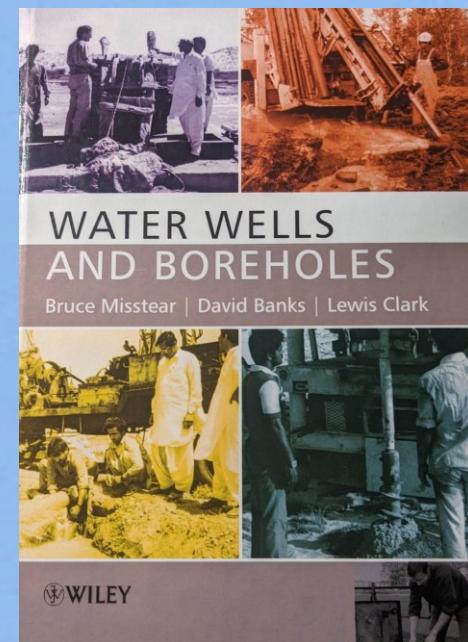
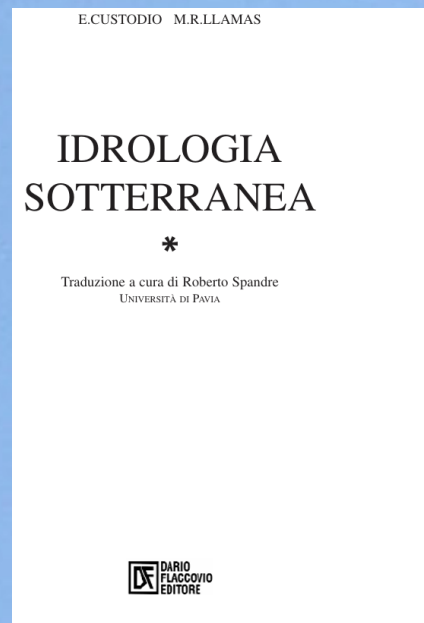
parere dell'Adunanza della Seconda Sezione del Consiglio di Stato n° 164 del 25.03.1992; parere dell'Assemblea Generale del Consiglio dei Lavori Pubblici n° 138 del 17.12.1993; parere del Consiglio di Stato in Adunanza Generale n° 154 del 2.06.1994; sentenza T.A.R. Umbria n° 142 dell'11.05.1994; sentenza Consiglio di Stato Quinta Sezione n° 701 del 4.05.1995; sentenza Consiglio di Stato Quinta Sezione n° 5909 del 28.11.2008; sentenza T.A.R. Friuli Venezia Giulia n° 293 del 25.03/24.04.2009; etc.

Riferimenti bibliografici per l'interpretazione delle prove



<https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100003>

2589-9155/© 2018 The Author(s). Published by Elsevier B.V.
This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Riferimenti bibliografici per l'interpretazione delle prove

Da scaricare online entrambi sul sito del The Groundwater Project.

Uscito a fine 2024, "introduction" da 367 pagine, molto completo e con esercizi



An Introduction to Hydraulic Testing in Hydrogeology Basic Pumping, Slug, and Packer Methods

William W. Woessner, A. Campbell Stringer
and Eileen P. Poeter



Analysis and Evaluation of Pumping Test Data

Second Edition (Completely Revised)

G.P. Kruseman

Senior hydrogeologist, TNO Institute of Applied Geoscience, Delft

N.A. de Ridder

Senior hydrogeologist, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen

and

Professor in Hydrogeology, Free University, Amsterdam

With assistance from

J.M. Verweij

Freelance hydrogeologist

Testo datato, ma con ottima esposizione degli assunti teorici, con esempi di calcolo manuale passo per passo basati su prove reali. Gli esempi di questo testo sono spesso stati utilizzati per la taratura dei software di calcolo commerciali.

Publication 47



International Institute for Land Reclamation and Improvement,
P.O. Box 45, 6700 AA Wageningen, The Netherlands, 1994.

Software x l'interpretazione

Codici commerciali molto usati, dedicati esclusivamente alle prove di pompaggio:

Aquifertest

AQTESOLV

Si possono usare anche i software di modellazione degli acquiferi

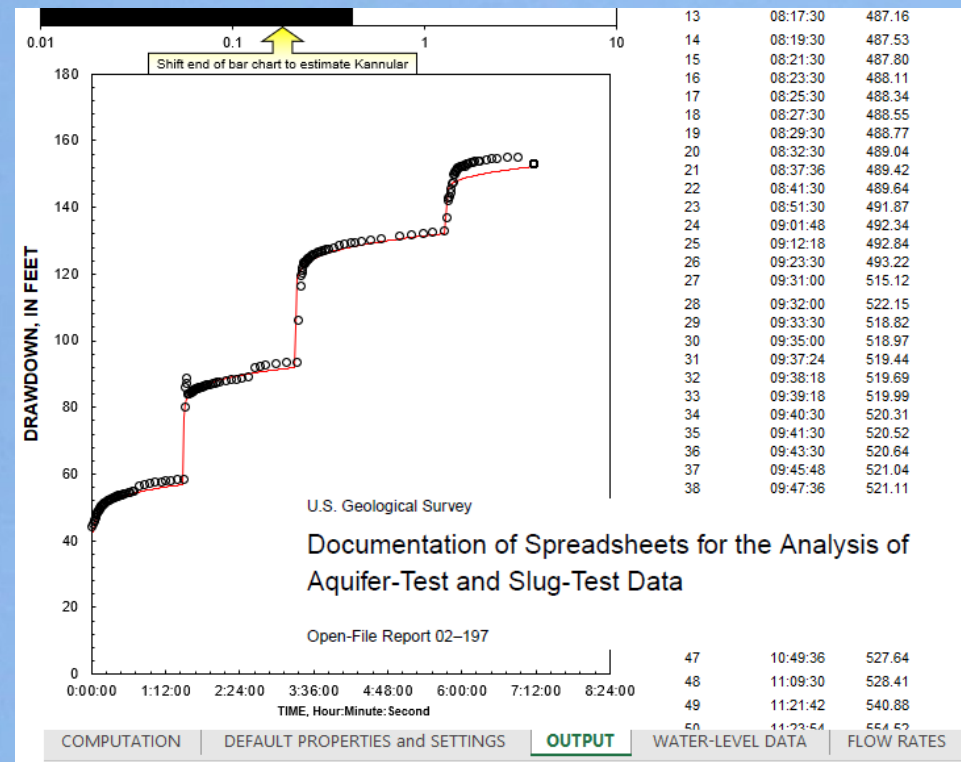
Alcuni freeware:

Documentation of Spreadsheets for the Analysis of
Aquifer-Test and Slug-Test Data

By Keith J. Halford and Eve L. Kuniansky



U.S. GEOLOGICAL SURVEY

Open-File Report 02-197



Article

Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells

Václav Fícaj , Pavel Pech  and Daniel Kahuda


6. Conclusions

The result of this work is a functional piece of software that considerably reduces the time demand when determining the magnitude of additional resistances and well storage. One of the advantages of this software is that it is available for free upon request to the authors (ficaj@fzp.czu.cz). It can also be downloaded from the following website: <https://github.com/Ficaj/Wtest> (accessed on 23 March 2021).

Alcuni freeware:

Diversi freeware citati con relativa URL in Woessner et al. 2024, pag.173 e 174

L'elaborazione dei dati e la preparazione dei diagrammi di una prova a gradini è facilmente gestibile con una cartella Excel, comunque esistono cartelle già predisposte o anche software specifici.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	Welcome to Well Designer!					Source: Houben (2015) <i>Hydraulics of water wells. Head losses of individual components. Hydrogeology Journal</i> 23 (8): 1659-1675. doi 10.1007/s10040-015-1313-7														
2						Houben and Kenrick (2022) Step-drawdown tests: linear and non-linear head loss components. <i>Hydrogeology Journal</i>														
3	Concept by: Georg Houben					Version: 2.1 Date: April 2017														
4																				
5	This Excel [®] tool allows you to predict the head loss (drawdown) of a vertical water well, as well as the drawdown contribution by individual well components.																			
6																				
7	Disclaimer: the author assumes no responsibility for the correctness of calculations and for decisions based on using this tool.																			
8	WellDesigner is provided with the understanding that it is not guaranteed to be correct or complete and conclusions drawn from such information are the sole responsibility of the user																			
9																				
10	Well designer runs under Microsoft Excel																			
11	* Excel is a registered and protected trademark by Microsoft																			
12																				
13	WellDesigner assumes the following boundary conditions:																			
14	confined, fully saturated aquifer *if not stated otherwise																			
15	steady-state flow (independent of time)																			
16	horizontal top and bottom layer (impermeable)																			
17	isotropic and homogeneous aquifer material																			
18	horizontal flow (no recharge), water is supplied from sides by constant head boundary																			
19	radially symmetric flow																			
20	cone of depression smaller than aquifer																			
21	fully penetrating well*																			
22	even distribution of inflow over screen length*																			
23	well radius small compared to aquifer and cone of depression																			
24																				
25	This implies that WellDesigner is - strictly speaking - only valid for a well in such a setting. In non-ideal geometries, deviations may occur.																			
26																				
27	If you find errors, typos or other corrections please contact:																			
28	georg.houben@hwr.de																			
29																				
30	Suggestions are also welcome. If you register with the author (by e-mail), you will receive complimentary updates and bugfixes!																			
31																				
32																				
33	Acknowledgement: Thanks to Martin Blümel for technical support!																			
34																				
35																				
36																				
37																				
38																				
39	Info Calculator Pie Chart OptionComparator Virtual_step_test Kozeny-Carman Radius of Influence Equations Sketch UnitConversion MANUAL																			

Source: Houben (2015)
Hydraulics of water wells. Head losses of individual components. *Hydrogeology Journal* 23 (8): 1659-1675. doi 10.1007/s10040-015-1313-7

Alcuni freeware:

Manuel de OUAIP v3 – Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essai : version mixte Hydrogéologie et Géothermie



Rapport final







BRGM/RP-72426-FR


Manuale anche in inglese, programma in francese, versione rilasciata nel settembre 2025


Dear OUAIP users,

We are pleased to announce the free availability of [OUAIP](http://ouaip.brgm.fr) v3.1 <http://ouaip.brgm.fr>


What's new in version 3.1?

- Mixed version  hydrogeology and  geothermal
- Added the  diagnostics of drawdown (or pressure) derivatives, taking into account variations in pumping rate (flow deconvolution) for the **interpretation of pumping tests**.
- OUAIP is now available in  Spanish in addition to French and English.
- A new  analytical solution representing the behavior of unconfined aquifers (Neuman solution) has been added.
- The interface has been improved from an  ergonomic perspective (unit management/conversion, graph management, addition of "dark mode", derivative module, point / derivative filtering using the eraser tool, etc.).

A new  user manual (in French) ([RP-72426-FR](#)) presenting examples of derivative analyses and the geothermal module is available.

The english  manual of OUAIP v2.3 is still available here [RP-69388-FR](#).

Best regards, the OUAIP BRGM team ([French Geological Survey](#)).

You can contact us at this e-mail  ouaip@brgm.fr

Download OUAIP (fill the form) : <https://www.brgm.fr/en/software/ouaip-computer-assisted-pumping-tests-interpretation>

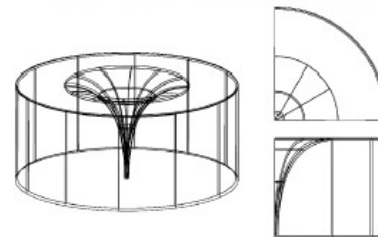
OUAIP Manual, v2 – Tool to assist in pumping tests interpretation

Final report

BRGM/RP-69388-FR

December 2020

1.89 3740.46 -625.5



OUAIP



		Interpretation			List effects				
Analytical solution	Variable flow	Well	Piezometer(s)	Partial penetration	Boudaries conditions	Quadratic head losses	Skin effect	Wellbore storage effect	No return check valve effect
<i>Theis (1935)</i>	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Papadopulos-Cooper (1967)</i>	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Hantush (1964)</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Gringarten-Witherspoon (1972)</i>	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

Illustration 13: Summary of OUAIP's analytical solutions and additional available effects

Le prove di pompaggio sono un'indagine costosa.

Una volta entrato in esercizio il pozzo la loro ripetizione può essere problematica.

Elementi di costo:

- installazione attrezzatura in cantiere per pompaggio e scarico delle acque
- **costo orario / giornaliero noleggio pompa**
- sorveglianza durante la prova;
- energia elettrica / carburante;
- geologo per l'interpretazione e pratica
- noleggio sensori di livello;
- **fermo di esercizio** per la prova.

Misurano e interpretano gli abbassamenti del livello di falda indotti dal pompaggio dei pozzi.

Possono essere su pozzo singolo (tipicamente prove a gradini) o su pozzo con piezometri / pozzi esistenti (tipicamente prove di acquifero).

Programmazione delle prove

Deve essere adeguata alle caratteristiche di utilizzo del pozzo.

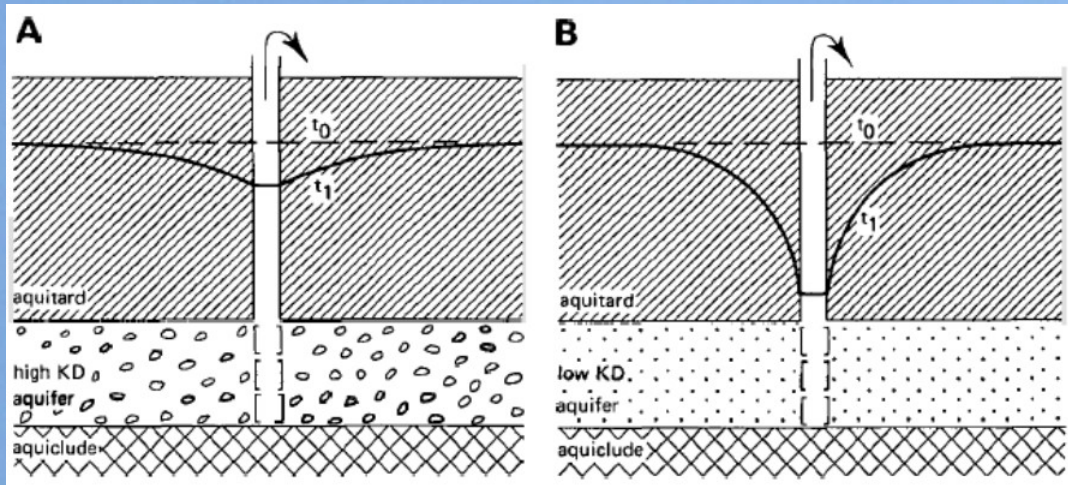
E' necessario avere conoscenza delle condizioni litostratigrafiche del sito e dei dintorni, dell'andamento della falda, delle caratteristiche costruttive del pozzo e delle 'condizioni al contorno'.

Condizioni al contorno.

- corsi d'acqua? laghi? verificare le variazioni idrometriche e possibilità di connessione idraulica col pozzo.
- pozzi nelle vicinanze? attivi?
- pareti rocciose con limite impermeabile o di alimentazione (sversamenti da massicci calcarei)?
- condizioni meteo prima e durante la prova (pressione atmosferica, precipitazioni).
- irrigazione attiva nelle vicinanze?
- disturbi antropici?
- c'è la valvola di non ritorno nel pozzo?

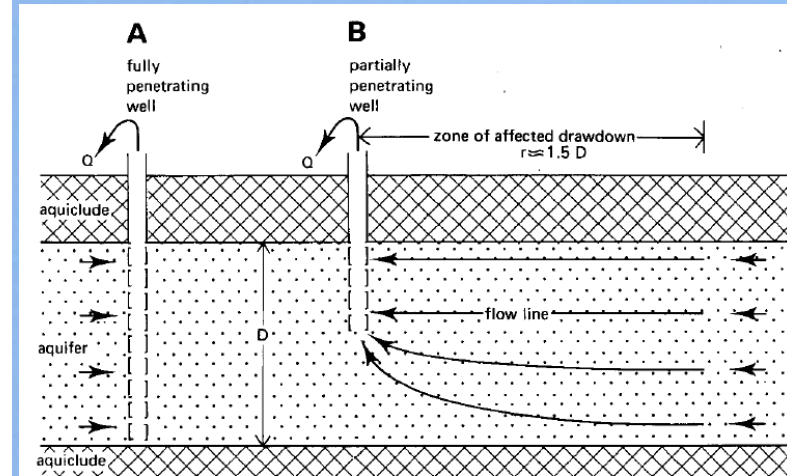
Condizioni al contorno.

Acquifero con alta o bassa
conduttività idraulica

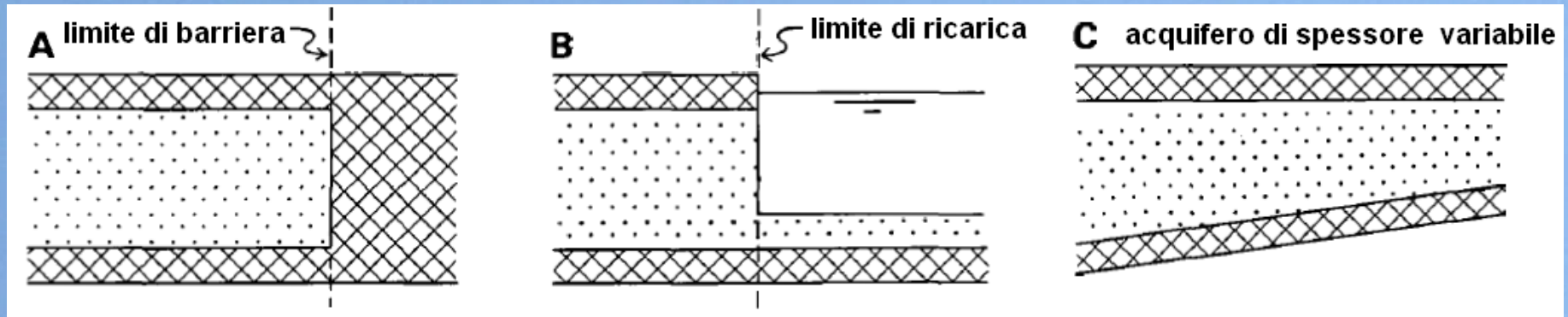


penetrazione
completa

parziale o



Presenza di limiti di permeabilità o variazioni di spessore dell'acquifero



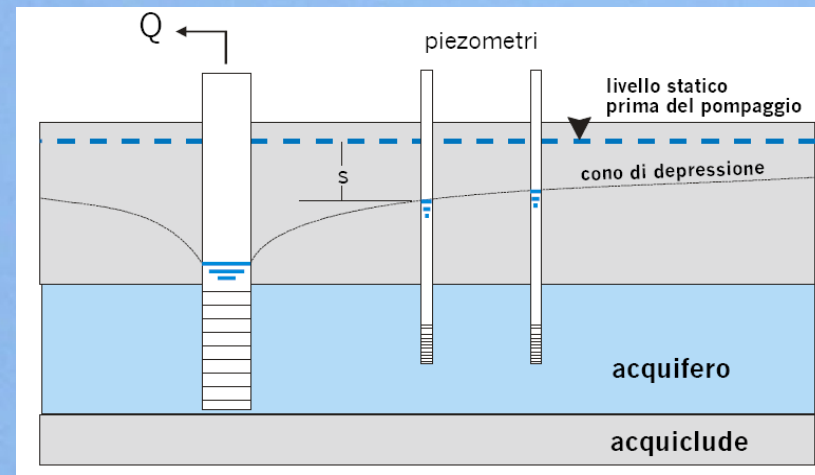
Piezometri di osservazione: ubicare a distanze da 10 a 100 m a seconda di K, tempo di pompaggio, portata. Profondità fino a $\frac{1}{2}$ tratto filtrato del pozzo. Se c'è un acquitrino al tetto, per studi importanti, un piezometro anche in esso*^(Noordbergum). Se più piezometri, consigliato $D(i+1) = 3D1$

Strumenti necessari:

- misuratori di portata
- misuratori di livello;
- cronometri;
- sensori di pressione.



- serbatoio tarato;
- contatore volumetrico;
- vasca a stramazzo;
- tubo con diaframma.



Tempistica di acquisizione dei dati

Table 1 - Minimum drawdown measurement time intervals for pumping and observation wells (modified from Sterrett, 2007; Kruseman and de Ridder, 2000).

Pumping Well	
Time Since Pumping Started (or Stopped) (min)	Time Intervals Between Measurements (min)
0-5	0.5-1.0
5-15	1
16-60	5
60-12	20
120 to termination of test	60
Observation Well	
Time Since Pumping Started (or Stopped)	Time Intervals Between Measurements
0-2 min	Approx. 10 sec
2-5 min	30 sec
5-15 min	1 min
15-50 min	5 min
50-100 min	10 min
100 min-5 h	30 min
5 h to 48 h	60 min
48 h to 6 days	Every 8 h
6 days to shutdown	Once a day



- verificare le condizioni di scarico delle acque di prova.

- controllare la presenza di emungimenti / ricariche artificiali in prossimità del sito di prova.

- effettuare misure di falda in un punto di controllo esterno all'area influenzata dalle prove

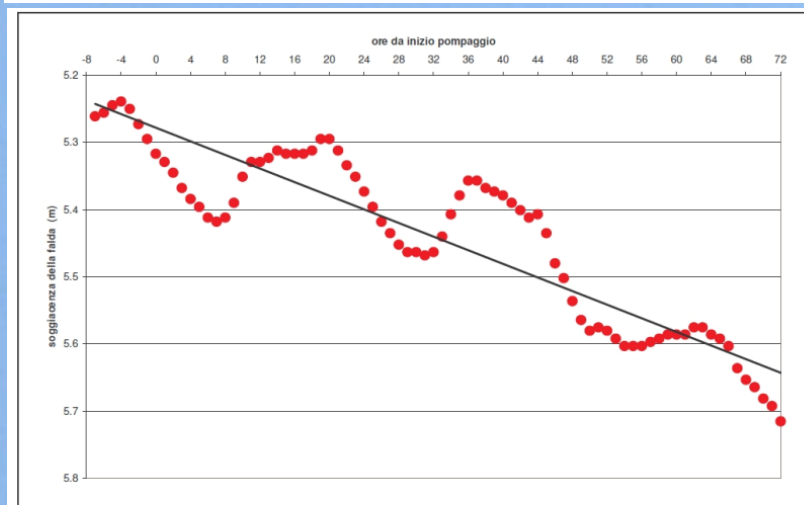
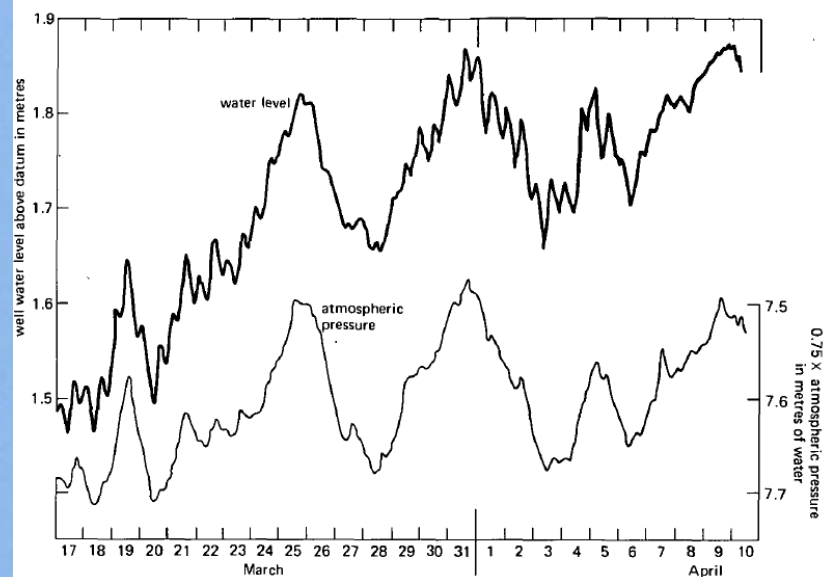
acquisire variazioni idrometriche dei fiumi

- è opportuno seguire in campo l'andamento delle prove registrando i possibili accidenti (interruzioni non previste del pompaggio, riduzioni della portata) e disturbi.

correggere /compensare:

- variazioni dovute alla pressione atmosferica (da acquisire con sensore barometrico o da dati da stazioni meteo)

-variazioni dovute a fluttuazioni della falda collegate a fiumi, maree, ...



Variazione del livello della falda atesina di fondovalle durante il periodo della prova a portata costante.

La gestione delle acque di spurgo e delle prove di pompaggio

La Prov. Aut. BZ (D.G.P. 2320/2008) consente l'immissione in corpi idrici superficiali

Riferimento: Provincia Autonoma di Trento: T.U.L.P. art. 25

Al riguardo anni fa per lo scarico in Adige di prove di pompaggio posi un quesito a PAT, cui fu data questa risposta.

In riferimento alla mail di data 4 gennaio 2011 relativa allo scarico delle acque provenienti dalle prove di pompaggio di un pozzo ad uso irriguo – antincendio si osserva quanto segue.

Secondo quanto disposto dall'art. 25 comma 3 del T.U.L.P in materia di tutela dell'ambiente dagli inquinamenti la restituzione delle acque derivate ad esclusivo uso idroelettrico, antincendio e irriguo non è soggetta alla disciplina degli scarichi.

Si ritiene pertanto che la restituzione di acque provenienti da prove di pompaggio dai pozzi per i quali sussiste una concessione per gli usi sopradescritti non sia soggetta ad autorizzazione allo scarico a condizione che l'acqua prelevata non sia destinata ad usi diversi da quelli fissati in concessione tali da modificarne le caratteristiche qualitative con le quali è stata prelevata, non presenti valori superiori alle soglie di contaminazione fissati dalla tab. 1 dell'allegato 5 alla parte IV titolo V del decreto legislativo 152/2006 nè indici di inquinamento tali da compromettere la qualità del corpo idrico ricettore.

Dovrà essere comunque richiesto il nulla osta-idraulico al Servizio competente (Servizio Bacini Montani)

Si fa invece presente che, secondo quanto disposto dall'art. 25 del T.U.L.P sopracitato è prevista la redazione di un programma di restituzione delle acque - e relativa autorizzazione da parte dell'APPA - qualora la restituzione riguardi acque intercettate durante l'esecuzione di opere pubbliche o private.

Distinti saluti

richiesta da fare per tempo

Nota bene: negli usi sopradescritti non sono compresi i pozzi per uso potabile e geotermico. Per i piezometri è un'altra storia .

La gestione delle acque di spurgo e delle prove di pompaggio

Nella normativa attuale la definizione di scarico è :

“qualsiasi immissione effettuata esclusivamente tramite un **sistema stabile** di collettamento che collega senza soluzione di continuità il ciclo di produzione del refluo con il corpo ricettore acque superficiali, sul suolo, nel sottosuolo e in rete fognaria, indipendentemente dalla loro natura inquinante, anche sottoposte a preventivo trattamento di depurazione”.

L'esclusione PAT degli usi potabile e geotermico appare legata alla presenza di «sistemi stabili di collettamento» nei relativi impianti, ma per gli spurghi e le prove di portata??

In qualche testo si considera lo scarico delle acque di prova come "sversamento occasionale in acque superficiali" non soggetto alla disciplina degli scarichi, ma soggetto solo a comunicazione. A mio avviso interpretazione pericolosa, dato che si usano comunque condotte per il trasporto.

In fase di progettazione va posta attenzione a:

- Titolarità del corpo idrico recettore (necessità di autorizzazioni / nulla osta idraulico od altro)
- Distanze da tenere
- Caratteristiche del corso d'acqua recettore
- Torbidità delle acque (prevedere una chiarificazione prima dello scarico mediante vasche di decantazione)
- Caratteristiche chimiche delle acque derivanti da operazioni di spurgo e prove di pompaggio e confronto con i limiti normativi

Tutti gli scarichi vanno autorizzati

Spesso le ditte di trivellazione propongono ai committenti l'organizzazione delle prove, con il rilievo dei dati, che vengono passati al “tecnico abilitato” per la redazione della relazione tecnica finale.

In questa, quanto di ciò che è stato esposto sopra viene preso in considerazione, correttamente elaborato e trasposto nella relazione finale?

Un conto è la mera raccolta dati di prova e loro presentazione, un altro è la definizione delle condizioni la contorno e l'interpretazione delle prove.

Con la relazione idrogeologica di fine lavori e con l'interpretazione delle prove di pompaggio a gradini si certifica la corretta (o meno) esecuzione dei lavori di costruzione del pozzo e si forniscono alla committenza dati per la gestione degli emungimenti.

Il firmatario della relazione idrogeologica di fine lavori assume così un profilo di responsabilità di fronte alla committenza e agli enti concessionari.

Tipologie di prova

Prova a gradini di portata o “step test”:

A cosa serve?

- ✓ si definisce il comportamento del pozzo in risposta al pompaggio a diverse portate Q
- ✓ si quantifica la portata ottimale di pompaggio e quella da non superare
- ✓ si fornisce alla committenza l'abbassamento di falda atteso alla portata di esercizio
- ✓ si quantificano le perdite di carico e si esprimono valutazioni sulla qualità costruttiva del pozzo.
- ✓ si possono eseguire stime della trasmissività dell'acquifero.
- ✓ se ripetuta periodicamente, segnala variazioni delle condizioni del pozzo: per esempio, calo di portata per presenza di incrostazioni calcaree*
- ✓ viene ripetuta prima e dopo interventi di risanamento per la valutazione dell'efficacia degli stessi.

E' il vero collaudo del pozzo e la curva del pozzo può essere considerata come una fotografia dello ‘stato di salute iniziale’ del pozzo.

Prova a portata costante o di acquifero

A cosa serve?

- ✓ fornisce informazioni sulla natura dell'acquifero
- ✓ si ricavano i parametri idrodinamici dell'acquifero: trasmissività T [L^2/t], conduttività idraulica k [L/t], coefficiente di immagazzinamento S

che servono a valutare le interferenze con altre captazioni, gli impatti del pompaggio sull'acquifero e per le modellazioni di flusso e di trasporto.

Alla fine di entrambe le tipologie di prova, allo spegnimento della pompa ($Q = 0$) si misura la risalita del livello di falda: **prova di risalita o «recovery test»**. Queste misure servono a completare l'interpretazione della prova di pompaggio, in particolare per gli acquiferi confinati.

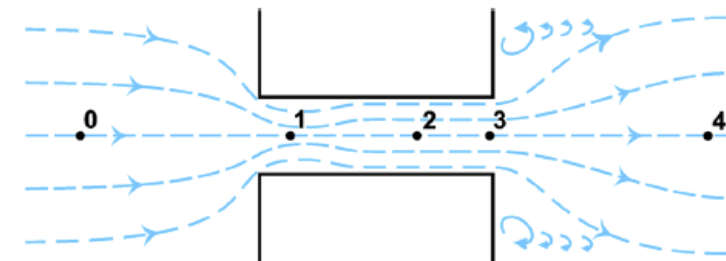
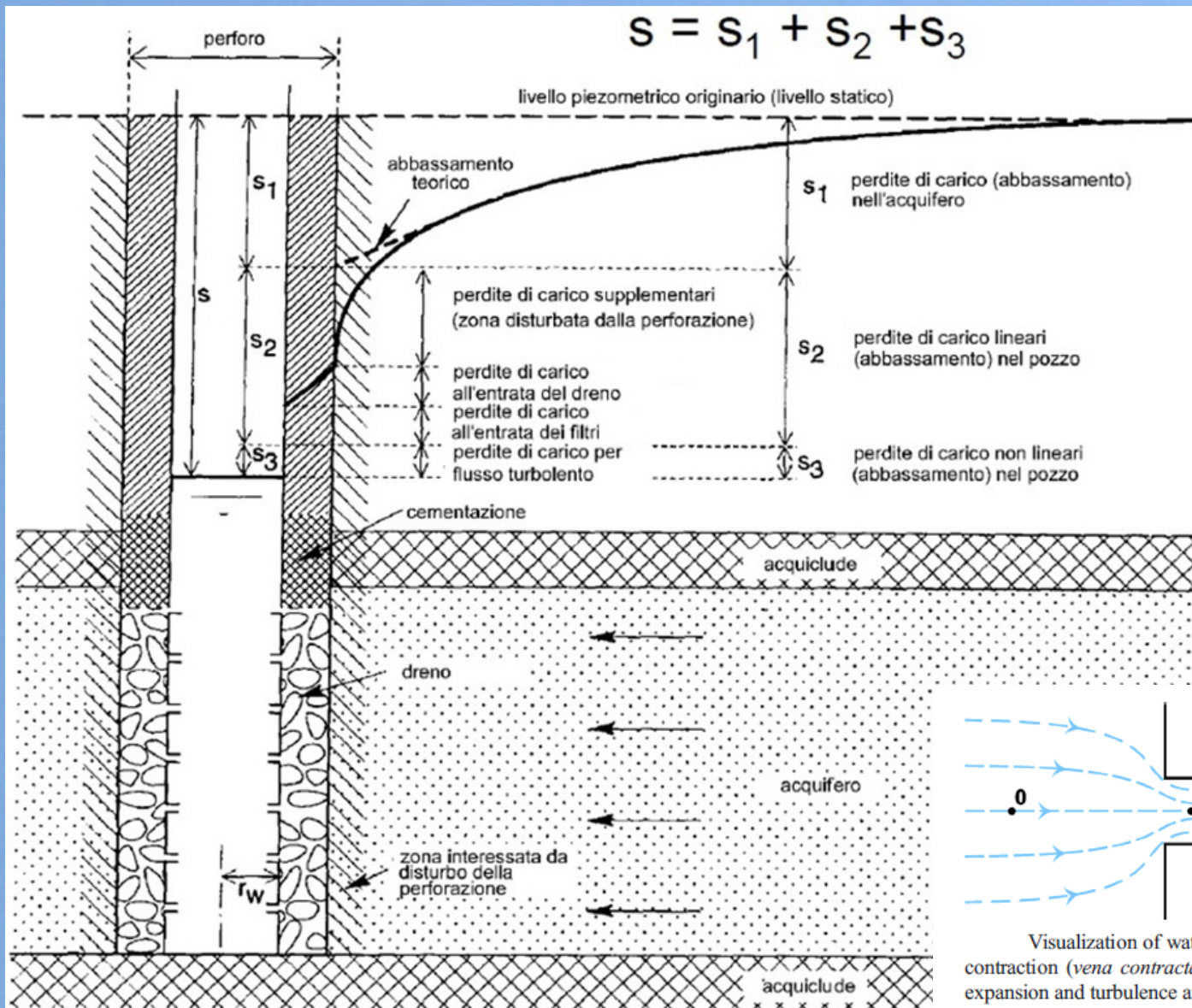
Non ci occuperemo qui di:

Prova a variazione istantanea di livello “slug test”: in questa prova si induce una variazione istantanea del livello in un piezometro/pozzo e si misura il ripristino del livello indisturbato in funzione del tempo.

Integral Pumping Tests: usati per la definizione della geometria di plumes di contaminazione. Richiedono un allineamento di più pozzi in pompaggio trasversalmente al plume e continue analisi della concentrazione dell'inquinante.

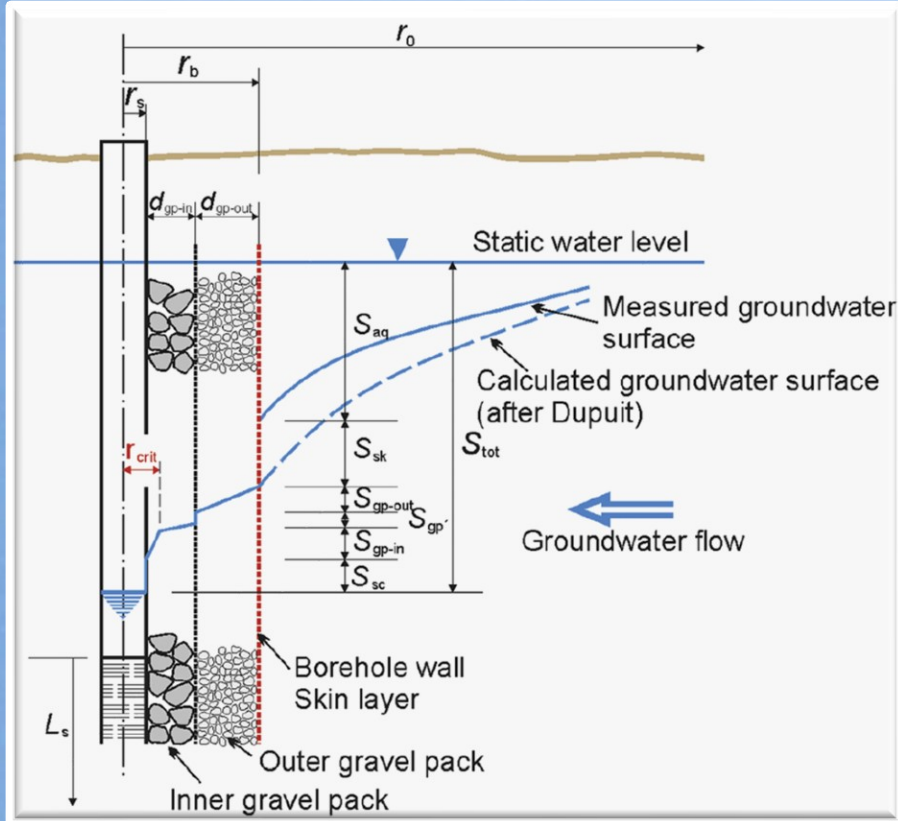
Oscillatory Pumping Tests: successione di pompaggi e iniezioni nello stesso pozzo, di durata limitata. Richiedono un equipaggiamento particolare per la reimmissione e un'elaborazione complessa per l'interpretazione.

Il valore dell'abbassamento s del livello in un pozzo è dato dall'abbassamento nell'acquifero dovuto all'estrazione di acqua / calo della pressione e da perdite di carico dovute alle caratteristiche costruttive del pozzo.



Visualization of water flow through a screen slot: (0) inflow, (1) contraction (vena contracta) at slot inlet, (2) laminar flow in slot, (3) expansion and turbulence at outlet, (4) outflow

La quantificazione delle perdite di carico correlate ai diversi fattori dell'abbassamento totale è oggetto di numerosi studi di idraulica dei pozzi.



$s_{tot} = s_{aq} + s_{sk} + s_{gp} + s_{sc} + s_{up}$, with:

s_{tot} =total head loss, measured in the well (m),

s_{aq} =aquifer loss (m),

s_{sk} =skin layer loss (m),

s_{gp} =gravel pack loss (inner and outer), including convergence loss (m), s_{sc} =well screen loss (m),

s_{up} =upflow loss in well interior, sum of losses in screen and casing (m).

Houben G.J. (2015) - Review: Hydraulics of water wells—head losses of individual components. Hydrogeol J.

Capire i fondamenti teorici è bene, ma non è essenziale entrare così in dettaglio in fase di elaborazione. È sufficiente considerare S1, S2, S3 pag. prec.

$$s_{tot} = s_{aq} + s_{sk} + (s_{gp} + s_{cv}) + s_{sc} + s_{up} = \left[\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K_{aq} \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{r_0}{r_b} \right) \right] + \left[\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K_{sk-o} \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{r_{sk-o}}{r_{sk-i}} \right) \right] + \left\{ \left[\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K_{gp} \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{r_b}{r_s} \right) + \beta^* \cdot \left(\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K_{gp} \cdot B} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_b} \right) \right] + \left[\frac{Q}{n_c \cdot K_{gp} \cdot B} \log \left(\frac{2}{1 - \cos \delta \cdot \pi} \right) \right] \right\} + \left[\frac{1}{2g} \cdot \left(\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot B \cdot C_v \cdot C_c \cdot A_p} \right)^2 \right] + \left\{ f_D \cdot \frac{L_p}{d_p} \cdot \frac{\left[Q / \left(\frac{\pi \cdot d_p}{4} \right) \right]^2}{2g} \right\}$$

Prova a gradini di portata “step test”

La prova consiste nell'emungere acqua da un pozzo con portate differenti, misurando le quote dei livelli dinamici, ossia gli abbassamenti del livello d'acqua corrispondenti alle diverse portate di prova.

Operativamente si misura al pozzo in pompaggio l'andamento dell'abbassamento s del livello di falda

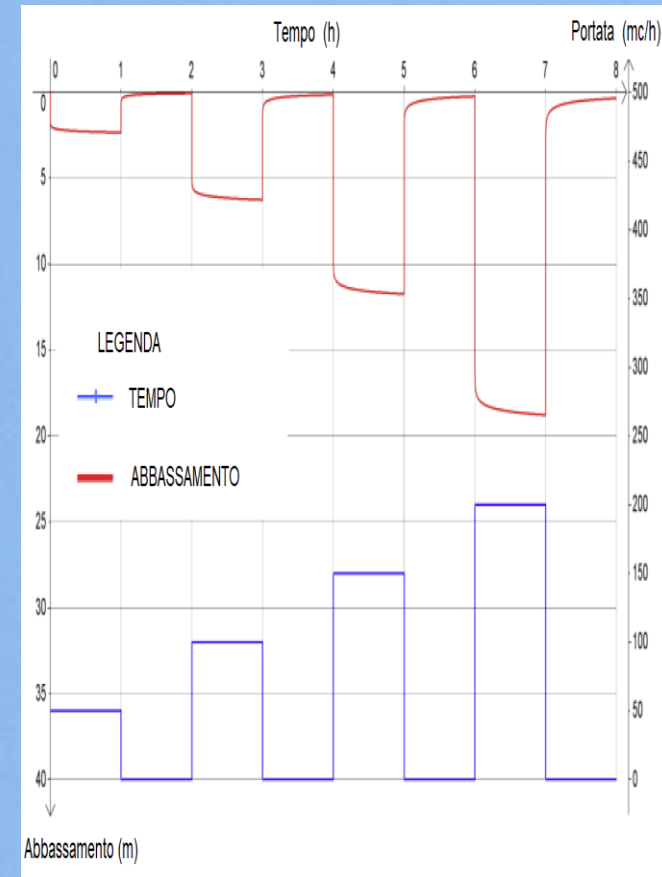
$$(s_1 = h_{t0} - h_1; s_2 = h_{t0} - h_2; \dots s_i = h_{t0} - h_i)$$

in corrispondenza a diverse portate di emungimento $Q_1, Q_2, \dots Q_i$ a tempi definiti $t_0 = t_1 = t_2, \dots = t_i$

La norma francese AFNOR X10-999 prescrive almeno 3 gradini di portata (preferibilmente 4) di durata di almeno 1 ora separati da interruzioni del pompaggio della stessa durata. Minimo consigliato dalla prassi: 4 gradini, meglio 5.

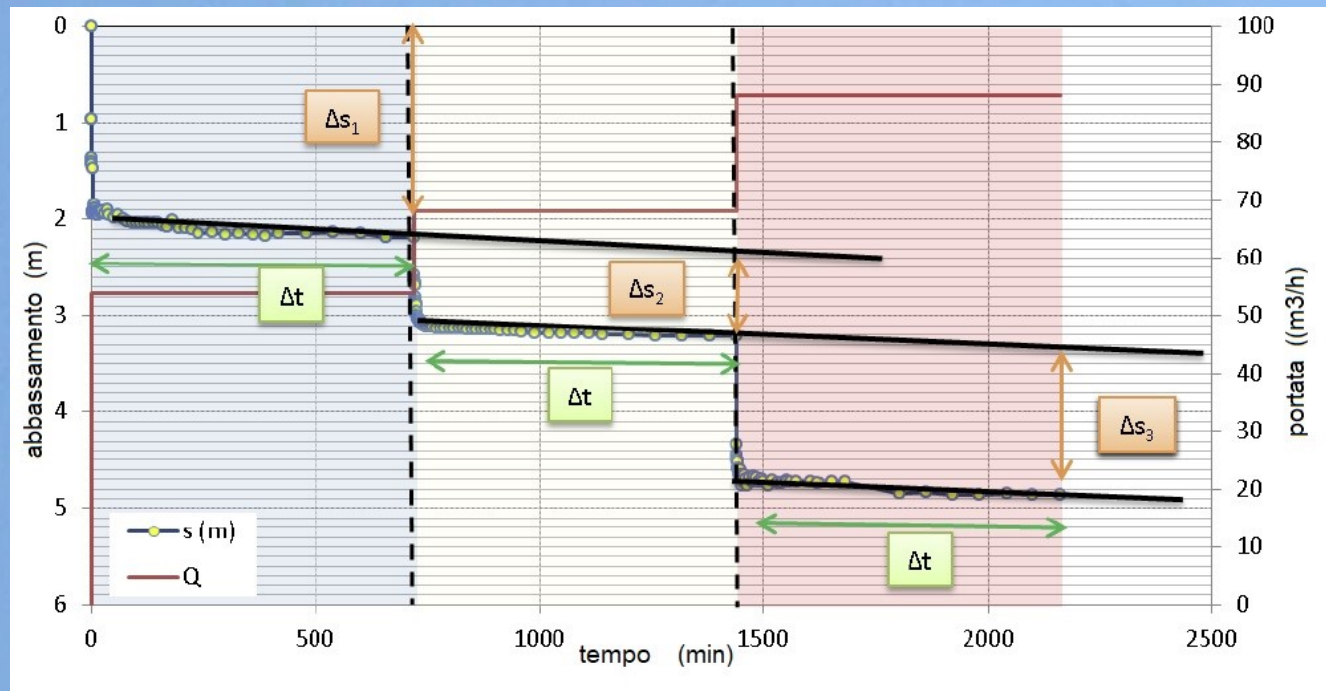
Si può operare in ‘**regime stazionario**’, emungendo acqua con una certa portata Q e misurando il relativo abbassamento s del livello ad avvenuta stabilizzazione dello stesso; a questo punto si spegne la pompa in modo che il livello d'acqua ritorni alla quota originaria del livello statico. Quindi si ripete più volte tale operazione emungendo acqua con diverse portate per poi tracciare il grafico $Q-s$ in scala lineare.

Ovviamente va fatta dopo lo spurgo del pozzo, con acqua pulita.



Prova a gradini di portata “step test”

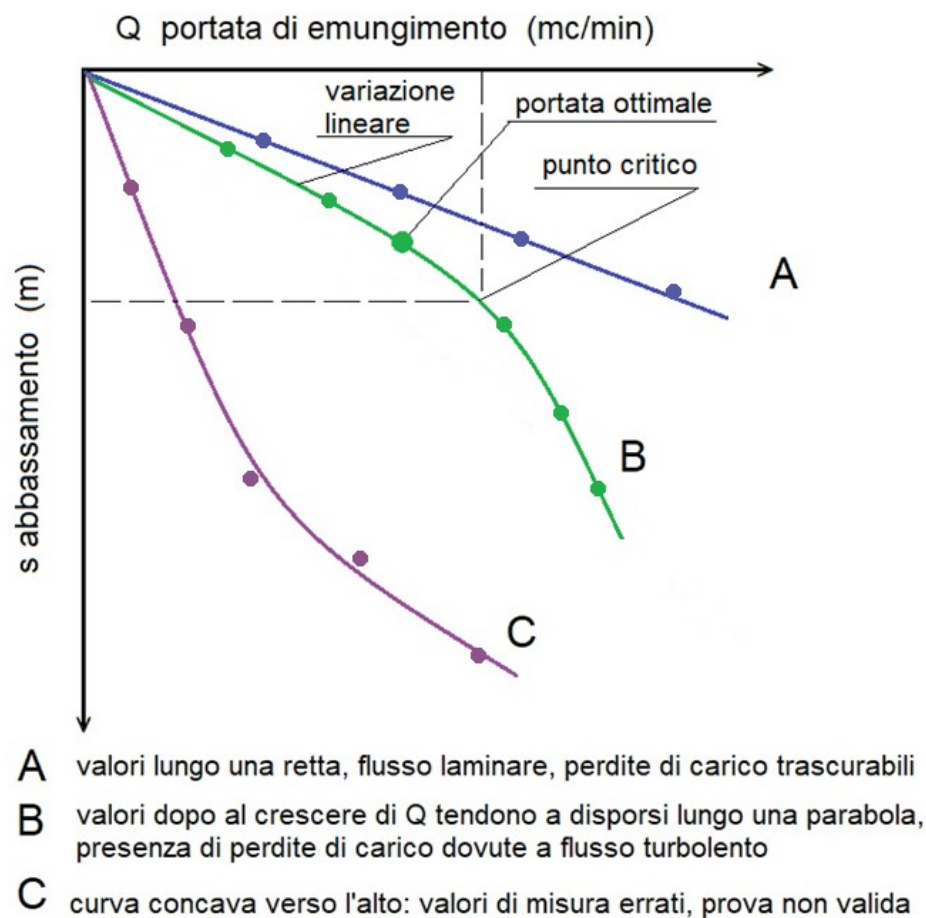
Si può scegliere di operare in regime **“transitorio”**, aumentando la portata alla fine di ogni gradino, senza spegnere la pompa, tenendo per quanto possibile costante la durata di ogni gradino. Se il livello nel pozzo si stabilizza rapidamente la base del gradino risulta piatta, se invece continua a scendere, il valore dell’abbassamento viene estrapolato con il metodo di Bierschenk : la curva alla base del gradino viene allungata su grafico semilogaritmico fino alla fine del gradino successivo, ricavando l’abbassamento. In questo modo si evita di sottostimare gli abbassamenti e la portata critica del pozzo.



Suggerimento operativo: se la riduzione di portata a seguito dell’aumento della prevalenza non è compensata da dispositivi automatici che agiscono sulla velocità delle giranti della pompa, non continuare a ripristinarla manualmente, ma lasciare che si assesti. Considerare una portata media

Plottiamo i risultati su un diagramma portata Q_i / abbassamento s_i e otteniamo la curva del pozzo.

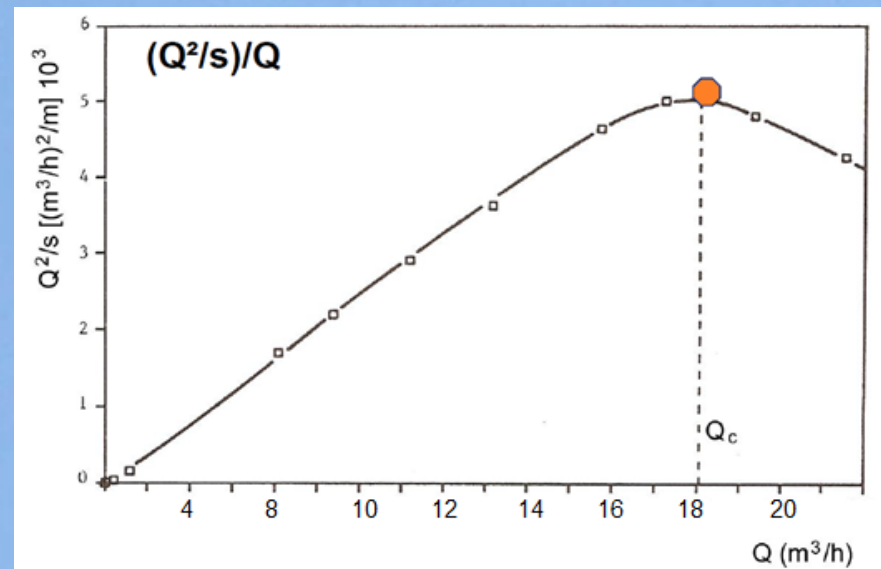
Plottiamo le coppie di valori $Q_i - s_i$ in un diagramma, ottenendo la curva del pozzo.



Il punto critico di passaggio tra variazione lineare e non lineare definisce la **portata critica del pozzo (Q_c)**.

La **portata ottimale** (portata del 15-20% inferiore alla Q_c) del pozzo può essere definita in diversi modi:

- 1) graficamente dalla curva;;
- 2) semi-analiticamente, utilizzando il grafico del rapporto $Q - Q^2/s$;
- 3) semi-analiticamente, utilizzando il 'metodo del punto di uguaglianza' (descritto più avanti).

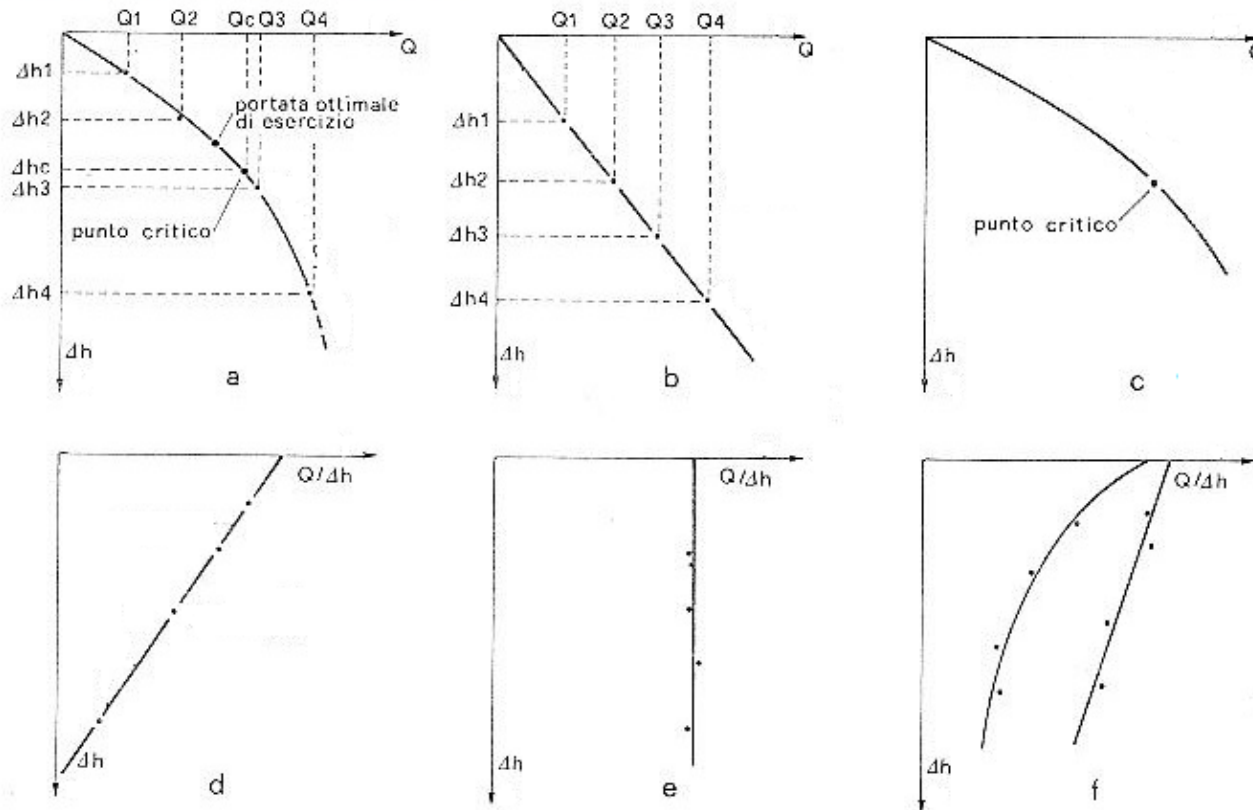


Un parametro utile: la portata specifica Q/s

portata del pozzo per metro di abbassamento $[L^3/t \times 1/L = L^2/t]$

(primo esempio di curve diagnostiche)

REGIME STAZIONARIO (DUPUIT)



Esempi di curve portate (Q)/depressioni (Δh) e portate specifiche ($Q/\Delta h$)/depressioni (Δh) riferite ad una falda libera (a, d), ad una falda confinata con piccole depressioni piezometriche* (b, e) e ad una falda confinata con elevate perdite di carico (c, f).

* $\Delta h \leq 25\% (H-d)$ H altezza della piezometrica indisturbata (livello statico) riferita al substrato impermeabile
 d spessore dell'acquifero confinato

da Celico (1986) *Prospezioni idrogeologiche, vol.1*, con modifiche

La curva del pozzo può essere espressa con un'equazione che ha la forma:

$$s = BQ + CQ^n$$

s abbassamento del livello di falda

Q Portata di pompaggio

l'equazione consente di predire il livello di falda corrispondente ad una determinata portata di emungimento.

il termine lineare **B** è un fattore che può essere scomposto in tre componenti B1, B2 e B3 e che dipende: dalle perdite di carico della formazione acquifera alla parete del pozzo (B1), dall'eventuale penetrazione parziale del pozzo nell'acquifero (B2), dalla eventuale presenza intorno al pozzo di una zona a permeabilità diversa da quella media della formazione (B3).

Se un acquifero è perforato a percussione e il tratto filtrato comprende l'intero spessore acquifero*, B dipende solo dalle perdite di carico dell'acquifero (B=B1), essendo stata la perforazione condotta senza uso di fanghi.

il termine esponenziale **Cⁿ** è un fattore che dipende dalle perdite di carico in pozzo per la componente di flusso turbolento che si crea per il passaggio d'acqua attraverso il dreno, i tratti finestrati e le tubazioni del pozzo.

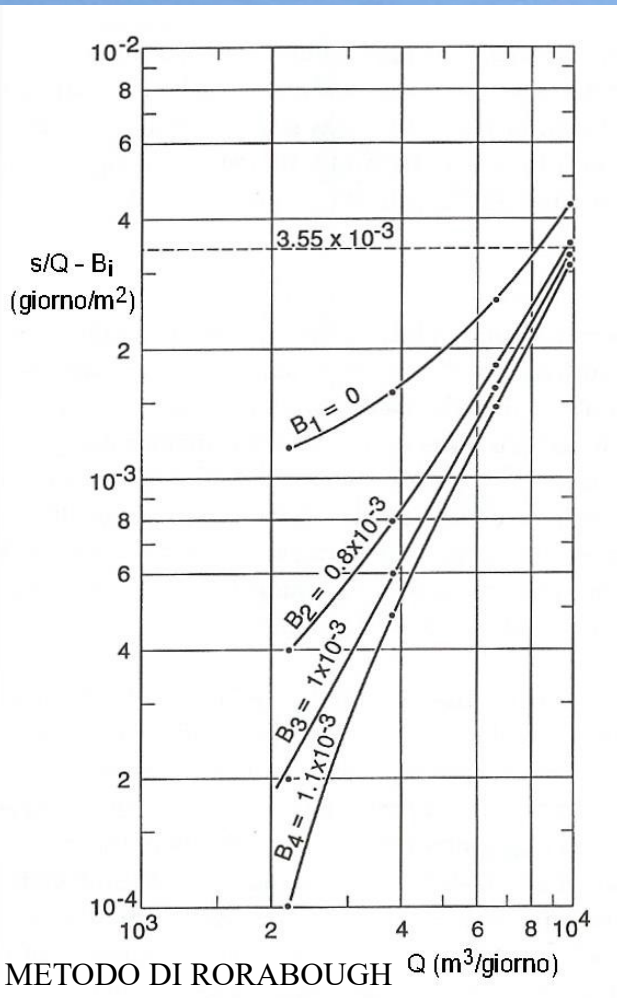
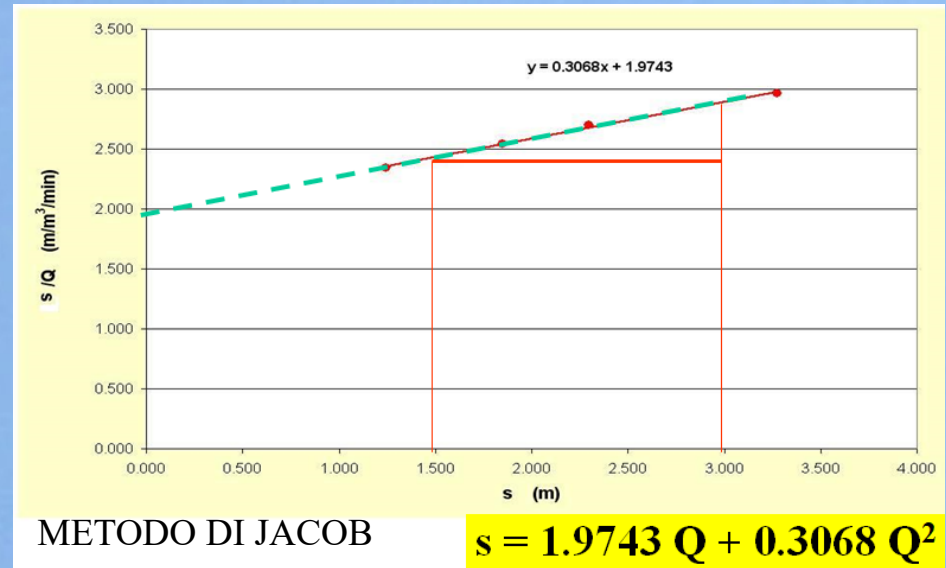
Risolvere l'equazione

$$s = BQ + CQ^n$$

METODO DI JACOB

considera $n = 2$. In questo caso, dividendo entrambi i membri per Q si può risolvere l'equazione in forma grafica.

$$s/Q = B + CQ$$



Metodo di RORABOUGH

considera $n \geq 2$.

$$s/Q = B + CQ^{n-1}$$

$$\ln(s/Q - B) = \ln C + (n-1)\ln Q$$

divide i membri dell'equazione per Q e applica il logaritmo. L'equazione indica che riportando su carta bilogarithmica il valore di Q e di $(s/Q - B)$ si ottiene una retta, avente $(n - 1)$ per coefficiente angolare (pendenza) e $\ln C$ come intercetta sull'ordinata. Il valore di B che permette l'allineamento dei punti va cercato per tentativi, tenendo presente che B è necessariamente maggiore di 0 e minore del più piccolo valore di s/Q . [valori di B maggiori renderebbero negativo il termine $(s/Q - B)$, e quindi priva di significato l'equazione]

Il metodo dei minimi quadrati di Dragoni (1990)

considera $n \geq 2$

Contributo al calcolo ed alla interpretazione dei parametri e della curva caratteristica di un pozzo", Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi; a cura di A. Zavatti, 1990 Pitagora Ed.

Il metodo di Dragoni modificato e applicato in excel: procedura

- Tabellare i dati di prova in m^3/min e m
- Imporre valori arbitrari (stimati) di B, C, n
- Calcolare, usando i valori stimati e i dati di ogni gradino i di prova, il valore di E (equazione 3) per ogni gradino $\Rightarrow E_i$
- Sommare i risultati di E_i per tutti i gradini di prova: questo è il valore da minimizzare
- Associare il valore ad una cella
- Avviare 'dati' > 'risolutore' e impostare come obiettivo la minimizzazione di questa cella, modificando i valori delle celle con B, C e n che erano stati imposti. Con 'risolvi' ottenere un rapporto valori, in cui si hanno B, C e n che rendono minimo il valore di E.

Data:

$$s = BQ + CQ^n \quad (1)$$

siano:

i	numero delle osservazioni
Q	portate emunte
s	livelli dinamici osservati nel pozzo
s'	livelli dinamici calcolati con dei valori di B, C ed n stimati con un metodo qualsiasi

Seguendo il criterio dei minimi quadrati il problema del calcolo «obiettivo» dei parametri della curva caratteristica può essere definito come il calcolo dei valori di B, C ed n per cui la funzione

$$E = \sum_{j=1}^{j=i} (s_j - s'_j)^2 \quad (2)$$

è minima. Per comodità di scrittura sostituiamo il simbolo $\sum_{j=1}^{j=i}$ con Σ . Ricordando la (1), la formula (2) può essere scritta sotto la seguente forma:

$$E = \Sigma (s_j - BQ_j - CQ_j^n)^2 \quad (3)$$

Sviluppando la (3) si ottiene facilmente:

$$E = \Sigma s_j^2 + B^2 \Sigma Q_j^2 + C^2 \Sigma Q_j^{2n} - 2B \Sigma Q_j s_j - 2C \Sigma s_j Q_j^n + 2BC \Sigma Q_j^{n+1} \quad (4)$$

Supponiamo ora di avere eseguito una stima di n con un metodo qualsiasi, ed indichiamo con n' il valore stimato di questo parametro. Derivando la (4) rispetto B e C e considerando che n vale n' si ottiene:

$$\partial E / \partial B = 2B \Sigma Q_j^2 - 2 \Sigma s_j Q_j + 2C \Sigma Q_j^{n'+1} \quad (5)$$

$$\partial E / \partial C = 2C \Sigma Q_j^{2n'} - 2 \Sigma s_j Q_j^{n'} + 2B \Sigma Q_j^{n'+1} \quad (6)$$

Uguagliando a zero la (5) e la (6) si ottiene il seguente sistema:

$$\begin{aligned} B \Sigma Q_j^2 - \Sigma s_j Q_j + C \Sigma Q_j^{n'+1} &= 0 \\ C \Sigma Q_j^{2n'} - \Sigma s_j Q_j^{n'} + B \Sigma Q_j^{n'+1} &= 0 \end{aligned}$$

La soluzione di questo sistema fornisce i valori di B e C che minimizzano la (4) per il valore n' di n fissato a priori. Con alcuni passaggi si ottiene facilmente che:

$$\begin{aligned} C &= \frac{(\Sigma s_j Q_j^{n'}) \Sigma Q_j^2 - (\Sigma s_j Q_j) \Sigma Q_j^{(n'+1)}}{(\Sigma Q_j^{2n'}) \Sigma Q_j^2 - (\Sigma Q_j^{(n'+1)}) \Sigma Q_j^{(n'+1)}} \\ B &= \frac{(\Sigma s_j Q_j - C \Sigma Q_j^{(n'+1)})}{\Sigma Q_j^2} \quad (7) \end{aligned}$$

Sostituendo quindi nella (3) il valore di C e B trovato con la (7) si ottiene il minimo valore della (3) per una qualsiasi stima di n. In definitiva, usando un qualunque algoritmo di calcolo per la ricerca del minimo di una funzione, incorporando in esso la (7), è possibile calcolare il valore di B, C ed n che minimizza la (3). Numerose prove indicano che per valori realistici di n (compresi in pratica fra 0 e 12) esiste generalmente un solo minimo della (3).

Il metodo di Dragoni modificato con excel: procedura di minimizzazione

Gradino	Q	s	$(s-BQ-CQ^n)^2$
1	0.02184	1.18	1.25537631
2	0.02364	1.325	1.588793288
3	0.0318	1.66	2.473938754
4	0.0519	2.32	4.737165255
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
Σ			10.05527361

Parametri Risolutore

Imposta obiettivo: SC\$39

A: ☐ Max ☒ **Min** ☐ Valgre di: 0

Modificando le celle variabili:
SBS43;SC\$43;SD\$43

Soggette ai vincoli:

SC\$43 >= 0.000001
SBS43 >= 0
SD\$43 <= 4
SD\$43 = 2

C non nullo
B
n compreso tra 2 e 4

☐ Rendi non negative le variabili senza vincoli

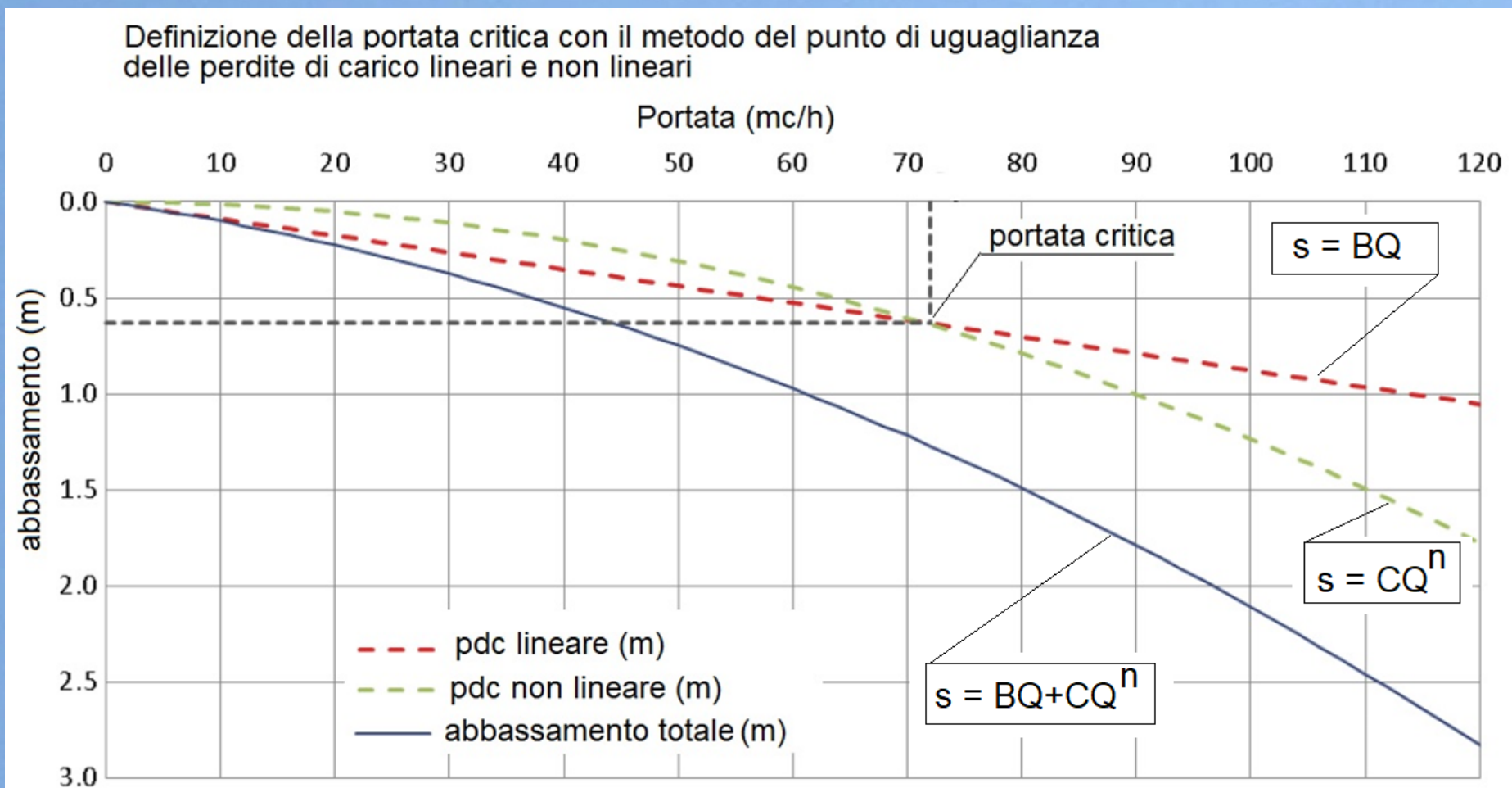
Selezionare un metodo di risoluzione: GRG non lineare

Metodo di risoluzione
 Selezionare il motore GRG non lineare per i problemi lisci non lineari del Risolutore. Selezionare il motore Simplex LP per i problemi lineari e il motore evolutivo per i problemi non lisci.

Risolvi

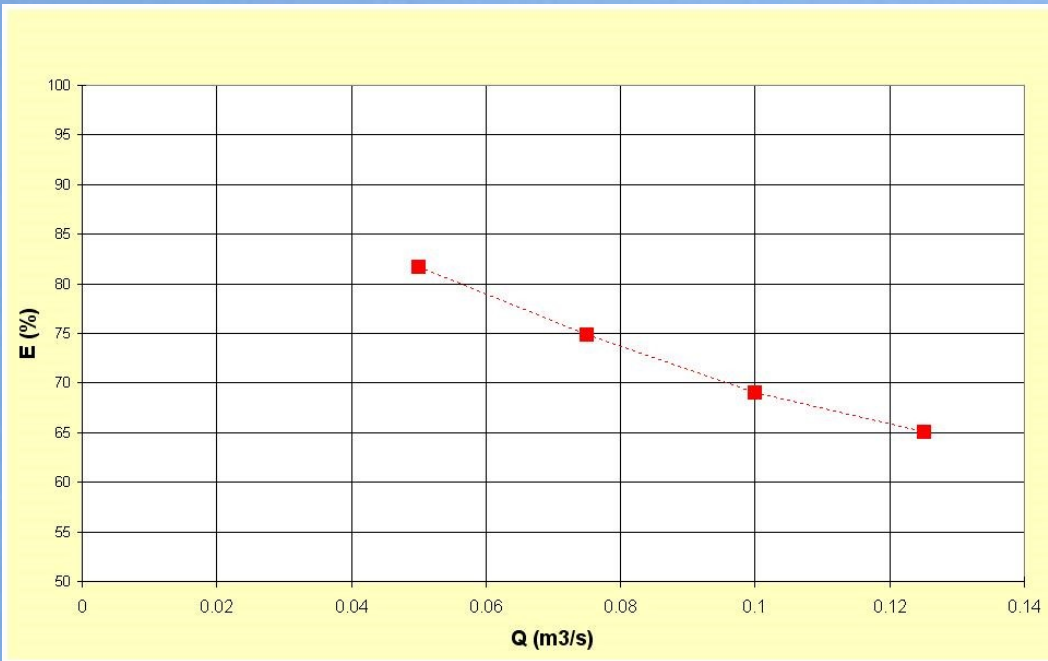
Studio Geologico Associato GeoAlp

Conoscendo B e C possiamo ora determinare la **portata critica del pozzo** con il **metodo del punto di uguaglianza** tra perdite di carico (pdc) lineari e non lineari (BRGM RP-65385-FR). Poiché si considera che nel pozzo una parte delle perdite di carico non dipende linearmente dalla portata, è ragionevole assumere che le migliori condizioni di esercizio del pozzo si trovino nel settore in cui gli abbassamenti non lineari sono minori di quelli lineari. La condizione limite sarà allora $BQ = CQ^n$. Si tracciano le linee corrispondenti agli abbassamenti lineari e non lineari: il punto di intersezione individua la portata critica.



Efficienza del pozzo

L'efficienza idraulica del pozzo è il rapporto tra la portata specifica misurata in condizioni di stabilizzazione e la portata specifica che, nelle stesse condizioni, il pozzo avrebbe fornito se avesse avuto comportamento ideale.



$$E = \frac{BQ}{BQ + CQ^n} 100$$

L'attendibilità di questo metodo di valutazione è stata posta in discussione da vari Autori. Sicuramente non è funzionale per pozzi in roccia fratturata/incarsita, in cui frequentemente si instaura un flusso turbolento.

Criterio di Walton per la valutazione dell'efficienza del pozzo

(da Custodio)

Portata in m³/s

portata in m³/min

VALORI DI C		VALUTAZIONE
(s²/m⁵)	(min²/m⁵)	
C < 1 900	C < 0.5	buon pozzo, ben sviluppato
1 900 < C < 3 800	0.5 < C < 10.5	pozzo mediocre, inizio di incrostazione
38 000 < C < 150 000	10.5 < C < 41.5	incrostazioni o intasamenti importanti
C > 150 000	C > 41.5	pozzo irrecuperabile

Efficienza del pozzo

Gorla, 2010

Il criterio di valutazione dell'efficienza del pozzo denominato metodo dell' indice di turbolenza (Turbulence Index Method - T.I.M.) si basa sul calcolo di un indice di turbolenza TI, che è calcolato mediante l'equazione

$$TI(\%) = 100 \times (C \times Q^n) / s$$

dove:

C è espresso in s^2/m^5

n è l' esponente adimensionale delle perdite di carico in regime turbolento;

Q è espressa in m^3/s .

Valutazione dello stato di un pozzo in base al Turbulence Index Method.

Valori di TI (%)	Valutazione dello stato del pozzo
T.I.< 10%	Perdite per flusso turbolento fortemente ridotte, pozzo molto efficiente.
11% < T.I. < 20%	Perdite per flusso turbolento limitate, pozzo efficiente.
21% < T.I.< 30%	Perdite per flusso turbolento apprezzabili, pozzo discretamente efficiente.
31 % < T.I.< 50%	Perdite per flusso turbolento sensibilmente elevate, pozzo ai limiti dell'efficienza: possibile necessità di rispurgare il pozzo per tentare di abbassare il T.I.
51 % < T.I. < 65%	Perdite di carico per turbolenza notevoli, pozzo inefficiente: si rendono necessarie indagini ad hoc per stabilire le cause.
66% < T.I.< 80%	Perdite per flusso turbolento non accettabili: pozzo difficilmente recuperabile.
T.I. > 81%	Pozzo mal completato e sviluppato: non recuperabile con gli usuali metodi di sviluppo.

Conoscere la geologia è importante per interpretare correttamente le prove.

In questo esempio si ha in fase iniziale una curva piuttosto pronunciata che poi diviene rettilinea. L'acquifero è semiconfinato e con piccole portate prevale il contributo della copertura porosa, poi diventa prevalente il contributo dell'acquifero carbonatico in pressione.

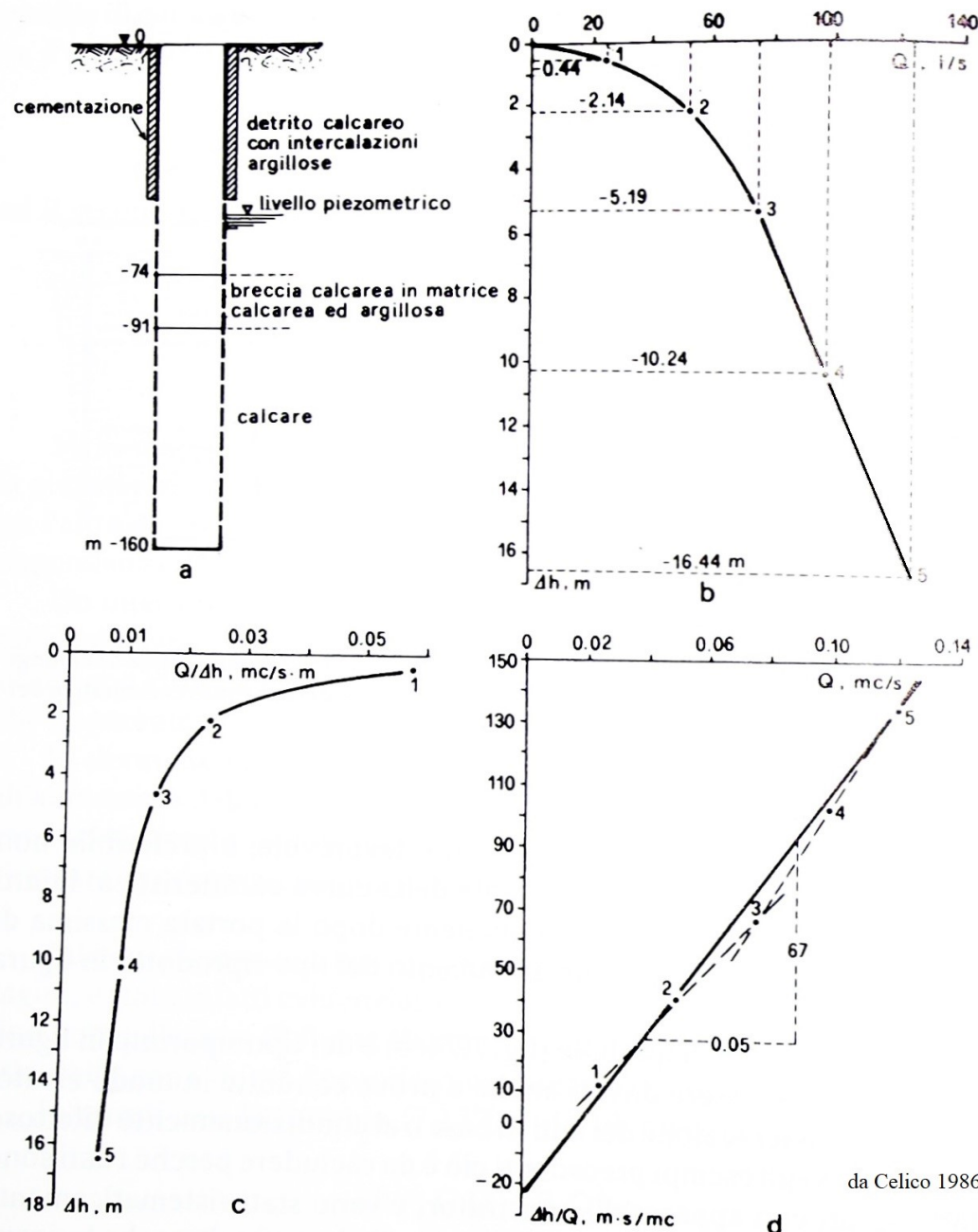


Figura 7.75 – Stratigrafie e diagrammi di interpretazione della prova di emungimento eseguita in un pozzo ubicato nella valle del fiume Tirino (Abruzzo). da Celico

Conoscere la geologia è importante per interpretare correttamente le prove.

In questo caso abbiamo una curva del pozzo concava verso l'alto. Prova errata e dati da cestinare? No. Viene spiegata con afflussi idrici crescenti provenienti dalla faglia, che attraversa un vicino fiume in una zona di acquifero carbonatico subaffiorante, che la ricarica.

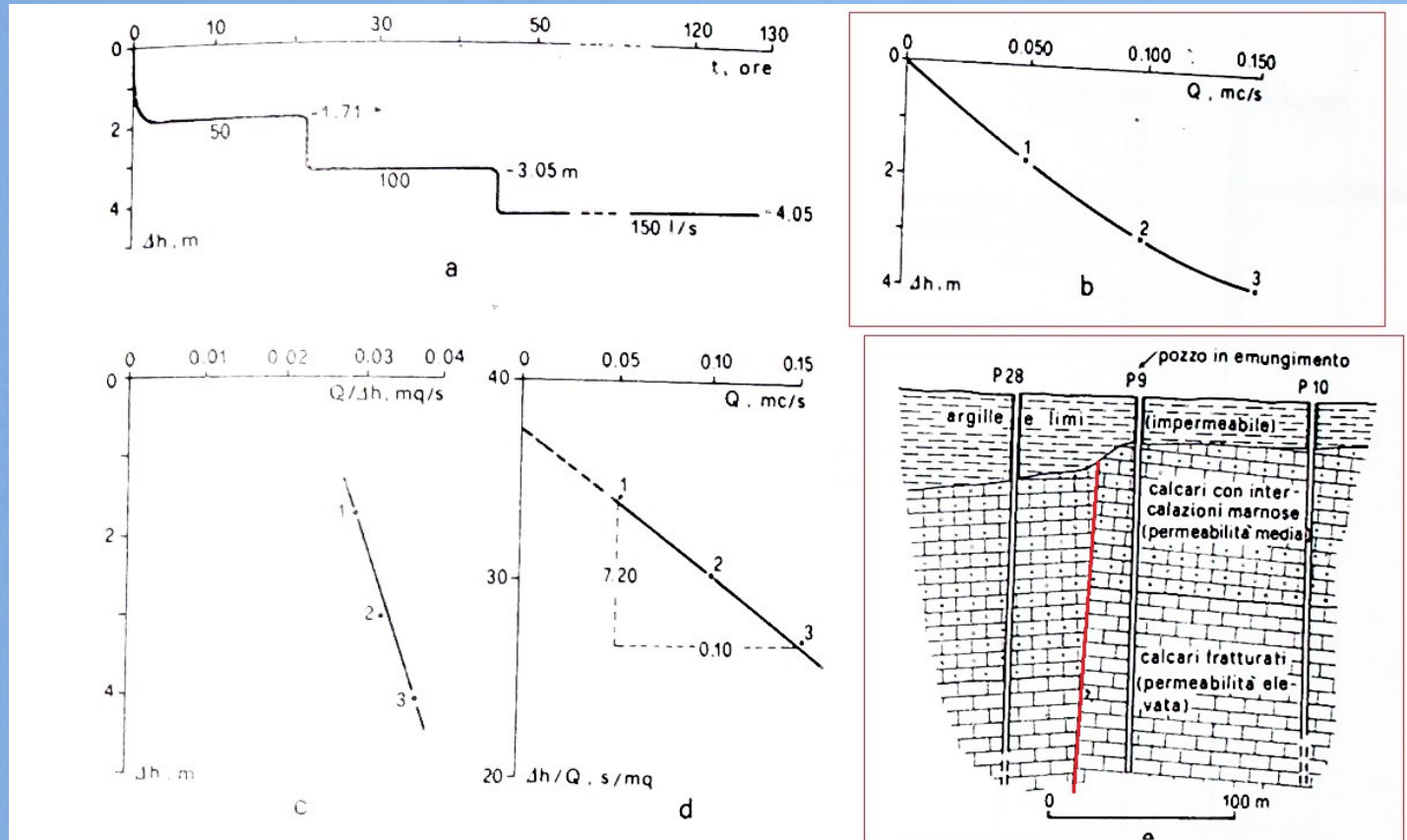


Figura 7.74 – Sezione geologica e diagrammi di interpretazione della prova di emungimento eseguita in un pozzo attestato nella falda confinata del substrato carbonatico della piana di Cassino (Lazio) (da Celico, 1984).

Un parametro utile: la portata specifica $Q/s = Q_{sp}$ portata del pozzo per metro di abbassamento [$L^3/t \times 1/L = L^2/t$]. Notare che ha le stesse unità di misura della trasmissività T .

Il valore di Q_{sp} dipende da:

- caratteristiche dell'acquifero: trasmissività, coefficiente di immagazzinamento, tipo di acquifero (libero semiconfinato, in pressione, fratturato, con limiti, ecc.)
- caratteristiche del pozzo: raggio, grado di penetrazione, perdite di carico

Si può correlare Q_{sp} alla trasmissività T con metodi analitici o con metodi empirici.

Metodi analitici: partendo dall'equazione di Dupuit per il regime stazionario o da quella di Theis per il regime transitorio, per iterazioni a partire da un'ipotesi iniziale sui valori del raggio di influenza o della trasmissività, si giunge ad un valore di T . Hanno minore utilità perché si basano su assunzioni non realistiche sull'acquifero e sull'idraulica del pozzo e per scarse info sull'acquifero. Esistono anche software di scopo. **Tguess (excel)**

Per approfondire:

Mace R.E. (2001) - Estimating Transmissivity Using Specific-Capacity Data. Bureau of Economic Geology. The University of Texas at Austin.

Bradbury & Rothschild (1985). A computerized technique for estimating the hydraulic conductivity of aquifers from specific capacity data. Ground Water 23, no. 2

Mclin S.G (2005) -Estimating Aquifer Transmissivity from Specific Capacity Using MATLAB. Ground Water 43, no. 4.

Metodi empirici: derivano da una correlazione statisticamente significativa, in aree idrogeologicamente omogenee, tra Q_{sp} e T (da risultati di prove di acquifero).

Logan J., 1964 ha espresso una relazione empirica tra portata specifica di un pozzo (filtrante tutto l'acquifero) e la sua trasmissività T , che per acquiferi porosi, è data da: $T = c Q_{sp}$ (m^2/day)
ove $c = 1.0$ per acquiferi liberi e $c = 1.2$ per acquiferi confinati e semiconfinati.

Mace (1997) ha proposto una formula empirica simile alla precedente anche per gli acquiferi carsici:

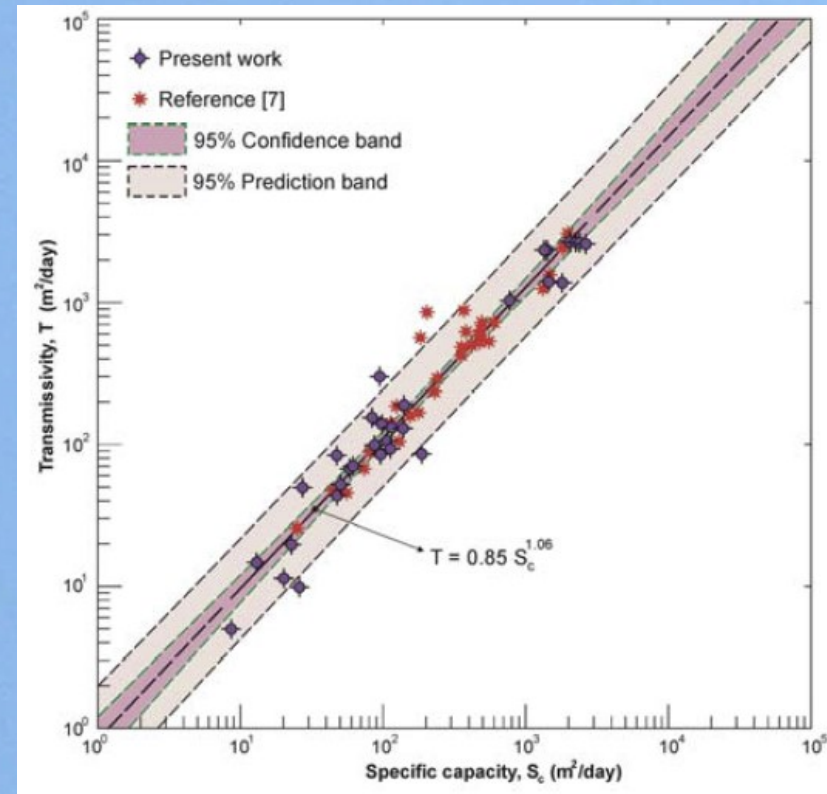
$$T = \alpha Q_{sp}^\beta = 0.76 Q_{sp}^{1.08} \quad (m^2/day)$$

Valigi et al. (2021) applicandola alle rocce carbonatiche italiane hanno proposto la seguente formulazione:

$$T = \alpha Q_{sp} = 0.85 Q_{sp}^{1.06} \quad (m^2/day)$$

Logan J. (1964) Estimating transmissibility from routine production tests of waterwells. Groundwater

Valigi D. et al. (2021) Transmissivity estimates by specific capacity data of some fractured italian carbonate aquifers. Water, 2021, 13, 1374.



Metodi empirici: derivano da una correlazione statisticamente significativa, in aree idrogeologicamente omogenee, tra Q_{sp} e T (da risultati di prove di acquifero).

Table 1. Summary of empirical relationships between specific capacity and transmissivity.

Author	Setting	10^{b_0}	b_1	R^2	n	Applicable range ($m^2 d^{-1}$)
a. Eagon and Johe (1972)	Fractured carbonate	3.24	0.81	0.8		10–2,000
b. Razack and Huntley (1991)	Heterogeneous alluvium	15.3	0.67	0.63	215	8.5–1,100
c. Huntley and others (1992)	Fractured hard rock	0.12	1.18	0.89		16–16,000
d. El-Naqa (1994)	Fractured carbonate	1.81	0.917	0.95	237	3–20,000
e. Mace (1997)	Fractured/karstic carbonate	0.76	1.08	0.89	71	1–100,000
f. Mace (1997)	Fractured/karstic carbonate	1.23	1.05	0.8	14	100–100,000
g. Fabbri (1997)	Fractured carbonate	0.785	1.07	0.95	45	6–1,100
h. This circular	Sandstone	2.75	0.82	0.55	147	5–300
i. This circular	Sandstone	3.16	0.79	0.57	28	10–125
j. This circular	Sandstone	1.51	0.91	0.45	33	4–200
k. This circular	Fractured carbonate	0.78	0.98	0.82	46	0.3–600
l. This circular	Sandstone	1.07	1.01	0.75	21	0.3–300
m. Mace and others (1999)	Sandstone	1.03	1.08	0.91	214	0.1–1,000

Notes: $T = (10^{b_0})S_c^{b_1}$

Parameters b_0 and b_1 were fitted with units of $m^2 d^{-1}$ for T and S_c .

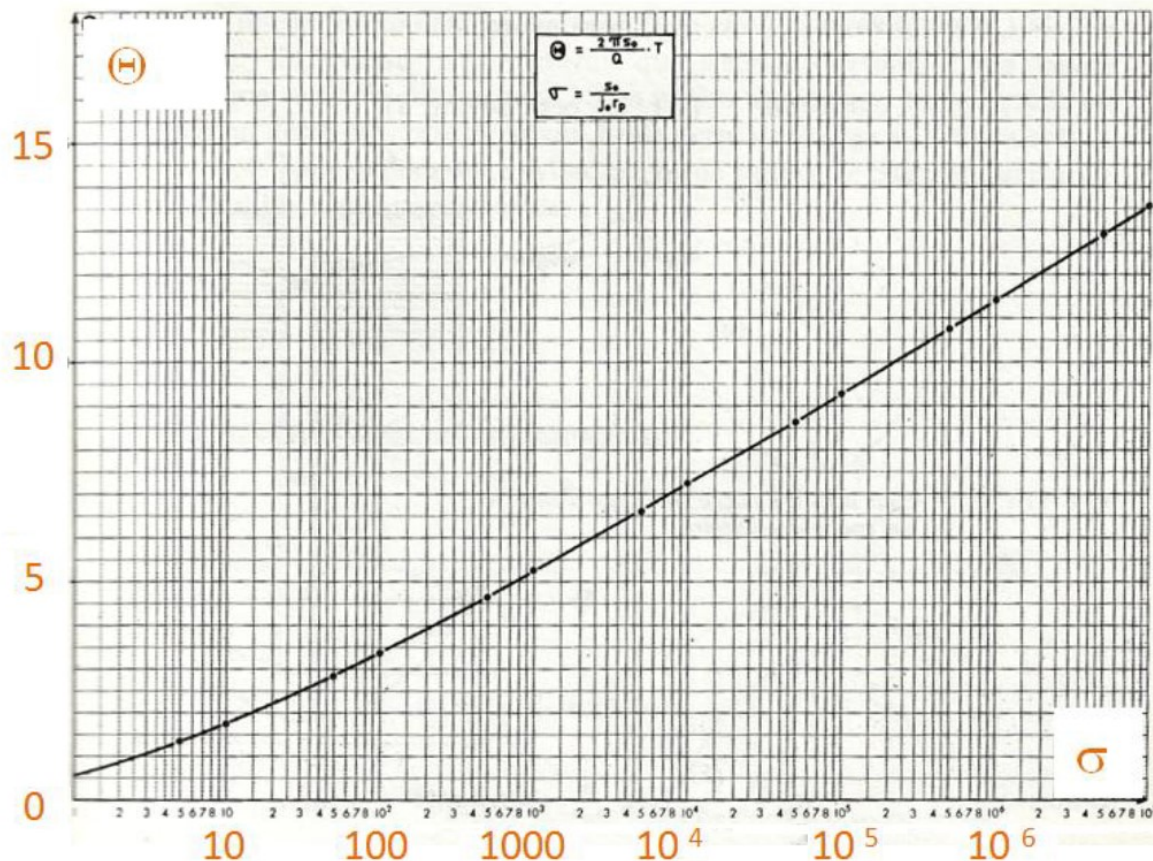
The Eagon and Johe (1972) relationship was corrected for well loss.

The Eagon and Johe (1972) relationship was determined by Mace (1997) by digitizing the points from the plot presented in their article.

Metodo di Cassan. Utilizzato spesso in alcune regioni. Sviluppato per acquifero con pendenza, stima approssimativa, con limiti di validità.

(vedere nel web: Un contributo al miglioramento del metodo di Cassan per la determinazione della trasmissività degli acquiferi in pressione. A cura di V. Francani e C. Rampolla)

grafico di Cassan (1980) per la determinazione della trasmissività



in ordinata il parametro θ

$$\theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot s_0}{Q} T$$

e in ascissa il parametro σ

$$\sigma = \frac{s_0}{i_0 \cdot r_p}$$

dove:

Q = portata emunta

s_0 = abbassamento nel pozzo

T = trasmissività

i_0 = gradiente naturale della falda

r_p = raggio del pozzo

calcolando σ si può trovare il valore di θ utilizzando il diagramma semilogaritmico, e quindi calcolare il valore della trasmissività T .

La prova di acquifero (a lunga durata)

Serve a determinare i parametri fondamentali dell'acquifero.

Si effettua misurando in uno o più piezometri a distanze e posizioni opportune dal pozzo in pompaggio, l'andamento dell'abbassamento s del livello di falda

$$(s_1 = h_{t0} - h_{t1}; s_2 = h_{t0} - h_{t2}; \dots s_n = h_{t0} - h_{tn})$$

in corrispondenza a una portata di emungimento Q che resta costante.

Durata: 8-72 ore a seconda del regime di flusso, della presenza di limiti di ricarica o impermeabili, e anche delle [finalità di esercizio](#).

Verifica delle condizioni al contorno come descritto all'inizio.

Durando la prova 2-3 gg la compensazione delle variazioni barometriche è ancora più importante.

Cosa si determina?

Trasmissività **T**

è una misura della quantità d'acqua che può essere trasmessa orizzontalmente attraverso una larghezza unitaria lungo l'intero spessore saturo dell'acquifero sotto un gradiente idraulico pari a 1.

$$T = KD \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

è il prodotto della conduttività idraulica **K** per lo spessore saturo **D** dell'acquifero

Conduttività idraulica **K**

è una misura della quantità d'acqua che può essere trasmessa orizzontalmente attraverso una larghezza unitaria lungo l'intero spessore saturo dell'acquifero sotto un gradiente idraulico pari a 1. (m/s)

Coefficiente di immagazzinamento **S** (adimensionale)

“storage coefficient” o “storativity”

è il volume d'acqua che una unità permeabile può assorbire o cedere dai vuoti saturi (storage) da una superficie unitaria per variazione unitaria del carico idraulico

il Coefficiente di immagazzinamento S (storativity) è dato da 2 componenti:

1. fluido estratto per gravità dai pori
2. acqua rilasciata dalla compressibilità dell'acquifero

Per gli **acquiferi confinati**, non c'è drenaggio dei pori, così tutta l'acqua proviene dalla componente compressibilità

$$S = S_s b$$

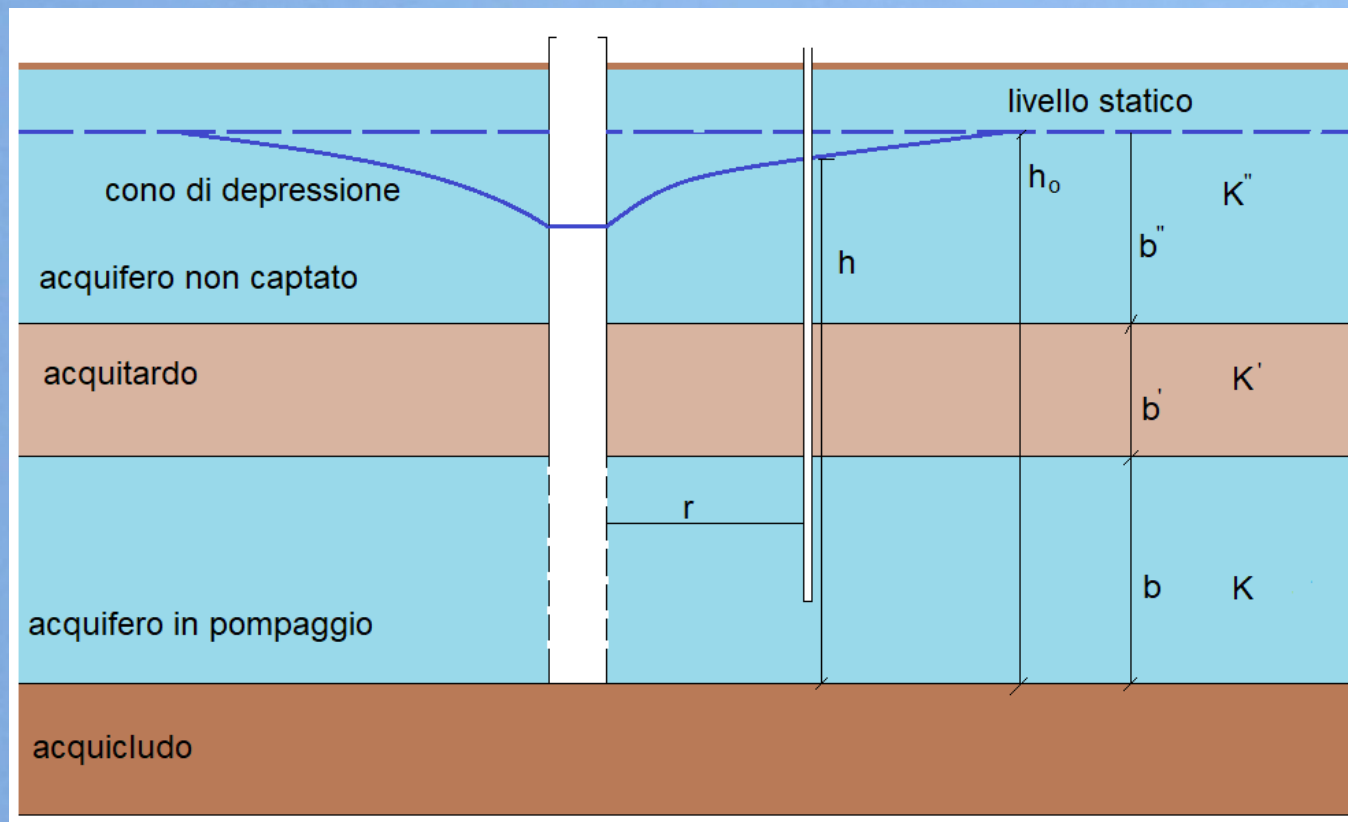
$S_s =$ immagazzinamento specifico (1/L) (specific storage)
 $b =$ spessore saturo (L)
 $S < 0.005$

Per gli **acquiferi liberi**, la maggior parte dell'acqua viene dal drenaggio dei pori, ed il contributo dalla compressibilità è molto piccolo in confronto.

$$S = S_y + S_s b$$

$S_y =$ potenzialità specifica (adimensionale) $\sim n_e$ (specific yield)
 $b =$ spessore saturo (L)
 $S_s =$ immagazzinamento specifico (1/L) (specific storage)

di solito, $S_y \gg S_s b$ e $S \sim S_y$ **S: da 0.02 a 0.30**



Per gli **acquiferi semiconfinati**, in una prima fase del pompaggio l'acqua proviene dalla falda in pressione e si ha il contributo di S_s ; nei tempi più lunghi si attiva la ricarica dalla falda libera, passando attraverso l'acquitardo, e si ha il contributo di S_y .

Caso con una certa complessità teorica e diverse ipotesi alla base delle soluzioni analitiche delle prove di pompaggio. Hantush (1960) Neuman & Witherspoon (1969).

- vale la legge di Darcy
- la portata di pompaggio è costante
- l'acquifero ha una estensione areale indefinita
- l'acquifero è omogeneo, isotropo e ha spessore uniforme per tutta l'area interessata dalla prova
- la superficie piezometrica prima del pompaggio è orizzontale o quasi sull'estensione dell'area delle misure
- il pozzo penetra l'intero spessore dell'acquifero e quindi riceve acqua per flusso orizzontale

In regime transitorio inoltre:

- il diametro del pozzo è piccolo;
- l'acqua emunta dallo storage è scaricata istantaneamente con l'abbassamento del carico idraulico.

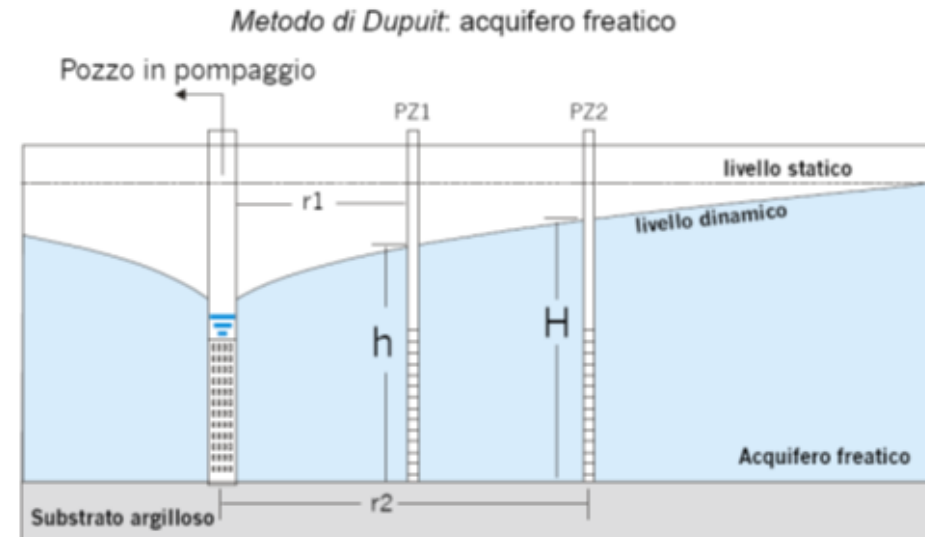
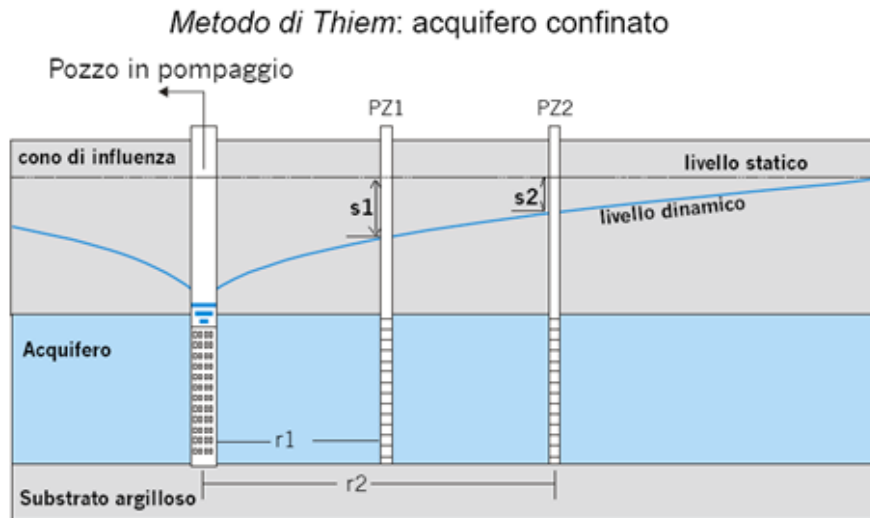
Gli assunti di base variano con le metodologie di interpretazione: studiarle con attenzione sempre prima di procedere all'interpretazione.

Regime permanente (o flusso stazionario)

Dupuit Thiem

Le variazioni avvengono nello spazio e non nel tempo. Ammette che l'alimentazione compensi esattamente l'emungimento e che a una certa distanza la depressione si annulla. Assume che l'acquifero sia incompressibile.

Soluzione in regime permanente



Conoscendo la portata costante, estratta durante la prova, le distanze dei piezometri dal pozzo e gli abbassamenti misurati,

$$T = \frac{Q}{2\pi (s_1 - s_2)} \ln r_2/r_1$$

$$Q = \pi K \frac{H^2 - h^2}{\ln r_2/r_1} \quad K = \frac{Q}{\pi (H^2 - h^2)} \ln r_2/r_1$$

Espressioni molto usate perchè molto semplici.

Ma il flusso stazionario è una condizione ipotetica, ed è una approssimazione rispetto al flusso transitorio.

Metodo di THEIS – acquiferi confinati - regime transitorio

1/2

Theis* nel 1935 e poi nel 1938 introduce per primo il tempo t e il coefficiente di immagazzinamento S nelle interpretazioni delle prove di pompaggio.

La sua equazione deriva dall'analogia fra il flusso dell'acqua sotterranea e la conduzione di calore:

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} \int_u^{\infty} \frac{e^{-y} dy}{y} = \frac{Q}{4\pi KD} W(u)$$

Q = portata emunta costante

(m³/d)

$KD = T$ = trasmissività dell'acquifero

(m²/d)

$u = r^2 S / (4KD t)$

adim.

s = abbassamento di falda $h_0 - h_1$

(m)

S = immagazzinamento (storativity) dell'acquifero

adim.

t = tempo da inizio pompaggio

(d)

$W(u) = -0.5772 - \ln u + u + u^2/2 \times 2! + u^3/3 \times 3! + u^4/4 \times 4! + \dots$

adim

$W(u)$ = funzione u di pozzo o funzione u di Theis. Tabulata in funzione di u .

* Theis Charles Vernon (1900 – 1987). Diploma nel 1922 in ingegneria civile, Ph.D. nel 1929 in geologia.
Dal 1930 lavorò in USGS.

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W(u)$$

KD , S incognite e l'integrale esponenziale rendono impossibile esplicitare l'equazione

Theis ha sviluppato un metodo di sovrapposizione di curve (curve fitting) per risolvere l'equazione

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W(u)$$

può essere scritta come

$$\log s = \log(Q/4\pi KD) + \log(W(u))$$

$$u = \frac{r^2 S}{4KDt}$$

può essere scritta come

$$\log(r^2/t) = \log(4KD/S) + \log(u)$$

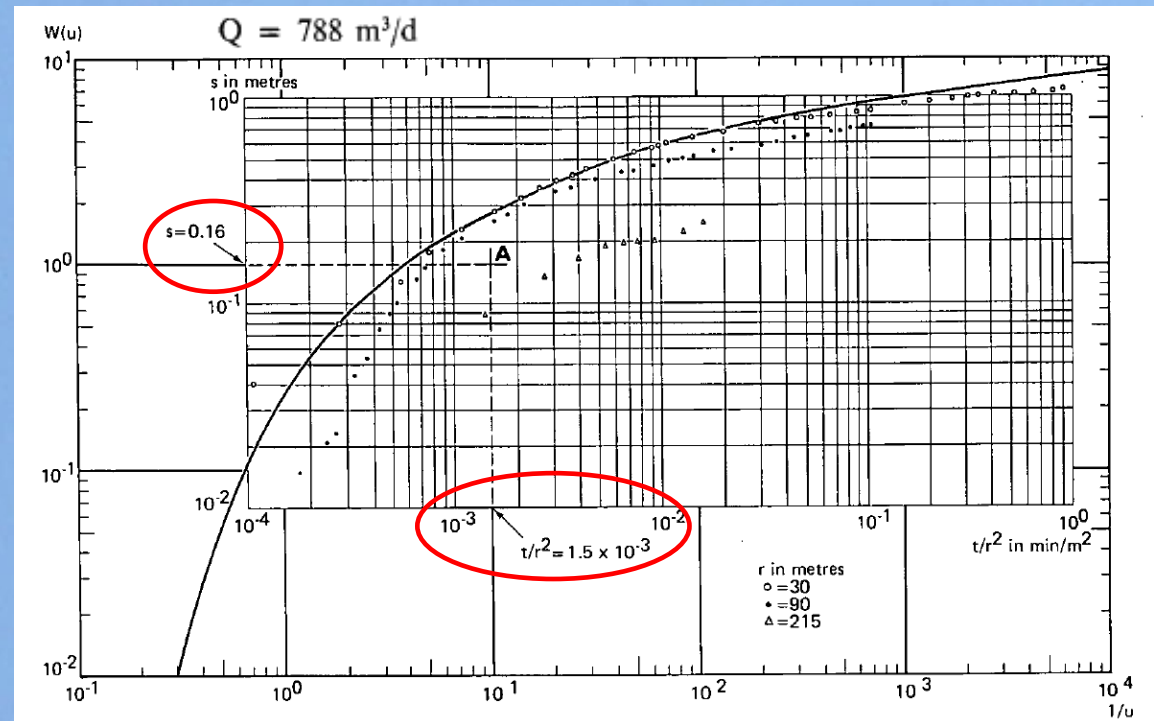
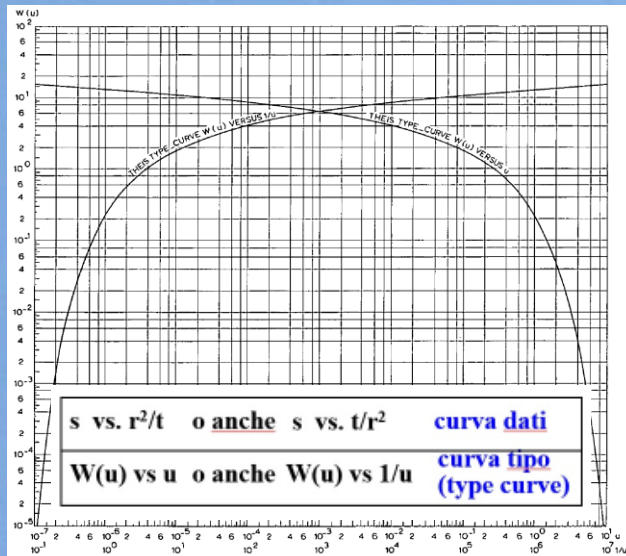
La presenza delle costanti ci dice che la relazione tra $\log s$ e $\log r^2/t$ deve essere equivalente alla relazione tra $\log W(u)$ e $\log u$. Le costanti riquadrate equivalgono ad una traslazione rigida lungo i rispettivi assi cartesiani

Il metodo di sovrapposizione di curve di Theis si basa sul fatto che se sullo stesso diagramma log-log si plotta s contro r^2/t e si plotta $W(u)$ contro u , si ottengono due curve che hanno la stessa forma, ma che sono sfasate orizzontalmente e verticalmente dalle costanti $Q/4\pi KD$ e $4KD/s$

Le due curve vanno sovrapposte e combaciate. Le coordinate di un punto di sovrapposizione arbitrario sono i valori correlati delle relazioni fra s , r/t^2 , $W(u)$ e u , che possono essere usati per calcolare i valori di s e di KD .

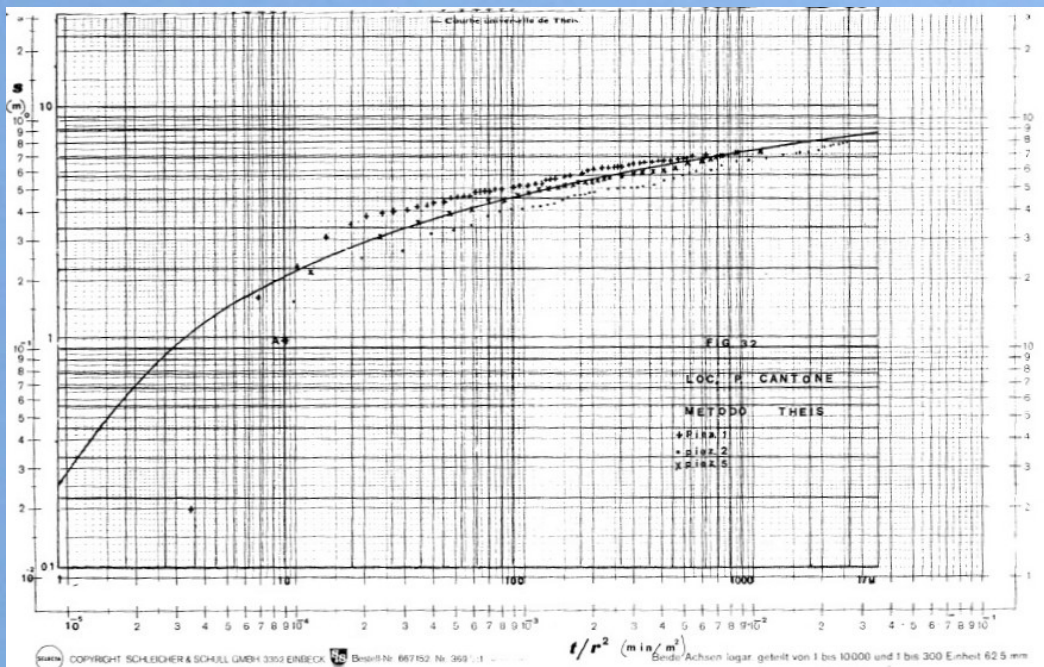
Annex 3.1 Values of the Theis well function $W(u)$ for confined aquifers (after Walton 1962)

		$1/u =$	n	$n(1)$	$n(2)$	$n(3)$	$n(4)$	$n(5)$
n	N	$u =$	N	$N(-1)$	$N(-2)$	$N(-3)$	$N(-4)$	$N(-5)$
1.000	1.0	$W(u) =$	2.194(-1)	1.823	4.038	6.332	8.633	1.094(1)
0.833	1.2		1.584(-1)	1.660	3.858	6.149	8.451	1.075(1)
0.666	1.5		1.000(-1)	1.465	3.637	5.927	8.228	1.053(1)
0.500	2.0		4.890(-2)	1.223	3.355	5.639	7.940	1.024(1)
0.400	2.5		2.491(-2)	1.044	3.137	5.417	7.717	1.002(1)
0.333	3.0		1.305(-2)	9.057(-1)	2.959	5.235	7.535	9.837
0.286	3.5		6.970(-3)	7.942(-1)	2.810	5.081	7.381	9.683
0.250	4.0		3.779(-3)	7.024(-1)	2.681	4.948	7.247	9.550
0.222	4.5		2.073(-3)	6.253(-1)	2.568	4.831	7.130	9.432
0.200	5.0		1.148(-3)	5.598(-1)	2.468	4.726	7.024	9.326
0.166	6.0		3.601(-4)	4.544(-1)	2.295	4.545	6.842	9.144
0.142	7.0		1.155(-4)	3.738(-1)	2.151	4.392	6.688	8.990
0.125	8.0		3.767(-5)	3.106(-1)	2.027	4.259	6.555	8.856
0.111	9.0		1.245(-5)	2.602(-1)	1.919	4.142	6.437	8.739



$$KD = \frac{Q}{4\pi S_A} W(u) = \frac{788}{4 \times 3.14 \times 0.16} \times 1 = 392 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$S = \frac{4KD(t/r^2)_A}{1/u} = 4 \times 392 \times \frac{1.5 \times 10^{-3}}{1440} \times \frac{1}{10} = 1.6 \times 10^{-4}$$



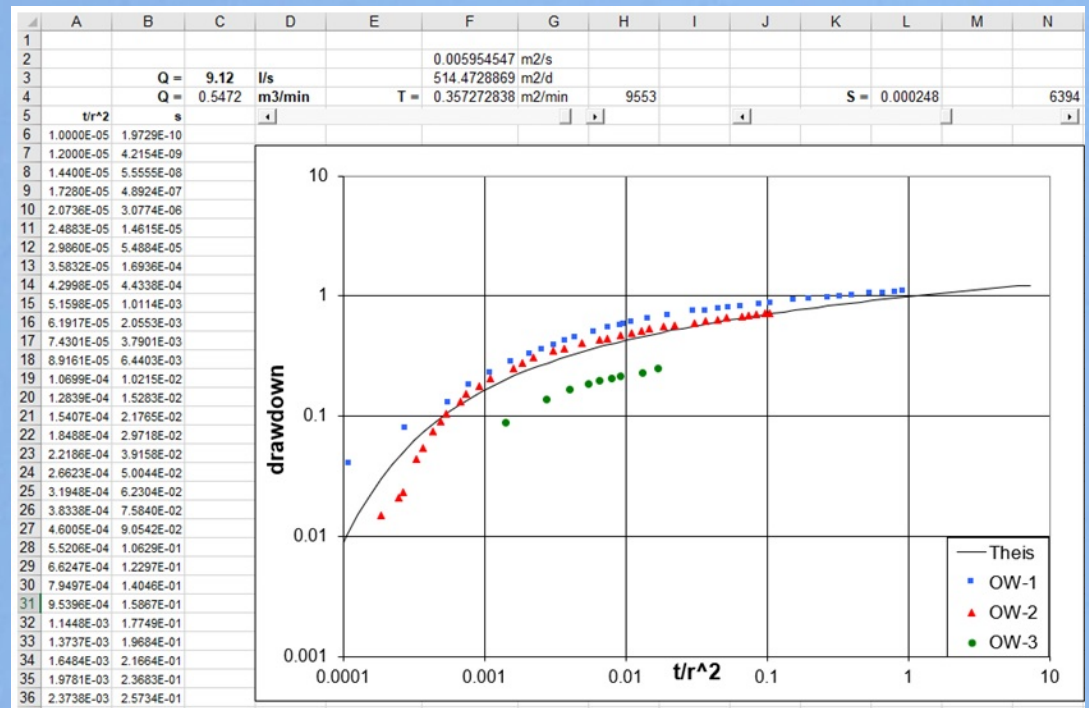
Qui la curva di Theis è plottata come $W(u)$ vs. $1/u$, e i dati di campagna sono plottati come vs. t/r^2 .

Se si confronta la curva $W(u)$ vs. $1/u$, analizzando i dati di un singolo piezometro, come in molti software commerciali, allora i dati di misura sono plottati come s vs. t .

(Kruseman- De Ridder, 2nd ed. pag. 64)

Esempio: Theis-GFB.xls

Nell'antichità si interpretavano le prove sovrapponendo dei trasparenti con le curve tipo ai dati di campo riportati in costosa carta millimetrata logaritmica, oggi si usano software dedicati, e anche solo fogli excel per casi semplici. $W(u)$ può essere calcolato da un semplice modulo Visual Basic.

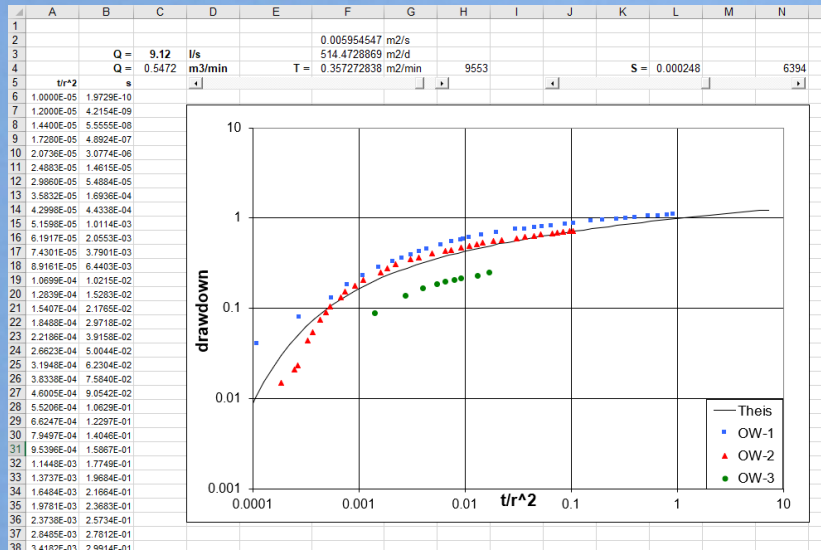


la curva interattiva di Theis in excel

8. Using Excel for Aquifer Test Analysis

8.1 Introduction

8.2 Creating a Scroll Bar in an Excel Worksheet



modulo VBA per $W(u)$

Utile anche in altri contesti in cui è richiesto il calcolo di $W(u)$. In excel si digita come formula:

= expint1(cella)

https://cdn.serc.carleton.edu/files/NAGTWorkshops/hydrogeo/activities/Excel_Aquifer_Test.pdf

8.3 Creating an Interactive Theis Type Curve

We now create a Theis type curve that can be controlled by the transmissivity and storage coefficient scroll bars. First, we use Visual Basic to create a user-defined function to evaluate the exponential integral $E_1(u)$, using the formulas given by (3.15) and (3.16). Before we create the function, we first save the workbook as notes09_Theis.xls. The steps for creating the user-defined function are as follows.

1. Clicking the "Tools" menu, then select "Macro", and then select "Visual Basic Editor". The Microsoft Visual Basic editor window appears. We will now work in this window (which contains several sub windows).
2. On the left is the "Project" sub window. This contains a "project tree" with main headings and subheadings. Select "VBAProject (notes09_Theis.xls)".
3. Click the "Insert" menu and select "Module". A new sub window opens up. The title of this sub window is "notes09_Theis.xls - Module1 (Code)". Note that back in the Project sub window, an extra item call "Modules" is added under the project "VBAProject (notes09_Theis.xls)".
4. Copy the following code into the module sub window.

```
Public Function expint1(u As Double)
' Computes the exponential integral E1(u)
' Make sure u is not negative
If u < 0 Then
    expint1 = "#NUM!"
ElseIf u <= 1 Then
    expint1 = -0.57721566 + 0.99999193 * u
    - 0.24991055 * u ^ 2 + 0.05519968 * u ^ 3
    - 0.00976004 * u ^ 4 + 0.00107857 * u ^ 5 - Log(u)
Else
    expint1 = Exp(-u) * (u ^ 4 + 8.5773287401 * u ^ 3
    + 18.059016973 * u ^ 2 + 8.6347608925 * u + 0.2677737343) _
    / (u ^ 4 + 9.5733223454 * u ^ 3 + 25.6329561486 * u ^ 2
    + 21.0996530827 * u + 3.9584969228) / u
End If
If expint1 < 1E-100 Then
' We avoid returning 0 to prevent triggering
' an error message if we plot with log-log axes.
    expint1 = 1E-100
End If
End Function
```

Note that the exponential function is called expint1 instead of E1 because we don't want to fool Excel into thinking that we are referring to a cell. Also note that the underscore character (_) is the line continuation symbol in Visual Basic. A line that begins with a single quote is a comment line.

7. Click the "File" menu and select "Save notes09_Theis.xls". This saves the macro with the workbook.

La curva di Theis è la curva tipo più semplice, basata sulle assunzioni teoriche di Theis per acquiferi confinati. Nella realtà idrogeologica le condizioni non sono ideali e nel corso degli anni molti Autori hanno sviluppato e continuano a sviluppare modelli teorici e curve tipo per affrontare le diverse situazioni:

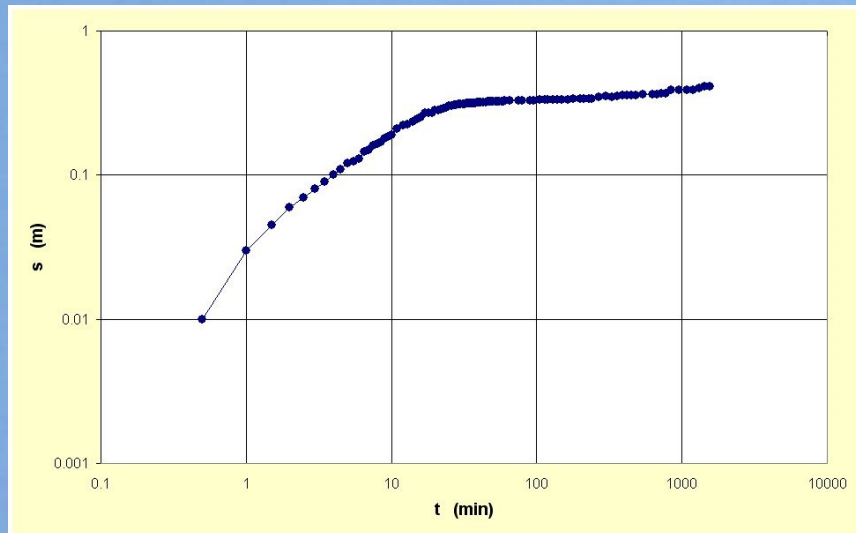
- acquifero libero con drenaggio ritardato *
- acquifero semiconfinato
- acquifero con limiti
- acquifero multistrato
- falda inclinata
- correzione della penetrazione parziale del pozzo
- correzione dell'effetto capacitivo del pozzo (grande diametro)
- ecc.

Normalmente nei software commerciali l'Help in linea contiene i riferimenti e le ipotesi alla base di ogni metodo. E' opportuno conoscerle sempre.

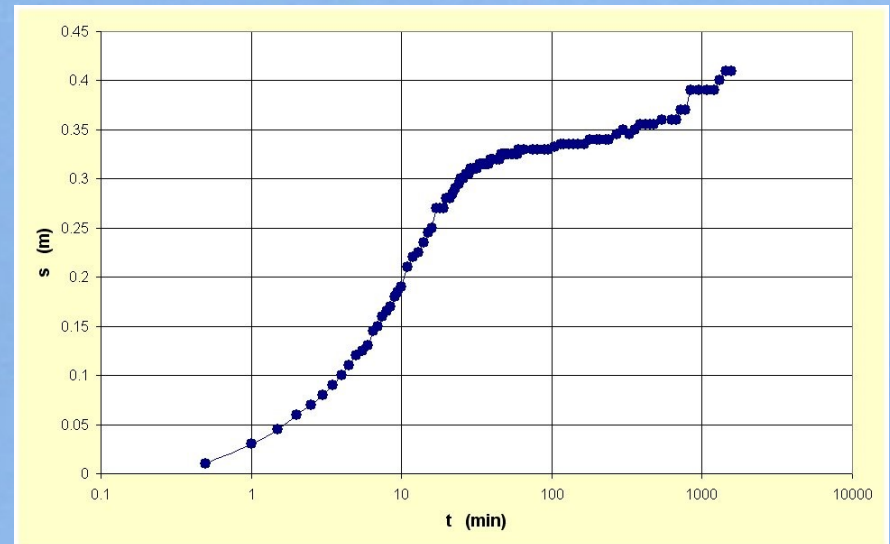
Per le relative basi teoriche rinvio ai testi consigliati all'inizio.

Come procedura per l'interpretazione si inizia riportando i dati di prova in diagrammi abbassamento tempo semilogaritmici e bilogaritmici, che vengono poi confrontati in base alla forma con curve tipo derivanti dalla soluzione analitica delle equazioni di flusso.

Il confronto aiuta a scegliere il modello di acquifero più appropriato sul quale effettuare il best fit con i dati di campagna.



bilogaritmica

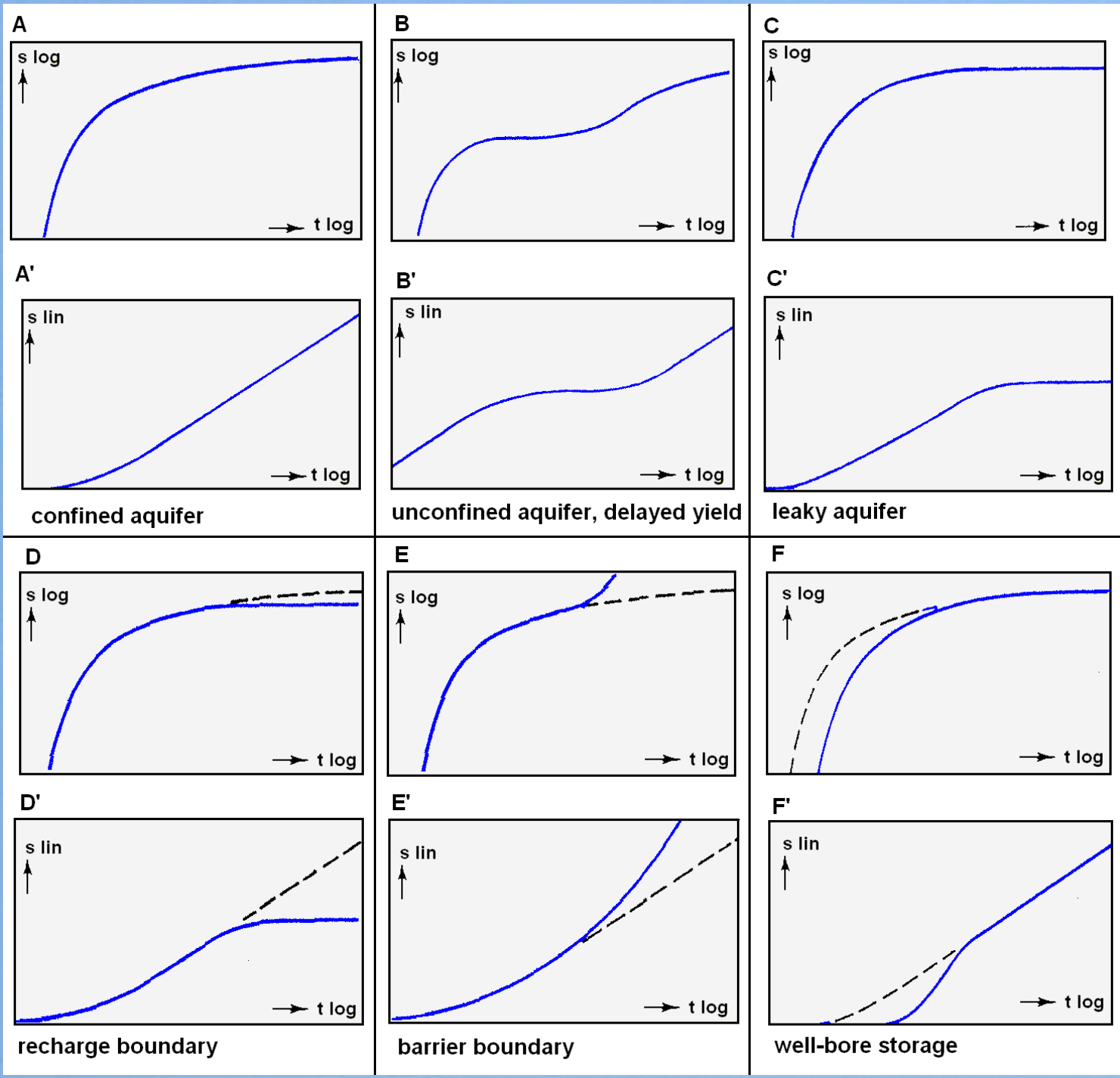


semilogaritmica

Le curve tipo
(o caratteristiche)
hanno valore
diagnostico delle
tipologie di
acquifero.

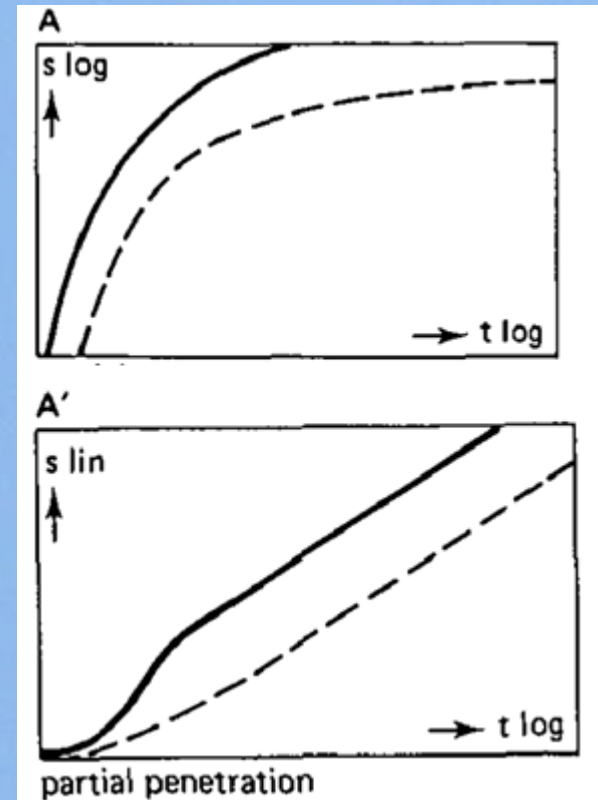
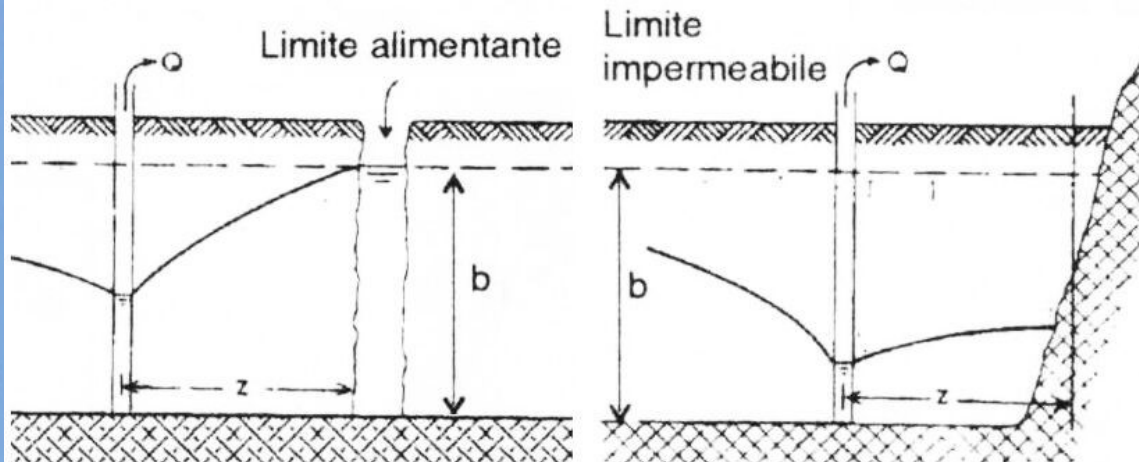
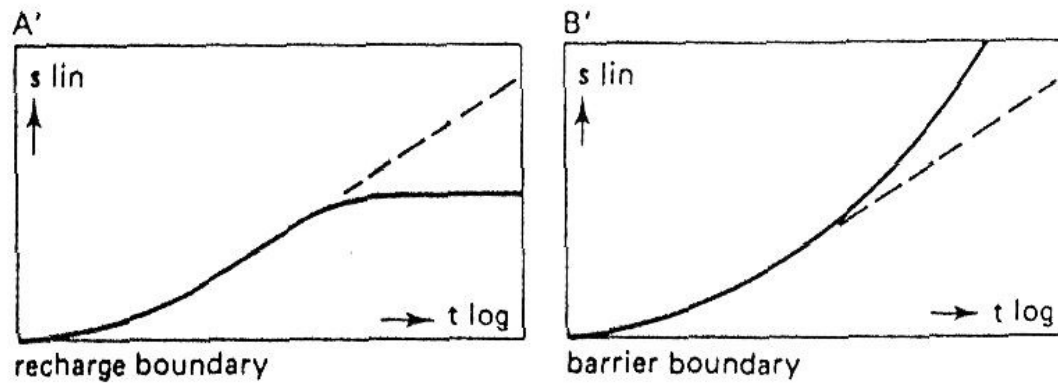
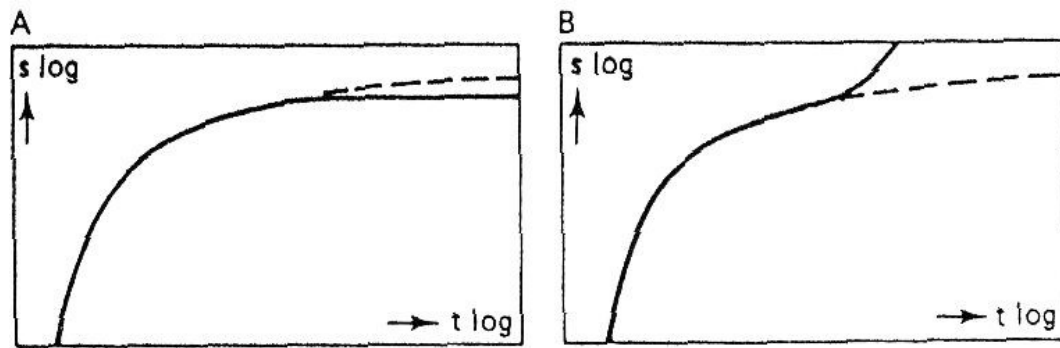
Acquiferi porosi

Se la prova ha
durata troppo
corta le
indicazioni
possono essere
ingannevoli.



Deviazioni dall'andamento teorico delle curve tipo rivelano la presenza di limiti di alimentazione dell'acquifero.

Acquiferi porosi



Scelto il modello si applica la sovrapposizione dei dati con il/i metodo/i più adatto/i

CONDIZIONE TEORICA	CONDIZIONE REALE
Raggio di pozzo infinitesimo	Raggio finito
Volume di pozzo infinitesimo	Volume finito (effetto di immagazzinamento)
Penetrazione e completamento totali	Spesso diversa
Formazione illimitatamente estesa	Talora, limiti di permeabilità o di ricarica
Permeabilità costante	Talora, danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo
Portata costante	Talvolta diversa
Immagazzinamento trascurabile nell'aquitardo	Talvolta diversa

da ricordare:

le soluzioni con curve tipo sono basate su soluzioni analitiche che presuppongono, per semplicità, particolari condizioni semplificative.

Queste condizioni ideali raramente vengono riscontrate nella realtà .

Confined Aquifers

Theis (1935)/Hantush (1961) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer
 Theis (1935) Solution for a Recovery Test in a Confined Aquifer
 Theis (1935) Solution for a Step-Drawdown Test in a Confined Aquifer
 Cooper-Jacob (1946) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer
 Moench-Prickett (1972) Solution for a Pumping Test in a Confined/Unconfined Aquifer
 Butler (1988) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer
 Papadopoulos-Cooper (1967) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer
 Dougherty-Babu (1984) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer
 Dougherty-Babu (1984) Solution for a Step-Drawdown Test in a Confined Aquifer
 Hantush (1962) Solution for a Pumping Test in a Wedge-Shaped Confined Aquifer
 Murdoch (1994) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer
 Daviau et al. (1985) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer
 Barker (1988) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer

Leaky Aquifers

Hantush-Jacob (1955)/Hantush (1964) Solution for a Pumping Test in a Leaky Aquifer
 Hantush-Jacob (1955) Solution for a Step-Drawdown Test in a Leaky Aquifer
 Hantush (1960) Solution for a Pumping Test in a Leaky Aquifer
 Cooley-Case (1973) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer Overlain by a Water-Table Aquitard
 Neuman-Witherspoon (1969) Solution for a Pumping Test in a Leaky Aquifer
 Moench (1985) Solution for a Pumping Test in a Leaky Aquifer

Unconfined Aquifers

Theis (1935) Solution for a Pumping Test in an Unconfined Aquifer
 Cooper-Jacob (1946) Solution for a Pumping Test in an Unconfined Aquifer
 Neuman (1974) Solution for a Pumping Test in an Unconfined Aquifer
 Moench (1997) Solution for a Pumping Test in an Unconfined Aquifer
 Tartakovsky-Neuman (2007) Solution for a Pumping Test in an Unconfined Aquifer

Fractured Aquifers

Moench (1984) Solution for a Pumping Test in a Fractured Aquifer
 Gringarten-Witherspoon (1972) Solution for a Pumping Test in a Fractured Aquifer
 Gringarten-Ramey-Raghavan (1974) Solution for a Pumping Test in a Fractured Aquifer
 Gringarten-Ramey (1974) Solution for a Pumping Test in a Fractured Aquifer
 Barker (1988) Solution for a Pumping Test in a Fractured Aquifer

Mai applicare indiscriminatamente un metodo. Il fitting delle curve può essere migliore, ma non coerente con la situazione dell'acquifero.

Esempio : 3 metodi per acquifero semiconfinato (leaky)

Leaky Aquifers

Hantush-Jacob (1955)/Hantush (1964) Solution for a Pumping Test in a Leaky Aquifer

Hantush-Jacob (1955) Solution for a Step-Drawdown Test in a Leaky Aquifer

Hantush (1960) Solution for a Pumping Test in a Leaky Aquifer

Cooley-Case (1973) Solution for a Pumping Test in a Confined Aquifer Overlain by a Water-Table
Aquitard

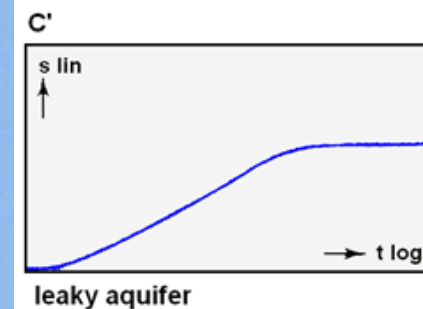
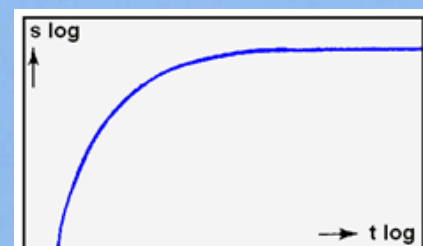
Neuman-Witherspoon (1969) Solution for a Pumping Test in a Leaky Aquifer

Moench (1985) Solution for a Pumping Test in a Leaky Aquifer

La soluzione originale di Hantush & Jacob (1955) è stata sviluppata sulla base di due assunzioni molto restrittive. Essi hanno assunto che il carico idraulico nell'acquifero non sfruttato si mantenga costante durante l'estrazione di acqua dall'acquifero sfruttato e che il tasso di percolazione nell'acquifero sfruttato sia proporzionale al gradiente idraulico attraverso l'acquitrando semiconfinato. La prima assunzione implica che l'acquifero non sfruttato abbia una capacità illimitata di fornire acqua all'acquifero sfruttato attraverso l'acquitrando. La seconda assunzione ignora completamente gli effetti della capacità di immagazzinamento dell'acquitrando in condizioni transitorie.

Hantush (1960) ha presentato una soluzione modificata in cui vengono presi in considerazione gli effetti dell'immagazzinamento nell'acquitrando.

Neuman & Witherspoon (1969) hanno presentato una soluzione più completa che considera sia il rilascio di acqua per immagazzinamento nell'acquitrando che gli abbassamenti del carico idraulico nell'acquifero non sfruttato. Le loro soluzioni richiedono il calcolo di quattro parametri adimensionali.



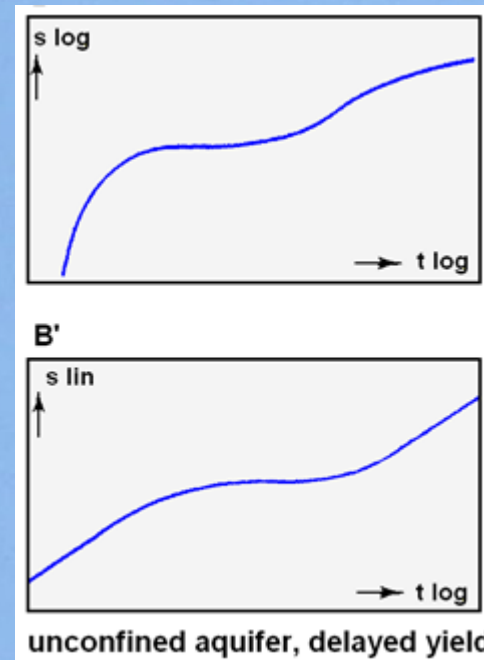
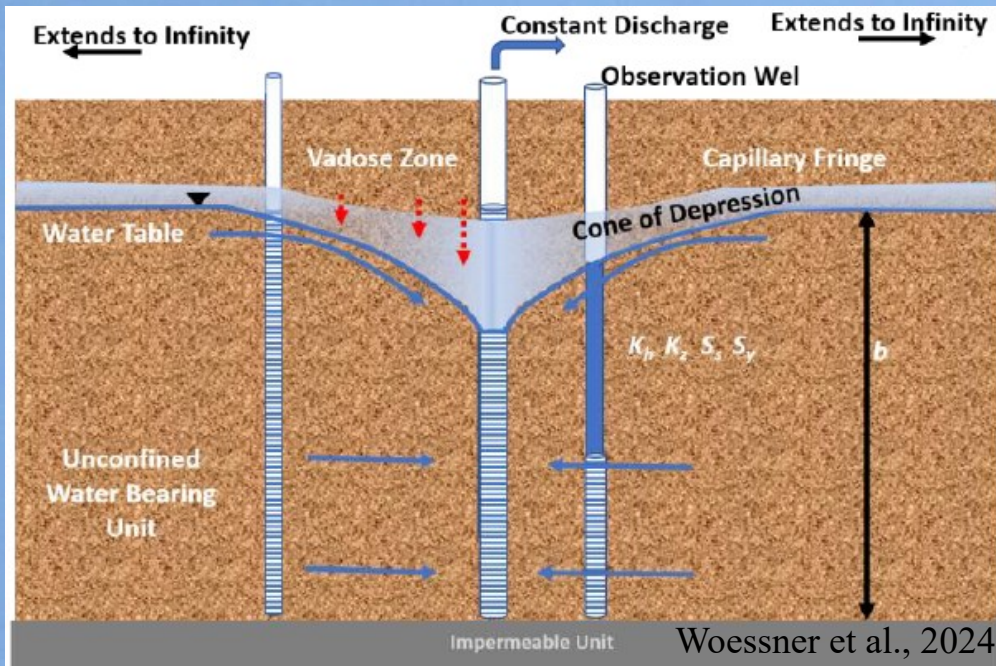
Acquifero libero con drenaggio ritardato

Nel diagramma $\log s$ vs. $\log t$ si ha una caratteristica curva ad S che corrisponde a tre fasi.

1. Fase iniziale, di breve durata, si ha rilascio di acqua dallo storage per espansione e compressione. Segue la curva di Theis. S_s
2. Fase intermedia, la diminuzione di pressione causa un gradiente verticale con drenaggio dei pori nel tratto abbassato della falda, con flusso a componente verticale, e produce un rallentamento dell'abbassamento. La curva si appiattisce.
3. Fase finale, il flusso ritorna a componente orizzontale prevalente e segue la curva di Theis. S_y

La fase 2 può mancare.

Curve tipo di Neuman



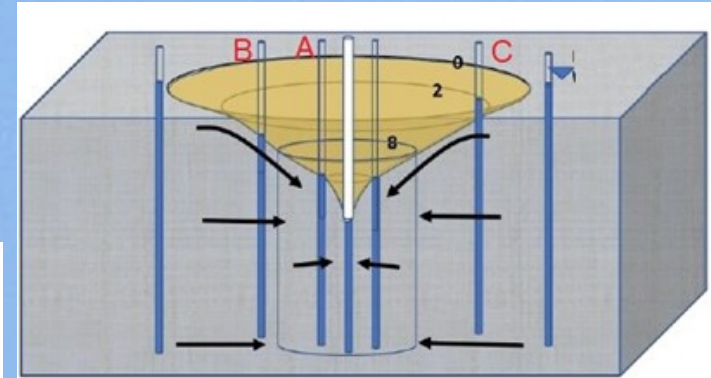
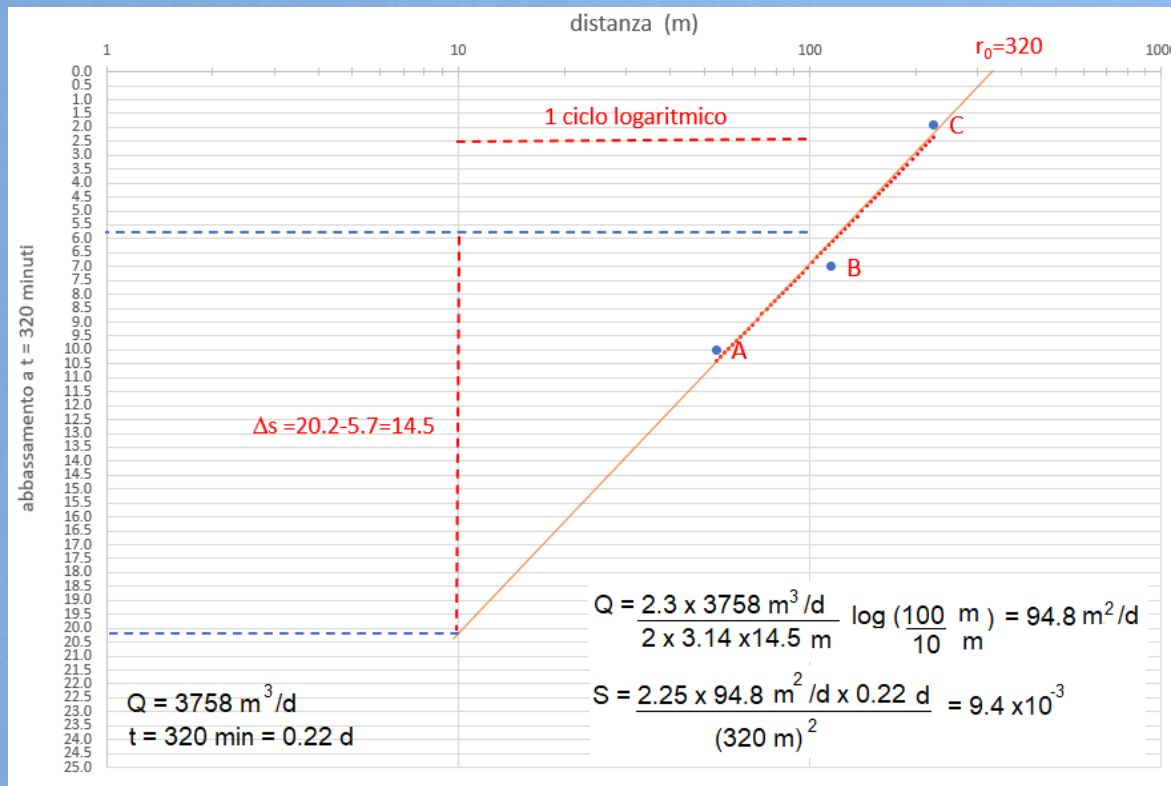
Quando siete fortunati e avete 2 o + piezometri. **Distanza - abbassamento.**

Abbassamento s preso a tutti i piezometri allo stesso tempo da inizio pompaggio.

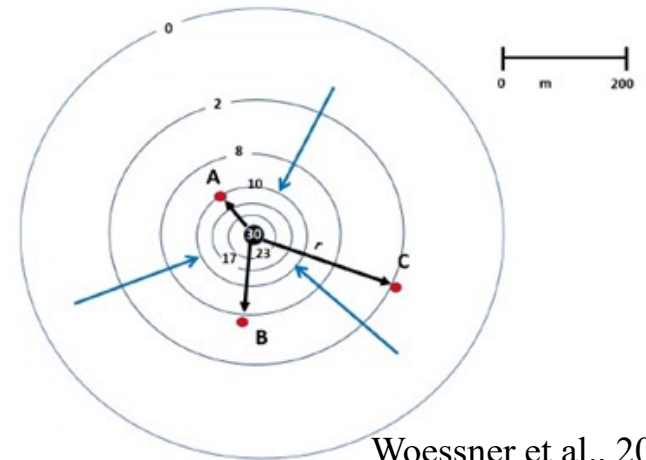
Non si può utilizzare come piezometro il raggio del pozzo, perché lì l'abbassamento s è influenzato dalle perdite di carico locali.

Acquifero confinato, penetrazione totale.

$$T = \frac{2.3 Q}{2\pi \Delta s} \quad S = 2.25 \frac{Tt}{r_0^2}$$

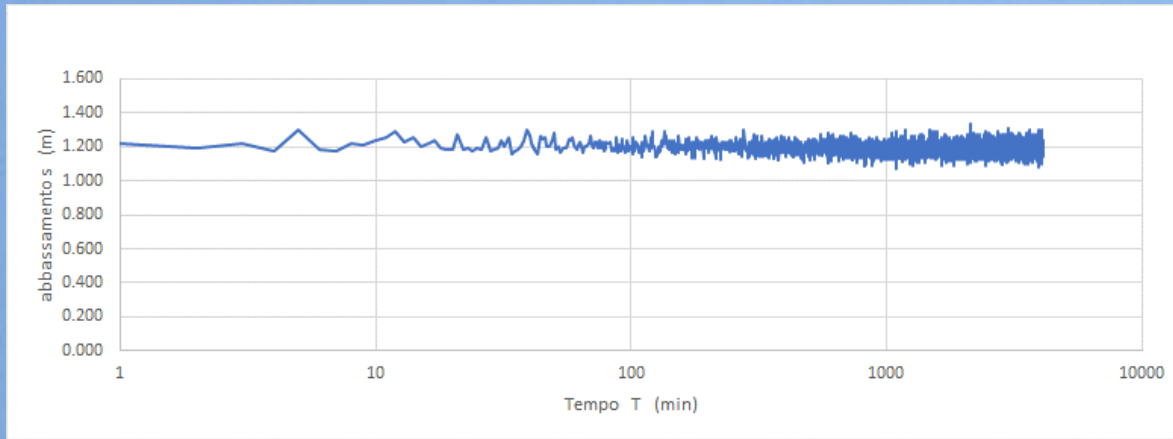


A	B	C
s = 10 m	s = 7 m	s = 1.9 m
r = 54 m	r = 115 m	r = 225 m
t = 320 min	t = 320 min	t = 320 min

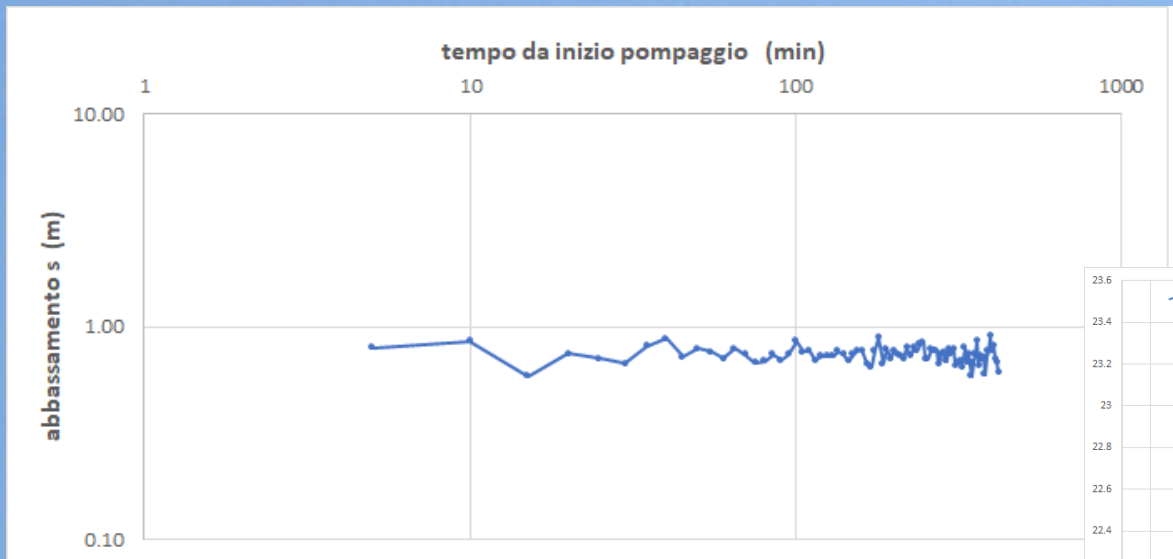


Woessner et al., 2024

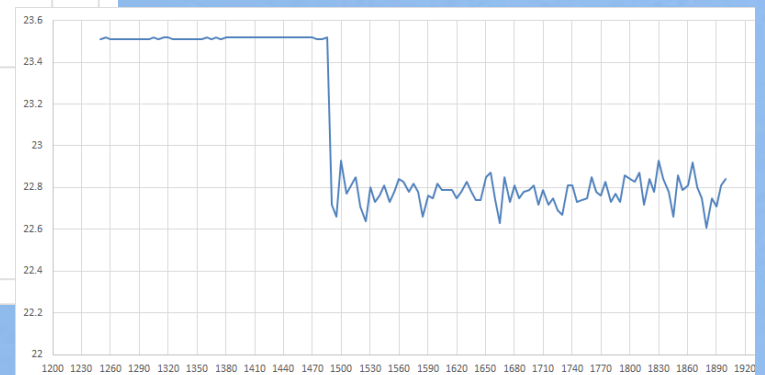
Non sempre si ottengono dati interpretabili con le curve tipo.
Può darsi che la curva dei dati di campagna risulti molto piatta, con variazioni di pochi centimetri. In questo caso non si possono ottenere risultati univoci ed è opportuno utilizzare altri metodi per T.



Acquifero poroso, limite di ricarica molto vicino, stabilizzazione immediata del livello, disturbi antropici.



Acquifero fratturato, fluttuazioni attribuite a flusso turbolento (non a causa del sensore, perchè in assenza del pompaggio le fluttuazioni, già compensate barometricamente, scompaiono).



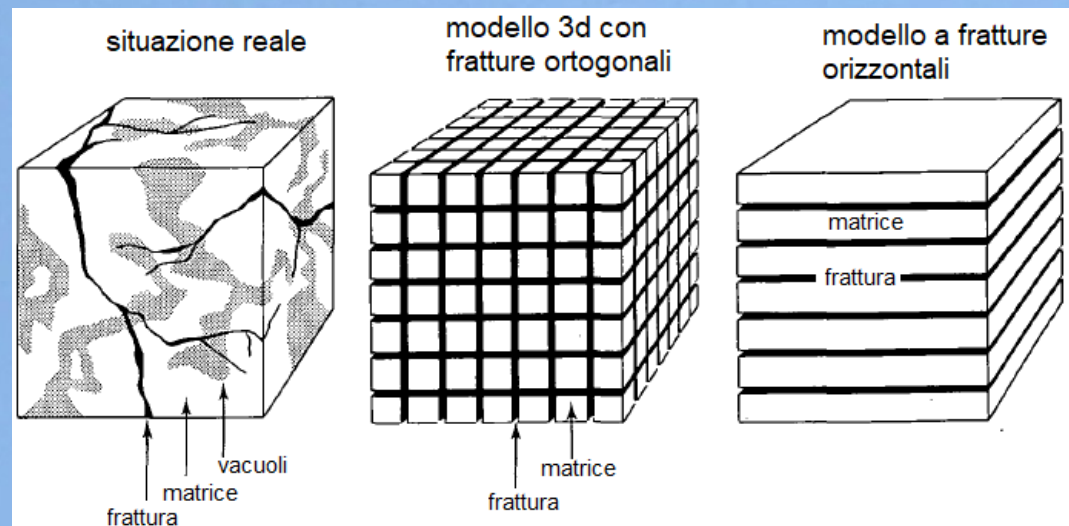
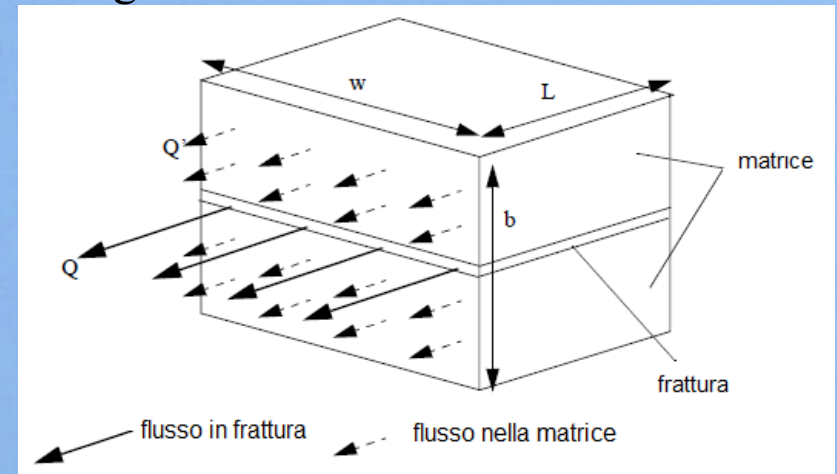
Gli **acquiferi a doppia porosità** (circolazione in frattura e in matrice) hanno elevata complessità naturale, di difficile modellazione.

Il flusso è quasi sempre turbolento (non vale la legge di Darcy) per vari motivi:

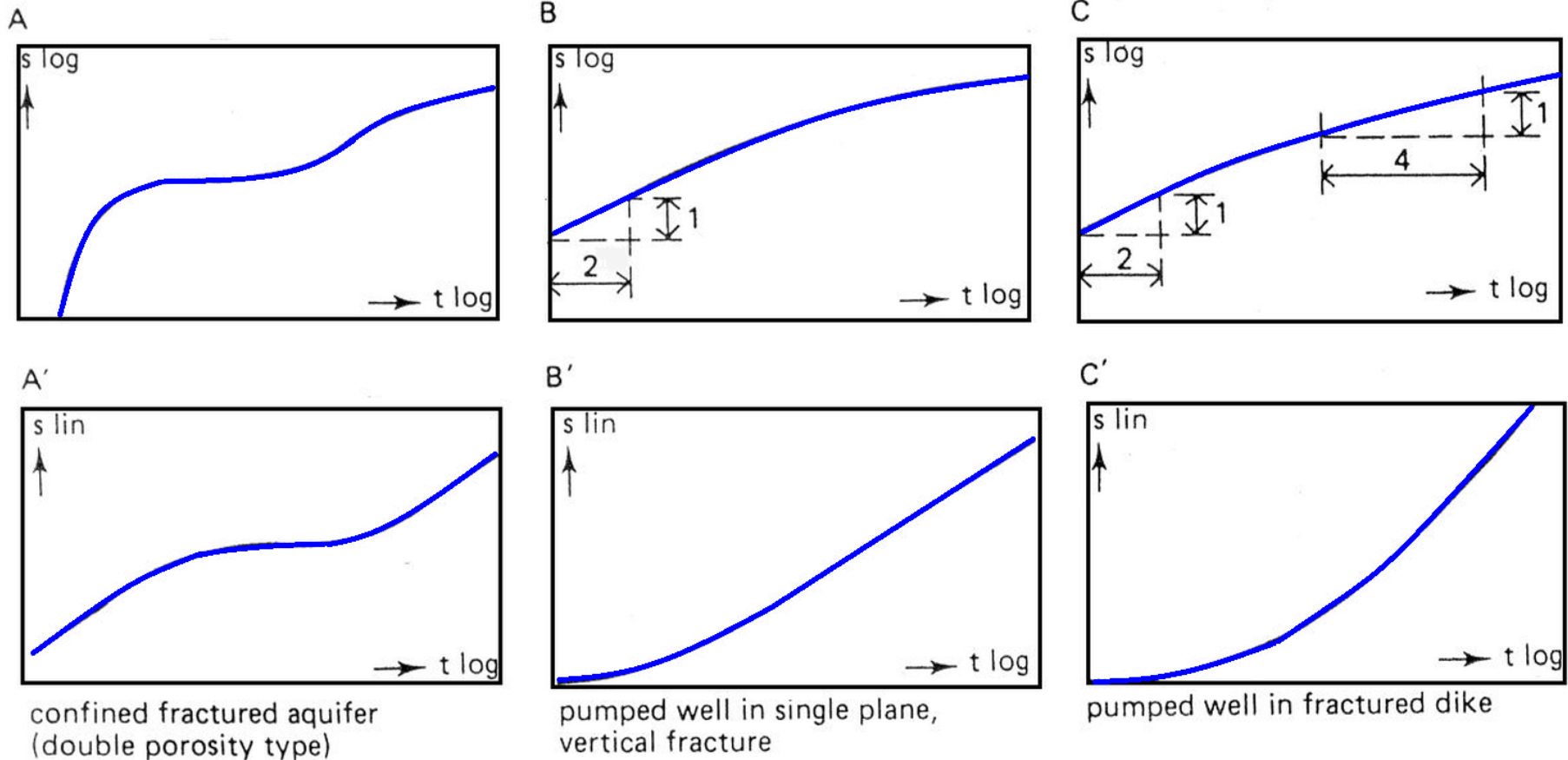
- rugosità delle fratture
- variazioni dell'apertura delle fratture
- presenza di riempimenti nelle fratture e effetti di degradazione
- interconnessioni tra fratture
- variazioni della direzione di flusso

Ma può assumere carattere laminare se subentra in toto la circolazione da matrice.

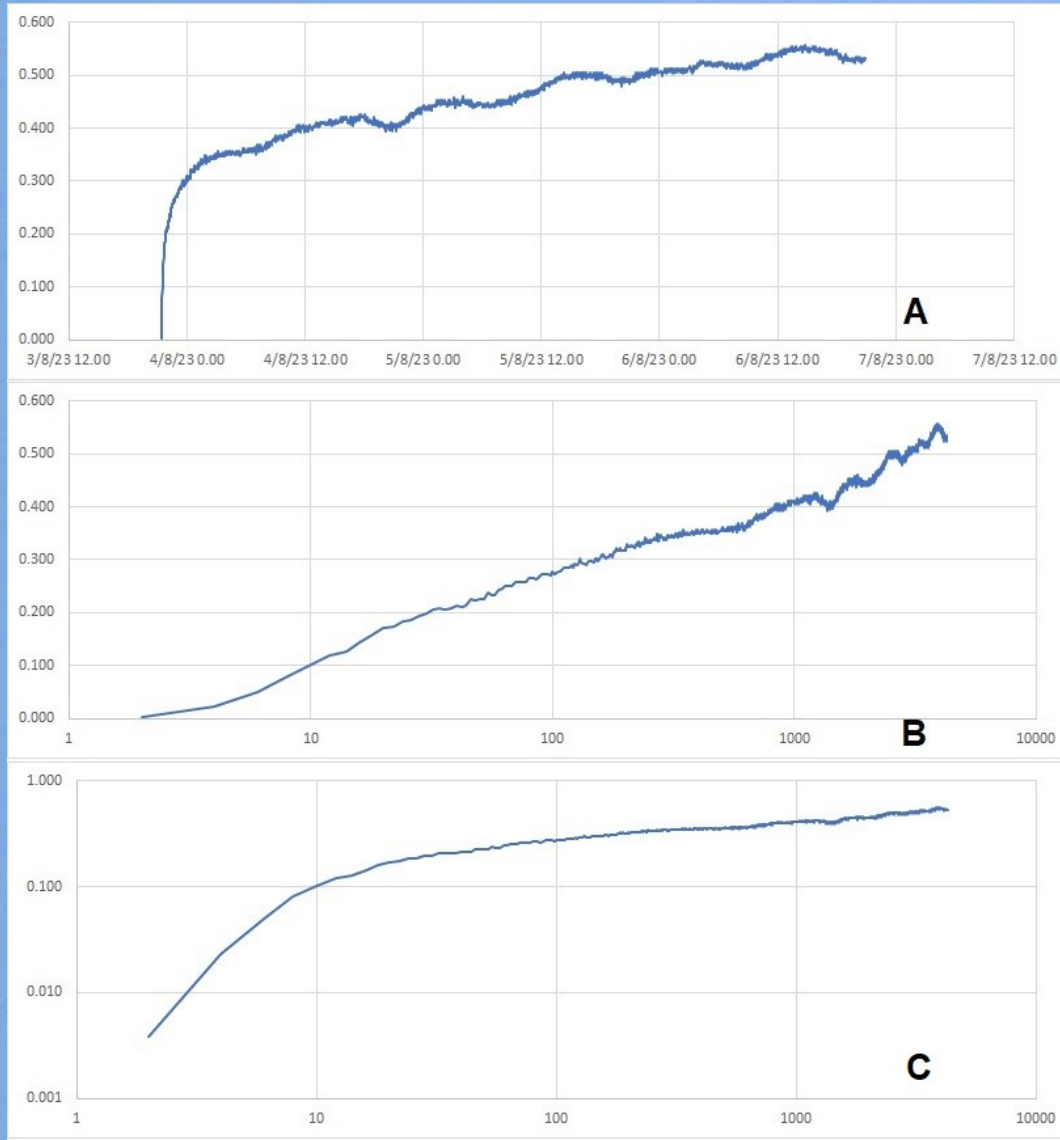
Per l'interpretazione delle prove di pompaggio, nelle soluzioni analitiche la situazione reale viene semplificata con sistemi regolari di fratture che suddividono la massa rocciosa. I modelli hanno poi condizioni idrauliche: acquifero confinato, infinito, di spessore uniforme, frattura piana o verticale, ecc. ecc.



Curve tipo per acquiferi a doppia porosità (circolazione in frattura e in matrice) e per **acquiferi in faglia/frattura**



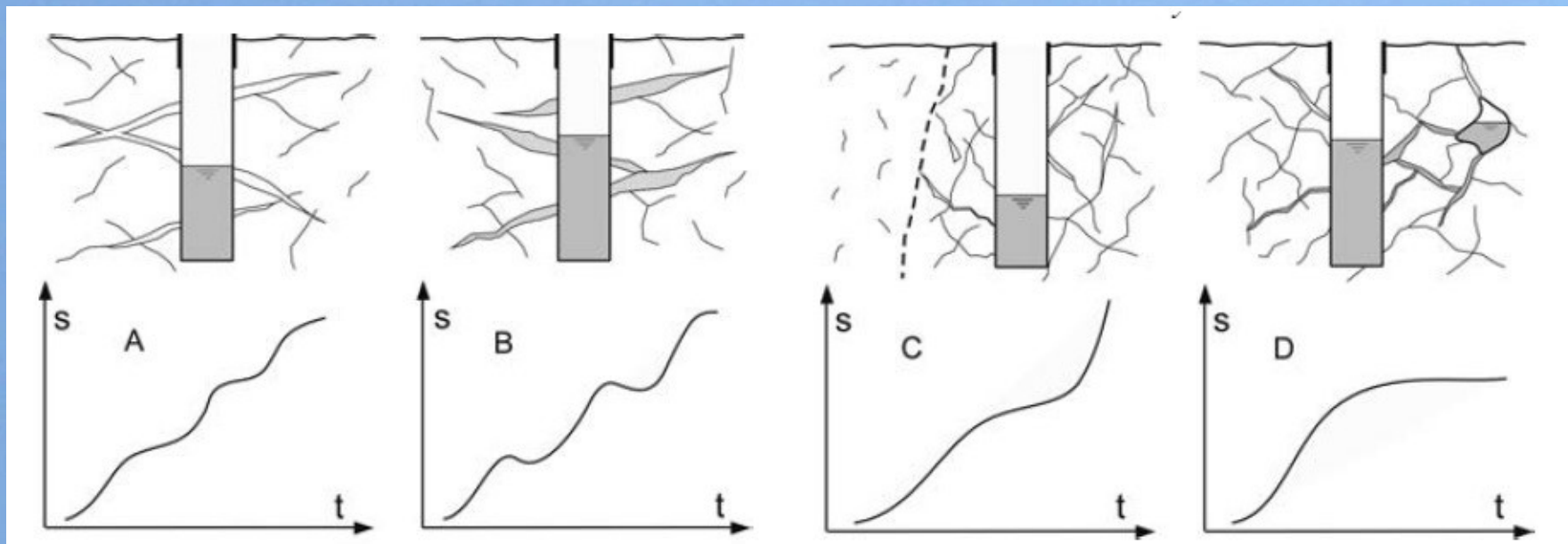
Caso reale: rilevazioni ad un piezometro durante una prova di pompaggio a portata costante (durata 2.5 giorni) in dolomia incarsita, con presenza di una faglia intercettata dal pozzo in pompaggio.



Sia in diagramma lineare
che nei diagrammi
logaritmici si osservano
nei tempi lunghi
oscillazioni ripetute.

In questo caso aiutano le
esperienze dei colleghi
idrogeologi.





- A) Pompaggio che coinvolge un numero limitato di fratture e condotti beanti che vengono progressivamente svuotati.
- B) Pompaggio da fratture e condotti larghi, riempiti da sedimenti clastici che vengono dilavati con il progredire del pompaggio.
- C) Cono di depressione che raggiunge una porzione meno permeabile (meno fratturata).
- D) Cono di depressione che raggiunge un limite equipotenziiale di alimentazione (condotto carsico ampio con acqua fluente o corso d'acqua superficiale).

Da Kresic N. (2007) – Hydraulic methods. In: Goldscheider N., Drew D. (eds.) - [Methods in Karst Hydrogeology](#). 2007 Taylor & Francis.
 L'immagine è a sua volta la modifica di una figura che rappresenta gli andamenti delle curve tempo-abbassamento degli acquiferi fratturati, in Larsson I. (1982). [Groundwater in hard rocks](#). Project 8.6 of the International Hydrological Programme, UNESCO, Paris, 228 p.

Il metodo delle derivate: un aiuto alla comprensione degli acquiferi fratturati.

Dagli studi sulla circolazione dei fluidi in ambiente fratturato e a doppia porosità condotti per ricerche petrolifere si è sviluppata una metodologia che utilizzando le **derivate di abbassamento e tempo** ha prodotto curve diagnostiche e tecniche interpretative che sono di aiuto all'interpretazione delle prove e del sistema di flusso da esse interessato.

Il metodo è particolarmente efficace per gli acquiferi fratturati e carsici.

Il metodo elabora i dati di abbassamento s e tempo t mediante la:

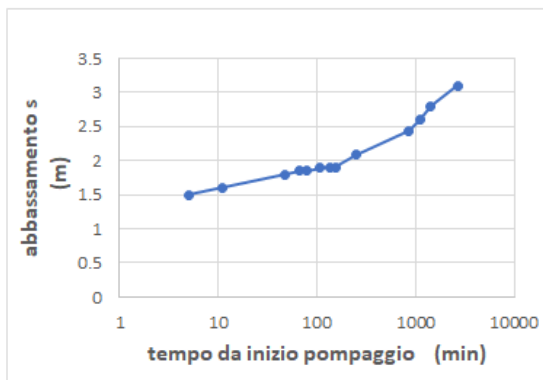
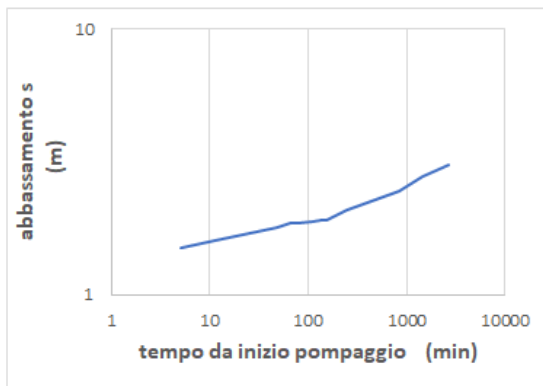
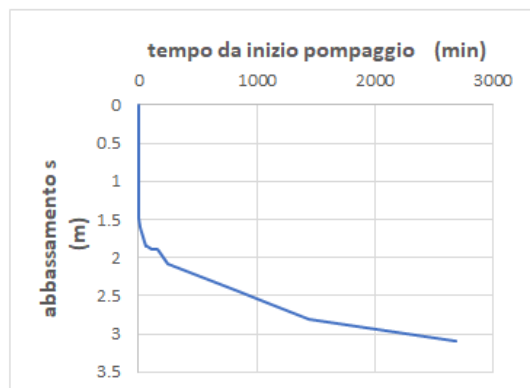
$$\left(\frac{\partial s}{\partial \ln t} \right)_i = \frac{\left(\Delta s_{i-1} / \Delta \ln t_{i-1} \right) \Delta \ln t_{i+1} + \left(\Delta s_{i+1} / \Delta \ln t_{i+1} \right) \Delta \ln t_{i-1}}{\Delta \ln t_{i-1} + \Delta \ln t_{i+1}}$$

Fondamentalmente la formula è una media pesata delle pendenze, calcolate su entrambi i lati del punto dati i .

Il segnale della derivata è scomposto in una sequenza di linee rette che sono interpretate separatamente come una sequenza di regimi di flusso.

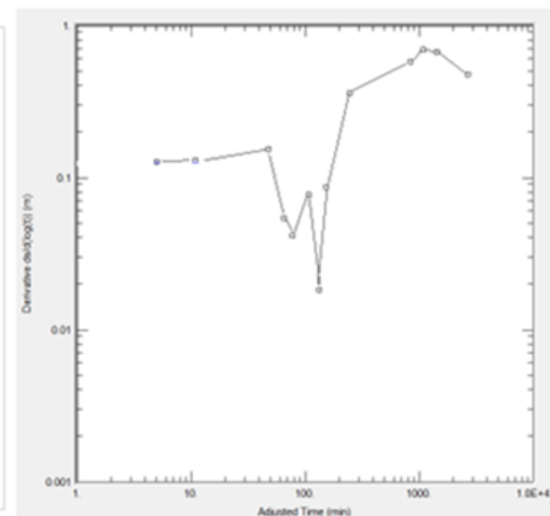
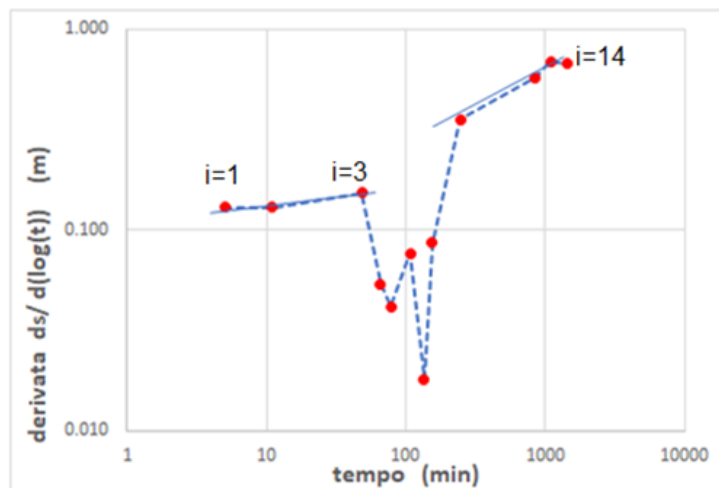
Quando la derivata dà una retta significa che il regime di flusso è idrodinamicamente stabile.

Fondamentalmente la formula è una media pesata delle pendenze, calcolate su entrambi i lati del punto dati i. Si può fare anche in Excel. Confronto con un software commerciale.



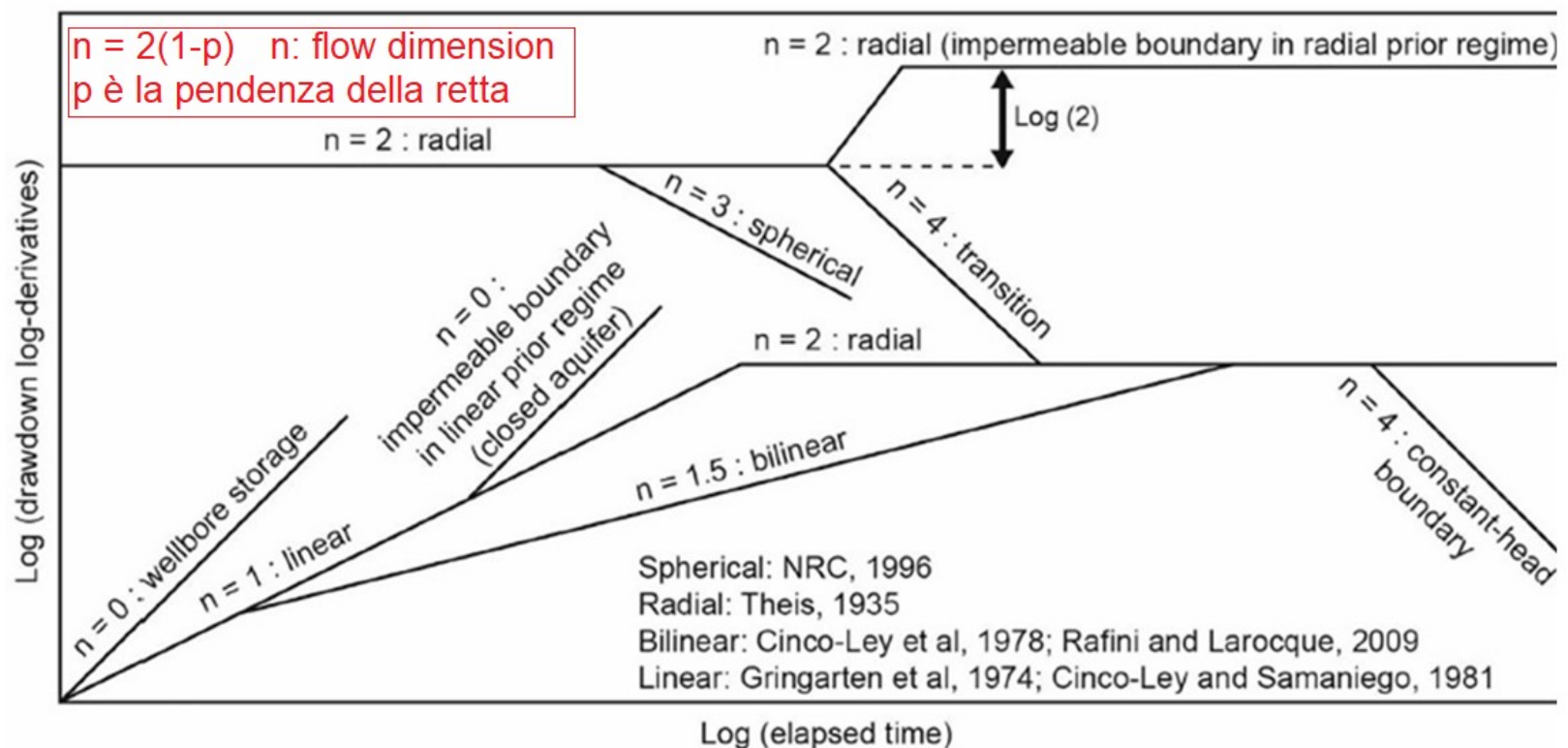
$$\left(\frac{\partial s}{\partial \ln t}\right)_i = \frac{(\Delta s_{i-1} / \Delta \ln t_{i-1}) \Delta \ln t_{i+1} + (\Delta s_{i+1} / \Delta \ln t_{i+1}) \Delta \ln t_{i-1}}{\Delta \ln t_{i-1} + \Delta \ln t_{i+1}}$$

nr punti	t	ln t	s	ds (i-1)	d ln(t i-1)	d ln(t+1)	ds (i+1)	t	derivata
1	0		0					0	
2	5	1.609	1.5			0.788	0.1	5	0.130
3	11	2.398	1.6	0.1	0.788	1.473	0.2	11	0.130
4	48	3.871	1.8	0.2	1.473	0.318	0.05	48	0.153
5	66	4.190	1.85	0.05	0.318	0.167	0	66	0.054
6	78	4.357	1.85	0	0.167	0.325	0.04	78	0.042
7	108	4.682	1.89	0.04	0.325	0.216	0.01	108	0.077
8	134	4.898	1.9	0.01	0.216	0.139	0	134	0.018
9	154	5.037	1.9	0	0.139	0.472	0.18	154	0.087
10	247	5.509	2.08	0.18	0.472	1.242	0.36	247	0.356
11	855	6.751	2.44	0.36	1.242	0.253	0.16	855	0.575
12	1101	7.004	2.6	0.16	0.253	0.265	0.2	1101	0.692
13	1435	7.269	2.8	0.2	0.265	0.627	0.3	1435	0.673
14	2685	7.895	3.1	0.3	0.627			2685	



Il segnale della derivata è scomposto in una sequenza di linee rette che sono interpretate separatamente come una sequenza di regimi di flusso (flow dimension), determinati da eterogeneità dell'acquifero incontrate man mano che il raggio di influenza del pompaggio si espande.

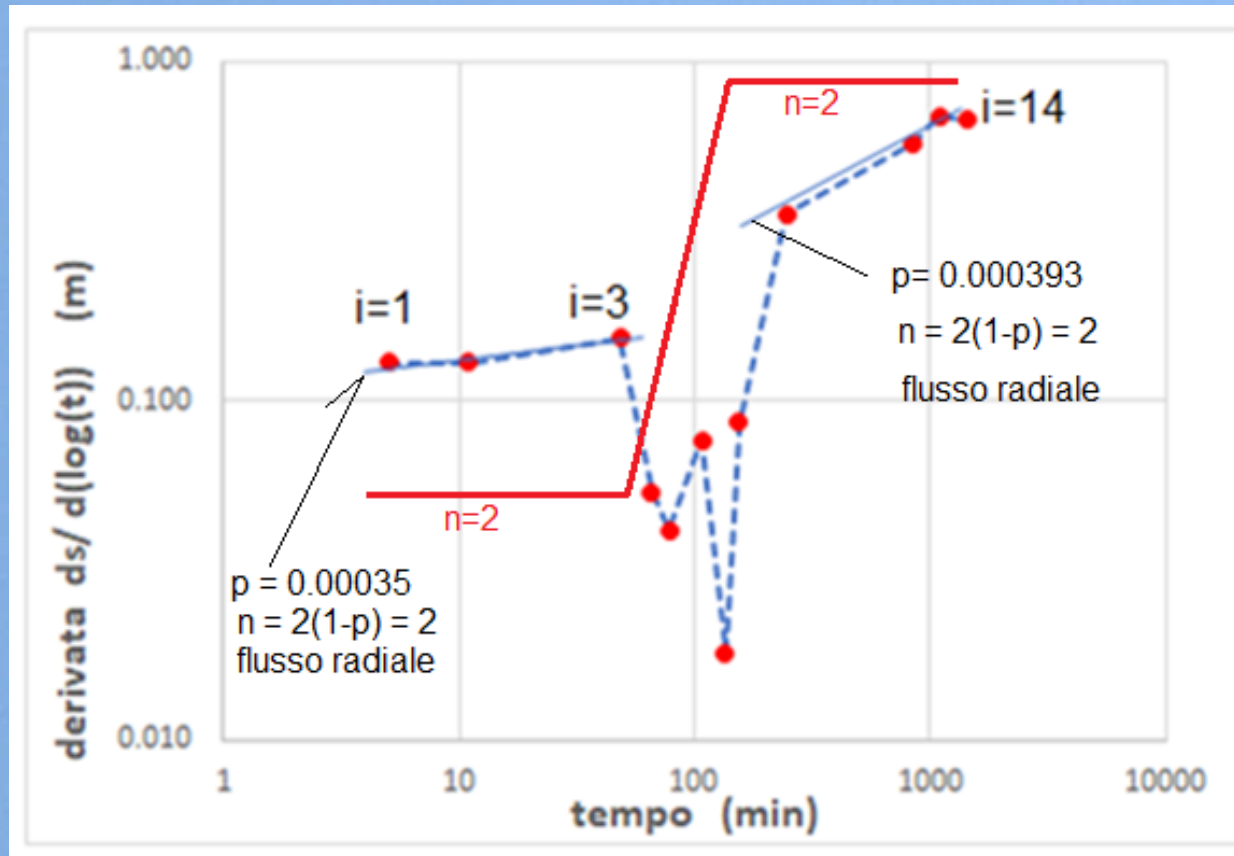
Si determina la pendenza della retta, che deve essere costante per almeno 1 ciclo logaritmico (se è più corta di 1 ciclo, l'interpretazione non è affidabile).



Summary of published theoretical flow regimes and their associated flow dimensions, n (modified from Ehlig-Economides et al. (1994)).

A. Ferroud, S. Rafini and R. Chesnaux, Using flow dimension sequences to interpret non-uniform aquifers with constant-rate pumping-tests: A review, Journal of Hydrology X, <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100003> Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

giusto per provare.....(circa 1 ciclo log)



Il metodo è molto sensibile alle oscillazioni di livello, specie nelle acquisizioni con sensori in continuo. Le oscillazioni producono nei dati derivati una distorsione ('rumore') nel grafico, e spesso bisogna ricorrere ad un algoritmo di campionamento dei dati su intervalli frazionari di ciclo logaritmico.

In pratica, meglio disporre dei dati rilevati con freatimetro, anche se con minor numero di punti.

Curve tipo
contenenti
anche le
derivate

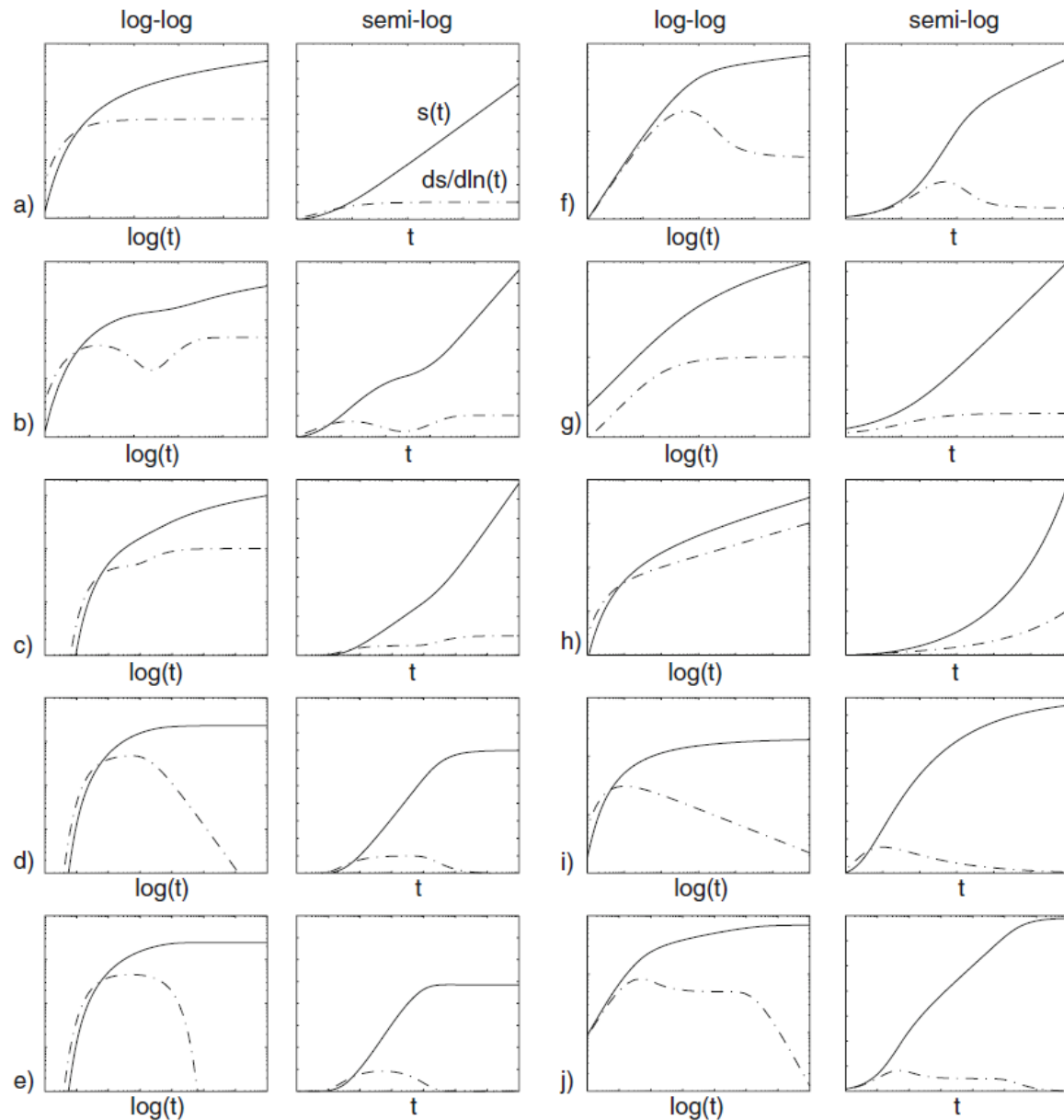


Fig. 2 Most typical diagnostic plots encountered in hydrogeology: a Theis model: infinite two-dimensional confined aquifer; b double porosity or unconfined aquifer; c infinite linear no-flow boundary; d infinite linear constant head boundary; e leaky aquifer; f well-bore storage and skin effect; g infinite conductivity vertical fracture; h general radial flow—non-integer flow dimension smaller than 2; i general radial flow model—non-integer flow dimension larger than 2; j combined effect of well bore storage and infinite linear constant head boundary (modified from Renard 2005b)

Da: Renard et al. (2008) - Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. Hydrogeology Journal

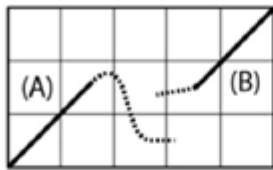
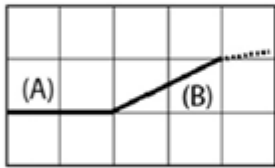

E' anche stato pubblicato un catalogo delle 'firme' delle derivate associate a modelli concettuali degli acquiferi.

Il metodo è nelle fasi iniziali di studio e in corso di perfezionamento. Dato che non fornisce modelli univoci per lo stesso segnale delle derivate una conoscenza preliminare del contesto geologico rimane fondamentale.

Approcciare con cautela.

Table 1

Summary of drawdown log-derivative signatures and their associated conceptual models.

	Flow dimension	Log-derivative response (bilog plots)	Conceptual model
1	Unit-positive slope		(A). Early time: wellbore ⁽⁴⁰⁾ (B). Late time: impermeable boundaries in all four directions ^(13, 15, 29, 40) , referred to as closed reservoir, pseudo-steady state and depleting reservoir
5	2-1		Large channel ^(13, 15) ; radial flow (A) settles before the lateral impermeable boundaries are reached (linear flow, B). (Glacio-) fluvial channel, elongated reservoir
16	2-(tr.)-2		Contiguous aquifers: presence of a lateral, blind (non-pumped), more transmissive flow domain ⁽³⁵⁾ . Early (A) and late (C) radial flow regimes reflect, respectively, the pumped (less transmissive) and non-pumped aquifers (more transmissive). The transitional stage (B) slope is -1

Da: A. Ferroud, S. Rafini and R. Chesnaux, Using flow dimension sequences to interpret non-uniform aquifers with constant-rate pumping-tests: A review, *Journal of Hydrology X*,

Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Il raggio di influenza - gli abbassamenti indotti a distanza

Una definizione spesso usata di raggio di influenza R di un pozzo in pompaggio: la distanza alla quale la depressione indotta dall'emungimento non è più osservabile (o considerata significativa). Ai fini idrodinamici invece il raggio di influenza si estende indefinitamente, o sino ad incontrare un limite, di ricarica o impermeabile.

La depressione indotta dal pompaggio ad una certa distanza dal pozzo dipende dalla distanza stessa, dalla portata, dal tempo di pompaggio e dai parametri dell'acquifero (trasmissività T e coefficiente di immagazzinamento S).

Di conseguenza il raggio di influenza non va considerato come un parametro immutabile e indipendente dall'azione antropica, come sono invece T e S .

Nel tempo sono state sviluppate da vari Autori formule empiriche per la sua valutazione: alcune di esse considerano i parametri dell'acquifero e non la portata di pompaggio, altre considerano la portata di pompaggio.

La valutazione e la significatività del raggio di influenza calcolato con le varie formule empiriche sono dibattuti nella letteratura scientifica.

**Further Discussion on the Influence Radius of a Pumping Well:
A Parameter with Little Scientific and Practical Significance
That Can Easily Be Misleading**

Yuanzheng Zhai et al. *Water* 2021, 13, 2050

Water 2022, 14, 149

The Radius of Influence Myth

Andy Louwyck et al.

The radius of influence myth refers to the use of empirical formulas to assess the environmental impact of groundwater extractions.

Alcune formule che sono frequentemente usate

Formula di Cooper-Jacob

R è il raggio di influenza in metri

t il tempo in giorni da inizio pompaggio corrispondente all'abbassamento usato

T è la trasmissività espressa in m²/g

S è il coefficiente di immagazzinamento

$$R = 1.5 \sqrt{\frac{T t}{S}}$$

Dragoni (1998) ha dimostrato che si può calcolare l'abbassamento di falda s alla distanza R_{cj} ottenuta dalla formula di Cooper & Jacob.

$$s_{R_{cj}} = 0.03912 \frac{Q}{T}$$

Metodo di Dragoni: scegliere un abbassamento d (m) e usando R da Cooper-Jacob applicare la relativa formula: si trova la distanza alla quale si ha l'abbassamento d.

d = 0.01	$R_{(d)} = R_{(cj)} (-0.0140X^2 + 0.3673X + 1.5522)$
d = 0.02	$R_{(d)} = R_{(cj)} (-0.0161X^2 + 0.3957X + 1.2826)$
d = 0.03	$R_{(d)} = R_{(cj)} (-0.0174X^2 + 0.4138X + 1.1152)$
d = 0.04	$R_{(d)} = R_{(cj)} (-0.0182X^2 + 0.4270X + 0.9923)$
d = 0.05	$R_{(d)} = R_{(cj)} (-0.0188X^2 + 0.4373X + 0.8945)$

In the table, $X = \ln(Q/T)$.

Approximate formulas for computing $R_{(d)}$ for $1 \leq Q/T \leq 35$ m.

d = drawdown used to define the radius of influence (m)

ln = natural logarithm

Q = pumped flow (m³/day)

$R_{(cj)}$ = radius of influence according to the Cooper - Jacob equation (m)

$R_{(d)}$ = radius of influence according to the drawdown criteria (m)

s = drawdown in general (m)

S = storage coefficient (dimensionless)

t = time (days)

T = transmissivity (m²/day)

Cooper H.H., Jacob C.E. (1946) - A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarising well-field history. Trans. Am. Geoph. Union, 27, 526-534.

Dragoni W. (1998) - Some considerations regarding the radius of influence of a pumping well. Hydrogéologie 3, 1998, 21-25

Formula di **Sichardt**

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{K}$$

s abbassamento in m

K conducibilità idraulica (m/s)

Formula di **Cambefort**

$$R = 550 \sqrt[4]{(T \cdot i)}$$

i gradiente idraulico

T trasmissività (m²/s)

Una verifica dell'applicazione di queste formule

Parametro	valore	unità	valore	unità	commento
Q	25	L/s	2160	m ³ /day	portata del pozzo in pompaggio
S	0.02	-	0.02	-	coefficiente di immagazzinamento (acq. libero = ne)
T	1	m ² /min	1440	m ² /day	trasmissività
h	30	m	30	m	spessore saturo di acquifero
k	0.033333	m/min	48	m/d	= T/h conduttività idraulica --> m/s
r	0.15	m	0.15	m	raggio del pozzo
t	1440	min	1	days	tempo
s	1.8	m	1.8	m	abbassamento
i	0.0002				gradiente idraulico

Sintesi dei risultati	R (m)
Cooper Jacob s = 0.06 m	402.49
Dragoni (s < 0.05 a distanza R)	430.15
Sichardt	127.28
Cambefort (gradiente)	23.50

Le formule comunque, esclusa quella di Dragoni, non quantificano l'abbassamento alla distanza R.

Ma il punto fondamentale per il geologo professionista è: a quale distanza l'abbassamento indotto dal nuovo pozzo può recare danno ad un pozzo vicino? E come si quantifica il danno in termini di abbassamento di falda?

Il raggio di influenza come calcolato con quelle formule empiriche non è un 'raggio di interferenza dannosa'.

Una prima analisi dell'interferenza si può fare analiticamente, applicando l'equazione di Theis.

$$s = h_o - h_t$$

equazione di Theis

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} \int_u^\infty \frac{e^{-y} dy}{y} = \frac{Q}{4\pi KD} W_u \quad u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

$$s = h_o - h_t$$

equazione di Theis

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} \int_u^\infty \frac{e^{-y} dy}{y} = \frac{Q}{4\pi KD} W_u \quad u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

Esempio. Un pozzo è ubicato in un acquifero con $K = 14.9$ m/d e con $S = 0.0051$. L'acquifero ha uno spessore di 20.1 m ed è emunto con una portata di 2725 m³/d. Qual'è l'abbassamento s ad una distanza di 7 m dopo 1 giorno di pompaggio?

$$T = KD = 14.9 \text{ m/d} \times 20.1 \text{ m} = 299.5 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$u = (7^2 \text{ m} \times 0.0051) / (4 \times 299 \text{ m}^2/\text{d} \times 1 \text{ d}) = 0.25/1198 = 0.00021$$

$$W_u = \text{expint1}(0.00021) = 7.89$$

$$s = \frac{Q}{4\pi KD} W_u = (2725 \text{ m}^3/\text{d} \times 7.94) / (4 \times 3.14 \times 299.5 \text{ m}^2/\text{d}) = 5.7 \text{ m}$$

Per l'interferenza: è un abbassamento da aggiungere eventualmente a quello di un pozzo in pompaggio posto a quella distanza di 7 metri.

Il tutto sempre tenendo presenti i limiti delle ipotesi di base di Theis.

(Se applicate nell'equazione i dati utilizzati poco fa per la verifica delle formule empiriche del raggio di influenza, per una distanza di 430 m troverete $s = 0.049$ m)

L'interferenza tra 2 o più pozzi è additiva. Sovrapposizione degli effetti

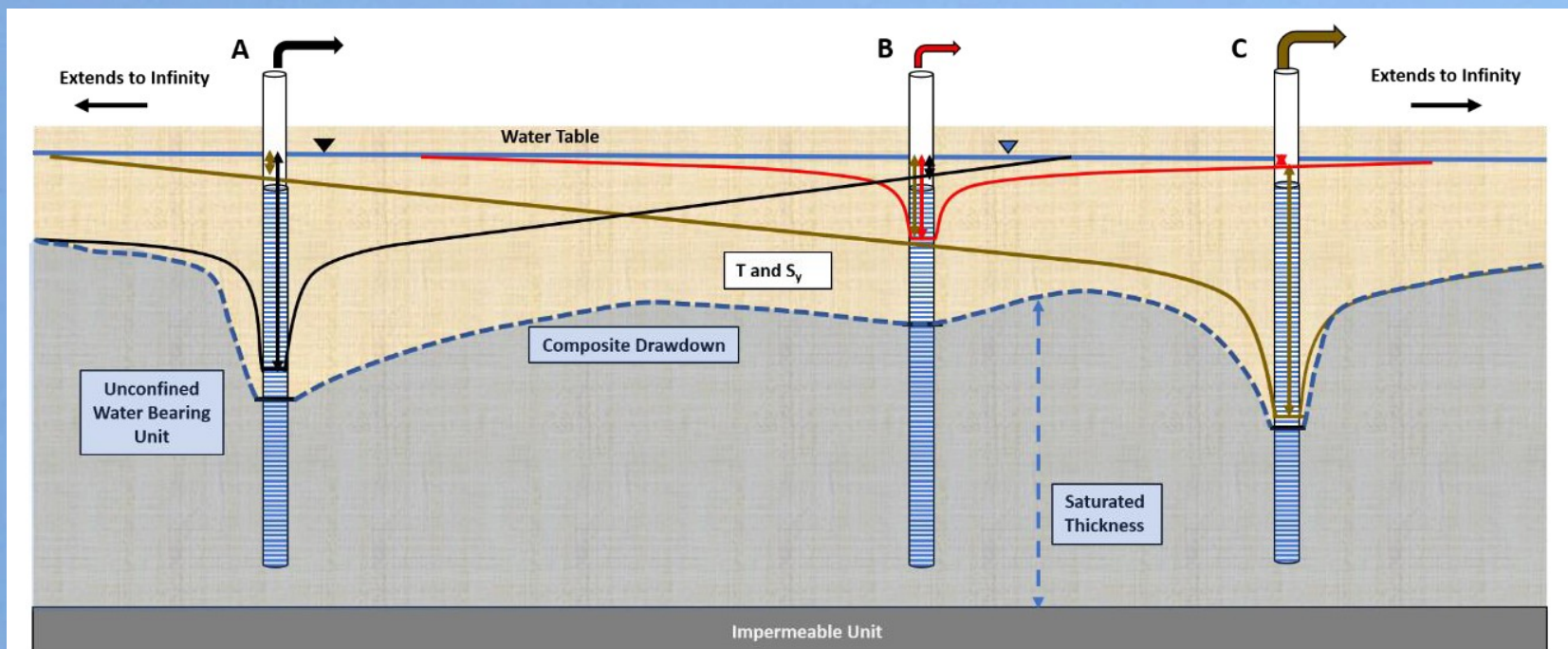


Figure 68 - Schematic cross section showing well interference and the resulting drawdown profile for an isotropic and homogeneous unconfined aquifer effected by pumping of three wells. The drawdown at each well is shown by arrows keyed to the color of the well discharge (Well A black, Well B red, Well C brown). When the well drawdown profiles are superimposed, the drawdowns are added, and the composite drawdown profile is obtained (dashed blue line). Determining well interference in an unconfined aquifer is more difficult than in a confined aquifer because transmissivity decreases as drawdown increases increasing the drawdown relative to that in an aquifer of constant saturated thickness.

Woessner et al., 2024

Una analisi che tenga conto di altri fattori (gradiente idraulico della falda, anisotropie di K, ricarica superficiale, ecc., richiede l'applicazione di un modello numerico.

Grazie per l'attenzione



Domande ?