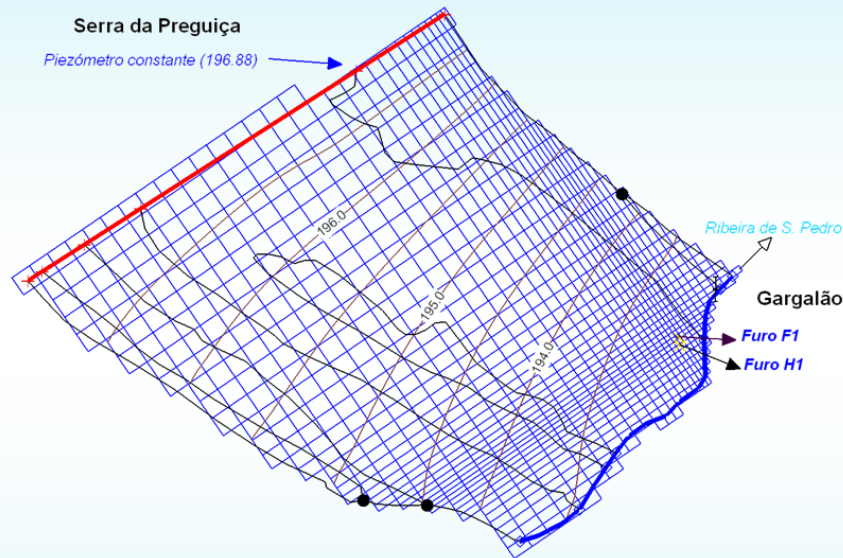


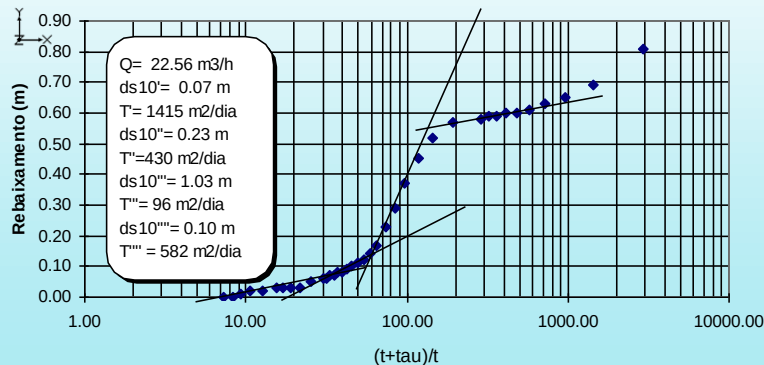
Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Algumas considerações e exemplos

Augusto Costa – **GEODISCOVER**

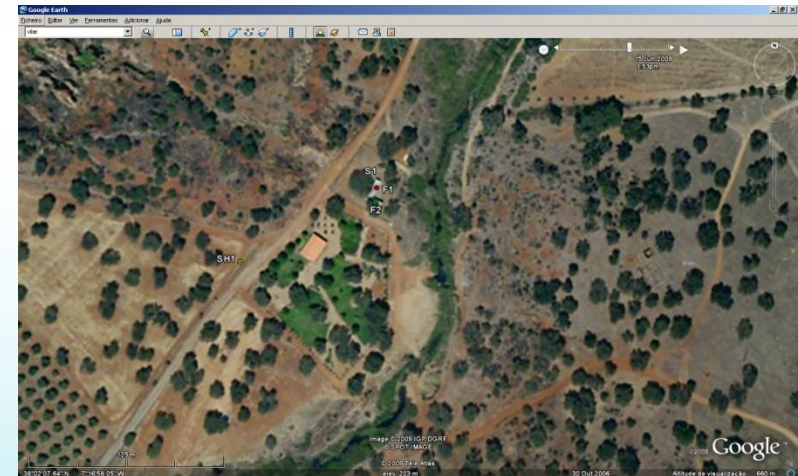


Ensaio de Recuperação F1 Gargalão



Map Symbols

- Specified Head
- River
- × Well
- △ Refine



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Aquífero

- É o conjunto de formações geológicas contendo água suscetível de ser captada economicamente pelo Homem.
- Constituem-se massas de água subterrânea que, em relação às de superfície (lagos e albufeiras), apenas têm a desvantagem de não se verem e de, por isso, ser mais difícil a sua caracterização.



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Ensaio de aquífero

- Os ensaios de aquífero são um conjunto de técnicas em que se monitoriza a resposta do aquífero a um estímulo conhecido, para se estimarem algumas características hidráulicas e condições de fronteira do aquífero.
- A situação mais usual é bombear água e monitorizar os níveis.



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Ensaio de aquífero

- A interpretação de um ensaio de bombeamento consiste, de facto, na resolução de um problema inverso, uma vez que se pretende calcular um conjunto de parâmetros hidráulicos do sistema furo-aquífero, suscetível de produzir os caudais e níveis observados.



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Ensaio de bombeamento

- A caudal constante e de recuperação;
- Escalonado e de recuperação.

Ensaio especiais

- A potencial constante e caudal variável.
- Ensaio de maré.
- Ensaio de traçador.



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Ensaio de bombeamento

- A caudal constante e de recuperação;

Ensaio especiais

- A potencial constante e caudal variável.
- Ensaio de maré.



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Equação geral de fluxo:

Significado

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{R}{T} = \frac{S \cdot \partial h}{T \cdot \partial t}$$

Recargas
exteriores ao
sistema



a variação de água
armazenada



Soma das entradas e saídas de
água de um volume elementar
de aquífero, resultantes das
diferenças de potencial com o
domínio adjacente a cada uma
das faces

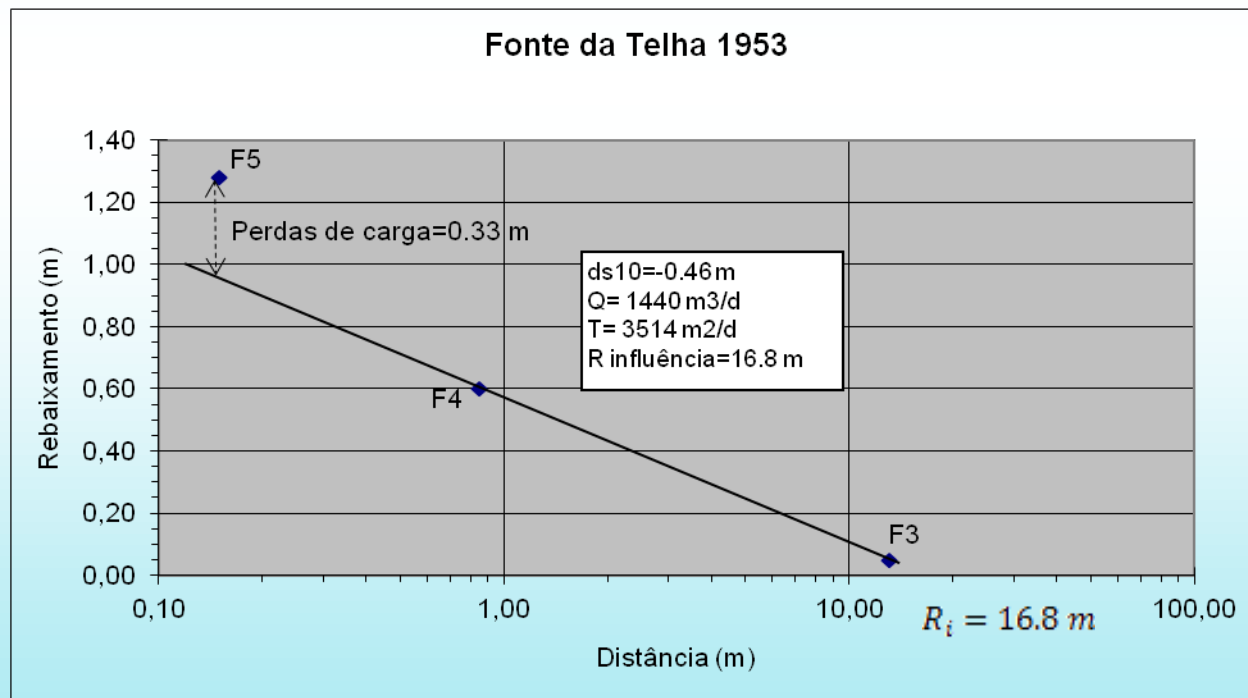


Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Regime permanente - Método de Thiem

$$T = -0.366 \cdot \frac{Q}{dh_{10}}$$

$$dh_{10} = \frac{d_1 - d_2}{\log_{10} r_1 - \log_{10} r_2}$$



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

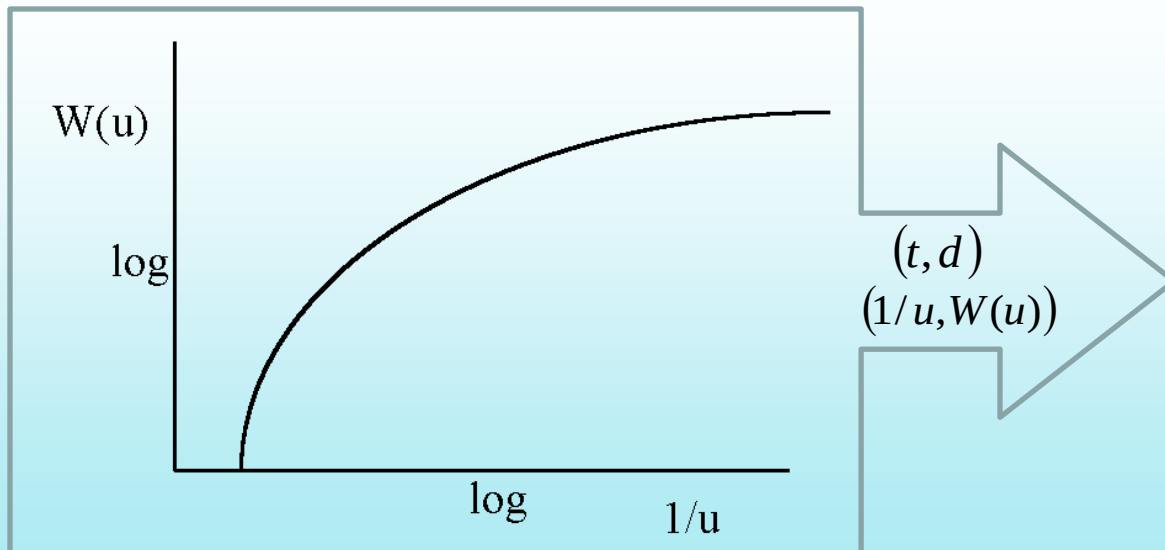
Regime transitório – Equação de Theis

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot du$$

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

$$W(u) = -0.577216 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$



$$T = \frac{Q \cdot W(u)}{4 \cdot \pi \cdot d}$$

$$S = \frac{4 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot 1/u}$$



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Regime transitório – Método de Jacob

$$W(u) = -0.577216 - \ln(u) \quad u \leq 0.1$$

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{2.25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S}\right)$$

$$d = 0.183 \cdot \frac{Q}{T} \cdot \log_{10}\left(\frac{2.25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S}\right)$$

$$T = 0.183 \cdot \frac{Q}{\Delta d_{10}}$$

$$S = 2.25 \cdot \frac{T \cdot t_0}{r^2}$$

$$t > 2.5 \cdot r^2 \cdot \frac{S}{T}$$

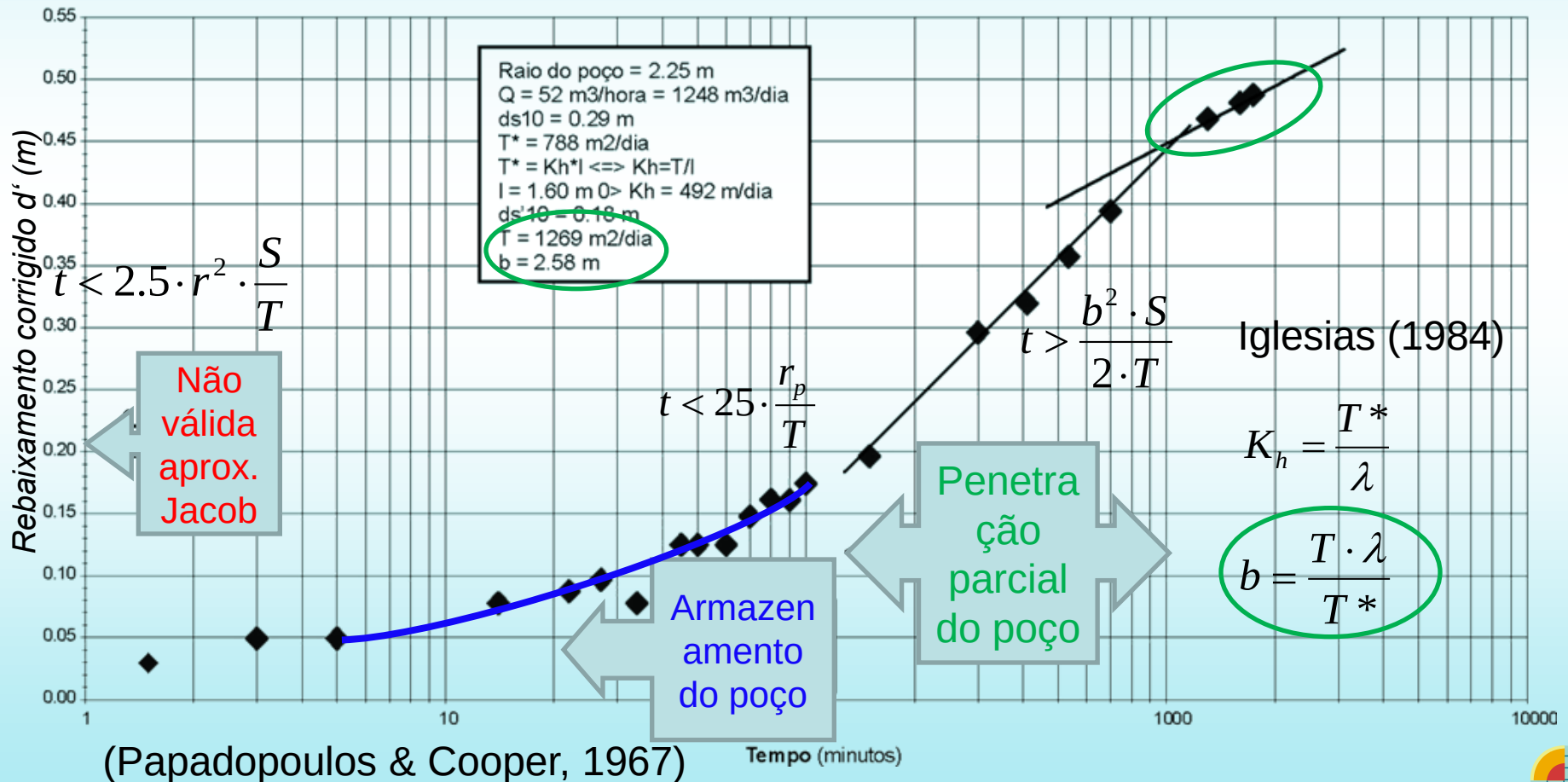


Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Regime transitório – Método de Jacob

Bombagem no Poço da Mina

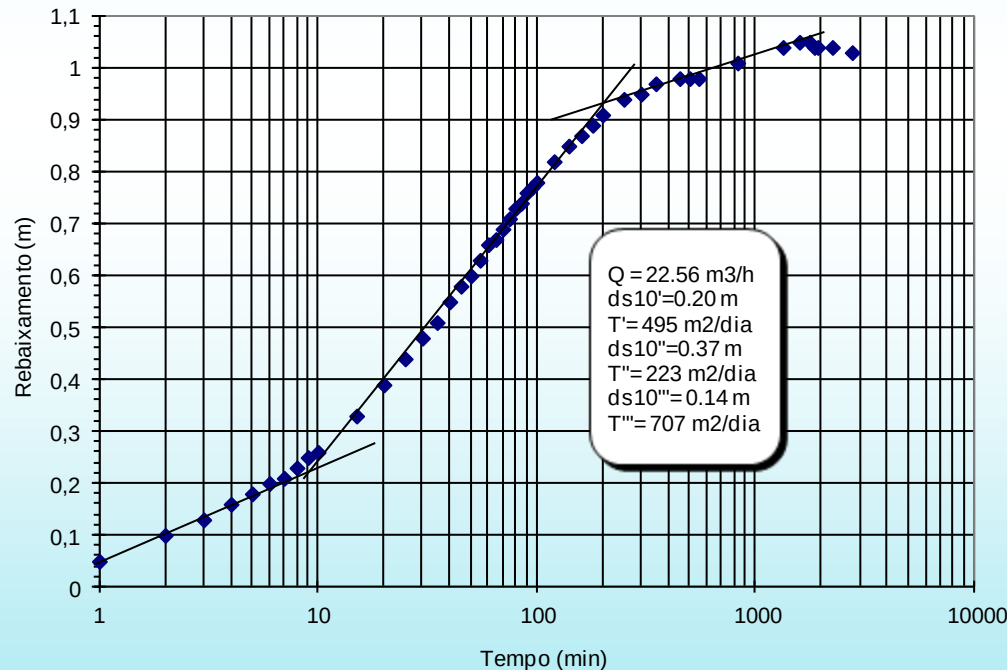
$$d' = \frac{d^2}{2 \cdot H_0}$$



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Ensaio de bombeamento e recuperação

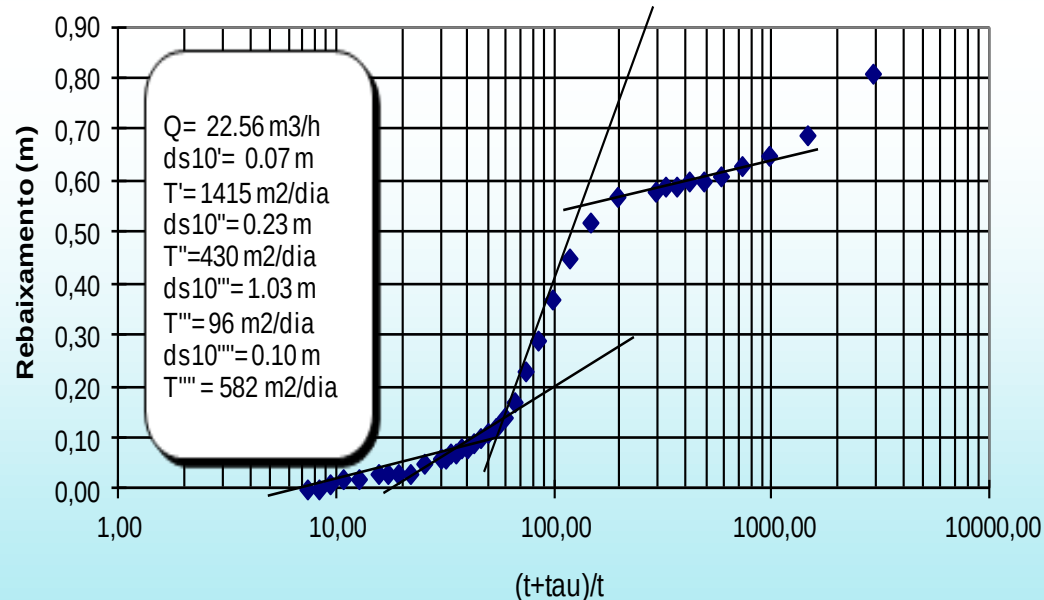
Bombagem F1 (Gargalão)



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

Ensaio de bombeamento e recuperação

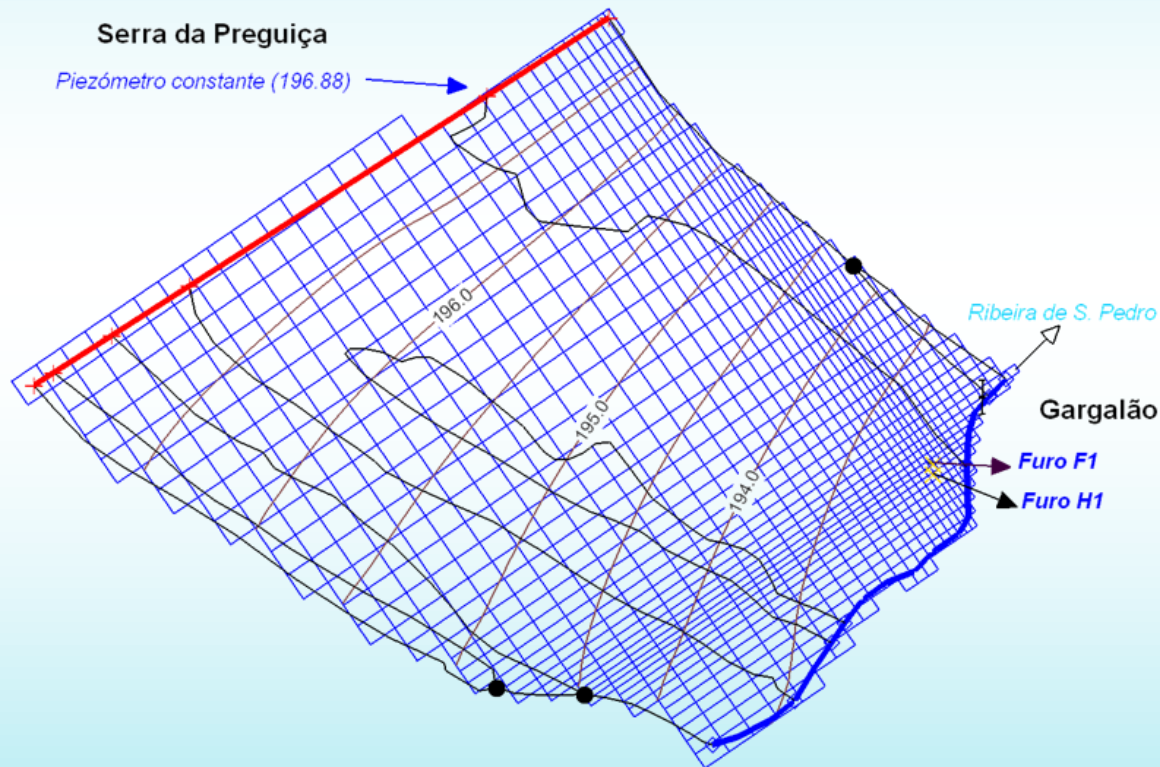
Ensaio de Recuperação F1 Gargalão



Ensaio de bombeamento e recuperação na zona de Gargalão (Moura, Alentejo)



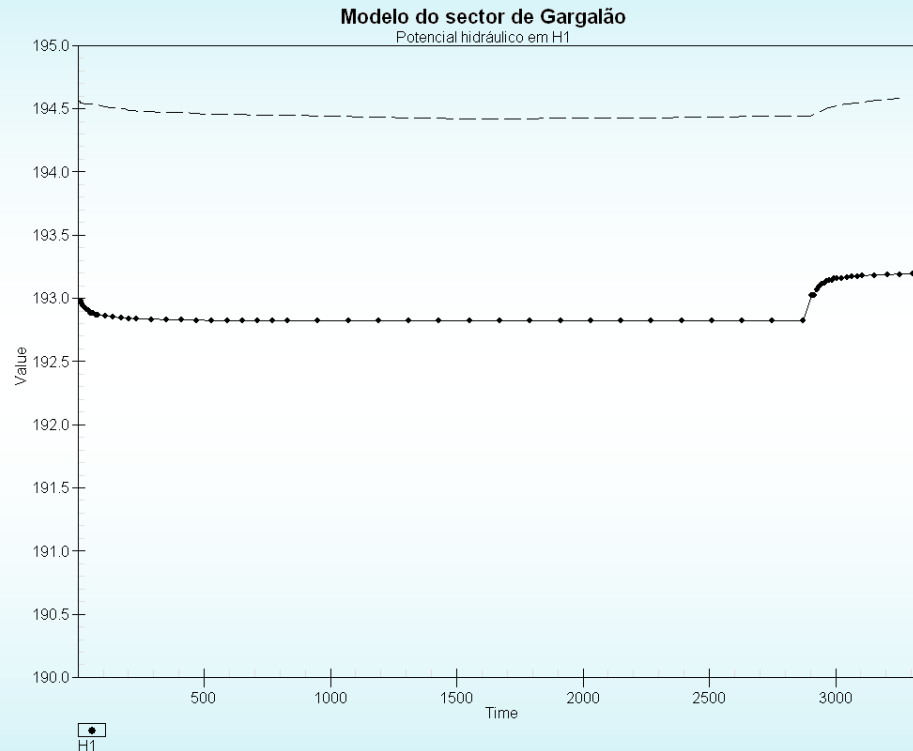
Ensaio de bombeamento e recuperação na zona de Gargalão (Moura, Alentejo)



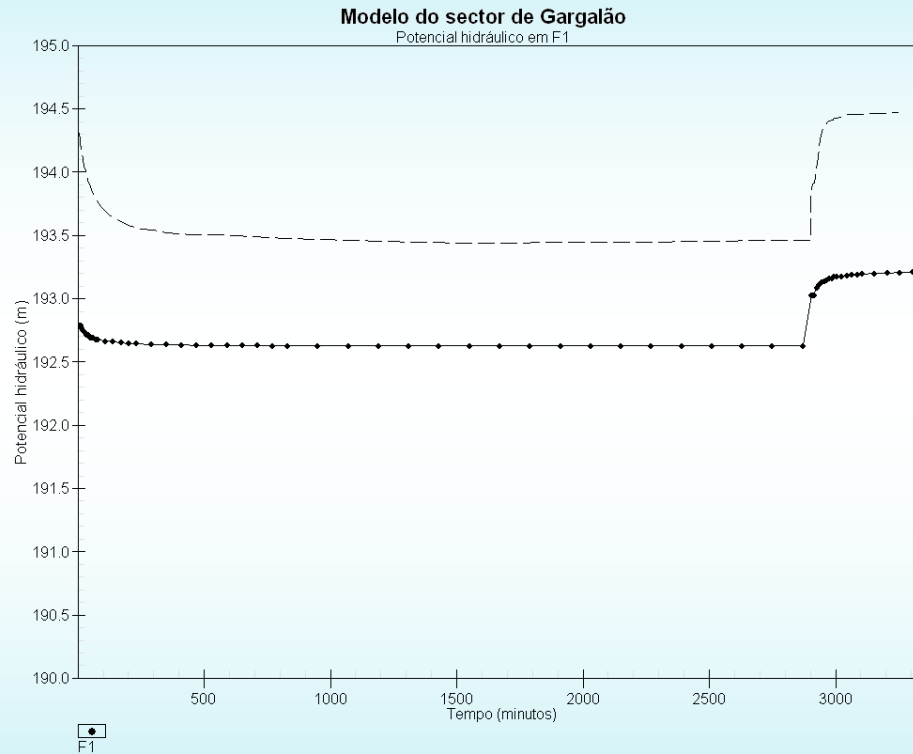
Map Symbols	
	Specified Head
	River
	Well



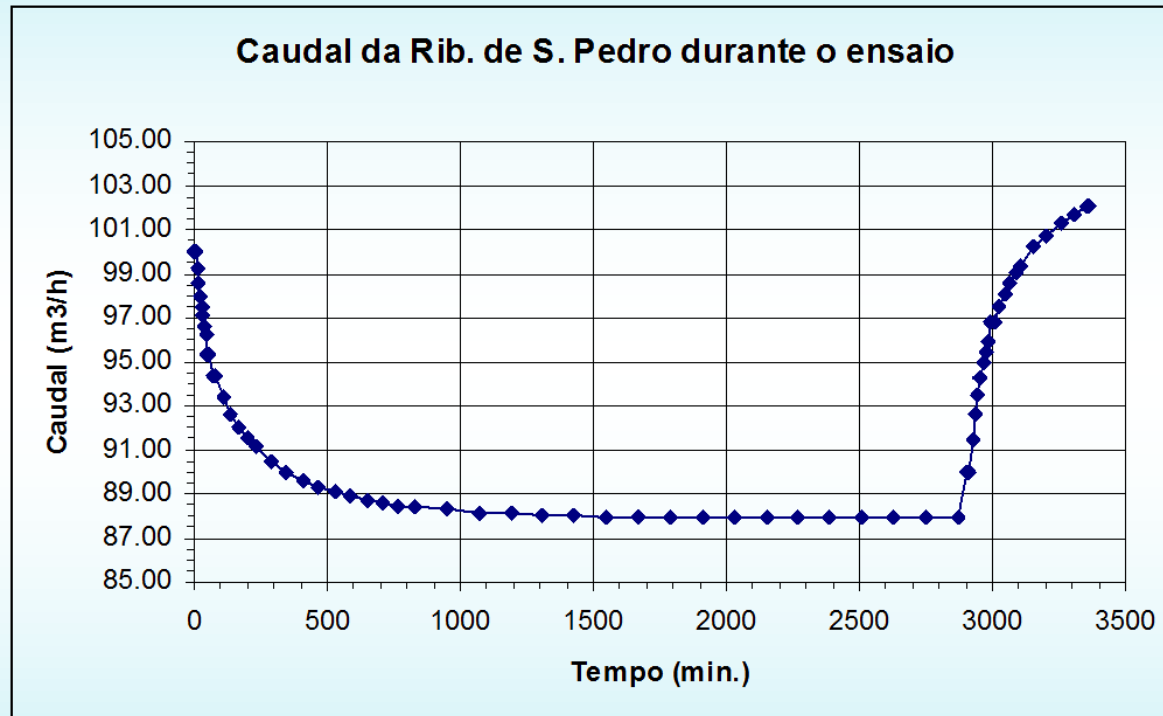
Ensaio de bombeamento e recuperação na zona de Gargalão (Moura, Alentejo)



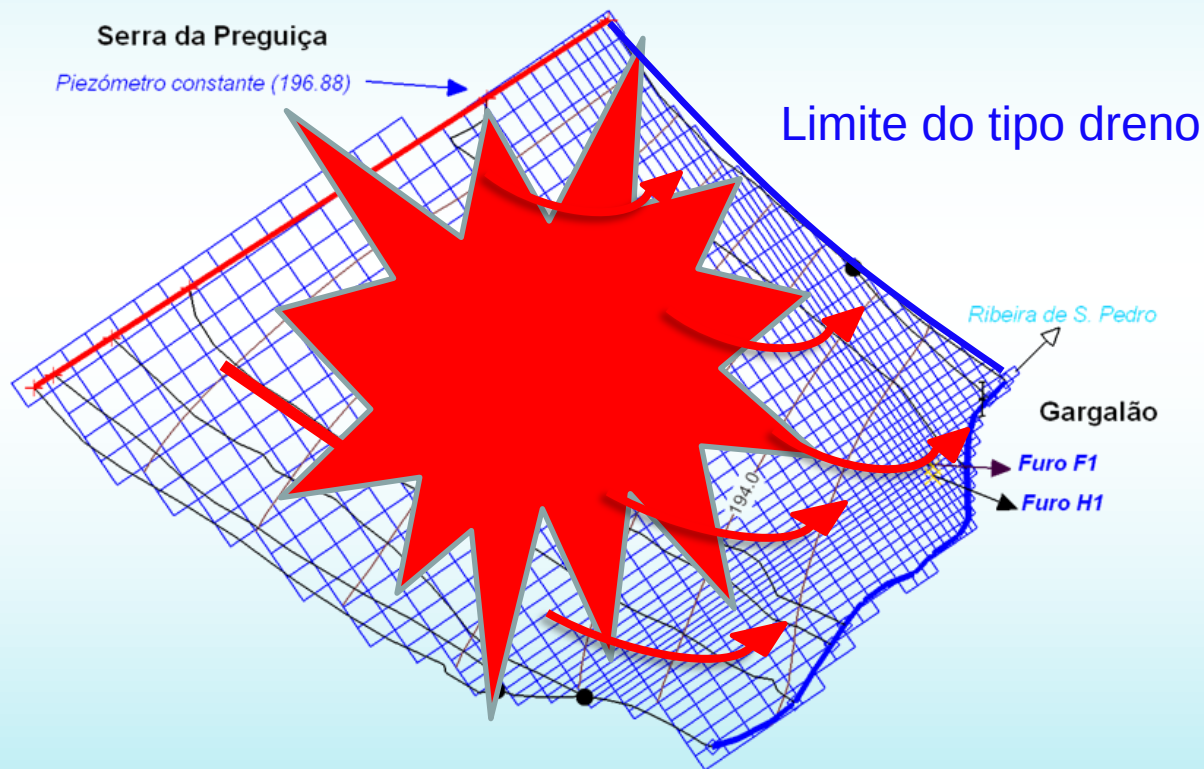
Ensaio de bombeamento e recuperação na zona de Gargalão (Moura, Alentejo)



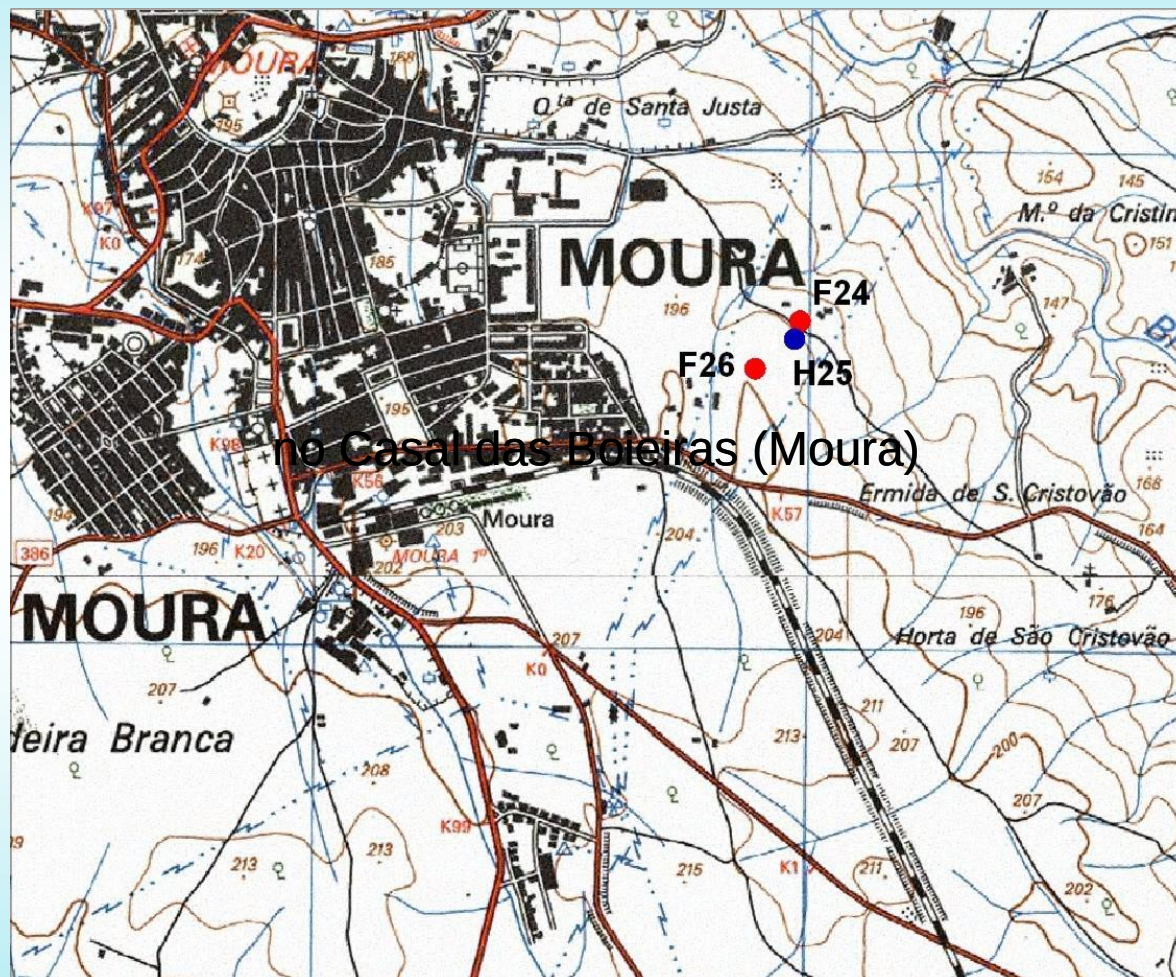
Ensaio de bombeamento e recuperação na zona de Gargalão (Moura, Alentejo)



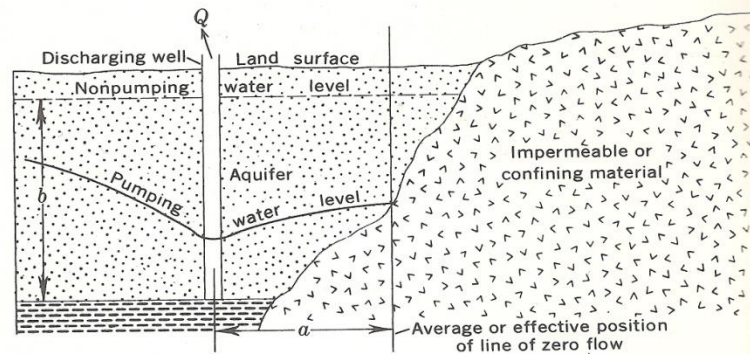
Ensaio de bombeamento e recuperação na zona de Gargalão (Moura, Alentejo)



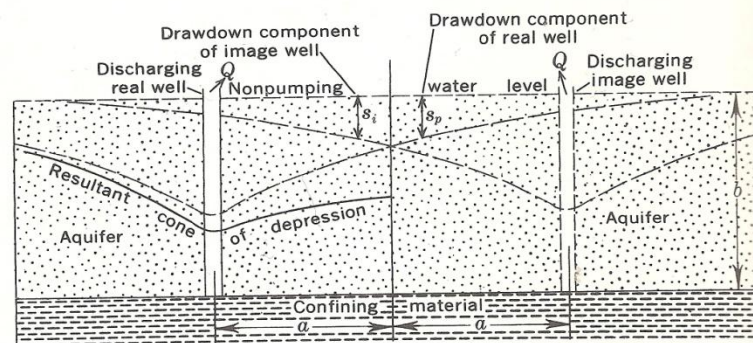
Ensaio de bombeamento e recuperação no Casal das Boieiras (Moura, Alentejo)



Ensaaios com efeito barreira



A. REAL SYSTEM



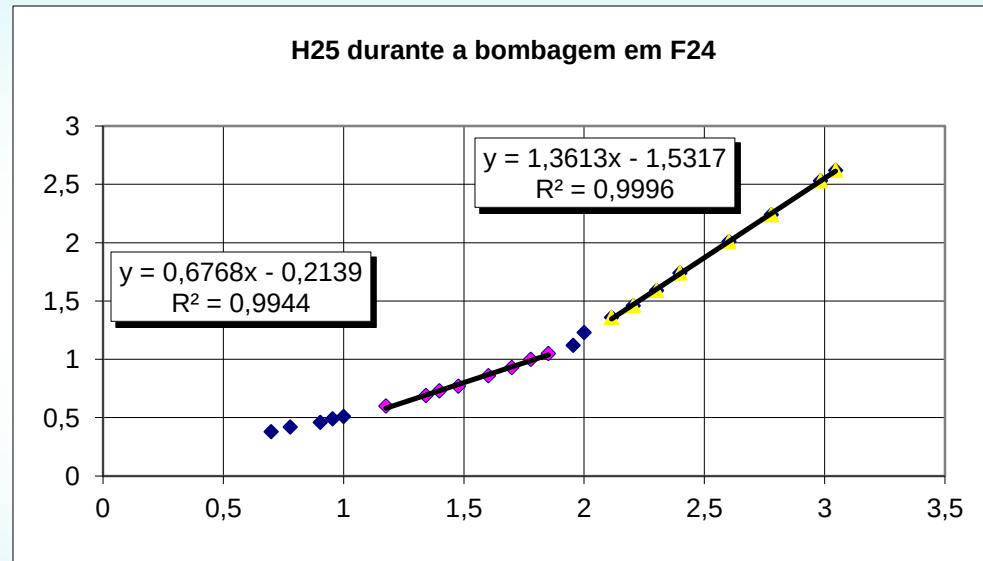
NOTE: Aquifer thickness b should be very large compared to resultant drawdown near real well

B. HYDRAULIC COUNTERPART OF REAL SYSTEM

FIGURE 37.—Idealized section views of a discharging well in an aquifer bounded by an “impermeable” barrier and of the equivalent hydraulic system in an infinite aquifer. From Ferris, Knowles, Brown, and Stallman (1962, fig. 37).



Ensaio com efeito barreira

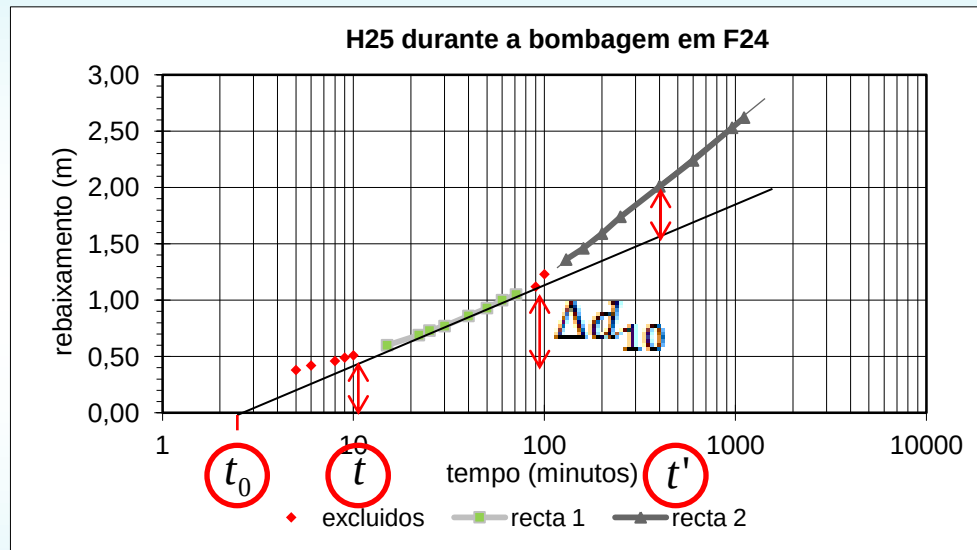


$$r' = r \cdot \sqrt{\frac{t'}{t}}$$



Ensaio no Casal das Boieiras

Efeito barreira



$$r' = r \cdot \sqrt{\frac{t'}{t}}$$

$$r' = 203 \text{ m}$$

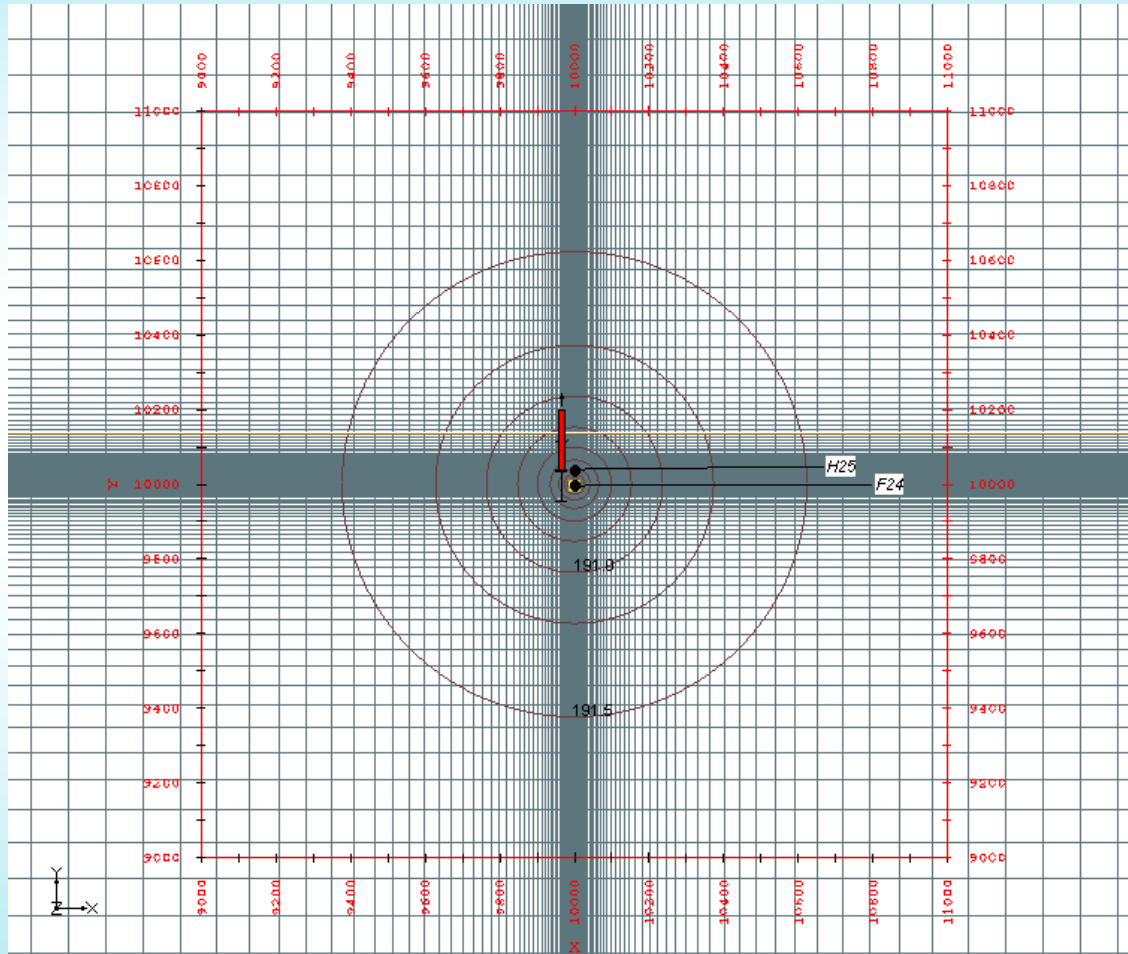
$$T = 0.183 \cdot \frac{Q}{\Delta d_{10}} \quad 37 \text{ m}^2/\text{dia}$$

$$S = 2.25 \cdot \frac{T \cdot t_0}{r^2} \quad 8.5 \cdot 10^{-5}$$



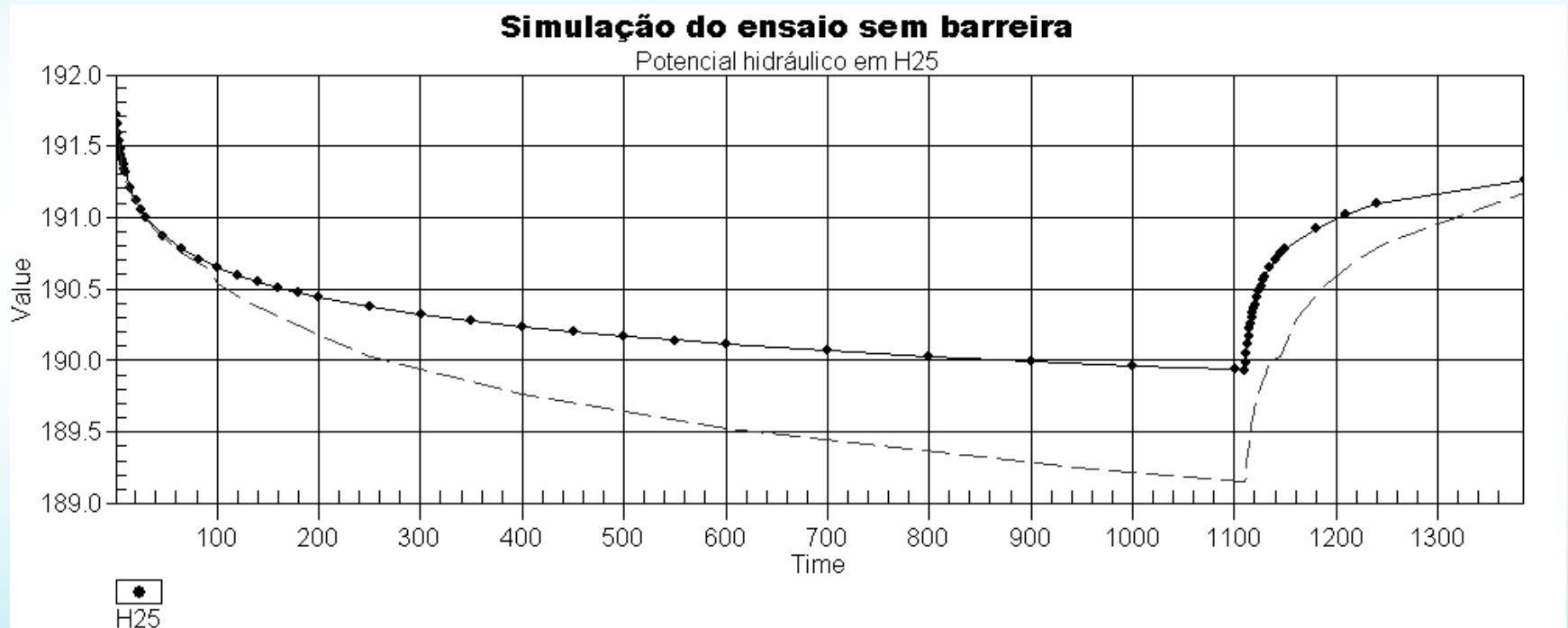
Ensaio no Casal das Boieiras

Efeito barreira



Ensaio no Casal das Boieiras

Efeito barreira

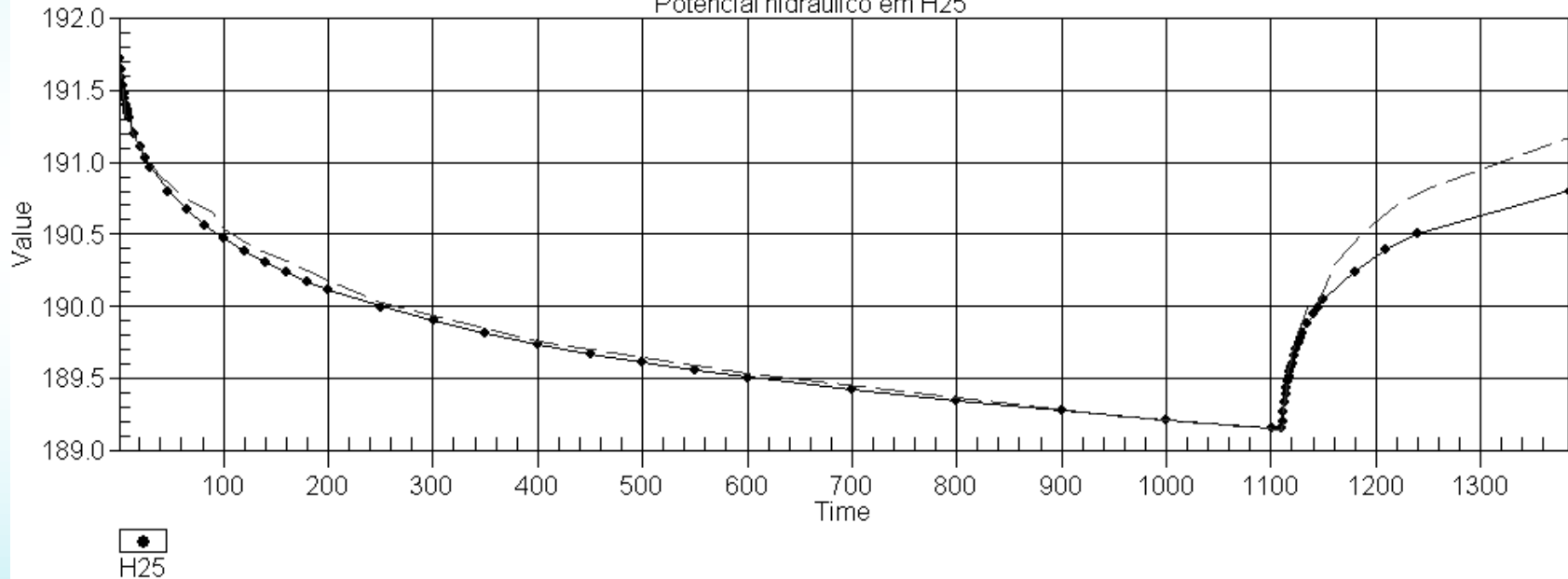


Ensaio no Casal das Boieiras

Efeito barreira

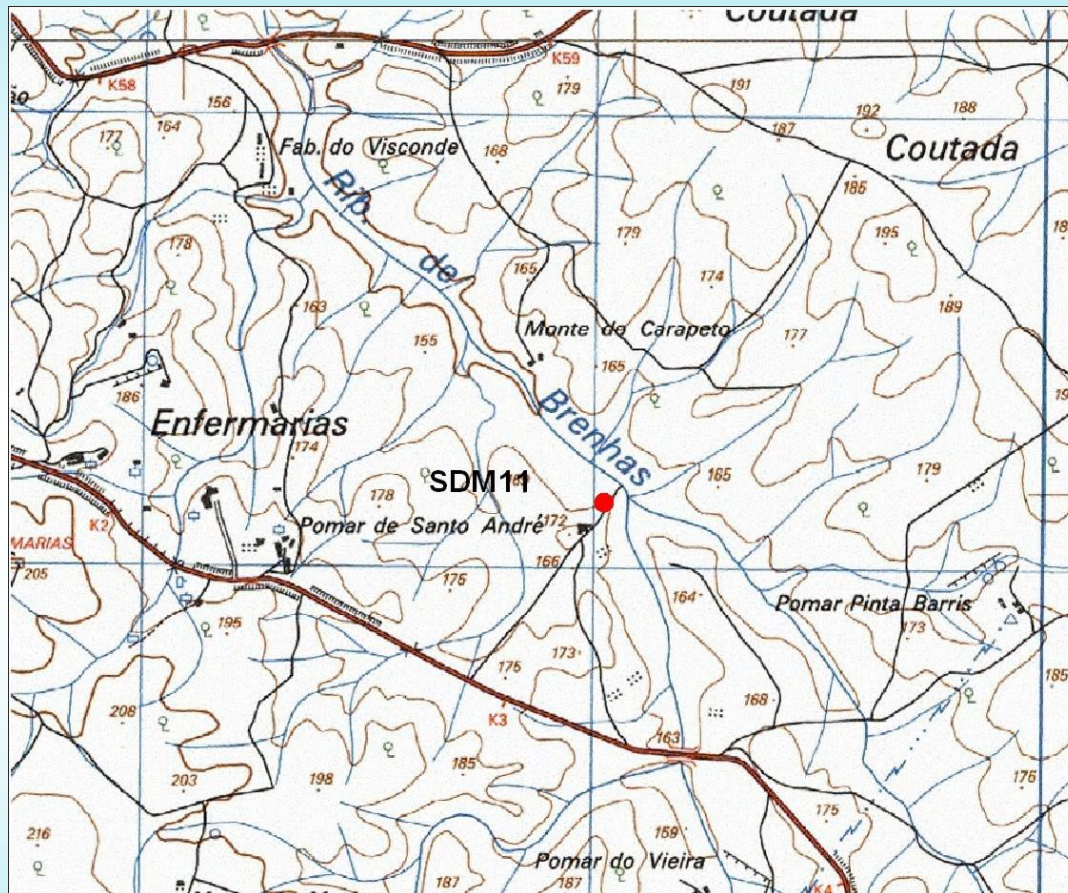
Simulação do ensaio com barreira

Potencial hidráulico em H25



Ensaio a potencial constante

(Casal de Santo André (SDM11) (Moura, Alentejo))



Nível aquífero confinado a partir dos 398 m

$\varnothing = 75.7$ mm

Rebaixamento imposto (s) = 16 m

Costa, A.M., 1988. *Ensaio de um aquífero profundo próximo de Moura, utilizando uma sondagem com artesianismo repuxante*, Comun. Serv. Geol. Portugal, t. 74, pp. 29-34.

9º Seminário sobre Águas Subterrâneas 2013



Ensaio a potencial constante

(Casal de Santo André (SDM11) (Moura, Alentejo))

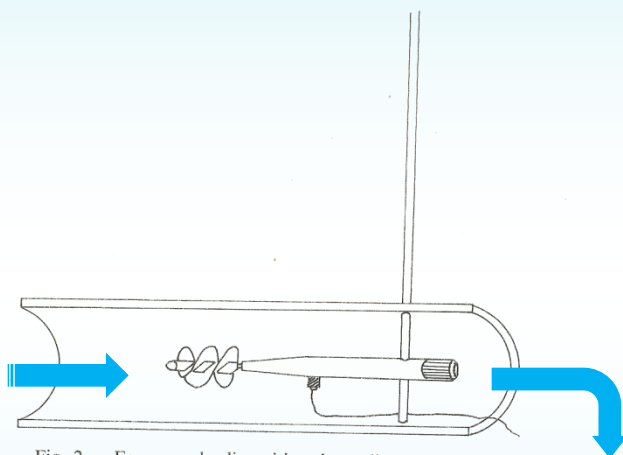


Fig. 2 — Esquema do dispositivo de medição utilizado.

QUADRO I

Resultado das medições feitas durante o ensaio

Tempo (min.)	Revoluções (em 30 s.)	Tempo (min.)	Revoluções (em 30 s.)	Tempo (min.)	Revoluções (em 30 s.)
1	620	20	574	250	546
2	596	30	569	350	535
3	588	40	567	500	529
4	587	50	564	750	511
5	584	60	562	940	504
6	584	70	563	1450	492
7	581	80	559	1800	478
8	583	90	559	2850	454
9	580	100	559	3330	445
10	580	150	548	4300	422
15	575	200	548	—	—

$$1.9 \text{ l/s} \leq Q_{\text{obs}}$$



Ensaio a potencial constante

Método de Ferris (1962)

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot d \cdot G(\alpha)$$

$$G(\alpha) = \frac{4 \cdot \alpha}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \left(x \cdot e^{-\alpha \cdot x^2} \cdot \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{Y_0(x)}{J_0(x)} \right) \right) \cdot dx$$

$$\alpha = \frac{T \cdot t}{r^2 \cdot S}$$



Ensaio a potencial constante

Método de Ferris (1962)

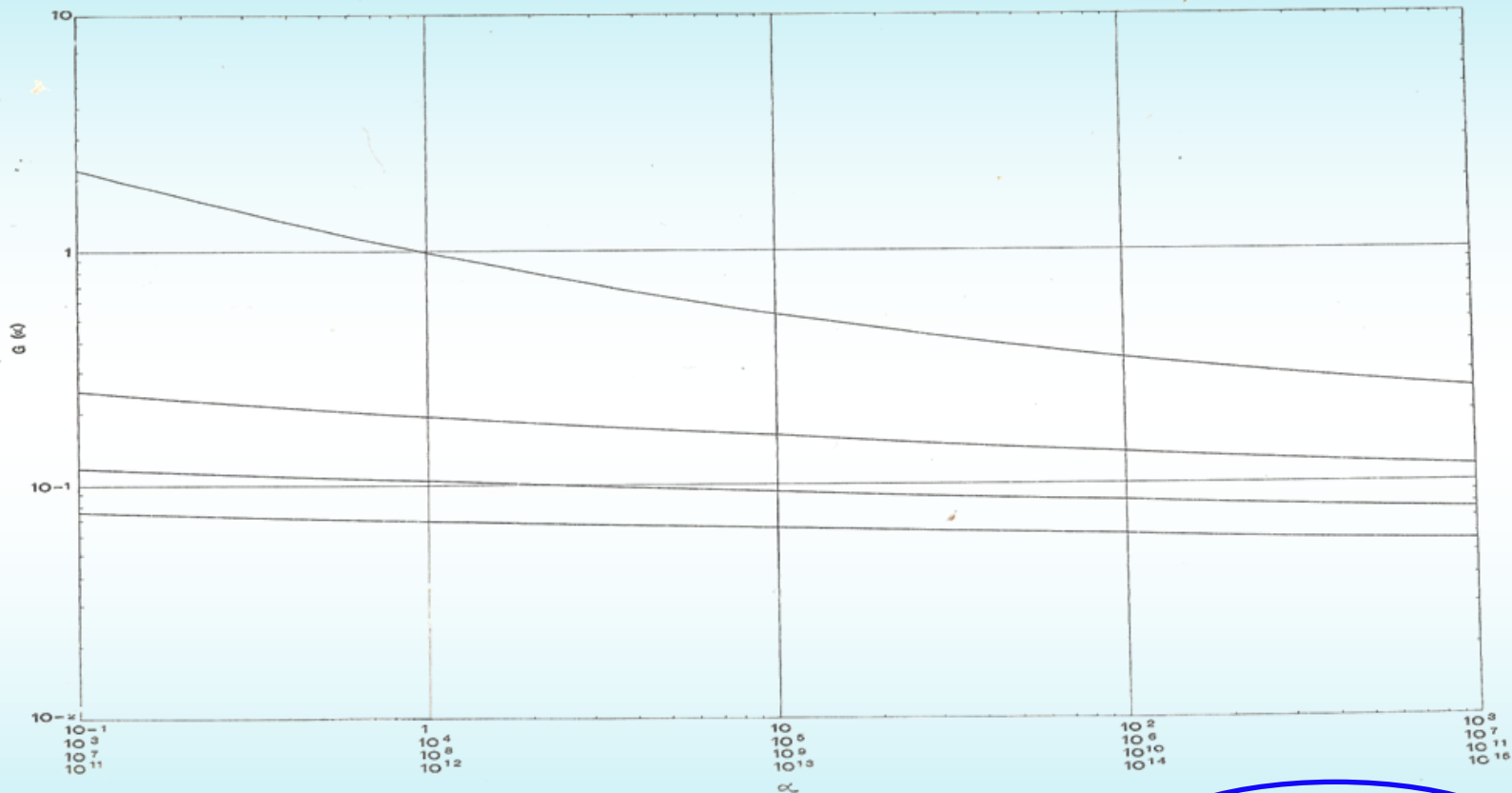
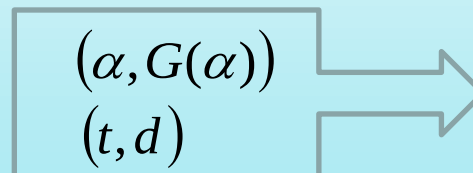


Fig. 1 — Ábaco para a obtenção de α e de $G(\alpha)$.



$$T = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot G(\alpha)}$$

$$S = \frac{T \cdot t}{r^2 \cdot \alpha}$$



Ensaio a potencial constante e caudal variável

(Casal de Santo André (SDM11) (Moura, Alentejo))

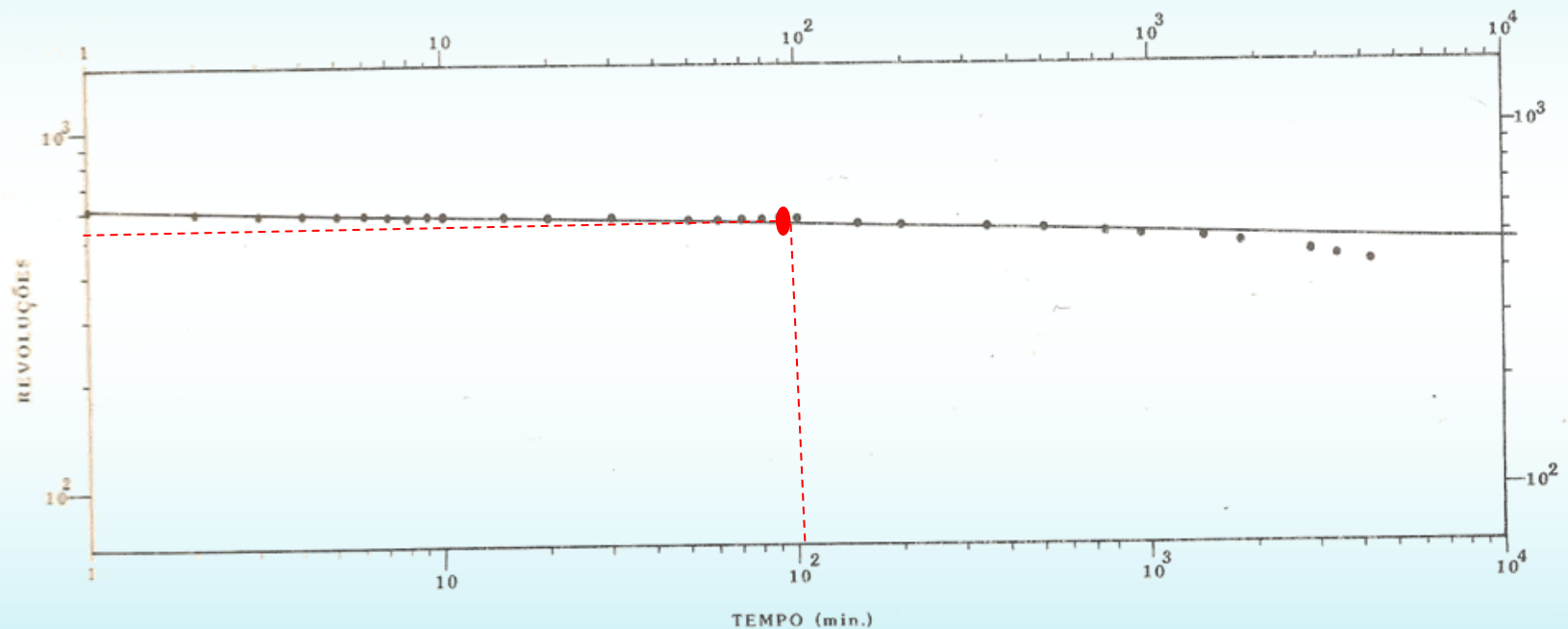


Fig. 3 — Pontos das medições feitas e troço da função $G(\alpha)$ com que estes melhor se ajustam.

$t = 100$ min.
Rev = 540

$\alpha = 10^{13}$
 $G(\alpha) = 0.066$

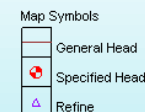
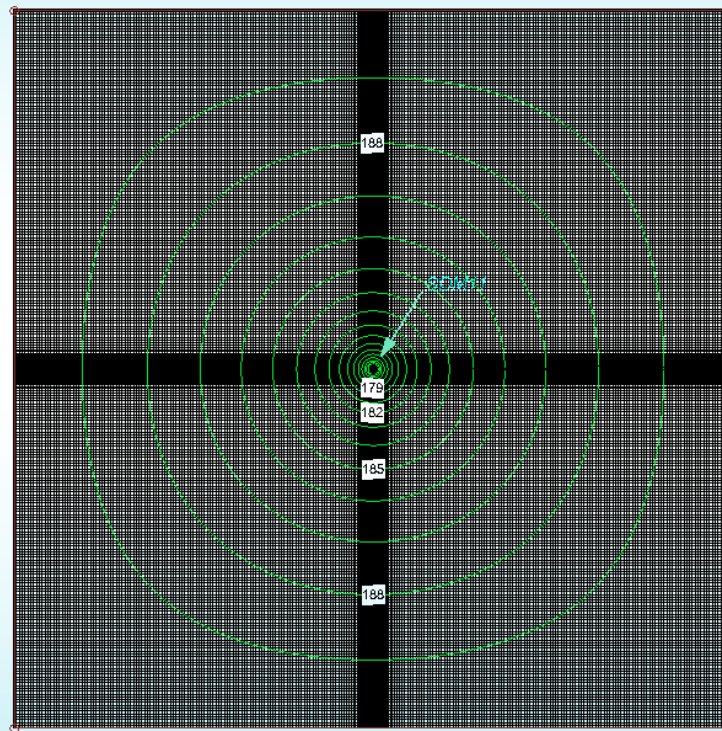
$T = 30.5$ m²/dia
S muito baixo



Ensaio a potencial constante e caudal variável

(Casal de Santo André (SDM11) (Moura, Alentejo))

$$T = 30.5 \text{ m}^2/\text{d}$$
$$Q_{\text{sim}} = 7.9 \text{ l/s}$$
$$Q_{\text{obs}} = 1.9 \text{ l/s}$$

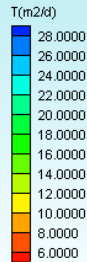


Linhas piezométricas do modelo SDM_0, em regime permanente



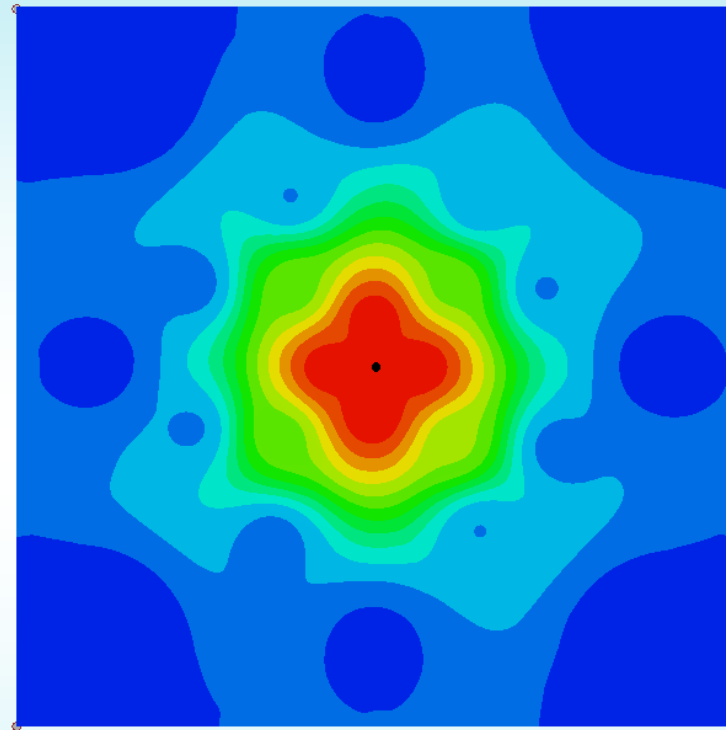
Ensaio a potencial constante e caudal variável

(Casal de Santo André (SDM11) (Moura, Alentejo)



$$30 < T < 4 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$Q_{\text{sim}} \approx Q_{\text{obs}} = 1.9 \text{ l/s}$$



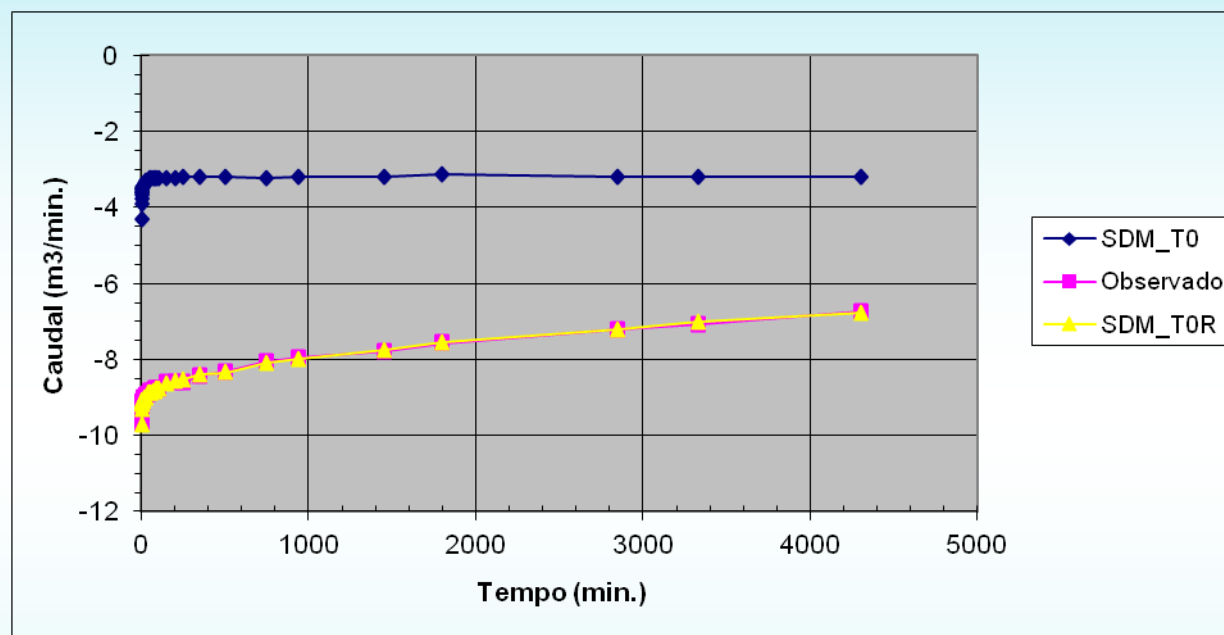
Modelo *Modflow 2000* em regime permanente

Transmissividade no domínio de simulação calculada por modelação inversa, com a técnica dos *pilot points* (*PEST*), em regime permanente **SDM_0R**



Ensaio a potencial constante e caudal variável

(Casal de Santo André (SDM11) (Moura, Alentejo))



Modelos *Modflow 2000* em regime transitório *SDM_T0* e *SDM_T0R*

Estimaram-se valores para o coeficiente de armazenamento (S) em três domínios concêntricos com a sondagem e estimou-se a condutividade hidráulica em todo o domínio de modelação com a técnica dos *pilot points*.

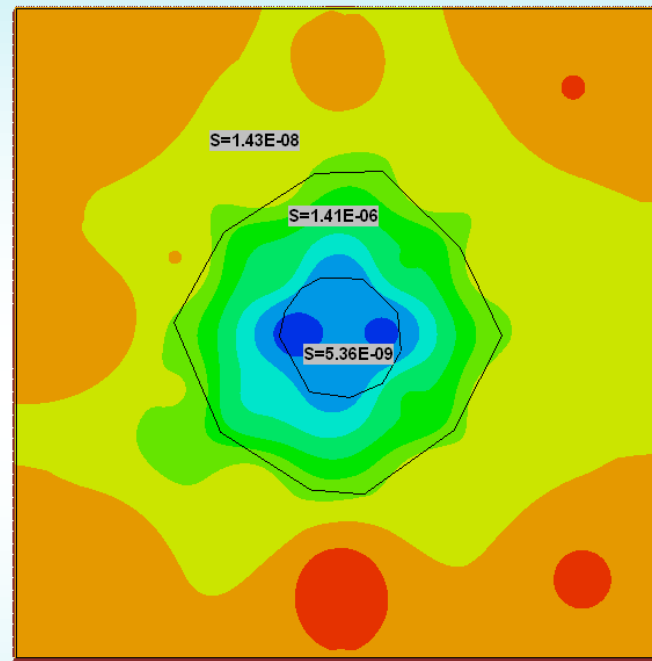


Ensaio a potencial constante e caudal variável

(Casal de Santo André (SDM11) (Moura, Alentejo))



$1 < T < 10 \text{ m}^2/\text{d}$
 $Q_{\text{sim}} \approx Q_{\text{obs}}$ ao
longo do ensaio



Modelo *Modflow 2000* em regime transitório
***SDM_T0R* calibrado com os caudais medidos**

Estimaram-se valores para o coeficiente de armazenamento (S) em três domínios concêntricos com a sondagem e estimou-se a transmissividade em todo o domínio de modelação com a técnica dos *pilot points*.



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

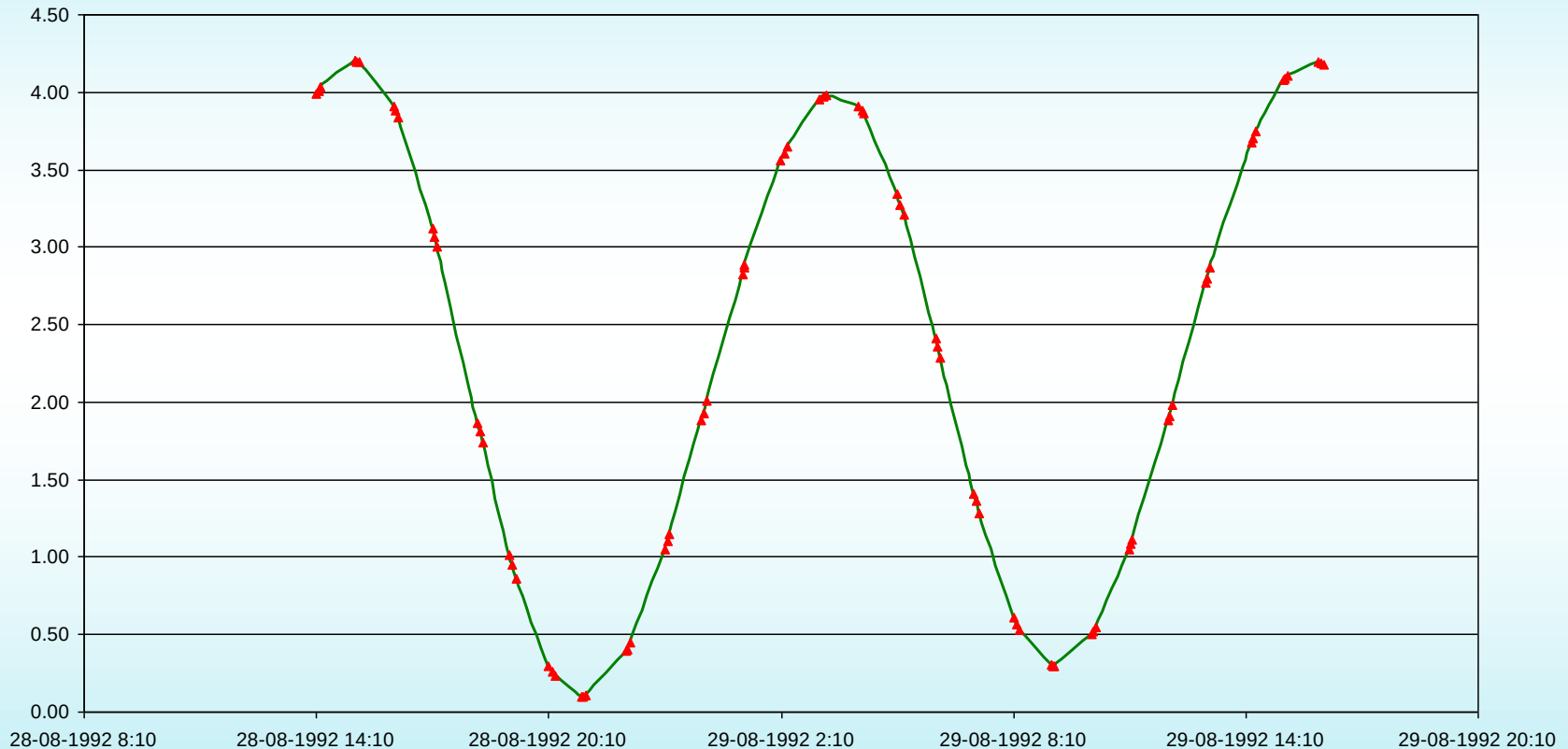
Ensaio de maré

- Em que se utiliza a variação sinusoidal da altura de maré como excitação conhecida do sistema.
- Monitorizam-se os níveis piezométricos durante vários ciclos de maré em furos próximos da massa de água superficial.



Dos ensaios de aquífero aos modelos de simulação de fluxo

ALTURAS DE MARÉ



$$y = \frac{H + h}{2} + \frac{H - h}{2} \cdot \cos \frac{\pi \cdot t}{T}$$

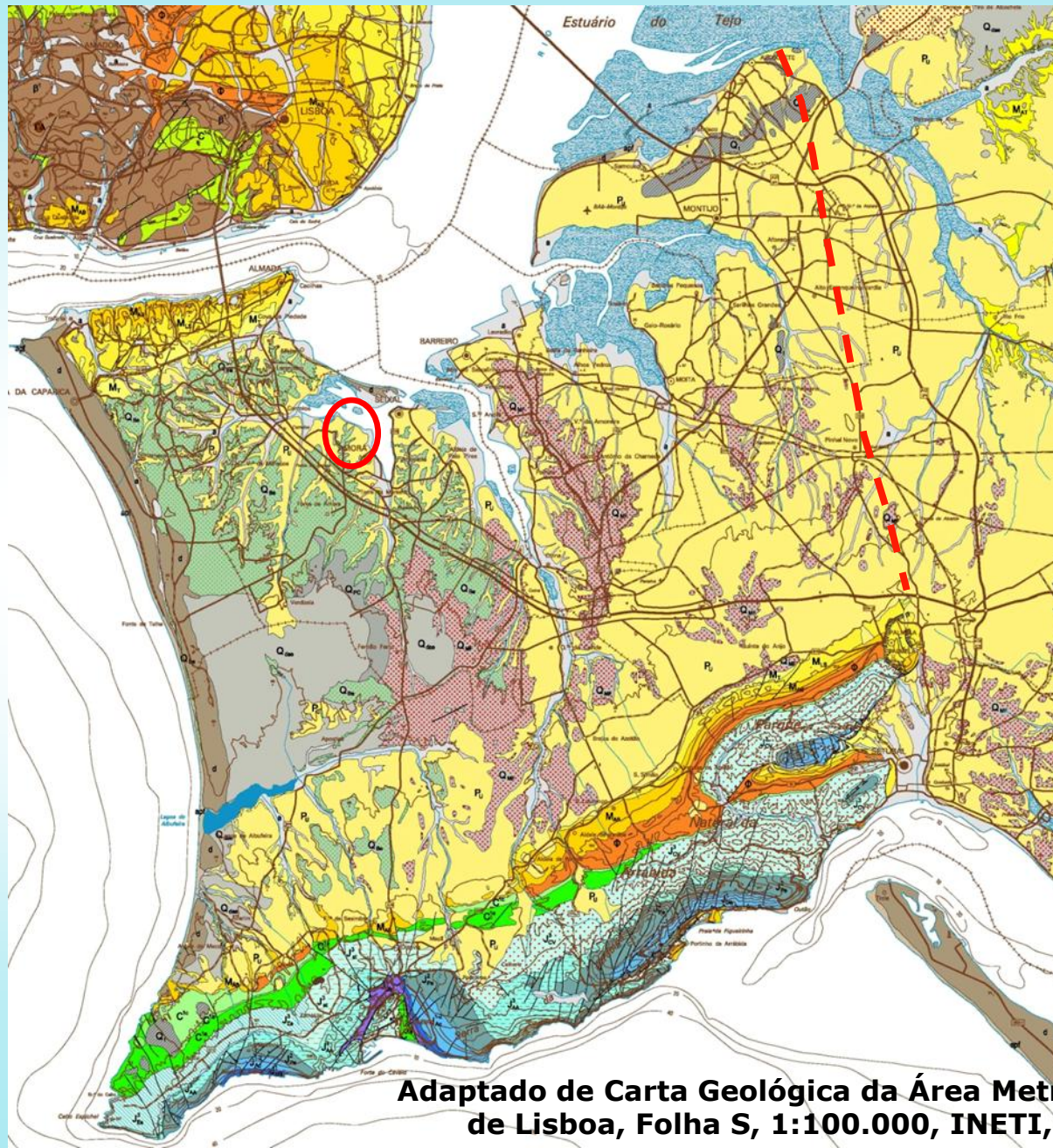
(em descida)

$$y = \frac{H + h}{2} + \frac{h - H}{2} \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot t}{T} \right)$$

(em subida)



Enquadramento Geológico da zona de trabalho



Adaptado de Carta Geológica da Área Metropolitana de Lisboa, Folha S, 1:100.000, INETI, 2005



Localização da Quinta da Barroca e de furos



Descargas naturais do aquífero freático



LFWS -1936 (Quinta da Barroca)



Inventário Hidrogeológico

Nº de inventário	M m	P m	Profundidade m	T (ág) oC	Condutividade eléc. $\mu\text{S/cm}$	Nível estático (m)(c)	pH	AQUÍFERO
F4	114.013	186.110	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)	-
F3	114.024	186.107	16,3(a)	21,0	381	2,65	6,24	1A
F6	113.716	186.080	20	23,6	386	5,75	6,05	1A
F7	113.820	186.134	17	23,1	381	4,40	6,16	1A
P1	114.185	185.980	3-4	21,9	309	1,47	6,95	1A
 F5	114.010	186.120	61,9(a)	22,5	369	1,79	5,85	1B
F1	114.165	185.932	45	24,4	314	(b)	5,57	1B
F2	114.096	185.982	45	25,4	332	(b)	5,69	1B
 TD1	114.018	186.067	164,04	(b)	(b)	14,70	(b)	2
 TD2	113.980	186.060	107,50	22,7	343	13,90	7,30	2

Freático

Semi-cativo

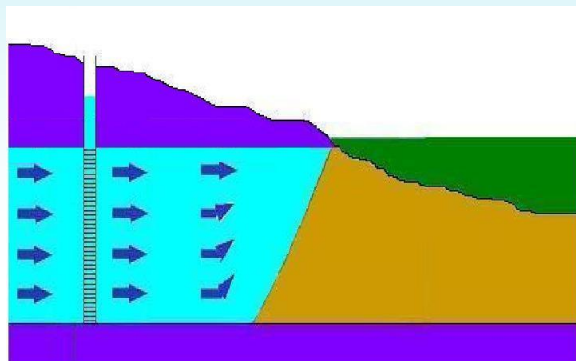
Cativo

Adaptado de Relatório dos SGP de Moitinho de Almeida



Variação piezométrica em aquíferos costeiros

Aquífero cativo, semi-infinito, em comunicação hidráulica com o estuário:



$$\Delta h = H_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi \cdot x^2 \cdot S}{t_0 \cdot T}}} \cdot \text{sen} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_0} - \sqrt{\frac{p \cdot x^2 \cdot S}{t_0 \cdot T}} \right)$$

Jacob, 1950 e Ferris, 1951

em que:

H_0 - semi-amplitude da oscilação de maré

Δh - variação do nível piezométrico do aquífero em relação à sua posição média

t_0 - período da maré

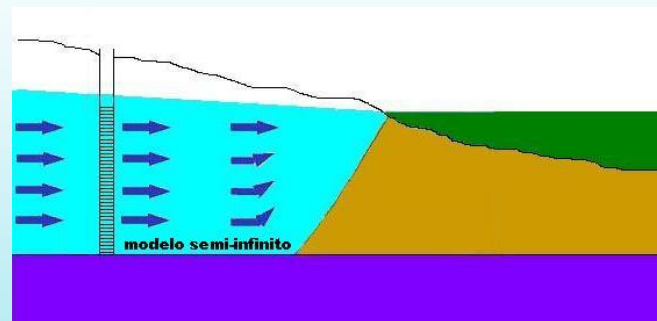
x - distância à ligação entre o aquífero e o mar

S - coeficiente de armazenamento do aquífero

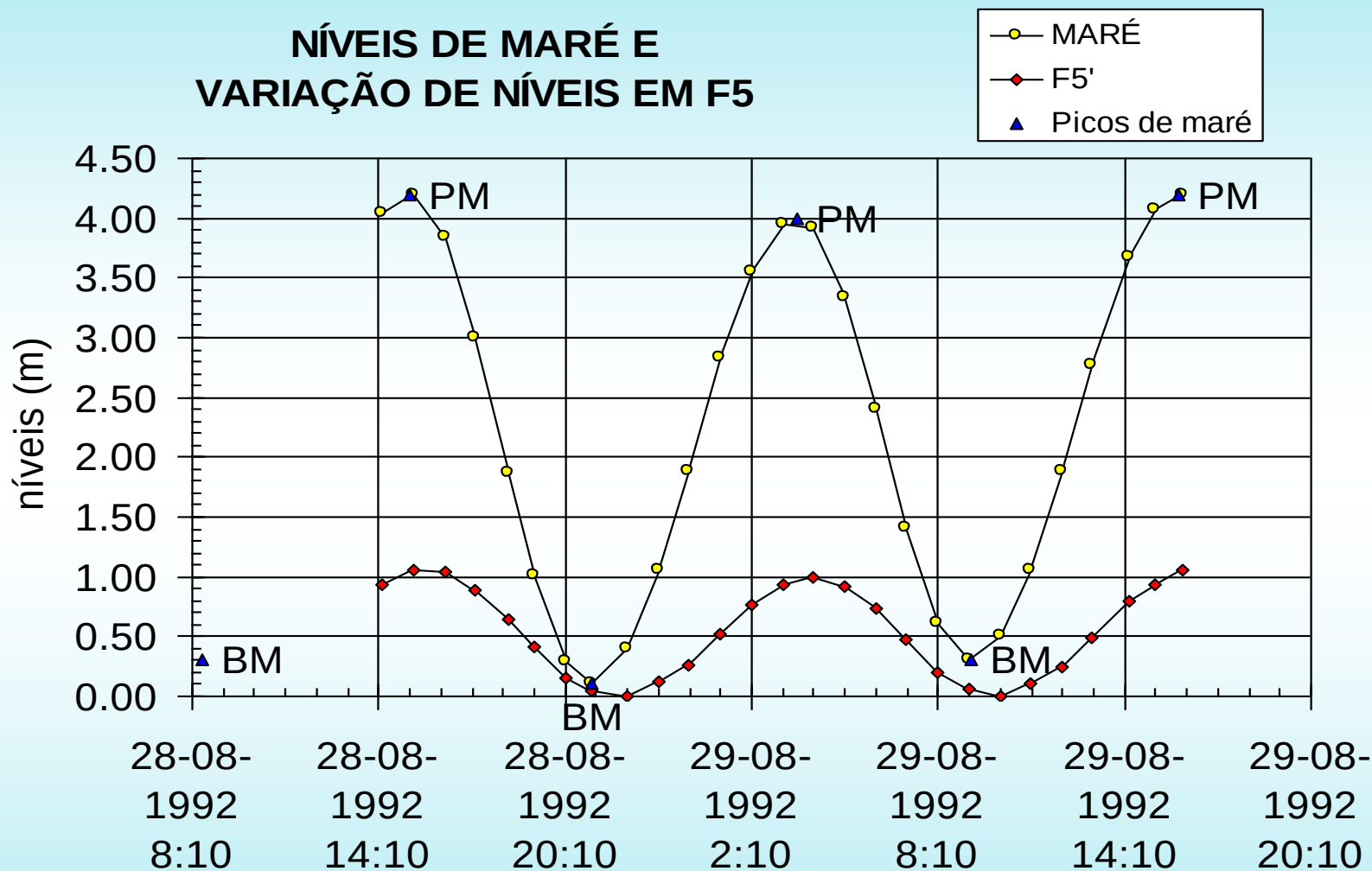
T - transmissividade do aquífero

t - tempo

Aquífero livre →



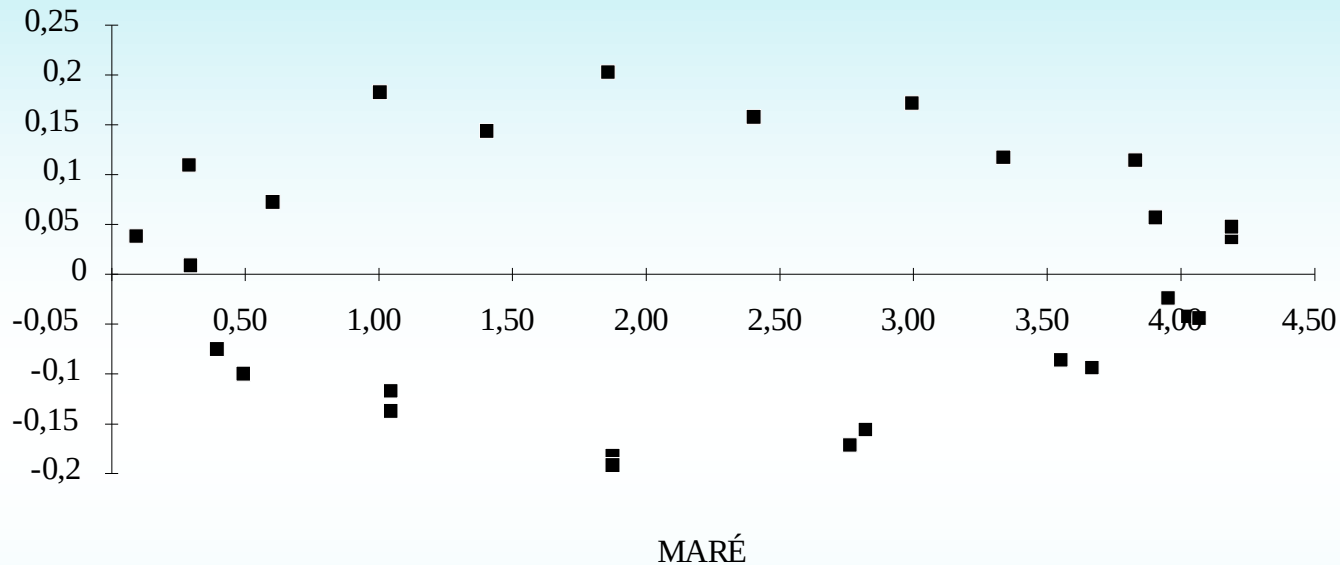
Variação piezométrica em F5 e alturas de maré



Interpretação por regressão linear (F5)

Resíduos da equação de regressão

furo F5



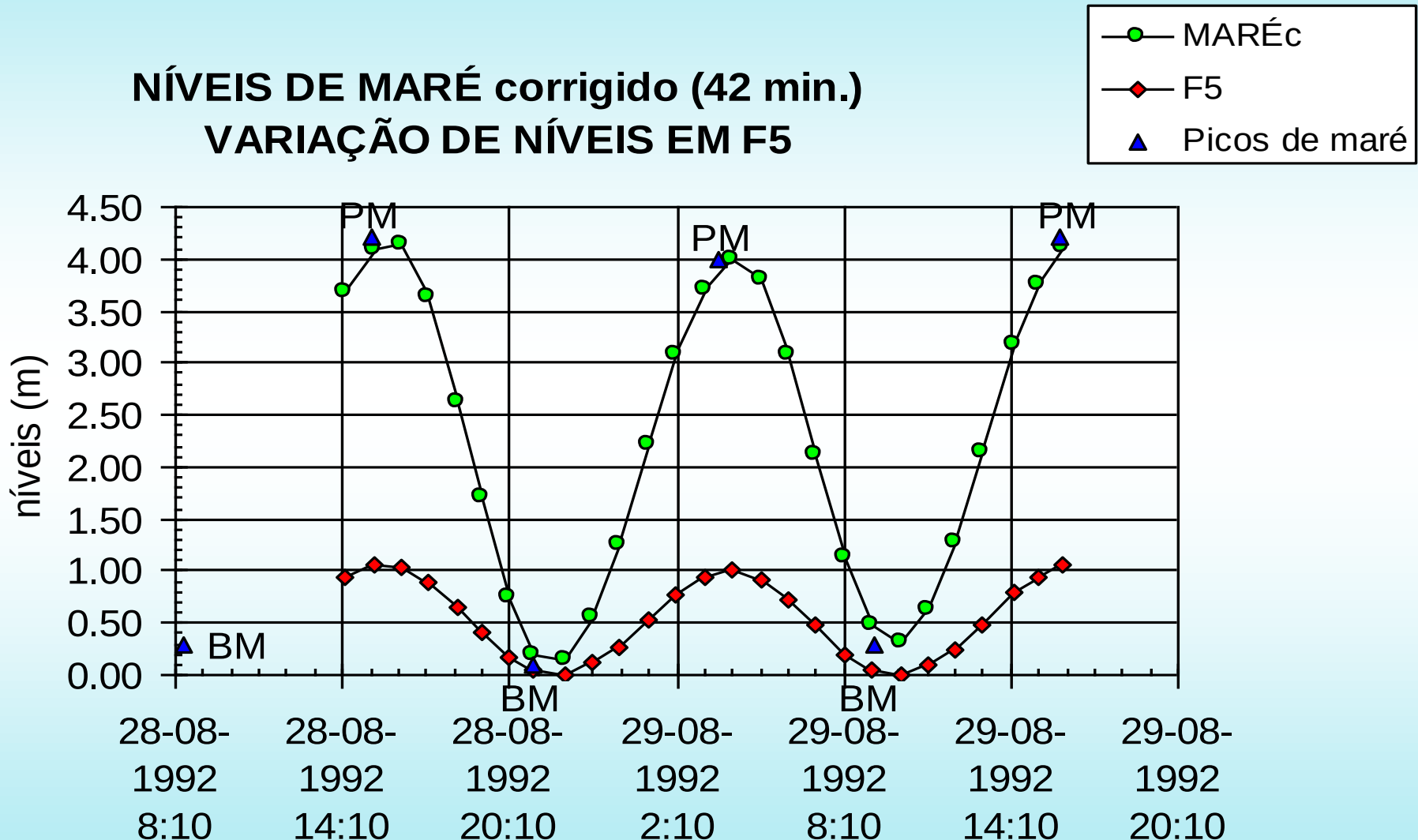
$$y = -0,02121 + 0,246888 \cdot x$$

Coef. de Correlação de Pearson: 0,946199



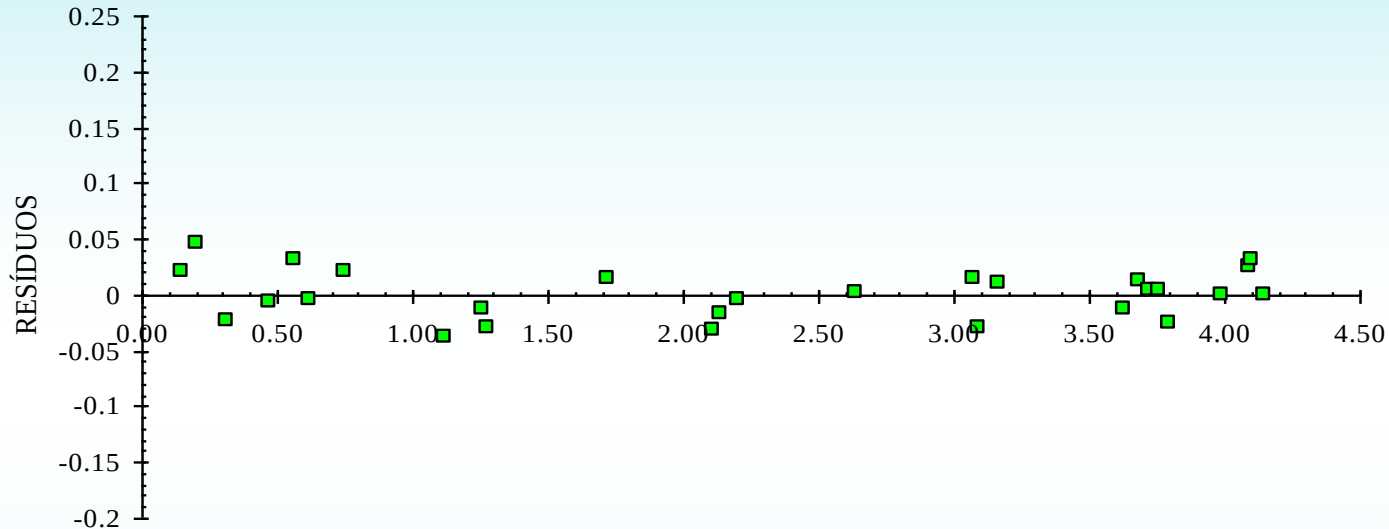
Interpretação por regressão linear (F5)

NÍVEIS DE MARÉ corrigido (42 min.)
VARIAÇÃO DE NÍVEIS EM F5



Interpretação por regressão linear (F5)

RESÍDUOS DA REGRESSÃO LINEAR PARA F5
com a função de maré convertida (42 min.)



$$y = -0,05991 + 0,265216 \cdot x$$

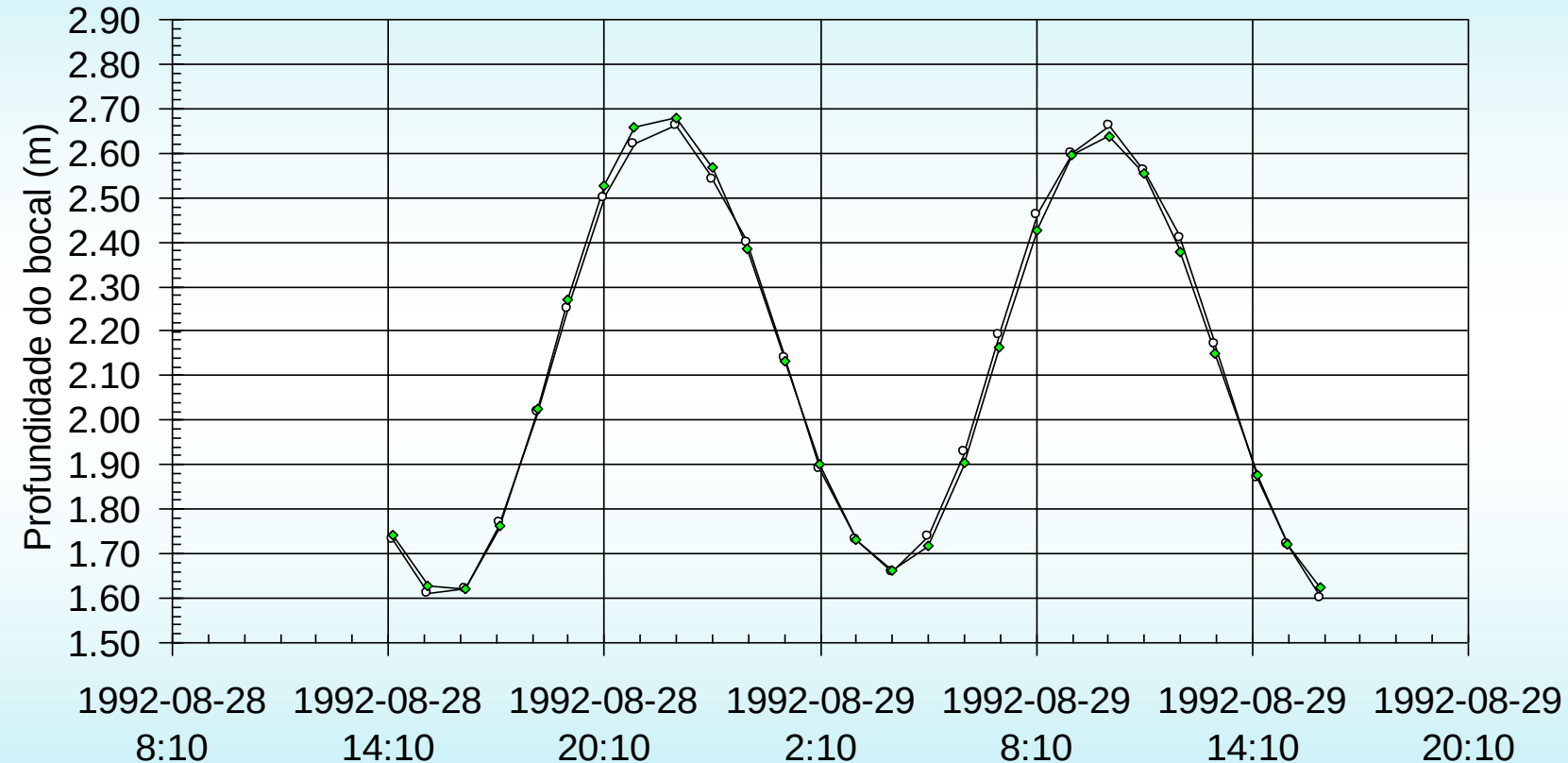
Coef. de Correlação de Pearson: 0,998365



Interpretação por regressão linear (F5)

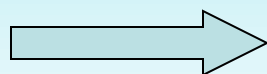
MODELO DE REGRESSÃO LINEAR PARA O FURO F5
c/ atraso de 42 minutos

—○— Níveis medidos
—◆— Níveis previstos



Interpretação hidráulica de F5

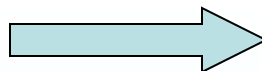
$$h_0 = H_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi \cdot x^2 \cdot S}{t_0 \cdot T}}}$$



$$D = \frac{\pi \cdot x^2}{t_0 \cdot \left[\ln \left(\frac{H_0}{h_0} \right) \right]^2}$$

$$D = T/S$$

$$t_e = \sqrt{\frac{t_0 \cdot x^2 \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot T}}$$



$$D = \frac{t_0 \cdot x^2}{4 \cdot \pi \cdot t_e^2}$$

A difusividade hidráulica (D) pode ser calculada a partir do amortecimento da amplitude e a partir do atraso, dos movimentos das duas massas de água.



Interpretação hidráulica de F5

Dados de F5:

$$x = 70 \text{ m}$$

$$H_0 = 1,95 \text{ m}$$

$$h_0 = 0,50 \text{ m}$$

$$t_0 = 53,33333 \times 10^{-2} \text{ dias}$$

$$t_e = 2,916666 \times 10^{-2} \text{ dia} (= 42 \text{ minutos})$$

Resultados:

$$D1 = 15.583 \text{ m}^2/\text{dia}$$

$\neq$

$$D2 = 244.418 \text{ m}^2/\text{dia}$$

Conclusão:

É necessário modificar o modelo conceptual, considerando a hipótese de haver drenância, sendo então um sistema semi-infinito e semicativo.



Caracterização hidráulica do aquífero 1 – F5

ρ Parâmetro que reflecte a importância da drenância no amortecimento do movimento do nível piezométrico.

$$\Delta h = H_0 \cdot e^{-\rho \sqrt{\frac{\pi \cdot x^2 \cdot S}{t_0 \cdot T}}} \cdot \text{sen} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_0} - \frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot x^2 \cdot S}{t_0 \cdot T}} \right)$$

$$\rho \neq 0 \quad \rho = \sqrt{t_0 \cdot \frac{|\ln(h_0/H_0)|}{2 \cdot \pi \cdot t_e}}$$



$$\rho = 1.99...$$



Caracterização hidráulica do aquífero 1 – F5

Resultados obtidos para o furo F5:

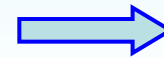
$$\rho = 1,990175393$$

$$D = 61.720 \text{ m}^2/\text{dia}$$

$$B = 53,155710 \text{ m (53 m)}$$

Apesar de o efeito de maré nos aquíferos ser um fractal ...

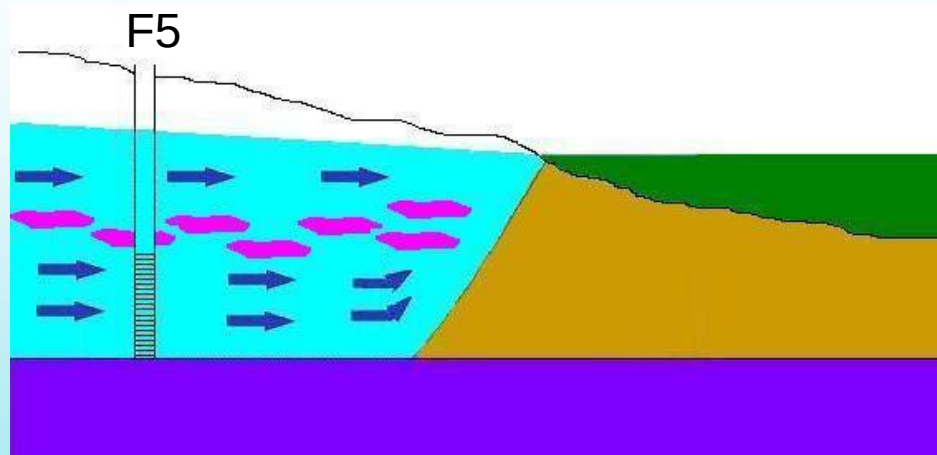
$$T = 50-70 \text{ m}^2/\text{dia}$$



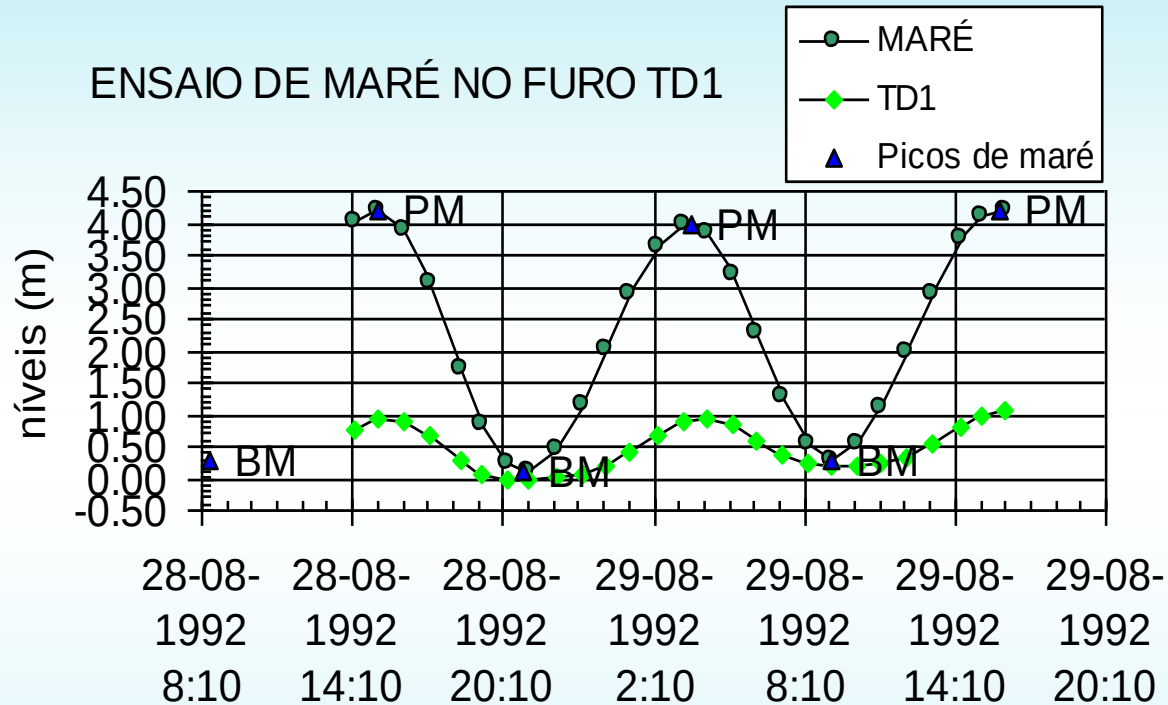
$$S = 10^{-3}$$

Conclusão:

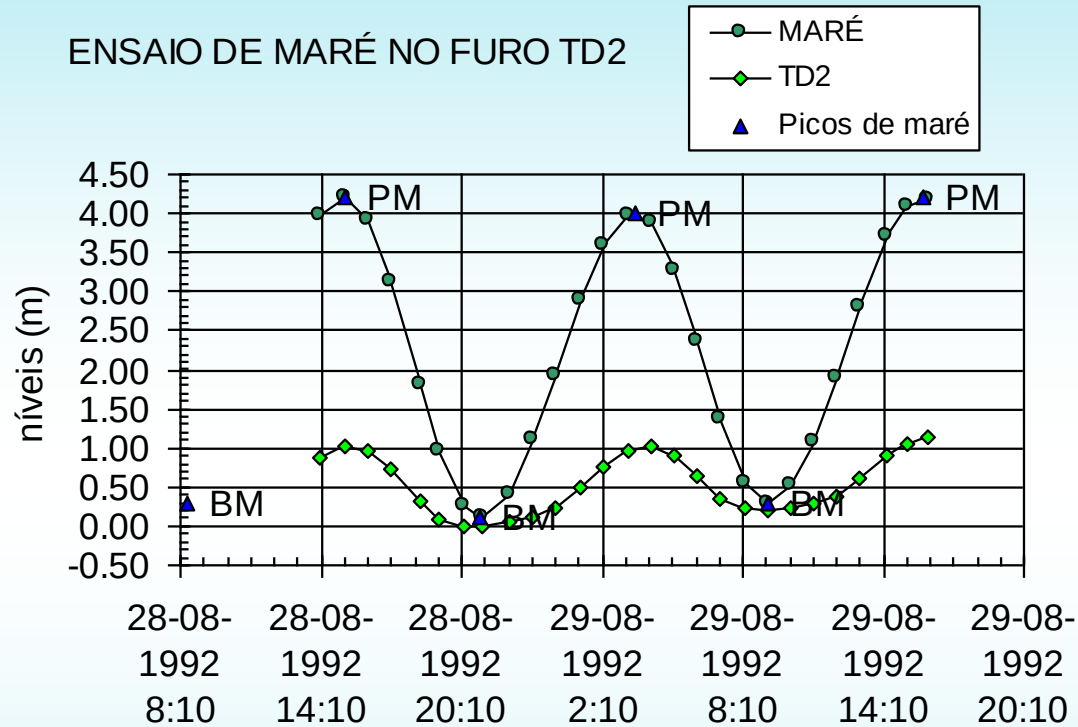
Trata-se de um sistema semi-infinito e semicativo.



Níveis de maré e do furo TD1

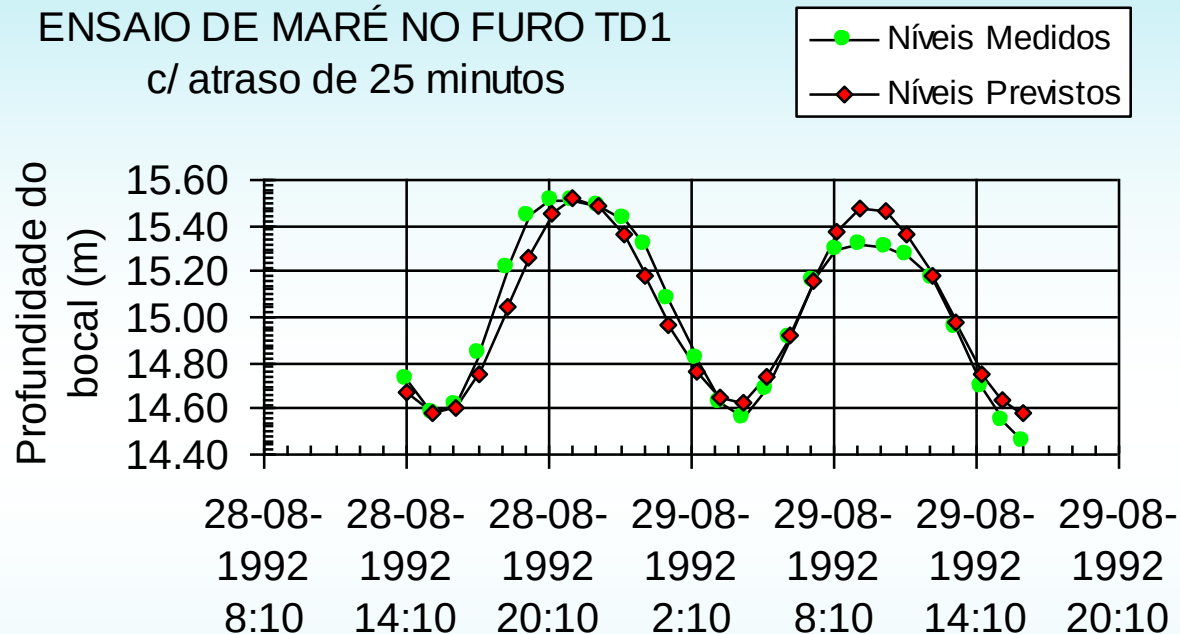


Níveis de maré e do furo TD2



Interpretação por regressão linear (TD1)

ENSAIO DE MARÉ NO FURO TD1
c/ atraso de 25 minutos

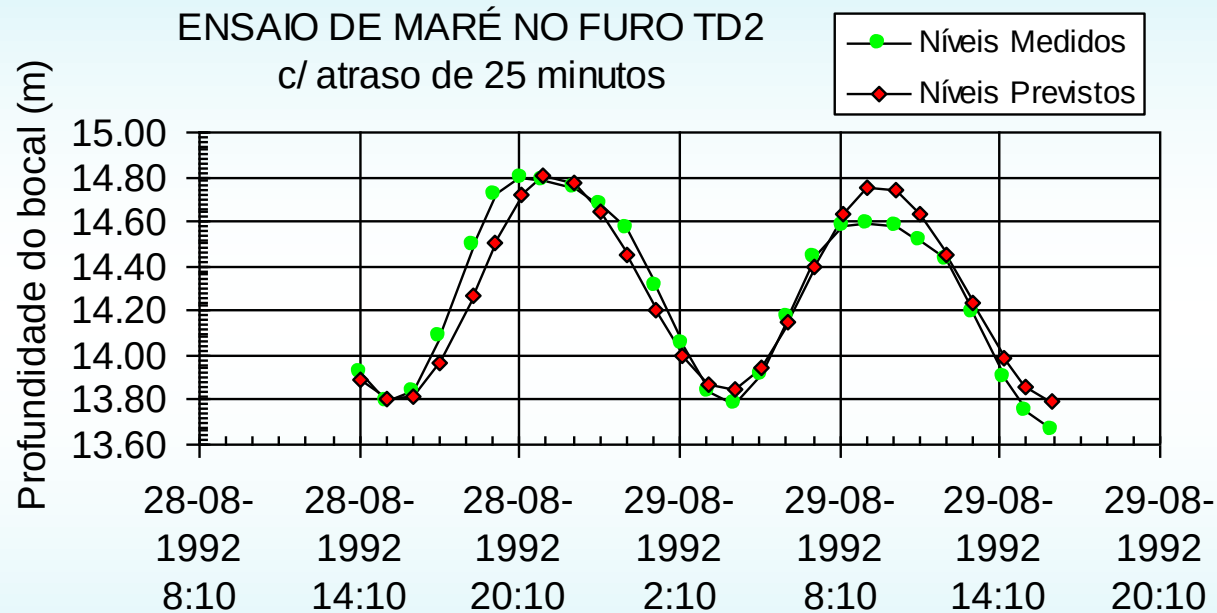


$$y = 15,55263 - 0,23182 x$$

Coef. Correl. Pearson = 0,9664



Interpretação por regressão linear (TD2)



$$y = 14,83678 - 0,2492 x$$

Coef. Correl. Pearson = 0,9634



Hipótese de o aquífero 2 ser semi-infinito (TD1 e TD2)

Dados de TD1 e TD2:

$$x = 130 \text{ m}$$

$$H_0 = 1,95 \text{ m}$$

$$h_0 = 0,48 \text{ m}$$

$$t_0 = 53,33333 \times 10^{-2} \text{ dias}$$

$$t_e = 1,736111 \times 10^{-2} \text{ dias (25 minutos)}$$

Resultados:

$$D1 = 50.660 \text{ m}^2/\text{dia}$$

$\neq$

$$D2 = 2.379.690 \text{ m}^2/\text{dia}$$

Conclusão:

É necessário modificar o modelo conceptual, considerando a hipótese de haver drenância, isto é, a hipótese de se tratar de um sistema semi-infinito e semicativo.



Hipótese de o aquífero 2 ser semicativo (TD1 e TD2)

ρ Parâmetro que reflecte a importância da drenância no amortecimento do movimento do nível piezométrico.

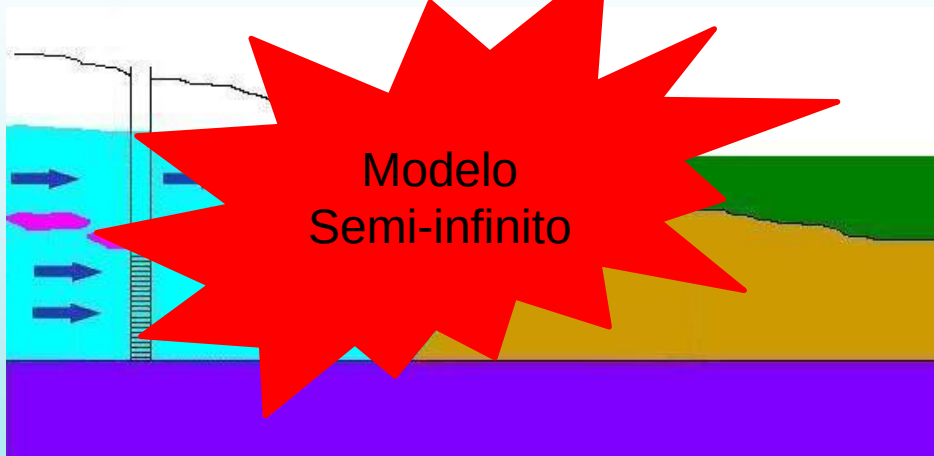
$$\Delta h = H_0 \cdot e^{-\rho \sqrt{\frac{\pi \cdot x^2 \cdot S}{t_0 \cdot T}}} \cdot \text{sen} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_0} - \frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot x^2 \cdot S}{t_0 \cdot T}} \right)$$

$$\rho \neq 0 \quad \rho = \sqrt{t_0 \cdot \frac{|\ln(h_0/H_0)|}{2 \cdot \pi \cdot t_e}}$$

$$\rho = 0.999981$$



Não existe drenância



Interpretação hidráulica de TD1 e TD2

Aquífero confinado de extensão infinita sem comunicação hidráulica com a massa de água superficial:

Eficiência de maré:

$$EM = \frac{h_0}{H_0} \cdot e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot t_e}{t_0}}$$

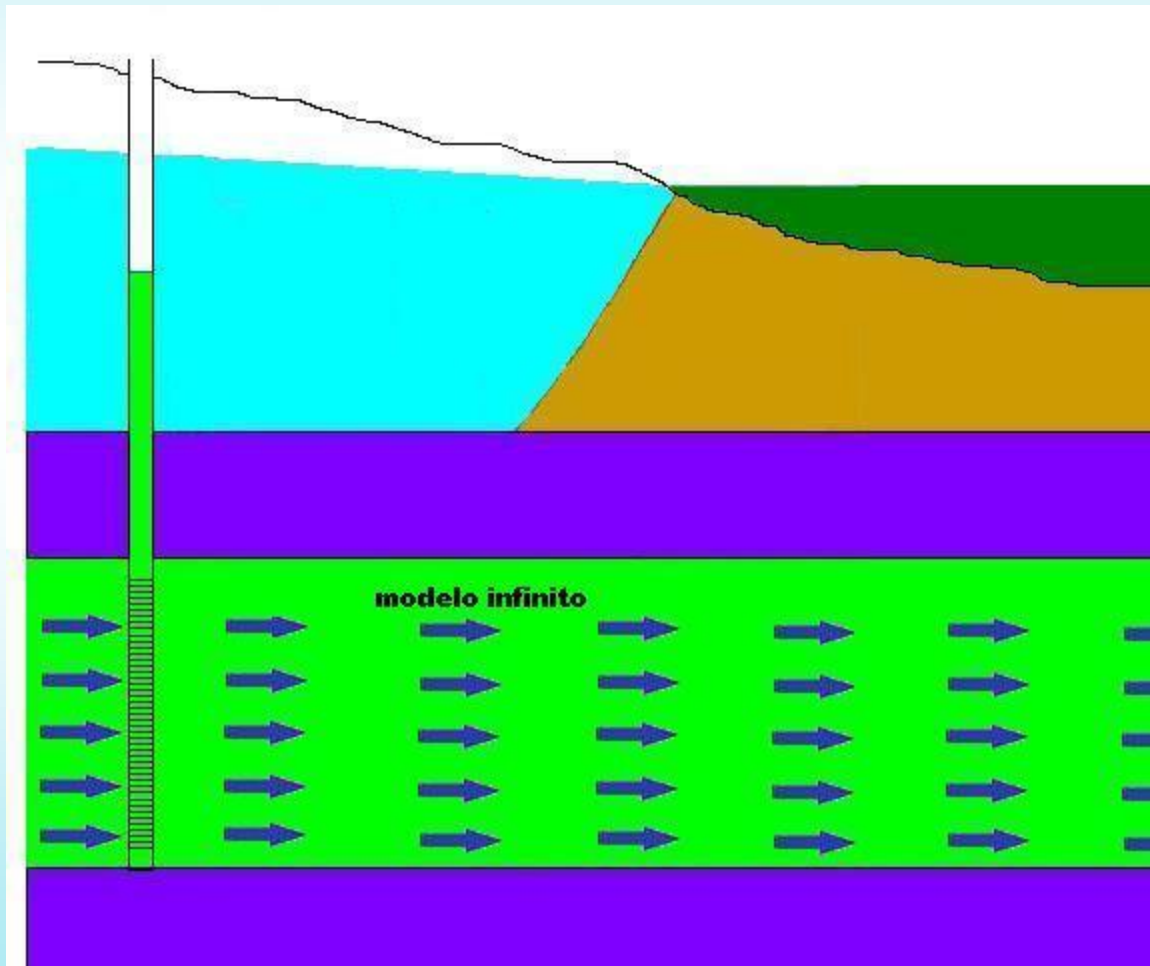
$$D = \frac{\pi \cdot x^2}{t_0 \cdot \left[\ln \left(\frac{H_0 \cdot EM}{h_0} \right) \right]^2} \quad \longrightarrow \quad D = \frac{t_0 \cdot x^2}{4 \cdot \pi \cdot t_e^2}$$

$$EM = 0.3020182673$$
$$D = 2\,379\,690 \text{ m}^2/\text{dia}$$



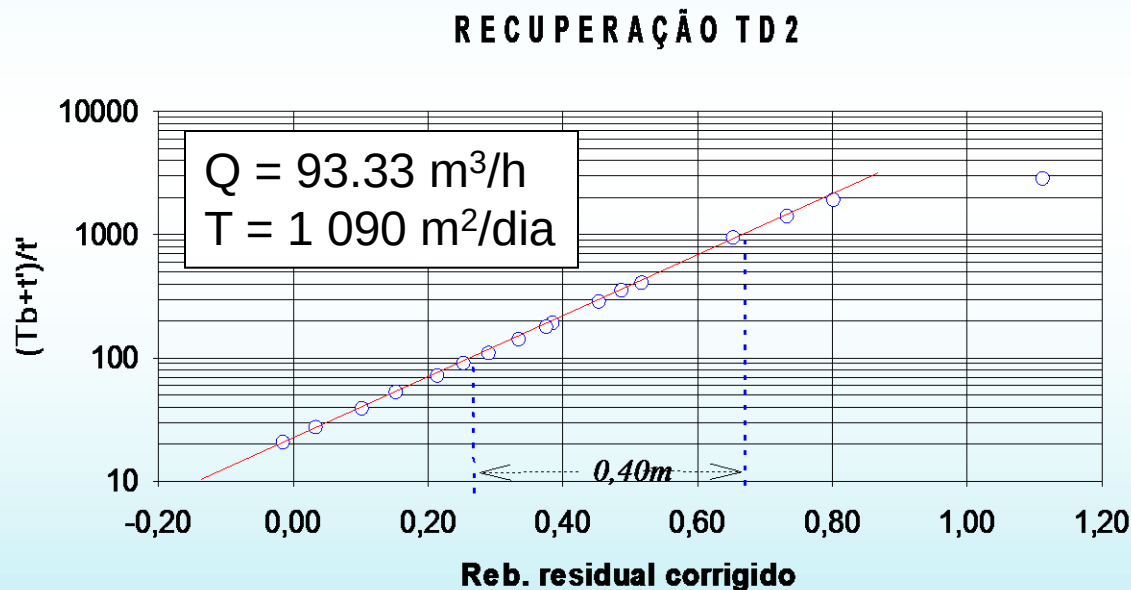
Modelo do aquífero 2

Aquífero confinado de extensão infinita sem comunicação hidráulica com a massa de água superficial:



Caracterização hidráulica do aquífero 2

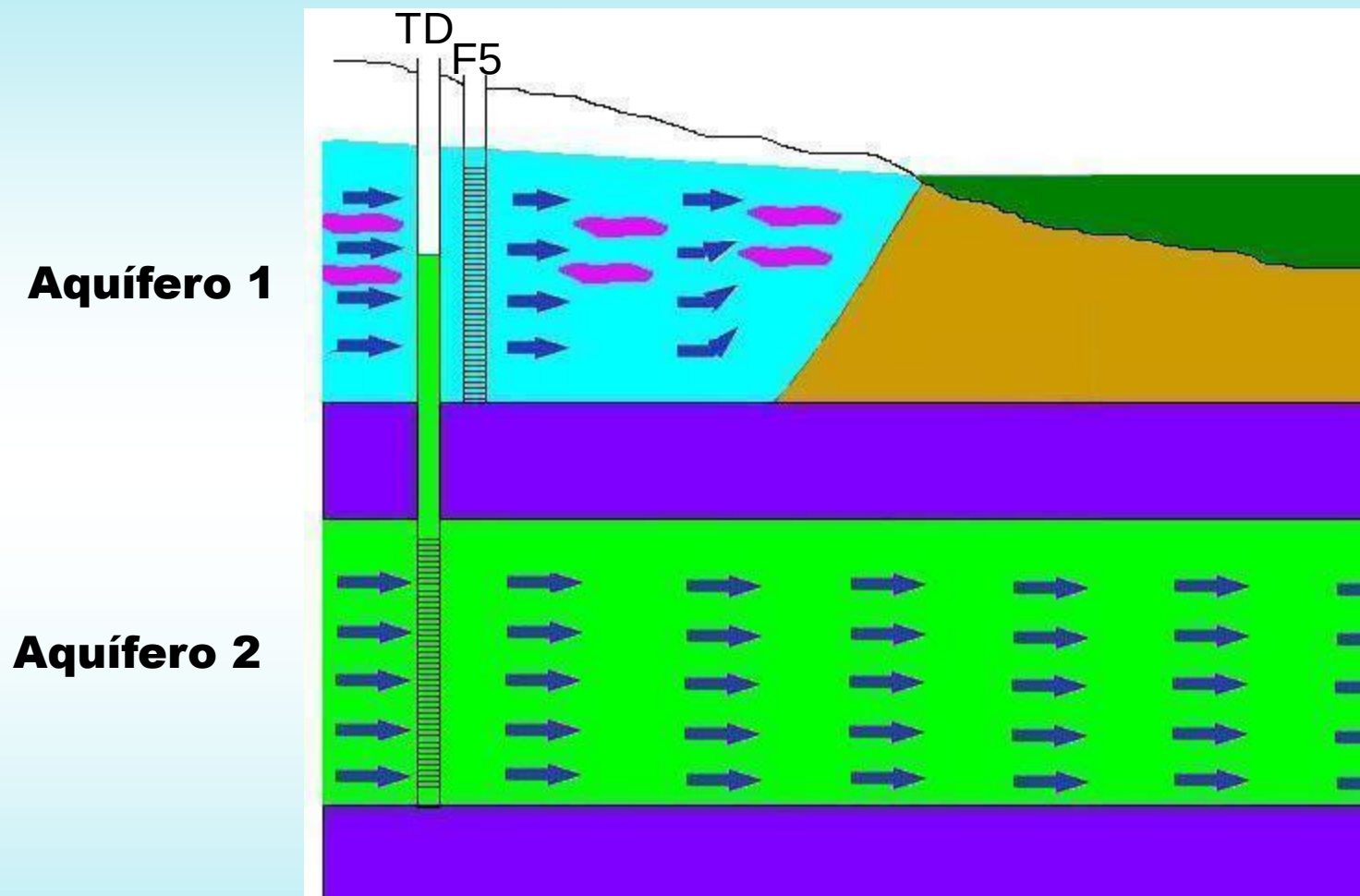
Apesar de o efeito de maré nos aquíferos ser um fractal ...
utilizando a transmissividade calculada a partir do ensaio de
recuperação:



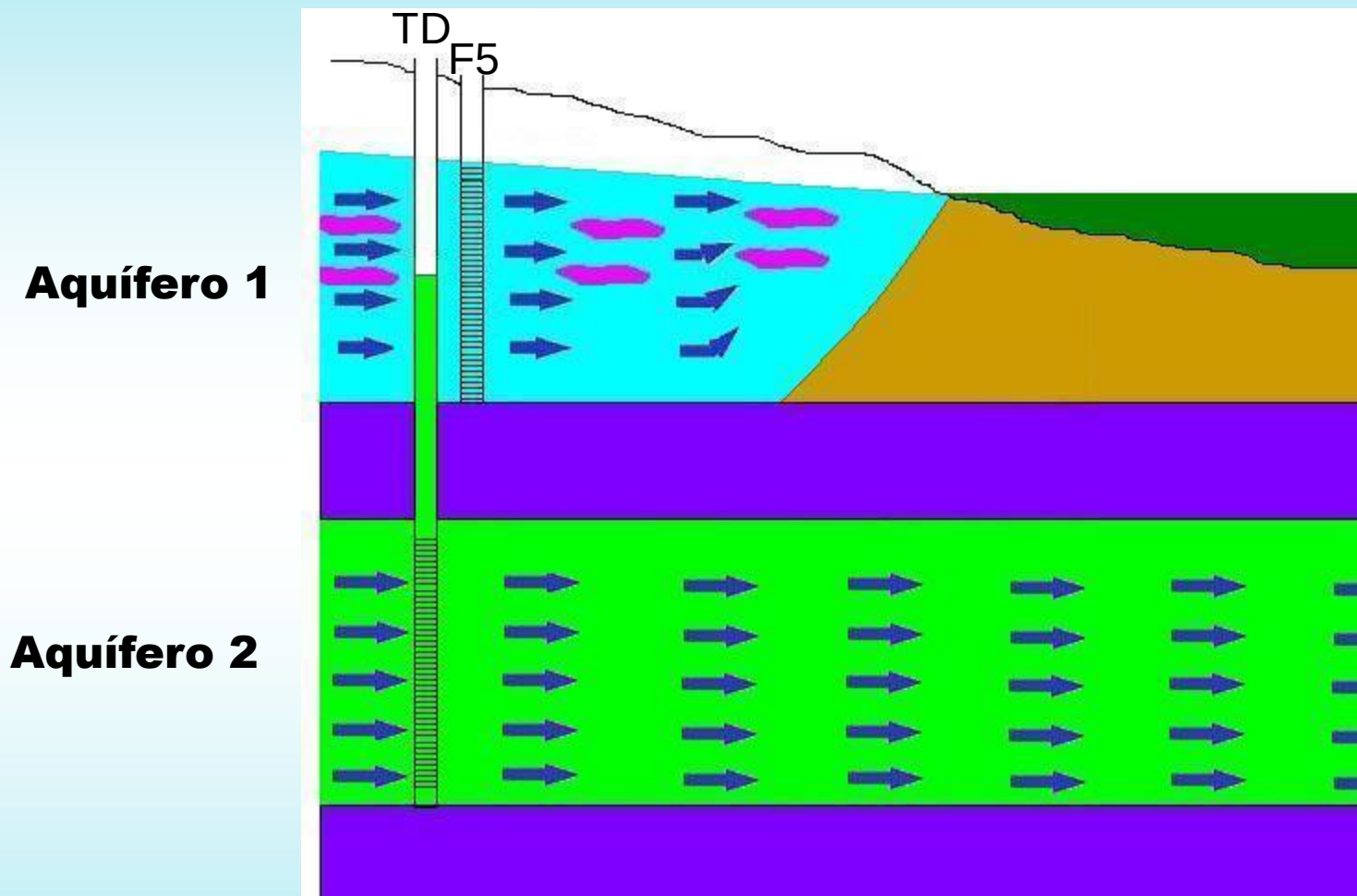
$$S = 4.58 \times 10^{-4}$$



Preia mar



Baixa mar



AQUÍFEROS

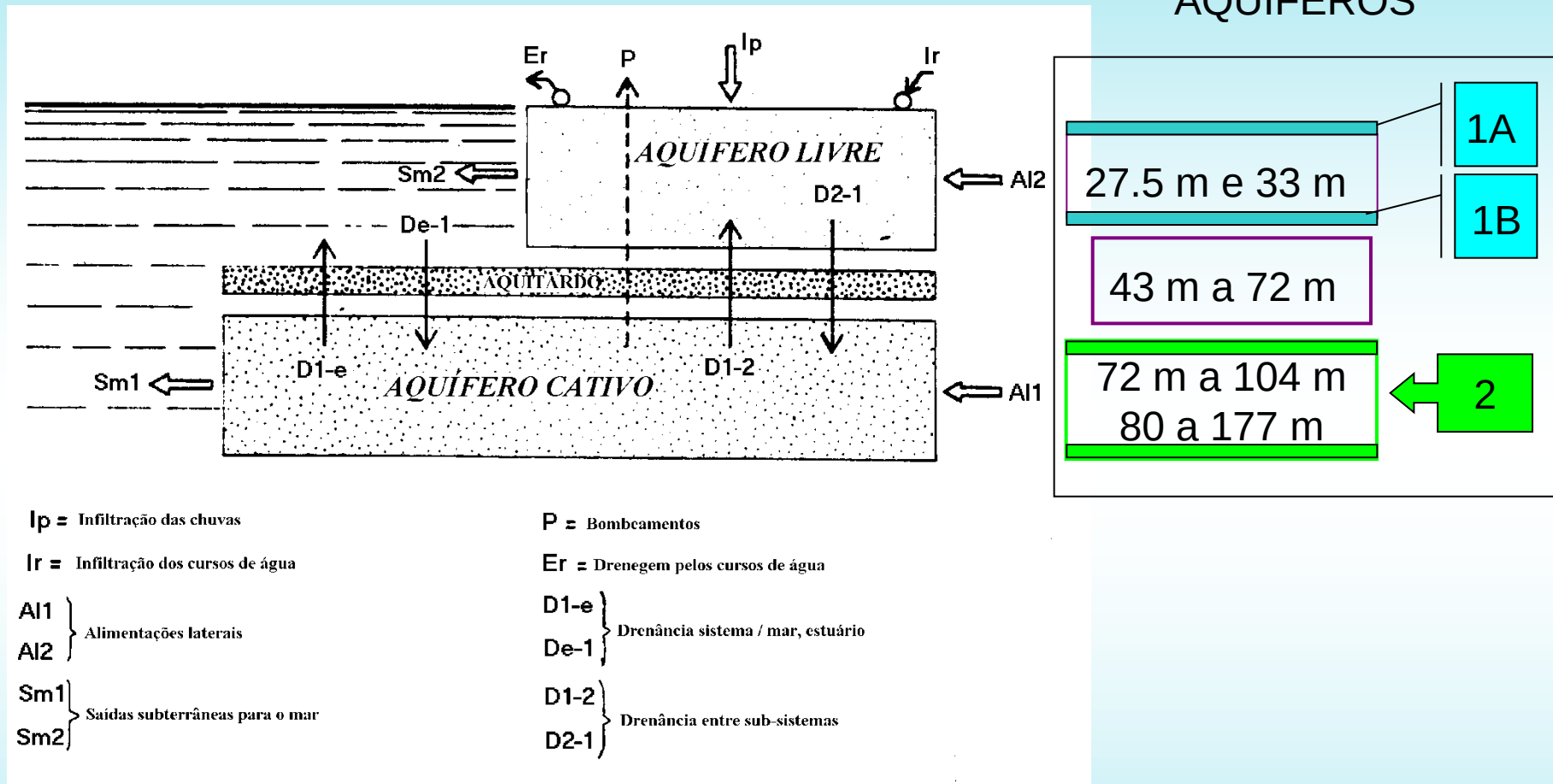
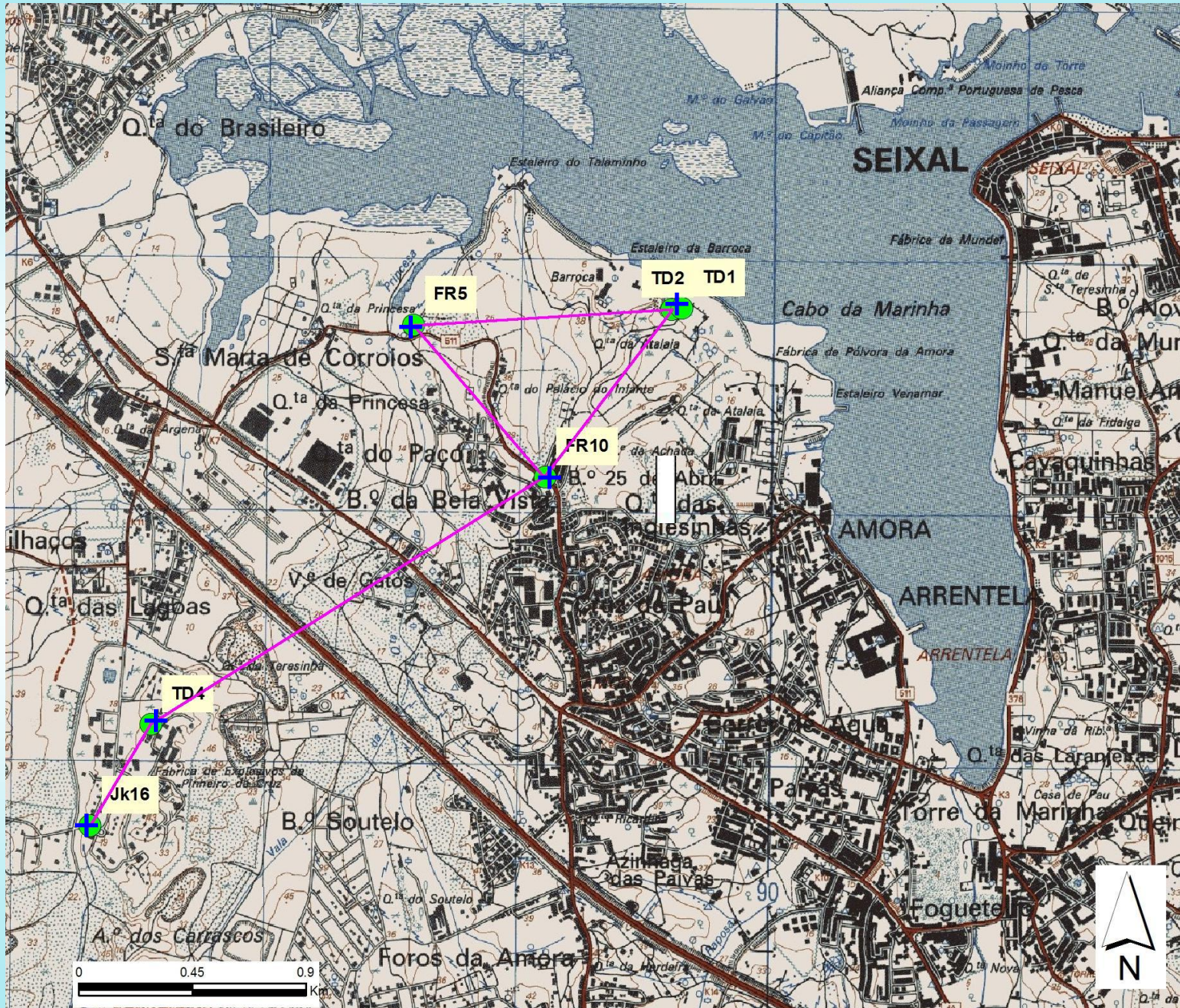


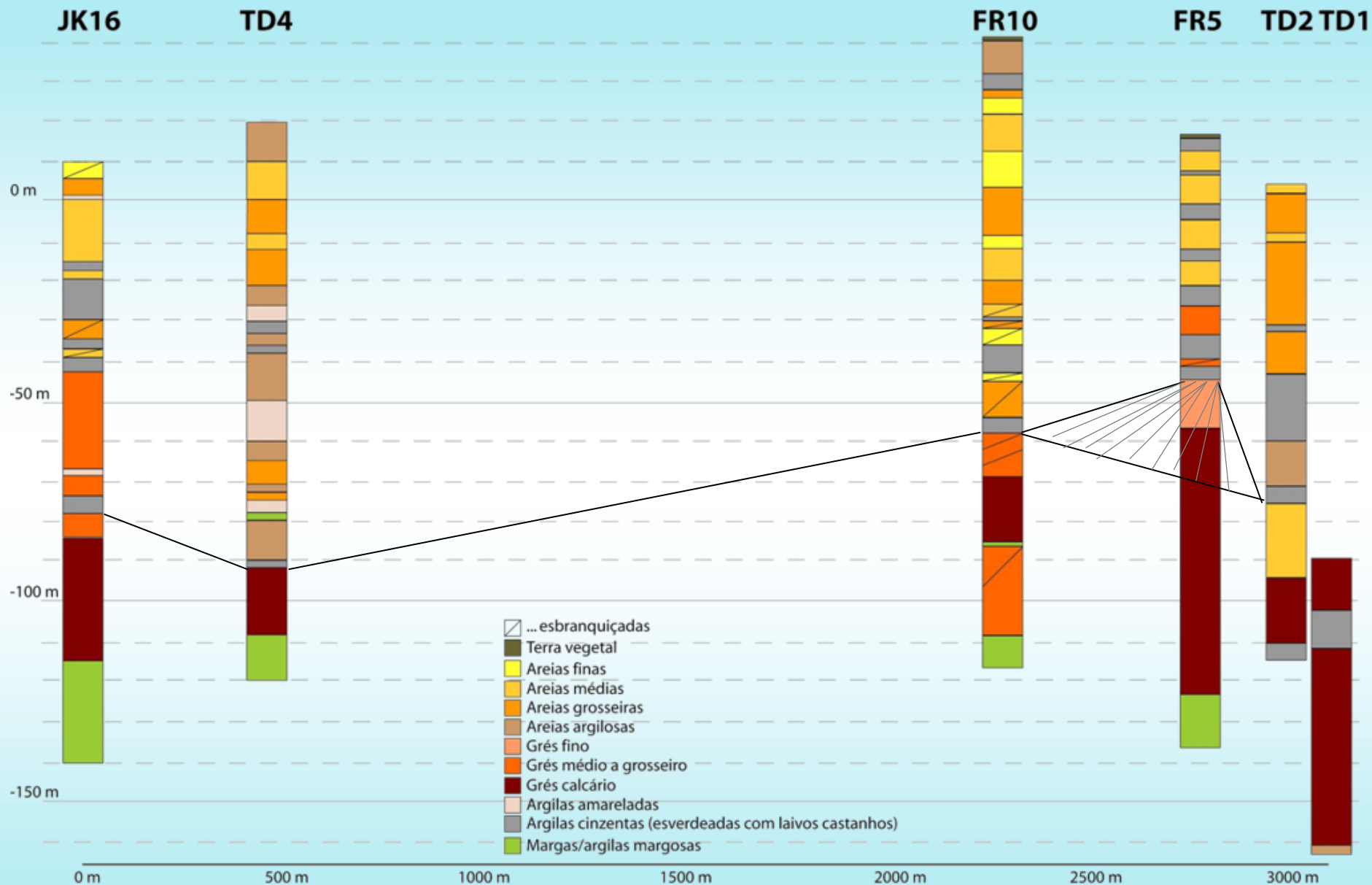
Figura 3- Esquema de funcionamento do Sistema Aquífero do Tejo e Sado
(extraído de "Étude des eaux souterraines de la Péninsule de Setúbal")



Perfis hidrogeológicos



Possível correlação do tecto do aquífero 2

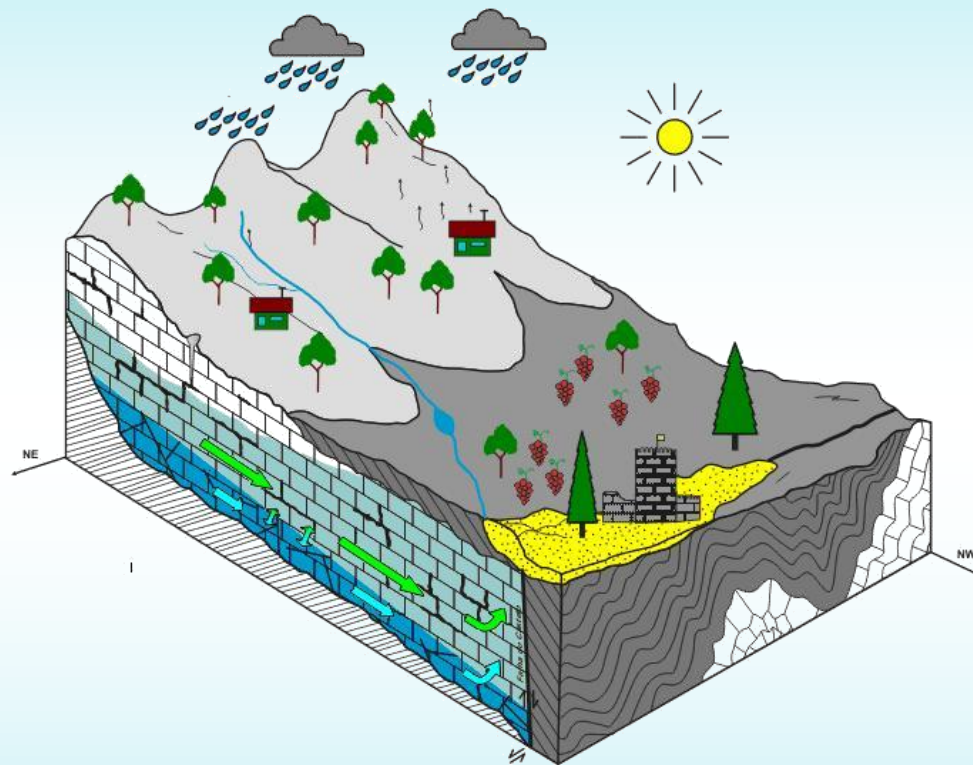


Trabalho feito com a colaboração de Helena Amaral

9º Seminário sobre Águas Subterrâneas 2013



OBRIGADO PELA VOSSA ATENÇÃO



Augusto Costa – Geodiscover - augusto.costa@geodiscover.pt

