

## ECUACIÓN CARACTERÍSTICA Y EFICIENCIA DE POZOS



Edición 2024

Manuel Giménez

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

[mgimenez@fing.edu.uy](mailto:mgimenez@fing.edu.uy)

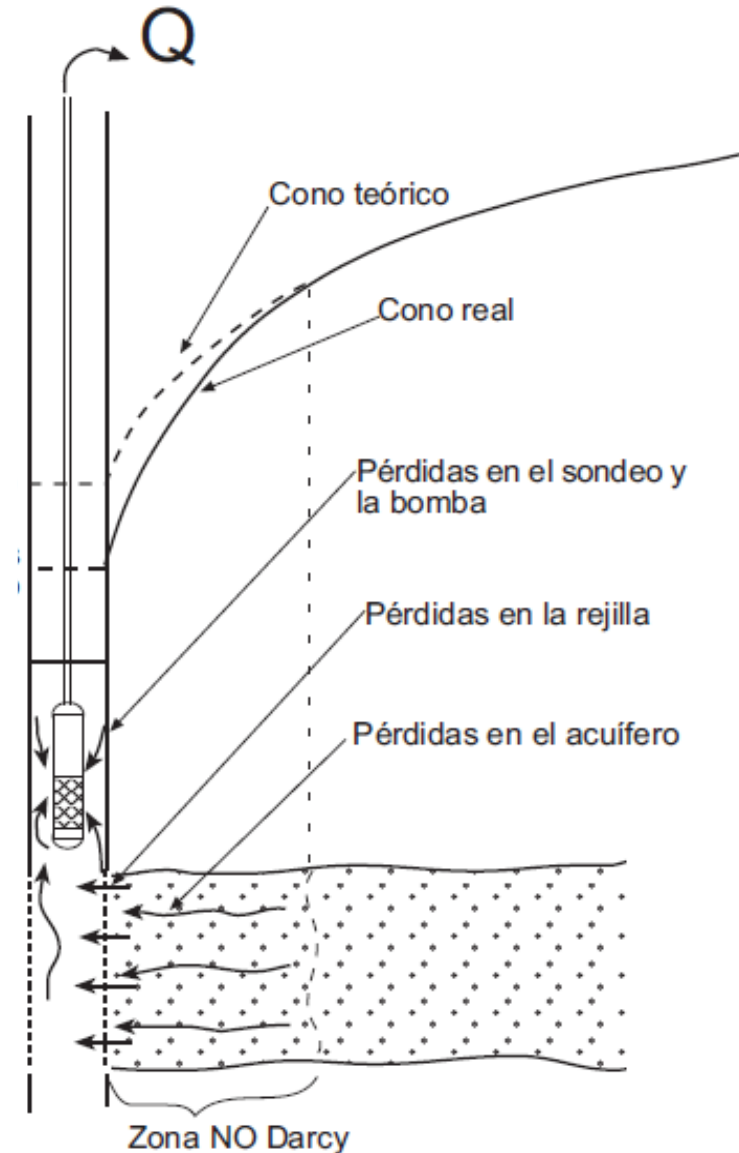
# ECUACIÓN CARACTERÍSTICA Y EFICIENCIA DE POZOS

## Objetivos

- ❖ Comprender los conceptos de descenso real, teórico y caudal específico.
- ❖ Reconocer las pérdidas de carga que ocurren en el bombeo de agua subterránea.
- ❖ Determinar la eficiencia hidráulica en un pozo de bombeo.
- ❖ Determinar la ecuación característica de pozos y comprender la curva característica en un pozo.
- ❖ Conocer los diferentes tipos de ensayos que se utilizan para determinar los parámetros de la ecuación característica.

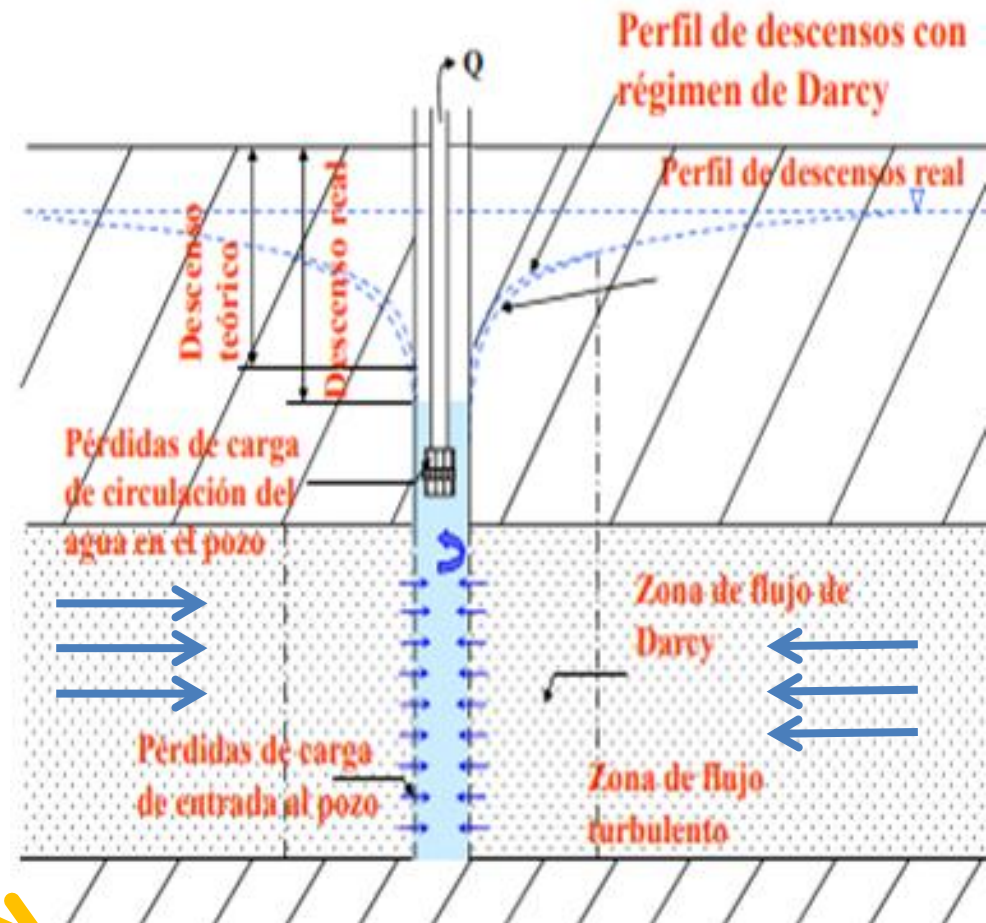
# Pérdidas de carga en un pozo

- ❑ Todas las fórmulas estudiadas de hidráulica de captaciones nos proporcionan la forma del cono de descensos. Estas fórmulas consideran los descensos que se producen por las pérdidas de carga que se producen en el acuífero.
- ❑ En la realidad, en zonas cercanas al pozo, el cono de descensos será siempre más profundo de lo calculado con los métodos anteriores. Esto se debe a las pérdidas de carga generadas por efecto del bombeo y características constructivas del pozo.



# Pérdidas de carga en un pozo

- ❑ El descenso del nivel piezométrico observado en un pozo que se bombea viene determinado por 2 tipos de pérdidas de carga.
- ❑ Pérdidas de carga que se producen por la circulación del agua en el medio acuífero (descenso teórico).
- ❑ Pérdidas de carga en la entrada y en el interior del pozo hasta llegar a la bomba (descensos por pérdidas).



$$S_{Real} = S_{teórico} + S_{pérdidas}$$

Se determina con los métodos ya conocidos

Se requiere un ensayo de bombeo escalonado para su determinación

# Pérdidas de carga en un pozo

- 1) Pérdidas en el entorno del pozo:** en las proximidades del sondeo la velocidad de flujo es tan alta que no se cumple la Ley de Darcy. Recordar que las fórmulas de descensos convencionales se basan en la validez de Darcy.
- 2) Pérdidas en la rejilla del pozo:** una rejilla pobre o mal diseñada tiene el mismo efecto que una válvula semicerrada que regula el caudal de agua, aunque la presión en la red de abastecimiento sea elevada. Las incrustaciones en las rejillas de los pozos también generan pérdidas de carga adicionales.
- 3) Pérdidas en la bomba y en el propio pozo:** estas pérdidas son inevitables, pero una bomba mal diseñada, mal instalada o en malas condiciones dará lugar a pérdidas de carga adicionales que deberían evitarse.



# Ecuación característica de pozo

En 1953 Rorabaugh propuso la siguiente ecuación para caracterizar los descensos reales que se producen en un pozo bombeado:

$$s_{Real} = B_t Q + C Q^n$$

$$s_{Real} = s_{teórico} + s_{pérdidas}$$

$$s_{teórico} = B_t Q \left\{ \begin{array}{l} B_t Q = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \quad u = \frac{r^2 S}{4 T t} \\ B_t Q = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25 T t}{r^2 S} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} s_{teórico} \text{ depende} \\ \text{del tiempo y del} \\ \text{caudal} \end{array}$$

$$s_{pérdidas} = C Q^n \quad \text{depende del caudal de bombeo}$$

# Ecuación característica de pozo

- Ecuación característica de pozo:

$$s_{Real} = B_t Q + C Q^n$$

- $B_t$  y  $C$  representan las condiciones en las que se encuentra el acuífero (B) y el pozo (C).
- $n$  puede variar entre 1 y 3,5. Aunque usualmente toma el valor  $n=2$
- Existen diversos métodos para determinar B, C y n. El que más utilizaremos es gráfico y asume que  $n=2$ .

C (m LPS <sup>-2</sup> )	C (ft gpm <sup>-2</sup> )	C (dia <sup>2</sup> m <sup>-5</sup> )	Condiciones constructivas del pozo
<1.87E-03	<2.44E-05	<2.5E-07	Pozo bien construido y bien desarrollado.
1.87E-03 a 0.03732	2.45E-05 a 4.87E-04	2.5E-07 a 50E-7	Principios de Incrustaciones en rejillas.
0.03732 a 0.149299	4.87E-04 a 1.95E-03	50E-07 a 200E-07	Pozo con incrustaciones o taponamientos en las rejillas, requiere Rehabilitación.
>0.149299	>1.95E-03	>200E-07	Incrustaciones fuertes, pozos de difícil o imposible rehabilitación.

# Ecuación característica de pozo

- Ecuación característica de pozo:

$$s_{Real} = B_t Q + C Q^n$$

- Si se mide el valor **C** a lo largo del tiempo para un mismo pozo, se puede determinar el estado de la rejilla y posibles incrustaciones que generan pérdidas de carga excesivas.
- **n** indica el régimen del flujo en el medio poroso en contacto con el pozo en donde pasa de laminar a turbulento y suele tender al valor 2 según determinaciones empíricas.



# Caudal específico

El caudal específico -o capacidad específica- considerando las pérdidas en el pozo, es:

$$q(t) = \frac{Q}{s_w} = \frac{Q}{B_t + CQ^n}$$

El caudal específico de un pozo **no es constante para un determinado caudal** ya que con el tiempo el descenso aumenta. Sin embargo los descensos tienden a estabilizarse y por lo tanto el caudal específico también.

El caudal específico es una buena estimación de la transmisividad:

$$\text{Transmisividad (m}^2 \text{ / dia)} \approx \text{Caudal específico} \frac{\text{(m}^3 \text{ / dia)}}{\text{(metros)}} \cdot 1,2$$

# Curva característica de pozo

- ❑ Se denomina curva característica de un pozo a la relación gráfica entre el caudal y descenso del pozo, complementada por la relación gráfica del caudal específico y el descenso en el pozo .
- ❑ Si en una región tenemos valores similares de T y S, dicha curva sirve para caracterizar la captación .
- ❑ Un cambio abrupto en la curva característica de un pozo nos indica averías, corrosión, incrustaciones o colmataciones en el pozo. Esto sirve para determinar cuando se debe hacer mantenimiento o reparaciones en la estructura de captación.

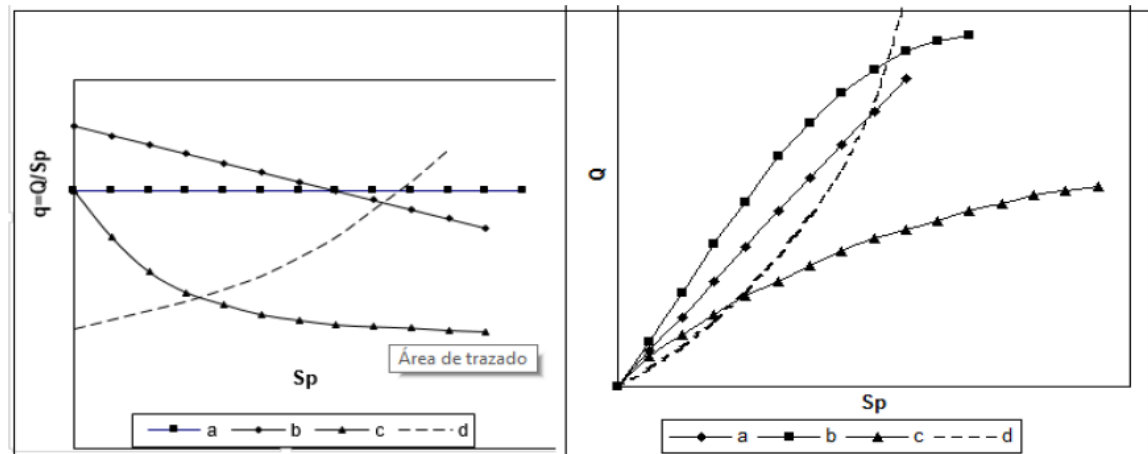


Figura 6 Tipos de curvas características de pozos. a) En acuífero sin pérdida en el pozo; b) en acuífero libre sin pérdidas en el pozo; c) con pérdidas no lineales en el pozo; d) datos mal tomados debido a ensayo defectuoso o acuífero con características cambiantes durante los ensayos.

# Eficiencia de un pozo

La eficiencia ( $E_f$ ) de un pozo es el cociente entre el descenso teórico (inexistencia de pérdidas de carga en el pozo) y el descenso real

$$E_f = \frac{S_T}{S_W} = \frac{B_t Q}{B_t Q + C Q^n} = \frac{1}{1 + \frac{C}{B_t} Q^{n-1}}$$

Mientras no se alcance el régimen estacionario,  $B_t$  es función del tiempo, y por ende de la eficiencia

La eficiencia, entonces, debe referirse a un tiempo de bombeo determinado y para un caudal de bombeo dado

# Eficiencia de un pozo

La eficiencia hidráulica del pozo determinada en esta forma es función tanto de las características constructivas del pozo como de las propiedades físicas y condiciones hidráulicas del acuífero.

En acuíferos cautivos poco permeables, la eficiencia de los pozos suele ser alta ya que la mayor parte de la pérdida de carga es imputable a la formación. Por el contrario, en acuíferos muy permeables, la eficiencia puede ser baja si el pozo no ha sido construido muy cuidadosamente y/o no ha sido bien desarrollado. No deben compararse eficiencias de pozos en acuíferos diferentes.

# Ensayos de bombeo

**1) Aforo de pozo:** Se bombea un caudal  $Q$  constante hasta la estabilización de los niveles y en el propio pozo se miden los descensos que se producen cada cierto intervalo de tiempo. Sirve para conocer los descensos que se producirán si se bombea un caudal determinado. Nos permiten estimar la productividad del pozo.



# Ensayos de bombeo

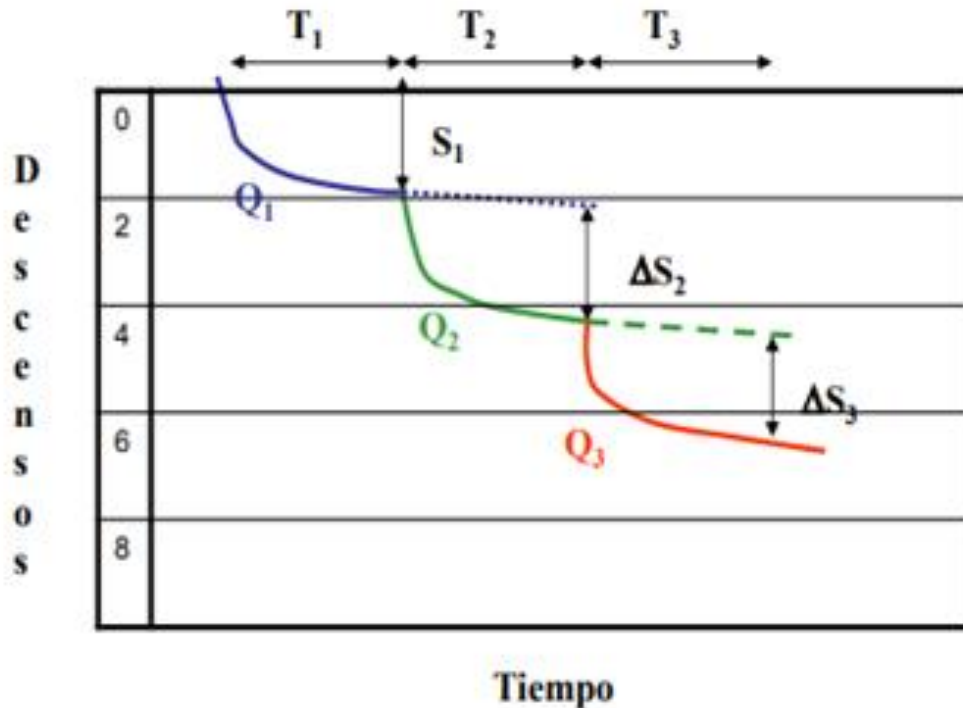
**2) Ensayo de bombeo simple:** Se bombea un caudal  $Q$  constante hasta la estabilización de los niveles y se utiliza uno o más piezómetros ubicados en la zona de influencia del cono de descensos para medir los descensos producidos cada cierto intervalo de tiempo. Permiten determinar los parámetros  $T$  y  $S$  locales del acuífero.





# Ensayos de bombeo

**3) Ensayo de bombeo escalonado:** consiste en varios bombeos sucesivos continuos y de igual duración y a caudal creciente pero constante en cada intervalo o escalón. Permiten calcular los coeficientes B, C y n de la curva característica del pozo y conocer la eficiencia hidráulica del pozo.



Existen 2 tipos de ensayos de bombeo escalonado:

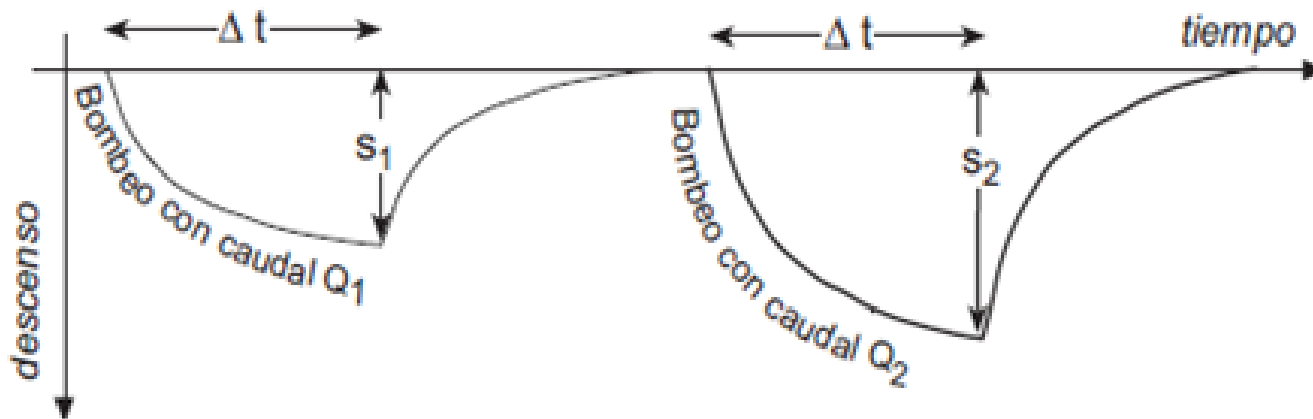
- 1) Con recuperación de niveles
- 2) Sin recuperación de niveles

$\Delta S_i$  es el descenso provocado no por  $Q_i$  sino por el incremento de caudal al pasar de  $Q_{i-1}$  a  $Q_i$ .

# Tipos de ensayos de bombeo escalonados

## 1) Con recuperación de niveles:

- ❑ En este tipo de ensayo se comienza bombeando un **caudal constante  $Q_1$**  durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  (1 hora) y medimos el descenso  $s_1$  obtenido en la captación al cabo de ese tiempo.
- ❑ Luego apagamos la bomba y **dejamos que se recuperen los niveles**. Cuando el descenso se haya **recuperado totalmente**, bombeamos un **caudal constante  $Q_2$**  que cumpla que  **$Q_2 > Q_1$**  y medimos el correspondiente descenso  $s_2$  generado en el **mismo intervalo de tiempo  $\Delta t$**  (1 hora).
- ❑ Se repite la operación para un caudal  $Q_3$ , tal que  **$Q_3 > Q_2$** .

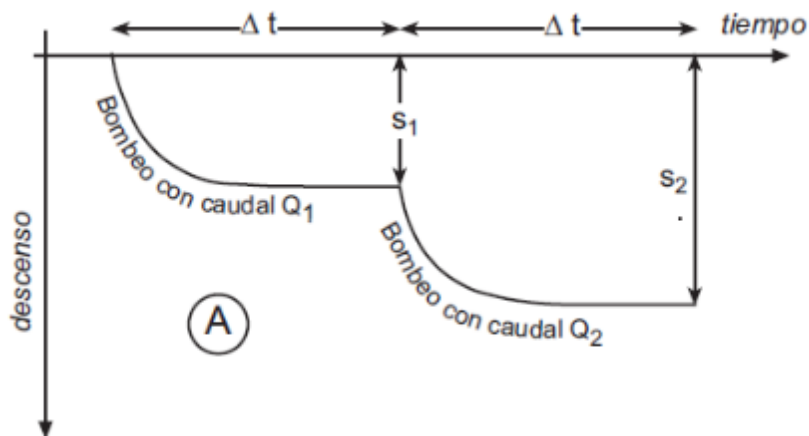


# Tipos de ensayos de bombeo escalonados

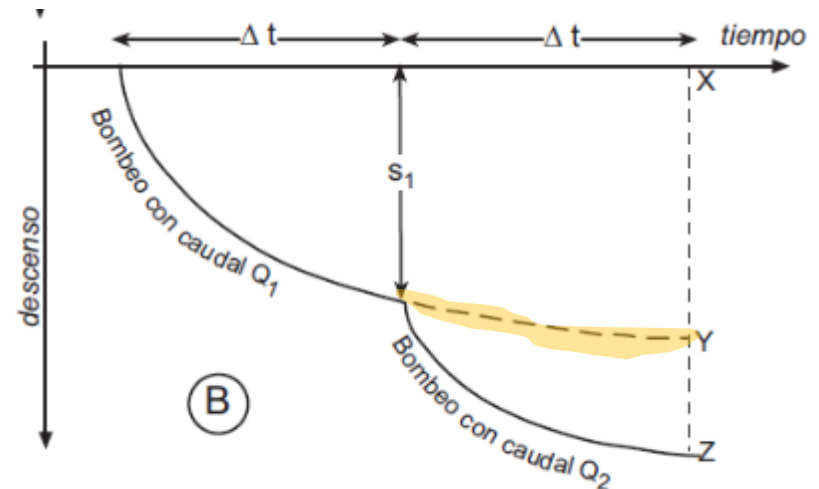
## 2) Sin recuperación de niveles:

En la práctica resulta más costoso esperar que los niveles se recuperen completamente  $\rightarrow$  es posible bombear un caudal  $Q_1$  durante un  $\Delta t$  determinado  $\rightarrow$  se obtiene  $s_1$   $\rightarrow$  se aumenta el caudal a  $Q_2$  ( $Q_2 > Q_1$ )  $\rightarrow$  se bombea durante  $\Delta t$  y se obtiene  $s_2$   $\rightarrow$  se procede igual con  $Q_3 > Q_2$  y se obtiene  $s_3$ .

En este tipo de ensayo se pueden dar 2 posibilidades:



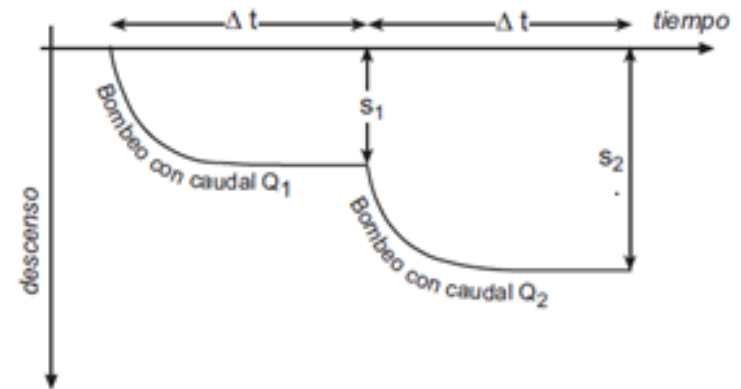
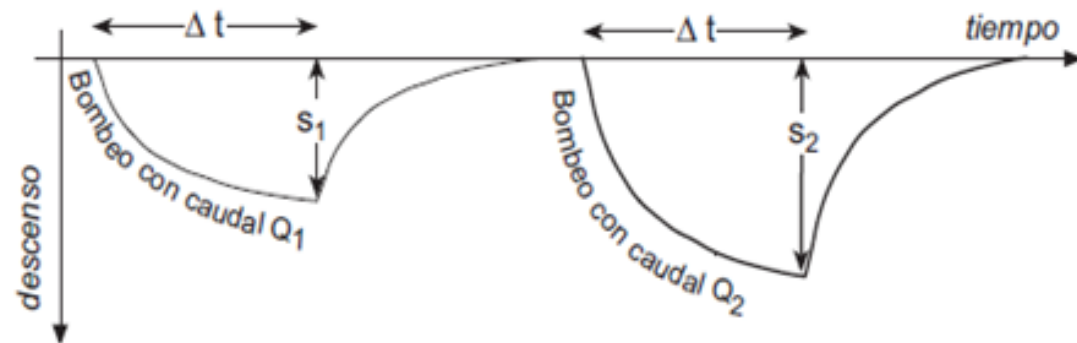
Con estabilización de niveles  
( $Q_1$ ;  $s_1$ ), ( $Q_2$ ;  $s_2$ )



Sin estabilización de niveles  
( $Q_1$ ;  $s_1$ ), ( $Q_2$ ;  $s_1 + YZ$ )

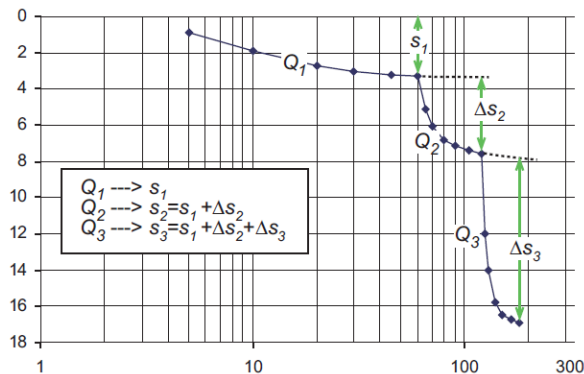
# Cálculo de coeficientes B, C y n

- ❑ Cada bombeo da origen a una curva de descensos que se suma al descenso alcanzado por el bombeo anterior. Para cada escalón se debe obtener una pareja de valores  $(s_i, Q_i)$ .
- ❑ En ensayos de bombeo **con recuperación y sin recuperación pero que se llega a la estabilización** de los niveles, para cada caudal Q de bombeo es sencillo definir el descenso máximo asociado  $(s_i)$ , que será el máximo obtenido en el intervalo  $\Delta t$ .



# Cálculo de coeficientes B, C y n

- ❑ En ensayos de bombeo **sin recuperación que no se llega a la estabilización** de los niveles, para cada caudal  $Q$  de bombeo es un poco más trabajoso obtener su descenso asociado ( $s_i$ ) en el intervalo  $\Delta t$ .
- ❑ En la representación gráfica se debe medir el incremento en el descenso final de cada bombeo,  $\Delta s_2$  y  $\Delta s_3$ . Los cuales se obtienen a partir de la extrapolación de la primera y de la segunda curva de descensos respectivamente.
- ❑  $\Delta s_2$  es el descenso provocado por el incremento de caudal al pasar de  $Q_1$  a  $Q_2$ , no es el descenso provocado por  $Q_2$ . Lo mismo con  $\Delta s_3$ .
- ❑ Conociendo  $s_1$ ,  $\Delta s_2$  y  $\Delta s_3$ , se calculan  $s_2$  y  $s_3$ :

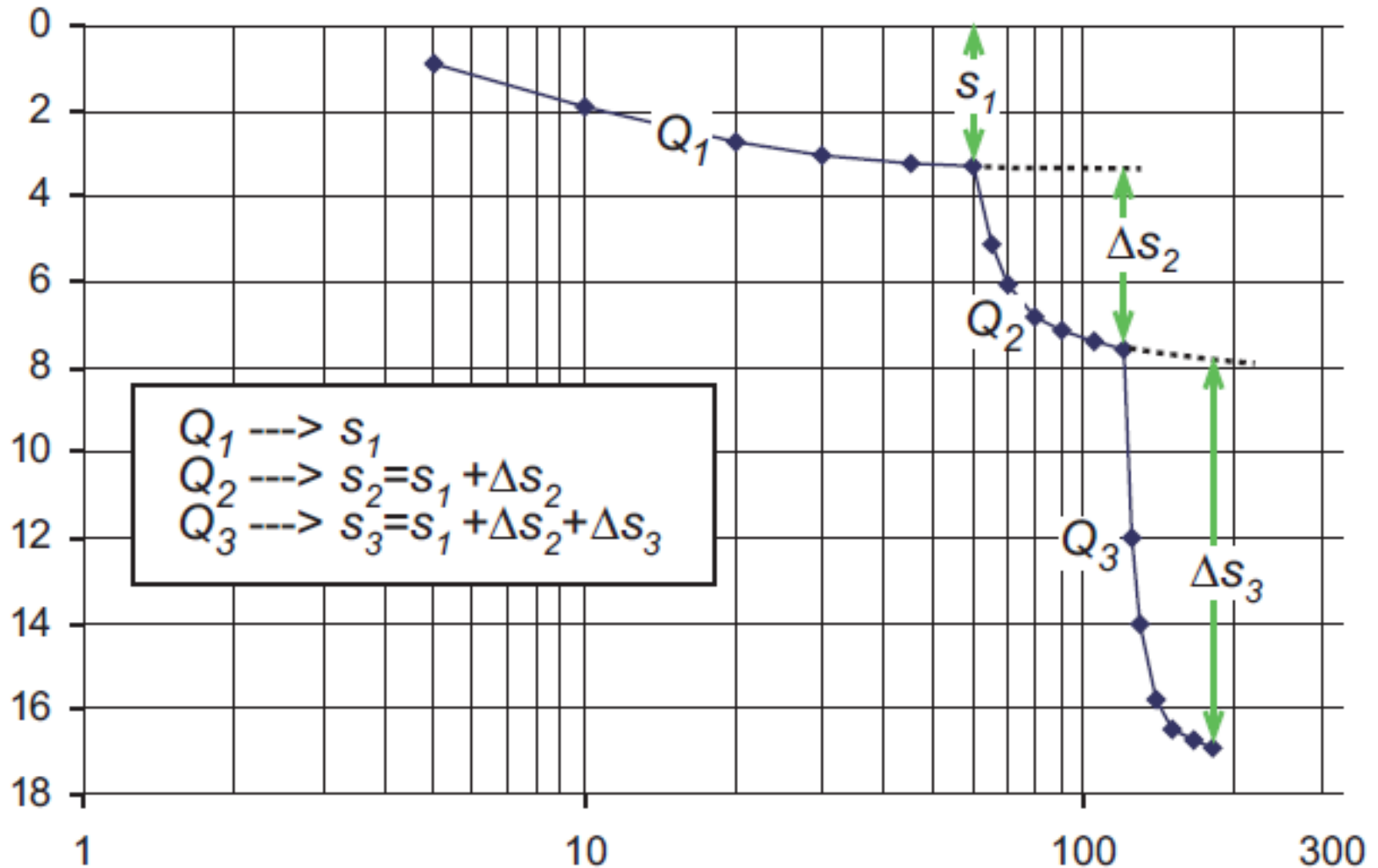


$$s_2 = s_1 + \Delta s_2$$

$$s_3 = s_2 + \Delta s_3 = s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3$$

# Cálculo de coeficientes B, C y n

Sin recuperación de niveles:





# Cálculo de coeficientes B, C y n

- Conociendo las parejas  $(s_1, Q_1)$ ,  $(s_2, Q_2)$  y  $(s_3, Q_3)$ , sustituimos sus valores en la ecuación característica y obtenemos:

$$s_1 = B \cdot Q_1 + C \cdot Q_1^n$$

$$s_2 = B \cdot Q_2 + C \cdot Q_2^n$$

$$s_3 = B \cdot Q_3 + C \cdot Q_3^n$$

- Dividiendo entre  $Q_i$  resulta que obtenemos:

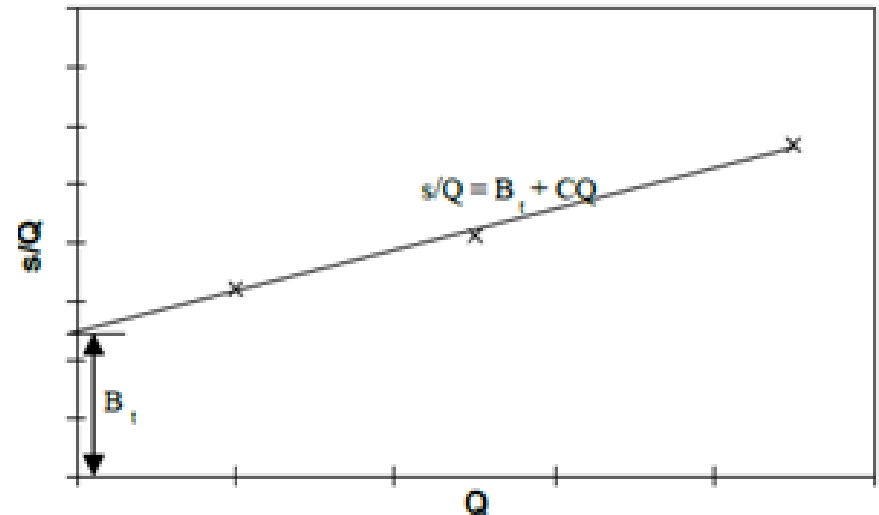
$$s_1/Q_1 = B + C \cdot Q_1^{n-1}$$

$$s_2/Q_2 = B + C \cdot Q_2^{n-1}$$

$$s_3/Q_3 = B + C \cdot Q_3^{n-1}$$

- Graficamos los valores  $s/Q$  en función de  $Q$ :

Si los tres puntos se ajustan a una recta, entonces  $n=2$  y para hallar B y C basta con resolver el sistema de ecuaciones anterior o determinar la pendiente de la recta (C) y el término independiente (B)



# Cálculo de coeficientes B, C y n

Si  $n$  no es igual a 2, debe procederse a resolver el sistema de ecuaciones de cualquiera de los siguientes métodos:

- Método de tanteo del valor de  $n$
- Método de tanteo del valor de  $B$
- Método analítico
- Método computacional

# Cálculo de coeficientes B, C y n

## Ejemplo:

Se ha efectuado un bombeo escalonado, obteniéndose las siguientes parejas de valores caudal - descenso con tiempos de bombeo iguales :

1,9 litros /seg.--> 9,91 metros

3,2 litros /seg. -->19,20 metros

5,1 litros/seg --> 36,56 metros

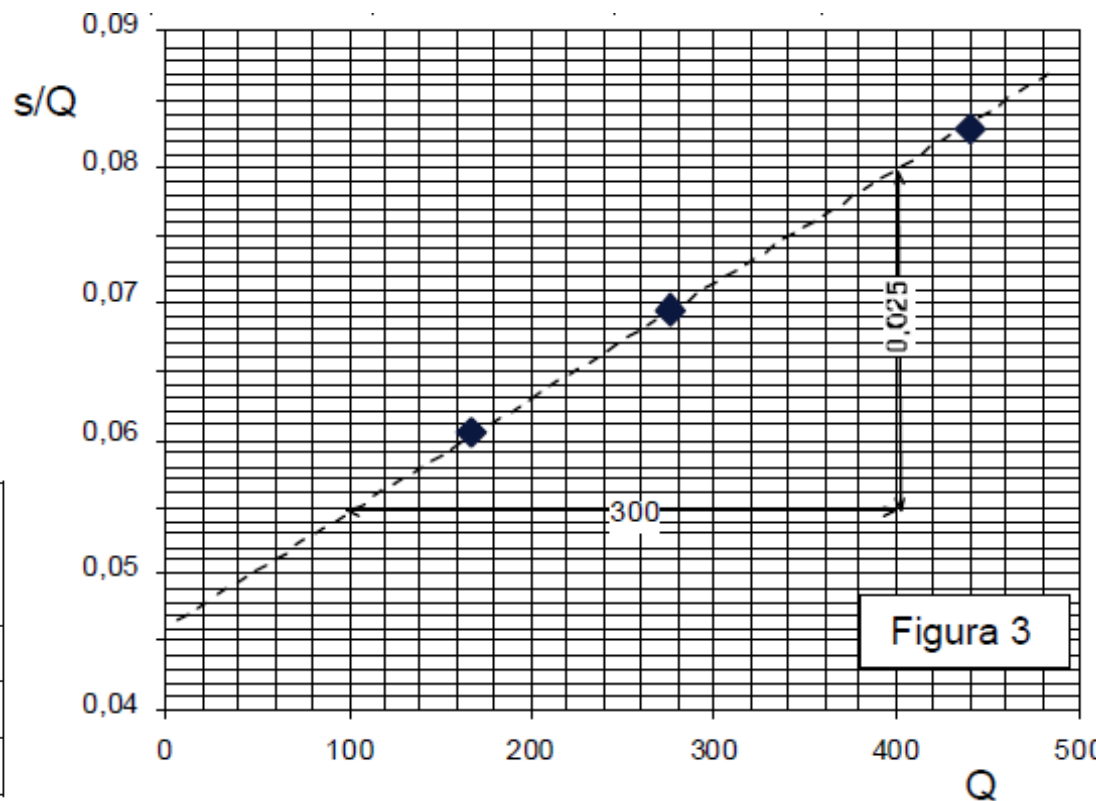
Determinación de ecuación característica:

$Q$ (litros/seg )	$Q^{n-1}$ (m <sup>3</sup> /día)	$s$ (metros)	$s/Q$ [m/(m <sup>3</sup> /d)]
1,9	164	9,91	$6,04 \cdot 10^{-2}$
3,2	276	19,20	$6,96 \cdot 10^{-2}$
5,1	440	36,56	$8,31 \cdot 10^{-2}$

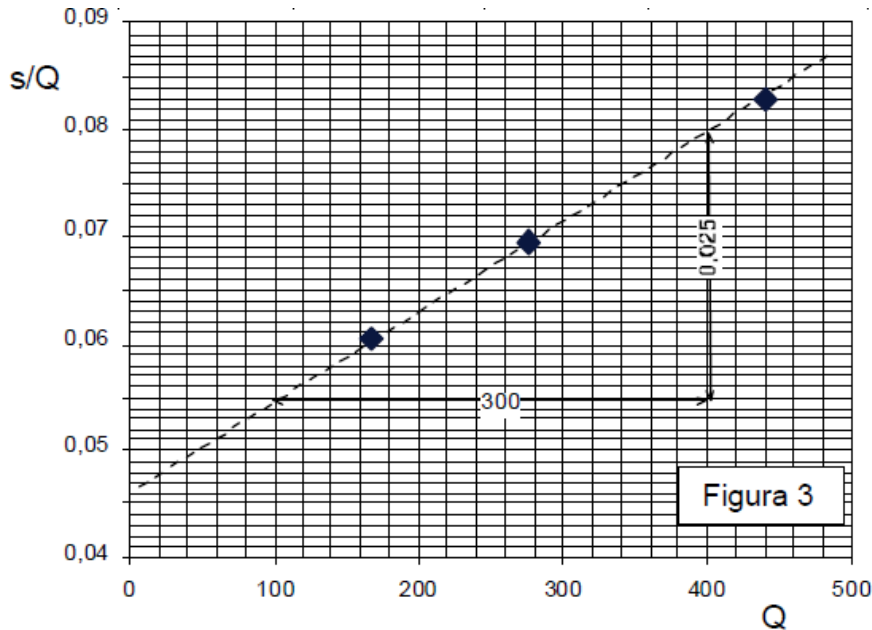
# Cálculo de coeficientes B, C y n

Representamos gráficamente las columnas 2ª y 4ª de la tabla,  $Q$  en abcisas y  $s/Q$  en ordenadas, si se obtiene una recta quiere decir que el exponente es efectivamente 2, como en el caso más sencillo expuesto inicialmente, ya que si  $s/Q$  es una función lineal de  $Q$ , entonces  $n = 2$

$Q$ (litros/seg )	$Q^{n-1}$ ( $m^3/día$ )	$s$ (metros)	$s/Q$ [ $m/(m^3/d)$ ]
1,9	164	9,91	$6,04 \cdot 10^{-2}$
3,2	276	19,20	$6,96 \cdot 10^{-2}$
5,1	440	36,56	$8,31 \cdot 10^{-2}$



# Cálculo de coeficientes B, C y n



En este caso, comprobamos que los puntos están alineados, trazamos la recta y leemos la ordenada en el origen y calculamos la pendiente, que son los valores de  $B$  y de  $C$ :

$$B = (\text{ordenada en el origen}) = 0,046$$

$$C = (\text{pendiente de la recta}) = 0,025/300 = 8,33 \cdot 10^{-5}$$

$$s_{Real} \left( \frac{m}{d} \right) = 0,046Q + 8,33 \times 10^{-5} Q^2$$

Determinación de la eficiencia de bombeo para un caudal  $Q$  de 5 l/s:

$$Eficiencia = \frac{B \cdot Q}{B \cdot Q + C \cdot Q^n} = \frac{B}{B + C \cdot Q^{n-1}} \quad \longrightarrow \quad Eficiencia = \frac{0,046}{0,046 + 8,33 \cdot 10^{-5} Q} \cdot 100$$

$$Eficiencia = \frac{0,046}{0,046 + 8,33 \cdot 10^{-5} Q} \cdot 100$$

Por ejemplo, para un caudal  $Q = 5$  litros /seg. (equivalentes a 432 m<sup>3</sup>/día) obtenemos una eficiencia de 56%.

# Cálculo de coeficientes B, C y n

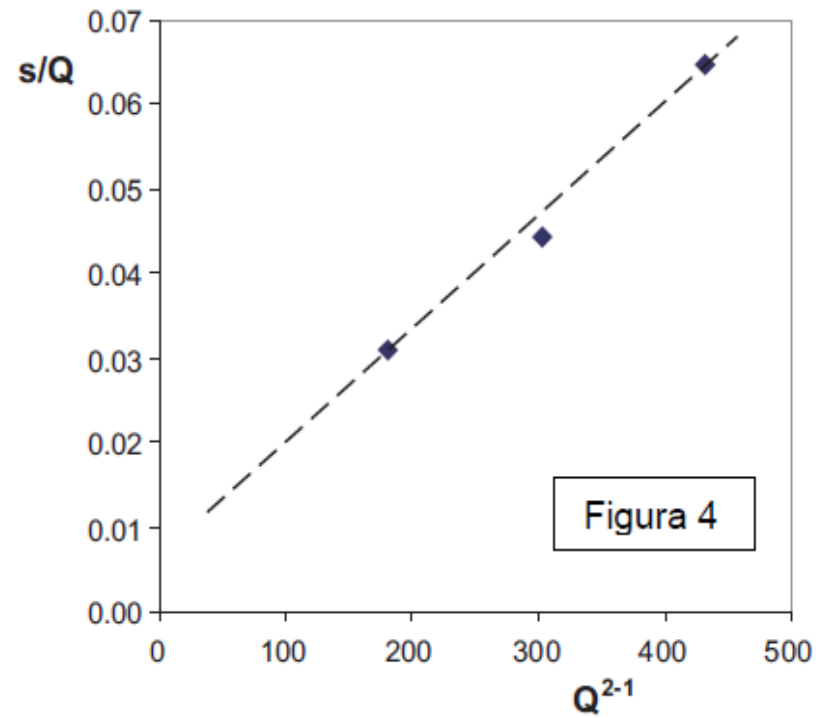
## Ejemplo 3. Tres escalones, comprobamos que $n \neq 2$

Se ha efectuado un bombeo escalonado, obteniéndose las siguientes parejas de valores caudal - descenso con tiempos de bombeo iguales :

2,1 litros /seg.--> 5,62 metros  
3,5 litros /seg. -->13,36 metros  
5,0 litros /seg.--> 27,95 metros

Confeccionamos una tabla análoga a la del ejemplo anterior con  $n = 2$ , y representamos  $s/Q$  en función de  $Q^{n-1}$ , observando que los puntos no están alineados (Figura 4).

$n = 2$			
$Q$ (litros/s)	$Q^{n-1}$ ( $m^3/día$ )	$s$ (metros)	$s/Q$ [ $m/(m^3/d)$ ]
2,1	181,4	5,62	0,03097
3,5	302,4	13,36	0,04418
5	432,0	27,95	0,06470





¡Muchas Gracias por su atención!

¿Preguntas?

