

CAPITULO IV. METODOS DE RECUPERACIÓN. REGIMEN VARIABLE

Interpretación De la evolución de niveles después de la parada

Campo de aplicación y reflexiones generales

Problemas característicos

CAPITULO IV

METODOS DE RECUPERACION. REGIMEN VARIABLE

Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones del ensayo en base a los datos que se obtienen una vez que el pozo detiene su extracción de agua. A partir de la parada, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial.

Estos métodos se basan en el análisis de la «recuperación» o evolución del ascenso de niveles posterior a la parada.

Interpretación de la evolución de niveles después de la parada

Para analizar la evolución de los niveles después de la parada de la bomba en el pozo hay que empezar por simular matemáticamente esta parada.

Para ello puede procederse, razonando, que el efecto de parar un pozo que lleva bombeando un tiempo t a caudal constante Q es el mismo que simular que el pozo no se para y que a partir del instante t se le inyecta un caudal constante Q .

El descenso que se observa en el pozo o «descenso residual», diferencia entre los niveles estático y dinámico, será como consecuencia de lo visto en el apartado de «Campos de pozos» y afecciones entre ellos, la diferencia entre el descenso producido por el bombeo desde que se inició el mismo y el ascenso producido por la inyección desde el momento de la parada.

La deducción matemática se resuelve con la ayuda de la figura 9.

El pozo está sometido a un bombeo con caudal Q que teóricamente no se interrumpe, y la curva de descensos producidos es \overline{OAB} .

Cuando ha transcurrido un tiempo t y el descenso producido es d_M , se para el pozo, o lo que es lo mismo se simula una inyección de caudal Q . La curva de ascensos teóricos vendrá dada por \overline{AE} , obtenida llevando dichos ascensos teóricos a partir de la horizontal de d_M y en el sentido negativo del eje de ordenadas.

La curva residual, que en rigor es la observada en campo, será la representada por \overline{AD} diferencia de las dos anteriores.

En un tiempo genérico t_g desde que se inició el bombeo, el pozo llevará parado un tiempo $t' = t_g - t$. En este momento, el descenso d_B debido al bombeo será:

$$d_B = \overline{FB} = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T(t + t')}{r_p^2 S}$$

siendo:

Q = caudal de bombeo constante.

T = transmisividad.

r_p = radio del pozo.

S = coeficiente de almacenamiento.

t = tiempo que duró el bombeo real.

t' = tiempo que ha transcurrido desde que se paró el bombeo.

El ascenso d_1 , producido por la inyección a caudal Q , que se simula a partir del tiempo t , que es cuando se interrumpe el bombeo, viene dada por:

$$d_1 = \overline{CE} = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T t'}{r^2 S}$$

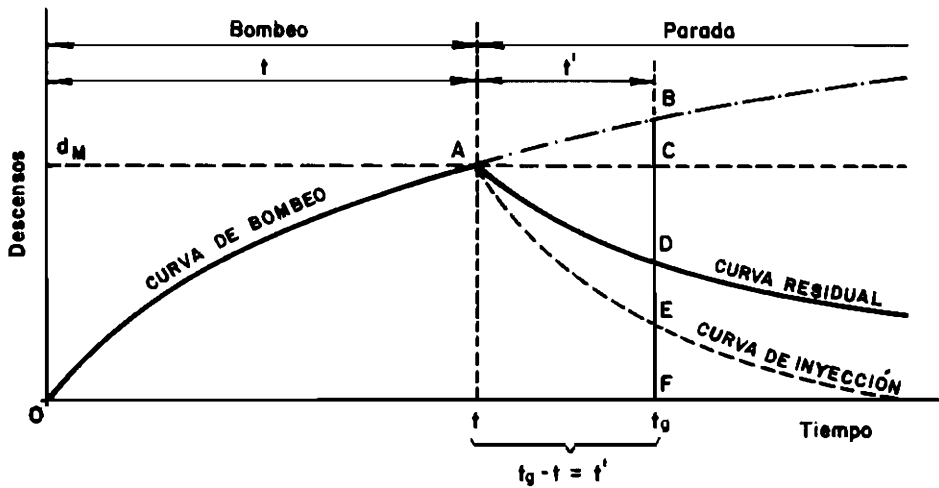


Fig. 9.—Esquema para la deducción del valor del descenso residual d_r , en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada.

Evidentemente, puede utilizarse la relación de Jacob, que prácticamente es siempre válida en el pozo de bombeo.

El descenso residual d_r , que es el que se observa en el pozo, es la diferencia entre el nivel estático anterior a iniciar el bombeo y el nivel que se mide realmente en el tiempo $t_g = t + t'$.

Vendrá dado por:

$$d_R = \overline{FD} = \overline{FB} - \overline{CE}$$

y, por tanto:

$$d_R = d_B - d_1$$

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T(t + t')}{r_p^2 S} - 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T t'}{r_p^2 S}$$

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{\frac{2,25 T(t + t')}{r_p^2 S}}{\frac{2,25 T t'}{r_p^2 S}}$$

de donde:

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{t + t'}{t'}$$

Expresión en la que si se toma d_R como función, y $\lg(t + t')/t'$ como variable, representa una recta de la forma:

$$y = mx$$

en la que:

$$y = d_R$$

$$x = \lg \frac{t + t'}{t'}$$

$$m = 0,183 \frac{Q}{T} \quad [1]$$

Esta recta pasa por el origen de coordenadas y queda representada en el gráfico 21.

La T , que es el parámetro que puede obtenerse en el análisis de la recuperación, se saca directamente de la pendiente de la recta m haciendo uso de la relación [1].

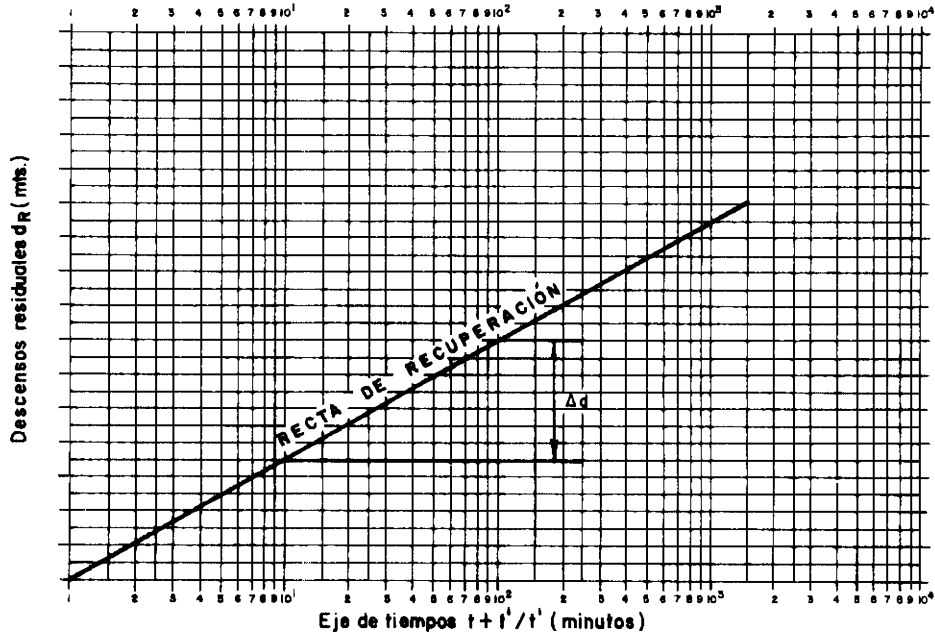


Gráfico 21.—Recta de recuperación.

$$T = 0,183 \frac{Q}{m}$$

Como ya se sabe $m = \Delta d$, siendo Δd la caída por ciclo logarítmico y por tanto:

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta d} \quad [2]$$

El caudal de bombeo Q debe expresarse en $m^3/\text{día}$ para obtener T en $m^2/\text{día}$.

La forma de operar en campo es la siguiente:

Se efectúa un bombeo a caudal constante Q . Al cabo de un tiempo t , la depresión es d_M y se interrumpe el bombeo. Los niveles, a partir de este momento, empiezan a subir y las depresiones a decrecer.

Las depresiones que se van midiendo son las depresiones o descensos residuales d_R . A partir de dicha parada, se miden los niveles (depresiones) con una secuencia en el tiempo análoga a la ya descrita para los bombeos, acorde con una escala logarítmica. Por ejemplo, minutos 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, etc.

Cada uno de estos minutos representa un tiempo t' , mientras que el tiempo de bombeo t es fijo.

Se representan en un gráfico semilogarítmico los valores de d_R en ordenadas (escala métrica) y los de cada $(t + t')/t'$ en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos y se obtiene el valor de T mediante la relación [2].

Esta recta suele presentar anormalidades en su parte inicial, que es la de valores de t' bajos y, por tanto, valores altos para $(t + t')/t'$. Por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

Campo de aplicación y reflexiones generales

Los ensayos en recuperación, que a simple vista sólo pueden proporcionar el parámetro T , son muy útiles a la hora de comprobar el grado de conexión del pozo con el acuífero. Es decir, la comunicación entre el tramo de acuífero próximo al pozo y otros más lejanos. También es interesante este tipo de análisis para comprobar las condiciones en que se ha realizado el ensayo: si se ha reciclado el agua, si ha habido recargas exteriores en general, o si el acuífero es limitado.

Es, por tanto, aconsejable que siempre que se realice un ensayo, se tomen las medidas de recuperación de niveles al final del mismo. Suponen en este sentido un importante complemento del análisis de los descensos en bombeo.

Sin embargo, dadas sus características pueden tener validez por sí mismos. Por ejemplo, no son demasiado sensibles a las variaciones del caudal de bombeo. Este puede ponderarse.

Si se realiza un bombeo con caudales:

$$\begin{array}{l} Q_1 \text{ durante un tiempo } t_1 \\ Q_2 \text{ durante un tiempo } t_2 \\ \dots\dots\dots \\ Q_n \text{ durante un tiempo } t_n \end{array}$$

Puede obtenerse un caudal medio ponderado

$$Q_M = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

que es el que debe introducirse en la relación que da la T en recuperación.

Se requiere que los caudales $Q_1, Q_2 \dots Q_n$ no sean muy distintos.

El análisis de la recuperación es también aconsejable, si no imprescindible, en aquellas pruebas en las que durante el bombeo no ha sido posible la medición de niveles. Por ejemplo, en los bombeos con aire comprimido y en los valvuleos que se realizan mientras se construyen los sondeos. Se puede estimar un caudal medio de extracción y luego seguir la evolución de niveles en recuperación, para interpretarla por el método comentado.

El ensayo en recuperación es más corto que el de bombeo. Ello es debido a que el tiempo que se usa es:

$$\frac{t + t'}{t'}$$

Cuando el tiempo de recuperación t' es igual al tiempo de bombeo t

$$\frac{t + t'}{t'} = 2$$

y la recta representativa llega al minuto 2 del gráfico logarítmico.

Es necesario, en general, terminar las mediciones en el primer ciclo de dicho gráfico. Es decir, con valores de $(t + t') / t'$ comprendidos entre 10^0 y 10^1 .

$$10^0 < \frac{t + t'}{t'} < 10^1$$

Ello equivale a tiempos de recuperación t' comprendidos entre t y $0,1 t$.

Una recuperación debe durar como mínimo el 10 por 100 del tiempo de bombeo, pudiendo considerarse como muy aceptable en la mayoría de los casos tomar las medidas de ascenso de niveles durante un tiempo equivalente al 30 por 100 del bombeo. En este último caso, la recta habría alcanzado el minuto 4 de la escala logarítmica.

Dado que este tipo de ensayos son más cortos que los de análisis de descensos, es frecuente, en casos en los que se desean hacer muchas pruebas en un corto espacio de tiempo, utilizar un bombeo determinado para usar métodos de régimen permanente sin seguir la evolución de descensos, para interpretar posteriormente la evolución de los ascensos después de la parada, que requiere un tiempo de la tercera a la décima parte menor.

El punto donde la recta ajustada corta a los ejes tiene también un valor significativo.

En el gráfico 22 pueden verse las rectas de dos recuperaciones.

Estas rectas presentan la anomalía de no pasar por el origen de coordenadas. Por ello, de acuerdo con la metodología expuesta, estas dos rectas no son rigurosamente interpretables al objeto de calcular la T. El valor que se obtenga para este parámetro se ajustará más a la realidad cuanto más se acerque al origen de coordenadas el punto de corte de las rectas con los ejes.

El desplazamiento de las rectas tiene un significado. La primera de ellas corta al eje de ordenadas, lo que indica que los niveles no se han recuperado cuando ha transcurrido un tiempo suficientemente largo desde que se detuvo el bombeo. Ello es síntoma de que el acuífero se ha vaciado a consecuencia del volumen de agua que se le ha extraído durante el período de bombeo. El

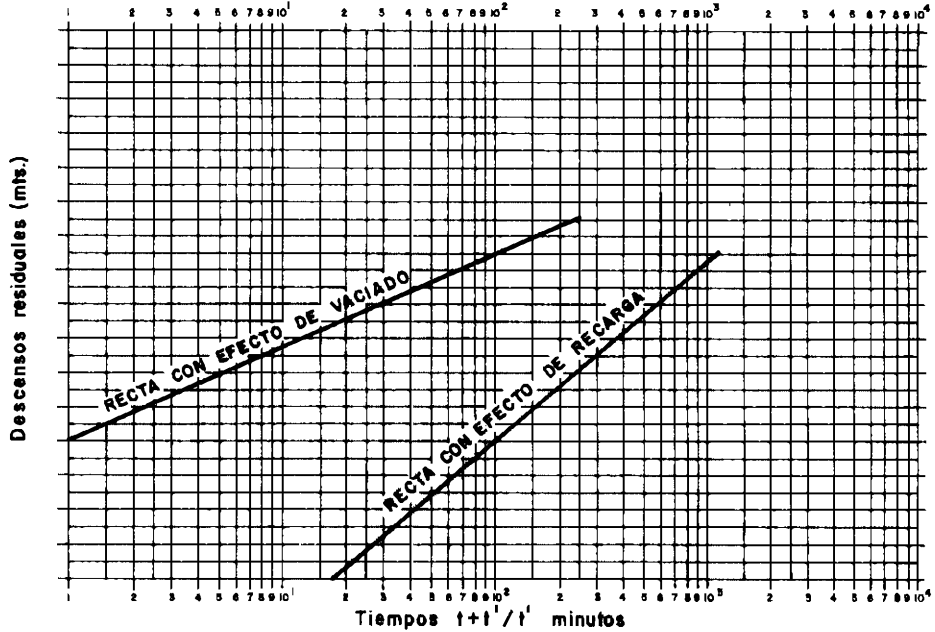


Gráfico 22.—Rectas de recuperación con efectos de vaciado y recarga.

ensayo no se ha realizado en las condiciones de contorno impuestas para la resolución de la ecuación general de la hidráulica en medios porosos. El acuífero ensayado no puede asimilarse a un acuífero infinito a efectos prácticos. En las curvas de bombeo seguramente se produjeron descensos anormales, que ahora pueden interpretarse como un efecto de vaciado. Los descensos totales en el bombeo son suma del descenso teórico (Theis) más una componente lineal del paulatino vaciado del acuífero. A veces puede deducirse la ley de vaciado y restituir la curva de descensos en bombeo, para una interpretación más rigurosa de la misma.

La segunda curva que se representa en el gráfico 22 corta al eje de abscisas. Ello implica que el pozo ha recuperado su nivel en un tiempo menor al teórico necesario, lo cual es solamente posible cuando ha existido una recarga de agua exterior al sistema pozo-acuífero. Estas recargas pueden tener, como se sabe, diversos orígenes: recargas por goteo vertical, laterales, infiltración desde cauces o balsas superficiales e incluso, y como más significativa, el reciclado del agua bombeada. Este tipo de anomalías se estudian con más detalle en los siguientes apartados.

Otra de las aplicaciones de este método consiste en poder, en ocasiones y bajo determinadas condiciones, calcular el área de embalse subterráneo. Si se realiza un bombeo de caudal Q durante un tiempo t y se observa en la curva de recuperación un vaciado claro del acuífero, puede procederse del siguiente modo:

Se calcula el espesor de acuífero vaciado h_v por intersección de la recta de recuperación con el eje de ordenadas. Si el área de embalse subterráneo es A, el volumen vaciado será:

$$\text{Volumen vaciado} = A \cdot h_v \cdot S$$

siendo S el coeficiente de almacenamiento.

Dicho volumen vaciado, deberá coincidir con el volumen extraído por el pozo durante el bombeo $Q \cdot t$ y por tanto

$$Q \cdot t = A \cdot h_v \cdot S$$

$$A = \frac{Q \cdot t}{h_v \cdot S}$$

Que requerirá, como siempre, utilizar unidades homogéneas.

$$A(\text{km}^2) = \frac{Q(\text{m}^3/\text{día}) \cdot t (\text{días})}{h_v(\text{metros}) \cdot S \cdot 10^6}$$

Por último queda indicar que no tiene sentido ser riguroso con las desviaciones de la recta sobre el origen, y solamente deberán ser interpretadas como vaciado o recarga, si dichas desviaciones son significativas respecto a la depresión total en el caso del vaciado, o se producen antes del minuto 4 ó 5 de la escala logarítmica $(t + t')/t'$, en el caso de recargas exteriores.

Problemas característicos

A continuación se exponen dos ejercicios típicos de desarrollo de esta metodología para la mejor comprensión del análisis de la evolución de niveles después de la interrupción del bombeo.

Ejercicio número 7.

Se realiza un bombeo a caudal constante de 20 l/s durante 1.400 minutos con una depresión final de 15,5 m.

Al término del bombeo se toman medidas de la recuperación de niveles con los siguientes resultados:

Tiempo en minutos	Depresión observada en metros
0	15.50
1	13.30
3	9.75
5	7.90
7	7.15
10	6.40
15	5.60
20	5.20
30	4.60
40	4.25
50	3.90
60	3.65
80	3.30
100	3.00
120	2.70
140	2.55
160	2.40
180	2.25
200	2.10
250	1.80
300	1.65
400	1.40

Se pide calcular la transmisividad T del acuífero.

RESOLUCION

Se confecciona en primer lugar la siguiente tabla:

Tiempo t'	$\frac{t + t'}{t'}$	Depresión observada en metros (d_R)
0	∞	15,50
1	1.401	13,30
3	467	9,75
5	281	7,90
7	201	7,15
10	141	6,40
15	94	5,60
20	71	5,20
30	47	4,60
40	36	4,25
50	29	3,90
60	24	3,65
80	18	3,30
100	15	3,00
120	12,6	2,70
140	11	2,55
160	9,7	2,40
180	8,7	2,25
200	8	2,10
250	6,6	1,80
300	5,6	1,65
400	4,5	1,40

Los pares de valores obtenidos $(d_R, \frac{t + t'}{t'})$ se representan en un gráfico semilogarítmico. Gráfico 23.

En este gráfico se ajusta una recta a los pares de valores representados, la cual tiene un tramo que pasa sensiblemente por el origen.

La pendiente de esta recta, dada por su caída por ciclo, será:

$$\Delta d = 3,15$$

y como

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta d}$$

$$T = 0,183 \frac{20 \times 86,4}{3,15} = 100 \text{ m}^2/\text{día}$$

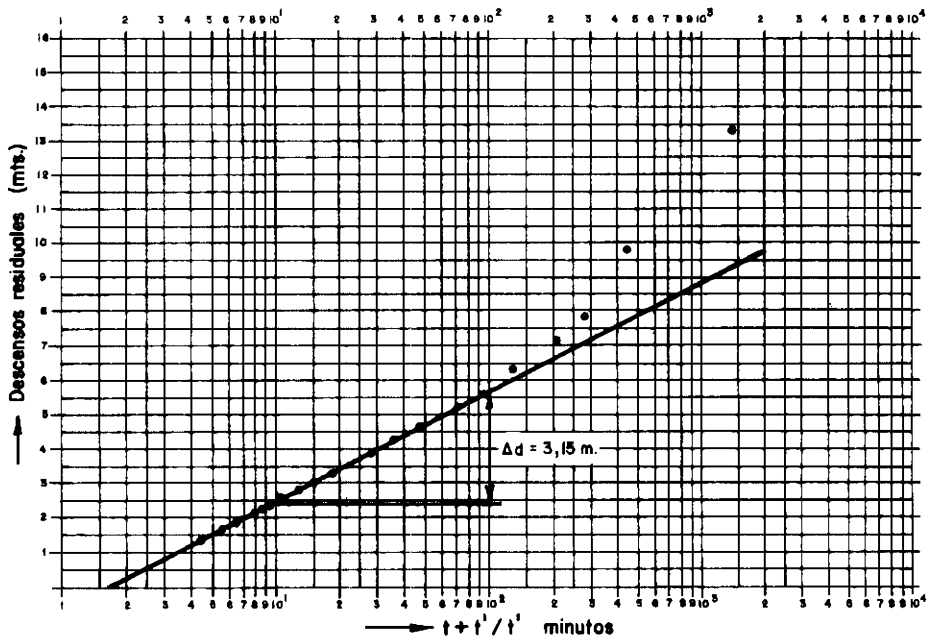


Gráfico 23.—Cálculo de «T» en recuperación para el ejercicio número 7.

Ejercicio número 8

Se realiza un ensayo de bombeo de veinticuatro horas de duración a caudal constante de 80 l/s.

La representación de los pares de valores $\left(d_R, \frac{t + t'}{t'}\right)$ se incluyen en el gráfico 24.

Se pide:

- Calcular la T y comentar la validez del resultado obtenido.
- Calcular el área de embalse subterráneo, sabiendo que el coeficiente del almacenamiento vale $S = 10^{-4}$.

RESOLUCION

- La pendiente de la recta ajustada, dada por su caída por ciclo, es

$$\Delta d = 3,89$$

como

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta d}$$

$$T = 0,183 \frac{80 \times 86,4}{3,89} = 325 \text{ m}^2/\text{día}$$

El valor de T no es el real, dado que la recta no ha pasado por el origen de coordenadas.

De todos modos, la distorsión no es muy grande, y podría darse por buena teniendo en cuenta que representa un valor «optimista».

- b) La recta corta al eje de ordenadas en $d_R = 2$ m, que es, en principio, el espesor de acuífero que quedaría vaciado. Se tiene

$$Q \cdot t = A \cdot d_r \cdot S$$

$$A = \frac{Q \cdot t}{d_r \cdot S}$$

$$A = \frac{80 \times 86,4 \times 1}{2 \cdot 10^{-4}} = 34.560.000 \text{ m}^2$$

$$A = 34,56 \text{ km}^2$$

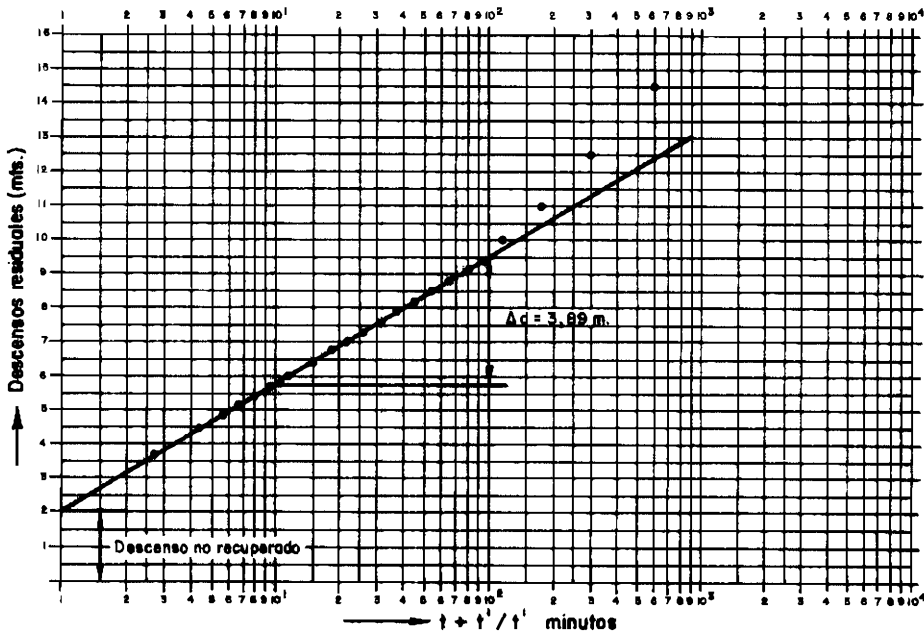


Gráfico 24.—Cálculo de «T» y del área de embalse. Curva de recuperación para el ejercicio número 8.