

RELACIÓN GASTO ESPECÍFICO Y TRANSMISIVIDAD CON FLUJO NO LINEAL Y POZO DE PENETRACIÓN PARCIAL

• Armando O. Hernández-Valdés* •
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

*Autor de correspondencia

Resumen

Hernández-Valdés, A. O. (julio-agosto, 2014). Relación gasto específico y transmisividad con flujo no lineal y pozo de penetración parcial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), 103-117.

El gasto específico ha sido utilizado por numerosos autores, incluido el del presente trabajo, para estimar la transmisividad darciana del acuífero, dada la carencia de datos de estos sistemas y de los costos que implican la realización de ensayos de bombeo para determinarla. Existen numerosos factores que pueden incidir en errores significativos de dicha estimación. En este trabajo se presentan expresiones analíticas y resultados de ensayos de bombeo para demostrar las magnitudes de los errores, sobre todo cuando hay presencia de flujo no lineal en los alrededores del pozo de bombeo, si es de penetración parcial o hay efectos de recarga o cavernas que provocan en los pozos una rápida estabilización de los niveles durante el bombeo. En los dos primeros casos, las estimaciones subvaloran la transmisividad darciana del acuífero y en el último se sobrevalora este parámetro. Se muestran los resultados de una prueba de bombeo con dos satélites o pozos de observación, situación poco frecuente, pero que permite realizar la interpretación utilizando una de las variantes propuestas anteriormente para calcular las propiedades hidrogeológicas con régimen no lineal de flujo, donde se evidencia el error que se comete en la determinación del coeficiente de almacenamiento y el uso de un inadecuado gasto específico para estimar la transmisividad.

Palabras clave: régimen no lineal, penetración parcial, gasto específico-transmisividad, hidráulica de pozos.

Introducción

Numerosos autores han utilizado con frecuencia los datos del gasto específico (Q_s) (relación entre el caudal de bombeo y el abatimiento o descenso que se produce en éste) para estimar la transmisividad del acuífero, dada la carencia de pruebas de bombeo que permitan caracterizar

Abstract

Hernández-Valdés, A. O. (July-August, 2014). Relation between Specific Capacity and Transmissivity with Non-linear Flow and Partial Penetration Well. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(4), 103-117.

Specific capacity has been used by several authors, including the author of the present work, to estimate the Darcian transmissivity of an aquifer, given the lack of data related to these systems because of the costs involved in conducting pumping tests to determine transmissivity. Several factors can cause significant errors in this estimate. This work presents the analytical expressions and results from pumping tests in order to demonstrate the error magnitudes, especially when non-linear fluid is present around pumping wells, in the case of a partial penetration well, or there are recharge effects or caves that quickly stabilize the levels of the wells during pumping. In the first two cases the Darcian transmissivity of the aquifer is underestimated, whereas in the latter it is overestimated. Results from a pumping test using two satellites, or observation wells are also shown. Although this is an uncommon situation, interpretation is possible based on one of the proposals above to calculate hydrogeological properties under a non-linear flow regime. Errors in determining the storage coefficient and the use of an inadequate specific capacity parameter to estimate transmissivity were found.

Keywords: Non linear regime, partial penetration, specific capacity-transmissivity, well hydraulics.

con mayor detalle a los sistemas acuíferos. La principal causa que motiva lo anterior es el costo de los ensayos de bombeo y la facilidad con que se determina el Q_s durante el desarrollo del pozo o cuando se afora.

Aunque el Q_s no sea un parámetro constante para cada pozo de bombeo ni pueda utilizarse para estimar la transmisividad del acuífero, según

se verá más adelante, en cierta medida permite realizar una evaluación cualitativa de la calidad constructiva del pozo y de las características acuíferas de la formación geológica donde se encuentra ubicado. Por otra parte, si se quieren aplicar técnicas de optimización donde las restricciones de niveles mínimos se impongan en los pozos de bombeo, como es necesario hacer en los acuíferos costeros, entonces se puede aplicar una corrección al abatimiento simulado en puntos correspondientes a los pozos de bombeo, procedimiento utilizado por Cabrera-Estupiñán (2010) en función del gasto específico.

Pérez (2001) señala: “el gasto específico es función del tiempo y del caudal, y que solamente se podría considerar constante en el caso de flujo lineal en todo el acuífero, en un pozo sin estructura, caso que resulta poco probable, ya que en aquellos acuíferos donde el flujo pudiera ser lineal en la cara del pozo, es casi seguro que resulta necesario que el pozo tenga una estructura, al menos, formada por camisa y rejilla. Por otra parte, en los casos en que no se necesite estructura en el pozo, lo más probable es que el flujo sea no lineal en la cara del pozo. Es decir, que la probabilidad de que el caudal específico sea constante es muy pequeña. No obstante, se puede utilizar como índice de fertilidad relativa, aunque no con la absolutez que se ha usado hasta ahora”.

Por lo general, se utiliza el gasto específico para caracterizar de manera cuantitativa las características de los pozos y de los acuíferos en diferentes cuencas hidrogeológicas, pero sin asociarlo con las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos correspondientes, como reportan Capucci *et al.* (2001).

En adelante se abordarán los factores que inciden en las magnitudes del Q_s y cómo inciden en la estimación de la transmisividad a partir de él, aunque hay trabajos, como el de Chenini, Silvain y Ben-Mammou (2008) que sólo consideran la variación con el tiempo debido al aumento del radio de influencia.

El gasto específico y factores que lo afectan

Son muchos los esfuerzos que se han realizado para tratar de buscar correlaciones entre la transmisividad T_D y el gasto específico Q_s , definido por la relación entre el caudal de bombeo y el abatimiento que se produce en dicho pozo.

Según señalan Pérez (2001) y Walton (1970), el abatimiento en los pozos de bombeo y, por ende, el gasto específico (Q_s) depende de varios factores:

$$Q_s = \frac{Q}{S_p} = \frac{Q}{A * Q + B * Q^2 + D * Q^{(n)}} \quad (1)$$

- Tiempo de bombeo (A).
- Flujo no lineal en las proximidades del pozo de bombeo (B).
- Pérdidas por la estructura del pozo de bombeo (D).

Además de los anteriores factores se debe incluir:

- Penetración parcial.
- Superficie de filtración en acuíferos libres.
- Efectos de interferencia entre pozos y fronteras impermeables o de recarga.
- Heterogeneidad y anisotropía del medio geológico, etcétera.

Aunque es cierto lo que señalan Aitchison-Earl y Smith (2008) de que el gasto específico se reduce con el incremento del tiempo y caudal de bombeo, debe especificarse que el efecto del tiempo de bombeo sólo se refleja en la componente lineal del abatimiento, siendo más significativa su variación al principio y menor para después de varias horas de bombeo, donde ya sea aplicable la aproximación de Jacob, $u \leq$

0.01, donde $u = \frac{r^2 * E}{4 * T_D * t}$, siendo E el coeficiente de almacenamiento, t el tiempo de bombeo, r el radio del pozo y T_D la transmisividad del acuífero. En relación con los incrementos de

caudal, es importante destacar que tienen efectos importantes en el gasto específico, pues influyen tanto en la componente turbulenta del abatimiento como en las pérdidas por estructura y los efectos de la penetración parcial.

En el estudio realizado por Knopman y Hollyday (1993) es posible constatar la gran cantidad de variables que pueden influir en el gasto específico y realizan una valoración del comportamiento estadístico de dichas variables en un número considerable de pozos con datos de gasto específico, pero sin llegar a proponer expresiones matemáticas que relacionen éste con la transmisividad.

Lari, Knochenmus y Bowman (1998) señalan que en la zona de estudio, la gran variabilidad de la relación entre transmisividad y gasto específico puede ser causada por las pérdidas por estructura del pozo, la penetración de éste en el acuífero, la heterogeneidad del acuífero y la influencia de las fracturas en su interconexión.

Por su parte, El-Naga (1994) justifica que una correlación logarítmica entre transmisividad y gasto específico tiene un mejor ajuste que una lineal debido a que ambas son distribuciones lognormales y que la transmisividad de la matriz acuífera está afectada por los fenómenos de fracturación y carstificación. Como se demostrará más adelante, una buena correlación no necesariamente implica una buena estimación de un parámetro.

En el WRI Report 87-4034 (2008) se señalan las grandes limitaciones de estimar la transmisividad a partir del gasto específico, considerando que el radio efectivo del pozo de bombeo puede ser sustancialmente muy superior al nominal, ya que muchos pozos en formaciones cársticas pueden estar perforados en cavernas, lo que resultaría un alto gasto específico y por tanto estimarse altas transmisividades; por otra parte, la presencia del flujo turbulento y las pérdidas por estructura del pozo de bombeo pueden causar mayores abatimientos, al igual que la penetración parcial, reduciendo ambos parámetros. Se señala que los efectos anteriores

pueden compensar los errores de estimación, cosa que es cierta para evaluar valores medios de la transmisividad, pero no para estimar la variabilidad espacial. Además se señala que en muchos casos el periodo de bombeo no se conoce y que virtualmente todo el abatimiento ocurre en pocos minutos.

En el presente trabajo se analizarán los efectos del régimen no lineal de flujo en las proximidades de los pozos de bombeo y el efecto de la penetración parcial del pozo en el acuífero, lo que hace coincidir con lo planteado en el reporte anterior y se demuestran teórica y prácticamente varios de dichos señalamientos.

Relación entre gasto específico y transmisividad T_D con régimen lineal alrededor del pozo de bombeo

a) Pozo de penetración total

A partir de la fórmula conocida de Dupuit-Thiem:

$$S_p = 0.366 * \frac{Q}{T_D} * \log \left[\frac{r_o}{r_p} \right] \quad (2)$$

Se obtiene de despejar T_D y realizando el cambio de unidades:

$$T_D (m^2/d) = 0.366 * 86.4 * \log \left[\frac{r_o}{r_p} \right] * \frac{Q(lps)}{S_p} \quad (3)$$

La ecuación anterior pudiera expresarse en otras unidades, como las utilizadas en muchos de los trabajos a que se hacen referencia, de la siguiente manera:

$$T_D (p^2/d) = 0.366 * \frac{3.7853 * 86.4 * (3.28)^3}{60} \log \left[\frac{r_o}{r_p} \right] * \frac{Q(gpm)}{S_p(p)} \quad (3a)$$

Para un pozo de bombeo de 50 cm de diámetro y un radio de influencia de 370 m, la ecuación (3) se convertiría en:

$$T_D (m^2/d) = 100 * \frac{Q(lps)}{S_p} = 100 * Q_s \left(\frac{lps}{m} \right) \quad (4)$$

Frecuentemente se ha utilizado en Cuba la expresión anterior para estimar la transmisividad hidráulica de Darcy, aunque entre otros factores depende del tiempo de bombeo.

Para los anteriores valores de diámetro y radio de influencia en la ecuación (3) se obtendría:

$$T_D (p^2/d) = 224 * \frac{Q(gpm)}{S_p(p)} = 224 * Q_s \left(\frac{gpm}{p} \right) \quad (4a)$$

Para un radio de influencia de $r_o = 1\ 250\ m$ se obtendría de las dos ecuaciones anteriores:

$$T_D (m^2/d) = Factor_{RL} * \frac{Q(lps)}{S_p} = 117 * Q_s \left(\frac{lps}{m} \right) \quad (5)$$

$$T_D (p^2/d) = 260 * \frac{Q(gpm)}{S_p(p)} = 260 * Q_s \left(\frac{gpm}{p} \right) \quad (5a)$$

De lo anterior se evidencia que el tiempo de bombeo afecta al gasto específico, disminuyendo a medida que el tiempo aumenta, pero que su variación es más significativa para tiempos pequeños de bombeo.

En las ecuaciones (4a) y (5a), el coeficiente obtenido está en el rango de las fórmulas utilizadas por Abbott y Dehay (2008), quienes emplearon la fórmula de Parkhurst, Christenson y Breit (1996) $T = 242\ Q/s$, y señalan que los valores estimados por la relación anterior son de 1.1 a 4.3 veces mayores que los valores de las transmisividades obtenidas a partir de los ensayos de bombeo.

En el WRI Report 87-4034 (2008) se utiliza la relación $T = 270\ Q/s$, indicando que para esa zona el coeficiente está entre 170 y 370, con un valor promedio de 270. Se señala que este coeficiente es muy variable y que acuíferos con cavernas como el estudiado provocan

altos gastos específicos que pueden inducir a estimar transmisividades muy grandes y por lo contrario, el efecto del flujo turbulento estima transmisividades muy bajas; ambos aspectos serán analizados y justificados analíticamente en el presente trabajo.

b) Pozo de penetración parcial

De las expresiones que relacionan la transmisividad T_D con el gasto específico Q_s en pozos de penetración parcial con régimen lineal se tienen las tres primeras citadas por Pérez (2001):

- De Glee (1930)

$$T_D = \frac{Q}{S_p} * \frac{86.4}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{Fp} \ln(\pi x) \right] + \ln \left(\frac{\alpha * Fp}{4x} \right) + 0.1 \right\}.$$

- Babouchkine

$$T_D = \frac{Q}{S_p} * \frac{86.4}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{Fp} \ln(2ax) \right] \right\}, \text{ donde } a \text{ (1.32-1.6).}$$

- Schneebeli (1966)

$$T_D = \frac{Q}{S_p} * \frac{86.4}{2\pi} \left[\frac{\ln(4x)}{Fp} + \ln \left(\frac{\alpha * Fp}{4x} \right) \right].$$

- Autor $T_D = \frac{Q}{S_p} * [116.2 * Fp^{-0.368}]$ (se obtiene de la ecuación (20) para régimen lineal).

En las expresiones anteriores, $Fp = hs/m$, $\alpha = r_o/r_p$ y $x = hs/2r_p$, siendo hs la penetración del pozo dentro del acuífero (m); m , el espesor del acuífero; r_p , el radio del pozo de bombeo, y r_o el radio de influencia.

En el cuadro 1 aparecen los resultados de evaluar las anteriores expresiones para la mismas magnitudes de los parámetros, obteniéndose resultados similares, salvo el caso de Babouchkine.

Tanto el efecto de la penetración parcial de los pozos de bombeo como el flujo no lineal que se puede producir alrededor de ellos provoca descensos superiores a los producidos si el régimen fuese lineal y el pozo de penetración total. En la simulación de los efectos locales en

Cuadro 1. Factor de penetración parcial con régimen lineal

F_p	Glee	Babouchkine		Autor	Schneebeli
		$a = 1.32$	$a = 1.6$		
0.4	233.77	191.69	198.30	162.77	240.70
0.5	194.24	153.35	158.64	149.94	199.51
0.6	167.88	127.79	132.20	140.21	172.05
0.7	149.06	109.54	113.31	132.48	152.43
0.8	134.94	95.84	99.15	126.12	137.72
0.9	123.96	85.19	88.13	120.77	126.27
1	115.17	76.67	79.32	116.18	117.12

un modelo regional, ambos factores pueden ser simulados mediante un refinamiento de malla y medio heterogéneo (Cabrera-Estupiñán & Hernández-Valdés, 2011).

Relación entre gasto específico y transmisividad hidráulica de Darcy con régimen no lineal alrededor del pozo de bombeo

Se presentan de manera frecuente dos situaciones:

a) Pozo de penetración total

Para este análisis se considera importante introducir las expresiones que determinan el abatimiento a cualquier distancia de un pozo que bombea a caudal constante en un medio homogéneo e isótropo (Pérez, 2001):

$$S = S_D + S_T = 0.183 \frac{Q}{T_D} \log \left(\frac{2.246 T_D t}{r^2 E} \right) + \left(\frac{Q}{2\pi T_T} \right)^2 \frac{1}{r} \quad (6)$$

O su equivalente:

$$S = 0.366 \frac{Q}{T_D} \log \left(\frac{r_0}{r} \right) + \left(\frac{Q}{2\pi T_T} \right)^2 \frac{1}{r} \quad (6a)$$

Donde $r_0 = \left(\frac{2.246 T_D t}{E} \right)^{1/2}$ y se conoce como radio de influencia.

La distancia medida desde el centro del pozo de bombeo a partir de la cual puede considerarse el régimen lineal de flujo se determina por el radio de Darcy (r_D), definido por Pérez (2001):

$$r_D = \frac{Q}{0.1\pi} \left[\frac{T_D}{T_T^2} \right] \quad (7)$$

La ecuación (6a) para el pozo de bombeo en función del r_D se expresa de la manera siguiente:

$$S_p = \frac{Q}{T_D} \left\{ 0.366 \log \left(\frac{r_0}{r_p} \right) + \frac{1}{40\pi} * \left[\frac{r_D}{r_p} \right] \right\} \quad (8)$$

En las expresiones (6), (6a) y (8), el primer sumando de la derecha representa a la componente darciana del abatimiento y el segundo a la componente turbulenta, siendo Q el caudal de bombeo; S , el abatimiento; $T_D = mK_D$, la transmisividad darciana; $T_T = mK_T$, la transmisividad turbulenta, donde m es el espesor del acuífero; E , el coeficiente de almacenamiento; t , el tiempo de bombeo, y r es la distancia desde el pozo de observación al centro del pozo de bombeo.

De las expresiones anteriores y a partir de las conductividades hidráulicas darciana $K_D = \frac{T_D}{m}$ y turbulenta $K_T = \frac{T_T}{m}$, y por las siguientes ecuaciones: $K_D = \frac{gk}{v}$ y $K_T^2 = \frac{g\sqrt{k}}{C}$, donde v es

la viscosidad cinemática del fluido y g la aceleración de la gravedad, se pudieran obtener las propiedades hidrogeológicas características de los acuíferos: permeabilidad intrínseca o geométrica (k), y rugosidad equivalente del medio poroso o fisurado (C).

La representación en un gráfico semilogarítmico S vs $\log(r)$ de la ecuación (5a) tendría un comportamiento como el indicado en la figura 1.

Para obtener el mismo abatimiento en el pozo de bombeo con régimen lineal de flujo, la pendiente del gráfico semilogarítmico de la figura 1 sería $\Delta S'_{r10} > \Delta S_{r10}$ lo que implica que la transmisividad correspondiente que simula el efecto del régimen no lineal es menor que la del acuífero $T'_D < T_D$.

$$S_p = 0.366 \frac{Q}{T_D} \log \left(\frac{r_o}{r_p} \right) \quad (9)$$

De igualar (8) con (9) se obtiene la relación entre la transmisividad real del acuífero y la

estimada a partir del gasto específico si hay componente no lineal de flujo $\left(\frac{r_D}{r_p} > 1 \right)$:

$$T_D = \left[1 + \frac{0.366 * \log \left(\frac{r_o}{r_p} \right)}{40 * \pi} * \left(\frac{r_D}{r_p} \right) \right] * T'_D \quad (10)$$

Si se despeja T_D en la ecuación (8) se obtiene:

$$T_D \left(\frac{m^2}{d} \right) = \frac{Q(lps)}{S_p(m)} * (\text{Factor}_{RNL}) \quad (11)$$

Sustituyendo $r_p = 0.25$ m y para un radio de influencia de $r_o = 1\ 250$ m se obtendría:

$$\text{Factor}_{RNL} = \left[117 + 0.688 * \frac{r_D}{r_p} \right] \quad (12)$$

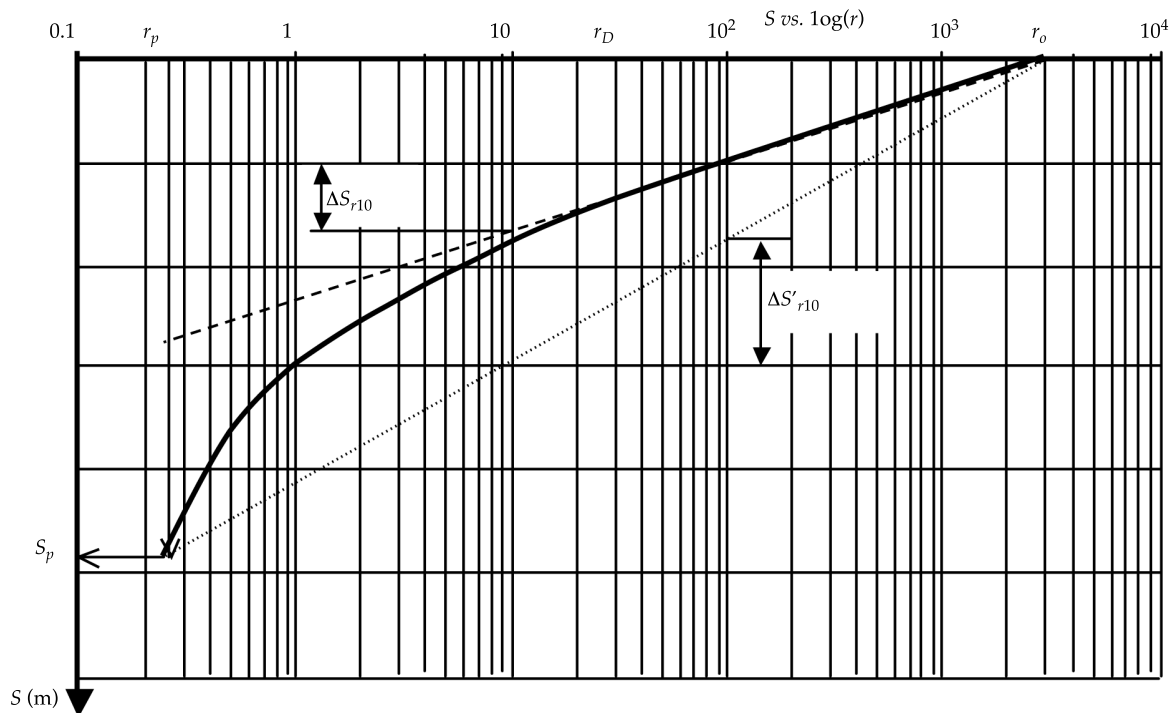


Figura 1. Gráfico S vs. $\log(r)$ con régimen no lineal alrededor del pozo de bombeo.

Observe que para régimen lineal, $\frac{r_d}{r_p} = 1$, por lo que el Factor $_{RNL}$ coincide con el del régimen lineal de la ecuación (5).

b) Pozo de penetración parcial

El uso de pozos penetración parcial es lo más frecuente que se presenta como situación real en los pozos de bombeo; así, los efectos del régimen no lineal se manifiestan con mayor frecuencia por inducirse mayores gradientes en las proximidades del pozo de bombeo, lo que implica mayores abatimientos en éstos.

En la figura 2 se muestra un esquema representativo de un pozo de penetración parcial utilizado por Hernández-Valdés (1984) para calcular el abatimiento en este tipo de pozo, considerando el régimen no lineal de flujo. Se realizó la hipótesis de suponer que la línea de corriente inferior tiene forma parabólica, con vértice en la pared del pozo e intercepto con el fondo impermeable del acuífero a una

distancia de dos veces el espesor de éste, por lo que el espesor del acuífero varía en función de la penetración del pozo de bombeo desde la pared de éste hasta dos veces su espesor.

A partir del esquema de la figura 2, en dicho trabajo se obtiene por integración la ecuación que permite determinar el abatimiento en el pozo de bombeo, considerando un régimen no lineal de flujo, que sigue la ley binómica que relaciona la velocidad con el gradiente hidráulico (Pérez, 2001):

$$I = \frac{U}{K_D} + \frac{U^2}{K_T^2} \quad (13)$$

Entre el pozo de bombeo y la distancia de dos veces el espesor del acuífero (2 m), la ecuación de continuidad presenta la siguiente forma:

$$Q = A * U = 2\pi r \left[h_s + \frac{(m - h_s)}{\sqrt{2m}} * r^{\frac{1}{2}} \right] * U \quad (14)$$

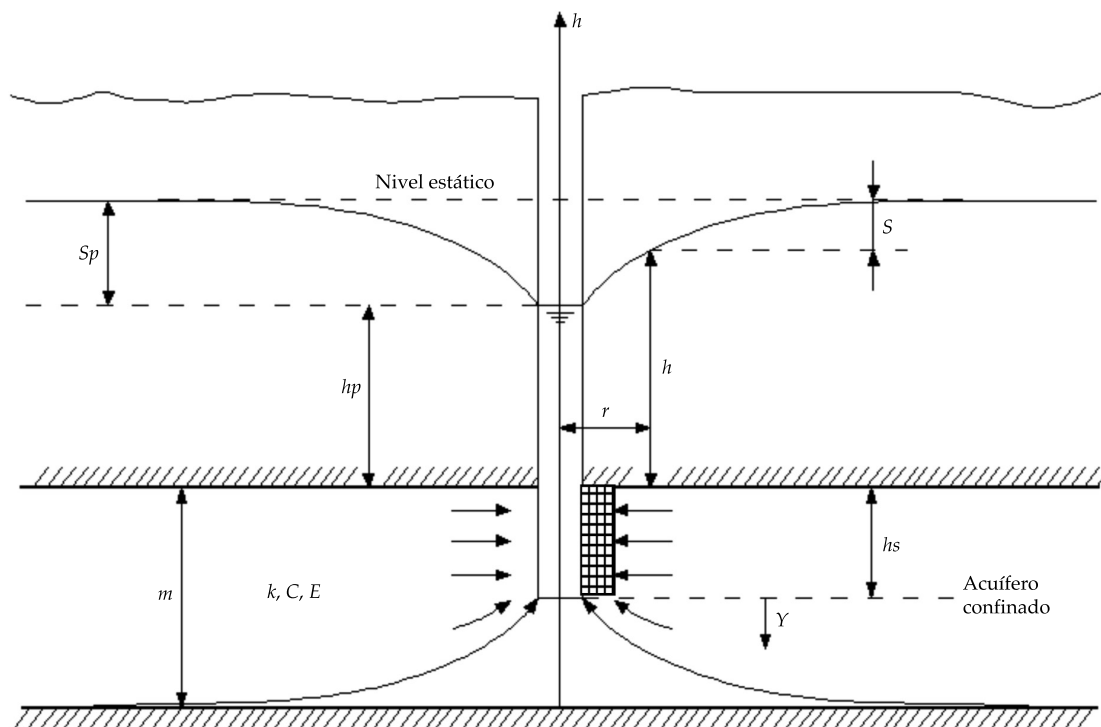


Figura 2. Representación de un pozo de penetración parcial.

Donde U es la velocidad media aparente.

Considerando $I = \frac{dh}{dr}$, despejando U de la ecuación (14), sustituyendo en la ecuación (13) y mediante un proceso de integración, se puede determinar la diferencia de abatimientos entre el pozo de bombeo y la distancia de dos veces el espesor del acuífero mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} [S_{pp} - S_{2m}] &= \int_{h_{pp}}^{h_{2m}} dh = \int_{r_p}^{r_{2m}} \frac{Q dr}{2\pi K_D r \left[h_s + \frac{(m-h_s)}{\sqrt{2m}} * r^{\frac{1}{2}} \right]} \\ &+ \int_{r_p}^{r_{2m}} \frac{Q^2 dr}{4\pi^2 K_T^2 r^2 \left[h_s + \frac{(m-h_s)}{\sqrt{2m}} * r^{\frac{1}{2}} \right]^2} \end{aligned} \quad (15)$$

El espesor es constante a partir de la distancia de dos veces el espesor del acuífero (2 m), hasta el radio de influencia (r_o), por lo que el abatimiento en éste se determinaría por:

$$S_{2m} \frac{Q}{2\pi K_D m} \ln \left[\frac{r_o}{2m} \right] + \frac{Q^2}{4\pi^2 m^2 K_T^2} * \frac{(r_o - 2m)}{r_o * 2m} \quad (16)$$

La ecuación (17) se obtiene de la integración de la ecuación (15) con la sustitución de la ecuación (16) y mediante el empleo de variables adimensionales.

Despejando T_D de la ecuación obtenida del abatimiento se obtiene:

$$\begin{aligned} T_D \frac{Q}{S_{pp}} * \frac{1}{2\pi} &\left\{ \ln \left[\left(\frac{4x}{Fp} \right) \left(Fp + (1-Fp) \left(\frac{Fp}{4x} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right] \right. \\ &\left. \left(\frac{1}{Fp} + 0.0375 * \frac{(1-Fp)^2 * \beta}{Fp^3 * x} \right) \right] + \ln \left(\frac{\alpha * Fp}{4x} \right) + \frac{0.025 * \beta}{x * Fp^2} \right. \\ &\left. * \left[\left(Fp^2 - 4.5 * Fp + 3 \right) + \left(\frac{2 * x * Fp}{Fp + (1-Fp) \left(\frac{Fp}{4x} \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-1.5 * (1-Fp) \left(\frac{4x}{Fp} \right)^{\frac{1}{2}} * \left[1 + \frac{(1-Fp) \left(\frac{Fp}{4x} \right)^{\frac{1}{2}}}{Fp + (1-Fp) \left(\frac{Fp}{4x} \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \\ &+ 0.05 * \beta * \left(\frac{Fp}{4x} - \frac{1}{\alpha} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

donde: $Fp = hs/m$, $\beta = r_D/r_p$, $\alpha = r_o/r_p$ y $x = hs/2r_p$, siendo hs la penetración del pozo dentro del acuífero (m); r_D , el radio de Darcy; m , el espesor del acuífero; r_p , el radio del pozo de bombeo, y r_o , el radio de influencia.

La ecuación (17) puede sustituirse por el producto del Q_s por un factor que considera el régimen no lineal y la penetración parcial (Factor_{RNLpp}):

$$T_D (m^2/d) = \text{Factor}_{RNLpp} * Q_s (lps/m) \quad (18)$$

Una expresión aproximada del Factor_{RNLpp} que se obtiene por regresión de la ecuación (18) sería la siguiente:

$$\text{Factor}_{RNLpp} = \text{Fac}_{RNL} * \text{Fac}_{RNLpp1} \quad (19)$$

$$\text{Fac}_{RNL} = \left[115.5 + 0.6845 * \frac{r_d}{r_p} \right] \text{ y}$$

$$\text{Fac}_{RNLpp1} = \left[Fp^{-0.368 * \left(\frac{r_d}{r_p} \right)^{0.234}} \right]$$

$$\text{Factor}_{RNLpp} = \text{Fac}_{RNL} * \text{Fac}_{RNLpp1}$$

$$= \left[115.5 + 0.6845 * \frac{r_d}{r_p} \right] * \left[Fp^{-0.368 * \left(\frac{r_d}{r_p} \right)^{0.234}} \right] \quad (20)$$

Para el caso de penetración total ($F_p = 1$), el Factor_{RNLpp} $\approx$ Factor_{RNL} en la ecuación (12).

La correlación entre el factor de la fórmula analítica (17) con el ajustado representado por la ecuación (20), para un amplio rango de valores de $Fp = hs/m$ y $\beta = r_D/r_p$, se observa en la figura 3.

Si se divide el coeficiente que afecta al Q_s en pozos de penetración parcial o con efectos del régimen no lineal dado por (Factor_{RNLpp}) entre el (Factor_{RL}), se obtendrían los resultados del cuadro 2, que representan al coeficiente por el que se multiplicaría la transmisividad obtenida a partir del gasto específico, suponiendo

régimen lineal de flujo y pozo de penetración total, en función de la penetración del pozo (Fp) y de la presencia de un régimen no lineal de flujo.

Valoración de la aplicación de los resultados anteriores en acuíferos cársicos de la antigua provincia La Habana, Cuba

Los principales acuíferos que abastecen a la ciudad de La Habana están en formaciones

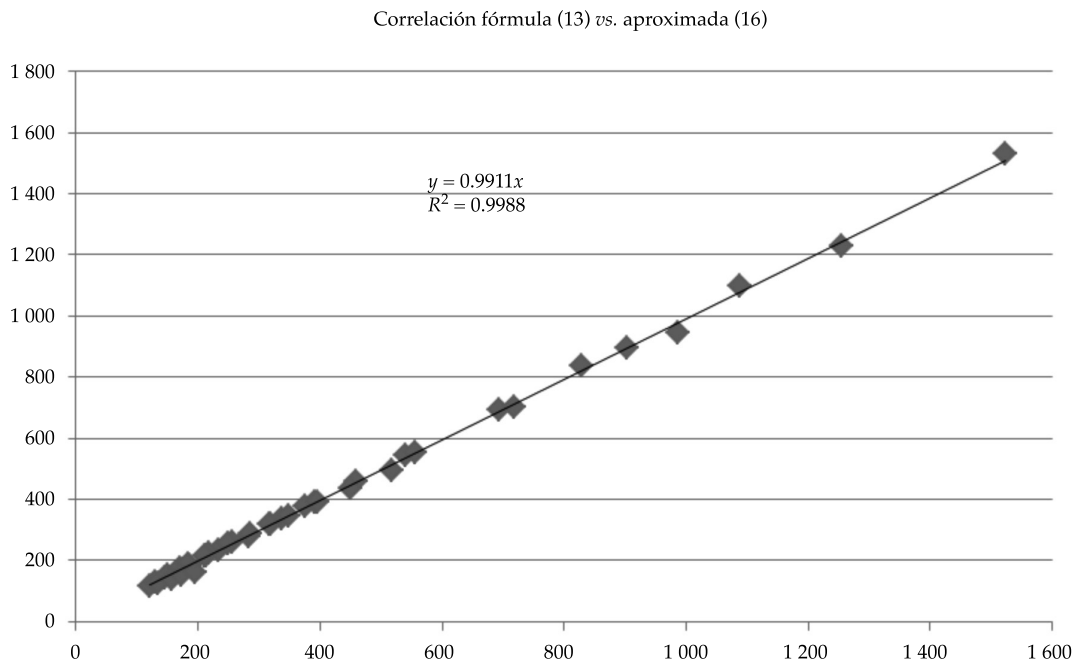


Figura 3. Correlación del factor con penetración parcial y régimen no lineal según fórmula analítica y ecuación de ajuste.

Cuadro 2. Coeficiente de corrección de transmisividades estimadas a partir del gasto específico Q_s .

Fp	Régimen lineal			Régimen no lineal. Relación entre r_D/r_p							
	Schneebeli	DeGlee	Autor	4	20	40	80	100	240	320	400
0.4	2.06	2.00	1.39	1.61	2.18	2.72	3.73	4.23	8.07	10.50	13.10
0.5	1.71	1.66	1.28	1.44	1.85	2.24	2.96	3.33	6.00	7.65	9.38
0.6	1.47	1.43	1.20	1.31	1.61	1.91	2.46	2.73	4.71	5.90	7.14
0.7	1.30	1.27	1.13	1.21	1.44	1.67	2.10	2.31	3.84	4.74	5.67
0.8	1.18	1.15	1.08	1.13	1.30	1.48	1.83	2.00	3.22	3.92	4.65
0.9	1.08	1.06	1.03	1.07	1.19	1.34	1.62	1.76	2.75	3.32	3.90
1	1.00	0.98	0.99	1.01	1.10	1.22	1.46	1.57	2.39	2.86	3.33

cársicas con diversos grados de fisuramiento y cavernosidad. La aplicación de ecuaciones deducidas para medios no consolidados en acuíferos cársicos ha encontrado en la comunidad científica diversos cuestionamientos; no obstante, modelos conceptuales que consideran estas formaciones geológicas como medios porosos equivalentes han demostrado ser aceptables en la modelación matemática a escala regional y en el flujo hacia pozos a escala local. No obstante, en este último caso es importante considerar la componente del abatimiento, que por lo general se manifiesta en los alrededores del pozo de bombeo y se debe a un régimen no lineal que no cumple con la ley de Darcy.

Para evaluar el comportamiento de la relación entre gasto específico y transmisividad, se incluyen los resultados de un conjunto de pruebas de bombeo realizadas en acuíferos de la antigua provincia La Habana, en Cuba, y fundamentalmente del acuífero costero del sur de la Habana, obtenidos por Molina-Rosabal y Ferrás-Martínez (1989), y que se muestran en el cuadro 3.

Las muestras no seleccionadas (148) del citado estudio presentaban como principal característica que en los pozos de bombeo se producía una estabilización muy rápida (85, inmediata estabilización; 63 en menos de 15 minutos), típico de un efecto de recarga, que puede ser causado por el sistema de cavernamiento de esta región cársica; tales pruebas daban un gasto específico muy grande y si se pronosticara la transmisividad T_D del acuífero por la ecuación (5), se estaría sobrevalorando este parámetro.

En la figura 4 se puede apreciar el comportamiento del factor que relaciona la transmisividad con el gasto específico (T_D/Q_s) en las 90 muestras seleccionadas. Sólo el 34% de la muestra tiene un factor en el rango corrientemente utilizado entre 100 y 140. El 58% de la muestra tiene un factor en el rango entre 80 y 160, con lo que se demuestra que no es confiable realizar estimaciones de la transmisividad a partir del gasto específico. Las desviaciones evidencian los efectos del

régimen no lineal de flujo, las pérdidas por estructura o la penetración parcial de los pozos de bombeo, no pudiéndose determinar la causa específica sin otros detalles adicionales.

En el propio trabajo de referencia (Molina-Rosabal & Ferrás-Martínez, 1989), se incluyeron los datos de pozos que disponían de satélites para tratar de determinar la propiedad del acuífero, indicativo del régimen no lineal, utilizando el procedimiento propuesto por Pérez (2001) y modificado junto con otro procedimiento por Hernández-Valdés (2008). En este último trabajo, el autor propone que el pozo de bombeo no sea utilizado para el cálculo de propiedades, ya que se le pueden achacar al régimen no lineal y a la propiedad que lo caracteriza causas como la penetración parcial, pérdidas por estructuras u otras, que realmente no se deben a él.

De los ensayos que debajo se muestran, en cinco de ellos se utilizó el pozo de bombeo para determinar T_r , por lo que el radio de Darcy obtenido puede estar afectado por las causas antes indicadas; no obstante, se aprecia que la relación $\left(\frac{T_D}{Q_s}\right)$, equivalente al factor, puede ser explicada en su magnitud por la presencia del régimen no lineal de flujo y/o por la presencia de la penetración parcial del pozo de bombeo, sin poder esclarecer la causa sin otras informaciones.

En el cuadro 4 se muestran los resultados de cinco ensayos de bombeo con pozos satélites tomados del trabajo de Molina-Rosabal y Ferrás-Martínez (1989); se agregó el 966 de la misma cuenca.

Comentarios sobre resultados de ensayos de bombeo con pozos satélites

En los casos donde se disponía de dos pozos de observación (pozo 15 y 966), se realizan los siguientes comentarios:

- En el primer caso no se manifestaba el régimen no lineal entre los dos satélites, por lo que se utilizó el pozo de bombeo y

Cuadro 3. Relación T_D/Q_s en pozos de la provincia La Habana.

Pozo	Q_s (lps/m)	T_D (m ² /d)	T_D/Q_s	Pozo	Q_s (lps/m)	T_D (m ² /d)	T_D/Q_s
19	324.00	52 600.00	162.35	1 615	75.36	8 197.00	108.77
86	100.00	11 900.00	119.00	657	3.50	324.00	92.57
23	12.00	3 730.00	310.83	715	2.43	479.00	197.12
85	35.00	4 360.00	124.57	1 100	74.00	7 313.00	98.82
115	14.61	3 160.00	216.29	1 580	22.32	3 169.00	141.98
98	141.00	30 800.00	218.44	619	45.90	4 061.00	88.47
95	22.00	3 800.00	172.73	1 784	7.04	821.00	116.62
97	66.00	6 700.00	101.52	1 023	54.38	8 657.00	159.19
103	42.20	10 000.00	236.97	22	31.16	11 331.00	363.64
115	109.00	15 330.00	140.64	1 590	9.00	1 000.00	111.11
132	216.00	26 800.00	124.07	2 077	43.70	4 353.00	99.61
131	121.70	12 470.00	102.47	1 957	33.60	2 435.00	72.47
133	176.60	65 800.00	372.59	1 627	19.92	1 878.00	94.28
149	154.30	17 900.00	116.01	1 815	9.97	1 392.00	139.62
6	57.00	10 000.00	175.44	1 662	39.01	4 872.00	124.89
7	12.00	1 000.00	83.33	1 732	43.40	7 423.00	171.04
10	50.00	5 600.00	112.00	701	0.78	72.13	92.47
54	14.00	2 180.00	155.71	1 160	40.10	12 482.00	311.27
56	102.00	33 000.00	323.53	15	1.65	373.00	226.06
57	2.70	289.00	107.04	1 393	20.40	835.00	40.93
60	53.50	5 490.00	102.62	1 192	876.00	107 271.00	122.46
59	59.60	5 490.00	92.11	1 113	1.60	752.00	470.00
61	15.20	1 480.00	97.37	690	30.76	5 424.00	176.33
63	154.30	17 100.00	110.82	814	3.03	567.00	187.13
67	13.50	2 670.00	197.78	608	3.30	500.00	151.52
68	34.90	4 840.00	138.68	519	52.60	9 686.00	184.14
75	123.00	14 900.00	121.14	507	27.45	6 375.00	232.24
78	53.00	7 330.00	138.30	503	38.80	5 564.00	143.40
79	287.00	18 170.00	63.31	494	20.70	4 598.00	222.13
80	8.20	1 140.00	139.02	1 432	55.90	4 188.00	74.92
81	110.00	29 200.00	265.45	75	16.25	2 462.00	151.51
83	16.14	1 335.00	82.71	1 681	10.80	1 282.00	118.70
87	40.00	2 804.00	70.10	1 605	1.66	740.00	445.78
91	142.40	17 500.00	122.89	1 447	5.42	530.00	97.79
92	7.80	1 000.00	128.21	1 317	13.07	1 683.00	128.77
94	53.96	27 902.00	517.1	AB2/9	49.00	7 848.00	160.16
93	11.50	4 950.00	430.43	TE-21	3.56	1 917.00	538.48
540	100.00	21 600.00	216.00	AB4/45	139.00	12 305.00	88.53
365	1.65	403.00	244.24	911	21.88	3 971.00	181.49
278	57.20	13 400.00	234.27	791	6.34	460.00	72.56
277	53.40	6 450.00	120.79	1 732	143.00	20 000.00	139.86
896	3.67	292.00	79.56	976	12.18	1 708.00	140.23
1	13.87	3 531.00	254.58	966	15.10	2 350.00	155.63
2	13.19	4 312.00	326.91	467	7.26	1 164.00	160.33
3	24.35	2 635.00	108.21	398	11.93	1 427.00	119.61
33	7.04	792.00	112.50	89	27.4	27 112	989
						Promedio	179.3
						Desviación	85.0

Valor porcentual del factor para diferentes intervalos

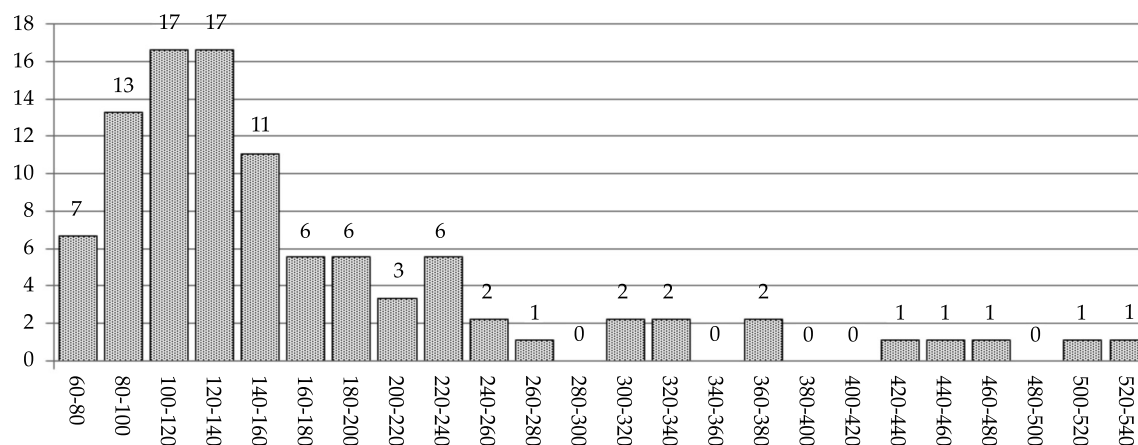


Figura 4. Valores porcentuales del factor que correlaciona la transmisividad con el gasto específico en las 90 muestras del cuadro 3.

Cuadro 4. Pozos del cuadro 3 con al menos un pozo satélite.

Pozo	T_D (m ² /d)	Distancias (m) Pozos para T_T	T_T (m ² /d)	Radio de Darcy (m)	Q_s (lps/m)	T_D/Q_s	Factor _{RNL}	Observaciones
94	27 902	0.25 y 23.3	3 049	124	54	517	455	*Penetración parcial $F_p = 0.92$
89	27 112	0.2 y 100	1 250	162	27.4	989	670	*Penetración parcial $F_p = 0.8$
1160	12 482	0.25 y 15	2 538	80	40	311	335	Ok
22	11 330	0.2 y 60	1 920	72.6	31.16	363	364	Ok
966	2 900	0.3, 38 y 60	823	79	12.2	237	295	Error en cálculo de T_T
15	373	0.2, 10 y 15	120	224	1.65 0.438	226-851	883	Valor de Q_s inadecuado

*Los valores estimados de la penetración parcial se obtienen de aplicar el Factor_{RNLpp} (20).

el más cercano, situado a 38 m; esto implicó que se consideraran pérdidas de carga como producto del régimen no lineal de flujo, siendo otras las causas y se cometiera un error en el cálculo de T_T dando un radio de Darcy superior a las distancias a las que se encontraban los pozos de observación, donde no se manifestaba el régimen lineal, por lo que de acuerdo con la relación entre T_D/Q_s , el valor del radio de Darcy debía ser teóricamente de 53 m, despejando del

$$Fac_{RNL} = \left[115.5 + 0.6845 * \frac{r_d}{r_p} \right]$$

- En el segundo caso se aprecia que el gasto específico obtenido de la prueba está afectado por efectos de recarga o cavernamiento, y que el abatimiento que debía obtenerse en el pozo de bombeo resultaría un gasto específico cuatro veces menor y que por ende existiría entonces correspondencia entre la relación $\left(\frac{T_D}{Q_s} \right)$

y el Factor_{RNL}. En la figura 5 se ilustra el cálculo de propiedades con la metodología propuesta por Hernández-Valdés (2008)

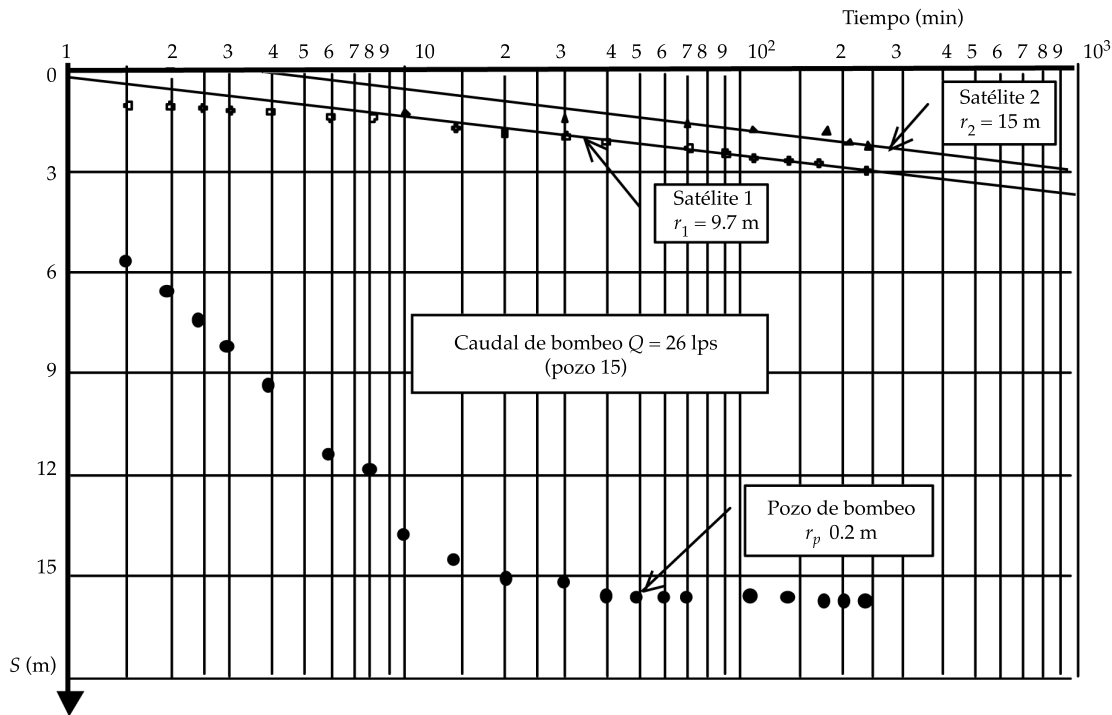


Figura 5. Gráfico semilogarítmico del pozo 15 (datos tomados de Molina-Rosabal & Ferrás-Martínez, 1989).

y se muestran gráficamente los datos del ensayo de bombeo.

Esta prueba de bombeo se realizó con un caudal de 26 lps en un pozo de 40 cm de diámetro y se midieron los abatimientos en dos satélites situados a 9.7 y 15 m, respectivamente, del pozo de bombeo.

Cálculo de la transmisividad darciana T_D

Se sigue el mismo procedimiento enunciado por Cooper y Jacob (1946), citado por Todd (1959), obteniendo de la representación en un gráfico S vs. $\log(t)$, la pendiente por ciclo ΔSt_{10} y de aquí se determina la T_D por la siguiente expresión:

$$T_D = 0.183 \frac{Q}{\Delta St_{10}} = 0.183 * \frac{26 * 86.4}{1.1} = 373 \text{ m}^2/d$$

Cálculo de la transmisividad turbulenta T_T

Como las rectas ajustadas en los gráficos semilogarítmicos del inciso anterior deben ser paralelas, se determina la diferencia de abatimientos entre ellas para cualquier tiempo y se despeja de la ecuación (6a) el valor de T_T .

$$T_T^2 = \frac{\frac{Q^2}{4\pi^2} \left(\frac{r_2 - r_1}{r_2 * r_1} \right)}{\left[(S_1 - S_2) - 0.366 \frac{Q}{T_D} \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right]} \Rightarrow T_T = 109 \text{ m}^2/d$$

Siendo $r_1 = 9.7$ m y $r_2 = 15$ m distancias desde el pozo de bombeo a los pozos de observación; $S_1 = 2.96$ m y $S_2 = 2.16$ m, abatimientos correspondientes a las distancias anteriores para un tiempo de 239 minutos.

Cálculo del radio de Darcy r_D

Este parámetro ya se definió como $r_D = \frac{Q}{0.1\pi} \left(\frac{T_D}{T_T} \right)$ y daría $r_D = 224$ m.

Determinación del coeficiente de almacenamiento E

Como los dos pozos de observación están en la zona de régimen no lineal (inferiores al radio de Darcy), entonces se sigue el procedimiento empleado por Jacob (Chenini *et al.*, 2008) para calcular E_p obteniéndose a partir de este valor el coeficiente de almacenamiento E :

$$E = \frac{2.246 T_D t_0}{r^2} * e^{\frac{Q T_D}{\pi r^2}} = E_j * e^{0.1 \left(\frac{r_2}{r} \right)}$$

Para $r_1 = 9.7$ m, $t_0 = 3.47 * 10^{-4}$ días y $E_j = 0.0031$, por tanto $E = 0.031$.

Para $r_1 = 15$ m, $t_0 = 1.8 * 10^{-3}$ días y $E_j = 0.0069$, por tanto $E = 0.031$.

El factor que afecta a E_j en la ecuación anterior es precisamente el error que se comete al determinar el coeficiente de almacenamiento E , por el procedimiento propuesto por Jacob en un pozo de observación que se encuentra en la zona no lineal de flujo.

Utilización del factor Factor_{RNLpp} para estimar abatimientos en los pozos de bombeo

De igual manera, se puede decir que el abatimiento en el pozo de bombeo puede ser determinado en función del caudal (Q) y la transmisividad (T_D), despejando de la ecuación (18) por:

$$S_p(m) = \text{Factor}_{RNLpp} * \frac{Q(\text{lps})}{T_D(m^2/d)} \quad (21)$$

En la propuesta de Hernández-Valdés y Llanusa-Ruiz (2009), aplicada por Cabrera-Estupiñán (2010), para considerar como restricción el abatimiento en algunos nodos representativos de pozos de bombeo si se conoce la penetración del pozo, se calcularía el Factor_{RNLpp} para el caudal de bombeo de máxima capacidad instalada, a fin de evitar iterar, dado que el radio de Darcy (7) depende de éste y estar del lado de la seguridad; ello

permitiría utilizar el modelo de optimización MADA (Cabrera-Estupiñán & Dilla-Salvador, 2011), con un refinamiento semilocal de la malla en el modelo regional del acuífero.

Conclusiones

De este trabajo se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Las estimaciones de la transmisividad (T_D) a partir del gasto específico (Q_s) induce a errores significativos de este parámetro, ya que se puede sobrevalorar en los casos donde se logre una rápida estabilización de los niveles en los pozos de bombeo, o se puede subvalorar cuando efectos de penetración parcial, régimen no lineal, pérdidas por estructura del pozo, etcétera, estén influyendo en la magnitud del factor que los correlaciona.
- El efecto del régimen no lineal de flujo en los pozos de bombeo induce a calcular transmisividades menores que las reales de utilizarse el gasto específico para estimarlas y éstas serían cada vez menores a medida que aumenten los caudales de bombeo.
- La magnitud del coeficiente que relaciona T_D (m^2/d) con Q_s (lps/m) puede indicar si hay efectos de recarga o cavernamiento, régimen no lineal de flujo, penetración parcial, pérdidas por estructura del pozo de bombeo, etcétera.
- Para identificar las verdaderas causas que originan los incrementos del abatimiento en los pozos de bombeo es necesario conocer las características constructivas de la obra de captación, las propiedades hidrogeológicas del acuífero y las condiciones de explotación a que está siendo sometida dicha obra.
- Para diferentes caudales de bombeo, los abatimientos en los pozos de bombeo pueden ser estimados en pozos de penetración parcial y con régimen no lineal de flujo a partir del factor Factor_{RNLpp} y de la transmisividad T_D , conocidas las propiedades del acuífero y el factor de penetración.

- Se recomienda realizar ensayos de bombeo que permitan determinar las propiedades del acuífero con régimen no lineal, realizando dos ensayos de bombeo con caudales diferentes y un pozo de observación, o un ensayo si se dispone de dos pozos de observación próximos al de bombeo y al menos uno donde se manifieste el efecto del flujo no lineal. No es aconsejable utilizar los datos del pozo de bombeo, salvo para calcular la transmisividad T_D .

Recibido: 27/03/12

Aceptado: 22/04/13

Referencias

- Abbott, M. M., & Dehay, K. (2008). *Aquifer Tests and Characterization of Transmissivity, Ada-Vamoosa Aquifer on the Osage Reservation* (10 pp.). Osage County, USA: Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5118. Recuperado de pubs.usgs.gov/sir/2008/5118/.
- Aitchison-Earl, P., & Smith, M. (2008). *Aquifer Test Guidelines* (2nd edition). Report No. R08/25. Environment Canterbury Technical Report. Recuperado de www.ecan.govt.nz.
- Cabrera-Estupiñán, E. (2010). *Sistema para la administración de la explotación del agua subterránea*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Cabrera-Estupiñán, E., & Hernández-Valdés, A. O. (2011). Modelación del agua subterránea a escala regional con refinamiento local de la malla. Planteamiento y validación del algoritmo. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México*, 2(1), 65-82.
- Cabrera-Estupiñán, E., & Dilla-Salvador, F. (octubre-diciembre, 2011). Modelo de administración de acuíferos: MADA. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, 2(4), 5-24.
- Chenini, I., Silvain, R., & Ben-Mammou, A. (2008). A simple method to estimate Transmissibility and Storativity of Aquifer Using Specific Capacity of Wells. *J. Applied Sci.*, 8(14), 2640-2643.
- De Glee, G. J. (1930). *Over Groundwaterstominger Bij Water Onnttrekking Door Middle Van Put Ten*. Thesis. Delft Holland: J. Waltman.
- El-Naga, A. (1994). Estimation of transmissivity from specific capacity data in fractured carbonate rock aquifer, central Jordan. *Environmental Geology*, 23(1), 73-80.
- Hernández-Valdés, A. O. (1984). Efectos de la penetración parcial e pozos con régimen no lineal. *Ingeniería Hidráulica (ISPJAE)*, 5(2).
- Hernández-Valdés, A. O., & Llanusa-Ruiz, H. (2009). "La modelación matemática y la explotación de los acuíferos costeros". Congreso Internacional de Hidráulica. Cayo Santa María. Cuba.
- Hernández-Valdés, A. O. (2008). *Nuevas formulaciones para determinar las propiedades hidrogeológicas con régimen no lineal*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Knopman, D. S., & Hollyday, E. F. (1993). Variation in Specific Capacity in Fractured Rocks, Pennsylvania. *Ground Water*, 31(1), 135-145.
- Knochenmus, A., & Bowman, G. (MOE) (1998). *Transmissivity and Water Quality of Water-Producing Zones in the Intermediate Aquifer System*. Sarasota County, USA: Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4091.
- Molina-Rosabal, Y., & Ferrás-Martínez, L. (1989). *Características de las propiedades hidrogeológicas de la Cuenca Sur: Tramo Güira-Quivicán*. Trabajo de Diploma. La Habana: Facultad de Ingeniería Civil, ISPJAE.
- Parkhurst, D. L., Christenson, S., & Breit, G. N. (1996). *Ground-Water-Quality Assessment of the Central Oklahoma Aquifer, Oklahoma: Geochemical and Geohydrologic Investigations* (101 pp.). Paper 2357-C. US Geological Survey Water-Supply.
- Pérez, D. (2001). *La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque*. La Habana: Editorial Félix Varela.
- Schneebeli, G. (1966). *Hydraulique Souterraine*. Paris: Eyrolles.
- Walton, W. (1970). *Groundwater Resource Evaluation* (664 pp.). McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering.
- WRI Report 87-4034 (2008). *Hydrogeology, Aquifer Characteristics, and Ground-Water Flow of the Surficial Aquifer System, Broward County*. Disponible en: sofia.usgs.gov/publications/wri/87-4034/spcapacity.html.

Dirección institucional del autor

Dr. Armando O. Hernández-Valdés

Facultad de Ingeniería Civil
Centro de Investigaciones Hidráulicas
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Calle 114, núm. 11901 entre 119 y 127, Marianao
19390 La Habana, CUBA
Teléfonos: +53 (7) 2601 416 y 2603 636
Fax: +53 (7) 2672 013
ahernandez@cih.cujae.edu.cu