

METODO DE DOBLE POROSIDAD PARA LA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO COMO ALTERNATIVA EN ACUÍFEROS FRACTURADOS

Javier de Jesús Cortés-Bracho¹

Abstract - La permeabilidad de los acuíferos fracturados y cársticos dependen de la amplitud de sus cavidades, lo cual implica utilizar una adecuada interpretación de la evolución de las condiciones hidrodinámicas. El objetivo del presente estudio fue interpretar las pruebas de bombeo en medios fracturados mediante el método de doble porosidad, utilizando datos derivados y su comparación con curvas tipo derivadas. Se realizó un programa de computadora el cual funciona en ambiente Windows como herramienta para hacer la estimación de los parámetros hidrogeológicos de 37 pruebas de bombeo realizadas en un medio fracturado de calizas. La interpretación de resultados bajo la metodología de doble porosidad fue comparada con la interpretación mediante Theis, Jacob y Hantush, si bien, los valores obtenidos con doble porosidad son menores que los obtenidos por los otros métodos, estadísticamente no se encontró diferencia significativa entre sus valores medios.

Palabras-clave - fracturas, doble porosidad, calizas.

INTRODUCCIÓN

Las pruebas de bombeo son usadas frecuentemente en estudios hidrogeológicos de rocas sedimentarias fracturadas, para obtener estimaciones de las propiedades hidráulicas de una dada longitud de perforación. Las curvas tipo basadas sobre el modelo conceptual de flujo radial en un acuífero poroso confinado son las más comunes, sin embargo frecuentemente, respuestas no ideales son observadas en los datos de pruebas

¹ Profesor Investigador del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Félix U. Gómez 211, Fracc. Viramontes, Saltillo, Coahuila, México, Tel. +84-17-30-22 Ext. 340, Fax: +84-17-32-44, C.P. 25040, e-mail: jjcortes@uaaan.mx

de bombeo surgiendo otros modelos conceptuales los cuales consideran diversos efectos tales como, flujo lineal, flujo esférico, espesor finito, efectos de revestimiento y respuesta ocasionada por un medio de doble porosidad. En la práctica, la selección del modelo esta basada sobre un conocimiento *a priori* de las condiciones geológicas y de la naturaleza de la respuesta de la prueba. (Lapcevic y Novakowski, 1989).

Frecuentemente las pruebas de bombeo conducidas en rocas fracturadas exhiben resultados como formas derivadas de respuesta radial ideal. Esto conduce al desarrollo de numerosos modelos conceptuales los cuales consideran los efectos de geometría de límites alternantes, sistemas mixtos y condiciones físicas encontradas en los sistemas de rocas fracturadas, por ejemplo, la presencia de un daño en la zona alrededor del pozo, conocido como revestimiento en el pozo ha sido considerado por Ramey *et al.* (1975) y Sageev (1986). Otros modelos conceptuales incluyen efectos de doble porosidad (Dougherty y Babu, 1984; Mateen y Ramey, 1984; Sageev y Ramey, 1986) donde ambos, las fracturas y la matriz contribuyen al sistema de flujo. Modelos mixtos consideran una región circunstante al pozo para tener propiedades que puedan ser diferentes de las propiedades de la formación como un todo, guiando a regímenes de flujo múltiple (Moench y Hsieh, 1985; Karasaki *et al.*, 1988). El efecto de límites abiertos o cerrados es incluida en algunos modelos (Karasaki *et al.*, 1988). Podría ser notado que en muchos casos el modelo de flujo radial de Cooper *et al.*, (1967) puede ser empleado para analizar los resultados de pruebas de bombeo influenciadas por estos procesos hidráulicos sin un substancial error. Consecuentemente, la utilidad de aplicar estos otros modelos conceptuales es en la información adicional que proveen respecto la naturaleza del régimen de flujo en el interior de un sistema de flujo complicada fractura-matriz.

McConnell (1993) menciona que los modelos de doble porosidad son como el nombre implica, dos sistemas de porosidad. El acuífero es dividido en fracturas y matriz de blocks, las fracturas tienen una extremadamente alta permeabilidad y si no están ocupadas por sedimentos, una porosidad de 1.0. Las rocas interfractura tienen una baja permeabilidad y una baja porosidad. Como el pozo empieza a producir a una tasa de flujo constante, todo el flujo y descompresión del fluido ocurre en las fracturas. Durante este período el sistema actúa como un acuífero homogéneo con las propiedades de transmisividad (T) y almacenamiento (S) para las fracturas. Dado que el área actual transversal de las fracturas es desconocida, la T referida es el número de veces de la conductividad hidráulica en el espesor del total de la zona productora. Usualmente muy al inicio los datos de tiempo son encubiertos por los efectos de almacenaje del pozo. Como

las caídas de presión son en las fracturas, los blocks empiezan produciendo agua, eventualmente los blocks y las fracturas están dentro de un equilibrio de presión y el sistema se conduce como si fuera homogéneo con la T solamente de las fracturas y el S de las fracturas además de la matriz de blocks.

MATERIALES Y MÉTODOS

En medios fracturados, la respuesta del abatimiento en función del tiempo, manifiesta una relación diferente a los medios porosos comunes (Lapcevic y Novakowski, 1989) es decir, un abatimiento mayor a tiempos iniciales y posteriormente una recuperación hasta llegar a una cierta estabilidad (efecto de doble porosidad), lo que hace difícil su comparación con las curvas tipo. Una solución a este problema es la utilización de datos derivados y su comparación con curvas tipo derivadas para doble porosidad. Además en la mayoría de los casos no es posible económicamente contar con pozos de observación para hacer las mediciones de abatimiento por lo que se propone utilizar el mismo pozo de producción como pozo de observación, de esta manera la metodología empleada fue:

a)- Personal de la Comisión Nacional del Agua en Coahuila, México, realizó en noviembre y diciembre de 1996, 37 pruebas de bombeo en pozos localizados en las zonas hidrogeológicas Manzanera y Zapalinamé, los datos de campo a considerar fueron: tiempo (t) vs. abatimiento (s) medido en el mismo pozo de bombeo, caudal de bombeo (Q), radio del pozo (r_w) y observar el posible daño en la formación por la perforación.

b)- Se ajustó un modelo de regresión a los datos de t vs. s .

c)- Se determinó los datos derivados. McConnell (1993) propone el siguiente algoritmo para derivar los datos de abatimiento respecto al logaritmo natural del tiempo.

$$\left(\frac{ds}{d(\ln t)} \right)_i = t_i \left[\frac{\ln(t_{i+j}) - \ln(t_i)}{\ln(t_{i+j}) - \ln(t_{i-k})} \left(\frac{s_i - s_{i-k}}{t_i - t_{i-k}} \right) + \frac{\ln(t_i) - \ln(t_{i-k})}{\ln(t_{i+j}) - \ln(t_{i-k})} \left(\frac{s_{i+j} - s_i}{t_{i+j} - t_i} \right) \right] \quad (1)$$

Donde: t_i es el tiempo observado; $t_{i+j} = t_i + 0.2 (t_i)$; $t_{i-k} = t_i - 0.2(t_i)$; s_i , s_{i+j} y s_{i-k} son los abatimientos a los tiempos t_i , t_{i+j} , t_{i-k} respectivamente.

d)- Se compararon los datos observados y derivados con las curvas tipo función y las curvas tipo derivadas, para encontrar el mejor ajuste, esto se logró con mayor facilidad utilizando los datos derivados sobre las curvas tipo derivadas.

e)- Una vez logrado el ajuste se encontró los parámetros t_D/W_D ; h_D ; h'_D para la curva tipo seleccionada ($W_D e^{2s}$) para un tiempo dado y un abatimiento estimado a este tiempo.

f)- Se calculó el valor de la transmisividad, considerando a los parámetros de la curva tipo seleccionada, McConnell (1993) propone:

$$h_D = \frac{2psT}{Q} \quad (2)$$

Donde s es el abatimiento en el pozo, T es la transmisividad y Q es el caudal de bombeo constante.

g).- Se calculó el coeficiente de almacenamiento. El efecto de almacenamiento en el pozo es debido a la primera producción procedente del almacenamiento en el pozo en vez de la formación. Conforme incrementa el tiempo la mayor parte del flujo viene de la formación y menos del almacenaje del pozo, así el efecto disminuye. Al inicio del tiempo el efecto de almacenaje del pozo (W_D) domina el sistema (McConnell, 1993).

$$W_D = \frac{C}{2pSrw^2} \quad (3)$$

Donde S es el coeficiente de almacenamiento, rw es el radio del pozo y W_D es el parámetro de la curva tipo de la forma:

$$W_D = e^{2s} \quad (4)$$

s representa un factor de revestimiento (adimensional) el cual varía de -5 para un pozo demasiado dañado a -2 para un pozo hidráulicamente fracturado con poco daño. El revestimiento tendrá un mayor efecto sobre el cálculo de los parámetros del acuífero cuando las observaciones son realizadas en el mismo pozo de bombeo el cual está construido en rocas fracturadas.

y C es una constante de almacenaje que de acuerdo a McConnell (1993) es definida en:

$$\frac{t_D}{W_D} = \frac{2ptT}{C} \quad (5)$$

h).- Se realizó el cálculo de Transmisividad utilizando los métodos tradicionales de Theis, Jacob y Hantush, para realizar una comparación estadística con los valores obtenidos bajo la interpretación por el método de doble porosidad. Esta comparación se efectuó bajo la hipótesis nula de que las poblaciones tienen la misma media ($H_0: \mathbf{m}_1 = \mathbf{m}_2$) distribuyéndose como una t-Student, considerando los supuestos de que cada serie de valores obtenidos en cada método se distribuyen normales y son independientes siendo la regla de decisión: Si $|t_c| > t_{\alpha/2, (n_1+n_2-2)gl}$ se rechaza la hipótesis nula ($H_0: \mathbf{m}_1 = \mathbf{m}_2$).

RESULTADOS

Para la determinación de los parámetros del acuífero en medios fracturados de caliza bajo la metodología de doble porosidad, se realizó un programa de computadora en lenguaje Microsoft Visual Basic, el cual funciona en ambiente Windows. En este programa se consideran los siguientes modelos encontrados con el software TableCurve 3D versión 1.0 de Jandel Scientific.

1.- Modelo para los datos de campo de tiempo (t) vs. abatimiento (s).

$$s = A + B(\ln t)^2 + C \ln t + D / t^{0.5} \quad (6)$$

Donde: A, B, C, D son coeficientes de regresión, s es el abatimiento en metros y t el tiempo en minutos, el modelo fue seleccionado observando el predominio de comportamiento de los datos de t vs. s de varias pruebas de bombeo en medios fracturados de calizas.

2.- Modelos para las Curvas Tipo Función de Doble Porosidad donde $z = h_D$ y $x = t_D/W_D$

a).- Curva tipo de parámetro $W_D e^{2s} = 10^{-.52}$

$$z = a + bx + cx \ln x + dx^{0.5} \ln x + ex^{0.5} \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9977$$

$$a = -0.2801; b = 0.0174; c = -0.0014; d = -0.1106; e = 0.6424$$

b).- Curva tipo de parámetro $W_D e^{2s} = 10^1$

$$z^{-1} = a + b(\ln x)^2 + c \ln x + d / x^{0.5} + e \ln x / x + f / x \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9986$$

$$a = -0.2545; b = -0.0051; c = 0.0918; d = 2.3341; e = -0.7610; f = -0.6846$$

c).- Curva tipo de parámetro $W_D e^{2s} = 10^4$

$$z^{-1} = a + b(\ln x)^2 + c \ln x + d / x^{0.5} + e / x \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9981$$

$$a = 0.2056; b = 0.0013; c = -0.0202; d = -0.1734; e = 1.1687$$

d).- Curva tipo de parámetro $W_D e^{2s} = 10^{10}$

$$z^{-1} = a + b \ln x + c / x^{0.5} + d \ln x / x + e / x^{1.5} + f \ln x / x^2 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.9991$$

$$a = 0.1303; b = -0.0076; c = -0.8578; d = 1.1169; e = 1.6505; f = -0.1256$$

e).- Curva tipo de parámetro $W_D e^{2s} = 10^{30}$

$$z^{-1} = a + b \ln x + c / x^{0.5} + d \ln x / x + e / x^{1.5} + f \ln x / x^2 \quad (11)$$

$$R^2 = 0.9988$$

$$a = 0.0853; b = -0.0057; c = -0.8042; d = 1.1049; e = 1.4949; f = -0.2413$$

3.- Modelos para las Curvas Tipo Derivadas de Doble Porosidad donde $z = h'_D$ y $x = t_D/W_D$

a).- Curva tipo de parámetro $W_D e^{2s} = 10^{-52}$

$$z^{-1} = a + b / x^{0.5} + c \ln x / x + d / x + e / x^{1.5} + f \exp^{-x} \quad (12)$$

$$R^2 = 0.9964$$

$$a = 2.0017; b = -4.2595; c = 9.0843; d = -6.6600; e = 11.9295; f = 3.7058$$

b).- Curva tipo de parámetro $W_d e^{2s} = 10^1$

$$z^{-1} = a + b(\ln x)^2 + c \ln x + d \exp^{-x} \quad (13)$$

$$R^2 = 0.9707$$

$$a = 0.6123; b = -0.0339; c = 0.3827; d = 3.6706$$

c).- Curva tipo de parámetro $W_d e^{2s} = 10^4$

$$z^{-1} = a + b \ln x + c / x^{0.5} \quad (14)$$

$$R^2 = 0.9531$$

$$a = -1.8060; b = 0.6002; c = 2.9407$$

d).- Curva tipo de parámetro $W_d e^{2s} = 10^{10}$

$$z^{-1} = a + b(\ln x)^2 + c / x^{0.5} \quad (15)$$

$$R^2 = 0.9471$$

$$a = -0.6147; b = 0.0508; c = 1.7751$$

e).- Curva tipo de parámetro $W_d e^{2s} = 10^{30}$

$$z^{-1} = a + b(\ln x)^2 + cx^{0.5} + d / x^{0.5} + e / x \quad (16)$$

$$R^2 = 0.9878$$

$$a = 0.1986; b = -0.0711; c = 0.1529; d = -1.0883; e = 1.8373$$

En el Cuadro 1, se presentan los resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo, aclarando que de las 37 pruebas realizadas, fue posible bajo la metodología de Doble Porosidad la interpretación de 34 para estimar valores de transmisividad y solo 30 para estimar valores de coeficiente de almacenamiento.

Se observa en el Cuadro 1 que de las 34 pruebas interpretadas por el método de doble porosidad para obtener los valores de transmisividad, estos corresponden a las unidades hidrogeológicas mostradas en el Cuadro 2. Donde el mayor rango pertenece a la unidad hidrogeológica del Cretácico Inferior, también se observa que su promedio es más grande ($1.10 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) comparado con las otras unidades. Esto es debido a que la unidad hidrogeológica del Cretácico Inferior está conformada por la secuencia de las formaciones Aurora, La Peña y Cupido, siendo esta última de gran fracturamiento y donde el fenómeno de disolución es más importante.

En tanto que de las 30 pruebas de bombeo interpretadas para estimar el coeficiente de almacenamiento, los resultados por unidad hidrogeológica se presentan en el Cuadro 3. Donde el rango más amplio se presenta en la unidad hidrogeológica del Cretácico Superior la cual presenta una secuencia de formaciones de Difunta, Lutita Parras, San Felipe e Indidura, que pueden ser las causantes de los diversos valores. En tanto que en la unidad hidrogeológica Terciario-Cuaternario conformada por arenas y conglomerados, el promedio es ligeramente mayor es decir presenta un ligero aumento en el almacenamiento comparado con las otras unidades, esto es debido a que es un material granular donde la porosidad es mayor.

Cuadro 1. RESULTADOS DE LA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS EN LA ZONA HIDROGEOLOGICA MANZANERA-ZAPALINAME MUNICIPIO DE ARTEAGA, COAH. UTILIZANDO EL METODO DE DOBLE POROSIDAD

POZO	LOCALIZACIÓN			PREDIO	AREA	UNIDAD HIDROGEOLOGICA	T (m ² /s)	S
	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD					
G-035	25° 22' 45'' N	100° 31' 58'' W	2690 m	Ejido Rancho Nuevo	Cañón Los Lirios	Ks	8.54 x 10 ⁻⁵	2.94 x 10 ⁻⁵
G-026	25° 23' 31'' N	100° 36' 44'' W	2250 m	Rcho. San Francisco	Cañón Los Lirios	Ki	4.71 x 10 ⁻⁵	5.41 x 10 ⁻⁴
G-038	25° 23' 16'' N	100° 33' 26'' W	2505 m	La Escondida	Cañón Los Lirios	Ki	**	**
F-034	25° 23' 27'' N	100° 37' 11'' W	2254 m	Rcho. San Francisco	Cañón Los Lirios	TQr	6.50 x 10 ⁻⁵	2.78 x 10 ⁻⁴
H-23	25° 23' 24'' N	100° 41' 38'' W	2183 m	Rcho. Martinillos	Cañón Los Chorros	Ks	2.84 x 10 ⁻⁵	6.13 x 10 ⁻⁴
E-003	25° 22' 55'' N	100° 46' 38'' W	2058 m	Rcho. El Tábano	Cañón Los Lirios	Ks	1.94 x 10 ⁻⁵	1.38 x 10 ⁻²
F-014	25° 25' 27'' N	100° 37' 13'' W	2294 m	Grupo 2	Cañón El Tunal	Js	2.99 x 10 ⁻⁵	3.32 x 10 ⁻⁴
C-22	25° 25' 26'' N	100° 38' 11'' W	2252 m	Huerta los Titilones	Cañón El Tunal	Js	5.31 x 10 ⁻⁵	6.55 x 10 ⁻⁴
H-141	25° 13' 52'' N	100° 47' 23'' W	2261 m	Rcho. San Felipe	Valle Chapultepec	Ki	2.99 x 10 ⁻⁵	1.88 x 10 ⁻⁴
H-009	25° 17' 30'' N	100° 47' 04'' W	2030 m	Rcho. Cerro Enmedio	Valle Emiliano Zapata	Ki	2.72 x 10 ⁻⁴	3.69 x 10 ⁻³
H-61	25° 15' 43'' N	100° 46' 13'' W	2044 m	Rcho. Puerto Rico	Valle Emiliano Zapata	Ki	1.08 x 10 ⁻⁵	2.81 x 10 ⁻⁵
H-73	25° 15' 38'' N	100° 45' 03'' W	1948	Rcho. Vikingo	Valle Emiliano Zapata	Ki	4.97 x 10 ⁻³	**
H-128	25° 12' 22'' N	100° 45' 23'' W	2000 m	Rcho. El Cura	Valle Huachichil	Ki	1.84 x 10 ⁻⁵	**
H-78	25° 14' 53'' N	100° 43' 06'' W	2079 m	Rcho. Zaragoza	Valle Emiliano Zapata	Ki	**	**

POZO	LOCALIZACIÓN			PREDIO	AREA	UNIDAD HIDROGEOLOGICA	T (m ² /s)	S
	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD					
H-117	25° 12' 20'' N	100° 45' 24'' W	2080 m	Rcho. La Galeana	Valle Huachichil	Ki	6.60 x 10 ⁻⁶	2.07 x 10 ⁻⁵
T-No-3	25° 10' 40'' N	100° 44' 47'' W	1798 m	Rcho. La Juliana	Valle Huachichil	Ki	2.02 x 10 ⁻⁴	3.23 x 10 ⁻³
H-110*	25° 12' 33'' N	100° 45' 58'' W	2048 m	Rcho. Guadalupe	Valle Huachichil	Ki	2.22 x 10 ⁻³	1.75 x 10 ⁻⁴
D-28	25° 11' 50'' N	100° 47' 28'' W	2055 m	Ejido Huachichil	Valle Huachichil	Ki	**	**
D-30	25° 12' 02'' N	100° 48' 11'' W	1925 m	Ejido Huachichil	Valle Huachichil	Ki	7.61 x 10 ⁻⁴	6.27 x 10 ⁻²
H-59	25° 21' 01'' N	100° 46' 25'' W	2230 m	Rcho. El Cristal	Valle San A. de las Alazanas	Js	2.29 x 10 ⁻⁴	7.76 x 10 ⁻³
H-06	25° 21' 22'' N	100° 41' 13'' W	2071 m	Rcho. El Cristal	Valle San A. de las Alazanas	Js	2.18 x 10 ⁻⁵	2.11 x 10 ⁻⁶
01-007	25° 15' 06'' N	100° 31' 51'' W	2390 m	H. el Alto	Valle San A. de las Alazanas	Ks	1.23 x 10 ⁻⁵	1.56 x 10 ⁻⁴
601-A	25° 24' 53'' N	100° 48' 16'' W	1865 m	Arroyo el Chorro 1	Cañón La Carbonera	Ki	4.20 x 10 ⁻⁴	1.43 x 10 ⁻²
H-82	25° 22' 29'' N	100° 48' 36'' W	2049 m	Rcho. La Herradura	Cañón Los Lirios	TQr	2.97 x 10 ⁻⁴	1.88 x 10 ⁻²
H-55	25° 15' 32'' N	100° 47' 11'' W	2060 m	Rcho. El Bayonero	Valle Emiliano Zapata	Ki	1.27 x 10 ⁻²	**
2-28	25° 21' 57'' N	100° 36' 10'' W		Buenavista	Cañón Jamé	Js	7.58 x 10 ⁻⁵	6.17 x 10 ⁻³
N-I-23	25° 22' 05'' N	100° 58' 26'' W	2232 m	El Bajío	Cañón Jamé	Js	1.84 x 10 ⁻⁵	5.10 x 10 ⁻⁶
H-33	25° 21' 22'' N	100° 41' 13'' W	2110 m	Rcho. La Flecha	Valle San A. de las Alazanas	Js	2.39 x 10 ⁻⁵	1.49 x 10 ⁻⁵
J-001	25° 14' 26'' N	100° 28' 16'' W	2506 m	Rcho. El Lucero	Valle San A. de las Alazanas	Ks	1.60 x 10 ⁻⁵	3.44 x 10 ⁻⁴
2-05	25° 18' 31'' N	100° 36' 55'' W	2280 m	Rcho. El Coyote	Valle San A. de las Alazanas	Js	2.02 x 10 ⁻⁵	5.49 x 10 ⁻⁴
H-89	25° 18' 00'' N	100° 36' 52'' W	2300 m	Rcho. La Libertad	Valle San A. de las Alazanas	Js	2.81 x 10 ⁻⁵	1.99 x 10 ⁻⁴

POZO	LOCALIZACIÓN			PREDIO	AREA	UNIDAD HIDROGEOLOGICA	T (m ² /s)	S
	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD					
B-54	25° 27' 48'' N	100° 37' 19'' W	2280 m	Rcho. Pinos Altos	Cañón La Carbonera	Ks	3.18 x 10 ⁻⁵	1.75 x 10 ⁻⁸
2-43	25° 29' 29'' N	100° 36' 18'' W	1869 m	Las Placetas	Cañón la Carbonera	Js	5.40 x 10 ⁻⁵	1.12 x 10 ⁻³
B-38	25° 27' 44'' N	100° 38' 30'' W	2270 m	Rcho. Santa Fe	Cañón La Carbonera	Ks	4.37 x 10 ⁻⁵	8.45 x 10 ⁻⁹
H-011*	25° 17' 29'' N	100° 47' 04'' W	2030 m	Rcho. Cerro Enmedio	Valle Emiliano Zapata	Ki	1.11 x 10 ⁻¹	**
H-60*	25° 17' 29'' N	100° 47' 04'' W	2030 m	Rcho. Cerro Enmedio	Valle Emiliano Zapata	Ki	2.21 x 10 ⁻²	7.40 x 10 ⁻³
PO	25° 17' 24'' N	100° 47' 03'' W	2095 m	Rcho. Cerro Enmedio	Valle Emiliano Zapata	Ki	5.39 x 10 ⁻³	3.88 x 10 ⁻⁷

T: Transmisividad

Ki: Unidad Hidrogeológica del Cretácico Inferior; Secuencia de las formaciones Aurora (Kia), La Peña (Kilp) y Cupido (Kic)

S: Coeficiente de Almacenamiento

Ks: Unidad Hidrogeológica del Cretácico Superior; Secuencia de las formaciones Difunta (Ksd), Lutita Parras (Ksp), San Felipe (Ksf), e Indidura (Ksi)

*: Pozo de Observación

Js: Unidad Hidrogeológica del Jurásico Superior de la formación La Casita (Jslc)

PO: Piezómetro de Observación

TQr: Unidad Hidrogeológica del Terciario-Cuaternario de las formaciones Conglomerado Reynosa (Ticgl) y Arena-Conglomerado (Qar-cgl)

** : Datos de campo insuficientes para el cálculo

Cuadro 2. Resultados de la transmisividad en m^2/s por unidad hidrogeológica.

Unidad Hidrogeológica	Número de Pruebas de Bombeo	Rango de Transmisividad (m^2/s)	Promedio de Transmisividad (m^2/s)
Cretácico Inferior	15	$6.60 \times 10^{-6} - 1.11 \times 10^{-1}$	1.10×10^{-2}
Cretácico Superior	7	$1.23 \times 10^{-5} - 8.54 \times 10^{-5}$	3.39×10^{-5}
Jurásico Superior	10	$1.84 \times 10^{-5} - 2.29 \times 10^{-4}$	5.54×10^{-5}
Terciario-Cuaternario	2	$6.50 \times 10^{-5} - 2.97 \times 10^{-4}$	1.81×10^{-4}

Cuadro 3. Resultados del coeficiente de almacenamiento por unidad hidrogeológica.

Unidad Hidrogeológica	Número de Pruebas de Bombeo	Rango de Coeficiente de Almacenamiento	Promedio de Coeficiente de Almacenamiento
Cretácico Inferior	11	$3.88 \times 10^{-7} - 6.27 \times 10^{-2}$	8.40×10^{-3}
Cretácico Superior	7	$8.45 \times 10^{-9} - 1.38 \times 10^{-2}$	2.13×10^{-3}
Jurásico Superior	10	$2.11 \times 10^{-6} - 7.76 \times 10^{-3}$	1.68×10^{-3}
Terciario-Cuaternario	2	$2.78 \times 10^{-4} - 1.88 \times 10^{-2}$	$9-50 \times 10^{-3}$

Por que se refiere a la estimación de la transmisividad por los métodos tradicionales de Theis, Jacob y Hantush, en el Cuadro 4, se muestran los valores calculados para los pozos donde fueron realizadas las pruebas de bombeo, aquí también se incluyen los calculados por el método de Doble Porosidad con el cual se compararon encontrando que al hacer la inferencia estadística, resulta que no se rechaza la hipótesis de que las medias sean iguales ($H_0 : m_1 = m_2$) a niveles de significancia $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.01$ (Cuadro 5).

Cuadro 4. Comparación de la estimación por diversos métodos del valor de Transmisividad ($m^2/día$), para las pruebas de bombeo consideradas en Cuadro 1.

Pozo	Theis	Jacob	Hantush	Doble Porosidad
01-007	17.13	17.09	8.53	1.07
2-05	6.19	15.76	6.69	1.75
2-28	128.21	128.26	131.25	6.55
2-43	97.99	97.98	77.54	4.67
601-A	1181.90	1181.91	1515.61	36.26
B-38	11.87	12.22	8.42	3.77
B-54	9.02	9.18	6.26	2.75
C-22	72.49	72.16	26.39	4.59
D-28	**	**	**	**
D-30	**	**	**	65.78
E-003	346.37	346.28	33.65	16.78
F-014	33.50	33.37	15.71	2.58
F-034	**	1409.79	**	5.62
G-026	60.26	59.79	3.01	4.07
G-035	50.54	50.88	47.68	7.38
H-009	7341.21	2447.07	122.35	23.49
H-011	42011.58	69247.15	35274.78	9557.75
H-06	9.98	10.65	4.96	1.88
H-110	1328.70	1357.32	345.13	192.11
H-117	7.81	7.74	1.93	0.57
H-128	8221.73	8221.73	704.45	158.59
H-141	50.45	50.38	9.89	2.59
H-23	26.56	27.82	25.96	2.45
H-33	10.49	11.37	8.29	2.06
H-59	7307.84	2435.95	121.79	19.82
H-60	5785.77	7296.32	5415.29	1905.03
H-61	13.49	13.50	8.24	0.93
H-73	**	**	**	429.53
H-78	**	**	**	190.24
H-82	1213.06	1213.06	576.61	25.66
H-89	37.79	37.81	35.02	2.43
J-001	8.23	13.71	6.15	1.38
N-I-23	9.02	9.49	6.91	1.59
PO	9210.54	14445.09	19500.89	465.68
T-No-3	731.53	731.53	57.72	17.42
Media	2844.71	3581.04	2136.90	387.20
Desviación Estándar	7923.64	12578.34	7240.30	1655.02

** Datos de campo insuficientes para el cálculo.

Cuadro 5. Comparación de medias para probar la hipótesis ($H_0 : m_1 = m_2$).

	Theis vs. Doble	Jacob vs. Doble	Hantush vs. Doble
	Porosidad	Porosidad	Porosidad
t-Calculada	1.7671	1.4678	1.3705
t-Student $\alpha=0.05$	1.997	1.996	1.997
t-Student $\alpha=0.01$	2.653	2.651	2.653

CONCLUSIONES

El método de Doble Porosidad encuentra una aplicación acorde al comportamiento de la evolución de los niveles piezométricos causados por el bombeo de pozos en medios fracturados de calizas, así lo manifiestan los datos derivados calculados para varios pozos. Los resultados de transmisividad son del orden de 6.60×10^{-6} a 1.11×10^{-1} m²/s con el promedio más alto del orden de 1.10×10^{-2} m²/s, que corresponde a la unidad hidrogeológica del Cretácico Inferior formada por la secuencia estratigráfica de las formaciones Aurora, La Peña y Cupido, y coeficiente de almacenamiento del orden de 8.45×10^{-9} a 6.27×10^{-2} con el promedio más alto de 9.50×10^{-3} que corresponde a la unidad hidrogeológica Terciario-Cuaternario conformada por arenas y conglomerados.

El método de Doble Porosidad comparado con Theis, Jacob y Hantush, presenta valores menores, sin embargo, estadísticamente sus medias son iguales, se recomienda el uso de doble porosidad para la interpretación de pruebas de bombeo en medios fracturados en vista de que representa con mas veracidad el fenómeno hidrodinámico de estos medios.

BIBLIOGRAFÍA

- Cooper, H. H., J. D. Bredehoeft, and I. S. Papadopoulos. 1967. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research* 3 (1): 263-269.
- Dougherty, D. E. and D. K. Babu. 1984. Flow to a partially penetrating well in a double porosity reservoir. *Water Resources Research*. 20 (8): 1116 - 1122.
- Karasaki, K., J. C. S. Long and P. A. Witherspoon. 1988. Analytical models of slug tests. *Water Resources Research*. 24 (1): 115 - 126.
- Lapcevic, P. A. and K. S. Novakowski. 1989. The analysis of slug tests conducted in fractured sedimentary rock. Paper presented at the NWWA FOCUS Conference on Easter Regional Ground Water Issues. Kitchener, Ontario.

- Mateen, K. and H. J. Ramey Jr. 1984. Slug test data analysis in reservoirs with double porosity behaviour. SPE 12779. Long Beach, California. Soc. Pet. Eng.
- McConnell, C. L. 1993. Double porosity well testing in the fractured carbonate rocks of the Ozarks. *Journal Ground Water* 31 (1): 75 - 83.
- Moench, A. F. and P. A. Hsieh. 1985. Analysis of slug test data in a well with finite thickness skin. *Memoirs of the 17th International Congress on the Hydrogeology of Rocks of Low Permeability. Member of the International Association of Hydrologists. Tucson Arizona, U. S. A. Vol. 17 pp 17 - 29.*
- Ramey, H. J. Jr., R. G. Agarwal and I. Martin. 1975. Analysis of slug test of DST flow period data. *Journal Can. Pet. Technol.* 14 (3): 37 - 47.
- Sageev, A. 1986. Slug test analysis. *Water Resources Research.* 22 (8): 1323 - 1333.
- Sageev, A. and H. J. Ramey. 1986. On slug test analysis in double porosity reservoirs. SPE 15479. New Orleans. L. A. Soc. Pet. Eng.