

# MODELACIÓN DEL ABATIMIENTO DE POZOS PROFUNDOS

## Modeling for Drawdown of Deep Wells

Abel Román-López<sup>1</sup>, Marco Antonio Inzunza-Ibarra<sup>1‡</sup>, Magdalena Villa-Castorena<sup>1</sup> y Ernesto Alonso Catalán-Valencia<sup>1</sup>

### RESUMEN

La ecuación del abatimiento del nivel de bombeo para pozos profundos proporciona información útil para el mejoramiento y rehabilitación de la infraestructura de extracción del agua subterránea. Es una herramienta básica para determinar la eficiencia hidráulica y las características del comportamiento hidráulico de un pozo profundo. Su expresión gráfica se conoce como curva característica, la cual prevé la posibilidad de incrementar o no el caudal extraído, así como la estabilidad del pozo en el acuífero, o sea, su capacidad para mantener el gasto o caudal. Para la obtención de la ecuación de abatimiento existen diferentes métodos por lo cual, el objetivo de investigación fue determinar la mejor metodología en términos de su precisión y facilidad de uso, en base al estudio de seis pozos dentro del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera. Estos pozos trabajan bajo una eficiencia electromecánica promedio de 40%, valor significativamente bajo con respecto al mínimo de 60% recomendado por las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes. Los resultados mostraron que los mejores modelos de predicción del abatimiento de bombeo en pozos profundos fue el polinomial, seguido por el propuesto por Kasenow. La confiabilidad de dichos modelos fue corroborada mediante un análisis de bondad de ajuste con la prueba de hipótesis de t de student a una confiabilidad del 90%. Posteriormente, y con base en el anterior análisis, se determinaron las curvas características del comportamiento hidráulico de los pozos.

**Palabras clave:** ecuación o modelo de abatimiento, curva característica, rehabilitación.

<sup>1</sup> Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, INIFAP. Km 6.5 margen derecho del canal Sacramento. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (inzunza.marco@inifap.gob.mx).

Recibido: febrero de 2009. Aceptado: mayo de 2010.  
Publicado en Terra Latinoamericana 29: 1-10.

### SUMMARY

The equation of the drawdown level of deep water wells provides useful information for the improvement and rehabilitation of the infrastructure of groundwater extraction. It is a basic tool to determine the hydraulic efficiency and the characteristics of the hydraulic response of deep water wells. Its graphical expression is known as the characteristic curve, which foresees the possibility of increasing pump rate, as well as the well stability or capacity to maintain the pump rate. There are several methodologies for obtaining the drawdown level equation for which, this work appeared with the objective of determining the best methodology in terms of its precision and facility of use for a study with six groundwater wells in the Main Aquifer of the Laguna Region. These wells operate with an average electromechanical efficiency of 40%, which is a value significantly low according to the minimum efficiency value recommended of 60% by the corresponding Mexican Official Norms. The results revealed that the better models to predict the drawdown pumping level were the polynomials, followed by that of Kasenow. The robustness statistics of models were checked by fitting statistic analysis using the student's hypothesis test greater than 90% of probability. Subsequently, and based on previous analysis, the characteristic curves hydraulic response of wells were determined, which defined stability of groundwater extraction from aquifer.

**Index words:** drawdown aquifer model, well characteristic curve, rehabilitation.

### INTRODUCCIÓN

Las exageradas e impredecibles variaciones en los patrones climáticos, han ubicado a la agricultura en condiciones de riesgo. Así, las reducciones de las precipitaciones han puesto de manifiesto la fragilidad del sector productivo al incrementar la presión sobre las reservas subterráneas debido a la reducción de

la captación de agua en los embalses de los distritos de riego del país. Como consecuencia, en más del 50% de los acuíferos en activo, el balance entre la recarga y la extracción de agua subterránea, presenta valores negativos como un índice de la sobreexplotación de los mismos. La información oficial reporta en 2004, un total de 653 acuíferos identificados a lo largo y ancho del país, de ellos se explotan actualmente 204 de los cuales 104 se encuentran sobreexplotados. De estos últimos acuíferos se extrae el 80% del agua subterránea que se utiliza en el país y en ellos se capta el 79% de la recarga de agua subterránea (CNA, 2005). Desafortunadamente, existe una tendencia de incremento del número de acuíferos sobreexplotados del orden de 2.5 por año (CNA, 2006).

Para corregir esta problemática y sostener las demandas de agua, una práctica común de solución temporal del abatimiento del nivel freático, es colocar la columna de bombeo cada vez a mayor profundidad, recurso que resulta conveniente siempre y cuando se haya realizado una reprojcción del equipamiento del pozo profundo. El inminente abatimiento de los niveles dinámicos en los acuíferos sobreexplotados, provoca la disminución drástica de hasta un 50% de la eficiencia global del sistema motor-bomba, en algunos casos de manera inmediata, aún en las bombas bien calculadas (Román *et al.*, 2007). La disminución en dicha eficiencia tiene como consecuencia el incremento de hasta un 100% del costo de la energía eléctrica consumida. El acuífero más importante de la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango, es el Acuífero Principal, su esencial fuente de agua subterránea y está considerado como sobreexplotado (Cruz y Levine, 1998). La CNA (2002), realizó un estudio de balance de agua de dicho acuífero y concluye que la relación (extracción/recarga) fue de 1221.8/518.9 Mm<sup>3</sup> anuales. Esto significa que dicha relación de 2.4:1 es la causa del innegable abatimiento de los niveles de bombeo en los pozos y uno de los factores principales de los bajos valores de eficiencia electromecánica con que operan los equipamientos de bombeo. En un estudio reciente Román *et al.* (2007), encontraron valores promedio del 89% de eficiencia hidráulica en los pozos muestreados siendo el 90% un valor aceptable. Esto indica que este acuífero sobreexplotado con problemas de abatimiento en el nivel de bombeo tiene un flujo libre del agua sin obstrucciones a través del filtro y del ademe.

El fenómeno de abatimiento del nivel del bombeo del agua en los pozos profundos ha sido considerado

mediante las ecuaciones de abatimiento por diversos autores (Custodio y Llamas, 1976; Kasenow, 2001; Román *et al.*, 2007). Dicha expresión del abatimiento del nivel de bombeo proporciona además información útil sobre las condiciones constructivas del pozo y criterios de decisión sobre la rehabilitación del mismo. A partir de esta función, se genera la curva característica del pozo que involucra la representación gráfica del gasto de extracción y el rendimiento o gasto específico del pozo con el abatimiento. Esta curva proporciona información acerca de la estabilidad del acuífero a la extracción del agua y además permite pronosticar los abatimientos de bombeo a diferentes gastos de extracción (Chen y Ayers, 1998). De acuerdo a la importancia económica que significa que el sistema de bombeo funcione bajo condiciones óptimas en una explotación agrícola, principalmente en zonas con el recurso agua de riego restringido, se presenta este documento como una metodología conveniente para diagnosticar y mejorar mediante la rehabilitación o reposición a los pozos profundos que extraen el agua subterránea.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los pozos bajo estudio están localizados dentro del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera entre 102° 22' y 104° 47' O y 24° 22' y 26° 23' N (SAGARPA, 2006). Este acuífero se encuentra incluido dentro de un valle intremontano cuya estructura geológica esta asociado principalmente a rocas sedimentarias plegadas eventualmente, y afectadas por cuerpos ígneos intrusivos; las litofaces asociadas a los medios porosos y fracturado constituyen un acuífero que fluctúa de libre a semiconfinado y en determinadas áreas su comportamiento corresponde a un acuífero del tipo confinado (CNA, 2002).

### Ecuación de Abatimiento del Pozo

Se utilizó el modelo matemático de abatimiento del nivel de bombeo para pozo profundo propuesto por Rorabaugh en 1953, recomendado por Custodio y Llamas (1976) y utilizado más recientemente por Peña y Arreguín (1989), Helweg (1992), Kasenow (2001) y por Román *et al.*, (2007). Su expresión se muestra en la Ecuación 1.

$$s = B Q + C Q^n \quad (1)$$

donde:

$s$  = abatimiento total en el pozo (m)

$BQ$  = pérdidas de carga del acuífero (m)

$CQ^n$  = pérdidas de carga en el pozo (m)

$B$  = coeficiente de pérdidas en el acuífero ( $m^2 \text{ día}^{-1}$ )

$C$  = representa el coeficiente de pérdidas en el pozo ( $m^5 \text{ día}^2$ )

$n$  = indica el régimen de flujo en la obra de toma o pozo profundo (adimensional)

$Q$  = gasto extraído ( $m^3 \text{ día}^{-1}$ )

Se consideró que valores del parámetro  $C$  de  $C \leq 2.5 \times 10^{-7}$  significa que las condiciones constructivas del pozo está bien construido y desarrollado, valores entre  $2.5 \times 10^{-7}$  a  $50 \times 10^{-7}$ , el pozo presenta inicio de incrustaciones en las rejillas del ademe, para valores de  $50 \times 10^{-7}$  a  $200 \times 10^{-7}$  el pozo profundo requiere de rehabilitación por incrustaciones o taponamiento de las rejillas del ademe, finalmente cuando  $C > 200 \times 10^{-7}$ , se considera difícil la rehabilitación del pozo por el alto grado de incrustaciones en sus rejillas. También se consideró que valores negativos de los coeficientes  $B$  y  $C$  en la ecuación, significan que las pérdidas de carga o abatimiento del nivel de bombeo en el acuífero ( $BQ$ ) o en el pozo ( $CQ^n$ ) son insignificantes o despreciables (Custodio y Llamas, 1976; CNA, 2006). El parámetro  $n$  indicó el régimen de flujo en el medio poroso y en contacto con el pozo: el régimen del flujo al pasar por este medio, cambia del régimen laminar al turbulento, en este fenómeno, Custodio y Llamas (1976) mencionan que  $n$  puede ser 1 ó variar de 2 a 3.6 (Jha *et al.*, 2004).

### Ecuación de Kasenow

Se aplicó la metodología de Kasenow (2001) para obtener los parámetros  $B$  y  $C$  del modelo 1, este método requiere como mínimo tres pares de datos observados de  $Q$  y  $s$ . Las ecuaciones propuestas por este autor para estimar dichos coeficientes, son mostradas en las Ecuaciones 2 y 3.

$$B_n = \frac{s_n Q_{n+1}^2 - s_{n+1} Q_n^2}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2} \quad (2)$$

$$C_n = \frac{s_{n+1} Q_n - s_n Q_{n+1}}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2} \quad (3)$$

Como un resultado preliminar se obtiene las medias de los parámetros  $B_m$  y  $C_m$ , posteriormente con los algoritmos (4) y (5), son obtenidos los valores finales que se utilizan en la ecuación de abatimiento.

$$B = \frac{s_f - C_m Q_f^2}{Q_f} \quad (4)$$

$$C = \frac{s_f - B_m Q_f}{Q_f^2} \quad (5)$$

donde:

$Q_n$  = gasto en la etapa  $n$  ( $m^3 \text{ día}^{-1}$ )

$s_n$  = representa al abatimiento en la etapa  $n$  (m)

$Q_{n+1}$  = gasto en la etapa  $n+1$  ( $m^3 \text{ día}^{-1}$ )

$s_{n+1}$  = abatimiento en la etapa  $n+1$  (m)

$B_n$  y  $C_n$  = valores intermedios obtenidos del ensayo de campo

$B_m$  y  $C_m$  = representan la media aritmética de  $B_n$  y  $C_n$

$s_f$  y  $Q_f$  = últimas observaciones de abatimiento y gastos ensayados.

Las unidades para  $Q$  y  $s$  ya fueron definidas.

### Ecuación de Jacob-Kasenow

Se empleó la metodología de Jacob-Kasenow (Peña y Arreguín, 1989), donde la pérdida de carga debida al acuífero se calcula con la Ecuación 6. Sin embargo, su utilización resulta impráctica ya que requiere tener un pozo de observación para la determinación de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, para superar este obstáculo, Jacob propone la Ecuación 7, con la cual es posible obtener en forma satisfactoria el valor del coeficiente de pérdida de carga en el pozo ( $C$ ).

$$a_t = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S} \quad (6)$$

$$C = \frac{\frac{\Delta s_{n+1}}{\Delta Q_{n+1}} - \frac{\Delta s_n}{\Delta Q_n}}{\Delta Q_n + \Delta Q_{n+1}} \quad (7)$$

donde:

$a_t$  = abatimiento teórico ocurrido en el acuífero (m)

$T$  = transmisividad ( $m^2 \text{ día}^{-1}$ )

$t$  = corresponde al tiempo a partir de iniciado el bombeo (h)

$r$  = simboliza el radio del pozo de observación (m)

$S$  = coeficiente de almacenamiento (adimensional)

$\Delta$  = representa el incremento o decremento de los abatimientos y gastos ensayados en los estudios de los pozos.

El procedimiento de esta metodología fue obtener primeramente, el valor medio de  $C$  utilizando la Ecuación 7, posteriormente este valor medio de  $C$  fue sustituido en la Ecuación 4, para finalmente obtener el coeficiente de pérdidas de carga hidráulica en el acuífero ( $B$ ).

### Método de Bierschenk Usando Análisis de Regresión

En esta metodología se utilizó el análisis de regresión lineal simple (Kasenow, 2001). Los coeficientes  $B$  y  $C$  se obtuvieron por regresión lineal con los datos medidos de la depresión específica ( $s Q^{-1}$ ) en función del gasto extraído del pozo ( $Q$ ) (Campillo, 2006). Con los resultados de la recta de ajuste, el valor de  $C$  corresponde a la pendiente de la recta, y el valor de  $B$  a la ordenada al origen.

### Procedimiento de la Obtención de los Modelos de Abatimiento

Para la determinación de las mediciones hidráulicas de los pozos, se realizaron ensayos escalonados de bombeo, donde en primer lugar se tuvo como dato de inicio el nivel estático de los pozos para posteriormente realizar pruebas de bombeo a diferentes gastos con sus respectivos niveles dinámicos o de bombeo. Se registraron las diferencias de los niveles dinámicos con respecto al estático entre las pruebas realizadas para finalmente obtener los abatimientos de bombeo real ( $s$ ) para cada gasto ( $Q$ ). Con esta información observada se obtienen los incrementos del gasto ( $\Delta Q$ ) e incremento en abatimiento ( $\Delta s$ ).

Para la obtención de la ecuación de abatimiento se emplearon las metodologías empíricas propuestas por Kasenow, Jacob-Kasenow y Bierschenk; además mediante el análisis de regresión se ajustaron modelos polinomiales de segundo grado ( $n = 2$ , Jacob) y modelos no lineales ( $n$ , Rorabaugh) utilizando el programa estadístico SAS (2001). Estos modelos tienen la ventaja

adicional con respecto a los anteriores, de conocer el grado de ajuste de la ecuación de abatimiento del pozo, mediante la significancia de los coeficientes de regresión, el coeficiente de determinación, así como el coeficiente de variación.

### Curvas Características del Pozo a partir de la Ecuación de Abatimiento

Para obtener la curva característica de los pozos primero se determinó la relación gráfica entre el gasto, el gasto específico y el descenso del nivel freático del pozo. La manera de validarla, fue generar con esta ecuación, la curva característica del pozo de una manera aceptable. Posteriormente, se obtuvieron conclusiones acerca del tipo de acuífero, de las pérdidas hidráulicas en el acuífero y el pozo, de la calidad de construcción y de sus condiciones operativas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio fueron realizados con tres pares de observaciones para los pozos con número 343 y 363, con cuatro pares de observaciones para los pozos 1942 y 2993, cinco pares de datos para el 3320 y seis pares de observaciones para el pozo con número 1463. Con base a la información generada en este estudio se obtuvieron las respectivas ecuaciones de abatimiento en

**Cuadro 1. Modelos de abatimiento del nivel de bombeo obtenidas de los pozos profundos bajo estudio entre el gasto extraído  $Q$  ( $m^3 \text{ día}^{-1}$ ) y el abatimiento total del nivel del agua en el pozo  $s$  (m). El subíndice se refiere a la metodología empleada.**

Pozo	Metodología	Ecuación de Abatimiento	$R^2$
3320	Bierschenk	$s_B = 0.4572*Q - 0.000767*Q^2$	-
	Polinomial	$s_1 = 0.4049*Q - 0.0006157*Q^2$	0.99
2993	Bierschenk	$s_B = 0.0004*Q + 1.11E-08*Q^2$	-
	Polinomial	$s_1 = 0.0004858*Q - 4.1815E-09*Q^2$	0.92
343	Kasenow	$s_K = 0.0457*Q - 2.00E-05*Q^2$	-
	Kasenow	$s_K = -0.004329*Q + 3,66E-06*Q^2$	-
363	Bierschenk	$s_B = -0.0041*Q + 3.52E-06*Q^2$	-
	Polinomial	$s_1 = -0.0041*Q + 3.5474E-06*Q^2$	0.99
1463	Bierschenk	$s_B = -0.0016*Q + 1.108E-06*Q^2$	-
	Polinomial	$s_1 = -0.001923*Q + 1.2504E-06*Q^2$	0.92
1942	Polinomial	$s_1 = 0.014*Q - 4.2545E-06*Q^2$	0.96
	Polinomial	$s_2 = 0.047035*Q - 0.01497*Q^{1.1324}$	0.97

los pozos estudiados, mediante análisis de regresión. El Cuadro 1 muestra dichos modelos matemáticos ajustados.

Así, el pozo marcado con número 3320 tuvo como principales características, un gasto operativo de  $3.8 \text{ L s}^{-1}$ , una profundidad de 155 m de nivel estático (NE) y un abatimiento de 66.6 m. De acuerdo al análisis efectuado a la información de seis pruebas realizadas a este pozo, se encontró que las mejores ecuaciones de abatimiento fueron la polinomial de segundo orden y la de Brieschenk, que se muestran en este cuadro y la Figura 1.

Estos modelos fueron los que presentaron un mejor ajuste al correlacionar los datos observados con los estimados. Del análisis de la Figura 1, se deduce que los dos modelos obtenidos explican satisfactoriamente el abatimiento del pozo en función del gasto y del gasto específico extraídos. Posteriormente, en la generación de la curva característica (Figura 1), ambos modelos describieron el funcionamiento hidráulico del pozo como inestable. La referida inestabilidad del pozo se presenta al tratar de predecir valores fuera hasta del 50% del rango de los datos medidos, ya que se obtienen valores ilógicos que pone en duda la extrapolabilidad lógico-empírica del modelo. Esta inestabilidad o incongruencia también se observó durante los ensayos con los datos

medidos entre los valores de 4 y  $5.12 \text{ L s}^{-1}$ , debido a las condiciones cambiantes del acuífero del pozo 3320. En la Figura 1 también se ilustra lo anterior, ya que a partir del gasto de  $5 \text{ L s}^{-1}$ , el pozo presentó inestabilidad en la relación abatimiento del nivel de bombeo con el gasto y el gasto específico extraído.

La relación de estabilidad se mantiene con un gasto inferior a  $3.8 \text{ L s}^{-1}$  y su correspondiente gasto específico de  $0.06 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$  (Figura 1). En el análisis del parámetro C de los modelos de abatimiento obtenidos (Cuadro 1), se deduce que no hay pérdidas de carga hidráulicas en el pozo y que estas existen únicamente en el acuífero.

El pozo con número 2993 que se localiza en la ribera del río Aguanaval, tiene una respuesta de recarga inmediata en períodos de lluvias por lo que es considerado de acuífero libre. Presentó como principales características, un gasto operativo de  $54 \text{ L s}^{-1}$ , una profundidad de nivel estático de 93 m y un abatimiento del nivel freático de 2.24 m. De acuerdo con el análisis efectuado a la información de cuatro ensayos realizados a este pozo, se encontró que las mejores ecuaciones de abatimiento fueron la de Brieschenk y la polinomial de segundo orden, que se muestran en el Cuadro 1 y en la Figura 2, ya que al correlacionar los datos observados

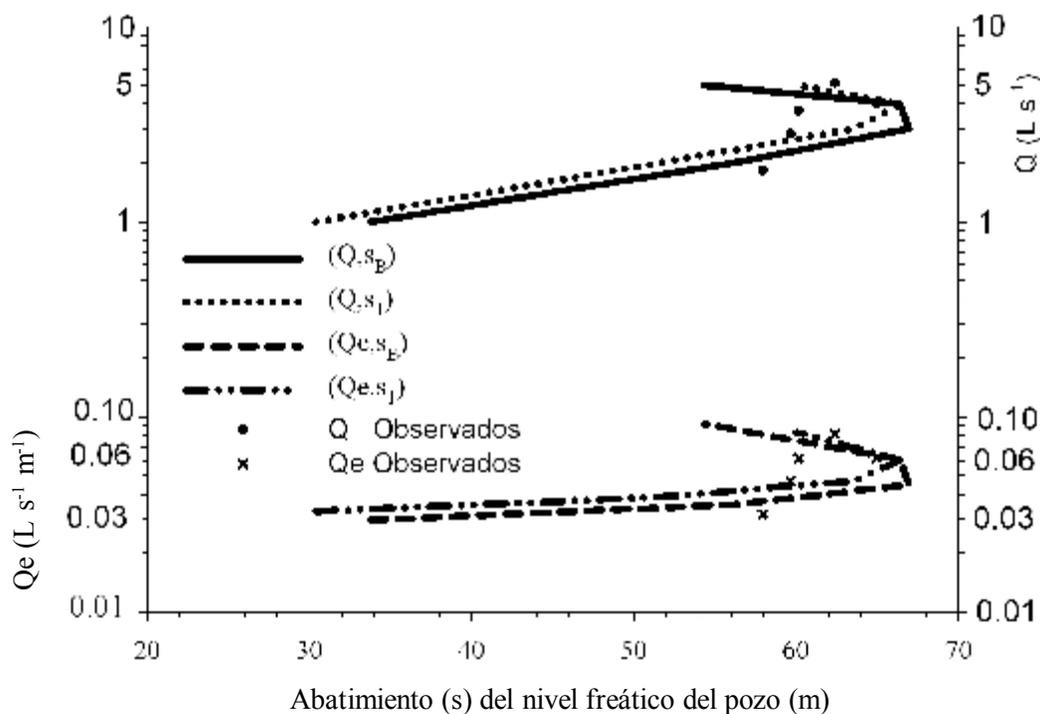


Figura 1. Curva característica del pozo número 3320 que relaciona al gasto (Q) y el gasto específico (Qe) con el abatimiento del pozo (s).

con los estimados por dichos modelos se encontró una significancia estadística del 99% (t de student). Las curvas características hidráulicas para este pozo (Figura 2), presentaron comportamientos hidráulicos de acuífero libre con pérdidas mínimas en el pozo. Estas se corroboran al analizar el valor del parámetro C en los modelos de abatimiento. Por otro lado, este parámetro C, indica que el pozo presenta buenas condiciones de construcción y desarrollo (Kasenow, 2001). De acuerdo a las características favorables del citado pozo, los modelos obtenidos permiten la posibilidad de realizar una extrapolación del gasto operativo de hasta un 50 por ciento de incremento (Helweg, 1992), así al utilizar el modelo de Brieschenk para un gasto de  $81 \text{ L s}^{-1}$ , se generó un aumento del abatimiento de 2.24 a 3.34 m.

Para el caso del pozo número 343 (Figura 3), presentó como características principales un gasto operativo del orden de  $13.5 \text{ L s}^{-1}$ , una profundidad del nivel estático de 84.2 m y un abatimiento del nivel freático de 25.9 m. De acuerdo al análisis efectuado a la información generada de tres observaciones de bombeo, se encontró que solamente el modelo propuesto por Kasenow resultó ser aceptable al 90% de significancia estadística (t de student). La curva característica hidráulica del pozo número 343 construida con el modelo referido, presenta comportamiento

hidráulico inestable del acuífero con características cambiantes durante el ensayo, esto imposibilitó predecir la posibilidad de incrementar su gasto operativo de extracción. El valor C en el modelo de abatimiento, resultó negativo; lo que indicó que las pérdidas, de carga hidráulica se tuvieron exclusivamente en el acuífero.

El pozo número 363 (Figura 4) presentó como principales características un gasto operativo de  $27.5 \text{ L s}^{-1}$ , una profundidad de nivel estático de 86.5 m y un abatimiento del nivel freático de 10.2 m. De acuerdo con el análisis de los datos de tres ensayos de bombeo realizado a este pozo, se encontró que los mejores ajustes a las ecuaciones de abatimiento fueron para los modelos propuestos por Kasenow, Brieschenk y la polinomial de segundo orden y se muestran en el Cuadro 1 y Figura 4. Lo anterior se apoya en la alta correlación entre los datos observados y los estimados por dichos modelos ajustados; se encontró una significancia estadística del 99.5% (t de student). Las curvas características hidráulicas de este pozo (Figura 4) presentaron comportamientos hidráulicos que indican pérdidas de carga no lineales en el pozo e inapreciables en el acuífero. Estas deducciones se corroboran al analizar el valor del parámetro C en los modelos de abatimiento. Por otro lado, el valor de C indica que el pozo presenta principios de incrustaciones en las rejillas del ademe

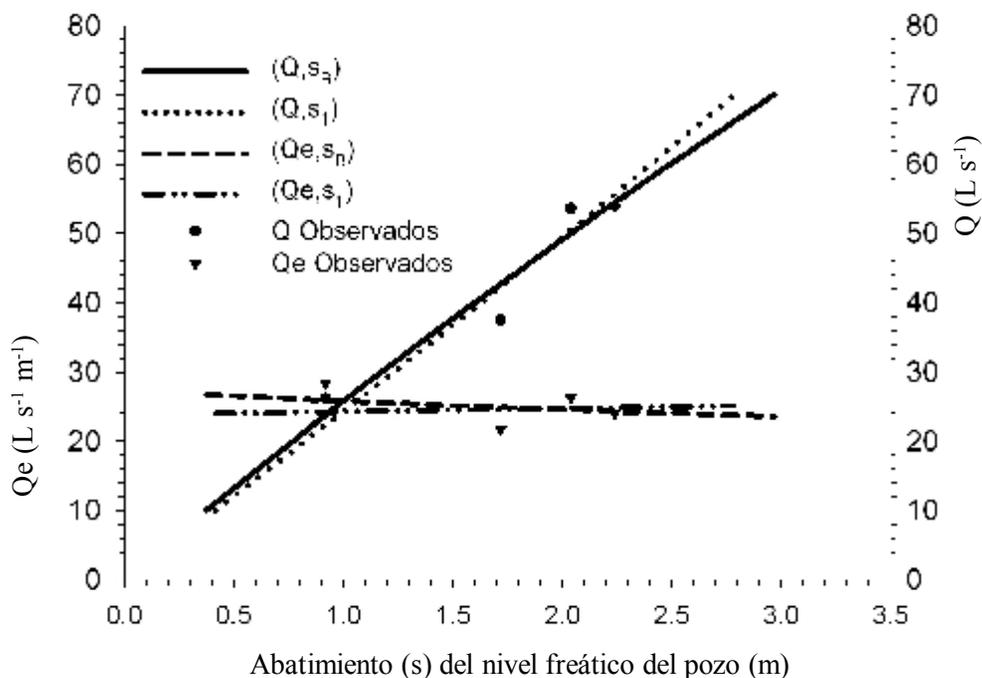


Figura 2. Curva característica del pozo número 2993 que relaciona al gasto (Q) y el gasto específico (Qe) con el abatimiento del pozo (s).

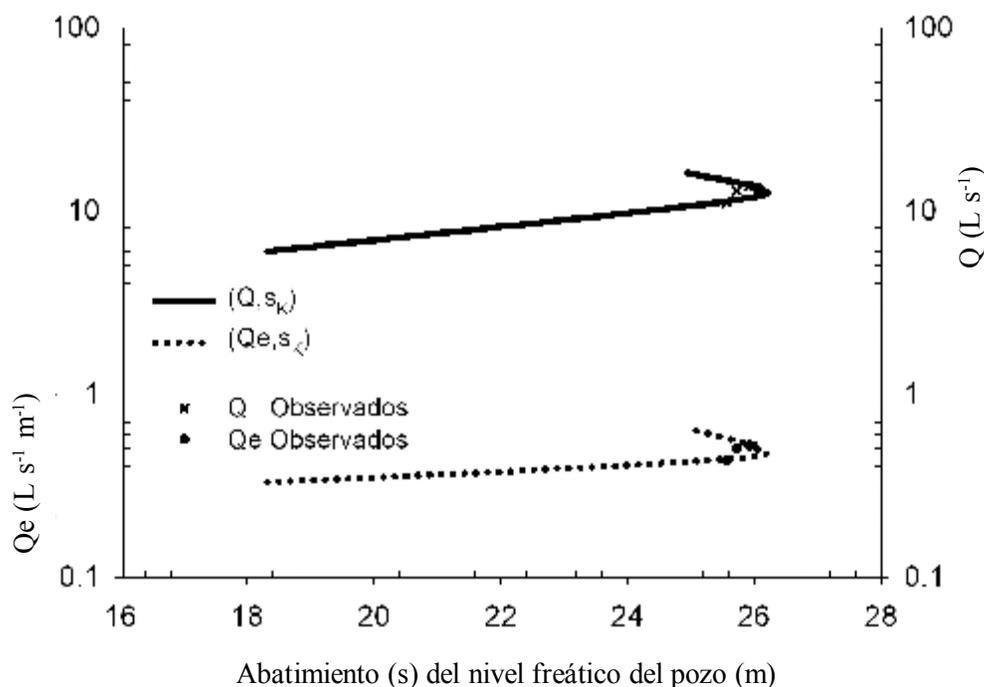


Figura 3. Curva característica del pozo número 343 que relaciona al gasto (Q) y al gasto específico (Qe) con el abatimiento del pozo (s).

lo que evidencia las pérdidas hidráulicas de carga no lineales citadas (Custodio y Llamas, 1976). De acuerdo a estas características del pozo estudiado, los modelos obtenidos permiten realizar una extrapolación del gasto operativo de hasta un 50% de incremento con un consecuente aumento del abatimiento de 19.8 m (Labadie y Helweg, 1975; Helweg, 1992).

El pozo número 1463 mostró como principales características, un gasto operativo de 25.6 L s<sup>-1</sup>, una profundidad de nivel estático de 63 m y un abatimiento del nivel freático de 2.25 m. De acuerdo al análisis realizado a la información de seis ensayos de bombeo del pozo, se encontró que los mejores ajustes a las ecuaciones de abatimiento fueron a los modelos de Brieschenk y a la polinomial de segundo orden mostradas en el Cuadro 1 y Figura 5, ya que al correlacionar los datos observados con los estimados por dichos modelos se encontró una significancia estadística del 99% (t de student). Las curvas características hidráulicas de este pozo (Figura 5) presentaron comportamientos hidráulicos que indican pérdidas de carga o abatimiento del nivel de bombeo no lineales en el pozo e inapreciables en el acuífero. Estas deducciones se corroboran al analizar el valor negativo del parámetro B en los modelos de abatimiento (Cuadro 1). Por otro lado, el parámetro C, indica que el pozo presenta principios de incrustaciones

en las rejillas del ademe (Custodio y Llamas, 1976) u obstrucciones (Román-López *et al.*, 2007) lo que evidencia las pérdidas hidráulicas de carga no lineales citadas (Kasenow, 2001). De acuerdo a estas características del pozo estudiado, los modelos obtenidos permiten realizar una extrapolación del gasto operativo de hasta un 50% de incremento con un consecuente aumento del abatimiento de 7.6 m (Helweg, 1992; Hilary and Bruce, 2006).

Por último, el pozo con número 1942 tuvo como principales características, un gasto operativo de 18.07 L s<sup>-1</sup>, una profundidad de 123.4 m de nivel estático (NE) y un abatimiento de 11.8 m del mismo. De acuerdo al análisis de los datos generados de cuatro ensayos realizados a este pozo, se encontró que las mejores ecuaciones de abatimiento fueron la polinomial de segundo orden y el modelo potencial, y se muestran en el Cuadro 1 y en la Figura 6.

Estos se seleccionaron al correlacionar los datos observados con los predichos de dichos modelos y se encontró una significancia estadística del 99.5% (t de student). De acuerdo a la Figura 6, se deduce que los dos modelos obtenidos explican satisfactoriamente el abatimiento del pozo en función del gasto y del gasto específico extraídos. En la generación de la curva característica (Figura 6), ambos modelos describieron

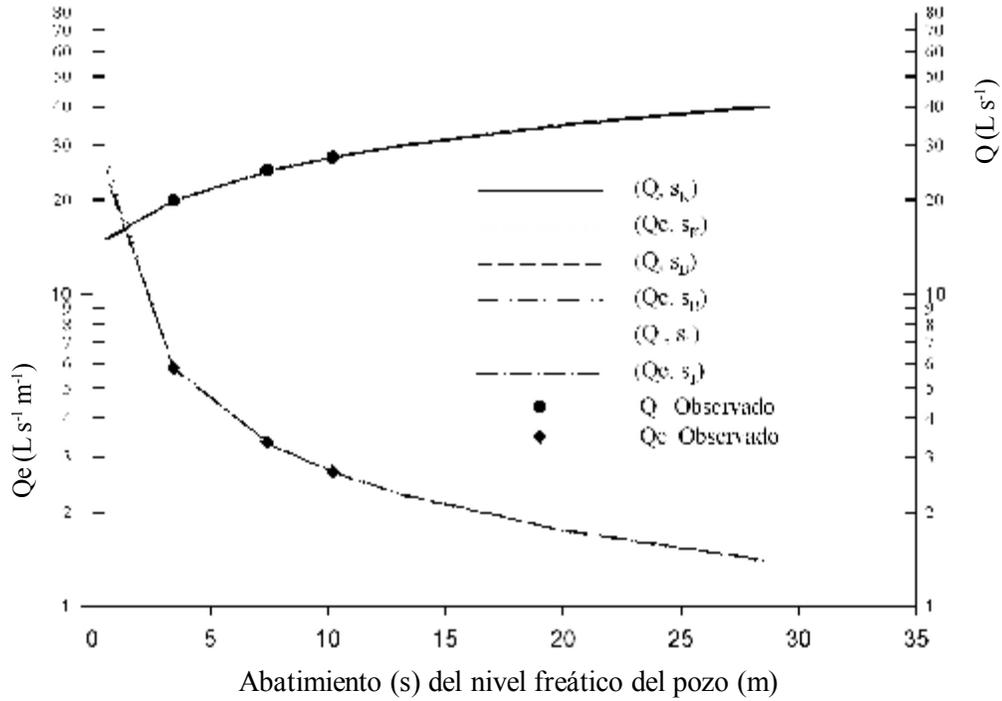


Figura 4. Curva característica del pozo número 363 que relaciona al gasto (Q) y el gasto específico (Qe) con el abatimiento del pozo (s).

el funcionamiento hidráulico del pozo como inestable. En el análisis del parámetro C de los modelos de abatimiento obtenidos (Cuadro 1), se deduce que no hay

pérdidas de carga hidráulicas en el pozo y que estas existen únicamente en el acuífero. La Figura 6 también mostró que a partir del gasto de 18 L s<sup>-1</sup>, el pozo presentó

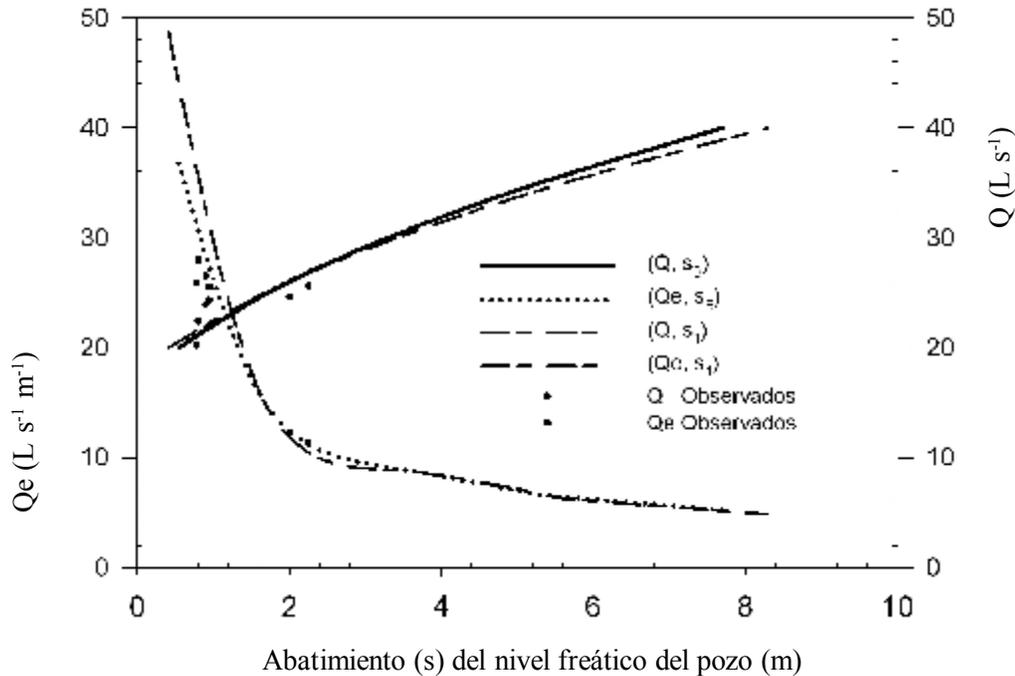


Figura 5. Curva característica del pozo número 1463 que relaciona al gasto (Q) y al gasto específico (Qe) con el abatimiento del pozo (s).

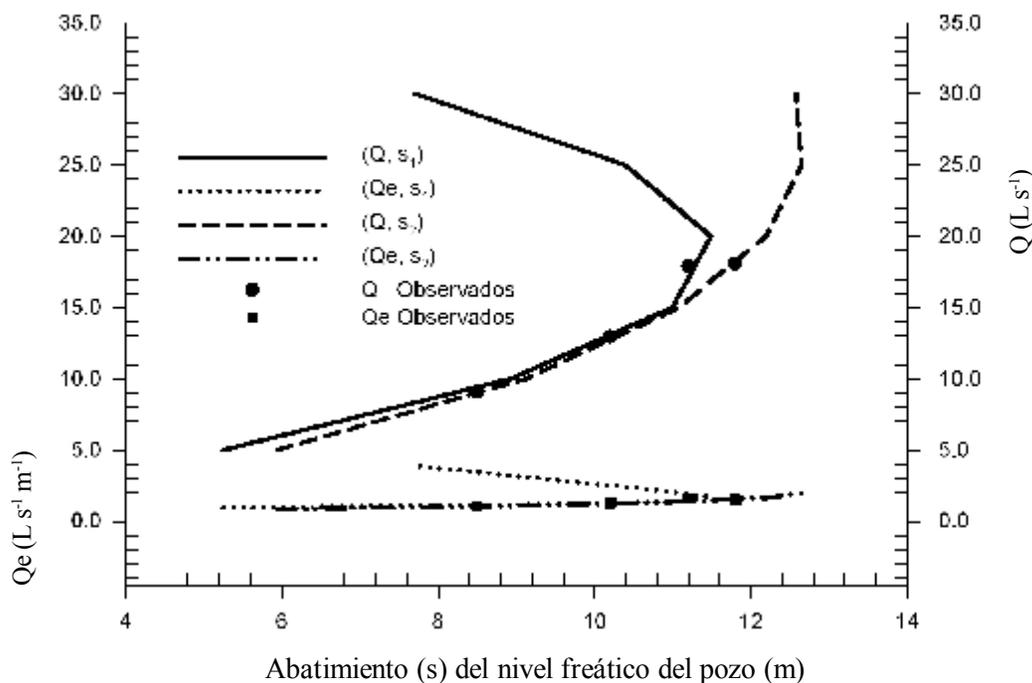


Figura 6. Curva característica del pozo número 1942 que relaciona al gasto (Q) y al gasto específico (Qe) con el abatimiento del pozo (s).

inestabilidad en la relación abatimiento del manto freático con el gasto y el gasto específico extraído. La relación de estabilidad se mantiene con un gasto de menos de  $18 \text{ L s}^{-1}$  y su correspondiente gasto específico de  $1.5 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

## CONCLUSIONES

- Para la obtención del mejor modelo de abatimiento en base a la información de campo es conveniente utilizar las metodologías de Bierschenk, Kasenow y los modelos polinomiales de segundo grado y los potenciales. El modelo propuesto por Jacob-Kasenow no se consideró adecuado por presentar estimaciones desviadas con respecto a los datos medidos en el análisis gráfico de tendencias de dichos datos. El modelo polinomial de segundo orden sin la ordenada al origen, resultó ser el más adecuado para describir la ecuación de abatimiento de los niveles de bombeo en pozos profundos.

- Se sugiere utilizar el modelo propuesto por Kasenow en el caso específico de infraestructuras de extracción de aguas subterráneas con características inestables en su acuífero, donde el modelo de Bierschenk ha presentado predicción con bajos coeficientes de ajuste.

- El método de Bierschenk presentó mayores inconsistencias en acuíferos inestables, debido que para la obtención del modelo de abatimiento se basa en un método gráfico o de regresión lineal simple.

- Los modelos obtenidos predicen en forma satisfactoria la inestabilidad o estabilidad de los niveles dinámicos del acuífero.

- Para futuros estudios considerar como variables los períodos de recarga y de estiaje para la generación de modelos de abatimiento con datos de aforo y con ensayos de bombeo de los pozos en su operación para establecer si existen diferencias en sus predicciones.

## LITERATURA CITADA

- Campillo U., R. 2006. Desarrollo de pozos y la depresión específica. <http://www.aprchile/>. (Consulta: noviembre 10, 2006).
- Chaban, M. 2000. Applying innovative well construction and drilling techniques to groundwater withdrawal. *Water Well J.* 60: 22-25.
- Chen, X. and J. F. Ayers. 1998. Aquifer properties determined from two analytical solutions. *Ground Water* 36: 783-791.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2002. Determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero principal, estados de Durango y Coahuila. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. México, D. F.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2005. Estadísticas del agua en México. El recurso hídrico en México. México, D. F.

- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2006. El agua en México. IV Foro Mundial del Agua. México, D. F.
- Cruz, A. y G. Levine. 1998. El uso de aguas subterráneas en el distrito de riego 017, Región Lagunera, México. Instituto Internacional del Manejo del Agua (IWMI). Serie Latinoamericana: núm. 3. México, D. F.
- Custodio, E. y R. Llamas. 1976. Hidrología subterránea. Omega. Barcelona, España.
- Helweg, O. J. 1992. Recursos hidráulicos, plantación y administración. Limusa. México, D. F.
- Hilary, L. and H. Bruce. 2006. Pumping test evaluation of stream depletion parameters. *Ground Water* 44: 540-546.
- Jha, M. K., G. Nanda, and M. P. Samuel. 2004. Determining hydraulic characteristics of production wells using genetic algorithm. *Water Resour. Manage.* 18: 353-377.
- Kasenow, M. 2001. Applied ground-water hydrology and well hydraulics. Water Resources Publications. Denver, CO, USA.
- Labadie, J. W. and O. J. Helweg. 1975. Step-drawdown test analysis by computer. *Ground Water* 13: 438-444.
- Peña-Díaz, S. y J. Arreguín-Mañón. 1989. Eficiencias electromecánicas de los equipos de bombeo y de las condiciones hidráulicas en los pozos. *Ing. Hidráulica Méx.* 3: 17-24.
- Román-López, A., E. A. Catalán-Valencia, M. A. Inzunza-Ibarra, M. Villa Castorena y S. F. Mendoza-Moreno. 2007. Modelos de abatimiento del nivel de bombeo y eficiencia hidráulica en un pozo profundo estable. *Agrofaz* 7: 39-46.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2006. Anuario estadístico de la producción agropecuaria 2006. Región Lagunera Coahuila-Durango. Cd. Lerdo, Durango, México.
- SAS Institute. 2001. Release 6.12 for Windows. SAS Institute. Cary, NC, USA.