

Análisis de pruebas de impulso con tiempo de producción corto dominado por almacenamiento y daño, ejemplos de campo

M. en I. Mario A. Vásquez Cruz
PEP, IPN-ESIA, CT-Unidad Ticomán
Dr. Rodolfo G. Camacho Velazquez
PEP

Dr. Gorgonio Fuentes Cruz
Texas A&M University/Instituto Mexicano del Petróleo

Información del artículo: recibido: octubre de 2013-aceptado: marzo de 2014

Resumen

Los procedimientos de uso cotidiano para el análisis de pruebas *falloff*/incremento de presión, consideran dentro de las suposiciones involucradas que al final del periodo de inyección o producción el efecto de llenado del pozo o almacenamiento ha cesado. Sin embargo, esto último no necesariamente se cumple para pruebas de impulso, en particular las registradas en yacimientos de baja permeabilidad o en aquellas que involucran pozos productores de fluidos de baja movilidad, en los cuales el efecto de llenado del pozo puede prevalecer considerablemente. Asimismo, las pruebas de presión cuyo tiempo de cierre es muy superior al tiempo de producción o inyección, en las cuales la diferencia entre las respuesta de la derivada de superposición para decremento e incremento de presión se acentúa, es otro caso donde la suposición antes indicada puede no satisfacerse.

De acuerdo a lo anterior, en junio de 2011 en el seno del Congreso Mexicano del Petróleo, Fuentes Cruz et al., se presentaron nuevas expresiones para el análisis de pruebas de impulso (*falloff*/incremento de presión), en las cuales el periodo de inyección/producción se encuentra dominado por los efectos de almacenamiento y daño.

En este trabajo se presenta la aplicación de dichos modelos al análisis de casos reales, demostrándose su utilidad práctica al producir resultados más confiables con respecto a los obtenidos mediante métodos de análisis basados en la teoría tradicional. Asimismo, los casos de campo analizados permitieron definir aspectos que desde el punto de vista práctico conducen a un mejor aprovechamiento de las nuevas expresiones, y al enriquecimiento de la metodología de interpretación presentada en junio de 2011, la cual en conjunción con el análisis mediante curvas tipo en términos de la derivada de superposición para pruebas de incremento de presión, permite confirmar los resultados obtenidos y por ende acrecentar su certidumbre.

Palabras clave: Prueba de impulso, baja permeabilidad, baja movilidad, tiempo de producción corto.

Impulse tests analysis with short production time affected by wellbore storage and skin, field examples

Abstract

The most popular procedures for *falloff*/buildup tests consider, among the assumptions involved, that at the end of the injection or production time wellbore storage effect has ceased. However, the latter is not necessarily accomplished in

an impulse test, in particular those recorded in low-permeability reservoir or in wells producing low-mobility fluids, in which afterflow effect can prevail considerably. Likewise, transient pressure tests with shut-in time much greater than production/injection time, where the difference of the superposition derivative response for pressure drawdown and buildup cases is important, constitutes another case where the above assumption could not be accomplished.

Thus, in June 2011 in a paper presented at the Mexican Petroleum Conference, Fuentes et al. introduced new expressions for analyzing impulse tests (falloff / pressure buildup), considering that the injection/production time is affected by wellbore storage and skin effects.

This work introduces the application of those models for the analysis of real cases, so their practical usefulness is demonstrated when more consistent results are obtained in comparison to the estimations yield by the analysis methods based on the traditional theoretical framework. Likewise, field cases analyzed allowed defining aspects which from a practical standpoint lead to take more advantage of the new expressions presented by Fuentes et al., as well as to enrich their interpretation methodology, which in conjunction with the type curve analysis involving the superposition derivative for buildup tests allows confirming the parameters estimated and consequently increasing their certainty.

Keywords: Impulse test, low-permeability, low-mobility, short production time.

Introducción

Las pruebas de pozo están reconocidas como el único medio para evaluar las características de las formaciones productoras de aceite y gas bajo condiciones dinámicas. Además, los procedimientos de prueba han sido bien establecidos para pozos fluyentes, pudiéndose incluso recabar datos de presión de un pozo durante horas o meses. Aunado a lo anterior, los desarrollos alcanzados en el tema, tales como la función de derivada de presión, han mejorado de manera substancial los procedimientos de interpretación.

Dentro de los diversos tipos de pruebas que pueden llevarse a cabo en la práctica, existen las denominadas “de impulso”, las cuales consisten de un periodo de inyección o de producción corto, seguido de un periodo de abatimiento (*falloff*) o de incremento de presión, (Ayoub et al., 1988).

En lo que concierne a las técnicas de análisis de pruebas de impulso, éstas suponen que al final del periodo de inyección/producción, el efecto de almacenamiento de pozo es despreciable, sin embargo, esta suposición a menudo no se satisface. La situación anterior cobra particular relevancia cuando las pruebas de impulso se registran en formaciones densas (*tight oil*), en yacimientos de baja permeabilidad o en estructuras que producen aceite pesado o extra-pesado. Bajo tales condiciones, es factible que los efectos de pozo (Agarwal et al. 1970) prevalezcan durante periodos de tiempo considerables, (horas o días). De esta forma, cuando el tiempo de cierre es de orden muy superior al tiempo de producción o inyección, la diferencia entre las respuestas de la derivada de superposición para decremento e incremento se acentúa, **Figura 1**.

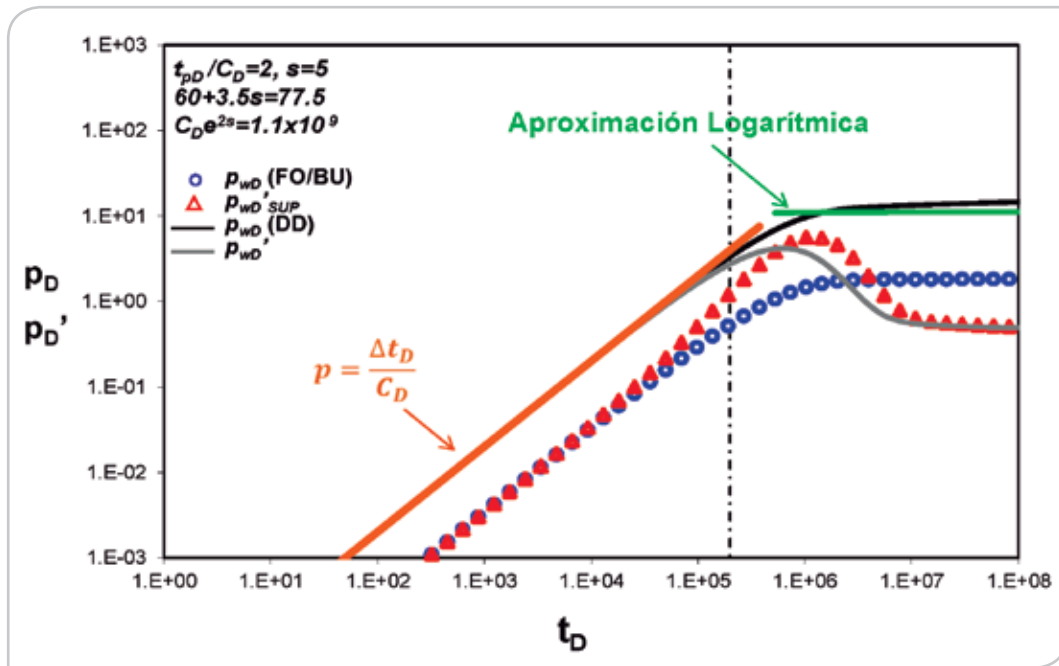


Figura 1. Comparación de la respuesta de la derivada de superposición para decremento (dd) versus incremento (fu/bu) de presión en pruebas de impulso con tiempo de producción corto afectado por almacenamiento y daño.

De acuerdo a lo anterior, Fuentes et al. (2012) presentaron nuevas expresiones para el análisis de pruebas de impulso (falloff/incremento de presión), en las cuales se considera que la respuesta de presión durante el periodo corto de inyección/producción que las precede, se encuentra dominada por efectos de almacenamiento y daño. Además se demostró que las expresiones convencionales, que datan de hace varias décadas, deben modificarse debido a que no es factible aplicarlas para las condiciones operativas antes mencionadas.

En base a lo antes expuesto, en este trabajo se presenta la aplicación de los modelos anteriores al análisis de casos reales, demostrándose su utilidad práctica al obtenerse resultados más confiables con respecto a los

obtenidos mediante métodos de análisis basados en la teoría tradicional.

Ecuaciones fundamentales

A partir de la ecuación propuesta para modelar el comportamiento de presión a tiempos cortos en pruebas de impulso con tiempo de inyección/producción corto afectado por almacenamiento, y utilizada como punto de partida para todas las aproximaciones presentadas en su trabajo, Fuentes et al. (2012) establecieron, usando el principio de superposición, que para tiempos de cierre pequeños cuando Δt_D comparada t_{pD} con no es despreciable, se obtiene la siguiente expresión:

$$p_{wD}(\Delta t_D) \approx \left[1 - \exp\left(-\frac{z t_{pD}}{C_D}\right) \right] \frac{\Delta t_D}{C_D}; \quad \frac{\Delta t_D}{C_D} \ll \frac{\ln(C_D e^{2s})}{2}; \quad \frac{1}{C_D e^{2s}} \ll \frac{t_{pD}}{C_D}, \frac{\Delta t_D}{C_D} \tag{1}$$

Expresando la ecuación anterior en variables reales se obtiene:

$$\Delta p_{ws} \approx m_{est} \Delta t, \quad m_{est} = \frac{qB}{24C} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{1694} \frac{kh}{C} \frac{t_p}{\mu \ln(C_D e^{2s})} \right] \right\} \quad (2)$$

De acuerdo a Fuentes et al. (2012), si $\frac{t_{pD}}{C_D} \ll \ln(C_D e^{2s})/2$, la Ec. (1) puede ser aproximada en la siguiente forma:

$$p_{wsD}(\Delta t_D) \approx \frac{2}{\ln(C_D e^{2s})} \frac{t_{pD}}{C_D} \frac{\Delta t_D}{C_D}; \quad \frac{\Delta t_D}{C_D} \frac{t_{pD}}{C_D} \ll \frac{\ln(C_D e^{2s})}{2}; \quad \frac{1}{C_D e^{2s}} \ll \frac{\Delta t_D}{C_D}, \frac{t_{pD}}{C_D} \quad (3)$$

A partir de la cual en términos de variables reales se tiene:

$$m_{est} \approx \frac{1}{70.6} \frac{qB}{(24C)^2} \frac{kh}{\mu} \frac{t_p}{\ln(C_D e^{2s})} \quad (4)$$

Según Fuentes et al. (2012) este resultado implica, para el caso de las pruebas de impulso donde efectos de almacenamiento son pronunciados al final del periodo de inyección/producción, que la respuesta de presión durante el periodo de pendiente unitaria a tiempos de cierre cortos en una gráfica doble logarítmica, depende no solamente del coeficiente de almacenamiento y el gasto, sino también de la transmisibilidad de la formación, factor de daño, tiempo de inyección/producción y los

parámetros involucrados en la definición del coeficiente de almacenamiento adimensional, C_D .

Con respecto a la segunda derivada de la ecuación propuesta por Fuentes et al. (2012) para modelar el comportamiento de presión a tiempos cortos en pruebas de impulso con tiempo de inyección o producción corto afectado por almacenamiento, la expresión está dada como:

$$p_{wD}'' \approx \frac{2}{\ln(C_D e^{2s})} \exp \left(-\frac{2t_D}{\ln(C_D e^{2s})} \right) \left(\frac{t_D}{C_D} \right)^2; \quad \frac{1}{C_D e^{2s}} \ll \frac{t_D}{C_D} \text{ O } \frac{t_D}{C_D} \approx 1 \quad (5)$$

Si $t_D/C_D \ll \ln(C_D e^{2s})/2$, entonces la ecuación anterior puede ser aproximada de la siguiente manera:

$$p_{wD}'' \approx \frac{2}{\ln(C_D e^{2s})} \left(\frac{t_D}{C_D} \right)^2; \quad \frac{1}{C_D e^{2s}} \ll \frac{t_D}{C_D} \ll \frac{\ln(C_D e^{2s})}{2}; \quad (6)$$

la cual, en términos de variables reales se expresa en la siguiente forma:

$$\Delta p_w'' \approx \frac{1}{70.6} \frac{qB}{(24C)^2} \frac{kh}{\mu} \exp \left[-\frac{1}{1694} \frac{kh}{\mu} \frac{t}{\ln(C_D e^{2s})} \right] \frac{t^2}{\ln(C_D e^{2s})} \quad (7)$$

De la Ec. (7) es posible establecer lo siguiente, (Fuentes et al. 2012):

$$\Delta p_w'' \approx m_{2d} t^2; \quad m_{2d} = \frac{1}{70.6} \frac{qB}{(24C)^2} \frac{kh}{\mu} \frac{1}{\ln(C_D e^{2s})} \quad (8)$$

Asimismo, Fuentes et al. (2012) relacionaron las Ecs. (4) y (8) y establecieron la siguiente expresión para el tiempo de producción:

$$\frac{m_{est}}{m_{2d}} = t_p \quad (9)$$

En las ecuaciones anteriores m_{est} corresponde a la pendiente cartesiana a tiempos de cierre cortos durante el periodo de pendiente unitaria en una gráfica doble logarítmica de la presión de fondo cerrado o la derivada de superposición, mientras que m_{2d} es la pendiente cartesiana de la derivada de superposición (la cual coincide con la segunda derivada de decremento de presión), calculada en el periodo de tiempo: $2t_p < \Delta t < t_{iarf}$, donde la pendiente igual 2 puede presentarse en una gráfica doble logarítmica.

Donde t_{max} y Δp_{wmax} son justamente las coordenadas del punto máximo identificado sobre la curva de la función de segunda derivada.

Ejemplos de campo

De acuerdo a lo discutido en la sección anterior, las Ecs. (8), (9) y (10) fueron utilizadas para analizar diversos casos de campos presentados en la literatura, con el fin de identificar los beneficios que ofrecen desde el punto de vista práctico y de esta forma enriquecer la metodología inicialmente propuesta por Fuentes et al. (2012), lo cual coadyuve en la interpretación de pruebas de impulso cuyo periodo de inyección/producción se encuentra afectado por los efectos de almacenamiento y daño.

Es pertinente mencionar que una suposición implícita en los ejemplos presentados se refiere a que el almacenamiento constante y el factor de daño son similares tanto en el periodo de inyección/producción como en el de cierre.

Ejemplo A (Ramey, 1992)

El primer ejemplo corresponde a un pozo productor de aceite a 13,000 pies mediante bombeo mecánico. De esta forma se registró una prueba de incremento de presión

Por lo que respecta al coeficiente de almacenamiento, Fuentes et al. (2012) establecieron que es factible obtenerlo en la siguiente forma a partir del máximo que presenta la Ec. (5):

$$C = \frac{2}{e^2} \frac{qB}{24} \left(\frac{t_{max}}{\Delta p_{wmax}''} \right) \quad (10)$$

durante 9,849 horas, precedida por un periodo de flujo a un gasto de 36 BPD durante 3,912 horas.

La **Figura 2** presenta la gráfica doble-logarítmica de la diferencia de presión y la función derivada de presión para este caso, a partir de cuyo comportamiento se observa que la prueba exhibe un periodo de flujo radial incipiente. En esta figura también se muestra el máximo de la respuesta de derivada de presión señalado por la flecha vertical hacia arriba. De esta forma, las coordenadas del máximo se usaron para obtener un estimado del coeficiente de almacenamiento mediante la Ec. (10) igual a 3.050 bl/lb/pg², el cual es similar reportado por Ramey (1992) (=3.034 bl/lb/pg²). Usando la aproximación logarítmica y el periodo de tiempo al final de la prueba señalada por las dos flechas verticales apuntando hacia abajo, Ramey (1992) reportó $\omega = 1.7$ y $\omega = 18.4$ md-pie. Sin embargo, con base en el comportamiento observado en la derivada de presión se tiene una alta incertidumbre en cuanto a la identificación del periodo de flujo radial, por lo cual se procedió a realizar el análisis suponiendo valores del factor de daño y utilizando el valor del coeficiente de almacenamiento estimado anteriormente mediante la Ec. (10). De esta forma se obtuvieron valores de la capacidad de flujo (kh) utilizando la Ec. (2), previa estimación de la pendiente cartesiana, = 0.522 lb/pg²/hr, a tiempos cortos de cierre, como se ilustra en **Figura 3**; el ajuste corresponde al periodo de línea recta de pendiente unitaria sobre la gráfica doble logarítmica señalado en la **Figura 2**.

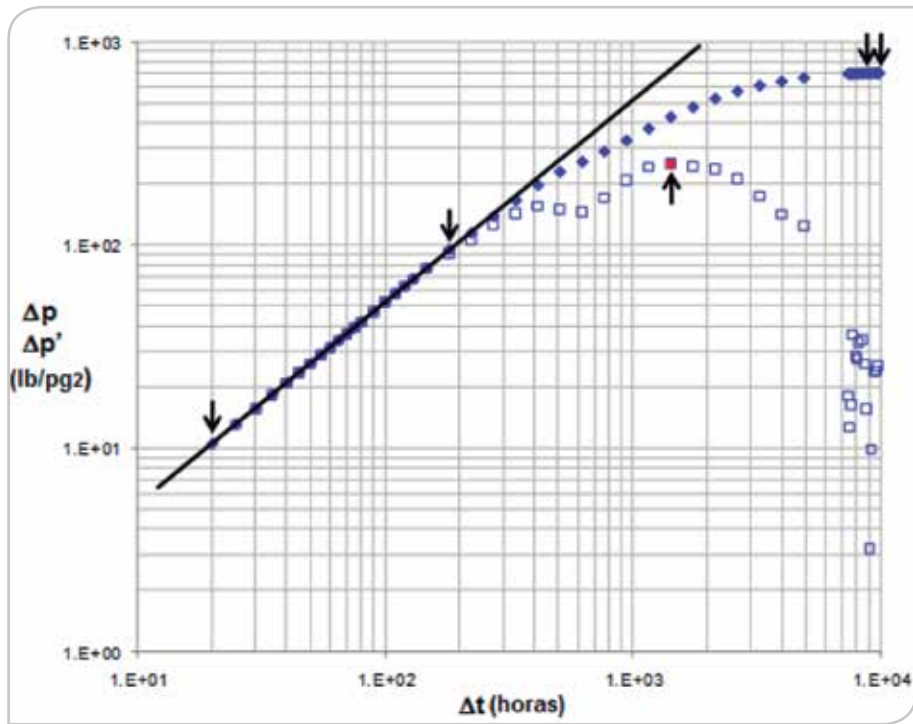


Figura 2. Gráfica doble logarítmica, ejemplo A (Ramey, 1992).

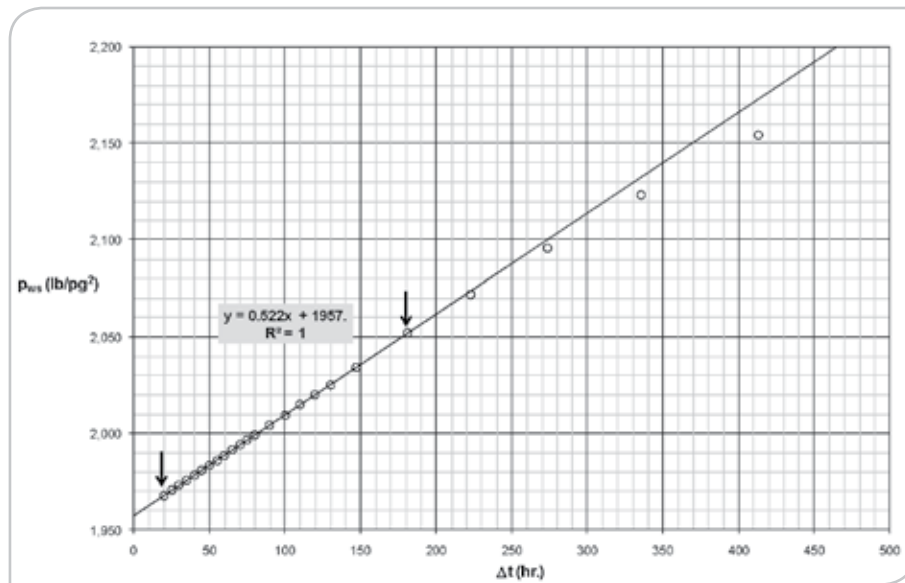


Figura 3. Determinación de la pendiente cartesiana (m_{est}) a tiempos cortos de cierre, ejemplo A (Ramey, 1992).

La capacidad de flujo se definió a partir de la comparación del valor de la pendiente cartesiana de la derivada de superposición (m_{2d}) estimada mediante la Ec. (8) versus el valor original de esta pendiente determinado mediante la Ec. (9). De esta forma, kh resultó de 38.7 md-pie para un factor de daño total (s_e) de 12.1. Estos valores fueron confirmados mediante el ajuste de los datos con la curva tipo de superposición correspondiente, considerando efectos de almacenamiento y daño (van Everdingen y Hurst, 1949), como se ilustra en la **Figura 4**. A partir del punto de ajuste mostrado en la citada figura, se obtuvo una capacidad de flujo de 51.7 md-pie, la cual concuerda

con el valor estimado mediante los modelos propuestos en este trabajo. Asimismo, los parámetros determinados coinciden con el hecho de que el gasto de aceite de este pozo (36 BPD) resultó inferior a los reportados para los pozos delimitadores del mismo campo (Ramey, 1992). Además, en la misma figura se incluye para referencia, la curva tipo de decremento de presión (Agarwal *et al.*, 1970) respectiva (líneas en color rojo), a partir de lo cual se evidencia que si se intenta utilizar dicha curva para el análisis de una prueba de impulso afectada por efecto de almacenamiento al momento de cerrar el pozo, la capacidad de flujo será sobrestimada.

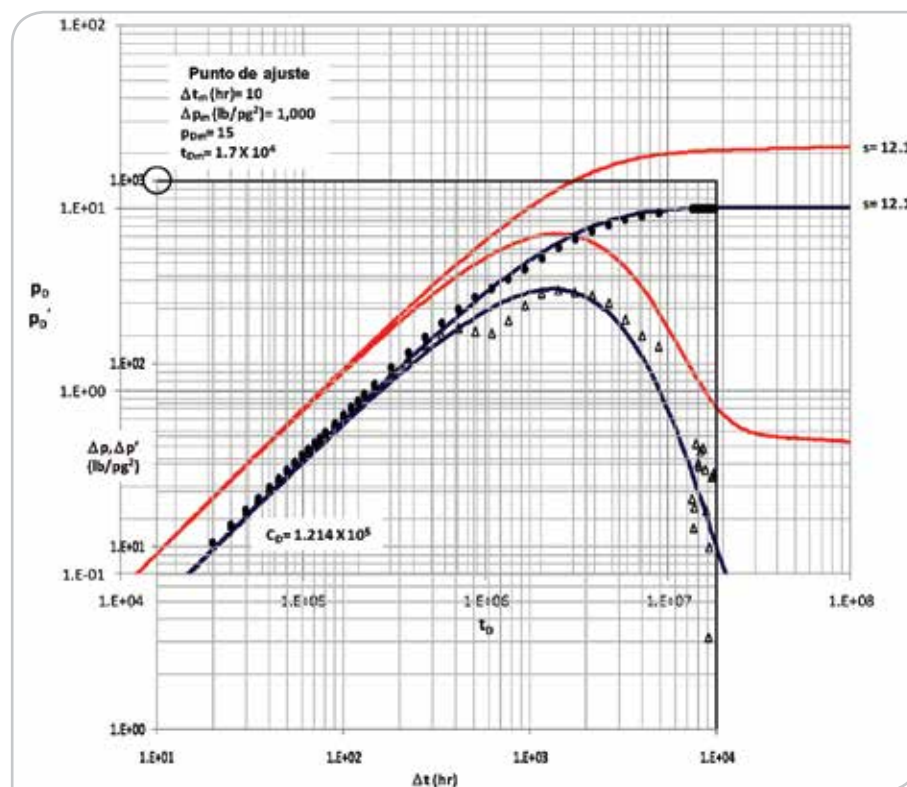


Figura 4. Ajuste mediante curva tipo de superposición, ejemplo A (Ramey, 1992).

Ejemplo B (Ayoub et al. 1988)

El segundo ejemplo se relaciona con una prueba DST registrada en un yacimiento de baja permeabilidad, para la cual se analizó el cierre inicial, el cual tuvo una duración de 1.55 horas, posterior a un periodo de flujo de 0.095 horas con un gasto de 355 BPD.

De acuerdo a lo anterior, la **Figura 5** presenta la gráfica doble-logarítmica del cambio de presión y la función de derivada, la cual al igual que en el ejemplo anterior, indica

apenas el inicio del periodo de flujo radial transitorio. Asimismo, debido a la resolución del sensor de presión utilizado durante el registro de presión, el periodo de la línea recta de pendiente unitaria no se definió completamente, por lo cual la pendiente cartesiana m_{est} se estimó a partir de los dos primeros datos de presión como se ilustra en la misma figura, obteniéndose un valor de 5,417.8 lb/pg²/hr. El coeficiente de almacenamiento (c) estimado a partir de las coordenadas del máximo de la respuesta de la función derivada (señalado en color rojo con una flecha apuntando hacia arriba) y utilizando la Ec. (10) fue de 3.6×10^{-3} bl/lb/pg².

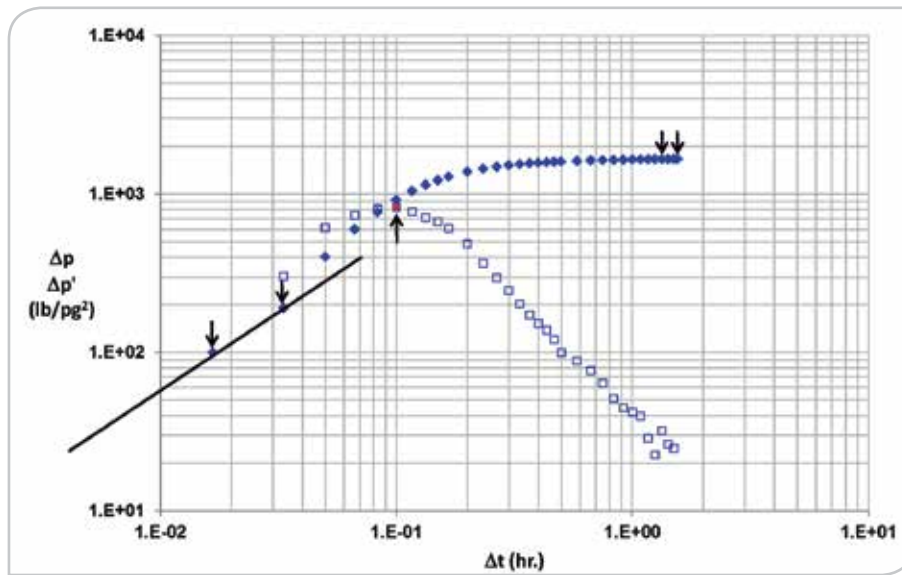


Figura 5. Gráfica doble logarítmica, ejemplo B (Ayoub et al. 1988).

En la **Figura 6** se presenta el análisis semilogarítmico, (Horner, 1951) de la prueba, a partir del cual se estimó un valor de kh igual a 53.6 md-pie y un factor de daño total de -3.3. En seguida se procedió a verificar este valor mediante la Ec. (8), previa estimación de m_{2d} mediante la Ec. (9) y

suponiendo valores del factor de daño. De esta forma la comparación resultó favorable dentro de una tolerancia de 6% para un valor del daño total (s_d) igual a -3.8, con una capacidad de flujo de 50.7 md-pie.

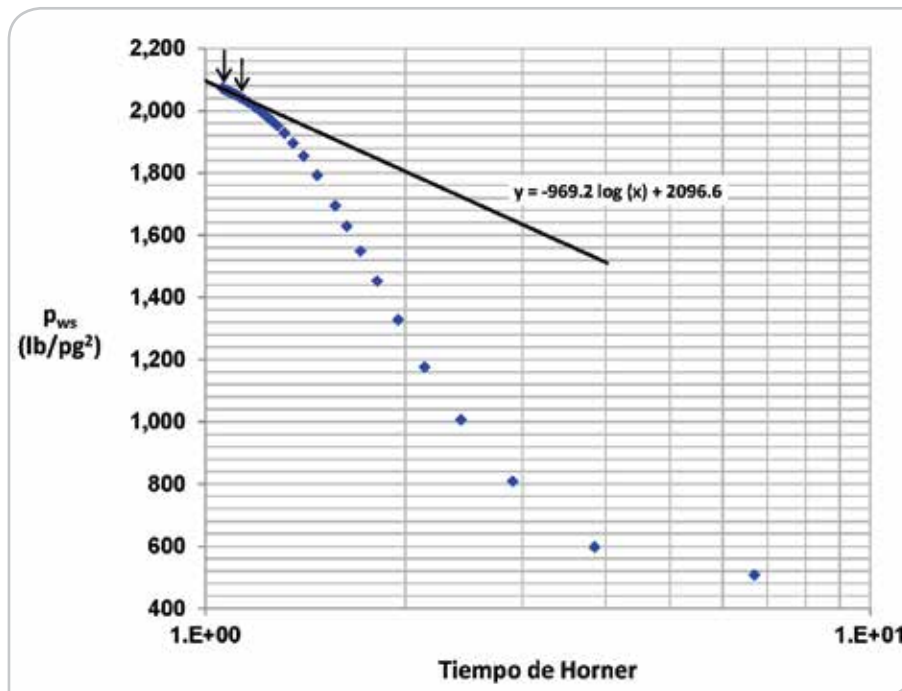


Figura 6. Análisis semilogarítmico, ejemplo B (Ayoub et al. 1988).

Aunado a lo anterior, la **Figura 7** muestra el ajuste logrado mediante las curvas tipo de superposición considerando la presencia del efecto de almacenamiento variable (Vásquez y Camacho, 1998). De esta forma, la capacidad de flujo y el factor de daño estimados resultan de 58.6 md-pie y -3.2, respectivamente.

Las estimaciones de la capacidad de flujo y el factor de daño anteriores, excepto el coeficiente de almacenamiento

($C = 2.2 \times 10^{-4}$ bl/lb/pg²), comparan favorablemente con aquellos reportados por Ayoub et al. (1988), $kh = 47.0$ md-pie y $s = -2.4$. Sin embargo, es pertinente señalar que Ayoub et al. (1988), reportaron que las estimaciones anteriores fueron obtenidas a partir del análisis iterativo de éste y de otro periodo de cierre registrado al final de la prueba DST, hasta lograr resultados consistentes.

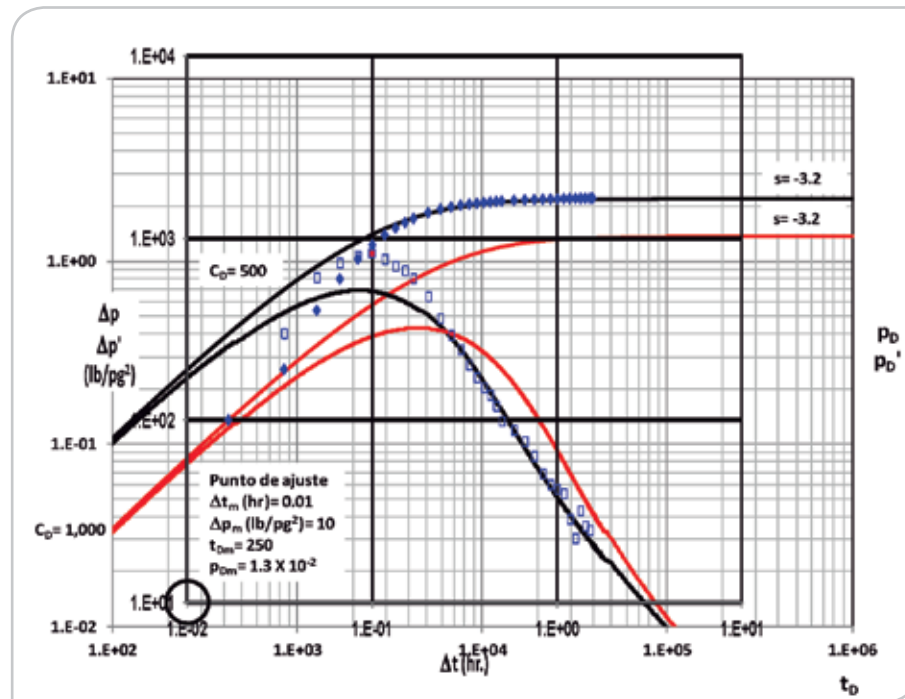


Figura 7. Ajuste mediante curva tipo de superposición, ejemplo B (Ayoub, et al. 1988).

Al respecto del segundo periodo de cierre mencionado y con el fin de acrecentar la certidumbre de las estimaciones realizadas, en este trabajo se procedió a realizar el análisis de dicho registro de presión y cuya gráfica doble-logarítmica del cambio de presión y la función de derivada se muestra en la **Figura 8**. En este caso, el periodo de prueba tuvo una duración de 12 horas precedido de un periodo de flujo de cuatro horas a un ritmo de 130.4 BPD. En la citada figura también se identifica el periodo de la línea recta de pendiente unitaria a tiempos cortos, estimándose un valor del coeficiente de almacenamiento (c) de 1.4×10^{-3} bl/lb/pg², correspondiente a un valor de $C_D = 350$. De esta forma y tomando como referencia

los valores de la capacidad de flujo y del factor de daño total estimados para el periodo de cierre previo, se realizó el ajuste de la prueba mediante las curvas tipo de superposición para un modelo de doble porosidad (Bourdet, 1983), obteniéndose el resultado final mostrado en la **Figura 9**. En consecuencia, a partir de la información del punto de ajuste mostrado, se obtuvo una capacidad de flujo de 49.7 md-pie y un factor de daño total de -3.8, corroborándose así las estimaciones realizadas para el cierre inicial. Asimismo, en forma adicional y con base en el modelo de interpretación utilizado, se determinó una relación de almacenamiento (w) igual a 0.7 y un coeficiente de flujo interporoso (l) de 4.62×10^{-5} .

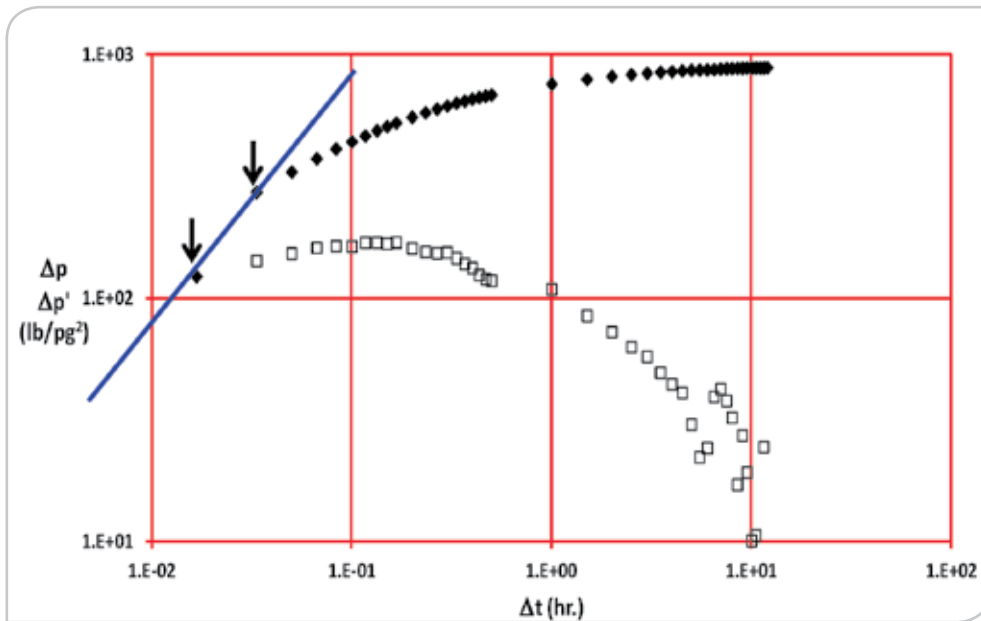


Figura 8. Gráfica doble logarítmica, ejemplo b, cierre final (Ayoub et al. 1988).

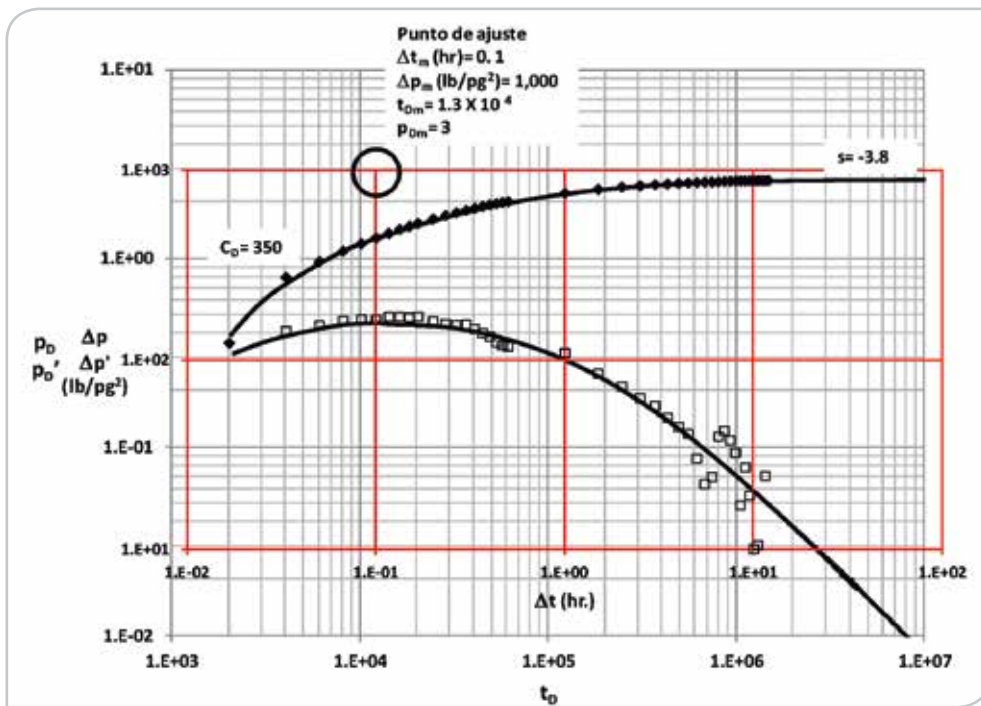


Figura 9. Ajuste mediante curva tipo de superposición, ejemplo b, cierre final (Ayoub, et al. 1988).

Procedimiento de análisis

Con base en los resultados anteriores, se infiere que las aproximaciones discutidas en este trabajo (Fuentes et al., 2012) pueden utilizarse para estimar los parámetros del sistema pozo-yacimiento, a partir de pruebas de impulso afectadas por efectos de almacenamiento y daño al final del periodo de inyección/producción. De este modo, se proponen las siguientes directrices para el análisis de estas pruebas:

1. Verificar el tiempo de inyección/producción mediante la relación m_{est}/m_{2d} , Ec. (9). Es pertinente señalar que si existe certeza en el valor del tiempo de producción, la expresión anterior puede utilizarse para estimar la pendiente m_{2d} .
2. Estimar el coeficiente de almacenamiento con el máximo observado en la derivada de superposición (Ec. (10)) o en la derivada impulso normalizada, la cual debe coincidir con el máximo de la segunda derivada.
3. Obtener la permeabilidad de la formación usando la pendiente de la aproximación logarítmica (Horner, 1951) o incluso mediante la gráficas ΔP_{ws} versus $(t_p + \Delta t)^{-1}$ propuesta por Soliman (1986).
4. Evaluar el factor de daño, usando las expresiones dadas por las Ecs. (2) u (8).

Asimismo, con el diagnóstico de la prueba y los parámetros determinados con el procedimiento propuesto, es factible corroborar los resultados mediante el análisis por curvas tipo.

Por último, se enfatiza que si el flujo radial no está definido o existe incertidumbre para identificarlo, y se dispone del valor de coeficiente de almacenamiento a partir del paso número dos, entonces se puede obtener una estimación de la permeabilidad usando la Ec. (8). La limitante para esto último es disponer de un estimado del factor de daño de otra fuente, o bien en forma alterna se puede suponer dicho factor y continuar estimando la permeabilidad mediante la Ec. (8) y confirmar los valores de C_D , k y s , mediante la técnica de ajuste por curvas tipo (Earlougher, 1977).

Conclusiones

De acuerdo a los resultados prácticos presentados en este trabajo, se concluye que mediante las expresiones propuestas para pruebas de impulso registradas con tiempo

de producción corto dominado por almacenamiento y daño, es posible determinar en forma práctica los parámetros que controlan la respuesta de presión. Estas expresiones son más generales en comparación a las utilizadas por décadas en la teoría tradicional de análisis pruebas de presión.

Aunado a lo anterior, se propone una metodología de análisis para pruebas de impulso (*fall-off*/incremento de presión) registradas bajo las condiciones anteriores y cuya aplicación práctica se demuestra mediante el análisis de casos reales.

Los resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta, pueden confirmarse mediante el análisis por curvas tipo involucrando la derivada de superposición para incremento de presión.

Nomenclatura

B_o	=	factor de volumen del aceite, L^3/L^3 , BI/BI
BU	=	incremento de presión
c_t	=	compresibilidad total, Lt^2/m , $(lb/pg^2)^{-1}$
C	=	coeficiente de almacenamiento de pozo, $L^3/(m/Lt^2)$, bls/ lb/pg^2
C_D	=	coeficiente de almacenamiento de pozo adimensional
DD	=	decremento de presión
e	=	número de Euler
FO	=	<i>Falloff</i>
h	=	espesor de la formación, L, pie
k	=	permeabilidad, L^2 , md
p	=	presión, m/Lt^2 , lb/pg^2
p_D	=	presión adimensional
p_i	=	presión inicial, m/Lt^2 , lb/pg^2
p_{wf}	=	presión de fondo fluyendo, m/Lt^2 , lb/pg^2
p_{ws}	=	presión de fondo cerrado, m/Lt^2 , lb/pg^2
q	=	gasto de producción, L^3/t , BPD
r	=	distancia radial, L, pie
r_D	=	radio adimensional
s	=	factor de daño
t	=	tiempo, t, hora
t_p	=	tiempo de producción/inyección, t, hora
t_D	=	tiempo adimensional

Δp_w	= caída de presión, lb/pg ²	μ	= viscosidad del aceite, m/Lt, cp
$\Delta p_w'$	= función de primera derivada, lb/pg ²	ϕ	= porosidad, fracción
$\Delta p_{wNIMP}'$	= Derivada impulso normalizada, lb/pg ²		
$\Delta p_{wSUP}'$	= Derivada de superposición, lb/pg ²		
$\Delta p_w''$	= función de segunda derivada, lb/pg ²		
Δt	= tiempo de cierre, t, hora		

Subíndices

D	= adimensional
w	= pozo

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de Pemex Exploración y Producción para la realización de este trabajo.

Referencias

- Agarwal, R.G., Al-Hussainy, R. y Ramey Jr., H.J. 1970. An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow: I. Analytical Treatment. *SPE J.* **10** (3): 279-90. SPE-2466-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/2466-PA>.
- Ayoub, J.A., Bourdet, D.P. y Chauvel, Y.L. 1988. Impulse Testing. *SPE Form Eval.* **3** (3): 534-46. SPE-15911-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/15911-PA>.
- Ayoub, J.A., Bourdet, D.P., Kniazeff, V., et al. 1983. Interpreting Well Tests in Fractured Reservoirs. *World Oil* **197** (5): 77-87.
- Earlougher Jr., R.C. 1977. *Advances in Well Tests Analysis*, Vol. 5. Richardson, Texas: Monograph Series, SPE.
- Fuentes C., G., Camacho V., R., y Vásquez C., M. 2012. Análisis de Pruebas Transitorias de Presión Afectadas por Almacenamiento, Daño y Tiempo de Producción/Inyección Corto. *Ingeniería Petrolera* **LII** (3): 31-46.
- Horner, D.R. 1951. Pressure Build-up in Wells. 3rd World Petroleum Congress, La Haya, Netherlands, Holanda, mayo 28-junio 6.
- Ramey Jr., H.J. 1992. Advances in Practical Well-Test Analysis. *J. Pet Tech* **44** (6): 650-659. SPE-20592-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/20592-PA>.
- Soliman, M.Y. 1986. Analysis of Buildup Tests With Short Producing Time. *SPE Form Eval* **1** (4): 363-71. SPE-11083-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/11083-PA>.
- Van Everdingen, A.F. y Hurst, W. 1949. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs. En *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, Vol. 186, 305-324. Dallas, Texas: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers.
- Vásquez-Cruz, M. y Camacho-Velázquez, R.G. 1998. Analysis of Short Pressure Transient Tests Affected by Changing Wellbore Storage," *SPE Res Eval & Eng* **1** (3): 261-267. SPE-36120-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/36120-PA>.

Semblanza de los autores

M. en I. Mario Alberto Vásquez Cruz

Ingeniero Petrolero egresado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y posee los grados de Maestro en Ingeniería por la DEPEFI de la UNAM y de Maestro en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad de Texas en Austin, EUA.

Actualmente labora en Pemex Exploración y Producción, adscrito a la Gerencia de Estrategia y Evaluación de Cartera de la Subdirección de Planeación y Evaluación, en donde participa, entre otras actividades, en la administración del portafolio de proyectos de explotación. En el periodo 2004–2013 en la Gerencia de Recursos y Reservas de la misma Subdirección colaboró en estudios de certificación de reservas, simulación de yacimientos para el mismo propósito y documentación del portafolio de proyectos de inversión.

En septiembre de 1984 ingresó como becario al Instituto Mexicano del Petróleo colaborando en estudios relacionados con evaluación de formaciones. A partir de 1986, contratado en la misma institución, participó durante 18 años en estudios de caracterización de yacimientos y en investigaciones relacionadas con el tema.

Por otra parte, desde 1992 desarrolla actividades docentes en el Departamento de Ingeniería Petrolera de la ESIA–Unidad Ticomán del IPN. Estas mismas actividades también las ha realizado de manera intermitente en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Ha recibido distinciones del Instituto Mexicano del Petróleo, de la Academia Nacional de Ingeniería, de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México, de la Society of Petroleum Engineers (SPE) y de la Academia Mexicana de Ciencias.

Es miembro del Colegio de Ingenieros Petroleros de México, en donde ha sido designado Perito en Ingeniería de Yacimientos; de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México, de la Sociedad Geológica Mexicana y de la SPE, agrupación en la que se ha desempeñado como responsable de la Secretaría y de los Programas Técnicos de la Sección México. Actualmente es Editor técnico de las publicaciones tituladas SPE Reservoir Evaluation and Engineering y Journal of Canadian of Petroleum Technology de la SPE.

Dr. Rodolfo G. Camacho Velázquez

En 1979 obtuvo el grado en la carrera de Ingeniería Geofísica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En 1983 realizó estudios de Maestría en Ingeniería Petrolera en la Universidad de Tulsa, Oklahoma; y en 1987 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Petrolera en la misma Universidad.

De 1979 a 1981 laboró en el Instituto Mexicano del Petróleo. De 1987 a 1988 trabajó como Investigador Asociado en el Departamento de Ingeniería Petrolera de la Universidad de Tulsa. En 1988 se desempeñó como Investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo, hasta 1991. Fue Asesor de la Subdirección de Planeación y Coordinación en Petróleos Mexicanos a partir de 1991 hasta 1992. De 1992 y hasta 1999 estuvo comisionado en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería por Pemex Exploración y Producción, desarrollando actividades docentes y de investigación en el programa de Posgrado en Ingeniería Petrolera. De 2000 a 2002 estuvo a cargo en forma interina de la Gerencia de Productividad de Pozos de la Subdirección de Tecnología y Desarrollo Profesional. De 2002 a 2005 fue Gerente de Desarrollo Tecnológico de Exploración y Producción en las Direcciones Corporativas de Planeación Estratégica y Operaciones. De 2005 a 2008 fue gerente de Información Técnica de Explotación. De 2008 a 2011 estuvo a cargo de la Gerencia de Tecnología de Explotación en la Subdirección Técnica de Explotación en PEP. Actualmente es Asesor de la Dirección de Pemex Exploración y Producción.

Ha realizado actividades docentes en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, de la UNAM y en la Escuela de Ciencias de la Tierra del Instituto Politécnico Nacional.

Ha presentado y publicado varios trabajos técnicos en diferentes foros y revistas, principalmente aquellos patrocinados por la Society of Petroleum Engineers, (SPE). También ha publicado varios artículos en la revista Ingeniería Petrolera de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México (AIPM), y en la revista de Water Resources Research. Ha colaborado

en el desarrollo del capítulo VII del libro: *Computational Methods for Free and Moving Boundary Problems in Heat and Fluid Flow*.

Es miembro de la Academia Nacional de Ingeniería, y de la Academia Mexicana de Ciencias. Fue Presidente de la SPE-Sección México en el periodo 2004-2006 y Vicepresidente del Programa Técnico de la SPE Sección México en el periodo 2002-2004. También ha participado, entre otros cargos, como Technical Editor en la SPE Editorial Review Committee en 1996, y hasta 1999 fue Review Chairman de la revista SPE Reservoir Evaluation and Engineering.

En 2008, recibió de la SPE la distinción Lester Uren Award. En 2000 recibió la distinción “Instituto Mexicano del Petróleo” por parte de la AIPM, por logros en investigación y desarrollo tecnológico en ingeniería petrolera. Recibió la Medalla “Juan Hefferan”, otorgada por la AIPM, al mejor trabajo técnico, en 1990 y 1993; el “Premio Nacional de la Administración Pública”, otorgado por el Gobierno Mexicano, en 1990; la Medalla “Academic Excellence” otorgada por la Atlantic Richfield Company, Tulsa, en 1982; la Medalla “Gabino Barreda”, otorgada por la UNAM en 1979; y Mención Honorífica otorgada al término del examen profesional por la Facultad de Ingeniería, UNAM, en 1979.

Dr. Gorgonio Fuentes Cruz

Físico egresado de la División Académica de Ciencias Básicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco en 1997. En el 2003 obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería en la DEPI-UNAM con Mención Honorífica. Recibió distinciones como mejor promedio en las instituciones mencionadas. Actualmente realiza estudios candidato a Doctor en Ingeniería Petrolera en la Texas A&M University.

En septiembre de 1997 ingresó al Instituto Mexicano del Petróleo donde ha participado en estudios integrales de caracterización de yacimientos, como responsable de la etapa de Ingeniería de Yacimientos. Además, ha participado en proyectos de investigación y desarrollo en caracterización dinámica de yacimientos.

Ha desarrollado actividades docentes en la División Académica de Ciencias de la UJAT y en la ESIA-Unidad Ticomán del IPN. Asimismo, se desempeñó como líder de proyecto en el Programa de investigación de recuperación de hidrocarburos del IMP.