

01/27
9
29

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

" AREA DE DRENE DE UN POZO : DEFINICION, ESTIMACION Y
APLICACION "

ING. JAIRO ANTONIO SEPULVEDA GAONA
T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERIA
(PETROLERA)
1 9 9 0

DIRECTOR DE TESIS : DR. HEBER CINCO LEY

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

	PAG.
RESUMEN.	
I.- INTRODUCCION.	1
II.- DESCRIPCION DE LOS DIFERENTES METODOS PARA LA DETERMINACION DEL AREA DE DRENE.	4
II.1.- METODO DE MUSKAT.	
II.2.- METODO DE MILLER, DYES Y HUTCHINSON (MDH).	
II.3.- METODO DE BROWNSCOMBE Y KERN.	
II.4.- METODO DE CHATAS.	
II.5.- METODO DE MATTHEWS, BRONS Y HAZEBRÖEJ. (MBH).	
II.6.- METODO DE TEK, GROVE Y POETTMANN.	
II.7.- METODO DE JONES.	
II.8.- METODO DE VAN POOLEN.	
II.9.- METODO DE DIETZ.	
II.10.- METODO DE EARLOUGHER, JR, RAMEY, JR, MILLER Y MUELLER.	
II.11.- METODO DE EARLOUGHER, JR.	
II.12.- METODO DE CINCO LEY Y GONZALEZ.	
III.- ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE LOS METODOS PARA LA DETERMINACION DEL AREA DE DRENE.	25

IV.- DETERMINACION DEL AREA DE DRENE A PARTIR DE DATOS DE PRODUCCION.	28
IV.1.- COMPORTAMIENTO DE UN POZO QUE PRODUCE A PRESION CONSTANTE EN UN AREA DE DRENE CERRADA.	
IV.2.- ANALISIS POR CURVA TIPO.	
IV.3.- ANALISIS POR DECLINACION EXPONENCIAL.	
IV.4.- LIMITACIONES DE LA METODOLOGIA.	
V.- EXTENSION DE SOLUCIONES A POZOS HORIZONTALES.	43
VI.- EJEMPLOS DE APLICACION.	47
VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	59

APENDICE A

- A. APLICACION DE LAS FUNCIONES FUENTE Y DE GREEN PARA GENERAR SOLUCIONES.
- B. DECLINACION TRANSITORIA DEL GASTO DE UN POZO QUE PRODUCE A PRESION CONSTANTE EN UN AREA DE DRENE CERRADA.

APENDICE B

FIGURAS Y TABLAS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRESION Y DEL GASTO ADIMENSIONAL EN SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

APENDICE C

CURVAS TIPO

APENDICE D

FACTORES DE FORMA PARA VARIAS AREAS DE DRENE CERRADAS CON UN POZO.

NOMENCLATURA.

REFERENCIAS.

RESUMEN

En el presente trabajo se hace una descripción de los diferentes métodos y técnicas de análisis más sobresalientes desarrolladas para la determinación del área de drenaje de un pozo.

Mediante el uso de las funciones Fuente y de Green, se presenta una nueva metodología para analizar el comportamiento del flujo en un área de drenaje cerrada. Podemos obtener información de los tres periodos de flujo presentes, estudiarlos e identificar las zonas de comportamiento infinito, de transición y la de comportamiento pseudoestacionario. Además, determinar un parámetro muy importante, el factor de forma para esa área de drenaje.

Se hace también un análisis del comportamiento de la declinación transitoria del gasto para un pozo que produce a presión constante.

Con base en esta metodología, estudiamos un gran conjunto de diferentes formas geométricas rectangulares con diferentes posiciones del pozo, determinando su factor de forma, C_A , periodos de flujo y el comportamiento de la declinación transitoria del gasto en una gráfica Log-Log.

I.- INTRODUCCION.

Uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta en el desarrollo de un yacimiento petrolífero, es el volumen de hidrocarburos recuperables. Para su determinación, se han desarrollado procedimientos que permiten estimar éste y otros factores muy importantes en la caracterización de los yacimientos petrolíferos.

Existen varios estudios de flujo en sistemas radiales que se pueden utilizar para interpretar los problemas de flujo en yacimientos irregulares. En el caso particular de analizar la cantidad de fluido (hidrocarburo) que está siendo drenado por un pozo, existen diferentes metodologías; éstos métodos presentados en la literatura por cada uno de sus autores dependen de la definición usada, un tanto arbitraria, para el radio de drene. De esta manera, diversas definiciones se han dado para el radio de drene, sin llegar a ser fronteras físicas o discontinuidades.

Haciendo una remembranza de los métodos y técnicas de análisis más relevantes desarrolladas para la determinación del área de drene de un pozo, puede decirse que MUSKAT¹ fué el primero en plantear el problema de determinar el radio de drene de un pozo, basado en las suposiciones que el fluido se extrae a un gasto constante y en representar aquel por un conjunto discontinuo de transientes que van desde un estado altamente transitorio a un estado estable.

MILLER, DYES y HUTCHINSON², usan exactamente la misma ecuación que BROWNSCOMBE y KERN³ y la hacen extensiva al flujo de fluidos en dos fases. BROWNSCOMBE y KERN³ definen el tiempo

de estabilización, como el tiempo requerido para que el yacimiento alcance el estado de equilibrio en el cual los cambios de presión sean menores del 2 % cuando el yacimiento está produciendo a un gasto constante. CHATAS⁴ aparentemente usa la misma filosofía que utilizó MUSKAT¹ con relación al tiempo de estabilización. MATTHEWS, BRONS y HAZEBROEK⁵ calculan la presión promedio en un yacimiento cerrado, dividen el yacimiento en una serie de zonas drenadas individualmente por cada pozo, utilizando el criterio que en estado pseudoestacionario el volumen de drene individual es proporcional al gasto de producción de cada pozo. Por su parte TEK, GROVE y POETTMANN⁶ estudian el comportamiento de pozos de gas natural y formulan expresiones que permiten determinar el índice de prueba, el radio de drene y el radio efectivo del pozo.

JONES⁷ desarrolla su trabajo tomando como base la analogía que existe entre el flujo de calor en una placa semi-infinita y el flujo de fluidos en un sistema lineal, definiendo dos parámetros como son el radio de drene y el tiempo de viaje. VAN POOLEN⁸ en su trabajo hace uso de la función Y de JONES⁷, y la principal suposición hecha es que existe un cambio brusco entre el comportamiento infinito y finito, eliminando la zona de transición.

DIETZ⁹ determina la presión promedio del yacimiento, de una manera más simple que la presentada por MBH⁵; define un factor de forma, C_A , que depende de la forma del yacimiento y de la presión del pozo dentro de él. EARLOUGHER, JR, RAMEY, JR, MILLER Y MUELLER¹⁰ simplifican el cálculo de las soluciones para sistemas de flujo finito, usan el principio de superposición para tabular la función de caída de presión adimensional para varios puntos en un cuadrado cerrado con un pozo en el centro; éste modelo nos sirve como patrón para generar el comportamiento del flujo de cualquier forma rectangular para el cual los lados están en una relación entera. EARLOUGHER, JR,¹¹ solamente analiza los primeros datos de una prueba de decremento y los últimos puntos de una prueba de límite de yacimiento; esta información la utiliza para estimar la

forma de la región de drenaje y la localización del pozo dentro de ella. Finalmente CINCO LEY y GONZALEZ¹² calculan la forma y tamaño del área de drenaje de un pozo, así como, la localización de éste dentro del área, por medio del ajuste de curvas obtenidas de los datos de pruebas de decremento de presión a curvas tipo elaboradas para diferentes áreas de flujo, utilizando el principio de "desuperposición".

En el presente trabajo se usan las funciones Fuente y de Green¹⁵ para hacer un análisis del comportamiento del flujo en diferentes formas geométricas de drenaje y localizaciones del pozo dentro de ella. Se calcula el factor de forma, C_A , el final del periodo infinito y el inicio del comportamiento pseudoestacionario. Obtenemos el comportamiento del flujo en sus tres periodos (infinito, transición y pseudoestacionario) en una forma continua. Además, analizamos el comportamiento de la declinación transitoria del gasto para pozos que producen a presión constante y su extensión a pozos horizontales.

II.- DESCRIPCION DE LOS DIFERENTES METODOS PARA LA DETERMINACION DEL AREA DE DRENE.

Como se mencionó anteriormente, existen en la literatura diferentes técnicas desarrolladas bajo ciertas consideraciones, que intentan interpretar los problemas de flujo en los yacimientos irregulares y que permiten estimar parámetros que son muy importantes en la caracterización de los yacimientos petrolíferos.

En este capítulo se describen los métodos más relevantes desarrollados para la determinación del área de drene de un pozo.

II.1.- METODO DE MUSKAT.

El problema de determinar el radio de drene de un pozo fué tratado inicialmente por MUSKAT¹. Al considerar el sistema yacimiento saturado de fluido, tiene en cuenta una serie de suposiciones para desarrollar su método. Supone un medio poroso homogéneo, isotrópico y de espesor constante que contiene un volumen total de aceite a una presión constante P_i , hasta un instante antes de hacerlo producir. Este volumen lo representa por * :

$$Q = \pi \phi h (r_b^2 - r_w^2) \quad \dots\dots (1)$$

* Las expresiones están en unidades DARCY. Simbología y unidades están definidas en la Nomenclatura.

Otro aspecto importante es la representación del flujo de fluidos en el medio poroso por una serie continua de flujos en regímenes permanentes y que cada volumen de fluidos que se produce del yacimiento está representado por:

$$Q_{rem} = \pi \theta h c (P_i - P_v) \left[\frac{r_b^2 - r_v^2}{2 \ln \frac{r_b}{r_v}} - r_v^2 \right] \dots (2)$$

Generalmente, el valor de r_v es muy pequeño comparado con el valor de r_b y r_v^2 se puede eliminar, y la ecuación 2 se representa por:

$$Q_{rem} = \pi \theta h c (P_i - P_v) \left[\frac{r_b^2}{2 \ln \frac{r_b}{r_v}} \right] \dots (3)$$

Al extraer este volumen de fluidos se origina un gasto expresado por:

$$q = \frac{2 \pi k h (P_i - P_v)}{\mu \ln \frac{r_b}{r_v}} \dots (4)$$

Esto indica que en la vecindad del pozo la presión es menor a P_i , y que se tiene un flujo radial tipo darcy. Al presentarse este nivel de presión, en la ecuación 4, se dice que en ese instante se

tiene el primer régimen permanente del sistema.

Como el volumen de fluidos producidos se extrae a un gasto constante, el tiempo necesario para alcanzar el primer régimen permanente estará dado por:

$$t = \frac{Q_{rem}}{q} \quad \dots (5)$$

Reemplazando las ecuaciones 3 y 4 en 5 se tiene:

$$t = \frac{\frac{\pi \phi h c (P_i - P_w) r_b^2}{2 \ln \frac{r_b}{r_w}}}{\frac{2 \pi k h (P_i - P_w)}{\mu \ln \frac{r_b}{r_w}}} \quad \dots (6)$$

simplificando términos, se llega a la siguiente expresión:

$$t = \frac{\phi \mu c r_b^2}{4 k} \quad \dots (7)$$

de donde podemos despejar el radio de drené,

$$r_b = 2 \left(\frac{k t}{\phi \mu c} \right)^{1/2} \quad \dots (8)$$

Como puede observarse en la ecuación 8, r_b crece continuamente con el tiempo. Se debe tener presente, que el desarrollo de esta expresión se basa en las suposiciones que el fluido se extrae a un

gasto constante y en representar aquel por un conjunto discontinuo de transientes que van desde un estado altamente transitorio a un estado estable.

11.2.- METODO DE MILLER, DYES Y HUTCHINSON (MDH).

Usan exactamente la misma ecuación de BROWNSCOMBE y KERN³ y la hacen extensiva al flujo de fluidos en dos fases. Estas expresiones consideran el flujo de un fluido homogéneo y compresible a lo largo de todo el medio poroso. Suponen que en un punto lejos del pozo en el yacimiento la presión es casi constante, y por lo mismo, las funciones de presión μ_l , μ_g , B , ρ , y S se pueden considerar como constantes. Asimismo, la saturación es casi constante en todo el yacimiento y las permeabilidades relativas, variables dependientes, k_{rg} y k_{rl} se pueden suponer constantes a lo largo de todo el medio poroso. Suposición bastante fuerte, en general, no cierta en todos los casos.

Las ecuaciones en las que el método se basa consideran un pozo fluyendo a un gasto de producción constante por un periodo de tiempo suficiente antes del cierre.

Bajo estas consideraciones, el tiempo de estabilización (el tiempo requerido para alcanzar condiciones de estado pseudocestacionario para cualquier condición de frontera) para el flujo de una sola fase es

$$t_s = \frac{\phi \mu c r_b^2}{3.16 k} \quad \dots\dots 17$$

Una ecuación similar para el flujo de dos fases se puede

obtener reemplazando $\frac{\sigma \mu c}{l}$ por el factor de η' , la difusividad modificada, obteniendo la expresión

$$t_w = \frac{\sigma \mu c_l r_b}{3.18 k \left[\frac{\delta_l + \delta_g R}{E \delta_T} \right]} \quad \dots (10)$$

donde t_w es el tiempo de estabilización.

11.3.- METODO DE BROWNSCOMBE Y KERN.

Los autores establecieron que el tiempo necesario para alcanzar el estado de equilibrio, en el cual los cambios de presión son constantes, para cualquier yacimiento es infinito. Desde el punto de vista práctico, sin embargo, ellos señalaron el tiempo requerido para alcanzar el estado de equilibrio como el tiempo en el cual el transitorio en la solución llega a ser despreciable.

Por medio de soluciones gráficas a problemas de flujo radial, ellos encontraron

$$t_s = \frac{\sigma \mu c r_b^2}{3.18 k} \quad \dots (11)$$

Entonces, definen t_s , tiempo de estabilización, como el tiempo

requerido para que el yacimiento alcance el estado de equilibrio en el cual los cambios de presión sean menores del 2 % cuando el yacimiento está produciendo a un gásto constante.

II.4.- METODO DE CHATAS.

CHATAS⁴ aparentemente usa la misma filosofía que empleó MUSKAT¹ acerca del tiempo de estabilización. Por lo tanto, para flujo radial él encontró la misma ecuación que desarrolló MUSKAT¹, la ecuación 7.

Para flujo lineal, encontró la siguiente expresión

$$t = \frac{0.479 \mu c X^2}{2 k} \dots (12)$$

donde el parámetro X representa la distancia o longitud de drene.

II.5.- METODO DE MATTHEWS, BRONS Y HAZEBROEK (MBH).

El objetivo del trabajo de estos autores, MBH⁵, fué el cálculo de la presión promedio en un yacimiento cerrado. El yacimiento lo dividen en una serie de zonas drenadas individualmente por cada pozo, utilizando el criterio que en estado pseudoestacionario el volumen de drene individual es proporcional al gásto de producción de cada pozo.

Para el cálculo de la presión promedio en cada volumen de drene, la presión extrapolada es corregida, esto es, la presión que se obtiene al extrapolar a tiempo infinito la parte lineal de

la gráfica de presión de cierre contra $\text{Log} \left(\frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \right)$, donde Δt es el tiempo de cierre y t_p es el tiempo de producción. La corrección, que es función del tiempo de producción, se presenta de manera gráfica para diferentes formas del área de drene.

Indirectamente podemos determinar la forma del área de drene para un yacimiento cerrado.

Dentro de las consideraciones tenidas en cuenta por MBH⁵ en el desarrollo de las expresiones tenemos que el yacimiento es horizontal, homogéneo, isotrópico y de espesor constante. Flujo de un solo fluido de compresibilidad pequeña y constante y μ viscosidad constante.

Los autores⁵ definieron las siguientes variables adimensionales de presión y tiempo:

$$P_{DMBH} = \frac{P^* - \bar{P}}{q \mu / 4 \pi k h} \quad \dots (13)$$

$$t_{PDA} = \frac{k t_p}{\phi \mu c A} \quad \dots (14)$$

donde P_{DMBH} es la presión adimensional de MBH⁵, P^* es la presión extrapolada de la gráfica de incremento de presión de HORNER, \bar{P} es la presión promedio del área de drene, t_{PDA} es el tiempo adimensional a t_p , y t_p es el tiempo de producción.

De las figuras 2 hasta la 8, ref 5, tenemos un conjunto de gráficas de P_{DMBH} contra t_{PDA} para diferentes formas del área de drene y localizaciones de pozos.

El procedimiento para el cálculo de t_{PDA} ⁵ es el siguiente: se divide el mapa del yacimiento en zonas de drene para cada pozo. Generamos una tabla que contiene los gastos de producción promedio

del último mes; los volúmenes de drenaje relativos, V_i / V_T , calculados usando la expresión

$$\frac{V_i}{V_T} = \frac{q_i}{q_T} \quad \dots (15)$$

Las áreas de drenaje relativas,

$$\frac{A_i}{A_T} = \left[\frac{V_i}{V_T} \frac{1}{h_i} \right] + \left[\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V_T} \frac{1}{h_i} \right] \quad \dots (16)$$

Las fronteras de drenaje son revisadas ajustadas, hasta que las áreas estén en proporción correcta. El cálculo de θV_T , se obtiene al multiplicar (θV_T) por (V_i / V_T) .

La etapa importante es cuando determinamos t_{PIA} , y así, con éste valor entramos a las figuras 2 hasta la 8^a y seleccionamos la curva apropiada para determinar la \bar{F}_i de cada volumen de drenaje. Luego, promediando volumétricamente las \bar{F}_i hallamos la \bar{F} del yacimiento.

11.6.- METODO DE TER, GROVE Y POETTMANN.

Su trabajo consistió en estudiar el comportamiento de pozos de gas natural y formular expresiones que permitan determinar el índice de prueba, el radio de drenaje y el radio efectivo del pozo.

Es de nuestro interés, analizar el trabajo respecto al radio de drenaje realizado por ellos.

Definen el radio de drenaje como la distancia más allá de la

cual una cantidad insignificante de gas natural fluye hacia el pozo productor. Matemáticamente los autores⁵ evalúan el radio de drenaje como el punto donde solamente fluye el 1 % del fluido que está fluyendo hacia el pozo; la expresión derivada es la siguiente

$$r_e = 4.25 \left(\frac{k t}{\phi \mu c} \right)^{1/2} \quad \dots (17)$$

La compresibilidad del gas natural no es constante, varía con la presión, definida por

$$c = \frac{1}{P} \left[1 - \frac{P}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial P} \right) \right] \quad \dots (18)$$

La relación entre el flujo de fluido a través del radio, r , y el gasto del pozo está expresado como

$$\frac{q_{r,l}}{q_{rv}} = e^{-D} \quad \dots (19)$$

donde

$$D = \frac{\phi \mu c r^2}{4 l t}$$

De acuerdo a los autores⁶,

$$e^{-D} = 0.01$$

Así, de esta manera obtenemos la expresión para el radio de drené en un pozo de gas, ecuación 17.

II.7.- METODO DE JONES.

La ecuación para el radio de drené propuesta por el autor⁷ es:

$$r_b = 4 \left[\frac{k t}{\phi \mu c} \right]^{1/2} \quad \dots (20)$$

Reacomodando la ecuación anterior, podemos despejar el tiempo de viaje

$$t_L = \frac{\phi \mu c r_b^2}{16 k} \quad \dots (21)$$

JONES⁷ define el radio de drené, r_b , como "aquel punto del yacimiento donde el cambio de presión es menor o igual al 1 %", y el tiempo de viaje como "el tiempo necesario para que un disturbio en la presión sea perceptible a una distancia r_b alejada del pozo".

Esta expresión la desarrolló tomando como base la analogía que existe entre el flujo de calor en una placa semi-infinita¹⁰ y el flujo de fluidos en un sistema lineal.

El principio en el cual se basa esta deducción establece que si una placa se encuentra a una temperatura constante y, posteriormente, esta se incrementa a través de uno de los extremos, la distribución de temperatura a lo largo de la placa se describe por

$$T - T_o = (T_1 - T_o) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{y}{(4 \alpha t)^{1/2}} \right] \dots\dots (22)$$

Esta ecuación es semejante a la utilizada para el flujo de un fluido presurizado dentro de un núcleo lineal. Esta expresión es como sigue:

$$P - \bar{P} = (P_1 - \bar{P}) \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\theta \mu c X^2}{4 k t} \right]^{1/2} \right] \dots\dots (23)$$

Utilizando la definición del radio de drene,

$$\frac{(P - \bar{P})}{(P_1 - \bar{P})} = 0.01$$

y la ecuación 23

$$\operatorname{erf} \left[\frac{\theta \mu c X^2}{4 k t} \right]^{1/2} = 0.99$$

o

$$\left[\frac{\theta \mu c X^2}{4 k t} \right]^{1/2} = 1.82 \approx 2.0$$

$$X = 4 \left(\frac{k t}{\phi \mu c} \right)^{1/2} \quad \dots (24)$$

La ecuación 24 es muy semejante a la ecuación 20, excepto que el valor lineal X es reemplazado por el valor radial r_b .

11.8.- METODO DE VAN POOLEN.

En el artículo de JONES⁷ sobre "pruebas de límite de yacimientos", hace uso de la función Y que se define como

$$Y = \frac{(dp / dt)}{q} \quad \dots (25)$$

La función Y solución para los casos de yacimientos infinito y finito es :

$$Y_{inf} = (\mu / 4 \pi k h) (1 / t) \quad \dots (26)$$

$$Y_{fin} = \frac{1}{\pi \phi h c (r_b^2 - r_w^2)} = \frac{1}{N_c} \quad \dots (27)$$

La función Y_{fin} es una medida del volumen poroso conectado asociado al pozo y es inversamente proporcional al volumen poroso asociado al pozo. Al observar la figura 3^B (gráfica de la función

Y de JONES), generalmente el Y_{fin} no se ha alcanzado, significando que la función Y no se ha estabilizado. En estos casos, el último punto de la curva, Y_A , lo suponemos igual a Y_{fin} , e interceptando el Y_{fin} con el Y_{inf} ,

$$Y_{inf} = Y_{fin} \quad \text{en A}$$

o

$$\frac{\mu}{4 \pi k h} \frac{1}{t} = \frac{1}{\pi \phi h c r_e^2}$$

rearrreglando obtenemos la expresión

$$r_e = 2 \left(\frac{k t}{\phi \mu c} \right)^{1/2} \quad \dots (28)$$

Este radio de drenaje, r_e , es conservador. Se puede considerar como la distancia a la cual se tiene evidencia del volumen poroso conectado. La principal suposición es que existe un cambio brusco entre comportamiento infinito y finito, eliminando la zona de transición. Suposición válida para pozos en el centro de un área de drenaje simétrica.

II.9.- METODO DE DIETZ.

El trabajo desarrollado por DIETZ⁹ es la determinación de la presión promedio del yacimiento, de una manera más simple que la presentada por MBH⁹. Para yacimientos cerrados, en condiciones de flujo pseudoestacionario, los resultados son idénticos. El método

da resultados inferiores para condiciones de estado transitorio. Con una ligera modificación, se puede emplear para el análisis de yacimientos con empuje de agua.

En el desarrollo de las ecuaciones^o, el autor considera, principalmente, condiciones de estado pseudoestacionario, área de drene radial con un pozo en el centro. DIETZ llega a la siguiente expresión

$$P_w(\Delta t) = \bar{P} - \frac{q \mu}{4 \pi k h} \left[\text{Ln} \frac{\phi \mu c r_b^2}{4 k \Delta t} - 0.9228 \right] \dots (29)$$

En la extrapolación de esta línea recta, el valor de \bar{P} se encuentra cuando

$$\text{Ln} \frac{\phi \mu c r_b^2}{4 k \Delta t_p} - 0.9228 = 0$$

rearrreglando la expresión tenemos,

$$\Delta t_p = \frac{\phi \mu c r_b^2}{10.07 k} \dots (30)$$

De la ecuación anterior podemos despejar el radio de drene, r_b

$$r_b = \left[\frac{10.07 k \Delta t_p}{\phi \mu c} \right]^{1/2} \dots (31)$$

La expresión anterior sólo es aplicable a un área de drenaje circular con un pozo en el centro.

Para áreas de drenaje con diversas formas y diferentes localizaciones de pozos, DIETZ^P usa las gráficas de MBH^P y obtiene la expresión

$$\Delta t_{-P} = \frac{\emptyset \mu c A}{C_A k} \quad \dots (32)$$

La cual es la forma general de la ecuación 30. Rearreglando la ecuación 32,

$$A = \frac{C_A k \Delta t_{-P}}{\emptyset \mu c} \quad \dots (33)$$

donde A es el área de drenaje.

El factor de forma C_A se obtiene de las gráficas de MBH^P considerando que en la parte de la línea recta,

$$\frac{P^* - \bar{P}}{q \mu / 4 \pi k h} = \ln C_A \quad \text{para} \quad \frac{k t}{\emptyset \mu c A} = 1.0 \quad \dots (34)$$

Dietz^P también analizó el caso de los "yacimientos con empuje de agua". En los yacimientos que presentan un empuje de agua la presión en cualquier punto tiende a ser constante. Las áreas de drenaje, definidas en la manera usual, tienen formas muy irregulares, tendiendo a estar en contacto con el frente de agua que está avanzado. En este caso es preferible dividir el yacimiento tan regularmente como sea posible lo que, de acuerdo con el D.R. Horner, se pueden llamar áreas del yacimiento

asociadas a los pozos.

En un campo perforado regularmente las áreas asociadas se pueden aproximar a círculos.

Dietz^p obtiene despues de una serie de consideraciones la siguiente expresión,

$$r_b = \left[\frac{6.1 k \Delta t_p}{\phi \mu c} \right]^{1/2} \dots (35)$$

II.10.- METODO DE EARLOUGHER, JR, RAMEY, JR, MILLER Y MUELLER.

Soluciones para sistemas de flujo finito pueden ser generadas por medio del principio de superposición utilizando las soluciones para el el sistema infinito, siendo un proceso laborioso. Los autores¹⁰ proponen una metodología para simplificar el cálculo de las soluciones para sistemas de flujo finito. Usan el principio de superposición para tabular la función de caída de presión adimensional para varios puntos en un cuadrado cerrado con un pozo en el centro. Este modelo nos sirve como patrón para generar el comportamiento de flujo de cualquier forma rectangular para el cual los lados estan en una relación entera. Los valores de la función de caída de presión adimensional tabulados son simplemente sumados para obtener la función de caída de presión adimensional para cualquier sistema rectangular; éste puede contener cualquier número de pozos produciendo a cualquier gasto. Además, las fronteras externas del sistema pueden ser cerradas (no-flujo) o pueden estar a presión constante, las dos condiciones tambien se pueden considerar.

Los autores¹⁰ inicialmente consideraron el agotamiento

transitorio de una región de drenaje cuadrada cerrada y con un pozo en el centro. Suponen una formación ideal, delgada, isotrópica, homogénea, horizontal que contiene un fluido de una sola fase de compresibilidad y viscosidad constante. Los gradientes de presión son muy pequeños, fuerzas gravitacionales despreciables. Para generar la región de drenaje cuadrada, aplicaron el método de superposición utilizado por MBH⁵.

Este principio de superposición puede ser representado analíticamente como

$$P_D(X_D, Y_D, t_{DA}) = \sum_{i=1}^{\infty} P_D(a_{iD}^2, t_{DA}) \quad \dots (36)$$

donde $a_{iD} = a_i / A^{1/2}$.

a_i = Distancia del i-ésimo pozo imagen al punto (X_D, Y_D) .

A = Área drenada por el pozo.

$$t_{DA} = \frac{k t}{\phi \mu c A} = t_D \left[\frac{r_v^2}{A} \right]$$

Después de una serie de análisis y consideraciones, los autores¹⁰ obtienen la siguiente expresión para la caída de presión adimensional

$$P_D(r_{wD}, t_{DA}) = - \frac{1}{2} \left[\text{Ln} \left(\frac{r_w^2}{4 A t_{DA}} \right) + 0.5772 \right. \\ \left. + \sum_{l=2}^{\infty} \text{Ei} \left(- \frac{a_l D^2}{4 t_{DA}} \right) \right] \quad \dots (37)$$

En la tabla 1¹⁰, se muestran los resultados de la caída de presión adimensional para diferentes puntos usando la ecuación 37.

En el caso de tener otras formas rectangulares los autores¹⁰ analizando las gráficas de MBH⁵, definen la siguiente expresión para condiciones de flujo pseudoestacionario

$$P_{DMBH} = \text{Ln} (C_A t_{DA}) \quad \dots (38)$$

Así, el logaritmo natural del factor de forma se puede determinar de los valores tabulados de P_{DMBH} para t_{DA} igual a la unidad, si las condiciones de flujo pseudoestacionario han sido alcanzadas para ese tiempo. De otro modo, una extrapolación más arriba de $t_{DA} = 1.0$ es necesaria.

II.11.- METODO DE EARLOUGHER, R.C., JR.

El método propuesto¹¹ requiere solamente datos de pendiente e intercepto de los primeros puntos de una prueba de decremento y de los últimos puntos de una prueba de límite de yacimiento. Esta información es utilizada para estimar la forma de la región de drenaje y la localización del pozo dentro de ella.

En una prueba de límite de yacimiento a gasto constante el

comportamiento de la presión alcanza un estado pseudoestacionario en un sistema de drenaje cerrado. En el estado pseudoestacionario la presión varía linealmente con el tiempo, la constante de proporcionalidad depende del volumen del yacimiento.

El análisis del método es el siguiente:

Cuando un yacimiento estabilizado produce a gasto constante, el comportamiento de la presión en los primeros tiempos está dado por la expresión

$$P_{vf} = m \text{ Log } t_p + P_{1hr} \quad \dots (39)$$

donde

P_{vf} = presión de flujo en el pozo

t_p = tiempo de producción

$$m = - 0.1833 \frac{q B \mu}{k h}$$

$$P_{1hr} = \bar{P} - \frac{q B \mu}{4 \pi k h} \left[\text{Ln} \left(\frac{k t_p}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 0.80907 + 2 S \right]$$

después de un periodo de tiempo los efectos de frontera afectan el comportamiento de la presión, hasta que la presión toma un comportamiento pseudoestacionario. DIETZ^P, tabuló los tiempos donde inicia el estado pseudoestacionario para las diferentes áreas de drenaje.

En este periodo pseudoestacionario la ecuación que rige el comportamiento de la presión es

$$P_{vr} = m^* t_p + P_o \quad \dots (40)$$

donde

$$m^* = - \frac{q B}{\phi c_t h A}$$

$$P_o = \bar{P} - \frac{q B \mu}{4 \pi k h} \left[\text{Ln} \left(\frac{A}{C_A r_w^2} \right) + 0.80907 + 2 S \right]$$

A = área de drenaje

C_A = factor de forma de DIETZ.

Utilizando las ecuaciones anteriores, EARLOUGHER¹¹ finalmente llega a la siguiente expresión

$$C_A = 5.456 \frac{m}{m^*} \text{EXP} \left[2.303 (P_{thr} - P_o) / m \right] \quad \dots (41)$$

El tiempo adimensional usado por DIETZ⁹ para definir el inicio del periodo pseudoestacionario se calcula de

$$(t_{DA})_{PSS} = 0.1833 \frac{m^*}{m} t_{PSS} \quad \dots (42)$$

donde,

t_{pss} = tiempo donde comienza el periodo pseudoestacionario.

II.12.- METODO DE CINCO LEY Y GONZALEZ.

Desarrollan una metodología para determinar la forma y tamaño del área de drene de un pozo, así como, la localización de este dentro del área, por medio del ajuste de curvas obtenidas de los datos de pruebas de decremento de presión a curvas tipo elaboradas para diferentes áreas de flujo.

En la construcción de las curvas tipo los autores¹² utilizaron el principio de "desuperposición". Se desuperpuso la presión adimensional del comportamiento infinito, ecuación 10¹² a la caída de presión adimensional definida por EARLOUGH, RAMEY et al¹⁰, ecuación 9¹², la que se reduce a

$$\Delta P_{D(tDA)} = 2 \pi t_{DA} - \frac{1}{2} P_{DMBH(tDA)} \quad \dots (43)$$

Es decir, a $P_D(tDA)$ que es la suma de caídas de presión por comportamiento infinito y efectos de frontera, se le restó la caída de presión por comportamiento infinito P_D , de lo que se desprende que $\Delta P_{D(tDA)}$ es la caída de presión adimensional debido a los efectos de las fronteras.

Las figuras 2,3,4 y 5¹² son la representación gráfica de la caída de presión adimensional por fronteras $\Delta P_{D(tDA)}$ en función de t_{DA} para diferentes áreas de drene; conformandose así el conjunto de curvas tipo a utilizar en la determinación del área de drene.

III.- ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE LOS METODOS PARA LA DETERMINACION DEL AREA DE DRENE.

Haciendo un análisis global de la literatura existente sobre la determinación del área drenada por un pozo, puede observarse que la mayor parte de los métodos y técnicas tradicionales están desarrollados en base a una serie de consideraciones y definiciones muy específicas de cada autor.

Dentro de las más comunes están la de tener un medio poroso homogéneo, isotrópico y de espesor constante, horizontal; flujo de un solo fluido de compresibilidad pequeña y constante, y de viscosidad constante. Además suponen producción a gasto constante, condiciones de flujo estable, y en algunos casos se está dentro de condiciones pseudoestacionarias.

Estas limitaciones en los métodos tradicionales hacen que se tornen imprácticos, especialmente cuando son aplicados a datos de presión obtenidos de yacimientos de baja permeabilidad y también cuando tenemos datos que pertenecen a la zona de transición entre comportamiento infinito y comportamiento pseudoestacionario.

Debido a lo anterior podemos afirmar que para una evaluación confiable de los parámetros característicos del yacimiento, los métodos tradicionales desarrollados en algunas ocasiones son limitados y no son aplicables en el análisis de los datos de producción.

En la Tabla 1, se tiene una comparación de los diferentes métodos existentes para la determinación del área de drenaje.

TABLA 1.- METODOS EXISTENTES PARA LA DETERMINACION DEL AREA DE DRENE.

AUTOR	DESCRIPCION
MUSKAT (1).	$r_b = 2 \left[\frac{k t}{\phi \mu c} \right]^{1/2}, \quad t = \frac{\phi \mu c r_b^2}{4 k}$
MILLER, DYES y HUTCHINSON, MDH (2). BROWNSCOMBE y KERN (3).	$t_a = \frac{\phi \mu c r_b^2}{3.18 k}$
CHATAS (4). radial	$t = \frac{\phi \mu c r^2}{4 k}$
CHATAS (4). lineal	$t = \frac{\phi \mu c X^2}{2 \nu}$
MATTHEWS, BRONS y HAZEBROEK, MBH (5).	<p>Calculan la presión promedio del área de drenaje y determinan además la forma, tamaño, y la localización del pozo dentro de ella. Utilizan las siguientes variables adimensionales:</p> $P_{DMBH} = \frac{P^* - \bar{P}}{q \mu / 4 \pi k h}$ $t_{PDA} = \frac{k t_p}{\phi \mu c A}$

TABLA 1.- CONTINUACION.

AUTOR	DESCRIPCION
TEK, GROVE y POETTMANN (6).	$r_b = 4.29 \left[\frac{k t}{\phi \mu c} \right]^{1/2}$
JONES (7).	$r_b = 4 \left[\frac{k t}{\phi \mu c} \right]^{1/2}, t_l = \frac{\phi \mu c r_b^2}{16 k}$
VAN POOLEN (8).	$r_b = 2 \left[\frac{k t}{\phi \mu c} \right]^{1/2}, t = \frac{\phi \mu c r_b^2}{4 k}$
DIETZ (9).	$\Delta t_p = \frac{\phi \mu c A}{CA k}$
EARLOUGHER, RAMEY, MILLER y MUELLER. (10)	<p>Utilizan el principio de superposición para generar el comportamiento de flujo de cualquier forma rectangular para el cual los lados están en una relación entera. Calculan el factor de forma CA en base a las gráficas de MBH.</p>
EARLOUGHER (11).	$CA = 5.456 \frac{m}{m} \frac{m}{m} \text{EXP} \left[-\frac{2.303}{m} (P_{shr} - P_o) \right]$
CINCO LEY y GONZALEZ (12)	<p>Utilizan el método de ajuste de curva tipo para determinar la forma y tamaño del área de drenaje y la localización del pozo dentro de ella.</p>

IV - DETERMINACION DEL AREA DE DRENE A PARTIR DE DATOS DE PRODUCCION.

En la mayoría de los casos condiciones de producción a gasto constante son consideradas en el desarrollo de los métodos convencionales de análisis de pruebas de pozos, condiciones de producción a presión constante no son muy comunes.

De acuerdo a como se llevan a cabo estas pruebas en tales casos, una forma usual es hacer fluir el pozo a gasto constante por varios días antes de realizar la prueba. Este procedimiento no es siempre efectivo, y por lo tanto es recomendable una prueba a presión constante. En este trabajo se desarrolla una metodología para analizar el gasto transitorio de un pozo que produce a presión constante.

IV.1.- COMPORTAMIENTO DE UN POZO QUE PRODUCE A PRESION CONSTANTE EN UN AREA DE DRENE CERRADA.

Las funciones de GREEN, a pesar de ser muy antiguas, se usan muy poco en la ingeniería de yacimientos en la solución de problemas de flujo transitorio debido a la dificultad para encontrar la función de GREEN apropiada. En el análisis del comportamiento de nuestro sistema emplearemos las funciones Fuente y de GREEN instantáneas¹⁵. Para información más detallada ver el Apéndice A.

El concepto de fuente instantánea ha sido aplicado por varios autores en la solución de problemas de flujo de fluidos en medios porosos, e implica una extracción o liberación repentina de fluido de la fuente que provoca un disturbio en la presión del sistema.

Según esta teoría, la caída de presión en el punto M si suponemos yacimiento infinito cuando el fluido es removido en el tiempo τ está dada por la expresión A-9, Apendice A.

En la expresión anterior está contemplada implícitamente la función fuente instantánea $S(m,t)$. Esta función fuente instantánea se calcula aplicando el método de Newman¹⁷ a la función fuente instantánea básica que reproduce la fuente y el yacimiento que se va a estudiar. En nuestro caso, la solución para $S(m,t)$ es la ecuación A-11, Apendice A.

Con la ecuación A-9, Apendice A, obtenemos la función de caída de presión. Ahora, expresando la caída de presión en forma adimensional en función de las variables adimensionales X_D , Y_D , t_{DA} , la expresión obtenida es la ecuación A-16, Apendice A. Definiendo algunas constantes adimensionales, la podemos reagrupar en la forma dada por la expresión A-17, Apendice A.

De la misma manera podemos desarrollar una expresión para los primeros tiempos teniendo en cuenta los principios empleados en el desarrollo de la expresión anterior. La solución obtenida es la ecuación A-21, Apendice A.

Con las expresiones A-17 y A-21, Apendice A, obtenemos el comportamiento de la presión adimensional con el tiempo adimensional, P_D contra t_{DA} , para cualquier sistema rectangular cerrado con un solo pozo. En el Apendice B, Tabla B1, se dan los resultados en forma tabular obtenidos para la caída de presión adimensional para varios sistemas rectangulares.

Al graficar los valores de P_D contra t_{DA} , figura B3, Apendice B, esquemáticamente nos ilustra tres regímenes de flujo transitorio para un sistema de drenaje cerrado. La presión adimensional se muestra como una función de t_{DA} y $\log t_{DA}$. La parte marcada con A es el primer transitorio o régimen de flujo infinito; todos los pozos actúan como si estuvieran solos en un sistema infinito a tiempos de flujos cortos. Este periodo se caracteriza por una línea recta en la gráfica semilog, figura B3.b, Apendice B. La parte de la curva etiquetada con C en la

figura B3, Apendice B, es el régimen de flujo en estado pseudoestacionario que ocurre en todos los sistemas cerrados. Durante el flujo pseudoestacionario, la presión cambia linealmente con el tiempo, como se muestra en la figura B3.a, Apendice B. La parte B de la curva es el periodo de transición entre comportamiento infinito y flujo en estado pseudoestacionario.

Como se mencionó anteriormente, todos los pozos actúan como si estuvieran solos en un sistema infinito a tiempos de flujo cortos. La duración del periodo infinito se estima a partir de la ecuación A-17, Apendice A,

$$P_D(X_D, Y_D, t_{DA}) = \int_0^{t_{DA}} 2 \pi \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\alpha} B_n \text{EXP}(-A_n \tau) \right] \cdot \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\alpha} D_n \text{EXP}(-C_n \tau) \right] d\tau \dots (39)$$

La pendiente de la línea recta de la gráfica semilog, figura B3.b, Apendice B, está definida por

$$m_{\ln f} = \frac{dP_D}{d(\text{Log } t_{DA})} \dots (40)$$

dónde $\text{Log } t_{DA} = \frac{\text{Ln } t_{DA}}{\text{Ln } 10}$

entonces,

$$m_{\text{inf}} = \frac{dP_D}{d \left(\frac{\text{Ln } t_{D\Delta}}{\text{Ln } 10} \right)}$$

$$\frac{m_{\text{inf}}}{\text{Ln } 10} = \frac{dP_D}{d(\text{Ln } t_{D\Delta})}$$

$$\frac{m_{\text{inf}}}{\text{Ln } 10} = t_{D\Delta} \frac{dP_D}{dt_{D\Delta}}$$

$$m_{\text{inf}} = \left(t_{D\Delta} \frac{dP_D}{dt_{D\Delta}} \right) \text{Ln } 10 \quad \dots\dots (41)$$

de la figura B3.b, Apendice B, tenemos que

$$m_{\text{inf}} = \frac{\text{Ln } 10}{2} \quad \dots\dots (42)$$

Iguando las expresiones 41 y 42 determinamos que para el periodo infinito,

$$t_{D\Delta} \frac{dP_D}{dt_{D\Delta}} = \frac{1}{2} \quad \dots\dots (43)$$

Ahora, derivando la expresión 39 con respecto al tiempo adimensional, dP_D/dt_{DA} , aplicando el teorema de LEIBNITZ, hallamos que

$$\frac{dP_D}{dt_{DA}} = 2 \pi \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n \text{EXP}(-A_n t_{DA}) \right] \cdot \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} D_n \text{EXP}(-C_n t_{DA}) \right] \dots (44)$$

multiplicado a ambos lados por t_{DA} ,

$$t_{DA} \frac{dP_D}{dt_{DA}} = 2 \pi t_{DA} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n \text{EXP}(-A_n t_{DA}) \right] \cdot \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} D_n \text{EXP}(-C_n t_{DA}) \right] \dots (45)$$

La duración del periodo infinito, $t_{DA} = (t_{DA})_{\text{etc}}$, se estima cuando al evaluar la expresión 45, el valor obtenido es un 5 % mayor o igual al de la ecuación 43, es decir

$$t_{DA} \frac{dP_D}{dt_{DA}} \geq 0.525 \dots (46)$$

donde t_{DA} es la finalización del periodo infinito dado en la columna "Fin del periodo infinito (t_{DA})". Exacto para $t_{DA} < "$ de la tabla D1, Apéndice D.

La figura B3, Apéndice B, nos indica que en sistemas cerrados el periodo infinito es seguido por un periodo de transición. A su vez, este es seguido por el periodo de flujo en estado pseudoestacionario, un régimen de flujo transitorio donde el cambio de presión con el tiempo, dP/dt , es constante en todos los puntos en el yacimiento. P_D en cualquier punto del sistema varía linealmente con t_{DA} . Durante este periodo de flujo, la presión adimensional está dada como²⁴

$$P_D = 2 \pi t_{DA} + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{2.2458 A}{C_A r_w^2} \right] \quad \dots (47)$$

La pendiente de la línea recta de la gráfica de P_D contra t_{DA} , figura B3.a, Apéndice B, está dada por

$$m_{ps} = \frac{dP_D}{dt_{DA}} \quad \dots (48)$$

Derivando la expresión 47 con respecto a t_{DA} obtenemos para el periodo de flujo en estado pseudoestacionario,

$$\frac{dP_D}{dt_{DA}} = 2 \pi \quad \dots (49)$$

por lo tanto,

$$m_{ps} = 2 \pi$$

El inicio del periodo pseudoestacionario, $t_{DA} = (t_{DA})_{ps}$, se

estima cuando al evaluar la expresión 44 el valor obtenido es un 5 % menor o igual al de la ecuación 49, es decir

$$\frac{dP_D}{dt_{DA}} \leq 1.05 \frac{m}{P_{SS}} \quad \dots (50)$$

donde t_{DA} es el inicio del periodo pseudoestacionario dado en la columna "Inicio del periodo pseudoestacionario (t_{DA})_{PSS}" de la tabla D1, Apendice D.

En la ecuación 37, el factor de forma, C_A , es un factor geométrico característico de la forma del sistema y de la localización del pozo. Este parámetro característico, lo podemos evaluar despejándolo de la expresión 47,

$$C_A = \text{EXP} \left[4 \pi t_{DA} + \text{Ln} \left(\frac{2.2458 A}{r_w^2} \right) - 2 P_D \right] \quad \dots (51)$$

Los valores de C_A para varias áreas de drene cerradas con un solo pozo, estan dados en la tabla D1, Apendice D. En la estimación se usaron los valores de t_{DA} y P_D de la tabla B1, Apendice B, pertenecientes al periodo pseudoestacionario y un valor de $(A^{1/2} / r_w) = 2000.0$.

Utilizando la expresión A-24, Apendice A, desarrollada por VAN EVERDINGEN y HURST²¹,

$$\bar{q}_D(t) = \frac{1}{t^2 \bar{P}_{VD}(t)} \quad \dots (52)$$

determinamos el comportamiento de la declinación transitoria del gasto para un pozo que produce a presión constante en un área de drene cerrada. Para este análisis emplearemos la ecuación A-25 , Apendice A, para la caída de presión adimensional, P_D . Al final obtendremos las expresiones A-27 y A-28, Apendice A. Los resultados se presentan en forma tabular para varios sistemas rectangulares en el Apendice B, tabla B2.

IV.2.- ANALISIS POR CURVA TIPO.

Para la construcción de las curvas tipo se consideran las funciones Fuente y de GREEN instantáneas¹⁵ , las cuales se utilizan para desarrollar las soluciones de presión adimensional para un sistema rectangular cerrado. Luego empleando la ecuación 52 de VAN EVERDINGEN Y HURST²¹ determinamos el comportamiento transitorio del gasto para un pozo que produce a presión constante en un área de drene cerrada.

En la tabla B2, Apendice B, se muestran los valores obtenidos de $q_D(tD_A)$ para las áreas de drene consideradas. Las figuras C1, C2, ..., C14, Apendice C, son las representaciones gráficas de las tablas, y constituyen las curvas tipo a utilizar, en la determinación del área de drene de un pozo. El procedimiento de análisis para tal efecto se detalla a continuación.

Procedimiento de Análisis.

1. Graficar los datos de gasto q contra tiempo de producción t en papel log-log.
2. Ajustar la curva obtenida en el inciso 1 con alguna de las curvas tipo de las figuras C1, C2, ..., C14, Apendice C, sobreponiendola y deslizando la curva u horizontalmente la curva de datos hasta lograr el mejor ajuste.

3. Leer de la curva tipo ajustada, el área de drenaje que le corresponde y la posición del pdzo dentro de ella.
4. Escoger un punto de ajuste y leer :

De la gráfica de datos : $(t)_a$ y $(q)_a$

De la gráfica de curvas tipo:

$$\left[\text{Ln} \left(\frac{2.2458 A}{C_A r_w^2} \right)^{1/2} q_b(t_{DA}) \right]_a = (q_{DD})_a \quad \text{y}$$

$$\left[\frac{4 \pi t_{DA}}{\text{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}} \right]_a = (t_{DD})_a \quad \dots\dots (53)$$

5. Calcular el área de drenaje de la ecuación:

$$A = \frac{(q)_a (t)_a}{\phi h c_t (P_i - P_{wf}) (q_{DD})_a (t_{DD})_a} \quad \dots\dots (54)$$

6. Calcular el factor de forma de las ecuaciones :

$$C_A = \frac{2.2458 A}{r_w^2} \text{EXP} \left[- \frac{4 \pi k h (P_i - P_{wf}) (q_{DD})_a}{\mu (q)_a} \right] \quad \dots\dots (55)$$

$$C_A = \frac{2.2458 A}{r_v^2} \text{ EXP } \left[- \frac{4 \pi k_v(t) a}{\phi \mu c_t A (t_{Dd})_a} \right] \dots (56)$$

De esta forma, si la porosidad y la permeabilidad del yacimiento son conocidas, podemos obtener información acerca del tamaño y la forma del área de drenaje, y la localización del pozo dentro de ella.

Para considerar un pozo dañado se utiliza r_v' en vez de r_v como lo sugieren ECONOMIDES y RAMEY²⁰.

IV.3.- ANALISIS POR DECLINACION EXPONENCIAL.

Para un pozo que produce a gasto constante dentro de un área de drenaje cerrada, el efecto de las fronteras de drenaje causa el comienzo del comportamiento de estado pseudoestacionario. Para un pozo que produce a presión constante, el comportamiento resultante de tener las fronteras de drenaje cerradas es una declinación exponencial en el gasto. Esto se llama agotamiento exponencial. El estado de declinación exponencial se puede derivar de la función de presión de flujo en el pozo adimensional para producción a gasto constante después de iniciado el estado pseudoestacionario usando la ecuación 52. Para el estado pseudoestacionario de un yacimiento cerrado producido a gasto constante, RAMEY y COBB²⁴ o según EARLOUGHER¹⁴ demostraron que

$$P_{WD}(t_{DA}) = 2 \pi t_{DA} + \frac{1}{2} \text{ Ln } \frac{2.2458 A}{C_A r_v^2} \dots (57)$$

Tomando la transformada de Laplace²² a ambos lados de la ecuación

anterior, tenemos

$$\bar{P}_{wb}(\ell) = \frac{2 \pi}{\ell^2} + \left[\frac{1}{2} \operatorname{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_v^2} \right] \frac{1}{\ell} \quad \dots (58)$$

reemplazando la ecuación 58 en la ecuación 52

$$\bar{q}_b(\ell) = \frac{1}{\ell^2 \left[\frac{2 \pi}{\ell^2} + \left[\frac{1}{2} \operatorname{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_v^2} \right] \frac{1}{\ell} \right]}$$

$$\bar{q}_b(\ell) = \frac{1}{2 \pi + \left[\frac{1}{2} \operatorname{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_v^2} \right] \ell}$$

$$\bar{q}_b(\ell) = \frac{1}{\frac{1}{2} \operatorname{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_v^2} \left[\frac{4 \pi}{\operatorname{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_v^2}} + \ell \right]}$$

$$\bar{q}_D(t) = \frac{2}{\text{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}} \left[\frac{4 \pi}{\text{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}} + t \right] \dots (59)$$

si tomamos la antitransformada de Laplace²² a ambos lados de la expresión 59, obtenemos

$$q_D(t_{DA}) = \frac{2}{\text{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}} \text{EXP} \left[- \frac{4 \pi t_{DA}}{\text{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}} \right] \dots (60)$$

para $t_{DA} > (t_{DA})_{PRB}$

donde $(t_{DA})_{PRB}$ es el tiempo requerido para que se desarrolle verdaderamente el estado pseudoestacionario de un pozo producido a gasto constante, y es dependiente de la forma del yacimiento.

De la ecuación 60 :

$$\text{Log } q(t) = \text{Log} \left[\frac{4 \pi k h (P_i - P_{wf})}{\mu \text{Ln} \left(\frac{2.2458 A}{C_A r_w^2} \right)} \right] \dots (61)$$

$$\frac{4 \pi k t}{2.303 \phi \mu c_t A \text{Ln} \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}}$$

Así una gráfica de $\log q(t)$ contra t (figura B4, Apéndice B), tendrá un intercepto, q_{int} , y una pendiente m_q , dada por

$$q_{int} = \frac{4 \pi k h (P_i - P_{wf})}{\mu \ln \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}} \quad \dots (62)$$

$$m_q = \frac{4 \pi k}{2.303 \theta \mu c_l A \ln \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}} \quad \dots (63)$$

Resolviendo para $\ln \frac{2.2458 A}{C_A r_w^2}$ en ambas ecuaciones, la expresión resultante es

$$A = \frac{q_{int}}{2.303 \theta c_l h (P_i - P_{wf}) m_q} \quad \dots (64)$$

Entonces C_A la podemos estimar de la ecuación 62 o 63 :

$$C_A = 2.2458 \frac{A}{r_w^2} \text{EXP} \left[- \frac{4 \pi k h (P_i - P_w)}{q_{int} \mu} \right] \dots (65)$$

$$C_A = 2.2458 \frac{A}{r_w^2} \text{EXP} \left[- \frac{4 \pi k}{2.303 \phi \mu c_l A \pi q} \right] \dots (66)$$

Por lo tanto, si la porosidad y la permeabilidad del yacimiento son conocidas, podemos obtener información acerca del tamaño y la forma del área de drenaje, y la localización del pozo dentro de ella.

En el caso de tener un factor de daño, el radio efectivo del pozo, $r_w' = r_w \text{EXP}(-S)$, se utilizará en vez de r_w en las expresiones anteriores como se mencionó antes.

IV.4.- LIMITACIONES DE LA METODOLOGIA.

Esta técnica, análisis por curva tipo, presenta los siguientes problemas al ser empleada en el estudio de la declinación transitoria del gasto de un pozo que produce a presión constante.

Solo con el análisis de curva tipo, es imposible determinar con exactitud la forma del área de drenaje y la localización del pozo dentro de ella. Por consiguiente, si la porosidad y la permeabilidad del yacimiento son conocidas, podemos obtener información acerca del tamaño y la forma del área de drenaje, y la localización del pozo dentro de ella. De esta manera, podemos caracterizar el yacimiento adecuadamente. La porosidad la podemos estimar a partir de un análisis de curva tipo de gasto (q) contra tiempo (t). La permeabilidad la determinamos a partir de una

gráfica de $1/q$ contra $\text{Log } t$, a partir de la pendiente, m_q , de la línea recta semilogarítmica.

A partir del análisis de curva tipo es muy difícil poder distinguir la curva tipo que ajusta a nuestros datos reales, es decir se presenta el fenómeno de unicidad en la solución. En este caso la solución más probable la podemos obtener si tenemos información adicional sobre el yacimiento. También podemos eliminar este problema de unicidad en la solución representando en una gráfica Log-Log la función dq/dt contra t .

V. EXTENSION DE SOLUCIONES A POZOS HORIZONTALES.

Durante la última década, avances significativos en la tecnología de perforación han hecho posible perforar pozos horizontales.

Los pozos horizontales son normalmente pozos nuevos, tienen de 1000 a 3000 pies de longitud, los cuales son perforados desde la superficie. Los agujeros de drenaje son generalmente perforados desde pozos verticales y tienen una longitud de 100 a 700 pies. Por medio de un solo pozo vertical se pueden perforar uno o más agujeros de drenaje.

Los pozos horizontales y los agujeros de drenaje representan pozos con el espesor de la fractura limitada, donde el espesor de la fractura es igual al diámetro del hueco. Un pozo horizontal concebido correctamente puede ser equivalente a un pozo vertical con una fractura completamente penetrante. Un pozo horizontal representa una fractura vertical extensa y controlada. En la mayoría de los trabajos de fracturamiento es difícil obtener conductividades infinitas y, además, la conductividad de la fractura disminuye con el tiempo. Por el contrario, un pozo horizontal ofrece casi permanentemente una conductividad infinita al paso del flujo de un fluido. Adicionalmente, en yacimientos donde el empuje de agua en el fondo o una capa de gas en el tope, hacen difícil un fracturamiento, un pozo horizontal ofrece una alternativa para obtener altos gastos de producción sin que se conifiquen el gas o el agua. Un pozo horizontal ofrece una opción completamente viable y competirá con un fracturamiento en el futuro.

En general, los pozos horizontales son muy efectivos en yacimientos delgados, en algunos yacimientos naturalmente

fracturados, en yacimientos consolidados, y en yacimientos con problemas de conificación de gas y agua.

A continuación extenderemos la metodología desarrollada en el capítulo IV, para determinar el factor de forma del área de drene.

En nuestro caso, el pozo horizontal puede visualizarse como se describe en las figuras B5 y B6 del apéndice B.

Aplicando la misma metodología utilizada para analizar el comportamiento de la presión de un pozo vertical, capítulo IV, la expresión que rige el comportamiento de la presión adimensional en función del tiempo adimensional, $P_D(t_{DA})$, para un pozo horizontal es

$$P_D(t_{DA}) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[E_i(a/t_{DA}) + E_i(b/t_{DA}) + E_i(c/t_{DA}) + E_i(d/t_{DA}) \right] \dots (67)$$

donde,

$$a = \frac{(n - rv/2be)^2 be^2 + (m he)^2}{be he}$$

$$b = \frac{(n - rv/2be)^2 be^2 + (m - hwd)^2 he^2}{be he}$$

$$c = \frac{(n - bwd - rv/2be)^2 be^2 + (m he)^2}{be he}$$

$$d = \frac{(n - bwd - rv/2be)^2 be^2 + (m - hwd)^2 he^2}{be he}$$

con la cual se obtienen muy buenos resultados para los primeros tiempos. Para tiempos largos la expresión es

$$F_{D(bD, hD, tDA)} = \int_0^{LDA} 2 \pi \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n \text{EXP}(-A_n \tau) \right] \cdot \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} D_n \text{EXP}(-C_n \tau) \right] d\tau$$

..... (68)

donde,

$$A_n = n^2 \pi^2 he/be$$

$$B_n = \cos(n \pi bwd) \cdot \cos(n \pi (bwd + rv/be))$$

$$C_n = n^2 \pi^2 be/he$$

$$D_n = \cos^2(n \pi hwd)$$

$$bD = bwb + rv/be$$

$$hd = hwb$$

Los resultados del Apendice B, tabla B3, se calcularon utilizando la expresión 67 para los primeros tiempos ($t_{DA} \leq 0.00010$) y para tiempos mayores se empleó la ecuación 68, logrando así una convergencia más rápida y resultados muy exactos. En el cálculo se tuvo en cuenta un valor de $A^{1/2} / rv = 2000.0$.

El factor de forma, CA , lo evaluamos a partir de la ecuación S1. Los valores de CA , están dados en la tabla D2, Apendice D. En la estimación se usaron valores de Fb y t_{DA} de la tabla B3, Apendice B, pertenecientes al periodo pseudoestacionario y un valor de $A^{1/2} / rv = 2000.0$.

En la figura D1, Apendice D, tenemos una gráfica de CA contra be/he , con base en los valores tabulados de la tabla D2; de esta figura podemos determinar, interpolando, el factor de forma CA para cualquier relación be/he en pozos horizontales localizados en el centro del área de dreno.

Con este capítulo pretendemos crear la inquietud para que en futuras investigaciones, sobre el análisis del comportamiento del flujo de un pozo horizontal, se emplee esta técnica que da resultados aceptables y es muy fácil de aplicar.

VI.- EJEMPLOS DE APLICACION.

En esta sección emplearemos dos ejemplos para ilustrar el método de análisis de datos de una curva de declinación usando las técnicas de curva tipo y declinación exponencial.

Las historias de producción de los pozos fueron tomadas del artículo "The Effect of Reservoir and Fluids Properties on Production Decline Curves", publicado por GENTRY y McCRAY²⁷. Algunos datos fueron supuestos ya que no se publicaron en el artículo.

EJEMPLO 1.

La información general se muestra a continuación y corresponde a un pozo que produce de la arenisca Bartlesville y está localizado en Oklahoma County, Ok²⁷.

Información General :

$$\phi = 18 \%$$

$$h = 20 \text{ pies} = 609.60 \text{ cm}$$

$$c_t = 7.0 \times 10^{-5} \text{ Psi}^{-1}$$

$$\Delta P = (P_i - P_{vr}) = 2676 \text{ Psi} = 182.09 \text{ atm}$$

$$r_w = 0.33 \text{ pies}$$

$$k = 1.0 \text{ md} = 0.001 \text{ darcy}$$

$$\mu = 0.67 \text{ cp}$$

Los datos de la historia de producción se muestran en la Tabla 2. La Figura 1 es una gráfica Log-Log del gasto del pozo q contra tiempo de producción t y la Figura 2 es una gráfica semilogarítmica de gasto del pozo q contra tiempo de producción t .

A. Análisis por Curva Tipo.

1. Al sobreponer la Figura 2 con las curvas tipo del Apéndice C y logrando el mejor ajuste en la Figura C1, seleccionamos un punto de ajuste (a) y leemos :

$$(t)_a = 15.75 \text{ años} = 189 \text{ meses}$$

$$(q)_a = 244.0 \text{ bb/mes} = 1370.06 \text{ pies}^3/\text{mes} = 14.9648 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$(q_{Dd})_a = 0.10$$

$$(t_{Dd})_a = 2.314$$

2. Calculamos el área de drene, A :

$$A = \frac{(q)_a (t)_a}{\phi h c_t (F_v - F_{vf}) (q_{Dd})_a (t_{Dd})_a}$$

$$A = \frac{1370.06 * 189}{0.18 * 20 * 7.0 * 10^{-5} * 2676.0 * 0.10 * 2.314}$$

$$A = 1659401.15 \text{ pies}^2$$

$$A = 38.10 \text{ acres}$$

4. Calculamos el factor de forma, C_A :

$$C_A = \frac{2.2458 A}{r_w^2} \text{ EXP } \left[- \frac{4 \pi k h (P_i - P_{wf}) (q_{Dd})_a}{\mu (q)_a} \right]$$

$$C_A = \frac{2.2458 * 1659401.15}{(0.33)^2} \text{ EXP } \left[- \frac{4 \pi * 0.001 * 609.6 * 182.09 * 0.1}{0.67 * 14.9648} \right]$$

$$C_A = 31.07$$

Con estos valores vamos al Apéndice D, y encontramos que a éste factor le corresponde un área de drenaje cuadrada con un pozo en el centro.

B. Análisis por Declinación Exponencial.

1. De la Figura 2, $\text{Log } q(t)$ contra t , leemos el intercepto $q_{\text{int}(t=0)}$ y la pendiente m_q de la sección recta :

$$q_{\text{int}} = 2438.8 \text{ bb/mes} = 164325.5615 \text{ pies}^3/\text{año} = 149.574 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$m_q = -0.0625 \text{ ciclos/año}$$

2. Calculamos el área de drenaje, A :

$$A = \frac{q_{\text{int}}}{2.303 \theta c_l h (P_i - P_{wf}) m_q}$$

$$A = \frac{164325.5615}{2.303 * 0.18 * 7.0 * 10^{-5} * 20 * 2676 * 0.0625}$$

$$A = 1692951.513 \text{ pies}^2$$

$$A = 38.87 \text{ acres}$$

3. Calculmos el factor de forma, CA :

$$CA = 2.2458 \frac{A}{r_w^2} \text{ EXP} \left[- \frac{4 \pi k h (P_i - P_{wf})}{q_{int} \mu} \right]$$

$$CA = 2.2458 * \frac{1692951.513}{(0.33)^2} \text{ EXP} \left[- \frac{4 \pi * 0.001 * 609.6 * 182.09}{0.67 * 149.574} \right]$$

$$CA = 31.48$$

Como podemos observar obtenemos los mismos resultados hallados por el método de curva tipo.

EJEMPLO 2.

La información general es muestra a continuación y corresponde a un pozo completado en la formación Mississippi.

Información General :

$$\theta = 0.20$$

$$\begin{aligned}
 h &= 20 \text{ pies} = 609.60 \text{ cm} \\
 c_t &= 5.5 \times 10^{-5} \text{ Psi}^{-1} \\
 \Delta P &= (P_i - P_{vr}) = 2800 \text{ Psi} = 190.528 \text{ atm} \\
 r_w &= 0.33 \text{ pies} \\
 k &= 1.0 \text{ md} = 0.001 \text{ darcy} \\
 \mu &= 1.5 \text{ cp}
 \end{aligned}$$

Los datos de la historia de producción se muestran en la Tabla 3. La Figura 3 es una gráfica Log-Log del gasto del pozo q contra tiempo de producción t y la Figura 4 es una gráfica semilogarítmica del gasto del pozo q contra el tiempo de producción t .

A. Análisis por Curva Tipo.

- 1.- Realizando el mismo procedimiento empleado en el análisis del del Ejemplo 1, con la Figura 3, seleccionamos la Figura C5 y del punto de ajuste (a) escogido leemos :

$$(t)_a = 15.1082 \text{ años} = 181.2984 \text{ meses}$$

$$(q)_a = 140.5231 \text{ bb/mes} = 789.03345 \text{ pies}^3/\text{mes} = 8.61843 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$(q_{Dd})_a = 0.1405$$

$$(t_{Dd})_a = 1.917$$

- 2.- De donde el área de drene calculada A es

$$A = \frac{789.03345 * 181.2984}{0.20 * 20 * 5.5 * 10^{-5} * 2800 * 0.1405 * 1.917}$$

$$A = 862204.40 \text{ pies}^2$$

$$A = 19.79 \text{ acres}$$

y el factor de forma, C_A :

$$C_A = \frac{2.2458 * 862204.4}{(0.33)^2} \text{ EXP} \left[\frac{4 \pi * 0.001 * 609.6 * 190.528 * 0.1405}{1.5 * 8.61843} \right]$$

$$C_A = 2.30$$

Con estos valores vamos al Apéndice D, y encontramos que a éste factor le corresponde un área de drenaje con forma de un rectángulo de 1 * 5 con un pozo localizado en el centro.

B. Analisis por Declinación Exponencial.

1.- De la Figura 4, leemos el intercepto y la pendiente de la sección recta :

$$q_{int} = 1000 \text{ bb/mes} = 67379.67914 \text{ pies}^3/\text{año} = 61.33102 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$m_q = -0.05703 \text{ ciclos/año}$$

2.- De donde el área de drenaje A es

$$A = \frac{67379.67914}{2.303 * 0.20 * 5.5 * 10^{-5} * 20 * 2800 * 0.05703}$$

$$A = 832819.56 \text{ pies}^2$$

$$A = 19.12 \text{ acres}$$

y el factor de forma, C_A

$$C_A = \frac{2.2458 * 832819.56}{(0.33)^2} \text{ EXP} \left[- \frac{4 \pi * 0.001 * 609.6 * 190.528}{1.5 * 61.33102} \right]$$

$$C_A = 2.21$$

Como era de esperarse, los resultados son satisfactorios con respecto a los calculados por el método de curva tipo.

TAELA 2.- DATOS DE LA HISTORIA DE PRODUCCION DEL EJEMPLO 1.

años	ó(b)/mes
1	1528,60
2	2131,40
3	1706,10
4	1544,60
5	1116,30
6	1037,70
7	515,70
8	779,10
9	637,10
10	582,60
11	428,00
12	377,50
13	321,40
14	284,80
15	269,90
16	273,60
17	260,70
18	225,50
19	214,90
20	189,40
21	143,80
22	116,50
23	73,80
24	55,70
25	54,00
26	63,10

TAELA 3.- DATOS DE LA HISTORIA DE PRODUCCION DEL EJEMPLO 2.

t (años)	ó(b)/mes
0,00	4642,00
0,42	1776,30
0,85	1245,20
1,67	898,20
2,50	715,70
5,00	518,00
7,50	371,80
10,00	288,30
12,50	193,10
15,00	135,00

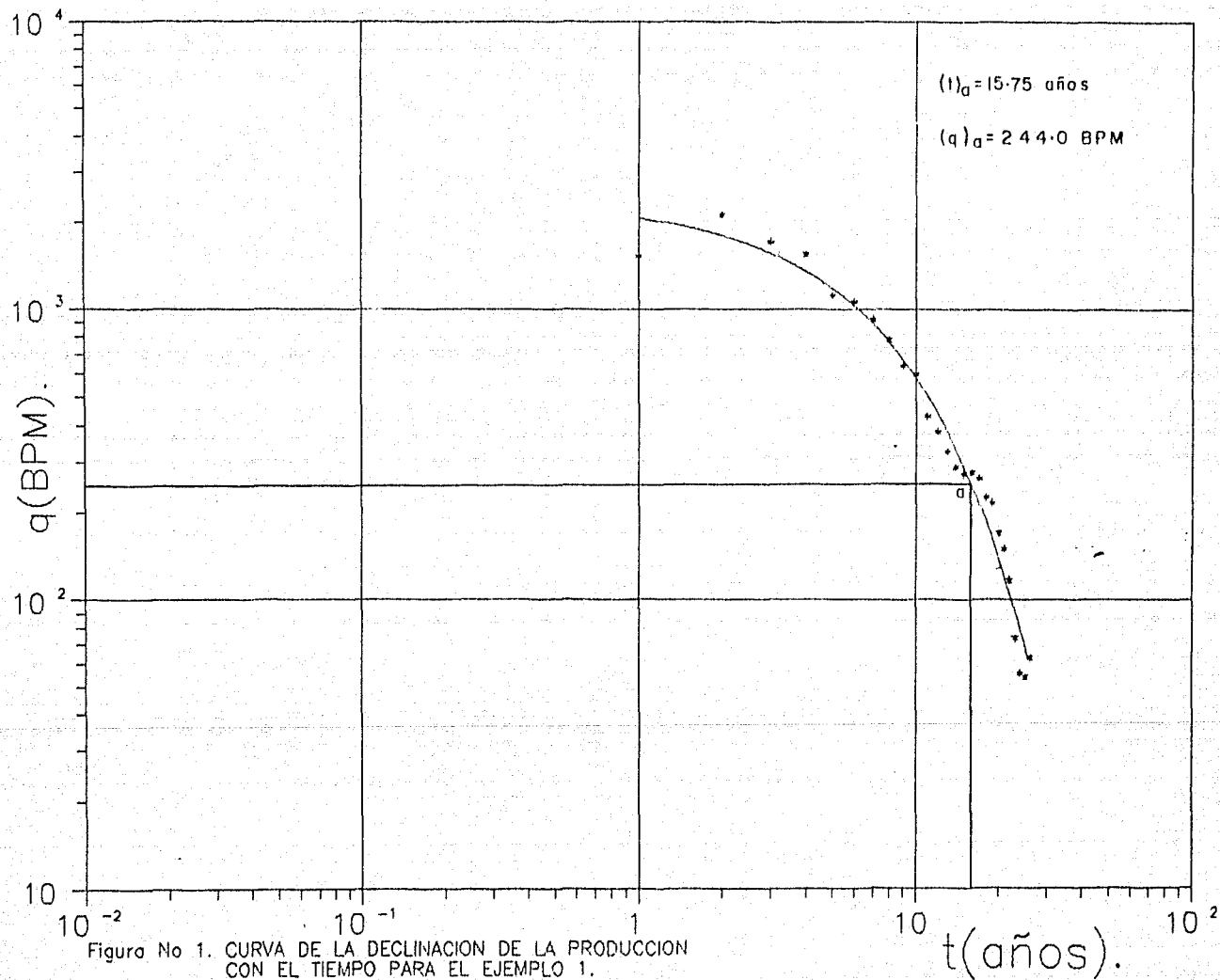


Figura No 1. CURVA DE LA DECLINACION DE LA PRODUCCION CON EL TIEMPO PARA EL EJEMPLO 1.

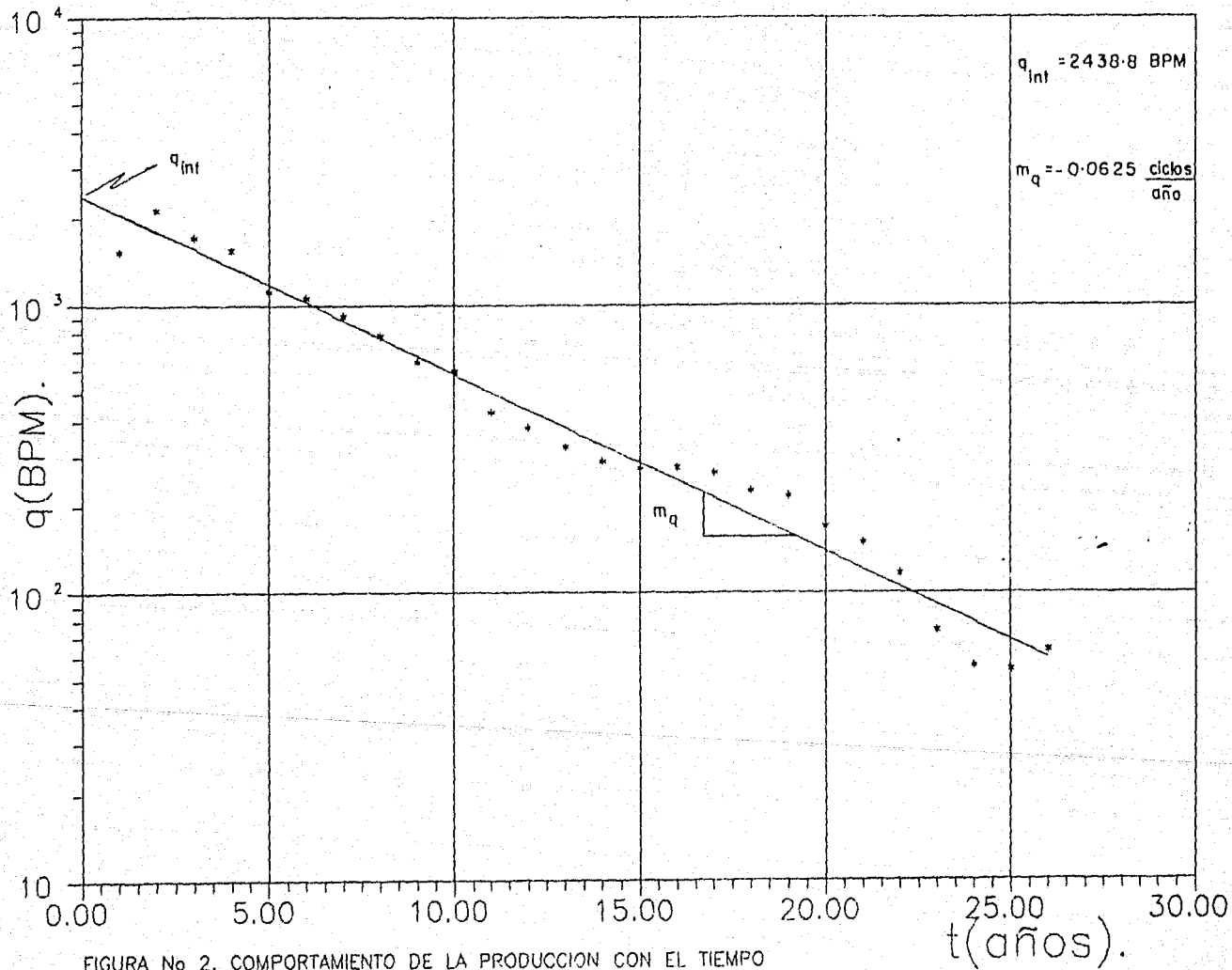


FIGURA No 2. COMPORTAMIENTO DE LA PRODUCCION CON EL TIEMPO PARA EL EJEMPLO 1.

$$(t)_a = 15.11 \text{ años}$$

$$(q)_a = 140.52 \frac{\text{bb}}{\text{mes}}$$

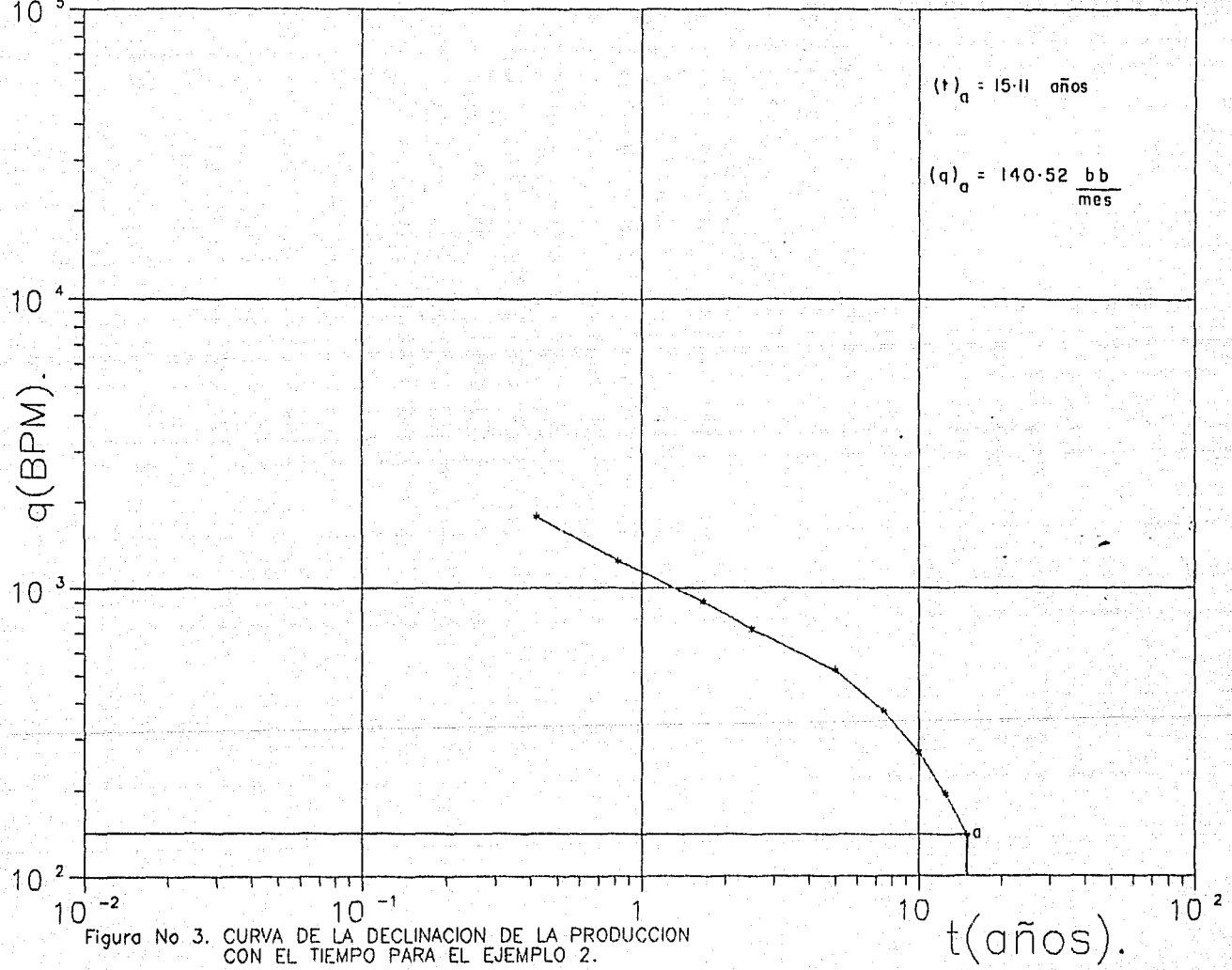


Figura No 3. CURVA DE LA DECLINACION DE LA PRODUCCION CON EL TIEMPO PARA EL EJEMPLO 2.

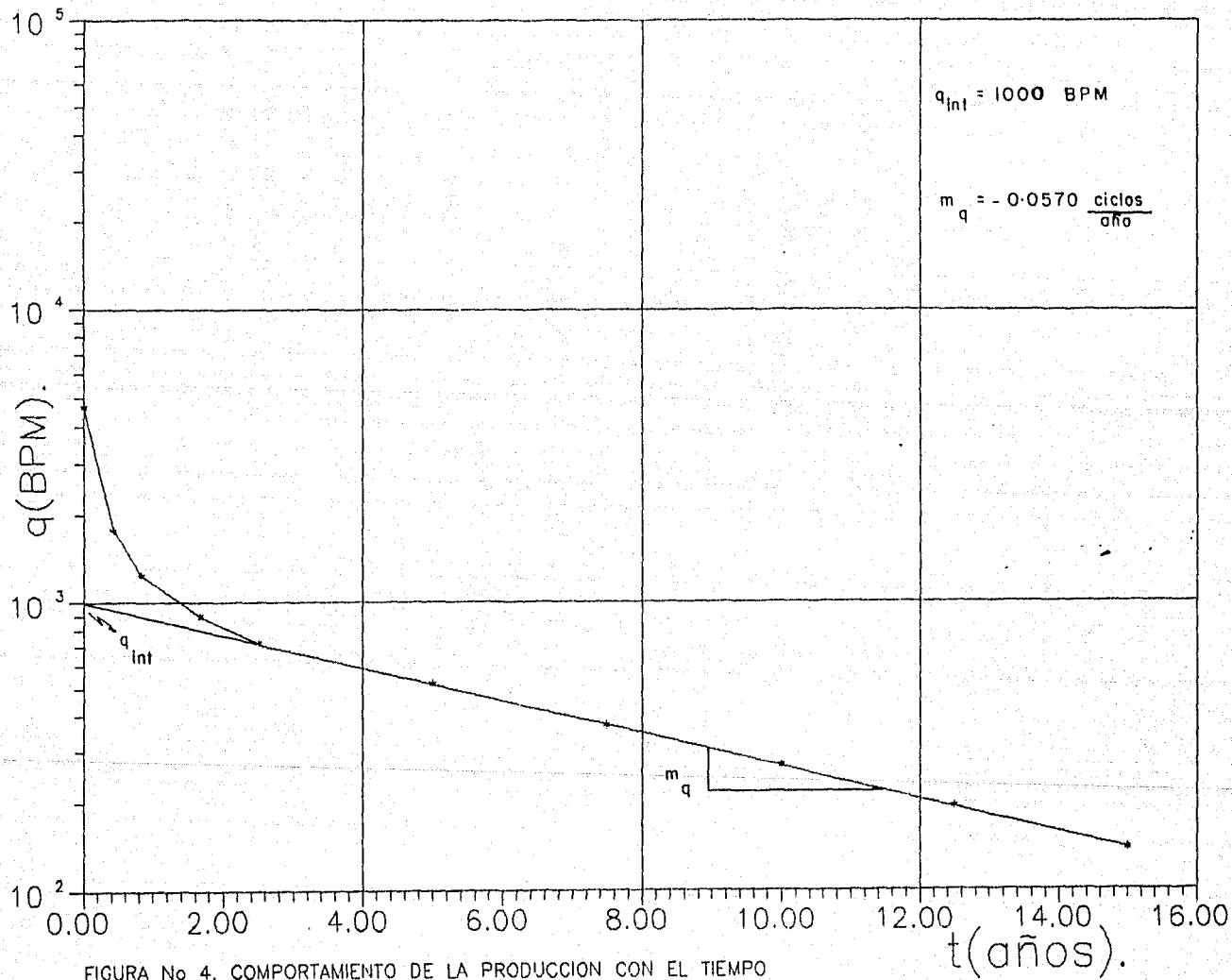


FIGURA No 4. COMPORTAMIENTO DE LA PRODUCCION CON EL TIEMPO PARA EL EJEMPLO 2.

VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El principal objetivo de este trabajo fué la determinación del área de drene de un pozo y su aplicación en el análisis de la declinación del gasto de pozos que producen a presión constante en sistemas de drene cerrados. Con base en el material analizado en este trabajo, se presentan las siguientes conclusiones :

- 1.- Se hizo una revisión de todos los métodos y técnicas de análisis más relevantes desarrollados para la determinación del área de drene de un pozo.
- 2.- Nuevos factores de forma, C_A , son hallados para varios sistemas rectangulares cerrados. También se determinó el final del comportamiento infinito y el inicio del periodo pseudoestacionario para cada forma de drene.
- 3.- Se obtienen las curvas de declinación del gasto para varios sistemas rectangulares cerrados.
- 4.- Se presenta una extensión de la solución para analizar el comportamiento de pozos horizontales que producen a presión constante.
- 5.- Se propone un nuevo método de ajuste a curvas tipo, que permite determinar la geometría del área de drene. De esta área, es posible conocer su forma y tamaño, así como, la localización del pozo productor dentro del área.

6.- Al dar comienzo el periodo pseudoestacionario, todas las soluciones para diferentes sistemas rectangulares de drenaje desarrollan declinación exponencial y convergen a una sola curva.

7.- La curva la podemos extrapolar hacia el futuro, y el pronóstico de la producción lo determinamos a partir de la parte extrapolada de la curva. Es decir, los gastos futuros simplemente son leídos de la escala de tiempo real en el cual los datos del gasto están graficados.

APENDICE A

A. APLICACION DE LAS FUNCIONES FUENTE Y DE GREEN PARA GENERAR PRESIONES ADIMENSIONALES.

GRINGARTEN y RAMEY¹⁵, consideran el flujo transitorio de un fluido ligeramente compresible, en un medio poroso homogéneo y anisotrópico; suponen la permeabilidad, porosidad y viscosidad del fluido constantes, los gradientes de presión pequeños y el efecto de gravedad despreciable. La ecuación de difusividad¹⁵ obtenida es

$$\eta_x \frac{\partial^2 P(M,t)}{\partial x^2} + \eta_y \frac{\partial^2 P(M,t)}{\partial y^2} + \eta_z \frac{\partial^2 P(M,t)}{\partial z^2} - \frac{\partial P(M,t)}{\partial t} = 0$$

.....(A-1)

si $\eta_x = \eta_y = \eta_r$ (sistema cilindrico), entonces la ecuación (A-1) se puede escribir

$$\eta_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial P(M,t)}{\partial r} \right] + \eta_z \frac{\partial^2 P(M,t)}{\partial z^2} - \frac{\partial P(M,t)}{\partial t} = 0$$

.....(A-2)

la difusividad esta dada por

$$\eta_j = \frac{k_j}{\theta \mu c}, \quad j = X, Y, Z \text{ o } r \quad \dots (A-3)$$

Para resolver la ecuación de difusividad, se han empleado muchas metodologías¹⁵; los autores¹⁵ presentan la solución del punto fuente como parte de una teoría más general de las funciones de Green, que aplicada en combinación con otras técnicas producen soluciones inmediatas a problemas de flujo difíciles, cuya solución por otros métodos sería muy complicado.

La solución del punto fuente de Lord Kelvin es muy utilizada en los problemas de conducción de calor¹⁵. Nisle¹⁶ propuso una expresión análoga para problemas en yacimientos

$$\Delta P_{(M,t)} = \frac{q}{8 \theta c (\pi \eta t)^{3/2}} \text{EXP} \left[\frac{\overline{PM}^2}{4 \eta t} \right] \quad \dots (A-4)$$

La expresión anterior representa la caída de presión creada en un punto M en un yacimiento de extensión infinita por un punto fuente instantáneo P, de gasto q, a una distancia \overline{PM} del punto M. La distancia puede ser expresada en términos de las coordenadas cartesianas, cilíndricas o esféricas. Para más detalle ver referencia 15.

Al aplicar en problemas de flujo transitorio la teoría de las funciones de GREEN, es conveniente introducir las funciones fuente, que se obtienen al integrar la función de GREEN sobre el

volumen de la fuente.

El problema definido por las expresiones A-1 y A-2 se simplifica multiplicando cada coordenada j por $(k/k_j)^{1/2}$, donde k se puede seleccionar arbitrariamente, obteniendo la expresión

$$\eta \nabla^2 P_{(M,t)} - \frac{\partial P_{(M,t)}}{\partial t} = 0 \quad \dots (A-5)$$

que es la ecuación de difusividad para dominio isotrópico. De esta manera, problemas con dominio anisotrópico se pueden reducir al correspondiente problema en dominio isotrópico¹⁵.

La función instantánea para el dominio D con respecto a la ecuación de difusividad (ecuación A-5) se define como la presión creada en el punto $M'(x',y',z')$ al tiempo t por una fuente ficticia instantánea de gasto unitario generado en el punto $M(x,y,z)$ al tiempo τ , con $\tau < t$, y con condiciones inicial y de frontera de cero.

La función de GREEN instantánea se representa por $G(M,M',t-\tau)$, es una función de dos puntos y tiene las siguientes propiedades

1. Es una solución de la ecuación de difusividad adjunta .
2. Es simétrica en los puntos M y M' .
3. Es una función Delta
4. Toma valores especiales dependiendo de la clase de condición de frontera especificada.

Si la función de GREEN se puede conocer, entonces la presión en M a un tiempo t , $P_{(M,t)}$, con una distribución de presión inicial en el yacimiento $P_{(M)}$, y cualquier condición de frontera especificada (gasto o presión) en un dominio de la fuente D_v y un punto ficticio M_v en la fuente, se expresa como ¹⁵

$$\Delta P_{(M,t)} = \frac{1}{\theta c} \int_0^t \int_{D_v} q(Mv,\tau) G(M',Mv,t-\tau) dMv d\tau$$

$$- \eta \int_0^t \left[\int_{S_e} \left[G(M,M',t-\tau) \cdot \frac{\partial P(M',\tau)}{\partial n(M')} \right. \right.$$

$$\left. \left. - P(M',\tau) \frac{\partial G_{M,M',t-\tau}}{\partial n(M')} \right] dS_e(M') \right] d\tau$$

$M' \in S_e$

..... (A-6)

donde

$$\Delta P_{(M,t)} = \int_D F(M') G_{M,M',t} dM' - P_{(M,t)} \quad \text{..... (A-7)}$$

es la caída de presión en el yacimiento. Si la presión inicial P_i es uniforme y constante, entonces

$$\Delta P_{(M,t)} = P_i - P_{(M,t)} \quad \text{..... (A-8)}$$

De esta manera se obtiene la caída de presión, sumando dos términos de diferente naturaleza: el primer término describe la producción de la fuente a un gasto dado y el segundo término toma en cuenta las condiciones de frontera.

La caída de presión en M si suponemos yacimiento infinito es

$$\Delta F(m,t) = \frac{1}{\rho c} \int_0^t q(\tau) S_{M,t-\tau} d\tau \quad \dots (A-9)$$

donde

$$S_{M,t} = \int_{DV} G_{M,M(t)} dM \quad \dots (A-10)$$

es la función fuente de flujo uniforme instantánea para el sistema yacimiento - fuente.

Newman¹⁷ demostró que para ciertos tipos de condiciones iniciales y de frontera, la solución del problema de conducción de calor en tres dimensiones es igual al producto de las soluciones de tres problemas unidimensionales.

En particular, el producto de Newman es aplicable a las funciones fuente y de Green instantáneas. En efecto, es necesario determinar las funciones de Green instantáneas solamente para yacimientos lineales unidimensionales, ya sean infinitos o finitos; todas las otras se obtienen utilizando el producto de Newman o por integración. De la misma manera se tratan las funciones fuentes de flujo uniforme instantáneas.

En la tabla 1¹⁵, encontramos las funciones fuentes instantáneas básicas en yacimientos infinitos. Las otras fuentes se construyen a partir de estas fuentes básicas.

La tabla 2¹⁵, contiene las funciones fuentes instantáneas básicas en un yacimiento laminar infinito. Formas aproximadas para fuentes lineales instantáneas, para los primeros y últimos

tiempos, están dadas en la tabla 3¹⁵; y para fuentes radiales en la tabla 4¹⁵. La tabla 5¹⁵ ilustra alguna de las numerosas posibles aplicaciones de la función fuente y la solución por el método del producto para un número de problemas que son de interés en ingeniería petrolera.

Por ejemplo, la solución para el agotamiento transitorio de una región de drenaje rectangular cerrada (no flujo), obtenida por GRINGARTEN y RAMEY¹⁵ es idéntica a la solución dada por HOVANESSIAN¹⁵ que utiliza la transformada de Fourier.

DISTRIBUCION DE LA PRESION ADIMENSIONAL DE UN POZO EN UN YACIMIENTO RECTANGULAR CERRADO.

Para nuestro conocimiento, este desarrollo de los puntos fuente instantáneos no es común y no tienen mucho uso en la literatura. La simplicidad y poder de este método se ilustra en esta sección. Esta solución ha sido obtenida en la literatura por medio del método de superposición^{5,10} o por HOVANESSIAN¹⁵ que emplea la transformada de Fourier.

Al aplicar este método, se deben considerar la fuente y el yacimiento independientemente y encontrar cuales fuentes y cuales yacimientos pueden, por intersección, reproducir la fuente y el yacimiento que se va a estudiar. En nuestro caso, figura B1, Apendice B, el pozo puede visualizarse como la intersección de dos planos fuentes, y el yacimiento como la intersección de dos yacimientos laminares con fronteras cerradas. La función fuente instantánea para el pozo en el rectángulo se obtiene como el producto de dos funciones, VII, tabla 2¹⁵ :

$$S_{x,y,u} = S_{x,u} \cdot S_{y,u}$$

$$S_{x,y,t} = \frac{1}{X_e} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos n \pi \frac{xv}{x_e} \cdot \cos n \pi \frac{x}{x_e} \cdot \text{EXP} \left[- \frac{n^2 \pi^2 \eta_x t}{X_e^2} \right] \right]$$

$$\cdot \frac{1}{Y_e} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos n \pi \frac{yv}{y_e} \cdot \cos n \pi \frac{y}{y_e} \cdot \text{EXP} \left[- \frac{n^2 \pi^2 \eta_y t}{Y_e^2} \right] \right]$$

.....(A-11)

Con la ecuación A-9 obtenemos la función de caída de presión. El gasto de flujo por unidad de longitud de la fuente, q, se supone constante. En el caso de tener un gasto de flujo variable lo podemos manejar por medio del teorema de superposición. Entonces el gasto total extraído del pozo es

$$q_w = h q \quad \text{.....(A-12)}$$

Ahora, si definimos las siguientes variables adimensionales¹⁵:

$$X_D = \frac{x}{X_e} \quad y \quad Y_D = \frac{y}{Y_e} \quad \text{.....(A-13)}$$

$$t_{DA} = \frac{k t}{\phi \mu c (X_e Y_e)} \quad \text{.....(A-14)}$$

$$F_D(X_D, Y_D, t_{DA}) = \frac{2 \pi k h}{q_w \mu} \Delta P(x, y, t) \quad \dots (A-15)$$

La expresión obtenida para la caída de presión es

$$F_D(X_D, Y_D, t_{DA}) = \int_0^{t_{DA}} \left[2\pi \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n \pi X_{WD}) \cdot \cos(n \pi X_D) \cdot \text{EXP} \left[-n^2 \pi^2 \frac{Y_e \tau}{X_e} \right] \right] \right. \\ \left. \cdot \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n \pi Y_{WD}) \cdot \cos(n \pi Y_D) \cdot \text{EXP} \left[-n^2 \pi^2 \frac{X_e \tau}{Y_e} \right] \right] \right] d\tau \quad \dots (A-16)$$

De la figura B2,

$$X_D = X_{WD} + \frac{r_w}{X_e} \quad \text{y} \quad Y_D = Y_{WD}$$

y si definimos

$$A_n = n^2 \pi^2 \frac{Y_e}{X_e}$$

$$B_n = \cos(n \pi X_{WD}) \cdot \cos(n \pi (X_{WD} + r_w / X_e))$$

$$C_n = n^2 \pi^2 \frac{X_w}{Y_w}$$

$$D_n = \cos^2 (n \pi Y_w D)$$

entonces,

$$F_D(X_D, Y_D, t_{DA}) = \int_0^{t_{DA}} 2\pi \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \text{EXP}(-A_n \cdot \tau) \right] \cdot \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot \text{EXP}(-C_n \cdot \tau) \right] d\tau$$

.....(A-17)

Integrando numéricamente la ecuación A-17 se obtienen muy buenos valores para la caída de presión adimensional en el pozo. En el Apéndice B, tabla B1, se dan los resultados en forma tabular obtenidos al utilizar la ecuación A-17 para calcular la caída de presión adimensional para varios sistemas rectangulares.

Así mismo, para los primeros tiempos podemos obtener una expresión teniendo en cuenta los principios empleados en el desarrollo de la expresión anterior. Cuando el yacimiento no es de extensión infinita, pero tiene sus fronteras rectas (lineales) que son mantenidas a presión constante o cerradas al flujo, el yacimiento finito puede reemplazarse por un infinito en todas las direcciones tomando planos imágenes en las fronteras; es decir, aplicando el principio de superposición. La función fuente instantánea para el pozo en el rectángulo se obtiene como el producto de dos funciones, I, tabla 1¹⁵ :

$$S(X, Y, t) = \frac{1}{2(\pi \eta_x t)^{1/2}} \left[\sum_{-\infty}^{\infty} \left(\text{EXP} \left[-\frac{(2nX_e + X_v - Y)^2}{4 \eta_x t} \right] + \text{EXP} \left[-\frac{(2nX_e - X_v - Y)^2}{4 \eta_x t} \right] \right) \right]$$

$$\frac{1}{2(\pi \eta_y t)^{1/2}} \left[\sum_{-\infty}^{\infty} \left(\text{EXP} \left[-\frac{(2nY_e + Y_v - Y)^2}{4 \eta_y t} \right] + \text{EXP} \left[-\frac{(2nY_e - Y_v - Y)^2}{4 \eta_y t} \right] \right) \right]$$

..... (A-18)

En base a las consideraciones del caso anterior, la expresión obtenida para la caída de presión es

$$F_D(X_D, Y_D, t_{DA}) = \int_0^{t_{DA}} \frac{1}{2\tau} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\text{EXP} \left[-\frac{(n - rv/2X_e)^2 X_e^2 + (mY_e)^2}{X_e Y_e} \right] \frac{1}{\tau} + \text{EXP} \left[-\frac{(n - rv/2X_e)^2 X_e^2 + (m - Y_{vD})^2 Y_e^2}{X_e Y_e} \right] \frac{1}{\tau} + \text{EXP} \left[-\frac{(n - X_{vD} - rv/2X_e)^2 X_e^2 + (mY_e)^2}{X_e Y_e} \right] \frac{1}{\tau} + \text{EXP} \left[-\frac{(n - X_{vD} - rv/2X_e)^2 X_e^2 + (m - Y_{vD})^2 Y_e^2}{X_e Y_e} \right] \frac{1}{\tau} \right] d\tau$$

..... (A-19)

Ahora, si definimos

$$a = \frac{(n - rv/2X_e)^2 X_e^2 + (m - Y_e)^2}{X_e Y_e}$$

$$b = \frac{(n - rv/2X_e)^2 X_e^2 + (m - Y_{vD})^2 Y_e^2}{X_e Y_e}$$

$$c = \frac{(n - X_{vD} - rv/2X_e)^2 X_e^2 + (m - Y_e)^2}{X_e Y_e}$$

$$d = \frac{(n - X_{vD} - rv/2X_e)^2 X_e^2 + (m - Y_{vD})^2 Y_e^2}{X_e Y_e}$$

entonces,

$$P_{D(X_D, Y_D, t_{DA})} = \frac{1}{2} \int_0^{t_{DA}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[e^{-a/\tau} + e^{-b/\tau} + e^{-c/\tau} + e^{-d/\tau} \right] \frac{d\tau}{\tau}$$

..... (A-20)

Reacomodando y expresando P_D en términos de la función integral exponencial, tenemos que

$$F_{D(x_D, y_D, t_{DA})} = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[E_1(a/t_{DA}) + E_1(b/t_{DA}) + E_1(c/t_{DA}) + E_1(d/t_{DA}) \right]$$

.....(A-21)

Calculando las funciones integrales exponenciales de la ecuación A-21 se obtienen muy buenos valores, para los primeros tiempos, de la caída de presión adimensional en el pozo.

Los resultados del Apéndice B, tabla B1, se calcularon utilizando la expresión A-21 para los primeros tiempos ($t_{DA} \leq 0.00010$) y para tiempos mayores se empleó la expresión A-17, logrando así una convergencia más rápida y resultados muy exactos. En este caso, el cálculo de la caída de presión en el pozo se llevó a cabo para $A^{1/2}/r_w = 2000.0$. Estos resultados pueden convertirse a otros valores de $A^{1/2}/r_w$, substrayendo de los valores tabulados en la tabla B1, Apéndice B, el valor de $-1/2 \left[\ln \left(r_w^2 / (4 A t_{DA}) \right) + 0.5772 \right]$, y substituidos por el valor apropiado de $A^{1/2}/r_w$.

B. DECLINACION TRANSITORIA DEL GASTO DE UN POZO QUE PRODUCE A PRESION CONSTANTE EN UN AREA DE DRENE CERRADA.

En general, los métodos convencionales de análisis de pruebas de decremento o incremento de presión para producción a gasto constante no son los más apropiados para analizar la producción de un pozo a presión constante. Sin embargo, un pozo que produce a presión constante exhibe una declinación transitoria del gasto la cual se puede analizar empleando técnicas análogas a los métodos existentes para flujo a gasto constante. Hay disponibles en la

literatura muchas soluciones analíticas básicas desarrolladas para analizar la declinación transitoria del gasto. Para mayor información ver referencia 20. En esta sección, una solución analítica es desarrollada para analizar la declinación transitoria del gasto de un pozo que produce a presión constante en un área de drenaje cerrada.

VAN EVERDINGEN y HURST²¹ desarrollan una solución para la producción acumulada adimensional, \bar{Q}_D , bajo condiciones de producción a presión constante que está relacionada a la presión del pozo adimensional, \bar{P}_{WD} , bajo condiciones de producción a gasto constante. La ecuación derivada es

$$\bar{P}_{WD}(\ell) \cdot \bar{Q}_D(\ell) = \frac{1}{\ell^2} \quad \dots (A-22)$$

donde \bar{Q}_D está definida como

$$\bar{Q}_D(t_D) = \int_0^{t_D} q_D dt_D = \frac{Q(t)}{2 \pi \phi c_l h r_b^2 (P_i - P_{wf})} \quad \dots (A-23)$$

Este resultado se obtiene a partir del principio de superposición.

Combinando las expresiones A-22 y A-23, encontramos una relación entre \bar{P}_{WD} y \bar{q}_D ,

$$\bar{q}_D(t) = \frac{1}{t^2 \bar{F}_{FD}(t)} \quad \dots (A-24)$$

Con base en la expresión A-24, de VAN EVERDINGEN y HURST²¹, determinaremos el comportamiento de la declinación transitoria del gasto para un pozo que produce a presión constante en un área de drenaje cerrada.

La ecuación A-20 está definida como

$$F_D(x_D, y_D, t_{DA}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_0^{t_{DA}} \left[\frac{\text{EXP}(-a/\tau) + \text{EXP}(-b/\tau) + \text{EXP}(-c/\tau) + \text{EXP}(-d/\tau)}{2\tau} \right] d\tau \quad \dots (A-25)$$

Teniendo en cuenta las siguientes transformadas de Laplace²² inmediatas:

$$\mathcal{L} \left[P_D(x_D, y_D, t_{DA}) \right] = \bar{F}_{WD}(z)$$

$$\mathcal{L} \left[\int_0^{LDA} F(\tau) d\tau \right] = \frac{1}{z} f(z)$$

$$\mathcal{L} \left[\frac{1}{2t} \text{EXP}(-k^2/4t) \right] = K_0(k \cdot z^{1/2}), \quad (k > 0)$$

y tomando la transformada de Laplace a ambos lados de la ecuación A-25, obtenemos

$$\bar{F}_{WD}(\ell) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\ell} \left[K_0(2(a.\ell)^{1/2}) + K_0(2(b.\ell)^{1/2}) + K_0(2(c.\ell)^{1/2}) + K_0(2(d.\ell)^{1/2}) \right]$$

..... (A-26)

Reemplazando la ecuación A-26 en A-24, tenemos

$$\bar{q}_D(\ell) = \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \ell \left(K_0(2(a.\ell)^{1/2}) + K_0(2(b.\ell)^{1/2}) + K_0(2(c.\ell)^{1/2}) + K_0(2(d.\ell)^{1/2}) \right) \right]^{-1}$$

..... (A-27)

y,

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\bar{q}_D(\ell) \right] = q_D(tb_A) \quad \text{..... (A-28)}$$

Las soluciones para la ecuación A-28 se generan usando el algoritmo de STEHTEST¹⁶, que es un algoritmo de inversión numérica de la transformada de Laplace. Los resultados se presentan en forma tabular para varios sistemas rectangulares en el Apéndice B, tabla B2.

Al implementar el algoritmo de STEHTEST¹⁶ en la solución de nuestro problema, fue necesario seleccionar el número óptimo de coeficientes, que para nuestro caso es de $a=10$. Al emplear otros valores para a , se obtenían resultados no acordes con los esperados. Se hicieron corridas para valores $a = 8, 10, 12$ y 16 ; se llegó a la conclusión que el valor adecuado para a era de 10 .

APENDICE B₁

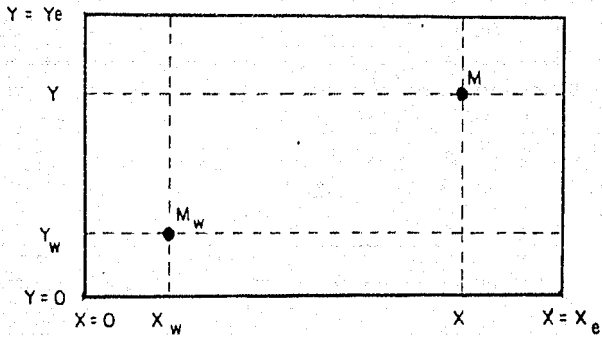


FIGURA B1. Función fuente Instantánea en un yacimiento rectangular cerrado con un solo pozo.

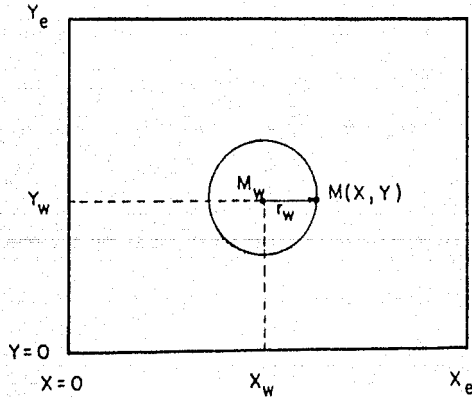


FIGURA B2. Ilustración de la función fuente instantánea en nuestro sistema rectangular.

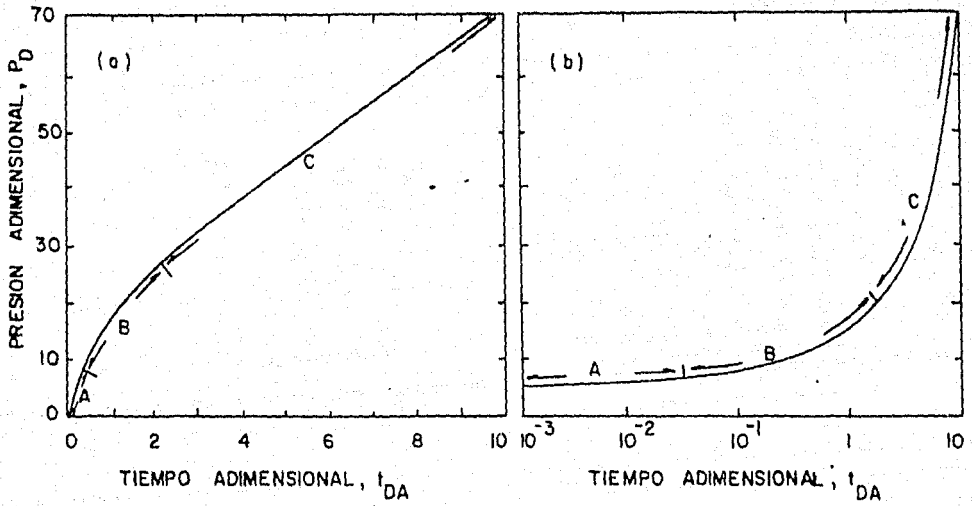


FIGURA B3. Regimes de flujo transitorio: A-actuando infinito; B-transición; C-estado pseudoestacionario, Datos tomados de Earlougher, R.C, Jr ¹²

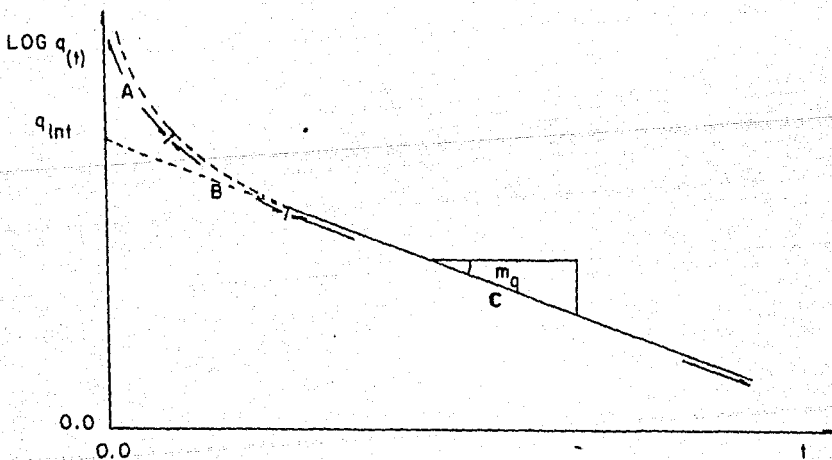


FIGURA B4. Gasto de flujo para un pozo que produce a presión constante, para $t > t_{pss}$, en un sistema rectangular cerrado.

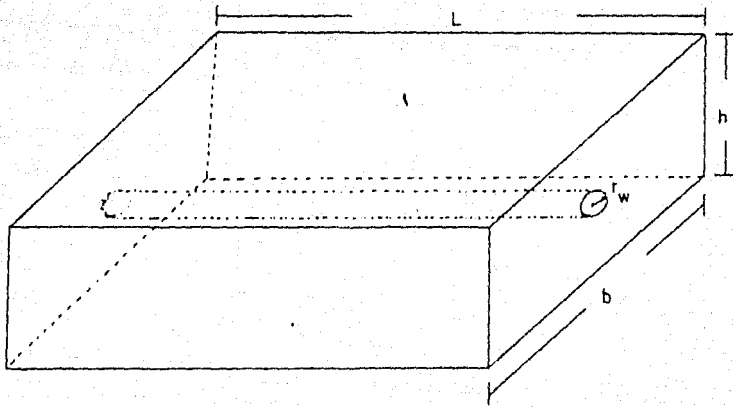


FIGURA B5. Diagrama esquemático de un pozo horizontal.

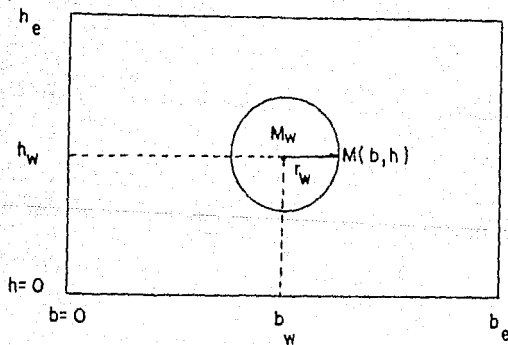
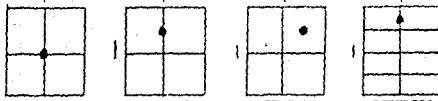


FIGURA B6. Diagrama esquemático de la función fuente instantánea para un pozo horizontal.

TABLA E1. CAIDA DE PRESION ADIMENSIONAL COMO FUNCION DEL TIEMPO ADIMENSIONAL PARA VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.





41



T/4	1	2	3	4
0.0001	3.400001	3.400001	3.400001	3.400001
0.0002	3.746802	3.746802	3.746802	3.746802
0.0005	3.949485	3.949485	3.949485	3.949485
0.0004	4.080001	4.080001	4.080001	4.080001
0.0008	4.204887	4.204887	4.204887	4.204887
0.0016	4.291002	4.291002	4.291002	4.291002
0.0032	4.350076	4.350076	4.350076	4.350076
0.0064	4.398801	4.398801	4.398801	4.398801
0.0128	4.438700	4.438700	4.438700	4.438700
0.0256	4.471400	4.471400	4.471400	4.471400
0.0512	4.498011	4.498011	4.498011	4.498011
0.1024	4.519074	4.519074	4.519074	4.519074
0.2048	4.534458	4.534458	4.534458	4.534458
0.4096	4.545151	4.545151	4.545151	4.545151
0.8192	4.552311	4.552311	4.552311	4.552311
1.6384	4.556358	4.556358	4.556358	4.556358
3.2768	4.557815	4.557815	4.557815	4.557815
6.5536	4.558010	4.558010	4.558010	4.558010
13.1072	4.557321	4.557321	4.557321	4.557321
26.2144	4.555800	4.555800	4.555800	4.555800
52.4288	4.553488	4.553488	4.553488	4.553488
104.8576	4.550314	4.550314	4.550314	4.550314
209.7152	4.546319	4.546319	4.546319	4.546319
419.4304	4.541636	4.541636	4.541636	4.541636
838.8608	4.536319	4.536319	4.536319	4.536319
1677.7216	4.530418	4.530418	4.530418	4.530418
3355.4432	4.524000	4.524000	4.524000	4.524000
6710.8864	4.517134	4.517134	4.517134	4.517134
13421.7728	4.509880	4.509880	4.509880	4.509880
26843.5456	4.502300	4.502300	4.502300	4.502300
53687.0912	4.494458	4.494458	4.494458	4.494458
107374.1824	4.486300	4.486300	4.486300	4.486300
214748.3648	4.477888	4.477888	4.477888	4.477888
429496.7296	4.469276	4.469276	4.469276	4.469276
858993.4592	4.460514	4.460514	4.460514	4.460514
1717986.9184	4.451651	4.451651	4.451651	4.451651
3435973.8368	4.442634	4.442634	4.442634	4.442634
6871947.6736	4.433511	4.433511	4.433511	4.433511
13743895.3472	4.424334	4.424334	4.424334	4.424334
27487790.6944	4.415151	4.415151	4.415151	4.415151
54975581.3888	4.405914	4.405914	4.405914	4.405914
109951162.7776	4.396676	4.396676	4.396676	4.396676
219902325.5552	4.387488	4.387488	4.387488	4.387488
439804651.1104	4.378300	4.378300	4.378300	4.378300
879609302.2208	4.369151	4.369151	4.369151	4.369151
1759218604.4416	4.360076	4.360076	4.360076	4.360076
3518437208.8832	4.351014	4.351014	4.351014	4.351014
7036874417.7664	4.342000	4.342000	4.342000	4.342000
14073748835.5328	4.333076	4.333076	4.333076	4.333076
28147497671.0656	4.324200	4.324200	4.324200	4.324200
56294995342.1312	4.315418	4.315418	4.315418	4.315418
112589990684.2624	4.306676	4.306676	4.306676	4.306676
225179981368.5248	4.298014	4.298014	4.298014	4.298014
450359962737.0496	4.289451	4.289451	4.289451	4.289451
900719925474.0992	4.280934	4.280934	4.280934	4.280934
1801439850948.1984	4.272511	4.272511	4.272511	4.272511
3602879701896.3968	4.264134	4.264134	4.264134	4.264134
7205759403792.7936	4.255834	4.255834	4.255834	4.255834
14411518807585.5872	4.247551	4.247551	4.247551	4.247551
28823037615171.1744	4.239334	4.239334	4.239334	4.239334
57646075230342.3488	4.231200	4.231200	4.231200	4.231200
115292150460684.6976	4.223176	4.223176	4.223176	4.223176
230584300921369.3952	4.215300	4.215300	4.215300	4.215300
461168601842738.7904	4.207514	4.207514	4.207514	4.207514
922337203685477.5808	4.200000	4.200000	4.200000	4.200000
1844674407370955.1616	4.192634	4.192634	4.192634	4.192634
3689348814741910.3232	4.185451	4.185451	4.185451	4.185451
7378697629483820.6464	4.178418	4.178418	4.178418	4.178418
14757395258967641.2928	4.171576	4.171576	4.171576	4.171576
29514790517935282.5856	4.164976	4.164976	4.164976	4.164976
59029581035870565.1712	4.158651	4.158651	4.158651	4.158651
118059162071741130.3424	4.152534	4.152534	4.152534	4.152534
236118324143482260.6848	4.146676	4.146676	4.146676	4.146676
472236648286964521.3696	4.141014	4.141014	4.141014	4.141014
944473296573929042.7392	4.135600	4.135600	4.135600	4.135600
1888946593147858085.4784	4.130476	4.130476	4.130476	4.130476
3777893186295716170.9568	4.125600	4.125600	4.125600	4.125600
7555786372591432341.9136	4.120934	4.120934	4.120934	4.120934
15111572745182864683.8272	4.116511	4.116511	4.116511	4.116511
30223145490365729367.6544	4.112376	4.112376	4.112376	4.112376
60446290980731458735.3088	4.108476	4.108476	4.108476	4.108476
120892581961462917470.6176	4.104851	4.104851	4.104851	4.104851
241785163922925834941.2352	4.101534	4.101534	4.101534	4.101534
483570327845851669882.4704	4.098576	4.098576	4.098576	4.098576
967140655691703339764.9408	4.095934	4.095934	4.095934	4.095934
1934281311383406679529.8816	4.093651	4.093651	4.093651	4.093651
3868562622766813359059.7632	4.091776	4.091776	4.091776	4.091776
7737125245533626718119.5264	4.090251	4.090251	4.090251	4.090251
15474250491067253436239.0528	4.089034	4.089034	4.089034	4.089034
30948500982134506872478.1056	4.088076	4.088076	4.088076	4.088076
61897001964269013744956.2112	4.087334	4.087334	4.087334	4.087334
123794003928538027489912.4224	4.086851	4.086851	4.086851	4.086851
247588007857076054979824.8448	4.086576	4.086576	4.086576	4.086576
495176015714152109959649.6896	4.086451	4.086451	4.086451	4.086451
990352031428304219919399.3792	4.086434	4.086434	4.086434	4.086434
1980704062856608439838798.7584	4.086511	4.086511	4.086511	4.086511
3961408125713216879677597.5168	4.086651	4.086651	4.086651	4.086651
7922816251426433759355195.0336	4.086851	4.086851	4.086851	4.086851
15845632502852867518710390.0672	4.087134	4.087134	4.087134	4.087134
31691265005705735037420780.1344	4.087534	4.087534	4.087534	4.087534
63382530011411470074841560.2688	4.088014	4.088014	4.088014	4.088014
126765060022822940149683120.5376	4.088576	4.088576	4.088576	4.088576
25353012004564588029936624.0752	4.089251	4.089251	4.089251	4.089251
50706024009129176059873248.1504	4.090000	4.090000	4.090000	4.090000
101412048018258352119746496.3008	4.090834	4.090834	4.090834	4.090834
20282409603651670423949299.6016	4.091776	4.091776	4.091776	4.091776
40564819207303340847898599.2032	4.092851	4.092851	4.092851	4.092851
81129638414606681695797198.4064	4.094000	4.094000	4.094000	4.094000
162259276832213363391594396.8128	4.095251	4.095251	4.095251	4.095251
324518553664426726783188793.6256	4.096651	4.096651	4.096651	4.096651
649037107328853453566377587.2512	4.098200	4.098200	4.098200	4.098200
1298074214657068907132755174.5024	4.099934	4.099934	4.099934	4.099934
2596148429314137814265110289.0048	4.101800	4.101800	4.101800	4.101800
5192296858628275628530220578.0096	4.103851	4.103851	4.103851	4.103851
103845937172565512570604411556.0192	4.106034	4.106034	4.106034	4.106034
2076918743451310251412088231112.0384	4.108376	4.108376	4.108376	4.108376
4153837486902620502824176462224.0768	4.110900	4.110900	4.110900	4.110900
8307674973805241005648352924448.1536	4.113651	4.113651	4.113651	4.113651
16615349947610482011296705848896.3072	4.116651	4.116651	4.116651	4.116651
33230699895220964022593411697792.6144	4.119934	4.119934	4.119934	4.119934
66461399790441928045186823395585.2288	4.123451	4.123451	4.123451	4.123451
132922799580883856090373646791170.4576	4.127251	4.127251	4.127251	4.127251
265845599161767712180747293582340.9152	4.131376	4.131376	4.131376	4.131376
531691198323535424361494587164681.8304	4.135851	4.135851	4.135851	4.135851
1063382396647070848722989174329363.6608	4.140700	4.140700	4.140700	4.140700
212676479329414169744597834865877.3216	4.145951	4.145951	4.145951	4.145951
4253529586588283394891956697317554.6432	4.151651	4.151651	4.151651	4.151651
8507059173176566789783913394635109.2864	4.157851	4.157851	4.157851	4.157851
1701411834635313357956782678927021.5728	4.164600	4.164600	4.164600	4.164600
3402823669270626715913565357854043.1456	4.171951	4.171951	4.171951	4.171951
6805647338541253431827131075708086.2912	4.180000	4.180000	4.180000	4.180000
13611294677082506863654262151416172.5824	4.188751	4.188751	4.188751	4.188751
27222589354165013727308524302832345.1648	4.198251	4.198251	4.198251	4.198251
54445178708330027454617048605664690.3296	4.208551	4.208551	4.208551	4.208551
10889035741666005490923409721132938.6592	4.219700	4.219700	4.219700	4.219700
21778071483332010981846819442265877.3184	4.231751	4.231751	4.231751	4.231751
43556142966664021963693638884531754.6368	4.244751	4.244751	4.244751	4.244751
87112285933328043927387277769063089.2736	4.258751	4.258751	4.258751	4.258751
174224571866656087854774555538126178.5472	4.273751	4.273751	4.273751	4.273751
348449143733312175709549111076252357.0944	4.290000	4.290000	4.290000	4.290000
696898287466624351419098222152504714.1888	4.307551	4.307551	4.307551	4.307551
139379657493324870283819644430509428.3776	4.326551	4.326551	4.326551	4.326551
278759314986649740567639288861018856.7552	4.347051	4.347051	4.347051	4.347051
5575186299732994811				

TABLA B2. GASTO ADIMENSIONAL COMO FUNCION DEL TIEMPO ADIMENSIONAL
 PARA VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES DEFERIDOS.

01

TDA	L			
				
0.0001	0.282005	0.282005	0.282005	0.282005
0.0002	0.287907	0.287907	0.287907	0.287907
0.0005	0.245547	0.245547	0.245547	0.245547
0.0010	0.207441	0.207441	0.207441	0.207441
0.0025	0.201500	0.201500	0.201500	0.201500
0.0050	0.202805	0.202805	0.202805	0.202805
0.0100	0.203071	0.203071	0.203071	0.203071
0.0200	0.219687	0.219687	0.219687	0.219687
0.0500	0.217151	0.217151	0.217151	0.217151
0.1000	0.214758	0.214758	0.214758	0.214758
0.2000	0.200214	0.200214	0.200214	0.200214
0.5000	0.192560	0.192560	0.192560	0.192560
1.0000	0.187470	0.187470	0.187470	0.187470
2.0000	0.187701	0.187701	0.187701	0.187480
5.0000	0.180729	0.180729	0.180729	0.180710
10.0000	0.176028	0.176028	0.176028	0.177447
20.0000	0.176202	0.176202	0.176202	0.176741
50.0000	0.174440	0.174440	0.174440	0.174407
100.0000	0.170281	0.170281	0.170281	0.170491
200.0000	0.160045	0.160045	0.160045	0.160017
500.0000	0.158061	0.157731	0.156491	0.158002
1.000000	0.154595	0.153100	0.151477	0.154521
2.000000	0.151945	0.149768	0.147188	0.149515
5.000000	0.149720	0.146858	0.143411	0.147183
10.000000	0.147511	0.144269	0.140052	0.144386
20.000000	0.146100	0.142095	0.137024	0.141691
50.000000	0.144518	0.139969	0.134280	0.139481
1.000000	0.142975	0.137988	0.131977	0.137681
2.000000	0.139268	0.134474	0.128561	0.135285
5.000000	0.137024	0.130810	0.125362	0.132773
10.000000	0.135941	0.129028	0.124052	0.130721
20.000000	0.135008	0.128145	0.123200	0.129068
50.000000	0.136619	0.128001	0.123154	0.129128
100.000000	0.138244	0.128578	0.123101	0.129279
200.000000	0.139714	0.129229	0.123107	0.129497
500.000000	0.140405	0.129780	0.123122	0.129650
1.000000	0.140597	0.129786	0.123140	0.129660
2.000000	0.140710	0.129791	0.123140	0.129685
5.000000	0.140805	0.129791	0.123140	0.129730
10.000000	0.140848	0.129791	0.123140	0.129750

0.0001	0.010000	0.020000	0.030000	0.040000	0.050000	0.060000	0.070000	0.080000	0.090000
0.0002	0.011960	0.023920	0.035880	0.047840	0.059800	0.071760	0.083720	0.095680	0.107640
0.0003	0.013920	0.027840	0.041760	0.055680	0.069600	0.083520	0.097440	0.111360	0.125280
0.0004	0.015880	0.031760	0.045680	0.059600	0.073520	0.087440	0.101360	0.115280	0.129200
0.0005	0.017840	0.035680	0.049600	0.063520	0.077440	0.091360	0.105280	0.119200	0.133120
0.0006	0.019800	0.039600	0.053520	0.067440	0.081360	0.095280	0.109200	0.123120	0.137040
0.0007	0.021760	0.043520	0.057440	0.071360	0.085280	0.099200	0.113120	0.127040	0.140960
0.0008	0.023720	0.047440	0.061360	0.075280	0.089200	0.103120	0.117040	0.130960	0.144880
0.0009	0.025680	0.051360	0.065280	0.079200	0.093040	0.106960	0.120880	0.134800	0.148800
0.0010	0.027640	0.055280	0.069200	0.083120	0.096960	0.110880	0.124800	0.138720	0.152720
0.0011	0.029600	0.059200	0.073120	0.087040	0.100880	0.114800	0.128720	0.142640	0.156640
0.0012	0.031560	0.063120	0.077040	0.090960	0.104800	0.118720	0.132640	0.146560	0.160560
0.0013	0.033520	0.067040	0.080960	0.094880	0.108720	0.122640	0.136480	0.150480	0.164480
0.0014	0.035480	0.070960	0.084880	0.098800	0.112640	0.126560	0.140400	0.154400	0.168400
0.0015	0.037440	0.074880	0.088800	0.102720	0.116560	0.130480	0.144320	0.158320	0.172320
0.0016	0.039400	0.078800	0.092720	0.106640	0.120480	0.134400	0.148240	0.162240	0.176240
0.0017	0.041360	0.082720	0.096640	0.110560	0.124400	0.138320	0.152160	0.166160	0.180160
0.0018	0.043320	0.086640	0.100560	0.114480	0.128320	0.142240	0.156080	0.170080	0.184080
0.0019	0.045280	0.090560	0.104480	0.118400	0.132240	0.146160	0.160000	0.173960	0.188000
0.0020	0.047240	0.094480	0.108400	0.122320	0.136160	0.150080	0.163880	0.177880	0.191920
0.0021	0.049200	0.098400	0.112320	0.126240	0.140080	0.154000	0.167800	0.181800	0.195840
0.0022	0.051160	0.102320	0.116240	0.130160	0.144000	0.157920	0.171720	0.185720	0.199760
0.0023	0.053120	0.106240	0.120160	0.134080	0.147920	0.161840	0.175640	0.189640	0.203680
0.0024	0.055080	0.110160	0.124080	0.138000	0.151840	0.165760	0.179560	0.193560	0.207600
0.0025	0.057040	0.114080	0.128000	0.141920	0.155760	0.169680	0.183480	0.197480	0.211520
0.0026	0.059000	0.118000	0.131920	0.145840	0.159680	0.173600	0.187400	0.201400	0.215440
0.0027	0.060960	0.121920	0.135840	0.149760	0.163600	0.177520	0.191320	0.205320	0.219360
0.0028	0.062920	0.125840	0.139760	0.153680	0.167520	0.181440	0.195240	0.209240	0.223280
0.0029	0.064880	0.129760	0.143680	0.157600	0.171440	0.185360	0.199160	0.213160	0.227200
0.0030	0.066840	0.133680	0.147600	0.161520	0.175360	0.189280	0.203080	0.217080	0.231120
0.0031	0.068800	0.137600	0.151520	0.165440	0.179280	0.193200	0.207000	0.221000	0.235040
0.0032	0.070760	0.141520	0.155440	0.169360	0.183200	0.197120	0.210920	0.224920	0.238960
0.0033	0.072720	0.145440	0.159360	0.173280	0.187120	0.201040	0.214840	0.228840	0.242880
0.0034	0.074680	0.149360	0.163280	0.177200	0.191040	0.204960	0.218760	0.232760	0.246800
0.0035	0.076640	0.153280	0.167200	0.181120	0.194960	0.208880	0.222680	0.236680	0.250720
0.0036	0.078600	0.157200	0.171120	0.185040	0.198880	0.212800	0.226600	0.240600	0.254640
0.0037	0.080560	0.161120	0.175040	0.188960	0.202800	0.216720	0.230520	0.244520	0.258560
0.0038	0.082520	0.165040	0.178960	0.192880	0.206720	0.220640	0.234440	0.248440	0.262480
0.0039	0.084480	0.168960	0.182880	0.196800	0.210640	0.224560	0.238360	0.252360	0.266400
0.0040	0.086440	0.172880	0.186800	0.200720	0.214560	0.228480	0.242280	0.256280	0.270320
0.0041	0.088400	0.176800	0.190720	0.204640	0.218480	0.232400	0.246200	0.260200	0.274240
0.0042	0.090360	0.180720	0.194640	0.208560	0.222400	0.236320	0.250120	0.264120	0.278160
0.0043	0.092320	0.184640	0.198560	0.212480	0.226320	0.240240	0.254040	0.268040	0.282080
0.0044	0.094280	0.188560	0.202480	0.216400	0.230240	0.244160	0.257960	0.271960	0.286000
0.0045	0.096240	0.192480	0.206400	0.220320	0.234160	0.248080	0.261880	0.275880	0.289920
0.0046	0.098200	0.196400	0.210320	0.224240	0.238080	0.252000	0.265800	0.279800	0.293840
0.0047	0.100160	0.200320	0.214240	0.228160	0.241960	0.255920	0.269720	0.283720	0.297760
0.0048	0.102120	0.204240	0.218160	0.232080	0.245880	0.259840	0.273640	0.287640	0.301680
0.0049	0.104080	0.208160	0.222080	0.236000	0.249800	0.263760	0.277560	0.291560	0.305600
0.0050	0.106040	0.212080	0.226000	0.239920	0.253720	0.267680	0.281480	0.295480	0.309520
0.0051	0.108000	0.216000	0.229920	0.243840	0.257640	0.271600	0.285400	0.299400	0.313440
0.0052	0.110000	0.220000	0.233840	0.247760	0.261560	0.275520	0.289320	0.303320	0.317360
0.0053	0.112000	0.224000	0.237760	0.251680	0.265480	0.279440	0.293240	0.307240	0.321280
0.0054	0.114000	0.228000	0.241680	0.255600	0.269400	0.283360	0.297160	0.311160	0.325200
0.0055	0.116000	0.232000	0.245600	0.259520	0.273320	0.287280	0.301080	0.315080	0.329120
0.0056	0.118000	0.236000	0.249520	0.263440	0.277240	0.291200	0.305000	0.319000	0.333040
0.0057	0.120000	0.240000	0.253440	0.267360	0.281160	0.295120	0.308920	0.322920	0.336960
0.0058	0.122000	0.244000	0.257360	0.271280	0.285080	0.299040	0.312840	0.326840	0.340880
0.0059	0.124000	0.248000	0.261280	0.275200	0.289000	0.302960	0.316760	0.330760	0.344800
0.0060	0.126000	0.252000	0.265200	0.279120	0.292920	0.306880	0.320680	0.334680	0.348720
0.0061	0.128000	0.256000	0.269120	0.283040	0.296840	0.310800	0.324600	0.338600	0.352640
0.0062	0.130000	0.260000	0.273040	0.286960	0.300760	0.314720	0.328520	0.342520	0.356560
0.0063	0.132000	0.264000	0.276960	0.290880	0.304680	0.318640	0.332440	0.346440	0.360480
0.0064	0.134000	0.268000	0.280880	0.294800	0.308600	0.322560	0.336360	0.350360	0.364400
0.0065	0.136000	0.272000	0.284800	0.298720	0.312520	0.326480	0.340280	0.354280	0.368320
0.0066	0.138000	0.276000	0.288720	0.302640	0.316440	0.330400	0.344200	0.358200	0.372240
0.0067	0.140000	0.280000	0.292640	0.306560	0.320360	0.334320	0.348120	0.362120	0.376160
0.0068	0.142000	0.284000	0.296560	0.310480	0.324280	0.338240	0.352040	0.366040	0.380080
0.0069	0.144000	0.288000	0.300480	0.314400	0.328200	0.342160	0.355960	0.369960	0.384000
0.0070	0.146000	0.292000	0.304400	0.318320	0.332120	0.346080	0.359880	0.373880	0.387920
0.0071	0.148000	0.296000	0.308320	0.322240	0.336040	0.350000	0.363800	0.377800	0.391840
0.0072	0.150000	0.300000	0.312240	0.326160	0.339960	0.353920	0.367720	0.381720	0.395760
0.0073	0.152000	0.304000	0.316160	0.330080	0.343880	0.357840	0.371640	0.385640	0.399680
0.0074	0.154000	0.308000	0.320080	0.334000	0.347800	0.361760	0.375560	0.389560	0.403600
0.0075	0.156000	0.312000	0.324000	0.337920	0.351720	0.365680	0.379480	0.393480	0.407520
0.0076	0.158000	0.316000	0.327920	0.341840	0.355640	0.369600	0.383400	0.397400	0.411440
0.0077	0.160000	0.320000	0.331840	0.345760	0.359560	0.373520	0.387320	0.401320	0.415360
0.0078	0.162000	0.324000	0.335760	0.349680	0.363480	0.377440	0.391240	0.405240	0.419280
0.0079	0.164000	0.328000	0.339680	0.353600	0.367400	0.381360	0.395160	0.409160	0.423200
0.0080	0.166000	0.332000	0.343600	0.357520	0.371320	0.385280	0.399080	0.413080	0.427120
0.0081	0.168000	0.336000	0.347520	0.361440	0.375240	0.389200	0.403000	0.417000	0.431040
0.0082	0.170000	0.340000	0.351440	0.365360	0.379160	0.393120	0.406920	0.420920	0.434960
0.0083	0.172000	0.344000	0.355360	0.369280	0.383080	0.397040	0.410840	0.424840	0.438880
0.0084	0.174000	0.348000	0.359280	0.373200	0.387000	0.400960	0.414760	0.428760	0.442800
0.0085	0.176000	0.352000	0.363200	0.377120	0.390920	0.404880	0.418680	0.432680	0.446720
0.0086	0.178000	0.356000	0.367120	0.381040	0.394840	0.408800	0.422600	0.436600	0.450640
0.0087	0.180000	0.360000	0.371040	0.384960	0.398760	0.412720	0.426520	0.440520	0.454560
0.0088	0.182000	0.364000	0.374960	0.388880	0.402680	0.416640	0.430440	0.444440	0.458480
0.0089	0.184000	0.368000	0.378880	0.392800	0.406600	0.420560	0.434360	0.448360	0.462400
0.0090	0.186000	0.372000	0.382800	0.396720	0.410520	0.424480	0.438280	0.452280	0.466320
0.0091									

APENDICE C

CURVAS TIPO

Los resultados de la tabla B2, Apendice B, son graficados y forman un conjunto de curvas tipo log-log en términos de una curva de declinación del gasto adimensional,

$$q_{Dd} = \text{Ln} \left[\frac{2.2458 A}{CA r_w^2} \right]^{1/2} q_{D(DDA)} \quad \text{..... (C-1)}$$

y una curva de declinación del tiempo adimensional,

$$t_{Dd} = \frac{4 \pi}{\text{Ln} \frac{2.2458 A}{CA r_w^2}} t_{DA} \quad \text{..... (C-2)}$$

Así, los valores calculados de $q_{D(DDA)}$ y t_{DA} se transformaron en una curva de declinación de gasto y tiempo adimensional, q_{Dd} y t_{Dd} , usando las ecuaciones C-1 y C-2.

A continuación encontraremos el conjunto de curvas tipo a utilizar, en la determinación del área de drenaje de un pozo.

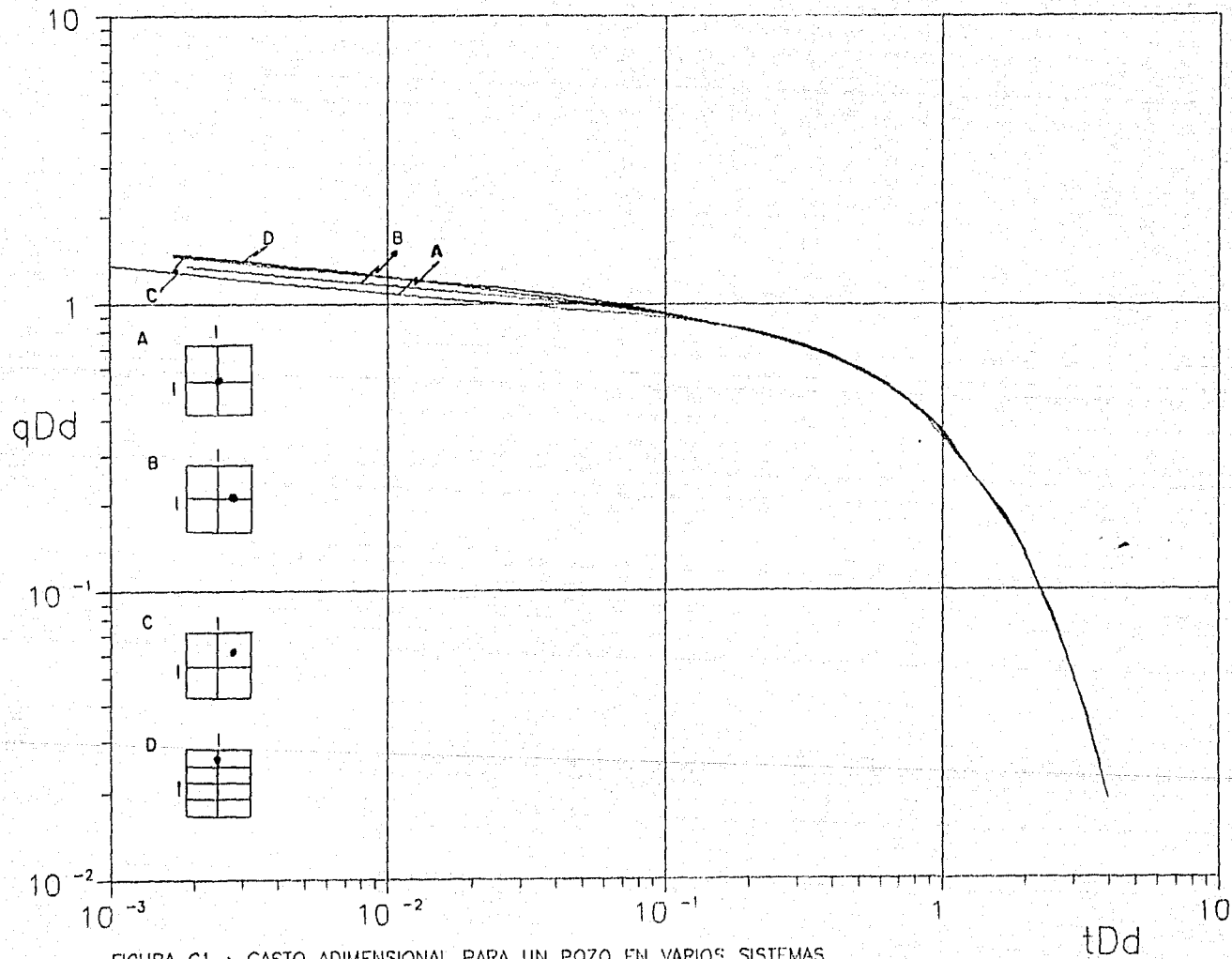


FIGURA C1. → GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

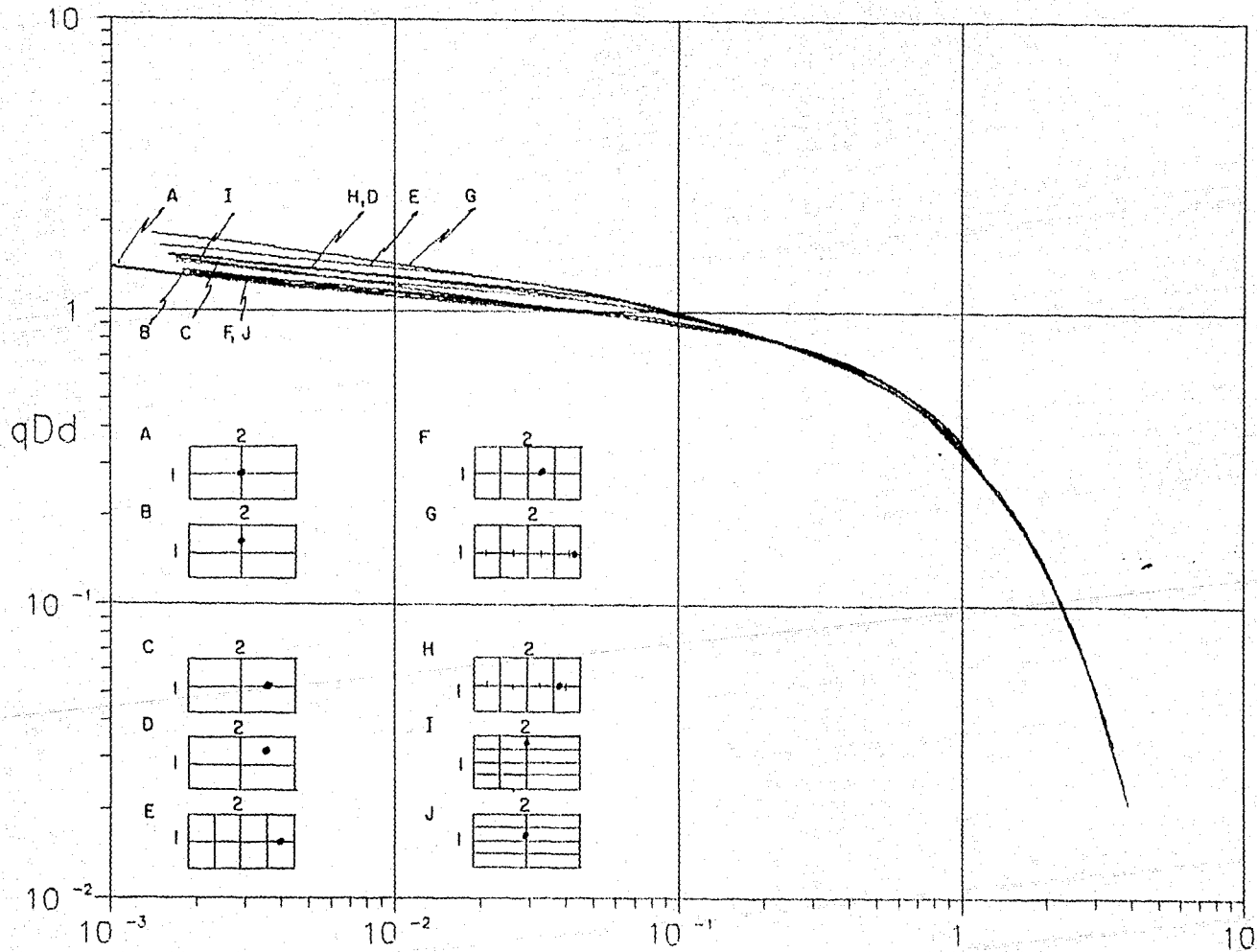


FIGURA C2.- GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

tDd

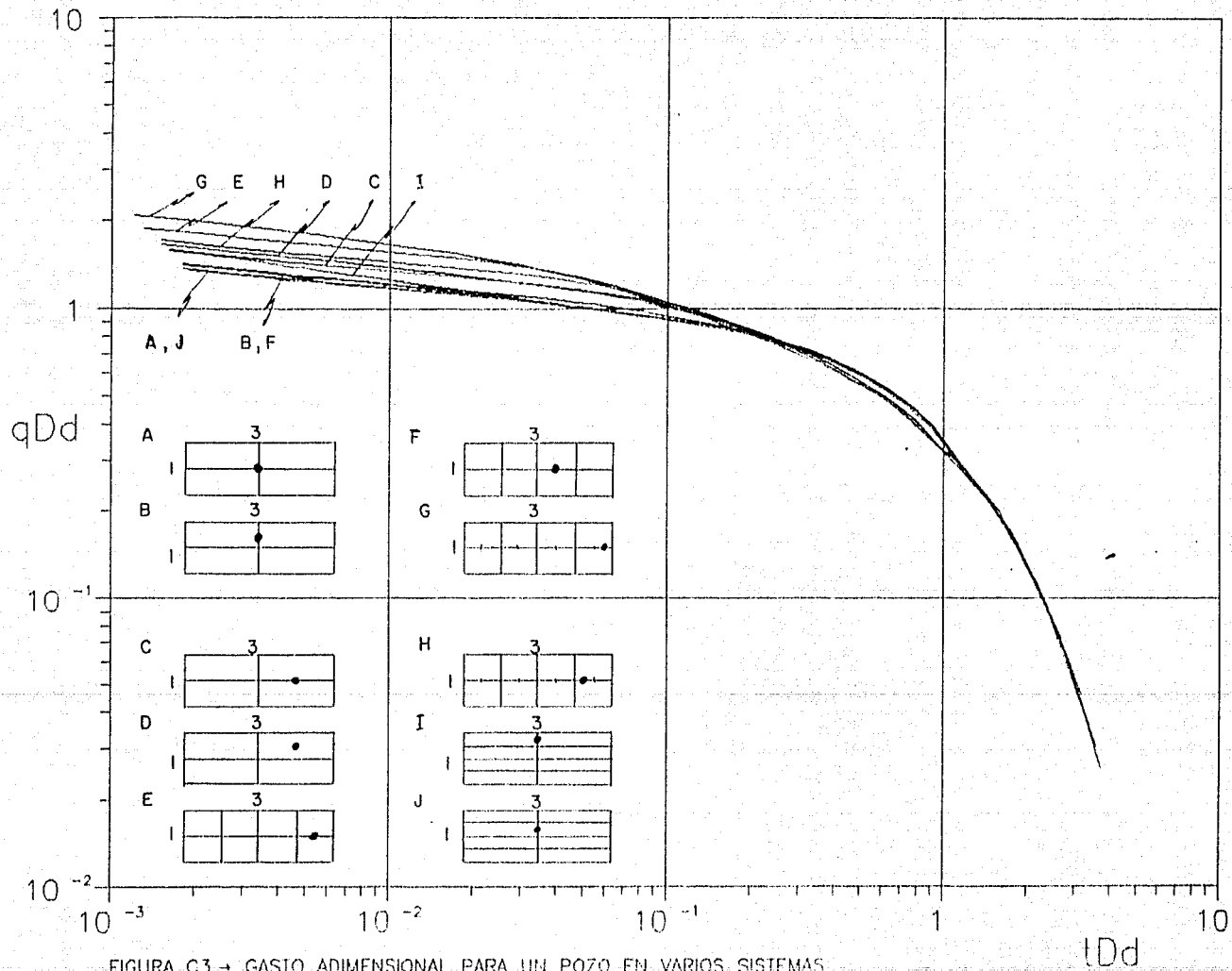


FIGURA C3. → GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

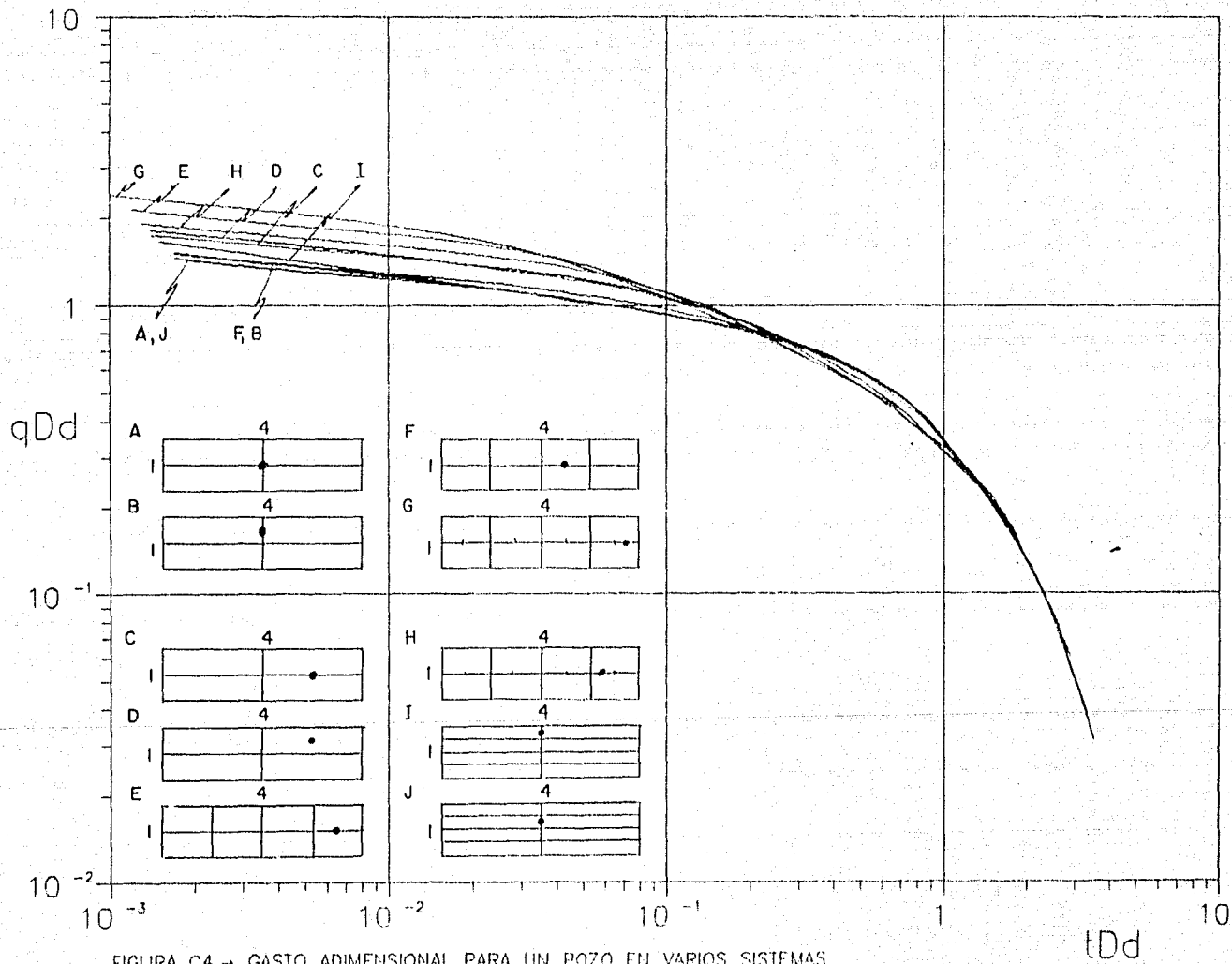


FIGURA C4. → GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

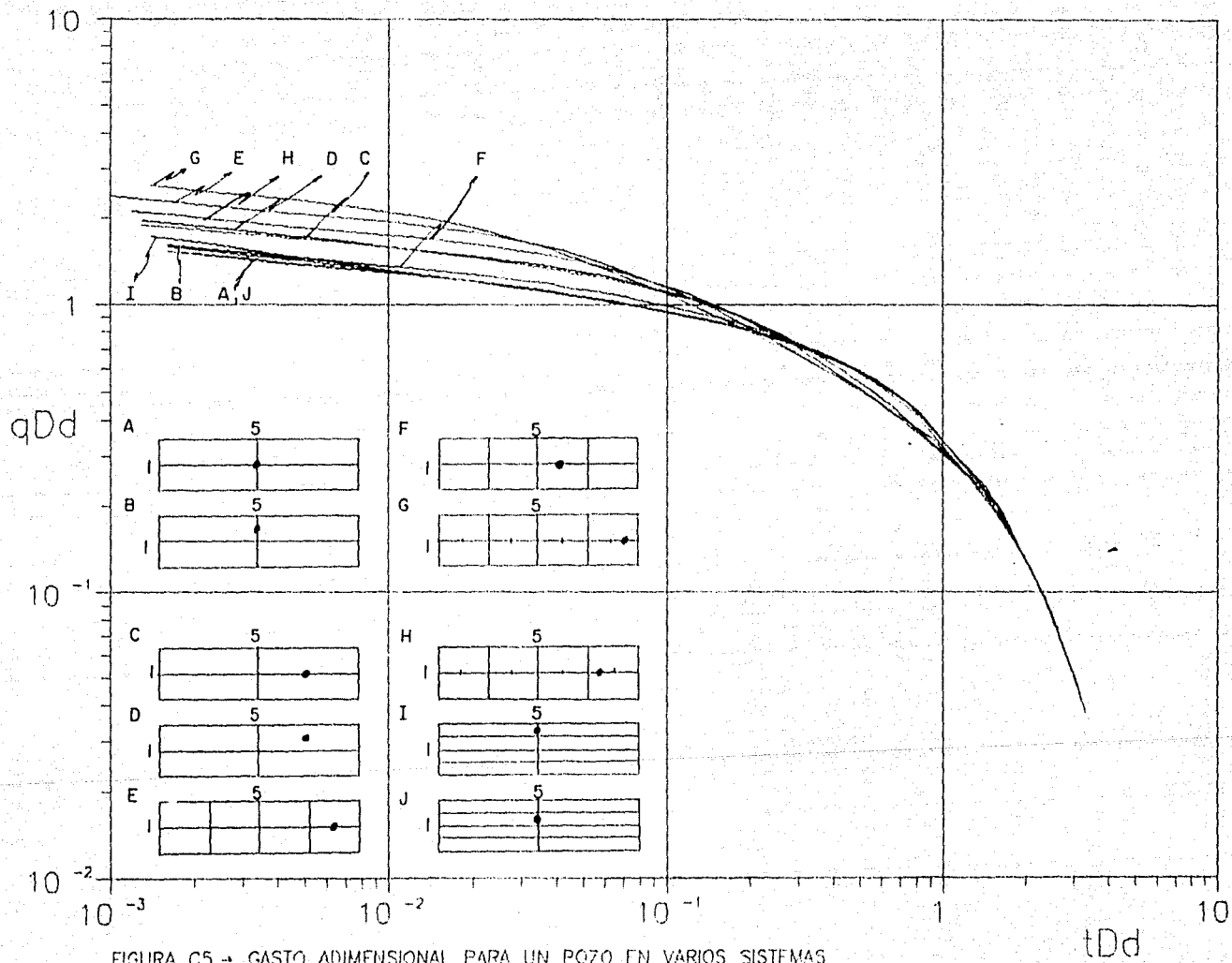


FIGURA C5. → GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

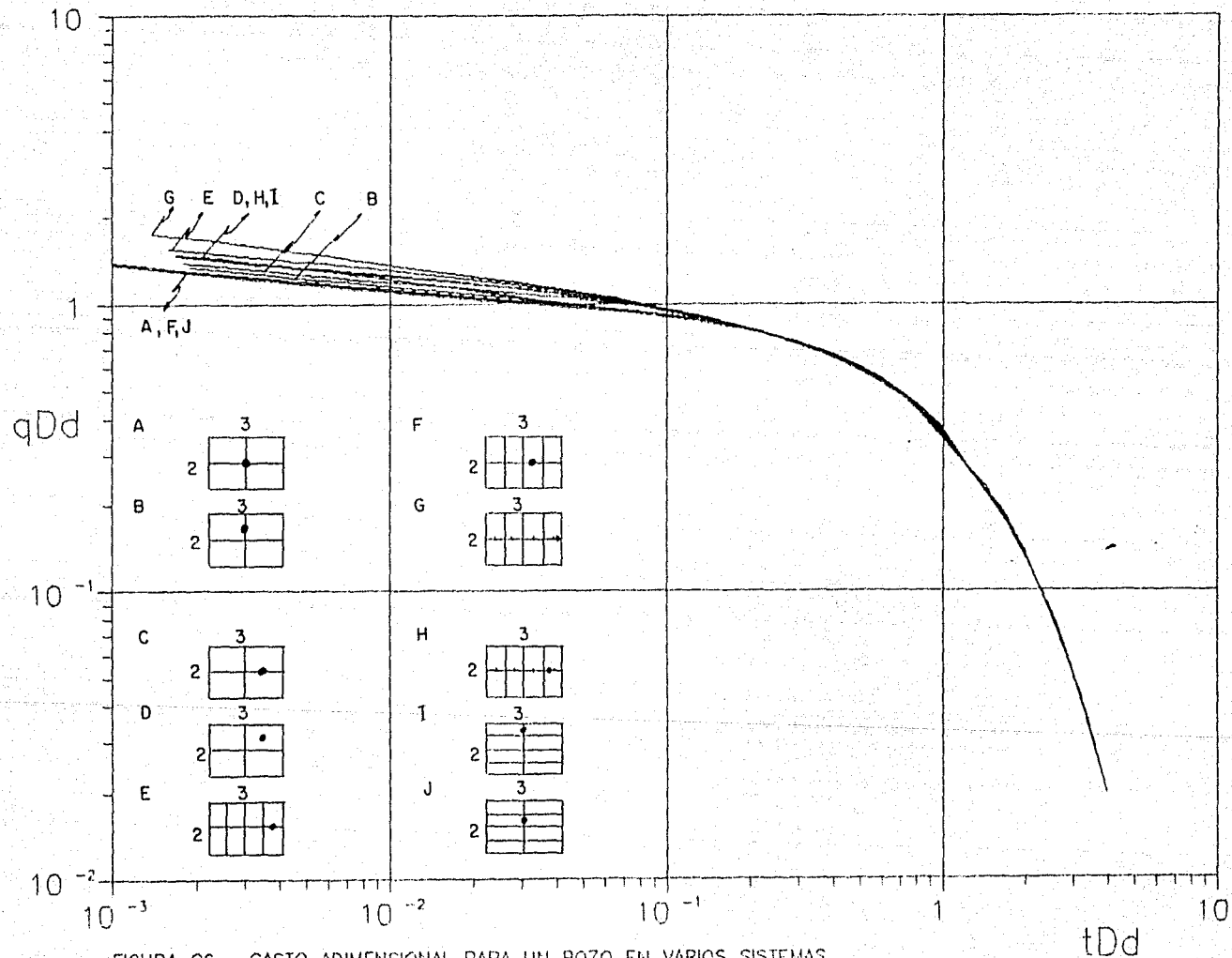


FIGURA C6. → GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

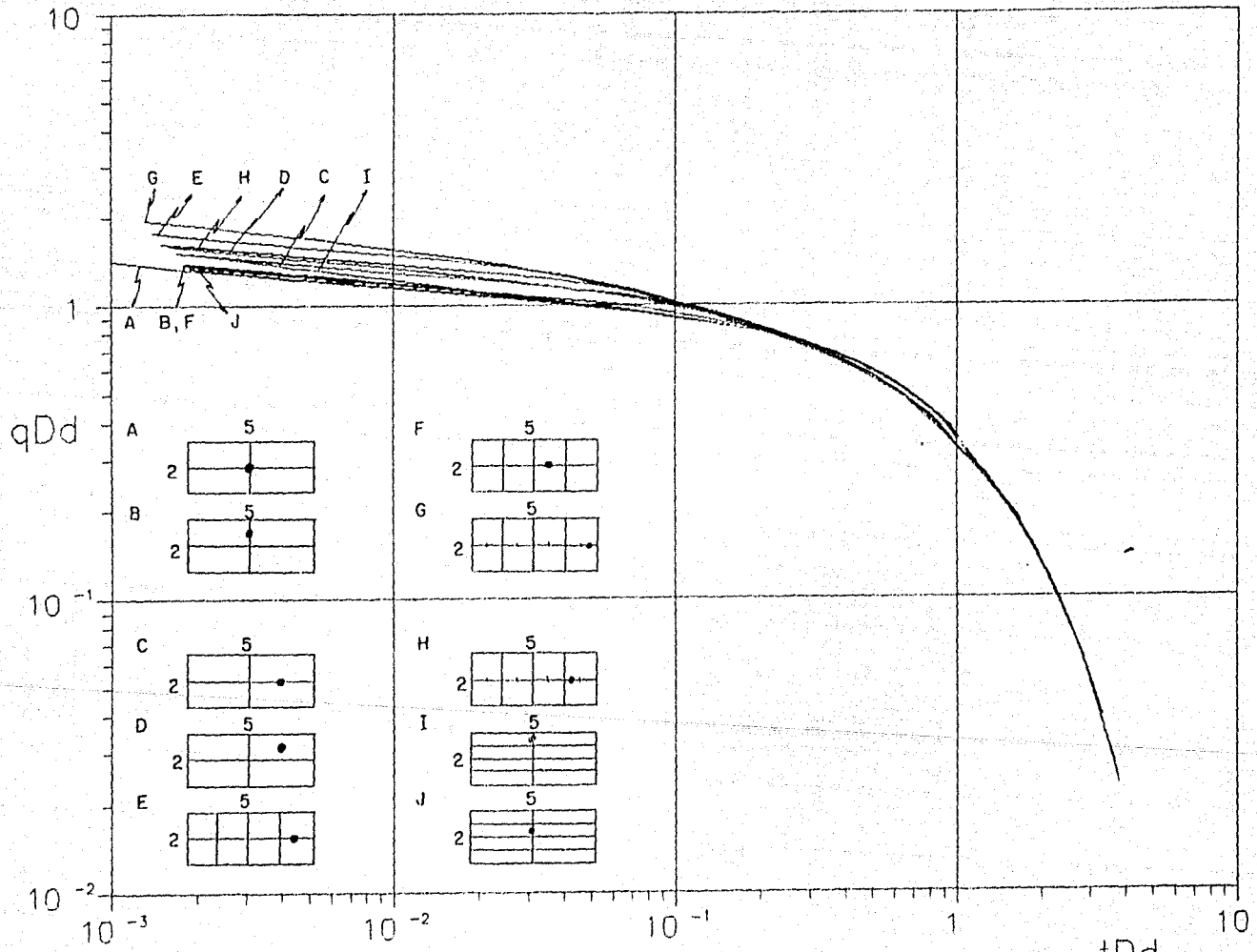


FIGURA C7.- GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

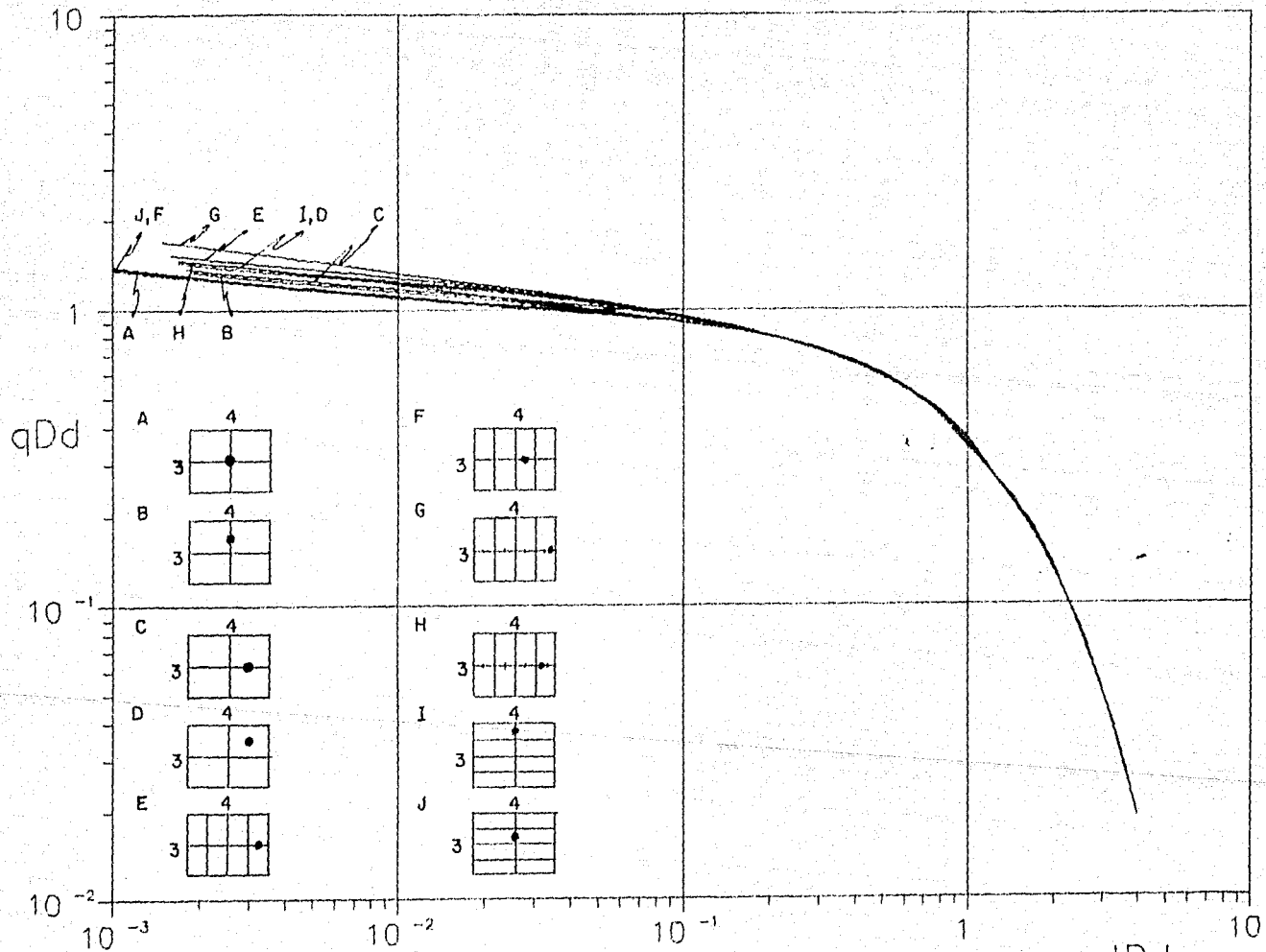


FIGURA C8. → GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

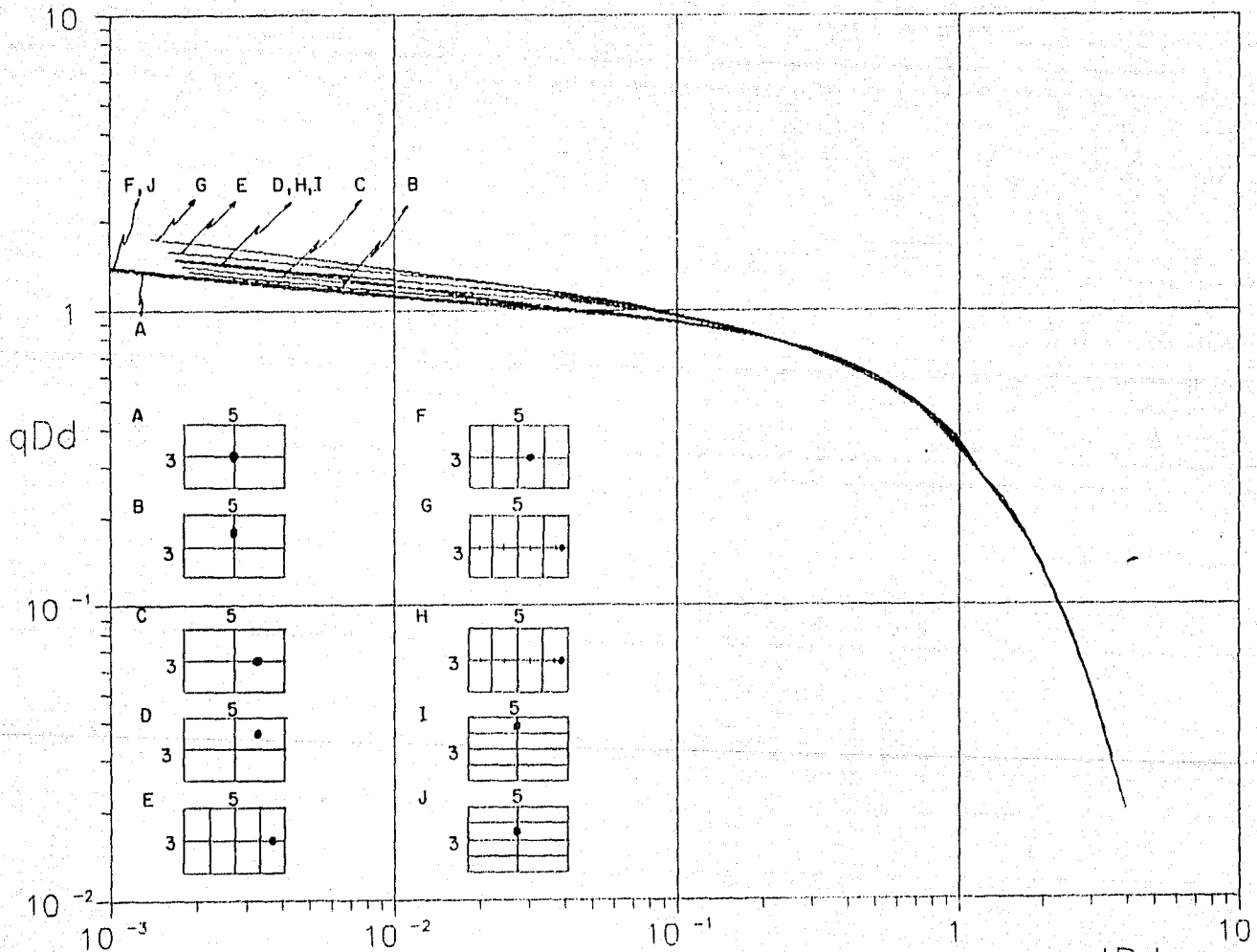


FIGURA C9. → GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

tDd

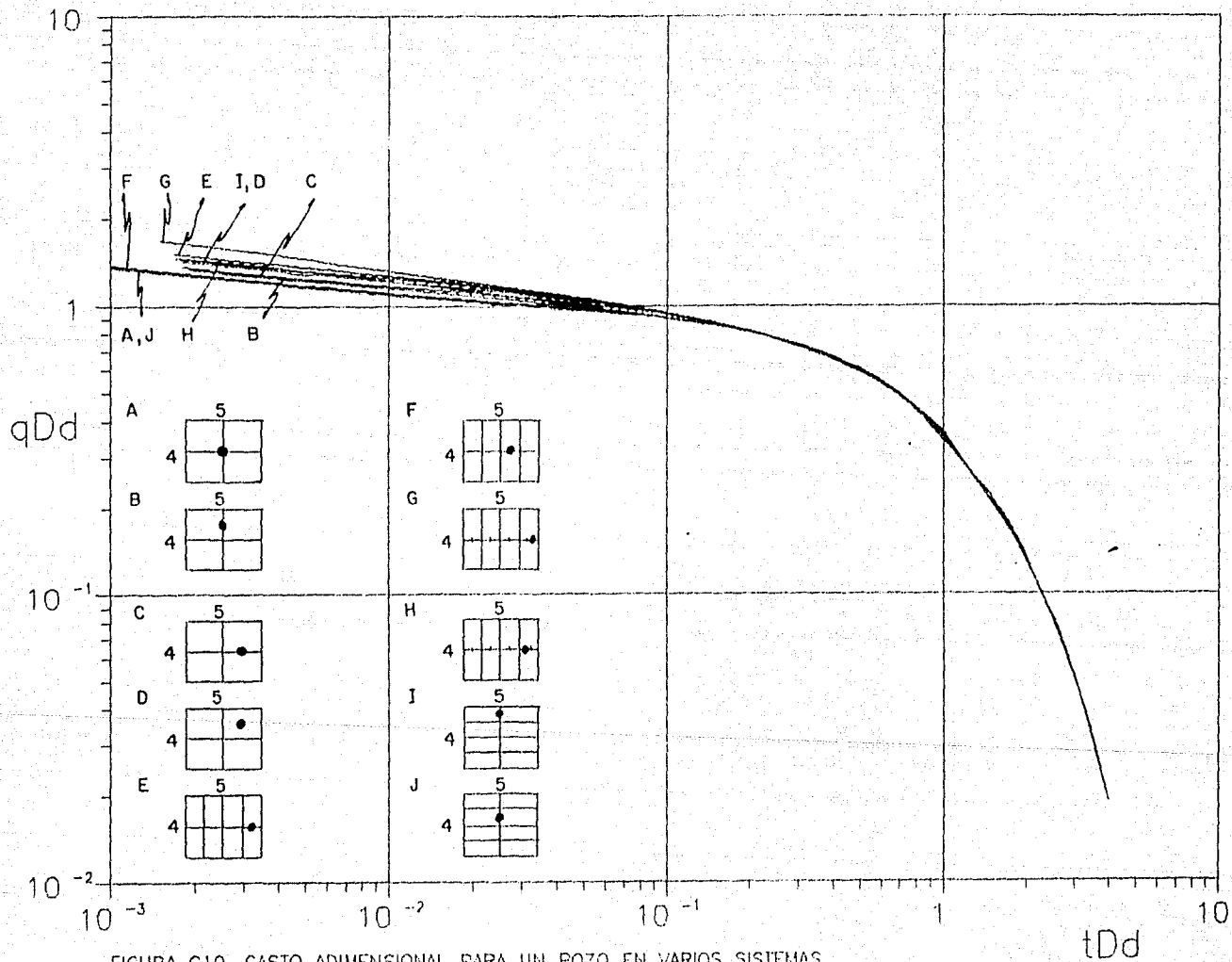


FIGURA C10. GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

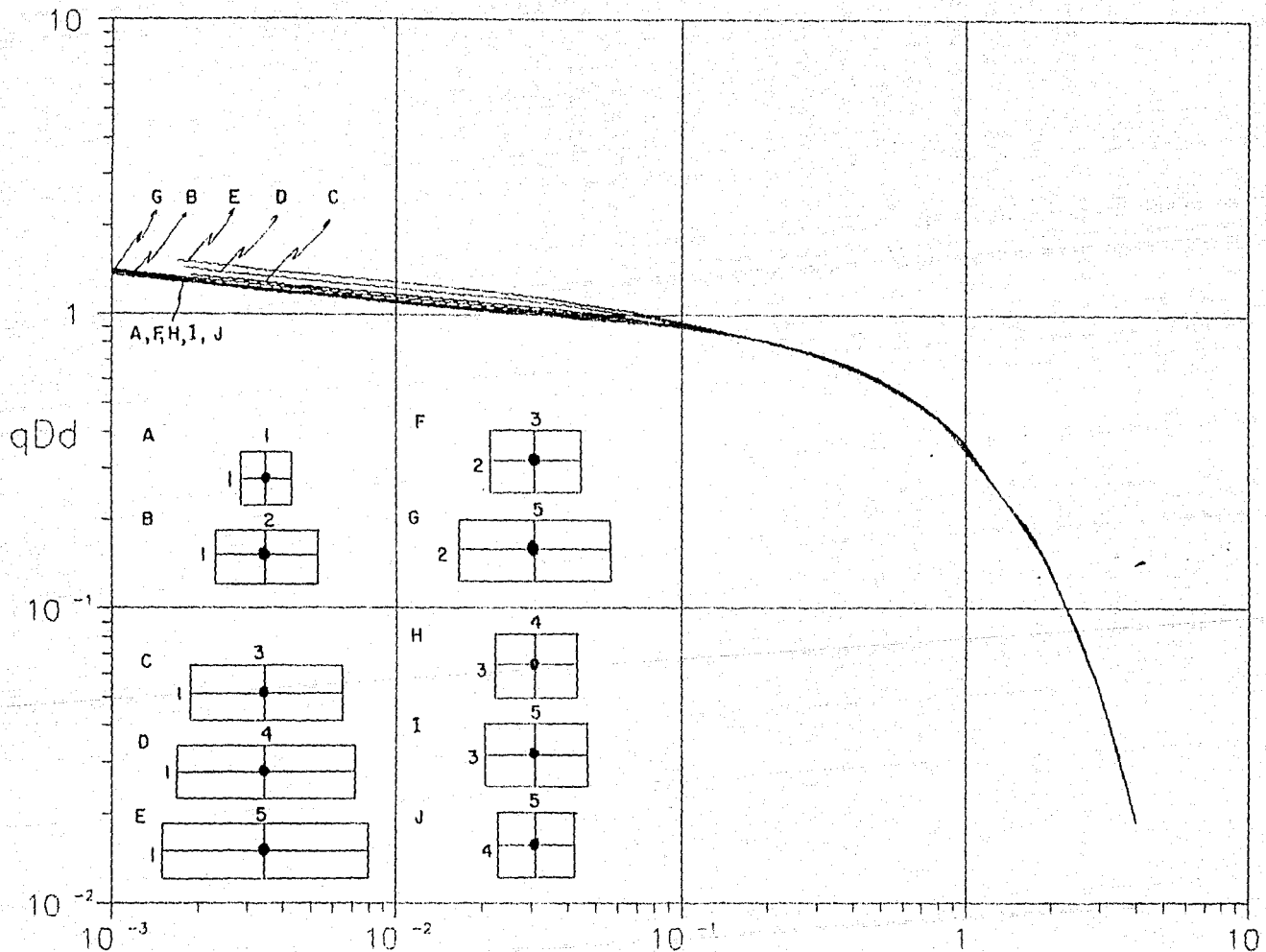


FIGURA C11. GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

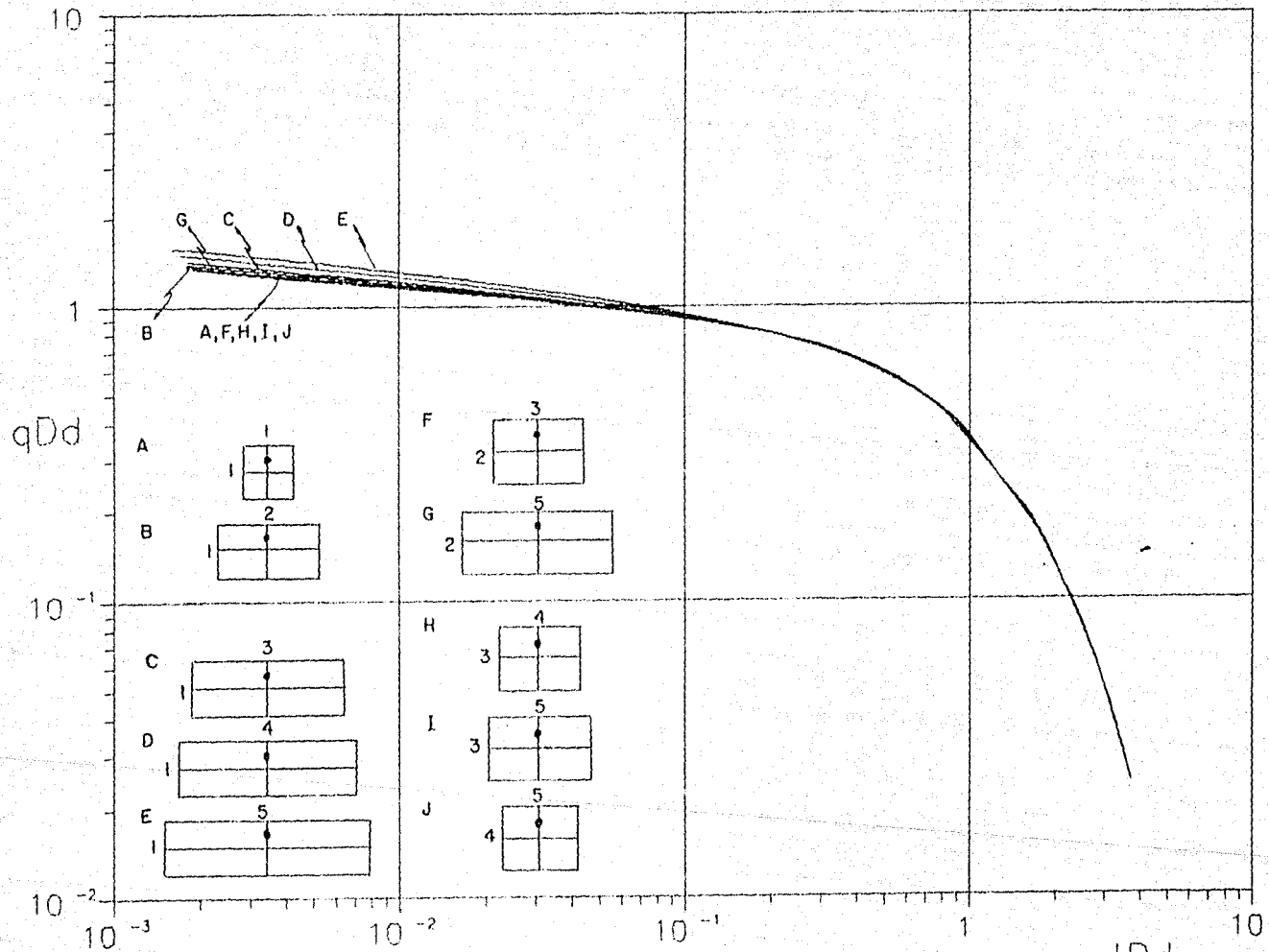


FIGURA C12. GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

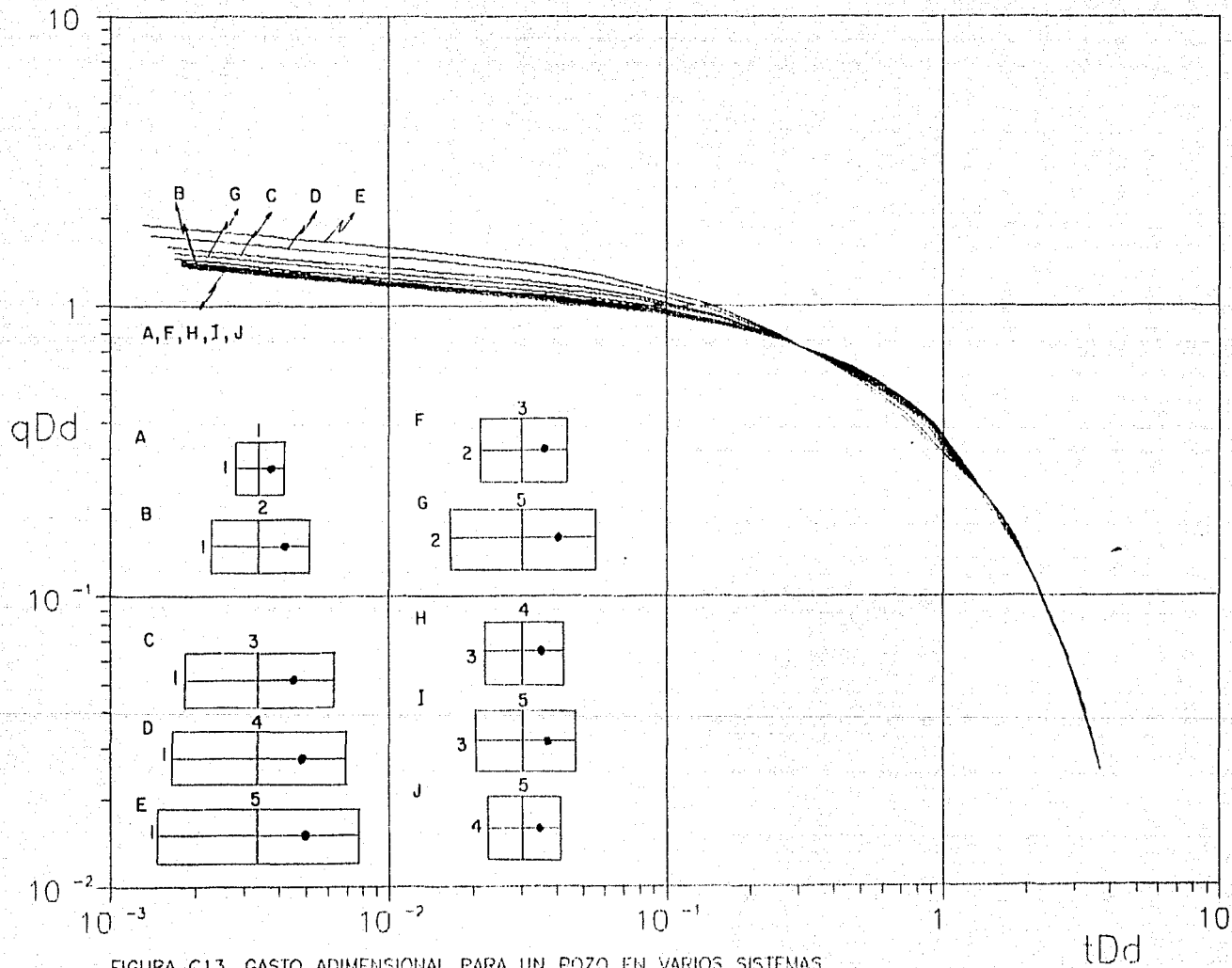


FIGURA C13. GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

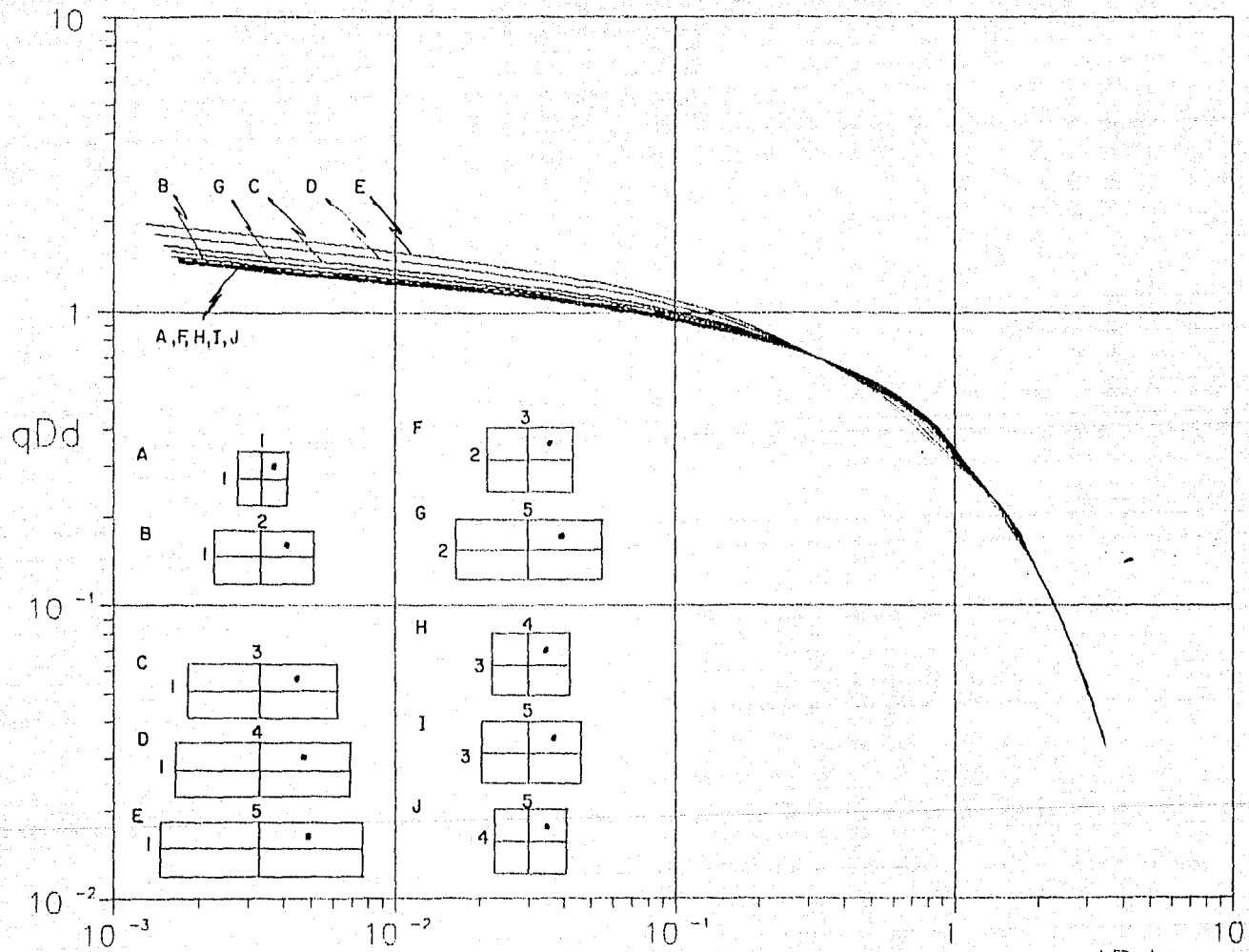


FIGURA C14. GASTO ADIMENSIONAL PARA UN POZO EN VARIOS SISTEMAS RECTANGULARES CERRADOS.

tDd

APENDICE D

TABLA D.1. FACTORES DE FORMA PARA VARIAS AREAS DE REFLEXO CERRADO CON UN PICO.





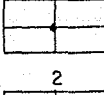
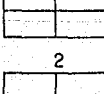
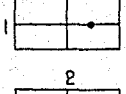
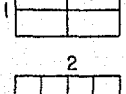
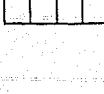
VACIADOS CERRADOS	CA	FIN DEL PERIODO		INICIO DEL PERIODO		
		INFINITO (totalpe)	Especo para tra 4	SEUDOESTACIONARIO (totalpe)	Especo para tra 3	
			5.0 A	0.20 A	1.0 A	5.0 A
	30.8621	0.0570	0.29	0.16	0.12	
	12.9845	0.0210	0.63	0.47	0.31	
	4.5128	0.0170	0.71	0.54	0.38	
	7.0742	0.0960	0.65	0.53	0.38	
2 	21.5381	0.0340	0.38	0.27	0.19	
2 	10.5370	0.0110	0.38	0.25	0.21	
2 	4.5129	0.0310	1.30	0.94	0.63	
2 	2.0760	0.0110	1.30	0.94	0.63	
2 	0.5810	0.0110	1.40	1.10	0.77	

TABLA 11. CONTINUACION.

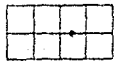



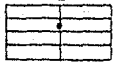

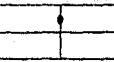

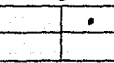
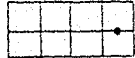
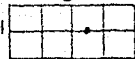

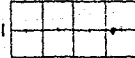



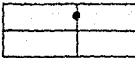

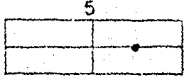
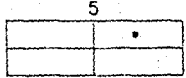
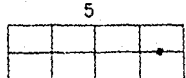
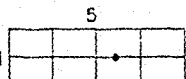
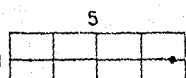
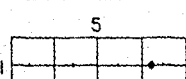
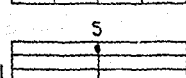
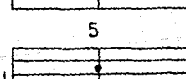
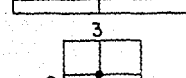
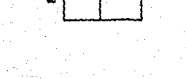
VARIABLES CENTRALES	D ₁	FIN DEL PERIODO		INICIO DEL PERIODO		
		INFLUENCIA (coeficiente)	Efecto para t ₀	INFLUENCIA (coeficiente)	Efecto para t ₀	
			0,174	0,204	1,004	0,604
2						
	14,7260	0,004	1,10	0,65	0,07	
2						
	0,1108	0,0030	1,40	1,10	0,74	
2						
	1,6371	0,0034	1,50	1,00	0,66	
2						
	0,1577	0,0030	0,39	0,30	0,22	
2						
	10,5450	0,0240	0,36	0,28	0,20	
3						
	11,4959	0,0030	0,83	0,41	0,28	
3						
	0,7456	0,0070	0,57	0,41	0,05	
3						
	1,0661	0,0030	1,40	1,50	0,93	
3						
	0,8734	0,0070	1,30	1,50	0,92	










TABLA IV. CONTINUACION.

YACIMIENTO DEPARTADO	TA	R. DEL PERIODO		R. DEL PERIODO	
		MAQUIL. (teoría)	Evento para t=0	EMBUERTACION (teoría)	Evento para t=0
		S. A.	S. A.	S. A.	S. A.
	0.054	0.0150	2.30	1.60	1.10
	0.0694	0.0270	1.60	1.10	0.55
	0.06977	0.0094	2.10	1.60	1.20
	0.2875	0.0200	1.60	1.50	1.10
	1.1564	0.0020	1.50	0.41	0.25
	9.8111	0.0160	0.50	0.41	0.25
	5.7811	0.0170	0.70	0.54	0.38
	1.6504	0.0040	0.70	0.54	0.38
	0.2317	0.0170	2.60	1.50	1.20

ANEXO 11. CONTINUACIÓN.

ACCIÓN DE EFECTOS	EP	FIN DEL PERIODO		INICIO DEL PERIODO	
		INICIAL	Final	INICIAL	Final
		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

TAFLA 011. CONTINUA

YACIMIENTOS COORDENADAS	ID	FIN DEL PERIODO	INICIO DEL PERIODO		
		Evento para top	Evento para bot	Evento para top	Evento para bot
	01.7711	0,094	0,40	0,21	0,21
	01.7407	0,100	0,65	0,31	0,40
	01.5004	0,0140	0,25	0,21	0,46
	01.5714	0,0090	1,10	0,75	0,5-
	01.5591	0,044	0,7-	0,50	0,26
	01.4587	0,0000	1,10	0,60	0,5-
	01.1241	0,0110	1,00	0,78	0,51
	01.8081	0,0040	0,4-	0,25	0,21
	01.5461	0,70	0,25	0,26	0,17

El presente informe es el resultado de un estudio de ingeniería de yacimientos que se realizó en el marco de un convenio de colaboración entre el Centro de Estudios Científicos (CECyC) y la Empresa Nacional de Hidrocarburos (ENAH). El estudio se realizó en el marco de un convenio de colaboración entre el Centro de Estudios Científicos (CECyC) y la Empresa Nacional de Hidrocarburos (ENAH). El estudio se realizó en el marco de un convenio de colaboración entre el Centro de Estudios Científicos (CECyC) y la Empresa Nacional de Hidrocarburos (ENAH).

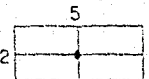
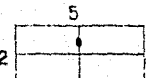
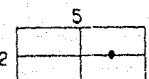
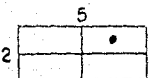
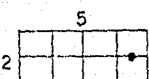
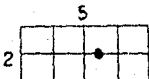
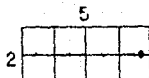
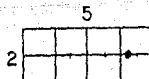
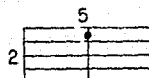
ACORDADO 185-4102	FA	FAIXAS, TENSÃO	DILUIÇÃO DO PERÍODO		
		MINUTOS por dia Específica por dia	0,2	0,4	0,6
	0,0000	0,0000	0,44	0,74	0,24
	0,0024	0,0000	0,44	0,74	0,24
	0,0048	0,0024	1,40	1,20	0,78
	0,0072	0,0048	1,60	1,20	0,78
	0,0096	0,0072	1,60	1,40	0,80
	0,0120	0,0096	1,30	0,88	0,41
	0,0144	0,0096	1,60	1,40	0,80
	0,0168	0,0144	1,70	1,30	0,65
	0,0192	0,0168	0,44	0,74	0,24

TABLE 4 (Cont.) CONTINUACION

ELEMENTOS DEFORMADOS	Z	FIN DEL PERIODO		INICIO DEL PERIODO	
		DEFORMACION Efecto para los	DEFORMACION Efecto para los	DEFORMACION Efecto para los	DEFORMACION Efecto para los
	10.784	0.015	0.24	0.24	0.19
	10.0754	0.020	0.24	0.19	0.11
	10.7817	0.016	0.45	0.36	0.24
	6.4404	0.022	0.24	0.17	0.41
	1.6137	0.017	0.23	0.17	0.42
	1.1943	0.0070	0.50	0.70	0.45
	11.4113	0.046	0.65	0.46	0.25
	6.0431	0.0029	0.50	0.70	0.50
	11.0003	0.0167	0.59	0.67	0.45

FAJLA DE CONTINUIDAD

4




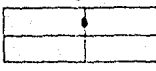
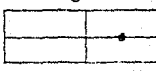
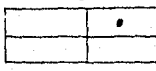
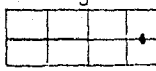
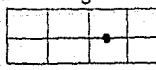
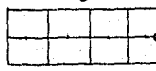

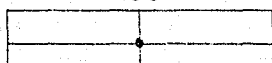
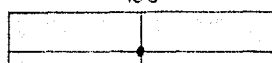


VALORES DE DEFAUCO	TA	FIN DEL PERIODO		INICIO DEL PERIODO	
		Evento: τ_{i+1}	Evento: τ_i	Evento: τ_i	Evento: τ_{i+1}
	0.8776	0.004	0.81	0.44	0.27
	0.8186	0.006	0.78	0.27	0.17
	0.7578	0.008	0.71	0.22	0.13
	0.6924	0.010	0.68	0.20	0.11
	0.6280	0.012	0.60	0.18	0.09
	0.5604	0.014	0.58	0.17	0.08
	0.4916	0.016	0.56	0.16	0.07
	0.4208	0.018	0.55	0.15	0.06
	0.3480	0.020	0.54	0.14	0.05

TABLE 21. IDA IN AIDEN

ATTITUDE DEFINITION	ID	INITIAL PERIOD	MIDDLE PERIOD		
		INITIAL PERIOD Events per day	EVENTS PER DAY	EVENTS PER DAY	EVENTS PER DAY
		5			
		4			
		5			
		4			
		5			
		4			
		5			
		4			

TABLE 10. FACTORES DE FORMA PARA VARIAS SERIES DE OBRAS TERRESTRES CON UN EJE HORIZONTAL.

INCLINACION DEL EJE	RELACION DESENE	C _d
<p>100</p> 	100:1	6.576×10^{-1}
<p>100</p> 	100:1	5.3312×10^{-1}
<p>100</p> 	100:5	1.545×10^{-1}
<p>100</p> 	100:5	2.7521×10^{-1}
<p>100</p> 	100:10	1.5449×10^{-1}

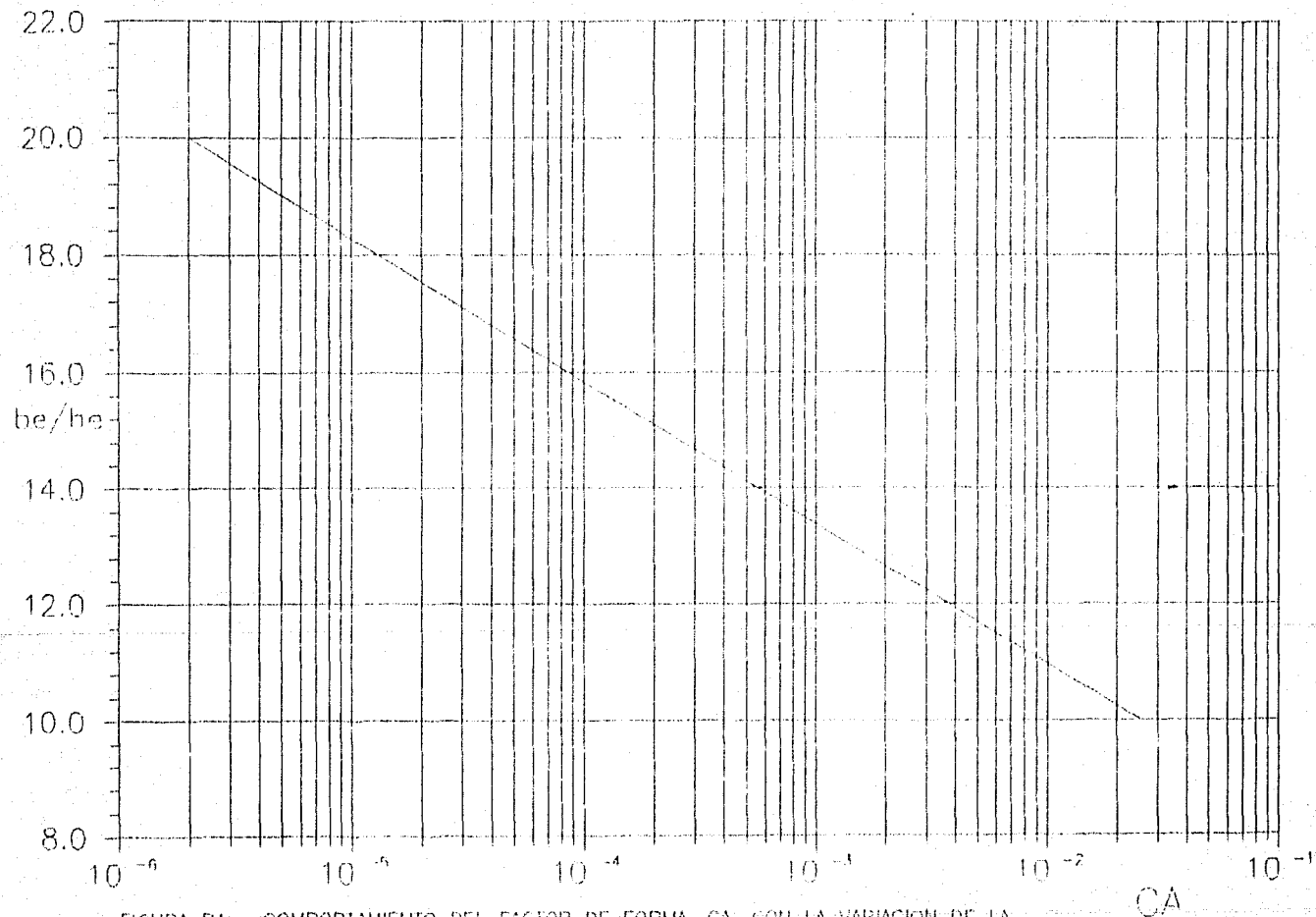


FIGURA D1.- COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE FORMA, CA, CON LA VARIACION DE LA RELACION DE be/he.

NOMENCLATURA

A	Area drenada por un pozo, L^2
A_i	Area drenada por el pozo i , L^2
A_t	Area de drene total de todos los pozos en un yacimiento, L^2
b	Extensión horizontal del yacimiento
B	Factor de volumen de la formación, L^3 / L^3
c	Compresibilidad promedio del liquido, $L t^2 / m$
c_t	Compresibilidad total, $L t^2 / m$
C_A	Factor de forma. Constante dependiente de la forma del área de drene, posición del pozo y característica de producción
h	Espesor del yacimiento, L
h_i	Espesor de la formación en el pozo i , L
k	Permeabilidad absoluta del yacimiento, L^2
k_{rg}	Permeabilidad relativa del gas, L^2
k_{rl}	Permeabilidad relativa del liquido, L^2
K_0	Función de BESSEL modificada
ζ	Variable en el espacio de LAPLACE
m	Pendiente de la gráfica F_{vf} contra $\text{Log } t_p$, $m / L t^3$
m^*	Pendiente de la gráfica de F_{vf} contra t_p , $m / L t^3$
N_c	Volumen poroso conectado al pozo, L^3
P_{1hr}	Presión cuando $t_p = 1$ hrs (sobre la recta de la gráfica de F_{vf} contra $\text{Log } t_p$), $m / L t^2$
P_D	Caida de presión adimensional
$P_{D(MBH)}$	Presión adimensional de MBH

- $P_D(t_{DA})$ Suma de las caídas de presión adimensional por comportamiento infinito y efectos de frontera
- P_i Presión inicial del yacimiento, $m / L t^2$
- P_a Es el intercepto de la línea recta de la gráfica de P_{vf} contra t_p , cuando se extrapola a $t_p = 0$, $m / L t^2$
- P_v Presión en el pozo, $m / L t^2$
- P_{vf} Presión del pozo fluyendo, $m / L t^2$
- $P_w(\Delta t)$ Presión en el pozo a un tiempo de cierre Δt , $m / L t^2$
- $\bar{P}_{wD}(\ell)$ Caída de presión adimensional en el espacio de LAPLACE
- \bar{P} Presión promedio volumétrica dentro del volumen drenado por un pozo, $m / L t^2$
- \bar{P}_i Presión promedio volumétrica dentro del volumen drenado por el pozo ℓ , $m / L t^2$
- P^* Presión obtenida por extrapolación de la línea recta de la parte lineal de la gráfica de P_v contra $\text{Log} \left[\frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \right]$, $m / L t^2$
- q Gasto del volumen de flujo en el pozo, L^3 / t
- q_b Gasto de producción adimensional
- $\bar{q}_b(\ell)$ Gasto de producción adimensional en el espacio de LAPLACE
- q_i Gasto de flujo volumétrico del pozo ℓ , L^3 / t
- q_t Gasto total de flujo volumétrico del yacimiento, L^3 / t
- $q_{r,t}$ Gasto de flujo volumétrico a una distancia r , a un tiempo t , L^3 / t
- q_{rv} Gasto de flujo volumétrico en el pozo, L^3 / t
- q_w Gasto de extracción constante desde el pozo, L^3 / t
- Q Volumen total de aceite en el yacimiento, L^3
- $Q(t)$ Producción acumulada, L^3
- $Q_D(t_{DA})$ Producción acumulada adimensional

$\bar{Q}_D(t)$	Producción acumulada adimensional en el espacio de LAPLACE
Q_{form}	Volumen de fluido producido del yacimiento, L^3
R	Relación gas-aceite, L^3 / L^3
r	Distancia radial desde el pozo, L
r_b	Radio de drenaje, L
r_w	Radio del pozo, L
r_{wD}	Distancia radial adimensional desde el pozo, r / r_w
S	Saturación de fluido, fracción
s	Factor de daño, adimensional
S^*	Solubilidad, L^3 / L^3
t	Tiempo de flujo, t
t_D	Tiempo adimensional
t_{DA}	Tiempo adimensional basado en el área de drenaje
$(t_{DA})_{\text{pss}}$	Tiempo adimensional para definir el inicio del periodo pseudoestacionario
t_p	Tiempo de producción, t
t_{pss}	Tiempo donde comienza el periodo pseudoestacionario, t
t_{PDA}	Tiempo adimensional a t_p
t_e	Tiempo de estabilización, t
t_i	Tiempo de viaje, t
T	Distribución de temperatura a lo largo de la placa de longitud Y , T
T_0	Temperatura en el punto $Y = Y_0$, T
T_1	Temperatura en el punto $Y = Y_1$, T
V_i	Volumen drenado por el pozo i , L^3
V_t	Volumen total del yacimiento, L^3
X	Distancia o longitud de drenaje, L
Y	Longitud de la placa, L
Y	Función Y de JONES, $m / L^4 t^2$
Y_{inf}	Función Y solución para yacimiento infinito, $m / L^4 t^2$
Y_{fin}	Función Y solución para yacimiento finito, $m / L^4 t^2$
Z	Coordenada vertical, L

\bar{z}	Factor de compresibilidad del gas natural bajo condiciones de presión y temperatura estática del yacimiento, fracción
α	Difusividad térmica, L^2 / t
β	Pseudocompresibilidad del gas, $L t^2 / m$
Δt	Tiempo de cierre, t
Δt_p	Definida por $F_w(\Delta t_p) = \bar{F}$ en la extrapolación lineal de la gráfica contra $\ln \Delta t$, t
ΔP	Caída de presión, $m / L t^2$
$\Delta P_{D(t_{bA})}$	Caída de presión adimensional debido a los efectos de las fronteras
δ	Densidad del fluido, m / L^3
η	Constante de difusividad hidráulica, L^2 / t
η'	Difusividad modificada, L^2 / t
\emptyset	Porosidad de la formación, fracción
e	Constante exponencial (2.7182818...)
π	Constante PI (3.14159265...)
ρ	Densidad del fluido, m / L^3
τ	Variable ficticia de integración, t
μ	Viscosidad del fluido, $m / L t$

SUBINDICES

D	Dimensionales
e	Espesor de un yacimiento laminar
g	Gas
i, j, x, y, z, r	Dirección de los ejes de permeabilidad
l	Líquido
t	Total
w	Localización de la fuente

FUNCIONES ESPECIALES

$$\eta' = \frac{k \frac{k_{rl}}{\mu_l} \frac{1}{B} (\delta l + \delta g R)}{\delta c_l \delta t}$$

$$R = \frac{k_{rg} \mu_l B \rho}{k_{rl} \mu_g} + S'$$

$$P_{D(MBH)} = \frac{P^* - \bar{P}}{q \mu / 4 \pi k h}$$

$$c_g = \frac{1}{\bar{P}} \left[1 - \frac{\bar{P}}{\bar{Z}} \left(\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \bar{P}} \right) \right]$$

$\left(\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \bar{P}} \right)$ Es la pendiente de la curva $Z = Z(P,T)$ en el punto correspondiente a las condiciones estáticas del yacimiento

$$\operatorname{erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X e^{-u^2} du, \text{ función error}$$

$$m_A = \frac{k t}{\theta \mu c A}$$

$$E_{i(-x)} = - \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du, \text{ integral exponencial}$$

$$m = -0.1833 \frac{q B \mu}{k h}$$

$$m^* = - \frac{q B}{\theta c_l h A}$$

TABLA 4

CONVERSIÓN DE UNIDADES

<u>Variable</u>	<u>Darcy, SI Unidades Métricas</u>	<u>Unidades Inglesas</u>
t_D	$\frac{k t}{\phi \mu c_l r_w^2}$	$\frac{0.000264 k t}{\pi \mu c_l r_w^2}$
q_D	$\frac{q B \mu}{2 \pi k h (P_i - P_{wf})}$	$\frac{141.2 q B \mu}{2 \pi k h (P_i - P_{wf})}$
Q_D	$\frac{Q}{2 \pi \phi c_l h r_w^2 (P_i - P_{wf})}$	$\frac{Q}{2 \pi \phi c_l h r_w^2 (P_i - P_{wf})}$
m	$\frac{0.1832 q B \mu}{k h}$	$\frac{162.6 q B \mu}{k h}$
c	$\text{atm}^{-1}, \text{Pa}^{-1}$	psi^{-1}
h	cm, m	ft
k	darcy, m^2	md
P	atm, Pa	psi
q	$\text{cm}^3 / \text{seg}, \text{m}^3 / \text{seg}$	barriles / día
r	cm, m	ft
t	seg, seg	hr
μ	cp, Pa-seg	cp

REFERENCIAS

- 1.- Muskat, M. : " The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media ". McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1946, Ch. 7, Sec. 10.13 .
- 2.- Miller, C.C., Dyes, A.E. and Hutchinson, G.A. : " The Estimation of Permeability and Reservoir Pressure from Bottom Hole Pressure Buildup Characteristics ", Journal of Petroleum Technology 2, 91, April 1950 .
- 3.- Brownscombe, E.R. and Kern, L.R. : " Graphical Solution of Single Phase Flow Problems ", The Petroleum Engineer, B-70, 1951 .
- 4.- Chatas, A.T. : " A Practical Treatment of Nonsteady State Flow Problems in Reservoir Systems, Part. 3 ", The Petroleum Engineer, B-44, August, 1953 .
- 5.- Matthews, C.S., Brons, F. and Hazebroek, P. : " A Method for Determination of Average Pressure in a Rounded Reservoir ", Trans. , AIME (1954) 201, 182 .
- 6.- Tek, M.R., Grove, M.L., and Poettmann, F.R. : " Method for Predicting the Back Pressure Behavior of Low Permeability Natural Gas Well ", Trans., AIME (1957) 210, 302 .
- 7.- Jones, F. : " Reservoir Limit Test on Gas Wells ", Journal of Petroleum Technology, June 1962, Pag 613 .

- 8.- Van Poolen, H.), : " Radius of Drainage and Stabilization Time Equations " , Oil and Gas Journal, September 1964 .
- 9.- Dietz, D.N. , : " Determination of Average Reservoir Pressure from Buildup Surveys " , Journal Petroleum Technology (Aug., 1965) 955-959.
- 10.- Earlougher, R.C., Jr., Ramey, H.J., Jr., Miller, F.G. and Mueller, T.D. , : " Pressure Distributions in Rectangular Reservoirs " , Journal Petroleum Technology (Feb., 1968) 199-208 .
- 11.- Earlougher, R.C., Jr. : " Estimating Drainage Shapes from Reservoir Limit Test " , Journal of Petroleum Technology (Oct., 1971) .
- 12.- Cinco Ley, H. and Gonzalez, M.A. , : " Un Metodo Práctico para Determinar el Area de Drene de un Pozo " , presentado en el XXI Congreso de la AIPM, Villahermosa, Tabasco, Mayo de 1983
- 13.- Matthews, C.S. and Russell, D.G. , : " Pressure Buildup and Flow Tests in Wells " , Monograph Series, Society of Petroleum Engineers, Dallas (1967) 1 .
- 14.- Earlougher, R.C., Jr. , : " Advances in Well Test Analysis " , Monograph Series, Society of Petroleum Engineers, Dallas (1977) 5.
- 15.- Gringarten, A.C. and Ramey, H.J., Jr. , : " The Use of Source and Green's Functions in Solving Unsteady-Flow Problems in Reservoirs " , Society of Petroleum Engineers Journal (Oct., 1973) 285-296 .

- 16.- Nisle, F.G. : " The Effect of (Partial) Penetration on Pressure Build-up in Oil Wells ". Trans., AIME (1958) Vol. 210, 85-90.
- 17.- Newman, A.B. : " Heating and Cooling Rectangular and Cylindrical Solids ". Ind. and Eng. Chem. (1936) Vol. 28, 545 .
- 18.- Hovanessian, S.A. : "Pressure Studies in Bounded Reservoirs". Soc. Pet. Eng. J. (Dec. 1961) 223-228; Trans., AIME, Vol.223.
- 19.- Bird, R.E. , Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. : " Fenómenos de Transporte ", Ediciones Repla, S.A., Mexico, D.F., 1967, Pág. 11-2 .
- 20.- Economides, C.E. and Ramey, H.J., Jr. : " Transient Rate Decline Analysis for Wells Produced at Constant Pressure ", Paper SPE 8087, Presented at the 54th Annual Fall Technical Conference, SPE of AIME, Las Vegas, Nevada, Sept. 23-26, 1979
- 21.- Van Everdingen, A.F. and Hurst, W., : " The Application of the LAPLACE Transformation to flow Problems in Reservoirs ", Trans., AIME (Dec., 1949), 305-324 .
- 22.- Abramowitz, M. and Stegun, I. : " Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables ", Dover Publications, Inc., New York, NY(1973) .
- 23.- Stehfest, H. : " Numerical Inversion of Laplace Transforms ", Communications of the ACM (Jan. 1970), 13, No. 1, 47-49, Algorithm 368 .

- 24.- Famey, H.J., Jr. and Cobb, W.M. : " A General Pressure Buildup Theory for a Well in a Closed Drainage Area ", Journal of Petroleum Technology (Dec., 1971) 1497-1505 .
- 25.- Cinco Ley, H. : " Comunicación personal " , 1990 .
- 26.- Joshi, S.D. : " A Review of Horizontal Well and Drainhole Technology ". Paper SPE 16868, Presented at the 62nd Annual Technical Conference, SPE of AIME, Dallas, Texas, Sept. 27-30 1987 .
- 27.- Gentry, F.W. and McCray, A.W. : " The Effect of Reservoir and Fluid Properties on Production Decline Curves " , Journal of Petroleum Technology. (Sept., 1978) 1327-1341 .
- 28.- Fetkovich, M.J. : " Decline Curve Analysis Using Type Curves", Journal of Petroleum Technology. (June, 1980) 1065-1077 .
- 29.- Fetkovich, M.J., Vienot, M.E., Bradley, M.D. and Kiesow, U.G. " Decline Curve Analysis Using Type Curves-Cases Histories " SPE Formation Evaluation, Dec. 1987, 637-656 .