

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PRUEBAS DE POZOS



Efecto de empuje parcial y fallas no sellantes en la determinación del área de drenaje en un pozo

Benjamín Armando Garzón Castro

Neiva, Huila, Abril de 2013

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PRUEBAS DE PRESIONES



Benjamín Armando Garzón Castro
Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director: Ph.D Freddy Humberto Escobar Macualo
Ingeniería de Petróleos

Neiva, Huila, Abril de 2013

CONTENIDO

	Pág.
1. RESUMEN DE LA PROPUESTA.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
2. RESULTADOS	4
2.1 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
2.1.1 Conceptos Generales	4
2.1.2 Caso 1. Dos fronteras de No-flujo	7
2.1.3 Caso 2. Dos fronteras de flujo	7
2.1.4 Caso 3. Mixtas (Una frontera de No-flujo y Una de flujo).....	8
2.1.5 Técnica de síntesis directa de Tiab (TDST)	10
2.1.6 Regímenes de Flujo	10
2.2 CAPÍTULO II: EFECTO DE LA TRANSPARENCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE DRENE.....	12
2.2.1 Procesamiento de Datos.....	15
2.3 CAPÍTULO III: ANÁLISIS LOCAL DE RESULTADOS	22
2.3.1 Pendiente en estado pseudoestable	22
2.3.2 Resultados estado estable	25
2.3.2.1 Máximo ($t_D * P'_D$).....	25
2.3.2.2 Mínimo ($t_D * P'_D$) y pendiente estado estable.....	28
2.3.3 Comportamiento de las constantes estado pseudoestable.....	32
2.3.4 Comportamiento de las constantes estado estable	35
2.3.5 Resultados globales	35
2.4 CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	38
2.4.1 Aplicación y resumen ecuaciones.....	43
2.4.2 Análisis económico.....	65
3. CONCLUSIONES.....	73
4. RECOMENDACIONES	74
5. BIBLIOGRAFÍA	75
6. NOMENCLATURA.....	77
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Yacimientos cuadrados: Casos 1, 2 y 3:	
Tabla 1. Pozo centrado frontera lateral, parcialmente activa.....	43
Tabla 2. Pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activas	44
Tabla 3. Pozo descentrado con frontera cercana parcialmente activa	45
Tabla 4. Pozo descentrado con frontera lejana parcialmente activa.....	46
Tabla 5. Pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activas	47
Yacimientos rectangulares, caso 1, 2 y 3.	
Tabla 6. Pozo centrado con frontera lateral parcialmente activa.....	48
Tabla 7. Pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activas	49
Tabla 8. Pozo descentrado con frontera cercana parcialmente activa	50
Tabla 9. Pozo descentrado con frontera lejana parcialmente activa.....	51
Tabla 10. Pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activa.....	52
Yacimientos cuadrados, caso 4.	
Tabla 11. Pozo centrado con fronteras hidráulicamente activas.....	53
Tabla 12. Pozo descentrado con fronteras hidráulicamente activas	53
Yacimientos rectangulares, caso 4	
Tabla 13. Pozo centrado con fronteras hidráulicamente activas.....	54
Tabla 14. Pozo descentrado con fronteras hidráulicamente activas	54

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Imagen del modelo para una región de drenaje cuadrado.....	33
Figura 2. Pozo centrado - Caso 1.....	35
Figura 3. Pozo centrado - Caso 2.....	36
Figura 4. Pozo descentrado a la derecha - Caso 1	36
Figura 5. Pozo descentrado a la izquierda – Caso 2	36
Figura 6. Pozo descentrado a la derecha – Caso 2.....	36
Figura 7. Pozo descentrado a la izquierda – Caso 1	36
Figura 8. Pozo descentrado a la derecha – Caso 3.....	37
Figura 9. Pozo descentrado a la izquierda – Caso 3	37
Figura 10. Pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activas	37

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ con presencia de estado pseudoestable para yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla <i>leaky</i> permeable derecha. Estado pseudoestable.....	12
Gráfica 2. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ con presencia de estado pseudoestable para yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla <i>leaky</i> permeable derecha. Estado estable.....	13
Gráfica 3. Resultado $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla <i>leaky</i> permeable derecha. (Ver anexo A, resultados generales, centrados y descentrados)....	14
Gráfica 4. Resultado $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas <i>leaky</i> permeables en sus fronteras. (Ver anexo A, resultados generales pozos centrados y descentrados con sus fronteras parcialmente activas).....	15
Gráfica 5. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla <i>leaky</i> permeable derecha. Estado pseudoestable y estable.....	16
Gráfica 6. Resultados $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla <i>leaky</i> permeable derecha. (Ver anexo A, resultados generales pozos centrado y descentrado con una o todas las fronteras parcialmente activas. Estado pseudoestable).....	17
Gráfica 7. Resultados $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla <i>leaky</i> permeable derecha. (Ver anexo A, resultados generales pozos centrado y descentrado con una o todas las fronteras parcialmente activas. Estado estable).....	17
Gráfica 8. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla <i>leaky</i> permeable derecha. Estado pseudoestable.....	18
Gráfica 9. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla <i>leaky</i> permeable derecha. Estado estable, Cumple para pozos centrado y descentrado con una o dos fronteras parcialmente activas.....	19
Gráfica 10. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas <i>leaky</i> permeables en sus fronteras. Estado estable.....	19
Gráfica 11. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ estado estable con presencia de máximo y mínimo de interés.....	20
Gráfica 12. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ estado estable con tres pendientes de interés.....	21
Gráfica 13. Comportamiento de la pendiente en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo centrado.....	23
Gráfica 14. Comportamiento de la pendiente en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la derecha.....	24
Gráfica 15. Comportamiento de la pendiente en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la izquierda.....	24
Gráfica 16. Comportamiento del máximo $t_D * P'_D$, en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo centrado.....	26
Gráfica 17. Comportamiento del máximo $t_D * P'_D$, en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la derecha.....	27
Gráfica 18. Comportamiento del máximo $t_D * P'_D$, en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la izquierda.....	27

Gráfica 19. Comportamiento del mínimo $t_D * P'_D$ en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo centrado.....	28
Gráfica 20. Comportamiento de la pendiente estado estable en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo centrado.....	29
Gráfica 21. Comportamiento del mínimo en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la derecha.....	29
Gráfica 22. Comportamiento de la pendiente estado estable en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la derecha.....	30
Gráfica 23. Comportamiento del mínimo en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la izquierda.....	30
Gráfica 24. Comportamiento de la pendiente estado estable en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la izquierda.....	31
Gráfica 25. Comportamiento de la constante en función de la eficiencia de flujo para el cálculo del área (intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial); resultado con pozo centrado. Estado pseudoestable.....	33
Gráfica 26. Comportamiento de la constante en función de la eficiencia de flujo para el cálculo del área, (intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial). Resultado con pozo descentrado a la derecha. Estado pseudoestable.....	34
Gráfica 27. Comportamiento de la constante en función de la eficiencia de flujo para el cálculo del área, (intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial). Resultado con pozo descentrado a la izquierda.....	34
Gráfica 28. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre estado estable y el flujo radial) resultado con pozo centrado.....	35
Gráfica 29. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre la primera y segunda pendiente) resultado con pozo centrado.....	36
Gráfica 30. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre estado estable y el flujo radial) resultado con pozo descentrado a la derecha.....	36
Gráfica 31. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre la primera y segunda pendiente) resultado con pozo descentrado a la derecha.....	37
Gráfica 32. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre estado estable y el flujo radial,) resultado con pozo descentrado a la izquierda.....	37
Gráfica 33. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre la primera y segunda pendiente) resultado con pozo descentrado a la izquierda.....	38
Gráfica 34. Simulación correspondiente a un yacimiento rectangular con frontera lateral parcialmente activa.....	53
Gráfica 35. Simulación correspondiente a un yacimiento rectangular con frontera lateral parcialmente activa.....	54
Gráfica 36. Simulación correspondiente a un yacimiento cuadrado con fronteras laterales hidráulicas parcialmente activas.....	56
Gráfica 37: Simulación correspondiente a un yacimiento rectangular con frontera lateral hidráulica parcialmente activa.....	57
Gráfica 38. Gráfico log-log de presión y derivada de presión para prueba real de un pozo descentrado cuadrado con fronteras laterales parcialmente activas.....	61

Gráfica 39. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con frontera lateral parcialmente activa.....	63
Gráfica 40. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activa.....	64
Gráfica 41. Gráfica semilogarítmico, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con todas las fronteras parcialmente activa.....	64
Gráfica 42. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con frontera lateral parcialmente activa.....	65
Gráfica 43. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activa.....	65
Gráfica 44. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con todas las fronteras parcialmente activas.....	66
Gráfica 45. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con frontera lateral parcialmente activa.....	67
Gráfica 46. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activas.....	67
Gráfica 47. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con todas las fronteras parcialmente activas.....	68
Gráfica 48. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con frontera lateral parcialmente activa.....	68
Gráfica 49. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activas.....	69
Gráfica 50. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con todas las fronteras parcialmente activas.....	69

INTRODUCCIÓN

Las pruebas de presión se practican en la industria con el fin de conocer las diferentes características del yacimiento como la permeabilidad k , daño o efecto skin s , radio del pozo, área de drenaje, entre otros. El conocimiento de estas características es de mucha utilidad para la elaboración de planes de acción que permitan elevar el valor del recobro.

Son diversas las técnicas utilizadas para la interpretación de las pruebas de presión. Los métodos encontrados en la literatura referente al tema se basan en el análisis convencional, interpretación mediante curvas tipo y el método TDST.

El método semilogarítmico, o análisis convencional, sólo hace una buena interpretación cuando se presentan todos los regímenes de flujo, lo cual no ocurre muy a menudo en las pruebas de presión, las cuales presentan dificultades para determinar correctamente los regímenes de flujo y el punto exacto donde éstos inician y terminan, lo que dificulta definir en forma apropiada las pendientes respectivas.

Las técnicas de ajustes por curvas tipo de presión contra tiempo, en escala semilogarítmica o logarítmica, extendida incluso a la derivada de presión, presentan poca exactitud debido a que es un procedimiento de ensayo y error. Además, su uso se restringe por el número limitado de curvas tipo disponibles.

En la técnica *Tiab's Direct Synthesis Technique*, TDST o traducida al español como Técnica de Síntesis Directa de Tiab, cada yacimiento presenta su propia "huella digital" en curvas de presión y derivada de presión contra tiempo. La TDST es una técnica revolucionaria que utiliza puntos y líneas características de cada régimen de flujo para establecer ecuaciones que permitan determinar los parámetros del pozo y yacimiento; por lo tanto, es importante extender esta técnica a geometrías específicas, como es el caso de los yacimientos fluviales de petróleo que pueden aproximarse a una geometría rectangular.

Así pues, este trabajo se planteó de la siguiente manera: en el primer capítulo se presentan brevemente los conceptos generales del uso de la ecuación de difusividad y el principio de superposición aplicado a estos tipos de yacimientos. El segundo capítulo comprende un análisis detallado del efecto de la transparencia en el desarrollo de una prueba de presión; también se ofrece una mirada al procedimiento realizado para la recopilación de datos y resultados. El tercer capítulo se basa en la interpretación de resultados y la obtención de ecuaciones que permitan la determinación del área en función de la transparencia. En el cuarto capítulo se presentan ejemplos de campo y simulados para la validación de la técnica propuesta. Finalmente, se dan las recomendaciones y conclusiones que se trazaron en este trabajo.

1. RESUMEN DE LA PROPUESTA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La determinación del área de yacimiento está íntimamente ligada a la presencia del flujo radial y estado pseudoestable o estable. A partir de la presencia de estos flujos se trazan las respectivas líneas de pendiente definida, y se observa el punto de intercepción de estas líneas; con el uso de este punto y fórmulas previamente establecidas se halla el área del yacimiento. Este procedimiento tiene validez siempre y cuando, para el estado existente en la prueba, exista una eficiencia absoluta de flujo. En la práctica, este escenario no se presenta en todas las oportunidades y posibilita que exista una eficiencia de flujo en la frontera.

Una variación en la eficiencia de flujo en las fronteras genera un panorama de transición entre la presencia de estado estable y pseudoestable que conduce a la imprecisión de la determinación del área, ya que para cada caso existe una constante.

En este sentido, se desconoce la forma en que afecta la prueba de presión la eficiencia de flujo en la frontera; por lo tanto se hace necesario establecer una metodología para la determinación del área del yacimiento en función de la transparencia.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Una cantidad significativa de pruebas de presión se llevan a cabo en yacimientos con geometría más o menos circular, alargados y estrechos (rectangulares), ya sean con fronteras cerradas o abiertas. Cuando se tienen identificados los parámetros, podemos tomar un explicativo del área de drenaje del yacimiento, la forma en que el yacimiento produce, y la magnitud de reservas recuperables; de tal forma, es posible tomar decisiones adecuadas para administrar y caracterizar el yacimiento.

Hasta el momento, los estudios encontrados para la identificación y determinación de los parámetros para este tipo de yacimientos se efectúan mediante técnicas convencionales (análisis de la línea recta) y análisis de curvas tipo logarítmico de presión y de derivada de presión. Estas últimas son básicamente procedimientos de ensayo y error que resultan tediosas de usar y además de contar con un número limitado de curvas tipo.

La identificación de puntos de intersección, líneas y pendientes características, permitirán el análisis de los parámetros, tales como permeabilidad, daño, ubicación del pozo y área del yacimiento.

Se ha visto que no todos los acuíferos aportan el 100% de eficiencia de empuje hidráulico; algunos aportan 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 y 10% de eficiencia y actualmente no existe un método para caracterizar analíticamente estos comportamientos. Es allí donde surge la necesidad de realizar un modelamiento de las variables ya mencionadas a distintas geometrías de yacimientos con características similares, e identificar el comportamiento dado, lo que es de suma importancia para las compañías petroleras: conocer un valor muy aproximado de las reservas de sus yacimientos ya que en términos económicos es lo que mueve a la industria hoy en día.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General.

Proporcionar una metodología para determinar el área de drenaje en yacimientos donde la eficiencia de empuje hidráulico varíe o que haya fallas no sellantes siguiendo la filosofía de la *Tiab's Direct Synthesis Technique*.

1.3.2 Específicos.

- Modelar las diferentes variables para obtener los interceptos de los distintos tipos de yacimientos alargados.
- Comparar los valores obtenidos con la nueva metodología e identificar cuál fue la desviación al asumir la condición de 100% de eficiencia de la barrera.
- Cuantificar la pérdida económica, el volumen y la estimación de reservas al incluir esta variable en la caracterización de estos yacimientos.
- Generar comportamientos de presión y derivada de presión contra tiempo para las distintas geometrías ya existentes para cada caso.

2. RESULTADOS

2.1 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

2.1.1 Conceptos Generales

Las técnicas del análisis de transientes de presión se basan en la ecuación de difusividad descrita para flujo de fluidos en medios porosos. Esta ecuación, en coordenadas cilíndricas, se expresa como:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\phi \mu c_i}{0.0002637k} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

La expresión anterior se obtiene mediante la combinación de la ecuación de balance de materia y la ley de Darcy, teniendo en consideración las siguientes premisas asumidas:

- El medio poroso homogéneo e isotrópico, horizontal, de espesor uniforme y permeabilidad y porosidad constantes.
- Un único fluido que satura 100 % el volumen poroso.
- La viscosidad y la compresibilidad del fluido se mantienen constantes a cualquier presión.
- El pozo penetra completamente la formación, y las fuerzas gravitacionales son despreciables.
- La densidad del fluido es gobernada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_o e^{[c(P-P_o)]} \quad (2)$$

Dónde:

ρ_o = La densidad del fluido a la presión, P_o , lbm/ft³

c = La compresibilidad del fluido, psi⁻¹.

Los términos adimensionales se definen de la siguiente forma:

Tiempo adimensional:

$$t_D = \frac{0.0002637kt}{\phi \mu c_i r_w^2} \quad (3)$$

Para un yacimiento rectangular se tiene en cuenta:

$$t_D \left(\frac{r_w^2}{y_E^2} \right) = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_i y_E^2} \quad (4)$$

Presión adimensional:

$$P_D = P_D(r_D, t_D)$$

$$P_D = \frac{kh}{141.2q\mu B} \Delta P \quad (5)$$

La solución de la ecuación de difusividad para un pozo de radio cero en un sistema infinito en forma adimensional es:

$$P_D(r_D, t_D) = -\frac{1}{2} Ei \left[-\frac{r_D^2}{4t_D} \right] \quad (6)$$

Teniendo en cuenta este concepto se usó el principio de superposición -método de las imágenes- para obtener el comportamiento de un pozo ubicado en un yacimiento rectangular con fronteras extremas de flujo (presión constante), no flujo o mixtas. Este método puede ser descrito como un procedimiento para distribución de fuentes o sumideros en un medio poroso infinito, donde los límites son fronteras de no-flujo o fronteras a presión constante. La localización de las imágenes es la misma para ambas fronteras. Incorporando la existencia de una frontera de presión constante se tiene la siguiente ecuación.

$$P_D(x_{D1}, y_{D1}, t_D) = -\frac{q_1}{2q} Ei \left(-\frac{r_{D1}^2}{4t_D} \right) - \frac{q_2}{2q} Ei \left(-\frac{r_{D2}^2}{4t_D} \right) \quad (7)$$

Asumiendo que $q = q_1 = -q_2$ Esta ecuación puede ser escrita como sigue:

$$P_D(x_{D1}, y_{D1}, t_D) = -\frac{1}{2} \left[Ei \left(-\frac{r_{D1}^2}{4t_D} \right) - Ei \left(-\frac{r_{D2}^2}{4t_D} \right) \right] \quad (8)$$

Para un pozo entre dos fronteras paralelas, se requieren un número infinito de imágenes para reproducir estas fronteras. Se consideraron tres parámetros como se expresa a continuación:

- Dos fronteras de no flujo
- Dos fronteras de flujo
- Una frontera de flujo y una frontera de no flujo

En cuanto a la distancia adimensional para los pozos imágenes, se encuentra que $r_{L,n}$ y $r_{r,n}$ son las distancias entre el pozo real y una imagen particular del pozo de orden n , sobre el lado izquierdo y derecho respectivamente. Sus valores se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$r_{L,n} = r_{L,(n+1)} + [1 - (-1)^n] a_x + [1 - (-1)^n] b_x \quad (9)$$

$$r_{r,n} = r_{r,(n+1)} + [1 - (-1)^n] b_x + [1 - (-1)^n] a_x \quad \dots \quad (10)$$

Dónde:

a_x = Distancia entre el pozo real y la frontera izquierda

b_x = Distancia entre el pozo real y la frontera derecha

La correspondiente distancia adimensional del pozo imagen es:

$$r_{DIL,n} = \frac{r_{L,n}}{X_E} \quad (11)$$

$$r_{Dir,n} = \frac{r_{r,n}}{X_E} \quad (12)$$

Donde X_E es la distancia entre las dos fronteras.

Considerando ahora el comportamiento de la presión en un punto, se encuentra que $G_{L,n}$ y $G_{r,n}$ son los símbolos de los coeficientes de los términos correspondientes a la contribución del pozo imagen a la presión y derivada de presión. $G_{L,n}$ se define como el símbolo de los términos debido a las n imágenes de pozo sobre el lado izquierdo, y $G_{r,n}$ el símbolo de los términos debido a las n imágenes de pozo sobre el lado derecho. Sus valores son +1 si el pozo imagen es productor y -1 si el pozo imagen es inyector.

2.1.2 Caso 1. Dos fronteras de No-flujo

Para este caso, los pozos imágenes son del mismo tipo del pozo real: productores. Así no habrá términos cambiantes en la sumatoria de los términos de contribución a las presiones adimensionales.

$$P_D(r_D, t_{DA}) = P_{Dr}(r_{Dr}, t_{DA}) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[P_D(r_{DIL,n}, t_{DA}) + P_D(r_{Dlr,n}, t_{DA}) \right] \quad (13)$$

O de otra manera:

$$P_D(r_D, t_{DA}) = -\frac{1}{2} \left[E_i \left(-\frac{r^2_{DR}}{4t_{DA}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[E_i \left(-\frac{r^2_{DIL,n}}{4t_{DA}} \right) + E_i \left(-\frac{r^2_{Dlr,n}}{4t_{DA}} \right) \right] \right] \quad (14)$$

La derivada de presión adimensional es:

$$P'_D(r_D, t_{DA}) = -\frac{1}{2t_{DA}} \left[\exp \left(-\frac{r^2_{DR}}{4t_{DA}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp \left(-\frac{r^2_{DIL,n}}{4t_{DA}} \right) + \exp \left(-\frac{r^2_{Dlr,n}}{4t_{DA}} \right) \right] \right] \quad (15)$$

2.1.3 Caso 2. Dos fronteras de flujo

De acuerdo con la técnica de las imágenes, al generar flujo en las fronteras cambia el tipo de las imágenes del pozo; los que anteriormente se definían como pozos productores ahora son pozos inyectores. Así, este tipo de fronteras son llamadas “Líneas de presión constante”, por consiguiente, no todos los pozos imágenes son del mismo tipo del pozo real, productores, y ahora son términos cambiantes en la presión y derivada de presión. Los términos tienen la misma variación en ambos lados, tal como:

$$G_{L,n} = G_{r,n} = (-1)^n \quad (16)$$

La presión adimensional es:

$$P_D(r_D, t_{DA}) = P_{Dr}(r_{Dr}, t_{DA}) + \sum_{n=1}^{\infty} G_{L,n} \left[P_D(r_{DIL,n}, t_{DA}) + P_D(r_{Dlr,n}, t_{DA}) \right] \quad (17)$$

O de otra manera:

$$P_D(r_D, t_{DA}) = -\frac{1}{2} \left[E_i \left(-\frac{r^2}{4t_{DA}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} G_{L,n} \left[E_i \left(-\frac{r^2}{4t_{DA}} \right) + E_i \left(-\frac{r^2}{4t_{DA}} \right) \right] \right] \quad (18)$$

La derivada de presión adimensional.

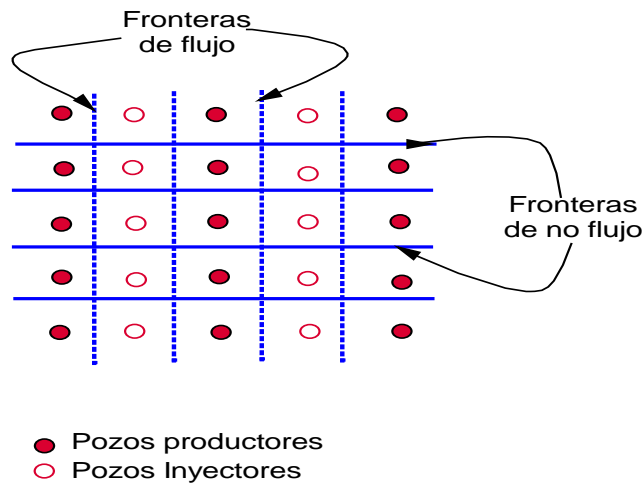
$$P'_D(r_D, t_{DA}) = -\frac{1}{2t_{DA}} \left[\exp \left(-\frac{r^2}{4t_{DA}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} G_{L,n} \left[\exp \left(-\frac{r^2}{4t_{DA}} \right) + \exp \left(-\frac{r^2}{4t_{DA}} \right) \right] \right] \quad (19)$$

2.1.4 Caso 3. Mixtas (Una frontera de No-flujo y Una de flujo)

Similar al caso anterior. No todos los pozos imágenes son del mismo tipo del pozo real: productores. De esta manera existen términos cambiantes en la presión y derivada de presión adimensional. $G_{F,n}$ es el símbolo de los términos debido a las n imágenes del pozo sobre el lado de frontera de flujo, y $G_{NF,n}$ es el símbolo de los términos debido a las n imágenes del pozo sobre un lado de frontera de no flujo. Así pues, se tiene que:

$$G_{F,n} \neq G_{NF,n} \quad (20)$$

Figura 1. Imagen del modelo para una región de drenaje cuadrado.



$$G_{F,n} = (-1)^n G_{F,(n-1)} \quad (21)$$

$$G_{NF,n} = (-1)^{(n-1)} G_{NF,(n-1)} \quad (22)$$

La presión adimensional es:

$$P_D(r_D, t_{DA}) = P_{DR}(r_{DR}, t_{DA}) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[G_{L,n} P_D(r_{DIL,n}, t_{DA}) + G_{r,n} P_D(r_{Dir,n}, t_{DA}) \right] \quad (23)$$

O de otra manera:

$$P_D(r_D, t_{DA}) = -\frac{1}{2} \left[E_i \left(-\frac{r_{DR}^2}{4t_{DA}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[G_{L,n} E_i \left(-\frac{r_{DIL,n}^2}{4t_{DA}} \right) + G_{r,n} E_i \left(-\frac{r_{Dir,n}^2}{4t_{DA}} \right) \right] \right] \quad (24)$$

La derivada de presión adimensional.

$$P'_D(r_D, t_{DA}) = -\frac{1}{2t_{DA}} \left[\exp \left(-\frac{r_{DR}^2}{4t_{DA}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[G_{L,n} \exp \left(-\frac{r_{DIL,n}^2}{4t_{DA}} \right) + G_{r,n} \exp \left(-\frac{r_{Dir,n}^2}{4t_{DA}} \right) \right] \right] \quad (25)$$

Donde $G_{L,n}$ y $G_{r,n}$ tienen el mismo significado en el caso de dos fronteras de flujo, pero ellos podrían tener la misma relación particular con la nueva definición de los coeficiente $G_{F,n}$ y $G_{NF,n}$, dependiendo de la posición de las fronteras de flujo y no flujo (Ver Figura 1).

- Una frontera de no flujo paralela a una frontera de flujo.

$$G_{L,n} = G_{NF,n} \quad (26)$$

$$G_{r,n} = G_{F,n} \quad (27)$$

- Una frontera de flujo paralela a una frontera de no flujo.

$$G_{L,n} = G_{F,n} \quad (28)$$

$$G_{r,n} = G_{NF,n} \quad (29)$$

2.1.5 Técnica de síntesis directa de Tiab (TDST)

La TDST es una técnica para la interpretación de las pruebas de presión usando gráficos log-log de presión y derivada de presión contra tiempo para calcular los parámetros del yacimiento sin utilizar ajuste por curvas tipo. Esta técnica identifica líneas y puntos característicos, los cuales se obtienen de la intersección de varias porciones de líneas rectas de la curva de presión y derivada de presión, pendientes y puntos de partida de estas líneas rectas. Estos puntos, pendientes y tiempos iniciales son entonces usados con ecuaciones apropiadas para determinar directamente la permeabilidad, el efecto de almacenamiento, el tamaño del yacimiento, el daño en el pozo y el daño causado por el cambio de régimen de flujo de lineal a radial.

2.1.6 Regímenes de Flujo

Flujo Radial: Se presenta al inicio de la prueba con pendiente en la curva de derivada de presión adimensional igual a cero y con corte en $t_D * P_D' = 0.5$.

Flujo Dual Lineal: El flujo dual lineal, denominado en la literatura doble flujo lineal o flujo lineal en dos direcciones, se presenta en todas las gráficas con una pendiente de $1/2$ en la curva de derivada de presión. Es el régimen más característico para el yacimiento rectangular planteado, y se muestra con mayor claridad cuando el pozo se ubica en el centro del mismo

Flujo Lineal: Es el flujo lineal en una sola dirección, o lineal puro. Se presenta sólo en el grupo de gráficas de “pozo cerca de la frontera cerrada” con pendiente en la curva de derivada de presión igual a $1/2$, y se muestra con mayor claridad cuando el pozo se ubica sobre una frontera. En las gráficas se observa que cuando el pozo tiende a acercarse a la frontera cerrada, el flujo lineal aumenta y el flujo dual lineal disminuye y que existe un periodo de transición entre estos dos flujos.

Flujo Pseudohemisférico (pendiente $-1/2$): En las gráficas cuando el “pozo se acerca a la frontera abierta” no se presenta la línea de flujo lineal con pendiente igual a $1/2$; es decir, después de que termina el flujo dual lineal y toca la frontera de presión constante debería presentarse, pero la tendencia muestra un Flujo con Pendiente $-1/2$ que en términos generales se reconoce como Flujo Hemisférico o Esférico, pero que para nuestro caso es el resultado de la acción simultánea de la frontera de flujo estable y del flujo lineal.

Estado Pseudoestable: Este período de flujo se origina en el grupo de pozos cerca de la frontera de no flujo, cuando la onda de presión toca la frontera lejana de no flujo y se reconoce por una pendiente unitaria en la curva de derivada de presión; a tiempos muy

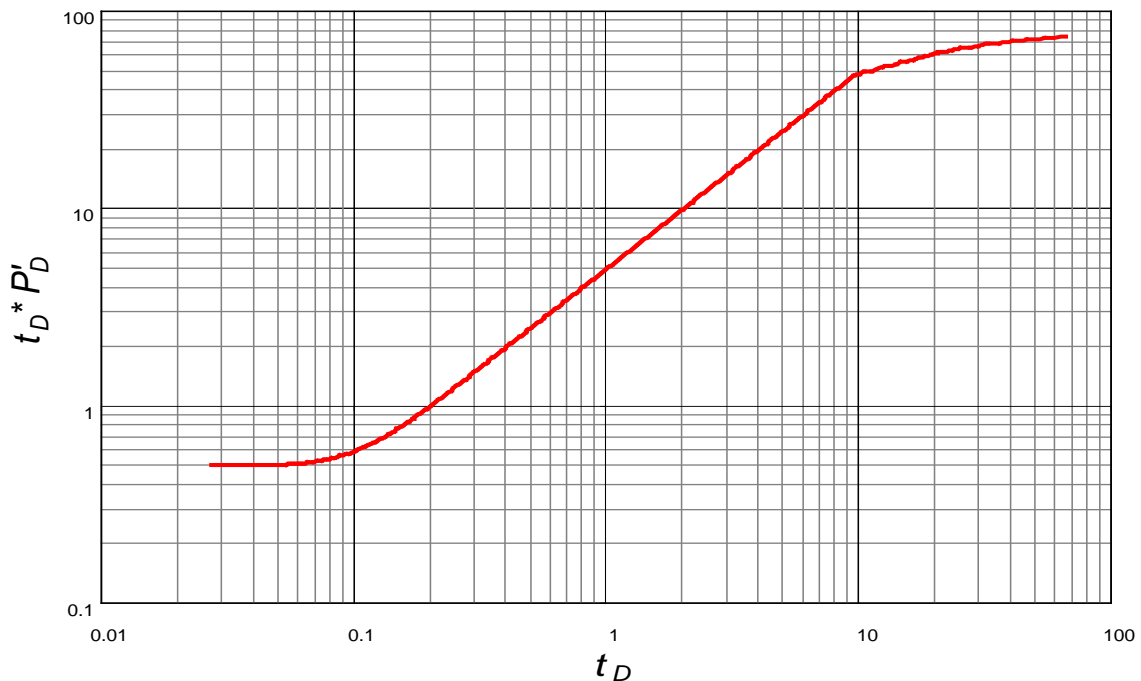
tardíos, la curva de presión se aproxima a la de la derivada de presión formando una sola línea. Cuando en una prueba de presión se alcanza este flujo, se espera que se presenten en totalidad los regímenes de flujo anteriormente mencionados. Para el grupo de gráficas cuando el “pozo se acerca a la frontera abierta”, y la frontera lejana es cerrada, la línea de pendiente 1 de flujo pseudo estable no se presenta. Aquí se observa que la curva de derivada de presión se levanta un poco hasta un punto máximo y luego cae, debido a la influencia de la frontera de presión constante.

Estado Estable: Este período de flujo se origina cuando el transiente de presión toca la frontera de flujo presión constante y se presenta como una caída en la curva de derivada de presión cuando se alcanza la frontera.

2.2 CAPÍTULO II: EFECTO DE LA TRANSPARENCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE DRENE

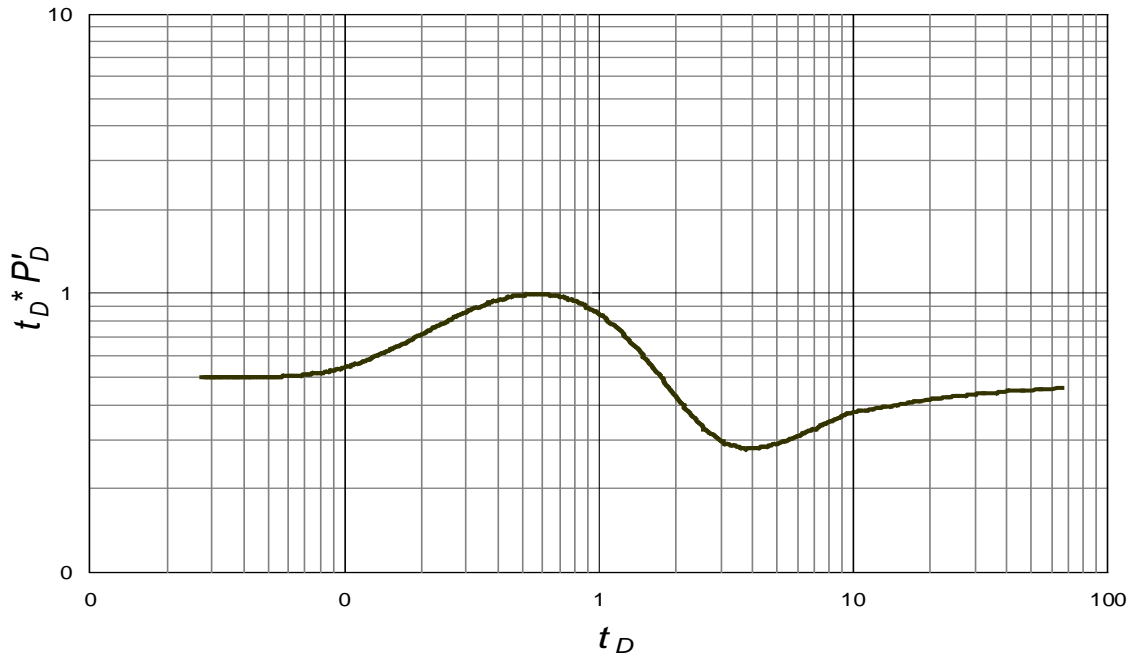
Para la obtención de datos a partir de procesos de simulación, se hace necesario conocer dos factores necesarios para la existencia de empuje hidráulico de manera regulada: el primero de ellos es la presencia de una frontera permeable y el segundo, muy ligado a la falla, es la eficiencia con que esta falla moviliza fluidos *ef*.

De manera convencional se han establecido dos patrones de flujo, en las fronteras, que han sido ampliamente estudiados. El primero de ellos es la inexistencia de flujo en las fronteras, caracterizado en las pruebas de presión por una respuesta de la derivada de presión con pendiente unitaria (1), ver gráfica 1. Este caso es conocido como estado pseudoestable.



Gráfica 1. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ con presencia de estado pseudoestable para yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla *leaky* permeable derecha. Estado pseudoestable.

El segundo caso representa un sistema de presión constante en la frontera, causado por la presencia de flujo hidráulico absoluto y reconocido por una caída en los datos de derivada de presión con pendiente unitaria negativa (-1) en la gráfico log-log; para éste caso se denota como estado estable. Ver gráfica 2.



Gráfica 2. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ con presencia de estado pseudoestable para yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla *leaky* permeable derecha. Estado estable.

Ahora se hace necesario conocer todo un espectro de escenarios, en el cual existe una eficiencia de flujo en la frontera o un estado de transición entre el estado estable y pseudoestable.

A partir de esta premisa se establece un yacimiento el cual será simulado con un software comercial y el uso de herramientas analíticas de dicho programa; se genera así una familia de curvas que representen el comportamiento de dicha prueba de presión variando la eficiencia de flujo en la frontera. Los datos utilizados para la simulación son los siguientes:

Caudal,	$q = 300$ Bbl/Día
Tiempo,	$t = 10000000$ horas
Daño al yacimiento,	$s = 0$
Almacenamiento en el pozo,	$C = 0$ bbl/psi
Espesor de la formación,	$h = 100$ Pies
Compresibilidad de la formación,	$c_t = 3 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹
Radio del pozo,	$r_w = 0.33$ pies
Porosidad,	$\phi = 18$ %
Presión inicial,	$P_i = 6000$ psi
Factor volumétrico,	$B_o = 1.3$ bbl
Densidad del aceite,	$\rho = 52$ lb/ft ³

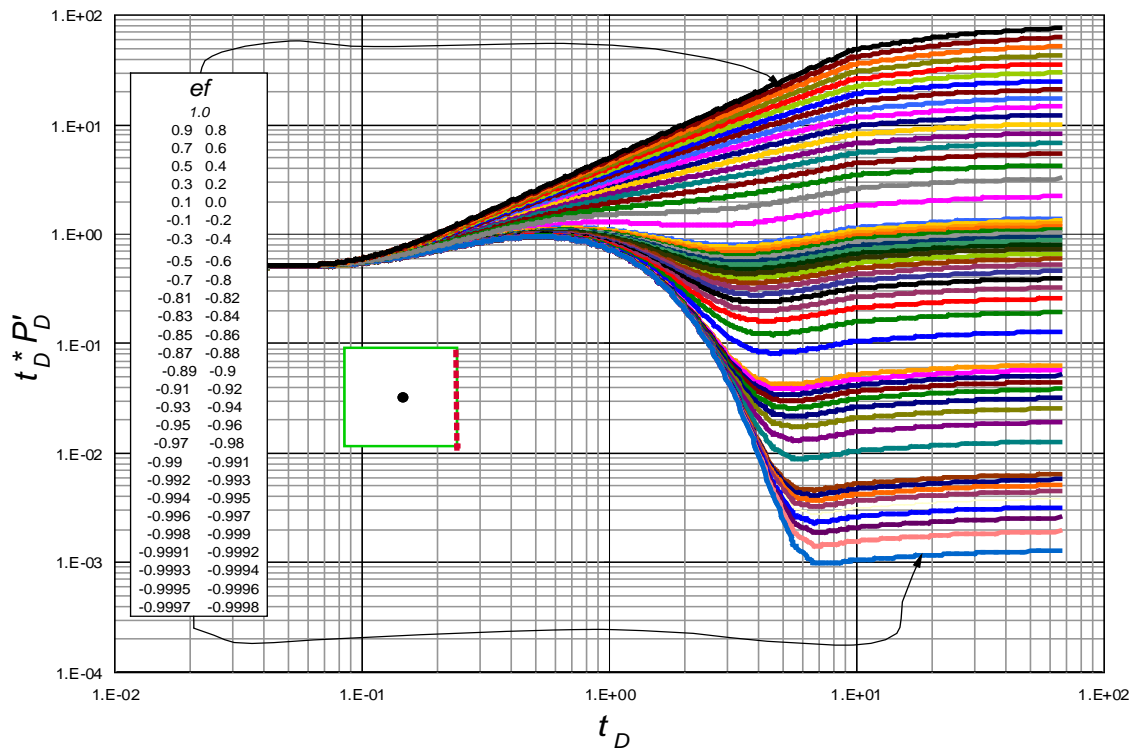
Yacimiento homogéneo, fronteras paralelas.

Para este caso se simularon varios yacimientos con iguales características y cuatro (4) escenarios para cada uno de estos. Los yacimientos simulados varían únicamente en la ubicación del pozo en el yacimiento, ya que se maneja en el primer caso un pozo centrado, los dos últimos casos de un pozo descentrado (descentrado a la derecha y el tercer pozo descentrado a la izquierda) y el cuarto, toma los casos 1, 2 y 3, pero difiere que todas sus fronteras están hidráulicamente activas. Los escenarios simulados son:

- Caso 1. Yacimiento con frontera derecha hidráulicamente activa
- Caso 2. Yacimiento con frontera izquierda hidráulicamente activa
- Caso 3. Yacimientos con fronteras laterales hidráulicamente activas
- Caso 4. Yacimiento con todas las fronteras hidráulicamente activas

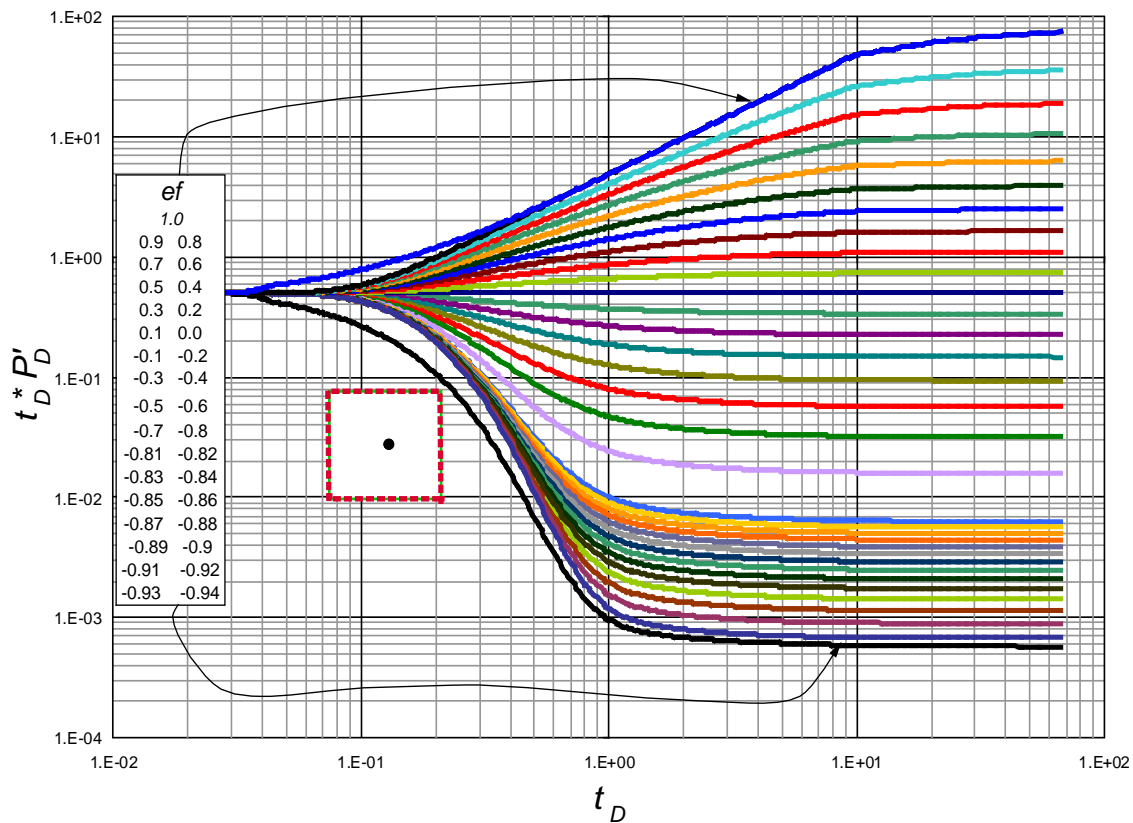
Una vez obtenidas todas las simulaciones, se realizaron los siguientes procedimientos para la obtención de los resultados a analizar:

Los resultados generales para los yacimientos con dos o menos fronteras hidráulicamente activa (Centrado y descentrado), se presentan en la gráfica 3.



Gráfica 3. Resultado $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable derecha. (Ver anexo A, resultados generales, centrado y descentrado).

Los resultados obtenidos para pozos centrados y descentrados con sus fronteras parcialmente activas, se observan en la gráfica 4:



Gráfica 4. Resultado $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas leaky permeables en sus fronteras. (Ver anexo A, resultados generales pozos centrados y descentrados con sus fronteras parcialmente activas).

2.2.1 Procesamiento de Datos

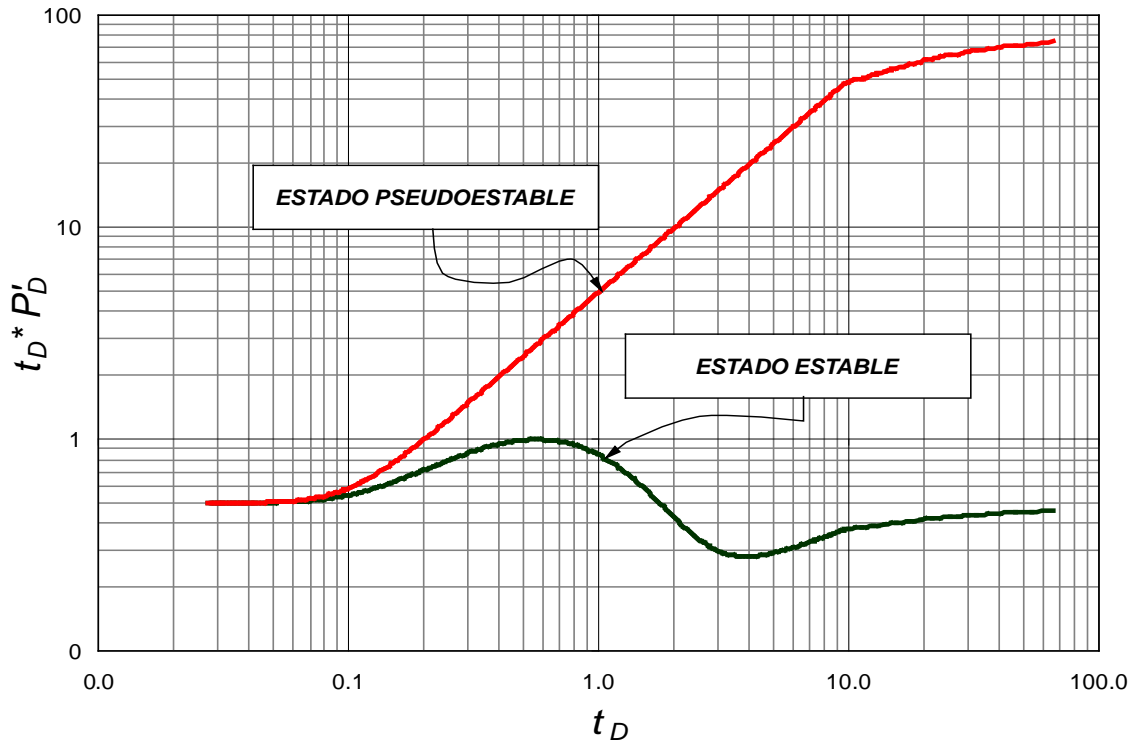
Se desarrolló un programa en lenguaje MatLab que permitiera leer los resultados obtenidos y trabajar con los datos que se tienen a disposición. Para la obtención de los resultados que serán analizados se procedió de la siguiente forma:

- Determinación del estado desarrollado

Criterio de selección: al observar el comportamiento de las gráficas se determinó la existencia de dos patrones claves, en el estado pseudoestable; la gráfica parte de un valor mínimo y los valores de la derivada aumentan progresivamente. Se dedujo que el valor posterior siempre es mayor que el anterior; debido a ésto, si se resta el valor

posterior al anterior se debe obtener un vector de valores positivos, esto identifica en términos de programación un conjunto de datos que representan un comportamiento pseudoestable.

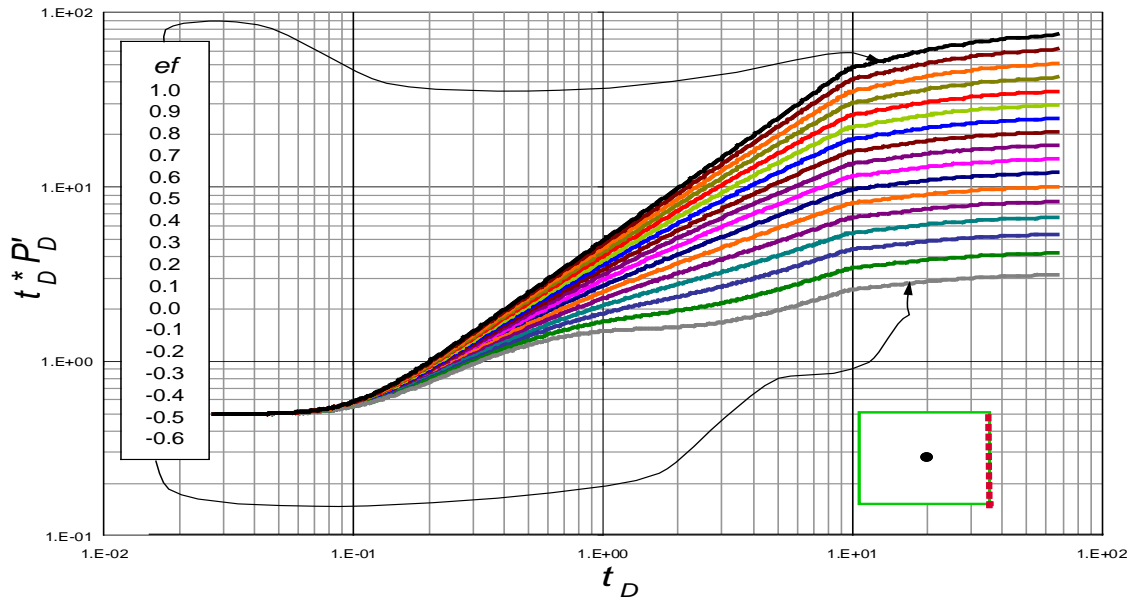
Para el estado estable; parte de un valor máximo, y los valores de la derivada disminuyen progresivamente, tomo el mismo criterio de selección del estado pseudoestable pero la resta de datos son valores negativos. Ver gráfica 5.



Gráfica 5. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable derecha. Estado pseudoestable y estable.

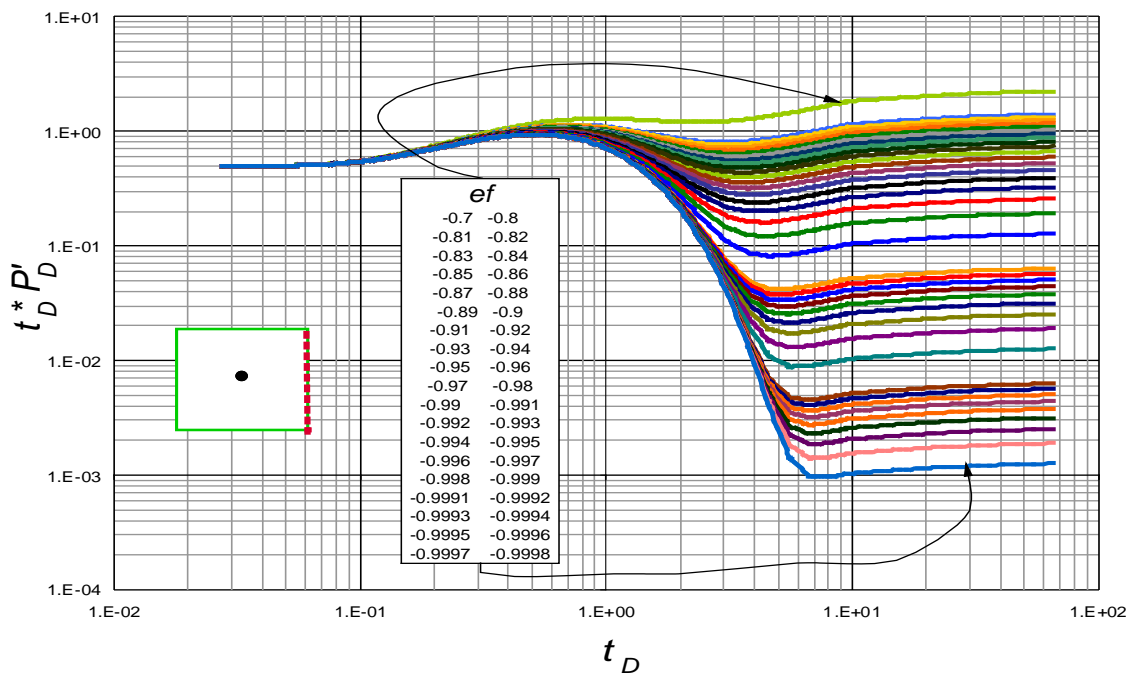
De esta manera, se procede a identificar a cuál estado corresponde los resultados obtenidos (pseudoestable y estable) ya que cada estado cuenta con su propia constante para la determinación del área.

La gráfica 6 presenta los resultados donde se observa la presencia del estado pseudoestable:



Gráfica 6. Resultados $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla *leaky* permeable derecha. (Ver anexo A, resultados generales pozos centrado y descentrado con una o todas las fronteras parcialmente activas. Estado pseudoestable).

La gráfica 7 corresponde al conjunto de resultados obtenidos que presentan estado estable:

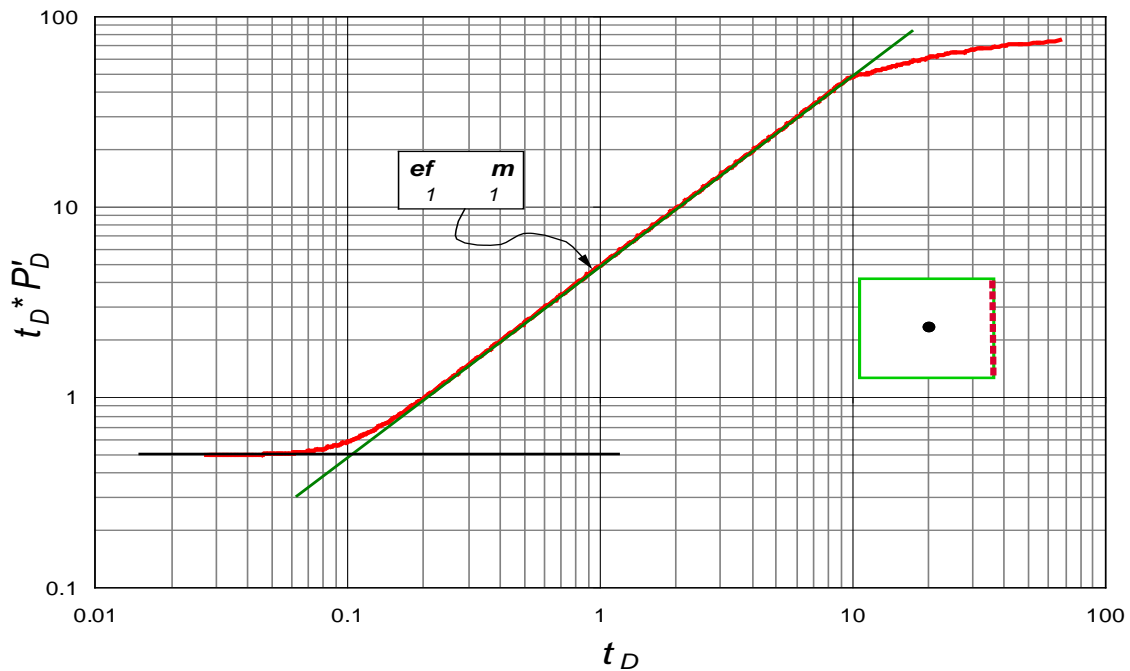


Gráfica 7. Resultados $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla *leaky* permeable derecha. (Ver anexo A, resultados generales pozos centrado y descentrado con una o todas las fronteras parcialmente activas. Estado estable).

Si bien identificar el estado de una prueba es el primer paso para la obtención de resultados concretos, el objetivo de este capítulo es reconocer todos los patrones y características que presenten todas las pruebas, con el fin de disponer de la mayor información posible para analizar.

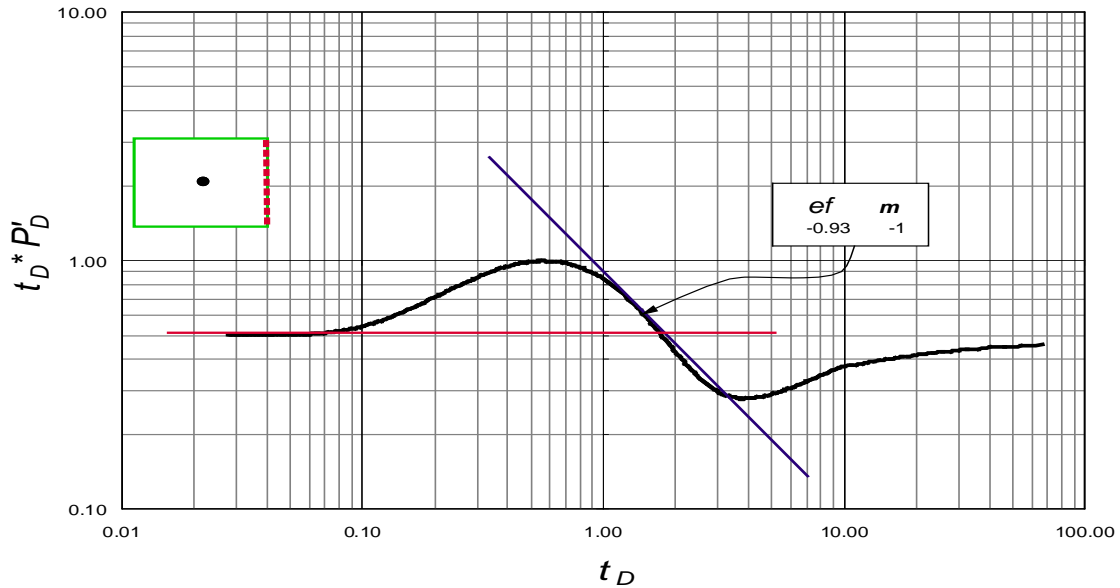
El paso a seguir es caracterizar cada una de las simulaciones obtenidas, sacando los parámetros de interés con el fin de disponer de resultados globales; éstos, deben permitir determinar una tendencia que evidencie el efecto de eficiencia de flujo en la frontera en el perfil de presiones de un yacimiento.

En la gráfica 8, se evidencia la presencia del estado pseudoestable. Los parámetros característicos de este gráfico son la sección lineal del estado pseudoestable y el flujo radial; estas dos líneas características se utilizan para determinar un punto de intersección de estas dos líneas para poder determinar el área del yacimiento.



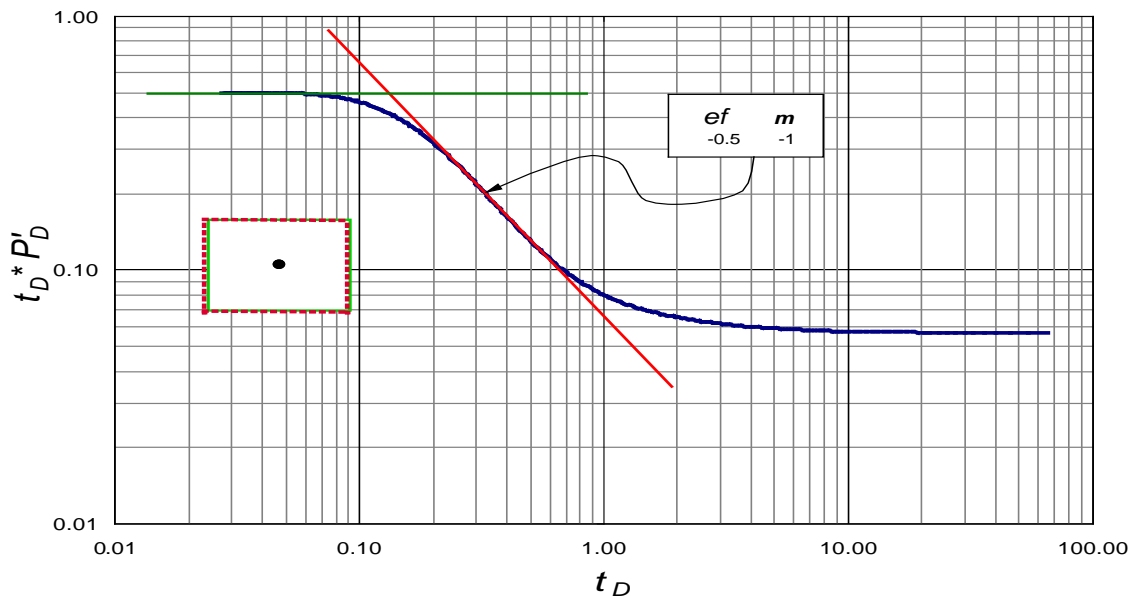
Gráfica 8. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla *leaky* permeable derecha. Estado pseudoestable.

La gráfica 9 describe el estado estable común para yacimientos con falla Leaky permeable en su frontera derecha, izquierda o en sus dos fronteras laterales “parcialmente activas” (caso 1, 2 y 3); difiere del estado pseudoestable por poseer un punto máximo y mínimo en la gráfica de derivada de presión y por desarrollar el estado en estos dos puntos de interés.



Gráfica 9. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable derecha. Estado estable, Cumple para pozos centrado y descentrado con una o dos fronteras parcialmente activas.

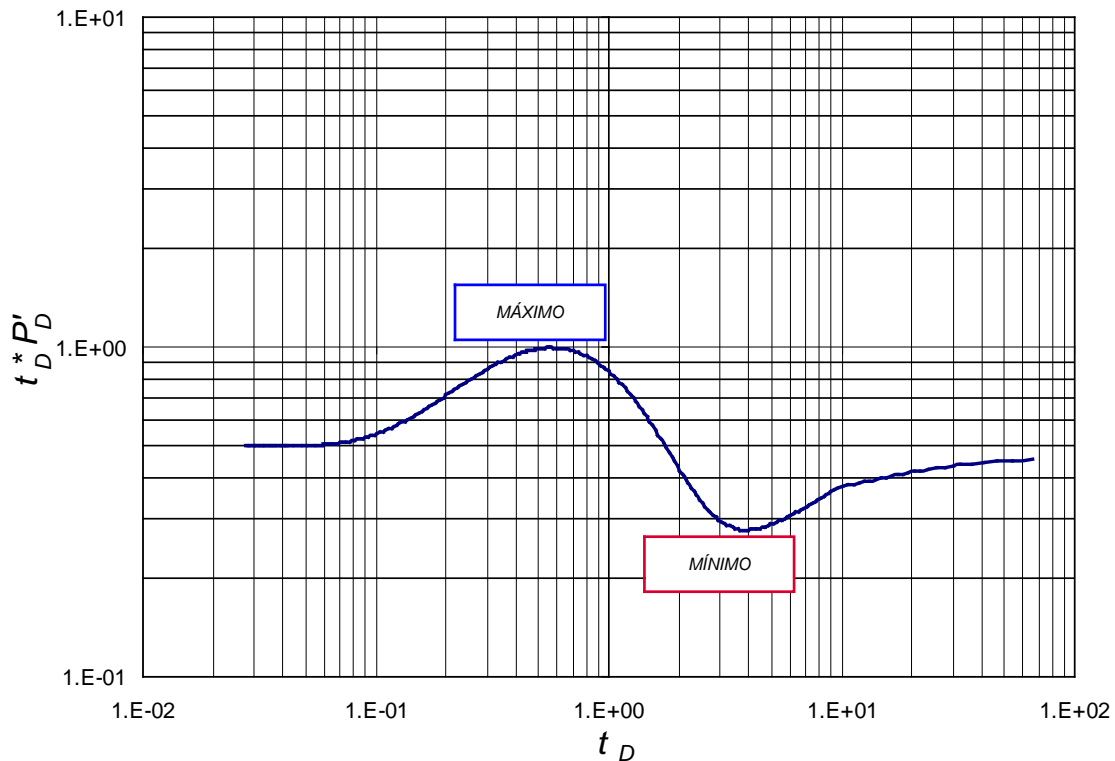
Existe un tipo particular de resultado para estado estable visto únicamente cuando se realiza la simulación de un yacimiento con todas las fronteras hidráulicamente activas; cuando se simulan valores de transparencia que corresponde a flujo en estado estable, solo se evidencia una pendiente negativa (-1), (ver gráfica 10). El sistema de análisis para este caso será similar al usado en el caso del estado pseudoestable.



Gráfica 10. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas leaky permeables en sus fronteras. Estado estable.

- Determinación de los máximos y mínimos en las gráficas con estado estable.

Se observó en la gráficas 3 y 7 la respuesta particular que se obtiene cuando la prueba muestra estado estable. La primera característica a analizar son los máximos y mínimos de interés, ver gráfica 11. Es importante discriminar estos puntos del conjunto total de datos ya que se dispone en ocasiones de un máximo global y un mínimo global que corresponde a los datos extremos del conjunto de datos, los cuales no son de interés.



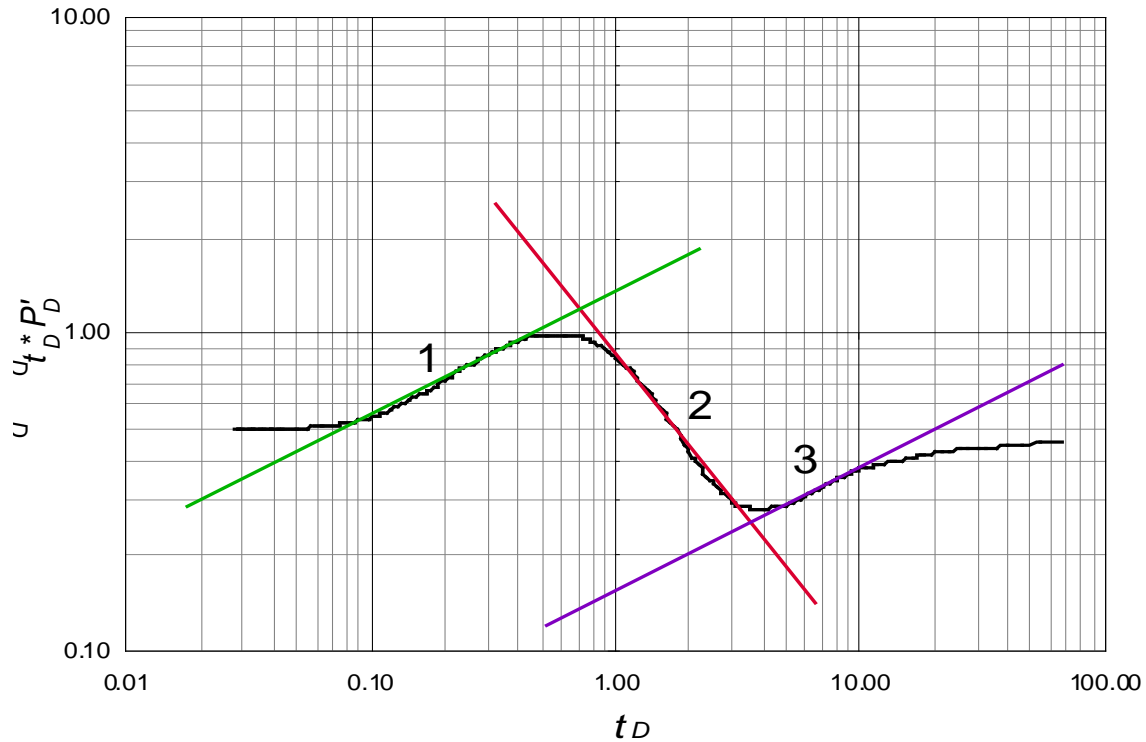
Gráfica 11. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ estado estable con presencia de máximo y mínimo de interés.

- Determinación de la pendiente en las zonas de interés

A partir de la presencia de máximos y mínimos se evidencia tres pendientes, ver gráfica 12. Ellas corresponden a las siguientes secciones:

- Conjunto de datos que preceden al máximo $t_D * P'_D$ de interés.
- Datos comprendidos entre el máximo y mínimo $t_D * P'_D$ de interés.
- Datos posterior al mínimo de interés $t_D * P'_D$.

Se procede a separar los datos, los cuales serán objeto de estudio y mediante regresión no lineal se determina la pendiente que encaja en dichos datos. Como parámetro de validación se utiliza el coeficiente de correlación “R”. La tolerancia para este análisis es 0.9999. Todos los ajustes realizados se basan en una ecuación de tipo exponencial.



Gráfica 12. $\log t_D * P'_D$ Vs. $\log t_D$ estado estable con tres pendientes de interés.

- Ajuste dimensional para la determinación del área

Debido a que los datos se trabajaron de forma adimensional, se utilizó la siguiente ecuación para transformarlos y volverlos dimensionales:

$$t_r = \frac{t_{DA} \phi \mu c_t A}{0.0002637k} \quad (30)$$

Posterior a ello se calcula la constante de ajuste para el valor del área simulada

$$\mathfrak{F}^* = \frac{kt_{rpsi}}{A \phi \mu c_t} \quad (31)$$

Se repite el procedimiento para cada una de las simulaciones realizadas con el fin de obtener una familia de datos.

2.3 CAPÍTULO III: ANÁLISIS LOCAL DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos varían si el estado que se analiza es estable o pseudoestable. El objetivo de esta investigación es conocer la tendencia que experimentan estos yacimientos cuando se presenta algún grado de eficiencia de flujo en las fronteras. Cabe destacar que los resultados se encuentran representados como un conjunto de datos, donde son referenciados como ejemplos y estos se refieren a los siguientes casos:

- Caso 1: Frontera derecha hidráulicamente activa
- Caso 2: Frontera izquierda hidráulicamente activa
- Caso 3: Fronteras laterales hidráulicamente activa
- Caso 4: Todas las fronteras hidráulicamente activa

Una de las características generales más representativas dentro del análisis para los estados estable y pseudoestable; es la estrecha relación que coexiste en todos los resultados para las geometrías establecidas (cuadrada y rectangular), posición del pozo y la falla *Leaky* permeable en las fronteras de dichas geometrías; tales características son:

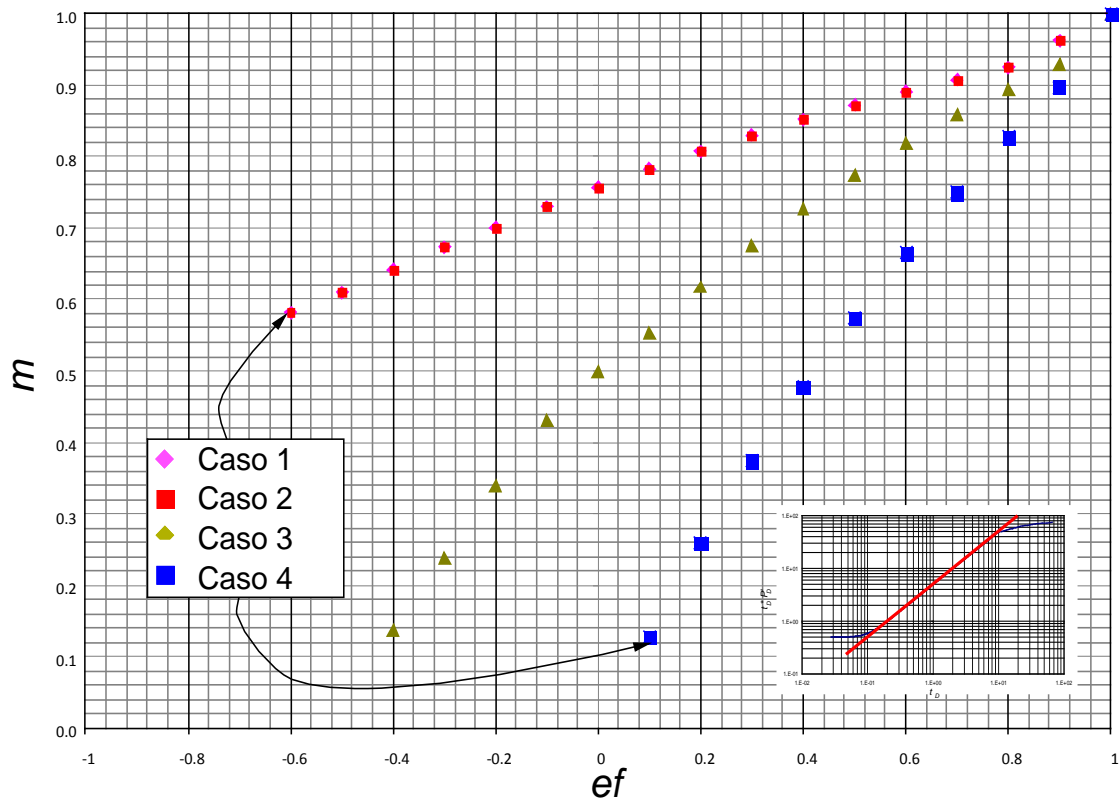
- Se observó que para pozos descentrado a la derecha, los casos 1, 2, 3 y 4 son iguales a los casos 2, 1, 3 y 4 respectivamente, para pozo descentrado a la izquierda.
- Para pozos centrados, se observó una igualdad en los resultados para los casos 1, 2 y una singularidad para los casos 3 y 4.

A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos para cada una de las características encontradas en el capítulo anterior:

2.3.1 Pendiente en estado pseudoestable

Las gráficas 13, 14 y 15, se observa una clara variación en el valor que adquiere la pendiente para el estado pseudoestable. Se ratifica el hecho que para una eficiencia de no flujo absoluto, la pendiente tiene un valor unitario (1) y el valor de este decrece a medida que disminuye el valor de la eficiencia de flujo.

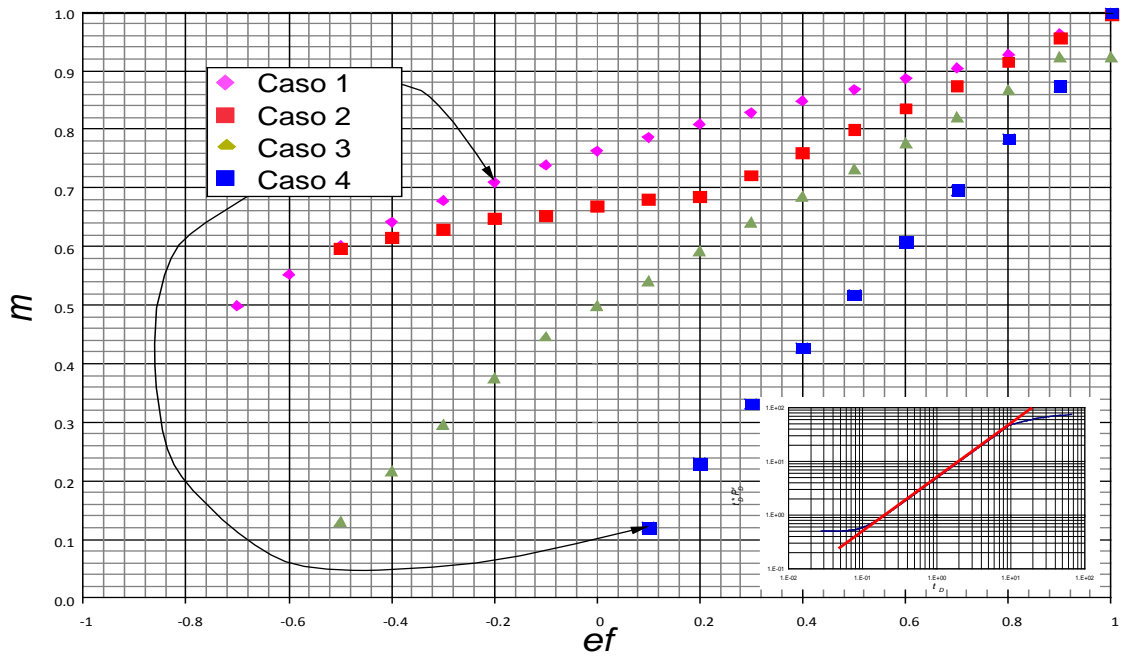
Comportamiento de la pendiente m en la eficiencia de flujo ef , para yacimientos cuadrados y rectangulares, con pozo centrado, ver gráfica 13:



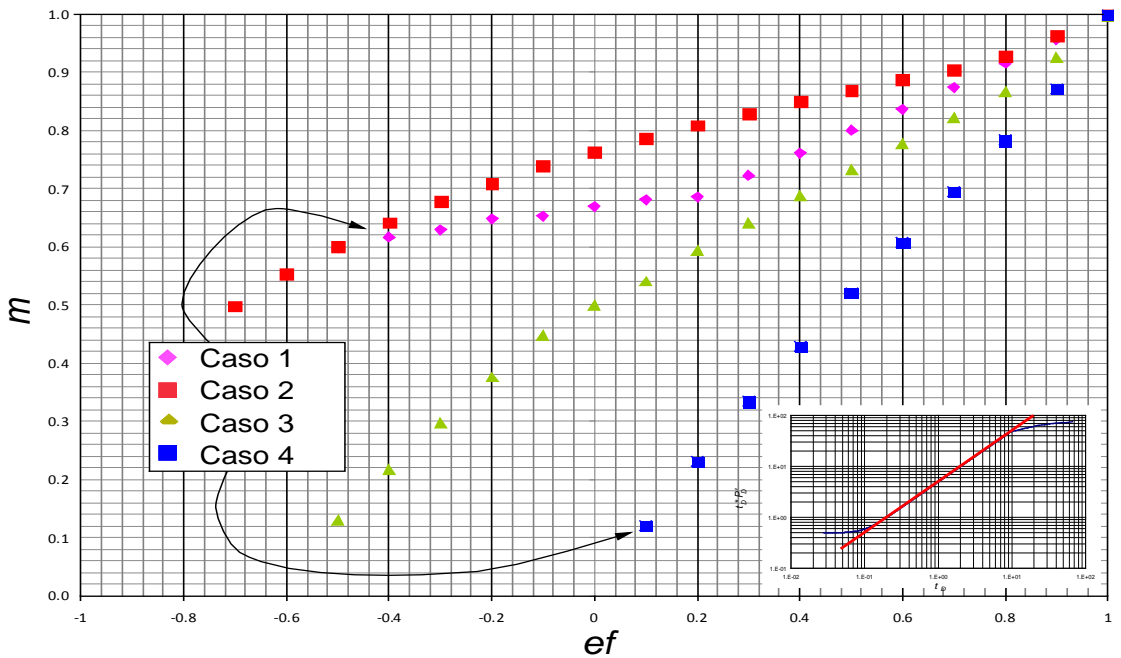
Gráfica 13. Comportamiento de la pendiente en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo centrado.

- Los resultados obtenidos para los casos uno (frontera derecha parcialmente activa) y dos (Frontera izquierda parcialmente activa), indica que la equidistancia de la frontera al pozo proporciona un perfil de datos con una igualdad de condiciones para ambos casos, esto se debe a la posición del pozo.
- Se observa una clara desviación en los resultados obtenidos para el caso tres (pozo con fronteras laterales activas) y cuatro (pozo con todas las fronteras hidráulicamente activas), lo que indica que la cantidad de fronteras con eficiencia de flujo afecta la pendiente del estado pseudoestable.

Comportamiento de la pendiente m en la eficiencia de flujo ef , para yacimientos cuadrados y rectangulares, con pozo descentrado (derecha o izquierda), (ver gráfica 14 y 15).



Gráfica 14. Comportamiento de la pendiente en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la derecha.



Gráfica 15. Comportamiento de la pendiente en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la izquierda.

- Se observa la injerencia de la ubicación del pozo en los resultados obtenidos, a mayor proximidad del pozo a la frontera y a mayor eficiencia de flujo, mayores van a ser los valores de las pendientes obtenidas.
- Existe una desviación apreciable en los resultados obtenidos por efecto de la ubicación del pozo; los resultados para estos casos, nunca serán menores a los resultados obtenidos con dos fronteras parcialmente activas.
- Para el caso de una sola frontera activa y pozo ubicado lejos de dicha frontera los resultados demuestran que los valores de la pendiente se hacen mayores.

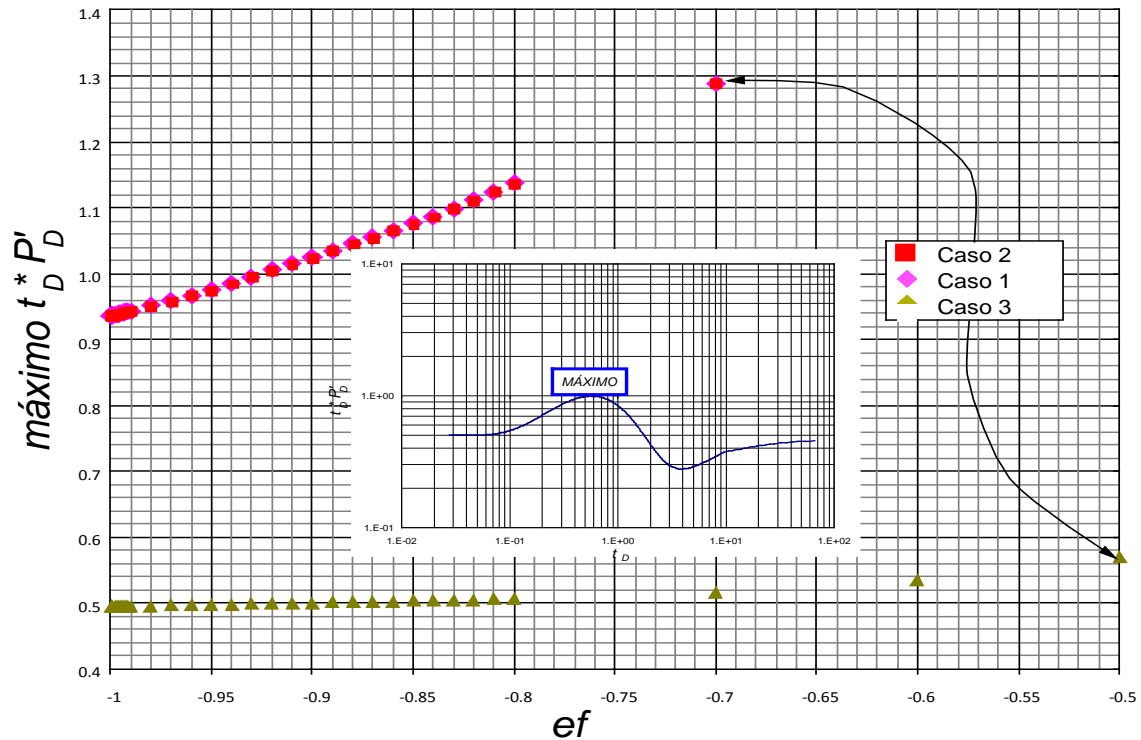
2.3.2 Resultados estado estable

Como se indicó en el capítulo anterior, las características a analizar son:

- Comportamiento del valor máximo $t_D * P'_D$.
- Comportamiento del valor mínimo $t_D * P'_D$ y la pendiente en estado estable.
- Comportamiento en la variación de la constante para determinar el área simulada.

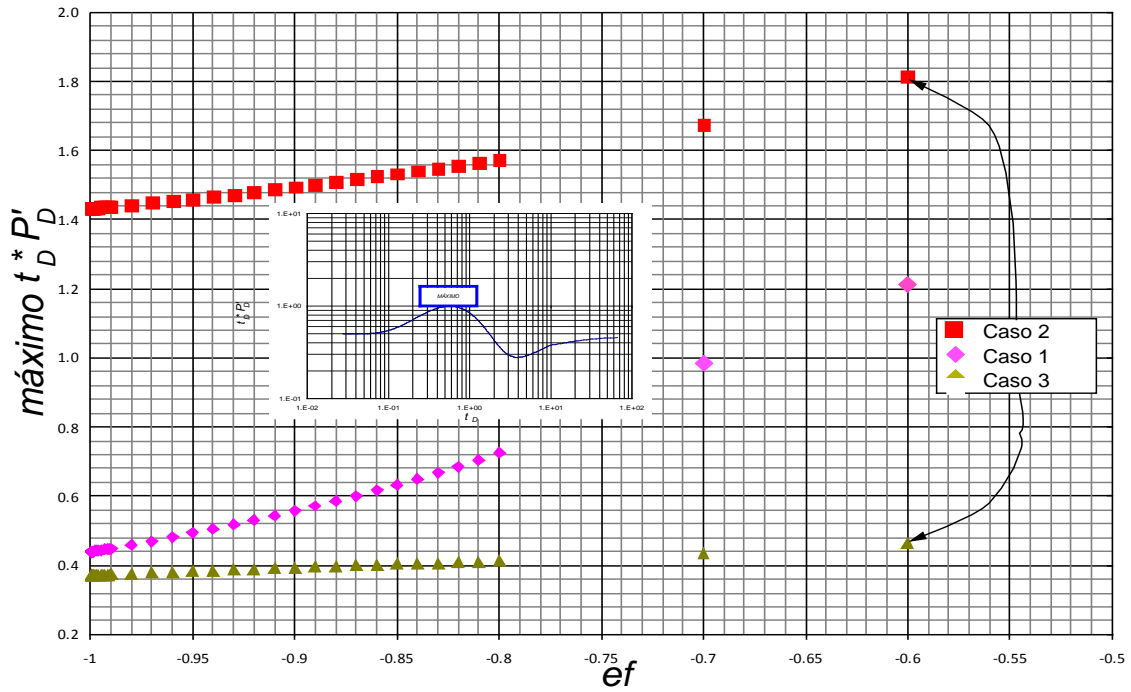
2.3.2.1 Máximo $t_D * P'_D$

La gráfica 16 corresponde a los resultados obtenidos para los valores máximo de la derivada " $t_D * P'_D$ "; cuando la prueba desarrollada presenta estado estable, en el caso uno y dos (Frontera derecha e izquierda parcialmente activa); se destaca la linealidad existente en los resultados. Como en todas las características analizadas en este trabajo "el número de fronteras activas".

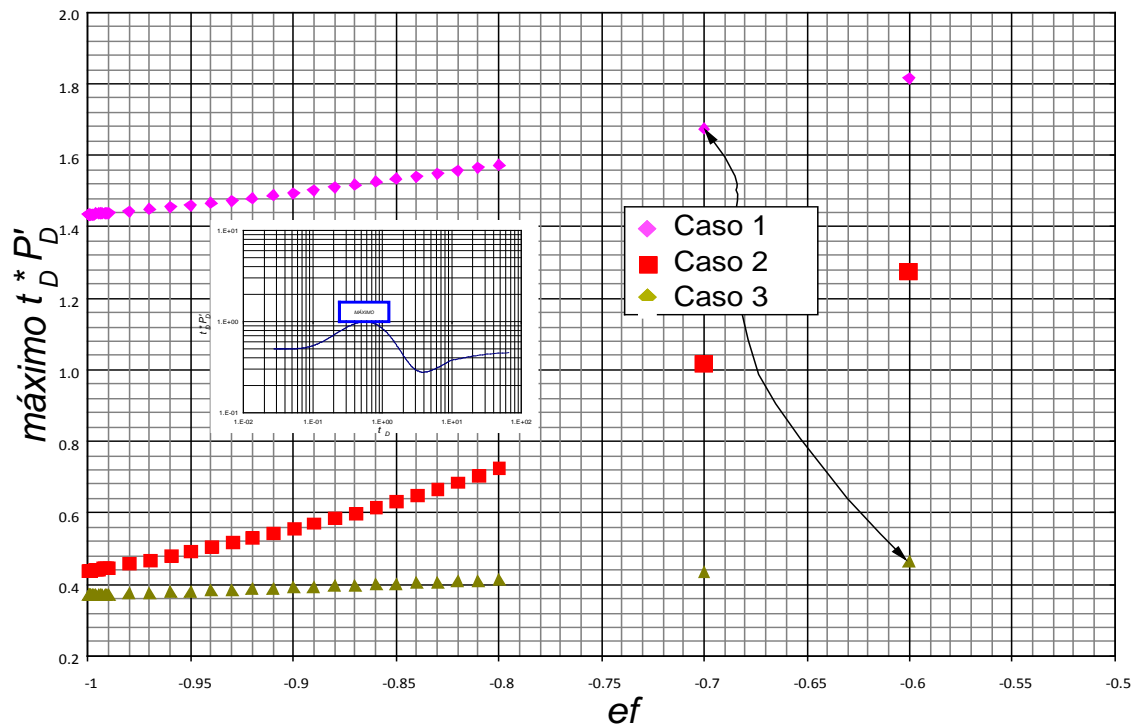


Gráfica 16. Comportamiento del máximo $t_D * P'_D$, en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo centrado

Cuando el pozo se encuentra descentrado existe una importante variación en los resultados obtenidos, ver gráficas 17 y 18. El caso cuatro (todas las fronteras hidráulicamente activas) no aplica por no tener en la geometría máximo y mínimo $t_D * P'_D$. Para el caso dos (Frontera izquierda parcialmente activa) los valores se mantienen estables. Para el caso uno (Frontera derecha parcialmente activa), los valores disminuyen drásticamente, siendo cercanos a los valores obtenidos para el caso tres (fronteras laterales parcialmente activas), para este último caso no existen mayores variaciones.



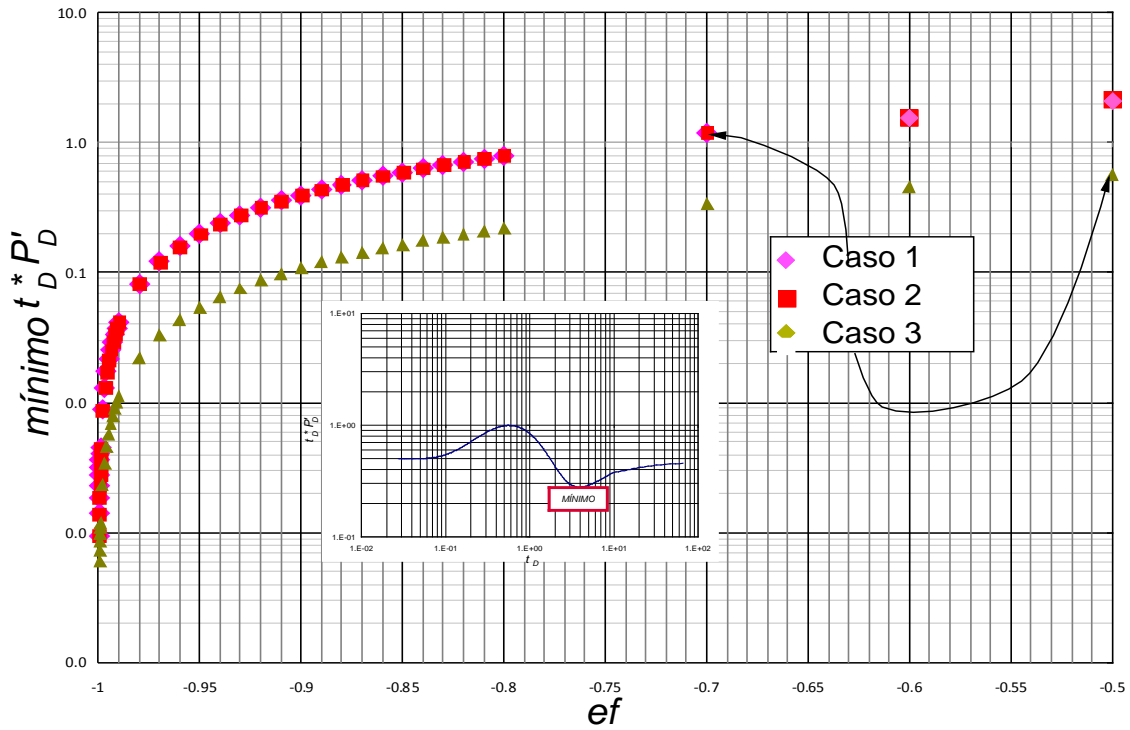
Gráfica 17. Comportamiento del máximo $t_D * P'_D$, en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la derecha.



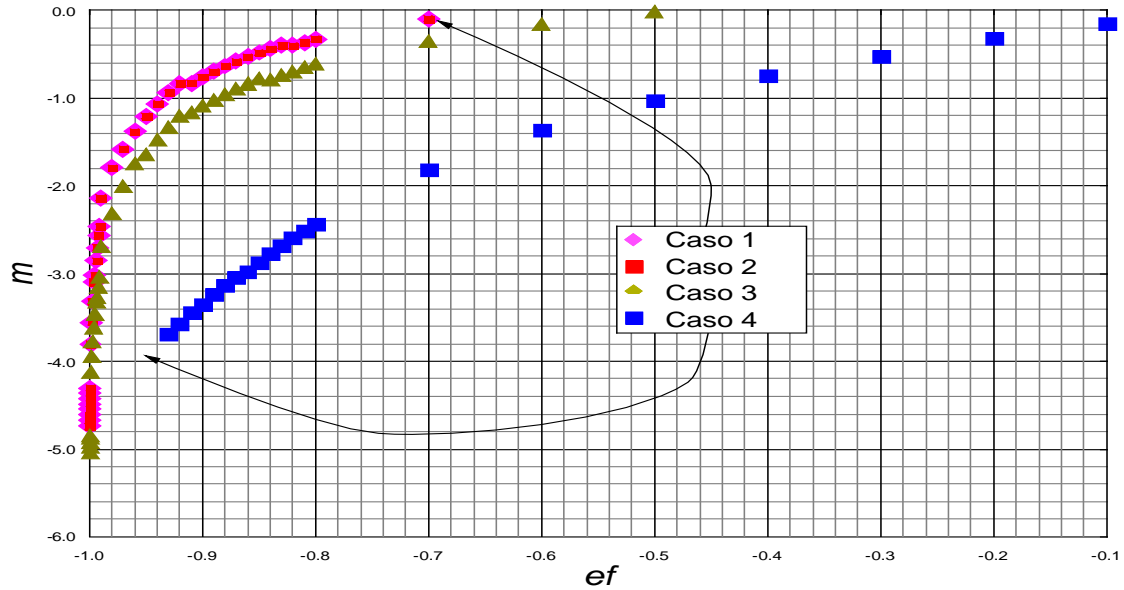
Gráfica 18. Comportamiento del máximo $t_D * P'_D$, en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la izquierda.

2.3.2.2 Mínimo $t_D * P'_D$ y pendiente estado estable.

Para estos parámetros, se observó una tendencia no lineal en los resultados obtenidos y una precipitación de los mismos con valores próximos a menos uno (-1), igual que los valores máximos $t_D * P'_D$; cuando el pozo se encuentra centrado, los resultados de los casos uno y dos (Frontera derecha e izquierda parcialmente activa) son los mismos, y los resultados del Caso 3 son menores, ver gráficas 19 y 20.

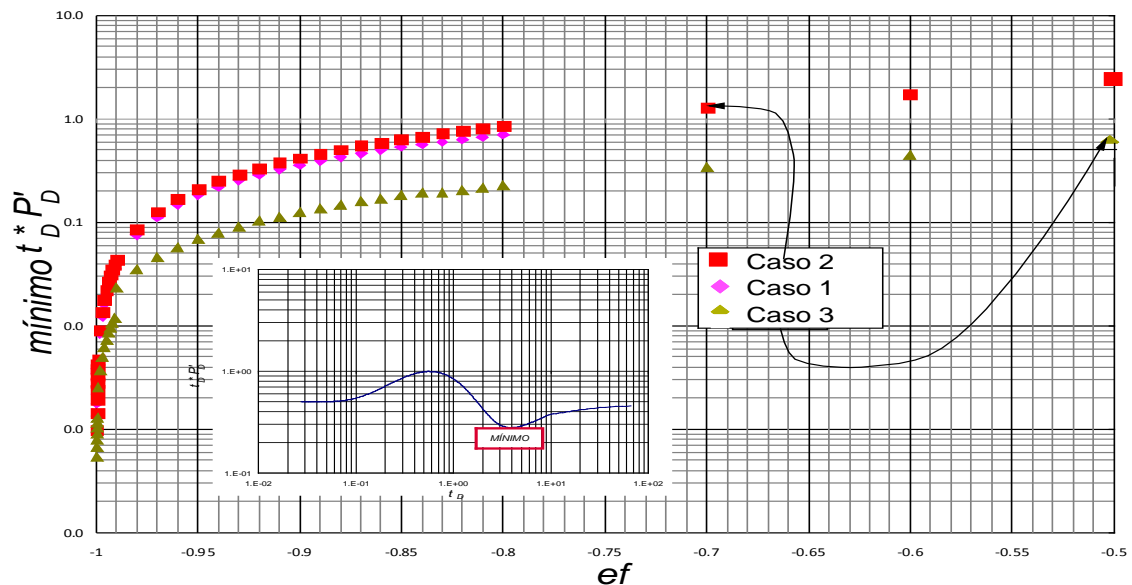


Gráfica 19. Comportamiento del mínimo $t_D * P'_D$ en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo centrado.

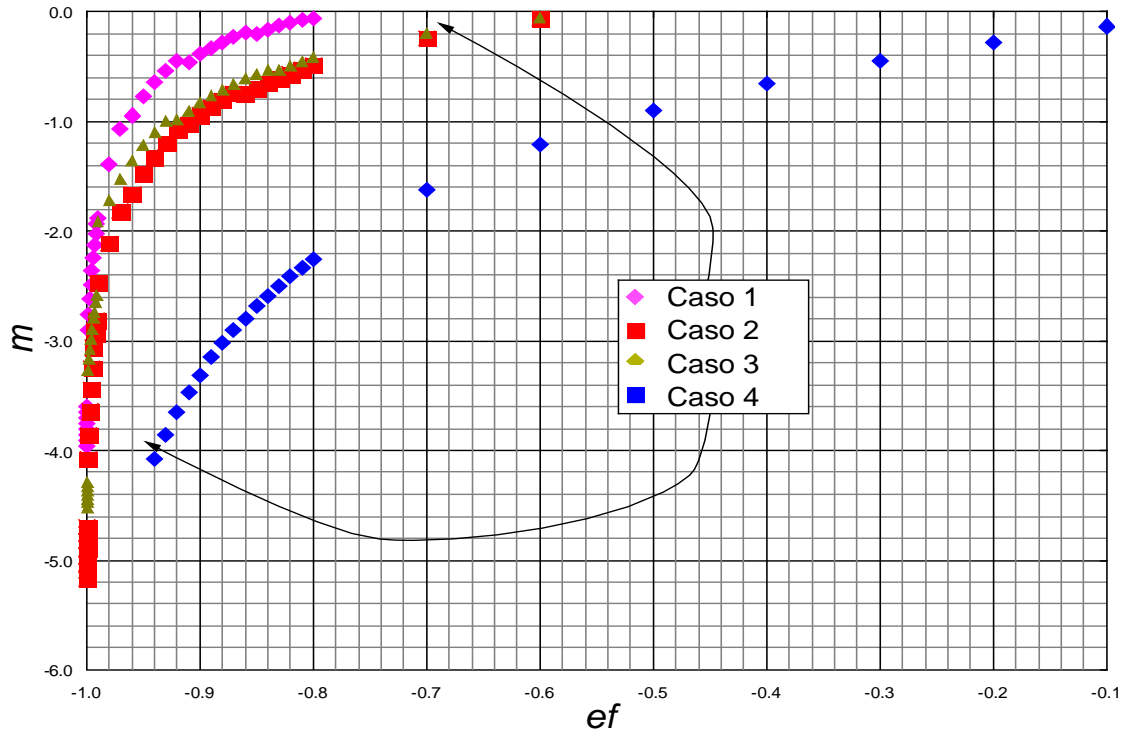


Gráfica 20. Comportamiento de la pendiente estado estable en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo centrado.

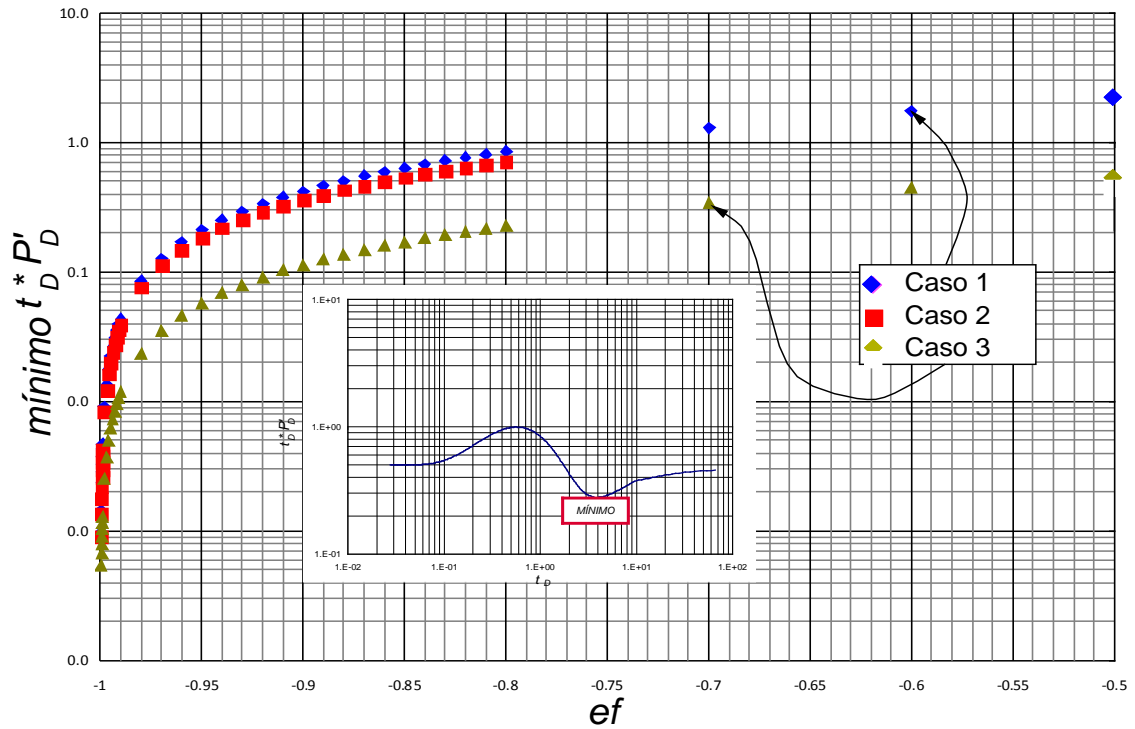
Fue considerable la variación de los resultados por efecto de la ubicación del pozo. Solo en el caso uno (Frontera derecha parcialmente activa), se observó una ligera disminución en los resultados y un ligero incremento en los resultados obtenidos para el caso dos (Frontera izquierda parcialmente activa); para el caso tres (Fronteras laterales parcialmente activas) los resultados se mantienen estables (ver gráficas 21, 22, 23 y 24).



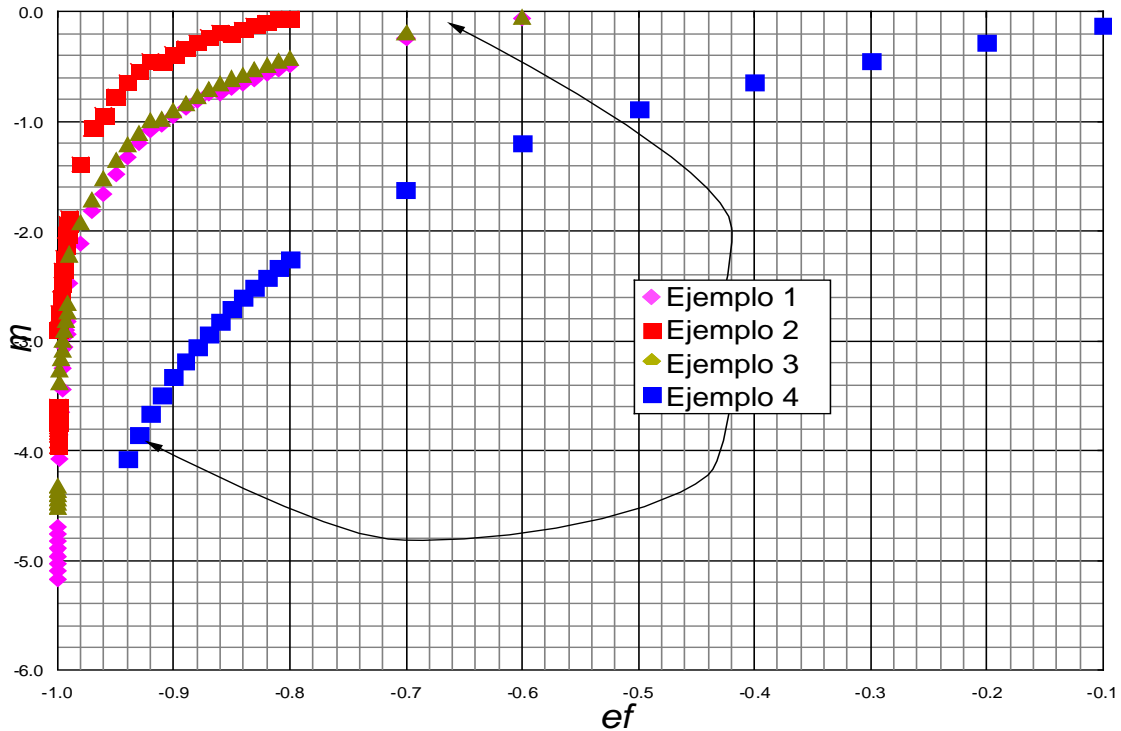
Gráfica 21. Comportamiento del mínimo en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la derecha.



Gráfica 22. Comportamiento de la pendiente estado estable en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la derecha.



Gráfica 23. Comportamiento del mínimo en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la izquierda.



Gráfica 24. Comportamiento de la pendiente estado estable en función de la eficiencia de flujo, resultado con pozo descentrado a la izquierda.

Dada la variación en la pendiente, se hace necesario reformar la constante utilizada en la fórmula para la determinación del área. Para calcular dicha constante, se hace uso de las siguientes ecuaciones:

Cálculo de la constante, para estado pseudoestable:

$$[\mathcal{E}]^* = \frac{kt_{rips}}{A\phi\mu c_t} \quad (33)$$

Donde, t_{rips} es el tiempo de intersección entre el estado pseudoestable pendiente uno (1) y la lineal de pendiente cero (0) correspondiente al flujo radial, $[\mathcal{E}]^*$ la constante para el cálculo del área para distintas pendiente (ver gráfica 13); A es el área real simulada, k permeabilidad, ϕ porosidad, μ viscosidad y c_t compresibilidad total.

Calculo de la constante $[\mathcal{E}]^*$, para estado estable:

$$[\mathcal{E}]^* = \frac{kt_{pssi-ss}}{A\phi\mu c_t} \quad (34)$$

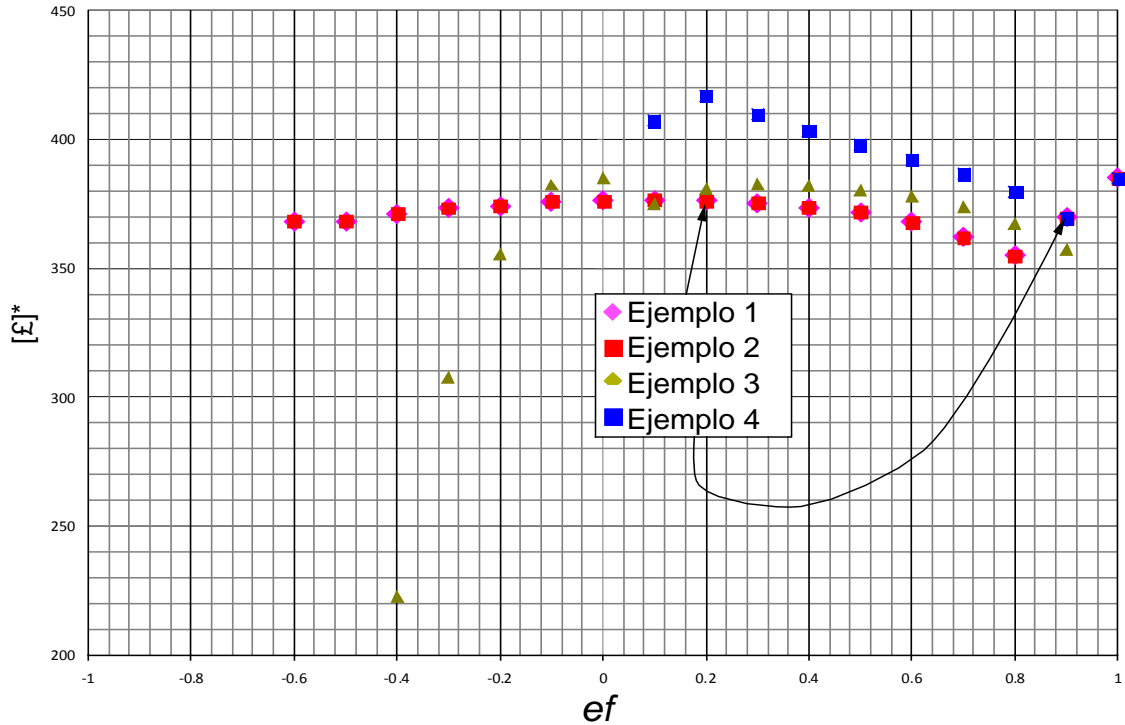
Donde, $t_{pssi-ss}$ es el tiempo de intersección entre el estado pseudoestable pendiente uno (1) y la lineal de pendiente negativa (-1) correspondiente al estado estable (ver gráfica 9), $[\mathcal{E}]^*$ la constante para el cálculo del área para distintas pendientes; A es el área real simulada, k permeabilidad, ϕ porosidad, μ viscosidad y c_t compresibilidad total.

$$[\mathcal{E}]^* = \frac{kt_{ssir}}{A\phi\mu c_t} \quad (35)$$

Donde, t_{ssir} es el tiempo de intersección entre el estado estable de pendiente negativa (-1) y la lineal de pendiente cero (0) correspondiente al flujo radial (ver gráfica 10), $[\mathcal{E}]^*$ la constante para el calculo del área para distintas pendiente; A es el área real simulada, k permeabilidad, ϕ porosidad, μ viscosidad y c_t compresibilidad total.

2.3.3. Comportamiento de las constantes estado pseudoestable.

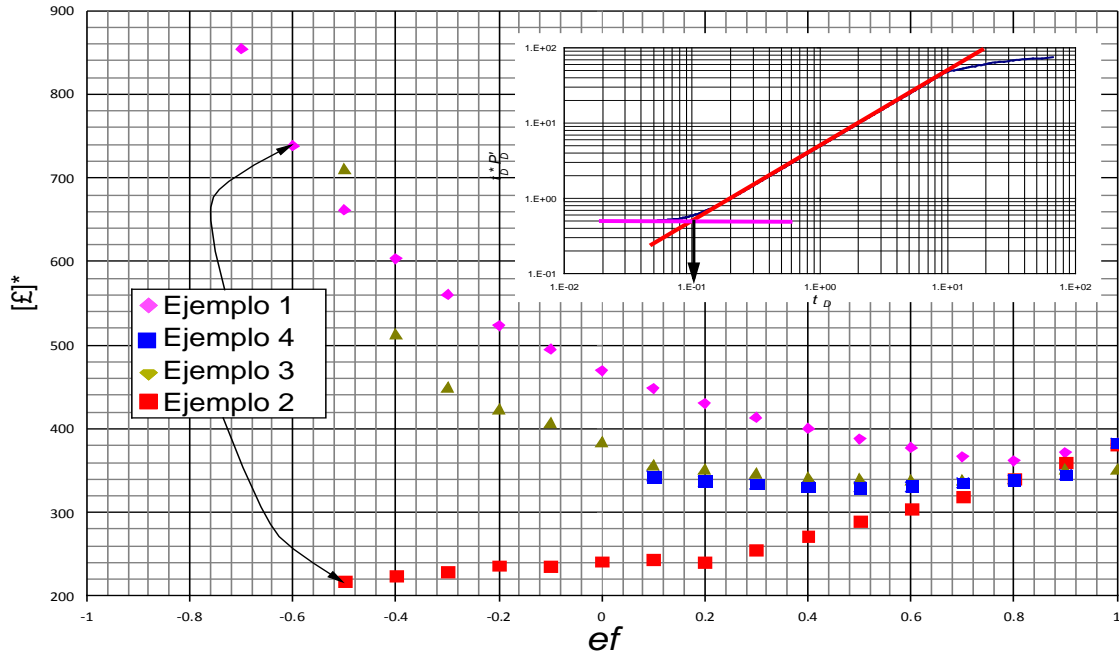
Las gráficas 25, 26 y 27 corresponden a los resultados concernientes a la constante hallada para el estado pseudoestable, dependiendo del área simulada y tipo de yacimiento. Todos los resultados obtenidos varían en proporción mínima; cabe destacar que esta constante se calcula con el uso del punto de intercepción entre la sección lineal correspondiente al estado pseudoestable y la lineal de pendiente cero (0) correspondiente al flujo radial.



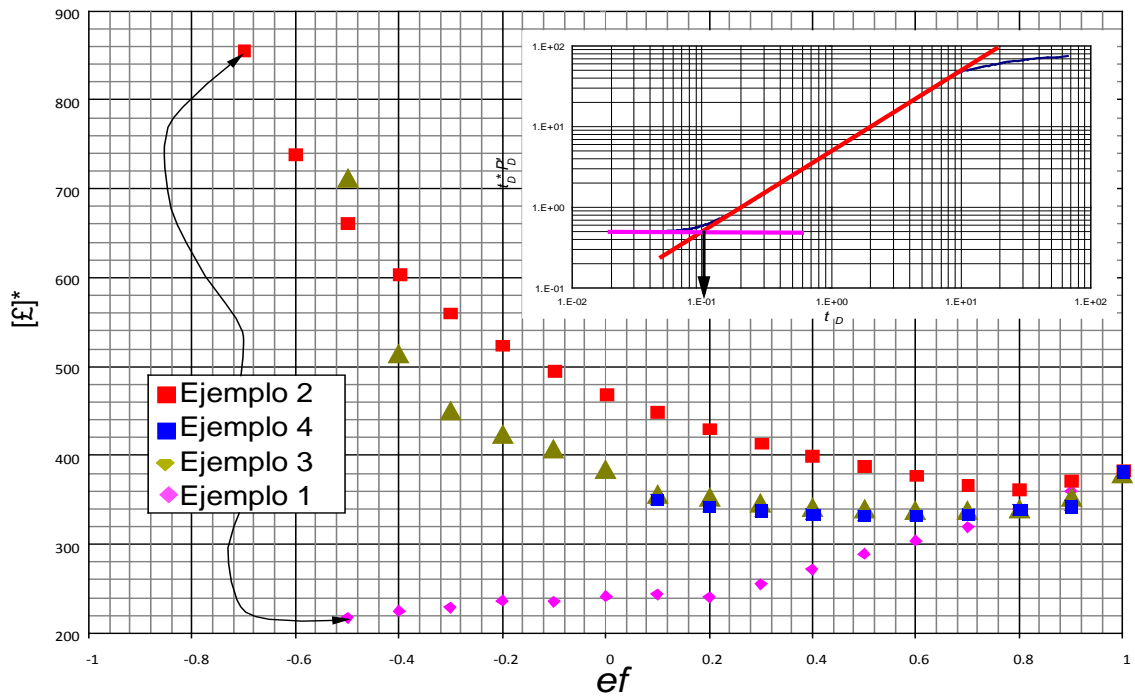
Gráfica 25. Comportamiento de la constante en función de la eficiencia de flujo para el cálculo del área (intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial); resultado con pozo centrado.
Estado pseudoestable

Para el caso de un pozo centrado (ver gráfica 25), se conserva la igualdad en los resultados para los casos uno y dos (frontera derecha e izquierda parcialmente activa), para los casos tres y cuatro (fronteras laterales y todas sus fronteras parcialmente activas), se observa una ligera declinación cuando los valores tiene una eficiencia de flujo igual a cero (0).

Los siguientes resultados corresponden a casos en el que el pozo se encuentra descentrado, (ver gráficas 26 y 27); en estos, los resultados varían drásticamente por lo que se hace necesario considerar la ubicación del pozo al momento de determinar la constante.



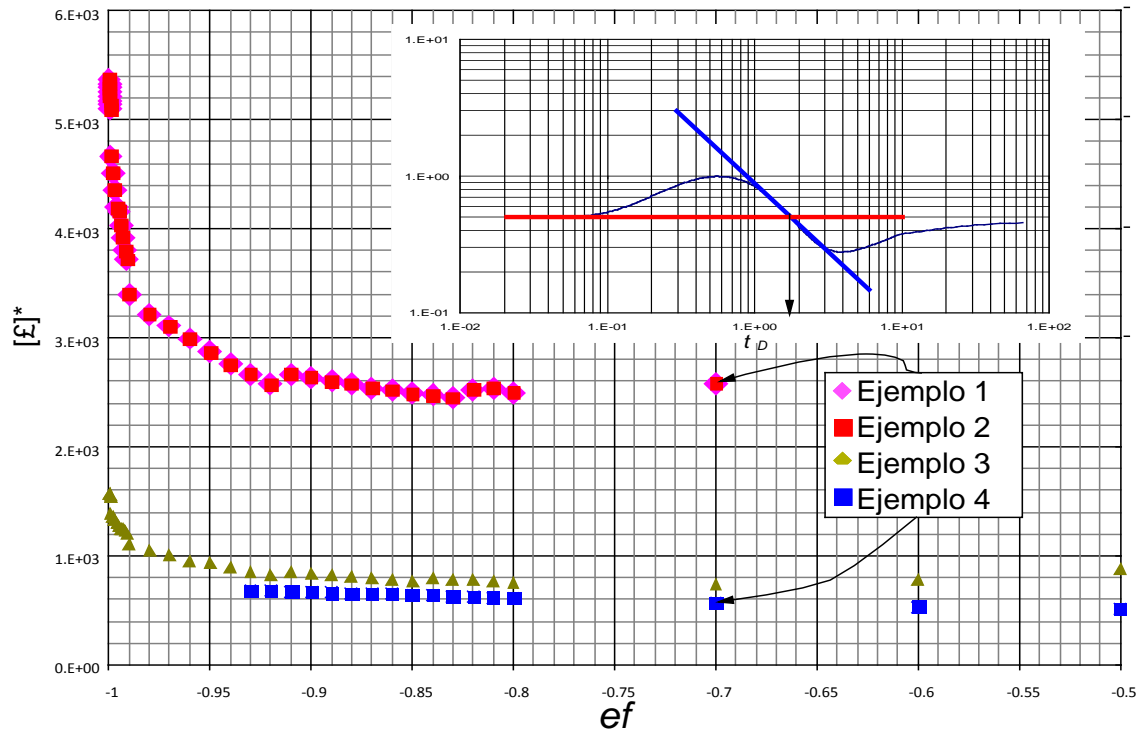
Gráfica 26. Comportamiento de la constante en función de la eficiencia de flujo para el cálculo del área, (intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial). Resultado con pozo descentrado a la derecha. Estado pseudoestable.



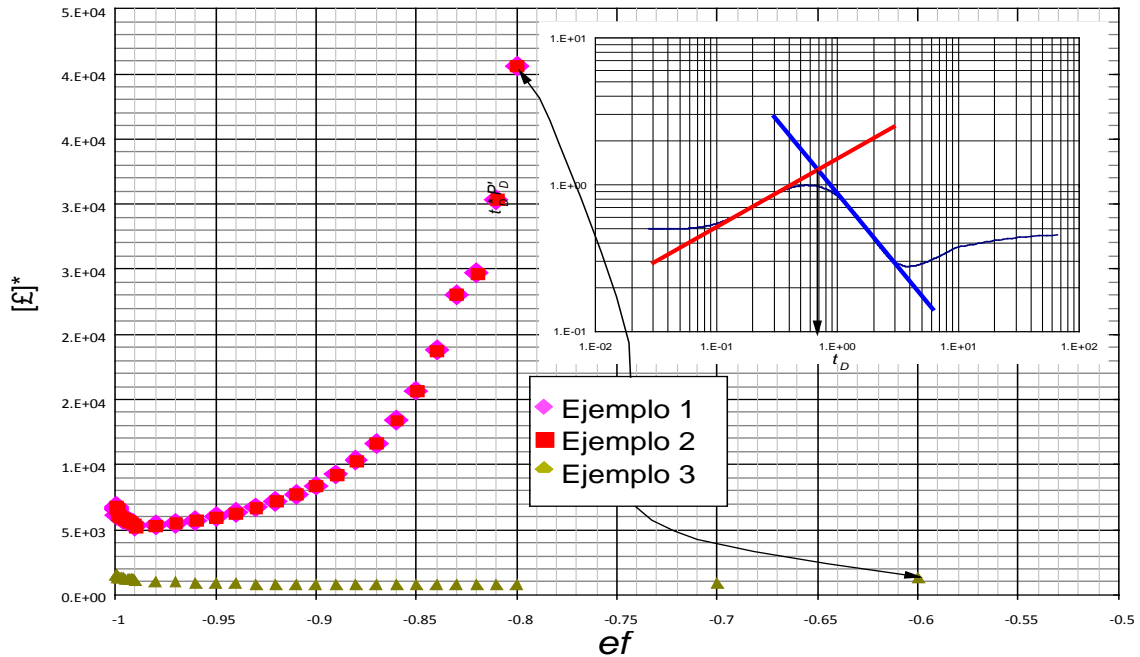
Gráfica 27. Comportamiento de la constante en función de la eficiencia de flujo para el cálculo del área, (intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial). Resultado con pozo descentrado a la izquierda. Estado pseudoestable.

2.3.4 Comportamiento de las constantes estado estable.

Los resultados del estado estable, se usó el punto de intersección entre la sección final correspondiente al estado estable y la línea de pendiente cero (0) correspondiente al flujo radial (ver gráficas 28, 30 y 32), también se agregó los resultados obtenidos haciendo uso del punto de intersección entre la primera y segunda pendiente (ver gráficas 29, 31 y 33).

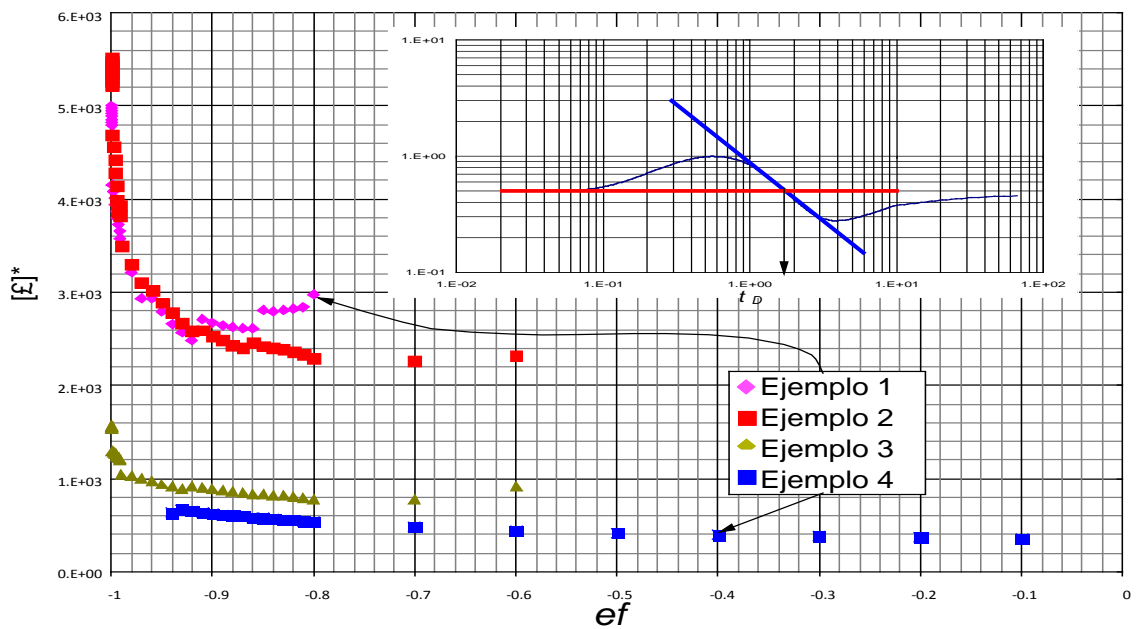


Gráfica 28. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intersección entre estado estable y el flujo radial) resultado con pozo centrado.

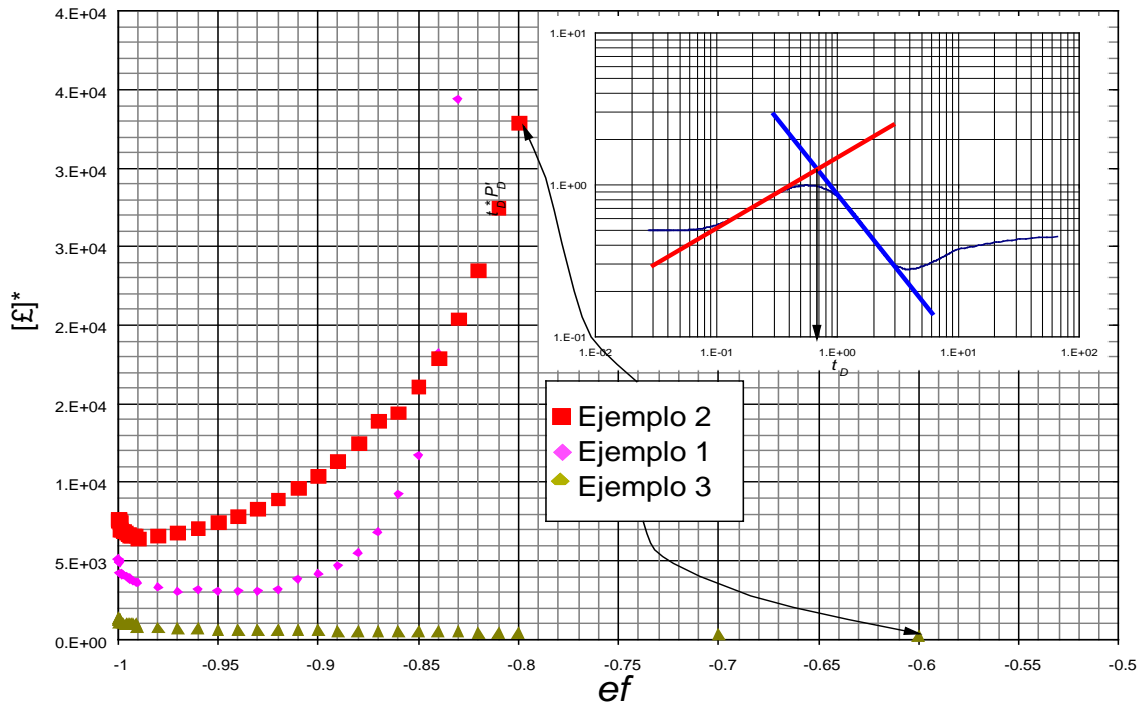


Gráfica 29. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre la primera y segunda pendiente) resultado con pozo centrado.

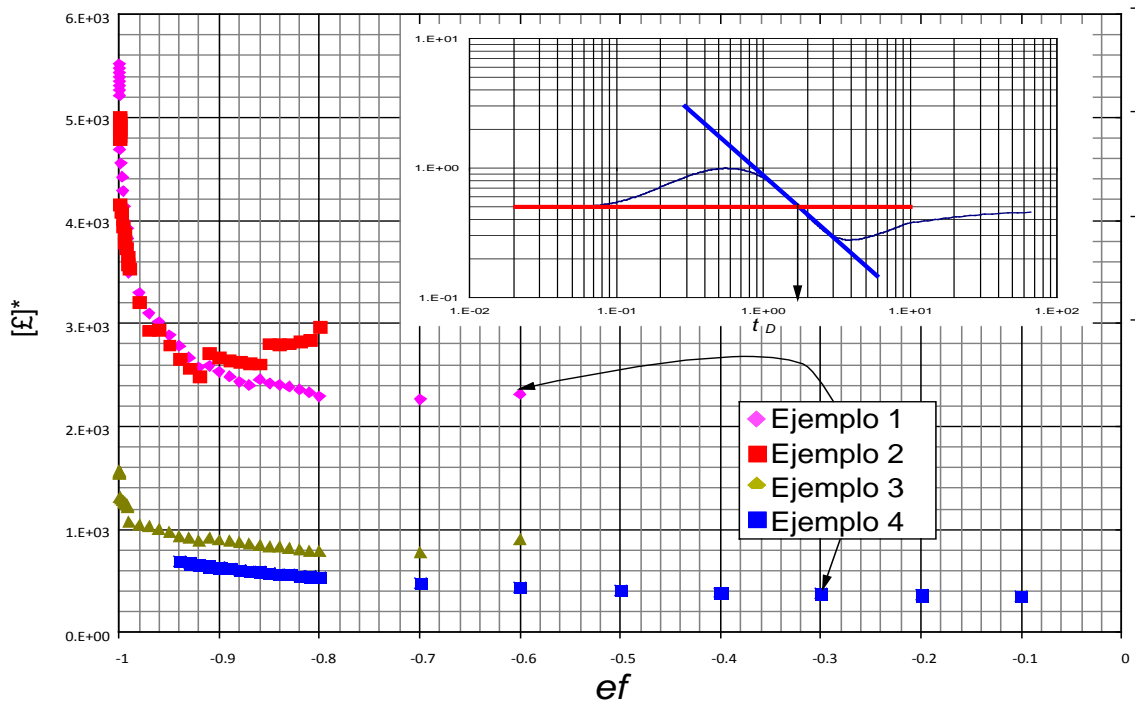
A continuación se presenta los resultados obtenidos para las constantes, casos en el que el pozo se encuentra descentrado.



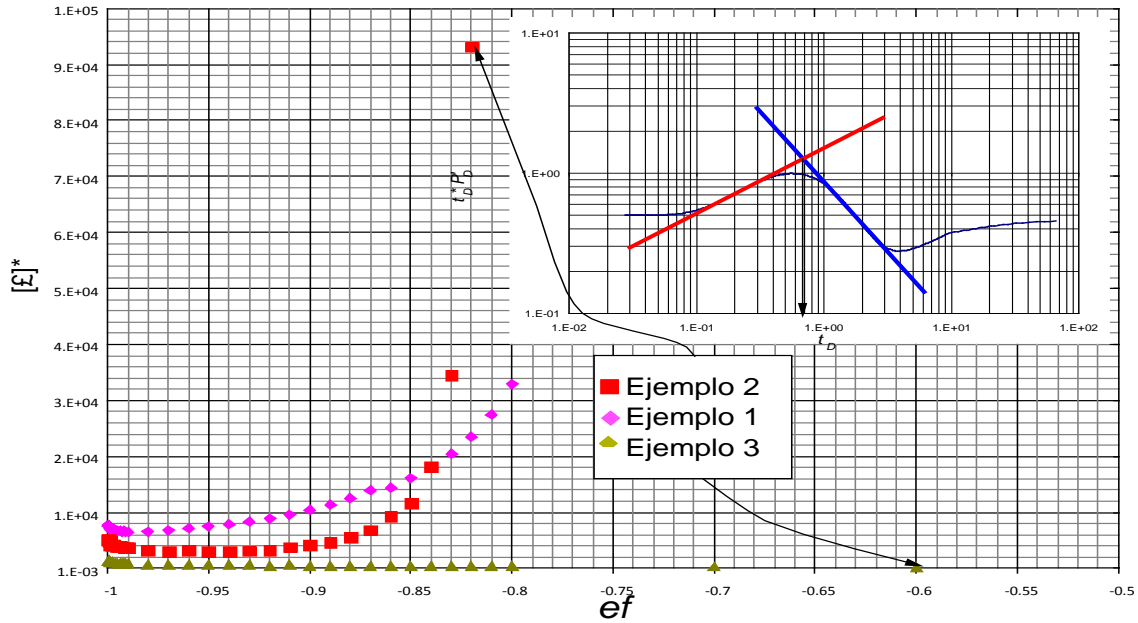
Gráfica 30. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre estado estable y el flujo radial) resultado con pozo descentrado a la derecha.



Gráfica 31. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre la primera y segunda pendiente) resultado con pozo descentrado a la derecha.



Gráfica 32. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre estado estable y el flujo radial,) resultado con pozo descentrado a la izquierda.



Gráfica 33. Comportamiento de la constante para el estado estable en función de la transparencia para el cálculo del área, (intercepción entre la primera y segunda pendiente) resultado con pozo descentrado a la izquierda.

2.3.5 Resultados globales

Estos parten de la agrupación de todos los resultados obtenidos, partiendo que se simuló en un medio isotrópico, donde se generan escenarios similares pero con lateralidad opuesta, por lo que los valores obtenidos tienen resultados iguales (ver anexo B). A continuación se presentan estos casos:

Yacimientos cuadrados y rectangulares con pozo centrado.

- Pozo centrado con presencia de una frontera parcialmente activa:

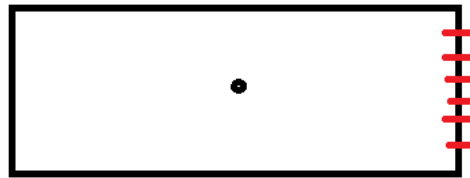


Figura 1. Pozo centrado - Caso 1 (Frontera derecha parcialmente activa)

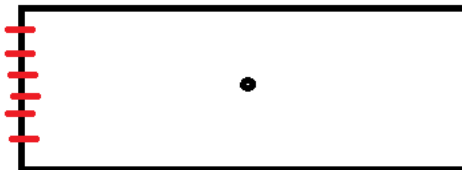


Figura 2. Pozo centrado - Caso 2 (Frontera izquierda parcialmente activa).

Caso singular:

- Pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activas:

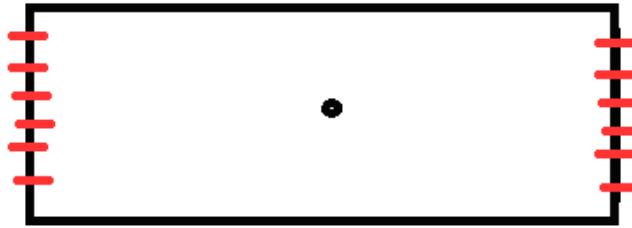


Figura 3. Pozo centrado – Caso 3 (Pozo con fronteras laterales parcialmente activas).

- Pozo centrado con fronteras hidráulicamente activas:

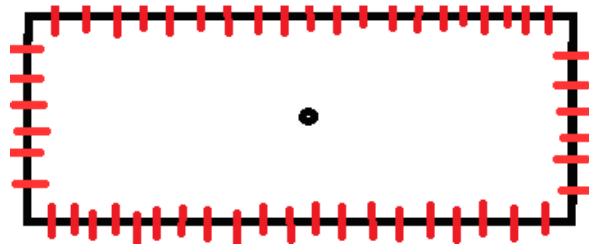


Figura 4. Pozo centrado – Caso 4 (Pozo con fronteras hidráulicamente activas).

Yacimientos cuadrados y rectangulares con pozo descentrado.

- Pozo descentrado con frontera cercana parcialmente activa:



Figura 5. Pozo descentrado a la derecha - Caso 1 (Frontera derecha parcialmente activa).



Figura 6. Pozo descentrado a la izquierda – Caso 2 (Frontera izquierda parcialmente activa).

- Pozo descentrado con frontera lejana parcialmente activa:



Figura 7. Pozo descentrado a la derecha – Caso 2 (Frontera izquierda parcialmente activa).



Figura 8. Pozo descentrado a la izquierda – Caso 1 (Frontera derecha parcialmente activa).

- Pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activas:



Figura 9. Pozo descentrado a la derecha – Caso 3 (Pozo con fronteras laterales parcialmente activas)



Figura 10. Pozo descentrado a la izquierda – Caso 3 (Pozo con fronteras laterales parcialmente activas)

Caso particular:

- Pozo descentrado con fronteras hidráulicamente activas:

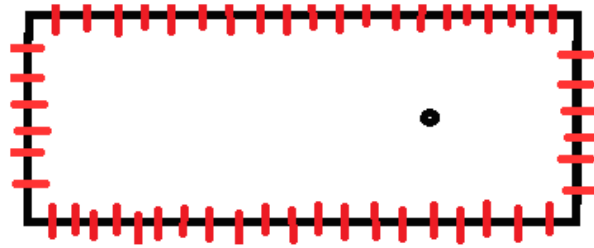


Figura 11. Pozo descentrado a la derecha – Caso 4 (Pozo con fronteras hidráulicamente activas).

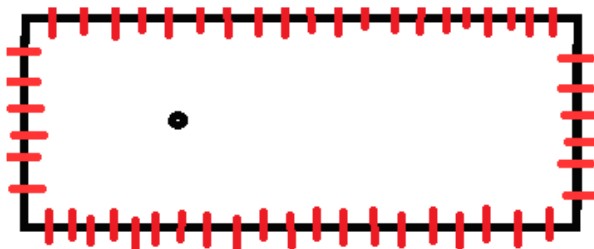


Figura 12. Pozo descentrado a la izquierda – Caso 4 (Pozo con fronteras hidráulicamente activas).

Se presentan todos los resultados obtenidos de acuerdo al modelo anteriormente presentado. De esta forma se obtiene una familia de curvas identificando las circunstancias que rodean una respuesta característica (ver anexo A). Los valores para determinar esta tendencia yacen del promedio armónico calculado a partir de la familia de datos obtenidos; en algunos casos ciertas tendencias no son tenidas en cuenta debido a la pronunciada desviación que presentan respecto los valores generales de la misma respuesta analizada.

- Pozo centrado con dos fronteras laterales activas.
- Pozo descentrado con frontera cercana activa.
- Pozo descentrado con frontera lejana activa.
- Pozo descentrado con fronteras laterales activas.

88753317 → 0097712466

88722655 → 00926560496

88722977 → 009

2.4 CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA TDS'T

En la industria las pruebas que serán analizadas cuentan con limitada información, así que la metodología a proponer debe ser ágil de implementar y los resultados obtenidos eficientes y muy cercanos a la realidad.

El método TDS'T para la determinación del área se basa en la ubicación de la sección lineal sobre la respuesta de derivada de presión en el estado que corresponda y la línea de pendiente cero (0) sobre el flujo radial, se determina el punto de intercepción y se calcula el área con la ecuación que corresponda.

El método propuesto parte de la identificación de las características propias de la prueba que permiten identificar la eficiencia de flujo de la frontera; con este valor se determina la constante apropiada y se aplica en las fórmulas tradicionales.

Para el estado pseudoestable la característica que se analiza es la pendiente de este estado, mientras que para el estado estable las características a analizar son:

- Valor del máximo $(t_D * \Delta P'_D)_{máx}$
- Valor del mínimo $(t_D * \Delta P'_D)_{mín}$

Con el valor de la característica se dispone a buscar en la gráfica correspondiente la eficiencia de flujo; con este valor, nuevamente se determina la constante necesaria para hallar el área del yacimiento.

La determinación del área de drene de un yacimiento estable se realiza a partir de los siguientes pasos:

1. Se reconoce la presencia del flujo radial y estado presente en la gráfica, (si el estado encontrado es pseudoestable se determina la pendiente de la línea, si es estable se reconocen los puntos máximos y mínimos de interés).
2. Se ubican las líneas respectivas pertenecientes a cada flujo hallado, (línea de pendiente cero (0) para el flujo radial, sección lineal sobre la pendiente unitaria (1) para el estado pseudoestable, sección línea sobre pendiente menos uno (-1) para el estado estable).
3. Con el tiempo de intercepción previamente encontrado se determina el área de drene con el uso de la ecuación que corresponda.

Como existe una clara variación en los resultados obtenidos por efectos de la eficiencia de flujo en la frontera para lograr la correcta determinación del área, se propone una variación al método que permitirá encontrar el correcto valor del área.

2.4.1. Aplicación y resumen ecuaciones:

Tabla 1		Cuadrado: Pozo centrado frontera lateral, parcialmente activa
Constante	Estado pseudoestable	$(\mathcal{F}^*)_{ssp} = \frac{374.261 - 558.458ef - 117.9508ef^2 + 321.1083ef^3}{1 - 1.5052ef - 0.2571ef^2 + 0.8116ef^3}$ <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial.</p>
	Estado estable	$(\mathcal{F}^*)_{ss} = \frac{2314.0597 + 12426.9471ef + 26498.4687ef^2 + 28204.3869ef^3 + 15000.037ef^4 + 3181.601ef^5}{1 + 5.378ef + 11.522ef^2 + 12.374ef^3 + 6.678ef^4 + 1.447ef^5}$ <p>Intercepción entre la primera y segunda pendiente.</p> $(\mathcal{F}^*)_{ss} = a + b(ef^2) + c(ef^4) + d(ef^6) + e(ef^8) + f(ef^{10}) + g(ef^{12}) + h(ef^{14}) + i(ef^{16}) + j(x^{18}) + k(x^{20})$ <p>a = 3762238461.624096 f = 73080404827.12149 b = -31326804224.72553 g = -162834313926.1443 c = 105653827303.1224 h = 73324778221.47893 d = -174075580716.6421 i = 29639386665.90014 e = 110155905413.4904 j = -36636102342.80389 k = 9256266922.107092</p> <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial.</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = 17137.6827 + \frac{-35841.63}{m_1} + \frac{27597.74}{m_1^2} + \frac{-7370.1}{m_1^3} + \frac{-2086.21}{m_1^4} + \frac{2160.9374}{m_1^5} + \frac{-756.74}{m_1^6} + \frac{164.007}{m_1^7} + \frac{-23.9033}{m_1^8} + \frac{1.762}{m_1^9}$ <p>Primera pendiente estado estable.</p> $ef = -0.6307 + 0.8844m_2 + 1.7195m_2^2 + 2.7584m_2^3 + 3.0355m_2^4 + 2.1679m_2^5 \dots$ $+ 0.9983m_2^6 + 0.2933m_2^7 + 0.053m_2^8 + 0.0053m_2^9 + 0.00023m_2^{10}$ <p>Segunda pendiente.</p>
	Estado pseudoestable	$ef = \frac{-2.1615 + 13.5327m_{ssp} - 33.8204m_{ssp}^2 + 42.1617m_{ssp}^3 - 26.212m_{ssp}^4 + 6.501m_{ssp}^5}{1 - 5.14m_{ssp} + 10.1345m_{ssp}^2 - 9.3682m_{ssp}^3 + 3.869m_{ssp}^4 - 0.4943m_{ssp}^5}$ <p>Pendiente estado pseudoestable.</p>
	Estado estable	$ef = \frac{-0.9258 + 28.7251 \ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x} - 504.7324 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^2 + 1700.03084 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^3 - 5848.203 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^4}{1 - 29.842 \ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x} + 510.3604 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^2 - 1240.813 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^3 + 4557.1936 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^4 + 7018.1247 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^5}$ <p>Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p> $ef = \frac{-1 - 5.7025 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n} + 32.7857 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^2 - 42.0444 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^3 + 11.1133 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^4}{1 + 5.9324 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n} - 31.0706 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^2 + 33.3749 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^3 - 1.176 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^4 - 1.599 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^5}$
Máximo y mínimo	Estado estable	$ef = \frac{-0.9258 + 28.7251 \ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x} - 504.7324 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^2 + 1700.03084 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^3 - 5848.203 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^4}{1 - 29.842 \ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x} + 510.3604 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^2 - 1240.813 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^3 + 4557.1936 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^4 + 7018.1247 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^5}$ <p>Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p> $ef = \frac{-1 - 5.7025 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n} + 32.7857 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^2 - 42.0444 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^3 + 11.1133 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^4}{1 + 5.9324 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n} - 31.0706 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^2 + 33.3749 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^3 - 1.176 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^4 - 1.599 (t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{m}n}^5}$

		Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable
Tabla 2		Pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activas:
Constante	Estado pseudoestable	$(\mathcal{F}^*)_{ssp}^{(-1)} = 0.0027 - 0.00052ef + 0.0012ef^2 - 0.0012ef^3 + 0.00035ef^4 + 8.26766E - 05ef^5$ <p>Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial</p>
	Estado estable	$(\mathcal{F}^*)_{ss} = \frac{-667.882 - 2339.520987392031ef - 2923.342ef^2 - 1348.79ef^3 - 97.723ef^4}{1 + 8.792ef + 26.2441ef^2 + 36.5463ef^3 + 24.381ef^4 + 6.2873ef^5}$ <p>Intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>
		$(\mathcal{F}^*)_{ss} = \frac{83.692 + 546.437ef + 1180.1345ef^2 + 1109.512ef^3 + 391.855ef^4}{1 + 5.882ef + 13.771ef^2 + 16.1893ef^3 + 9.5388ef^4 + 2.2384ef^5}$ <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = -0.8252 + 2.785m_1 + 6.1236m_1^2 - 35.6173m_1^3 + 394.9584m_1^4 + 5226.975m_1^5 - 84774.62m_1^6$ <p>Primera pendiente estado estable</p>
		$ef = -0.4853 + 0.893m_2 + 0.9161m_2^2 + 0.7056m_2^3 + 0.4365m_2^4 + 0.2189m_2^5 \dots$ $+ 0.083m_2^6 + 0.022m_2^7 + 0.0037m_2^8 + 0.00034m_2^9 + 1.3675E - 05m_2^{(10)}$ <p>Segunda pendiente</p>
	Estado pseudoestable	$ef = -0.467 + 3.3162m_{ssp}^2 - 2.9391m_{ssp}^4 - 167.3m_{ssp}^6 + 1662.1772m_{ssp}^8 - 7371.461m_{ssp}^{10} \dots$ $+ 18425.472m_{ssp}^{12} - 27586.1m_{ssp}^{14} + 24551.0419m_{ssp}^{16} - 11982.34m_{ssp}^{18} + 2469.6m_{ssp}^{20}$ <p>Pendiente estado pseudoestable</p>
Máximo y mínimo	Estado estable	$ef = \frac{-1.376 + 24.632(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^2 - 174.82(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^4 + 612.966(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^6 - 1057.1727(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^8 + 712.8061(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^{10}}{1 - 16.7854(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^2 + 108.5855(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^4 - 330.9701(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^6 + 452.8381(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^8 - 192.2349(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^{10}}$ <p>Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>
		$ef = -1. + 0.0411(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{0.5} - 0.439x + 20.3154(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{1.5} - 168.2946(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 + 847.95(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{2.5} \dots$ $- 2678.5151(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 + 5300.823(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{3.5} - 6366.8867(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4 + 4234.775(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{4.5} - 1194.12(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^5$

		Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable
Tabla 3		Pozo descentrado con frontera cercana parcialmente activa:
Constante	Estado pseudoestable	$(\mathcal{E}^*)_{ssp} = \frac{488.9436 + 841.3712ef - 15.73ef^2 - 425.7092ef^3}{1 + 2.4078ef + 0.9863ef^2 - 1.25002ef^3 - 0.8149ef^4}$ <p>Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial.</p>
	Estado estable	$(\mathcal{E}^*)_{ss} = \frac{-605.8474 - 2569.697ef - 4056.9411ef^2 - 2823.386ef^3 - 730.3042ef^4}{1 + 5.921ef + 13.905ef^2 + 16.1983ef^3 + 9.364ef^4 + 2.1499ef^5}$ <p>Intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>
		$(\mathcal{E}^*)_{ss} = \frac{60.3682 + 139.9621ef + 79.559ef^2}{1 + 3.1527ef + 3.2987ef^2 + 1.1460ef^3}$ <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = a + b(m_1^2) + c(m_1^4) + d(m_1^6) + e(m_1^8) + f(m_1^{10}) + g(m_1^{12}) \dots$ $+ h(m_1^{14}) + i(m_1^{16}) + j(m_1^{18}) + k(m_1^{20})$ <p> $a = -5.089810620779426$ $f = 1197222066.08895$ $b = 709.5449825721377$ $g = -14847870072.78087$ $c = -53880.52532174778$ $h = 122749794115.6225$ $d = 2349629.787548917$ $i = -648364788242.3891$ $e = -65065611.95848371$ $j = 1978525439949.556$ $k = -2652097211083.245$ </p> <p>Primera pendiente estado estable</p>
		$ef = -0.7808 + 0.7923m_2 + 1.6576m_2^2 + 1.9575m_2^3 + 1.192m_2^4 + 0.227m_2^5 \dots$ $- 0.1506m_2^6 - 0.1132m_2^7 - 0.0324m_2^8 - 0.00451m_2^9 - 0.00025m_2^{(10)}$ <p>Segunda pendiente</p>
	Estado pseudoestable	$ef = \frac{131.748 - 7964.2016m_{ssp}^2 + 43476.8044m_{ssp}^4 - 90785.9724m_{ssp}^6 + 81822.6302m_{ssp}^8 - 25654.0567m_{ssp}^{(10)}}{1 + 5743.4343m_{ssp}^2 - 23535.2932m_{ssp}^4 + 31834.1186m_{ssp}^6 - 15224.2945m_{ssp}^8 + 2190.553m_{ssp}^{(10)}}$ <p>Pendiente estado pseudoestable</p>
y	Estado estable	$ef = -68.6304 - \frac{449.594}{\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x}} - \frac{1274.9479}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^2} - \frac{1994.43}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^3} - \frac{1856.0756}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^4} - \frac{1027.1374}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^5} - \frac{312.917}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^6} - \frac{40.484}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^7}$ <p>Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>

$$ef = \frac{-1-13.123(t_D * \Delta P'_D)_{\min} + 64.4665(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^2 - 87.731(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^3 + 41.2501(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^4 - 9.9615(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^5}{1+13.371(t_D * \Delta P'_D)_{\min} - 60.452(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^2 + 70.7268(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^3 - 23.5807(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^4 + 7.3698(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^5}$$

Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable.

Tabla 4		Pozo descentrado con frontera lejana parcialmente activa:
Constante	Estado pseudoestable	$(\mathcal{E}^*)_{ssp} = \frac{191.9901 - 772.3581ef + 1396.9248ef^2 - 1434.5604ef^3 + 709.5373ef^4}{1 - 4.3876ef + 8.0734ef^2 - 7.4271ef^3 + 2.9828ef^4}$ <p>Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial</p>
	Estado estable	$(\mathcal{E}^*)_{ss} = \frac{-605.847 - 2569.697ef - 4056.9411ef^2 - 2823.386ef^3 - 730.3042ef^4}{1 + 5.921ef + 13.905ef^2 + 16.1983ef^3 + 9.3643ef^4 + 2.1499ef^5}$ <p>intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>
		$(\mathcal{E}^*)_{ss} = a + b(ef^2) + c(ef^4) + d(ef^6) + e(ef^8) + f(ef^{10}) + g(ef^{12}) + h(ef^{14}) + i(ef^{16}) + j(ef^{18}) + k(ef^{20})$ <p> $a = 586554951.0699465$ $f = -3389018976.820663$ $b = -5127227635.03214$ $g = -15294994574.56734$ $c = 18483145384.48266$ $h = 6662005802.013421$ $d = -34134990070.37381$ $i = 6913395225.256265$ $e = 30417062783.1757$ $j = -6830870778.546408$ $k = 1714945462.68045$ </p> <p>intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = 55060.6587 + 77946.4546m_1^{(1.5)} + -50110.933e^{m_1}$ <p>Primera pendiente estado estable</p>
		$ef = \frac{-0.519 + 0.7201m_2 + 2.7844m_2^2 + 1.824m_2^3 + 0.3277m_2^4 + 0.0715m_2^5}{1 + 0.4719m_2 - 1.7285m_2^2 - 1.4114m_2^3 - 0.2518m_2^4 - 0.0661m_2^5}$ <p>Segunda pendiente</p>
	Estado pseudoestable	$ef = -29363.5174 - 57936.2767m_{ssp} - 16509.489m_{ssp}^3 + 38190.5467e^{m_{ssp}} + 3712.775\ln(m_{ssp})$ <p>Pendiente estado pseudoestable</p>
Máximo y mínimo		$ef = -2261.97 + \frac{6994.9738}{\ln(t_D * \Delta P'_D)_{\max}} - \frac{8720.6741}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{\max})^2} + \frac{5435.4905}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{\max})^3} - \frac{1609.956}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{\max})^4} \dots$ $+ \frac{88.9033}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{\max})^5} + \frac{61.7973}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{\max})^6} - \frac{10.709}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{\max})^7}$ <p>Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>

		$y = -1 + -0.00106(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{(0.5)} + 0.2243(t_D * \Delta P'_D)_{\min} \dots \downarrow$ $+ 0.01976(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{(1.5)} + 0.35661(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^2 - 1.69(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{(2.5)} \dots$ $+ 3.5036(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^3 - 4.0421(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{(3.5)} + 2.63016(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^4 \dots \downarrow$ $- 0.889(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{(4.5)} + 0.1196(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^5$ <p>Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable</p>
Tabla 5		Pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activas:
<i>Constante</i>	Estado pseudoestable	$(\mathcal{E}^*)_{ssp} = 383.830639246712 - 410.588ef + 689.476ef^2 + 1315.04ef^3 - 2377.9646ef^4 \dots$ $- 8249.3029ef^5 + 21066.2362ef^6 + -16169.3767ef^7 + 4134.254ef^8$ <p>Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial</p>
	Estado estable	$(\mathcal{E}^*)_{ss} = \frac{622.777 + 4387.2965ef + 8941.984ef^2 + 9817.963ef^3 + 5428.62ef^4 + 797.441ef^5}{1 + 12.556ef + 44.6051ef^2 + 75.663ef^3 + 61.005ef^4 + 18.397ef^5}$ <p>Intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>
		$(\mathcal{E}^*)_{ss} = \frac{-28.261 - 273.3356ef - 752.523ef^2 - 901.9745ef^3 - 560.213ef^4 - 165.404ef^5}{1 + 5.5427ef + 11.3421ef^2 + 11.741ef^3 + 6.535ef^4 + 1.5937ef^5}$ <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
<i>Pendiente</i>	Estado estable	$ef = -0.77 + 1.0227m_1^2 - 146.754m_1^4 + 4064.7404m_1^6 - 60832.787m_1^8 + 552844.738m_1^{10} - 3174029m_1^{12} \dots$ $+ 11554132.221m_1^{14} - 25823995.221m_1^{16} + 32294385.581m_1^{18} - 17286363.886m_1^{20}$ <p>Primera pendiente estado estable</p>
		$ef = \frac{-0.5193 + 0.7201m_2 + 2.7844m_2^2 + 1.824m_2^3 + 0.3277m_2^4 + 0.0715m_2^5}{1 + 0.472m_2 - 1.7285m_2^2 - 1.4114m_2^3 - 0.2518m_2^4 - 0.06613m_2^5}$ <p>Segunda pendiente</p>
	Estado pseudoestable	$ef = \frac{-0.6735 + 5.2543m_{ssp} - 16.1597m_{ssp}^2 + 24.4249m_{ssp}^3 - 18.1004m_{ssp}^4 + 5.2633m_{ssp}^5}{1 - 6.4475m_{ssp} + 16.023m_{ssp}^2 - 19.04m_{ssp}^3 + 10.7533m_{ssp}^4 - 2.28m_{ssp}^5}$ <p>Pendiente estado pseudoestable</p>
<i>Máximo y mínimo</i>	Estado estable	$ef = 0.106 - 147.753(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^2 + 6719.597(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^4 - 161086.4338(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^6 + 2261660.1945(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^8 \dots$ $- 17277325.3616(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^{10} + 31682508.1452(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^{12} + 654681020.9536(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^{14} - 6395736321.418(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^{16}$ $+ 24918659843.9583(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^{18} - 37698416415.4725(t_D * \Delta P'_D)_{\max}^{20}$ <p>Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>

		$y = -0.998 - 0.1334(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{0.5} + 4.6517(t_D * \Delta P'_D)_{\min} - 53.64347(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{1.5} \dots$ $+ 393.9981(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^2 - 1643.5885(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{(2.5)} + 4055.3488(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^3 \dots$ $- 5854.4595(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{3.5} + 4566.8528(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^4 - 1485.773(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{4.5}$ <p style="text-align: center;">Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable</p>
--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

*(0.5) es el flujo radial completo que se presenta como una línea recta de pendiente cero en la gráfica de derivada de presión y con punto de corte igual a 0.5.

** (1) es la mitad de flujo radial que se presenta cuando el pozo está muy cerca a la frontera y se representa como una línea recta de pendiente cero en la gráfica de derivada de presión y con punto de corte iguala 1.

Tabla 6		Rectangular: Pozo centrado con frontera lateral parcialmente activa:
Constante	Estado pseudoestable	$(\mathcal{E}^*)_{ssp} = \frac{321.293 - 559.3267ef + 42.3596ef^2 + 211.711ef^3}{1 - 1.965ef + 0.69694ef^2 + 0.2599ef^3 + 0.05001ef^4}$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial</p>
	Estado estable	$(\mathcal{E}^*)_{ss} = \frac{-8760.32 + 16896.6742ef + 20635.0102ef^2 - 4851.634ef^3}{1 - 24.1916ef - 118.2804ef^2 - 152.7824ef^3 - 59.7115ef^4}$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>
	Estado estable	$(\mathcal{E}^*)_{ss}^{(-1)} = -0.1313 - 0.72003ef - 1.56531ef^2 - 1.6856ef^3 - 0.8984ef^4 - 0.18957ef^5$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = -1459598.598 + 1779580.4575m_1 - 320825.979m_1^{(1.5)} - 1085659.894m_1^{(0.5)} \ln(m_1) - 218024.873 \ln(m_1)$ <p style="text-align: center;">Primera pendiente estado estable</p>
	Estado estable	$ef = \frac{332.4554 + 19448.8183m_2 + 14776.7328m_2^2 + 126592.5505m_2^3}{1 - 21652.043m_2 - 2733.8942m_2^2 - 120622.3724m_2^3 + 718.169m_2^4}$ <p style="text-align: center;">Segunda pendiente</p>
	Estado pseudoestable	$ef = \frac{-2.213 + 7.6142m_{ssp} - 8.6938m_{ssp}^2 + 3.2968m_{ssp}^3}{1 - 2.4576m_{ssp} + 1.8307m_{ssp}^2 - 0.3687m_{ssp}^3}$ <p style="text-align: center;">Pendiente estado pseudoestable</p>

Máximo y mínimo	Estado estable	$ef = -864.08 + \frac{5712.48}{\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx}} - \frac{15847.93}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^2} + \frac{24093.27}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^3} - \frac{21635.46}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^4} + \frac{11089.49}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^5} \dots$ $- \frac{2317.69}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^6} - \frac{658.31}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^7} + \frac{552.743}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^8} - \frac{137.66}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^9} + \frac{12.66}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^{10}}$ <p style="text-align: center;">Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>
		$ef = \frac{-1 - 0.902(t_D * \Delta P'_D)_{mín} + 5.966(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 - 5.1864(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 + 0.9(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4}{1 + 1.036(t_D * \Delta P'_D)_{mín} - 5.749(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 + 4.202(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 - 0.132(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4 - 0.0977(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^5}$ <p style="text-align: center;">Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable</p>

Tabla 7		Pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activas:
Constante	Estado pseudoestable	$(\pounds^*)_{ssp} = 222.2256 + 185.524ef - 334.789ef^2 - 524.8164ef^3 + 4150.7514ef^4 \dots$ $- 6311.078ef^5 - 9937.4344ef^6 + 41253.6444ef^7 - 43463.0058ef^8 + 15143.02ef^9$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial</p>
	Estado estable	$(\pounds^*)_{ss} = \frac{6592.8433 + 25776.1978ef + 37202.4345ef^2 + 23391.1308ef^3 + 5372.1874ef^4}{1 - 7.8009ef - 43.589ef^2 - 73.858ef^3 - 53.1185ef^4 - 14.0492ef^5}$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>
	Estado estable	$(\pounds^*)_{ss} = \frac{-1710.446 + 2771.6101ef^2 - 1063.8848ef^4}{1 - 4.3215ef^2 + 5.3642ef^4 - 2.0436ef^6}$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = 3814791.9537 + 49578094.252m_1 + (37658158.8356m_1^2 * \ln(m_1)) - 28407169.43m_1^{(2.5)} - 24112997.711m_1^{(0.5)}$ <p style="text-align: center;">Primera pendiente estado estable</p>
	Estado estable	$ef = -0.485 + 0.9178m_2 + 1.0123(m_2^2) + 0.8665(m_2^3) + 0.5845(m_2^4) + 0.3041(m_2^5) \dots$ $+ 0.1163(m_2^6) + 0.0307(m_2^7) + 0.00516(m_2^8) + 0.0005(m_2^9) + 2.0083E - 05(m_2^{10})$ <p style="text-align: center;">Segunda pendiente</p>
	Estado pseudoestable	$ef = \frac{1.002 + 4.219\ln(m_{ssp}) + 5.723(\ln(m_{ssp}))^2 + 2.222(\ln(m_{ssp}))^3 - 0.3764(\ln(m_{ssp}))^4}{1 + 2.6433\ln(m_{ssp}) - 3.5206(\ln(m_{ssp}))^2 - 19.232(\ln(m_{ssp}))^3 - 23.3125(\ln(m_{ssp}))^4 - 9.479(\ln(m_{ssp}))^5}$ <p style="text-align: center;">Pendiente estado pseudoestable</p>

Máximo y mínimo	Estado estable	$ef = 4683.12 \frac{24954.83}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}} + \frac{46805.08}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^2} - \frac{32533.41}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^3} + \frac{4299.4116}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^4} + \frac{-16055.9158}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^5} \dots$ $+ \frac{34647.4397}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^6} - \frac{12794.9935}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^7} - \frac{13191.5758}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^8} + \frac{11712.0468}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^9} - \frac{2616.8665}{(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^{10}}$ <p style="text-align: center;">Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>
		$ef = -1 + 0.0357(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{0.5} - 0.3633(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 + 9.7277(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{1.5} - 56.23(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 + 190.33(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{2.5} \dots$ $- 392.6173(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 + 495.565(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{3.5} - 370.8394(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4 + 149.4901(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{4.5} - 24.588(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^5$ <p style="text-align: center;">entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable</p>

Tabla 8		Pozo descentrado con frontera cercana parcialmente activa:												
Constante	Estado pseudoestable	$(\mathcal{F}^*)_{ssp} = 415.311 - 159.6725ef + 105.3135ef^2 - 585.219ef^3 + 1132.8677ef^4 + 2451.199ef^5 \dots$ $- 4662.794ef^6 - 4638.0805ef^7 + 7813.051ef^8 + 2286.1578ef^9 - 3776.9498ef^{10}$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial</p>												
	Estado estable	$(\mathcal{F}^*)_{ss} = \frac{4586.036 + 15346.311ef + 16790.779ef^2 + 6031.172ef^3}{1 + 3.3585ef + 3.689ef^2 + 1.3306ef^3}$ <p style="text-align: center;">intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>												
		$\ln(\mathcal{F}^*)_{ss} = \frac{8.322 + 19.7758ef + 11.7568ef^2}{1 + 2.3651ef + 1.3988ef^2}$ <p style="text-align: center;">intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>												
Pendiente	Estado estable	$ef = a + bm_1 + c(m_1^2) + d(m_1^3) + e(m_1^4) + f(m_1^5) + g(m_1^6) + h(m_1^7) + i(m_1^8) + j(m_1^9) + k(m_1^{10})$ <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">a = 129.8545270268758</td> <td style="width: 50%;">f = 2723081.501365025</td> </tr> <tr> <td>b = -4387.417598097715</td> <td>g = -37951295.75448723</td> </tr> <tr> <td>c = 60518.31060002198</td> <td>h = 150648328.472216</td> </tr> <tr> <td>d = -420563.3451947616</td> <td>i = -315297705.1637524</td> </tr> <tr> <td>e = 1227371.100578521</td> <td>j = 351309590.6819313</td> </tr> <tr> <td></td> <td>k = -164811273.5264842</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Primera pendiente estado estable</p>	a = 129.8545270268758	f = 2723081.501365025	b = -4387.417598097715	g = -37951295.75448723	c = 60518.31060002198	h = 150648328.472216	d = -420563.3451947616	i = -315297705.1637524	e = 1227371.100578521	j = 351309590.6819313		k = -164811273.5264842
a = 129.8545270268758	f = 2723081.501365025													
b = -4387.417598097715	g = -37951295.75448723													
c = 60518.31060002198	h = 150648328.472216													
d = -420563.3451947616	i = -315297705.1637524													
e = 1227371.100578521	j = 351309590.6819313													
	k = -164811273.5264842													

		$ef = -0.888 + 0.183m_2 - \frac{0.0039}{m_2} + 0.133(m_2^2) + \frac{0.00018}{m_2^2} + 0.051m_2^3 \dots$ $+ \frac{3.421E-05}{m_2^3} + 0.0099m_2^4 + \frac{1.243E-06}{m_2^4} + 0.0007m_2^5 + \frac{1.1095E-08}{m_2^5}$ <p style="text-align: center;">Segunda pendiente</p>
	Estado pseudoestable	$ef = 0.9763 - 6.2667 \ln(m_{ssp}) - 285.679 (\ln(m_{ssp}))^2 - 3617.63 (\ln(m_{ssp}))^3 - 21397.92 (\ln(m_{ssp}))^4 \dots$ $- 64537.827 (\ln(m_{ssp}))^5 - 96221.6706 (\ln(m_{ssp}))^6 - 56125.065 (\ln(m_{ssp}))^7$ <p style="text-align: center;">Pendiente estado pseudoestable</p>
Máximo y mínimo	Estado estable	$ef = \frac{-1.0726 + -12.875(t_D * \Delta P'_D)_{máx} + 0.167(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^2 + 29.033(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^3 - 4.945(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^4 - 10.448(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^5}{1 + 7.858(t_D * \Delta P'_D)_{máx} + 12.458(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^2 - 24.92(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^3 - 20.079(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^4 + 23.851(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^5}$ <p style="text-align: center;">Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>
	Estado estable	$ef = \frac{-1 + 1.618(t_D * \Delta P'_D)_{mín} - 3.9564(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 + 9.306(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 - 7.6976(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4 + 1.708(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^5}{1 - 1.471(t_D * \Delta P'_D)_{mín} + 3.8456(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 - 9.062(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 + 6.833(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4 - 1.119(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^5}$ <p style="text-align: center;">Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable</p>
Tabla 9		Pozo descentrado con frontera lejana parcialmente activa:
Constante	Estado pseudoestable	$(\pounds^*)_{ssp} = \frac{158.902 - 941.6299ef + 2555.77ef^2 - 3186.558ef^3 + 447.489ef^4 + 1622.853ef^5}{1 - 5.844ef + 15.365ef^2 - 21.848ef^3 + 13.974ef^4 - 0.906ef^5}$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial</p>
	Estado estable	$(\pounds^*)_{ss} = \frac{2844.627 + 10570.763ef + 12398.473ef^2 + 4672.841ef^3}{1 + 3.9217ef + 5.1199ef^2 + 2.508ef^3 + 0.30988ef^4}$ <p style="text-align: center;">intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>
		$(\pounds^*)_{ss} = a + b(ef^2) + c(ef^4) + d(ef^6) + e(ef^8) + f(ef^{10}) + g(ef^{12}) + h(ef^{14}) + i(x^{16}) + j(x^{18}) + k(x^{20})$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p> <p style="text-align: center;"> $a = 6765720227.334109$ $f = -349548972587.9451$ $b = -60559292549.55579$ $g = 37040197619.78157$ $c = 230564337647.1604$ $h = 81622745592.84122$ $d = -478892999820.4403$ $i = -37776079432.51154$ $e = 569519353174.2612$ $j = -1735342390.069207$ $k = 3000347197.966076$ </p>
Pendiente	Estado estable	$ef = 31518883.978 - 80395022.1945m_1 + 97024306.332m_1^{(2.5)} + \frac{7452154.5405m_1}{\ln(m_1)} + \frac{1119352.2368 \ln(m_1)}{m_1^2}$ <p style="text-align: center;">Primera pendiente estado estable</p>
	Estado estable	$ef = -0.515 + 1.064m_2 + 1.787m_2^2 + 2.376m_2^3 + 2.189m_2^4 + 1.339m_2^5 \dots$ $+ 0.5392m_2^6 + 0.1406m_2^7 + 0.0228m_2^8 + 0.00208m_2^9 + 8.1662E-05(m_2^{10})$ <p style="text-align: center;">Segunda pendiente</p>

	Estado pseudoestable	$ef = a + b(m_{ssp}^2) + c(m_{ssp}^4) + d(m_{ssp}^6) + e(m_{ssp}^8) + f(m_{ssp}^{10}) + \dots$ $g(m_{ssp}^{12}) + h(m_{ssp}^{14}) + i(m_{ssp}^{16}) + j(m_{ssp}^{18}) + k(m_{ssp}^{20})$ $a = -2.122189641897838 \quad f = 1634227.481231802$ $b = 92.78319730961667 \quad g = -5770163.120411196$ $c = -2384.583557203361 \quad h = 13075082.88792822$ $d = 34413.11166004053 \quad i = -18331207.30559757$ $e = -298425.4889720342 \quad j = 14453811.72390938$ $k = -4895835.076729787$ <p style="text-align: center;">Pendiente estado pseudoestable</p>
Máximo y mínimo	Estado estable	$ef = \frac{1.91135 - 0.6024(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^2 + 0.0618(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^4 - 0.00204(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^6}{1 - 0.7164(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^2 + 0.1591(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^4 - 0.0141(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^6 + 0.0004(t_D * \Delta P'_D)_{máx}^8}$ <p style="text-align: center;">Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>
	Estado estable	$ef = \frac{-1 - 0.444(t_D * \Delta P'_D)_{mín} + 2.425(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 - 1.429(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 - 3.437(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4 + 0.492(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^5}{1 + 0.5712(t_D * \Delta P'_D)_{mín} - 2.281(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 + 0.936(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 + 3.789(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4 - 0.0913(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^5}$ <p style="text-align: center;">Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable</p>
Tabla 10		 Pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activa:
Constante	Estado pseudoestable	$(\pounds^*)_{ssp} = \frac{158.902 - 941.6299ef + 2555.77ef^2 - 3186.558ef^3 + 447.489ef^4 + 1622.853ef^5}{1 - 5.844ef + 15.365ef^2 - 21.848ef^3 + 13.974ef^4 - 0.906ef^5}$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial</p>
	Estado estable	$(\pounds^*)_{ss} = \frac{1421.7803 + 10870.808ef + 11825.8121ef^2 + 15986.8393ef^3 + 13725.704ef^4 + 203.528ef^5}{1 + 151.867ef + 759.573ef^2 + 1460.1215ef^3 + 1230.2494ef^4 + 378.8692ef^5}$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre la primera y segunda pendiente</p>
		$(\pounds^*)_{ss} = a + b(ef^2) + c(ef^4) + d(ef^6) + e(ef^8) + f(ef^{10}) + g(ef^{12}) + h(ef^{14}) + i(ef^{16})$ $e = 127275887586.2722$ $a = 607873611.5329593 \quad f = -131757368530.8249$ $b = -6461405211.77888 \quad g = 84743003783.63969$ $c = 29836798112.46689 \quad h = -30968100391.96265$ $d = -78200672170.85508 \quad i = 4923985697.498613$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = \frac{-0.476 - 0.6182 \ln(m_1) - 0.3665(\ln(m_1))^2 - 0.1089(\ln(m_1))^3 - 0.01264(\ln(m_1))^4}{1 + 1.2345 \ln(m_1) + 0.6374(\ln(m_1))^2 + 0.1617(\ln(m_1))^3 + 0.01647(\ln(m_1))^4}$ <p style="text-align: center;">Primera pendiente estado estable</p>
	Estado estable	$ef = -0.647 + 0.7578m_2 + 0.866m_2^2 + 0.5187m_2^3 + 0.0369m_2^4 - 0.1624m_2^5 \dots$ $-0.1146m_2^6 - 0.0381m_2^7 - 0.007m_2^8 - 0.0007m_2^9 - 2.7698E-05(m_2^{10})$ <p style="text-align: center;">Segunda pendiente</p>

	Estado pseudoestable	$ef = 3.926 - 133.837m_{ssp}^2 + 1569.766m_{ssp}^4 - 10251.93m_{ssp}^6 + 41788.07m_{ssp}^8 - 111505.696m_{ssp}^{10} \dots$ $+ 198132.79m_{ssp}^{12} - 232331m_{ssp}^{14} + 172576.37m_{ssp}^{16} - 73518.126m_{ssp}^{18} + 13670.71m_{ssp}^{20}$ <p style="text-align: center;">Pendiente estado pseudoestable</p>
Máximo y mínimo	Estado estable	$ef = \frac{-0.612 - 4.782 \ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx} - 12.507 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^2 - 13.406 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^3 - 4.993 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^4}{1 + 8.202 \ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx} + 22.809 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^2 + 26.491 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^3 + 11.019 (\ln(t_D * \Delta P'_D)_{máx})^4}$ <p style="text-align: center;">Entre la primera y segunda pendiente del estado estable.</p>
	Estado estable	$ef = -1 + 0.442(t_D * \Delta P'_D)_{mín} + 1.0434(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^2 - 10.034(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^3 + 53.7295(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^4 - 154.9879(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^5 \dots$ $+ 225.828(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^6 - 164.365(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^7 + 198.726(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^8 - 396.988(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^9 + 272.367(t_D * \Delta P'_D)_{mín}^{10}$ <p style="text-align: center;">Entre la segunda y tercera pendiente ($m_3 = 0.35$) del estado estable</p>

*(0.5) es el flujo radial complete que se presenta como una línea recta de pendiente cero en la gráfica de derivada de presión y con punto de corte igual a 0.5.

** (1) es la mitad de flujo radial que se presenta cuando el pozo está muy cerca a la frontera y se representa como una línea recta de pendiente cero en la gráfica de derivada de presión y con punto de corte iguala 1.

Caso particular:

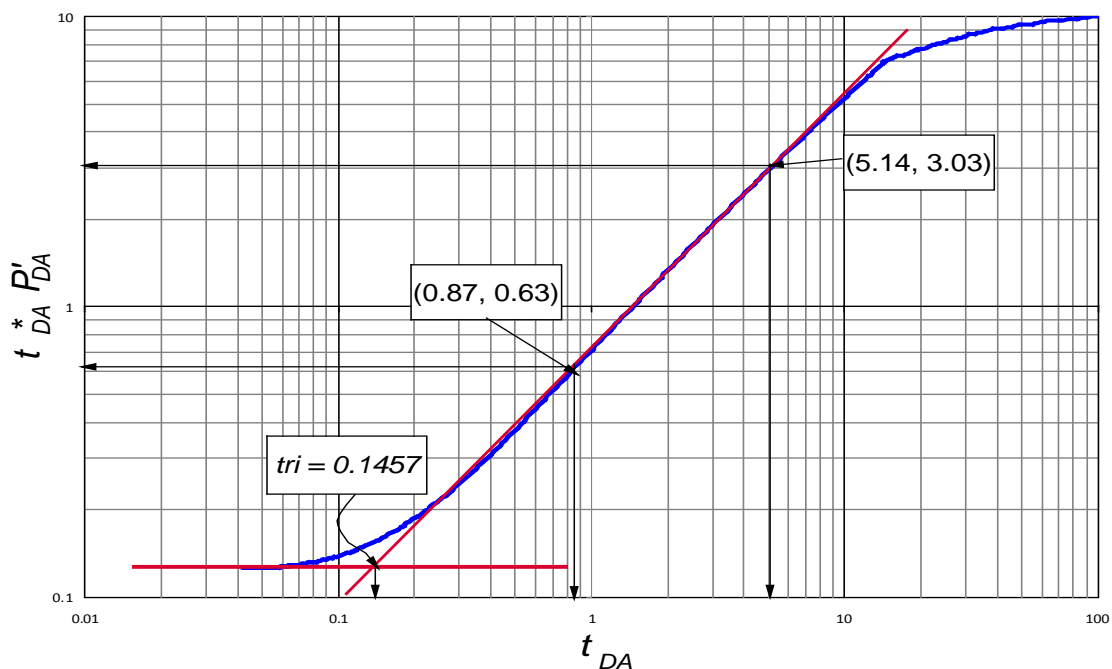
Tabla 11		Cuadrado: Pozo centrado con fronteras hidráulicamente activas:
Constante	Estado pseudoestable	$(\mathcal{E}^*)_{ssp} = 414.8398 - 42.3068ef + 1042.0376ef^2 - 6279.601ef^3 + 14232.841ef^4 - 14180.989ef^5 + 5198.166ef^6$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado estable y el flujo radial.</p>
	Estado estable	$ (\mathcal{E}^*)_{ss} = 431.9303 - 142.6563ef - 65.0744ef^2 - 122.1613ef^3 + 29.302ef^4$ <p style="text-align: center;">Intercepción entre estado estable y el flujo radial.</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = -0.3725 + 0.2970m_{ss} + 0.05102m_{ss}^2 + 0.3762e^{m_{ss}} - 0.0058(-m_{ss})$ <p style="text-align: center;">Segunda pendiente estado estable.</p>
	Estado pseudoestable	$ef = \frac{-3.5869 + 7.2512m_{ssp} - 3.6643m_{ssp}^2}{1 + 1.8564m_{ssp} - 4.5035m_{ssp}^2 + 1.7312m_{ssp}^3}$ <p style="text-align: center;">Pendiente estado pseudoestable.</p>
Tabla 12		Pozo descentrado con fronteras hidráulicamente activas:

Constante	Estado pseudoestable	$(\text{£}^*)_{ssp} = 311.817 - 27.593ef - 192.3474ef^2 + 1026.1287ef^3 - 2008.9912ef^4 + 1881.2815ef^5 - 677.9206ef^6$ <p>Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial.</p>
	Estado estable	$(\text{£}^*)_{ss} = 354.3121 + 200.8337ef^2 + 335.6549x^4 - 1452.2604ef^6 + 2607.1955ef^8 - 1319.5727ef^{10}$ <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = 0.00362 + 0.8516m_{ss} + 0.3927m_{ss}^2 + 0.1132m_{ss}^3 + 0.0187m_{ss}^4 + 0.00133m_{ss}^5$ <p>Segunda pendiente estado estable.</p>
	Estado pseudoestable	$ef = -0.0335 + 1.616441842645565m_{ssp} - 7.2323m_{ssp}^2 + 38.2493m_{ssp}^3 - 114.0361m_{ssp}^4 \dots$ $+ 207.0537m_{ssp}^5 - 225.6235m_{ssp}^6 + 135.1571m_{ssp}^7 - 34.1509m_{ssp}^8$ <p>Pendiente estado pseudoestable</p>

Tabla 13	Rectangular: Pozo centrado con fronteras hidráulicamente activas:	
Constante	Estado pseudoestable	$(\text{£}^*)_{ssp} = 339.7058 + 145.0468ef^2 - 1121.794ef^4 + 5761.8469ef^6 \dots$ $- 16503.4228ef^8 + 25937.5331ef^{10} - 20915.4176ef^{12} + 6741.6075ef^{14}$ <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial.</p>
	Estado estable	$(\text{£}^*)_{ss} = 333.6631 - 159.56ef^2 + 9741.2163ef^4 - 153956.6907ef^6 + 1240230.6895ef^8 - 5646210.389ef^{10} \dots$ $+ 15370216.9764ef^{12} - 25508425.708ef^{14} + 25284251.74ef^{16} - 13751215.034ef^{18} + 3156685.023ef^{20}$ <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial.</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = -0.0303 + 0.3008m_{ss} - 3.597m_{ss}^2 - 13.011m_{ss}^3 - 24.15m_{ss}^4 - 26.8m_{ss}^5 \dots$ $- 18.586m_{ss}^6 - 8.119m_{ss}^7 - 2.1702m_{ss}^8 - 0.3241m_{ss}^9 - 0.0207m_{ss}^{10}$ <p>Segunda pendiente estado estable.</p>
	Estado pseudoestable	$ef = -0.0796 + 2.813m_{ssp} - 19.757m_{ssp}^2 + 105.117m_{ssp}^3 - 319.381m_{ssp}^4 \dots$ $+ 579.777m_{ssp}^5 - 620.1265m_{ssp}^6 + 360.3203m_{ssp}^7 - 87.6827m_{ssp}^8$ <p>Pendiente estado pseudoestable.</p>
Tabla 14	Pozo descentrado con fronteras hidráulicamente activas:	

Constante	Estado pseudoestable	$(\mathcal{E}^*)_{ssp} = 348.869 - 1610.049ef + 15088.527ef^2 - 75967.1423ef^3 + 222661.139ef^4 \dots$ $- 392766.431ef^5 + 411872.536ef^6 - 236474.158ef^7 + 57226.357ef^8$ <p>Intercepción entre estado pseudoestable y el flujo radial.</p>
	Estado estable	$(\mathcal{E}^*)_{ss} = 283.458 + 629.589ef^2 - 7228.589ef^4 + 55947.0214ef^6 - 251058.5122ef^8 + 688744.457ef^{10} \dots$ $- 1174865.1647ef^{12} + 1238752.283ef^{14} - 777420.272ef^{16} + 264538.8217ef^{18} - 37763.2465ef^{20}$ <p>Intercepción entre estado estable y el flujo radial</p>
Pendiente	Estado estable	$ef = 0.0007 + 0.935m_{ss} + 0.5714m_{ss}^2 + 0.5594m_{ss}^3 + 0.6482m_{ss}^4 + 0.4935m_{ss}^5 \dots$ $+ 0.2181m_{ss}^6 + 0.0513m_{ss}^7 + 0.0043m_{ss}^8 - 0.00044m_{ss}^9 - 8.237E-05m_{ss}^{10}$ <p>Segunda pendiente estado estable.</p>
	Estado pseudoestable	$ef^{(-1)} = 15.902 - 94.706m_{ssp} + 266.881m_{ssp}^2 - 388.3462m_{ssp}^3 + 280.927m_{ssp}^4 - 79.66m_{ssp}^5$ <p>Pendiente estado pseudoestable</p>

Ejemplo 1. Yacimiento rectangular con frontera lateral hidráulicamente activa, en la que se evidencia la presencia del estado pseudoestable.



Gráfica 34. Simulación correspondiente a un yacimiento rectangular con frontera lateral parcialmente activa.

En el gráfico 34, se identifican y ubican las líneas correspondientes para cada flujo. Sobre la línea del estado pseudoestable se toma nota de dos puntos para la determinación de la pendiente y el tiempo donde se interceptan las dos líneas ingresadas.

Para la determinación de la pendiente se hace uso de la fórmula:

$$m = \frac{\log y_2 - \log y_1}{\log x_2 - \log x_1}$$

$$m = \frac{\log 3.03 - \log 0.61}{\log 5.14 - \log 0.87}$$

$$m = 0.88$$

Con el valor de la pendiente se dirige a la tabla 6, donde está consignada las ecuaciones para calcular la eficiencia de flujo y la constante para el estado pseudoestable.

$$ef = \frac{-2.213 + 7.6142m_{ssp} - 8.6938m_{ssp}^2 + 3.2968m_{ssp}^3}{1 - 2.4576m_{ssp} + 1.8307m_{ssp}^2 - 0.3687m_{ssp}^3}$$

$$ef = 0.452$$

Ecuación de la constante para estado pseudoestable:

$$(\mathcal{F}^*)_{ssp} = \frac{321.293 - 559.3267ef + 42.3596ef^2 + 211.711ef^3}{1 - 1.965ef + 0.69694ef^2 + 0.2599ef^3 + 0.05001ef^4}$$

$$\mathcal{F}^* = 344.93$$

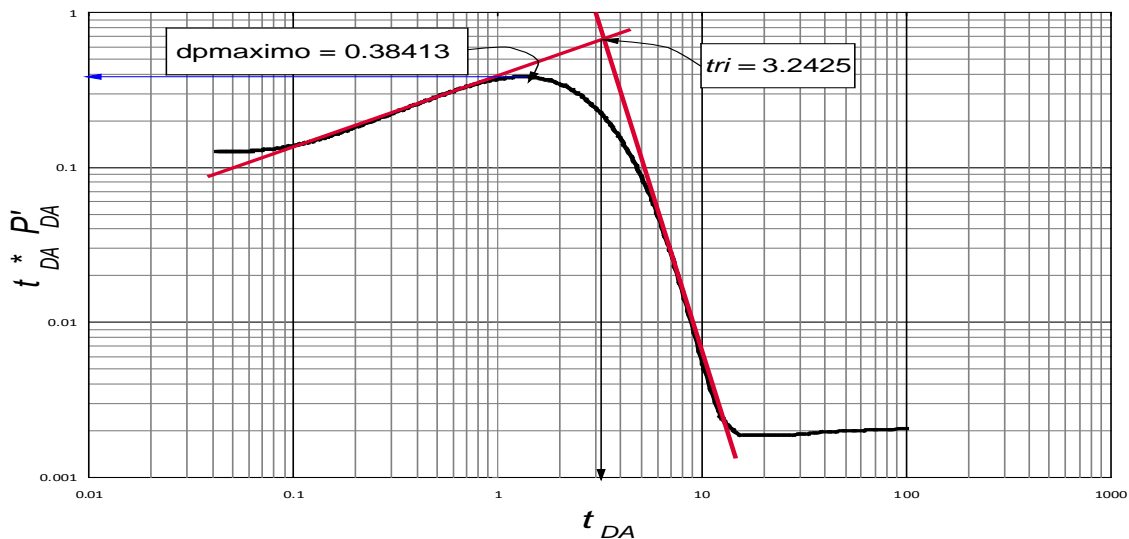
$$A = \frac{kt_{rpi}}{344.93\theta\mu t}$$

$$A = \frac{3000 * 0.1457}{346.32 * 0.2 * 2 * 3e^{-6}}$$

$$A = 1056011.365ft^2$$

La área simulada para este ejercicio es de 1040000 ft^2 , el error generado es de 1.54% por lo que se puede observar la eficiencia en la metodología propuesta para la determinación del área.

Ejemplo 2. Yacimiento rectangular con frontera lateral hidráulica parcialmente activa en la que se evidencia la presencia del estado estable.



Gráfica 35. Simulación correspondiente a un yacimiento rectangular con frontera lateral parcialmente activa.

En este caso la línea de la primera y segunda pendiente se obtiene el punto de intersección entre ellas y el valor del máximo presentado en la prueba, para este caso no existe la presencia de un mínimo (ver gráfica 35). Se hace uso de la fórmula:

$$(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x} = \frac{kh(t_{DA} * \Delta P'_{DA})_{m\acute{a}x}}{(141.2q\mu\beta)}$$

$$(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x} = \frac{3000 * 100 * 0.3841}{(141.2 * 200 * 2 * 1.05)}$$

$$(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x} = 1.52$$

Con el valor del máximo, calculo la eficiencia de flujo de la frontera para estado estable (ver tabla 6):

$$ef = -864.08 + \frac{5712.48}{\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x}} - \frac{15847.93}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^2} + \frac{24093.27}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^3} - \frac{21635.46}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^4} + \frac{11089.49}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^5} \dots$$

$$- \frac{2317.69}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^6} - \frac{658.31}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^7} + \frac{552.743}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^8} - \frac{137.66}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^9} + \frac{12.66}{(\ln(t_D * \Delta P'_D)_{m\acute{a}x})^{10}}$$

$$ef = -0.998$$

Con la eficiencia de flujo ya calculada, se determina el valor de la constante para estado estable (ver tabla 6).

$$(\mathcal{L}^*)_{ss} = \frac{-8760.32 + 16896.6742ef + 20635.0102ef^2 - 4851.634ef^3}{1 - 24.1916ef - 118.2804ef^2 - 152.7824ef^3 - 59.7115ef^4}$$

$$\mathcal{L}^* = 7695.27369$$

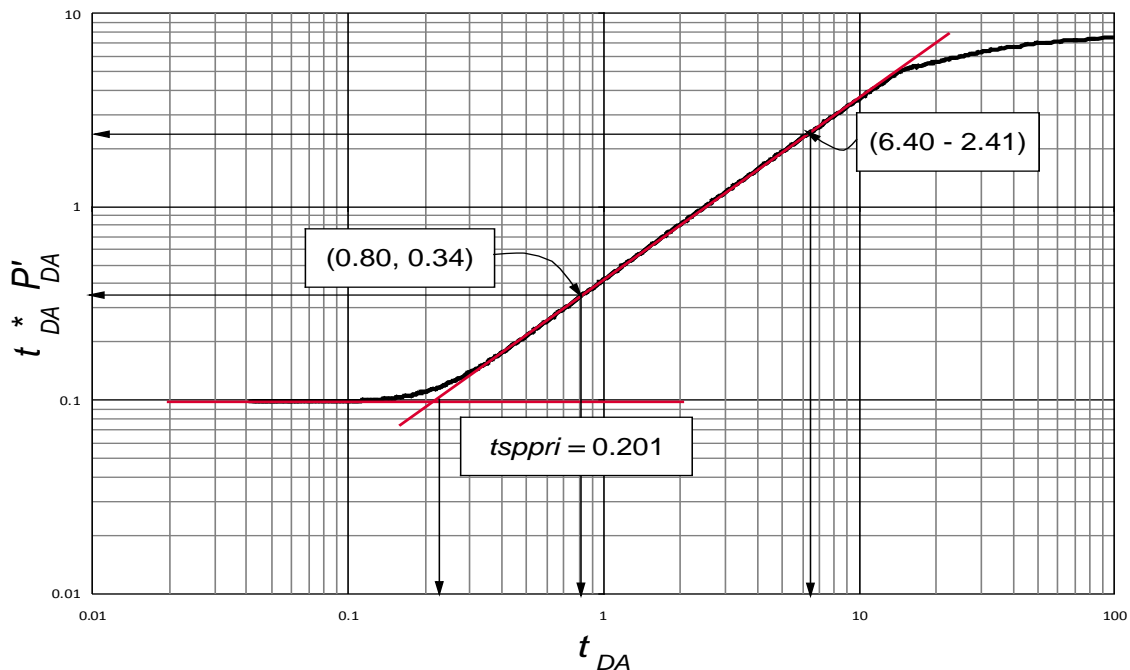
$$A = \frac{kt_{rpi}}{7801.6\theta\mu ct}$$

$$A = \frac{3000 * 3.2425}{7695.27369 * 0.2 * 2 * 3e^{-6}}$$

$$A = 1053406.328 \text{ ft}^2$$

El área simulada para este ejercicio es de 1040000 ft^2 , el error generado es de 1.29% por lo que se puede observar la eficiencia en la metodología propuesta para la determinación del área.

Ejemplo 3. Yacimiento cuadrado con fronteras laterales parcialmente activas, en la que se evidencia la presencia del estado pseudoestable:



Gráfica 36. Simulación correspondiente a un yacimiento cuadrado con fronteras laterales hidráulicas parcialmente activas.

En el gráfico 36 se identifican y ubican las líneas correspondientes para cada flujo. Sobre la línea del estado pseudoestable se toma nota de dos puntos para la determinación de la pendiente y se toma el tiempo donde se interceptan las dos líneas ingresadas.

Para la determinación de la pendiente se hace uso de la fórmula:

$$m = \frac{\log y_2 - \log y_1}{\log x_2 - \log x_1}$$

$$m = \frac{\log 2.41 - \log 0.34}{\log 6.4 - \log 0.8}$$

$$m = 0.94$$

Con el valor de la pendiente calculo la eficiencia de flujo de la frontera, (ver ecuaciones en la tabla 5).

$$ef = \frac{-0.6735 + 5.2543m_{ssp} - 16.1597m_{ssp}^2 + 24.4249m_{ssp}^3 - 18.1004m_{ssp}^4 + 5.2633m_{ssp}^5}{1 - 6.4475m_{ssp} + 16.023m_{ssp}^2 - 19.04m_{ssp}^3 + 10.7533m_{ssp}^4 - 2.28m_{ssp}^5}$$

$$ef = 0.89$$

Con la eficiencia de flujo calculo el valor de la constante para estado pseudo estable, (ver tabla 5).

$$(\text{£}^*)_{ssp} = 383.8306 - 410.588ef + 689.476ef^2 + 1315.04ef^3 - 2377.9646ef^4 \dots$$

$$-8249.3029ef^5 + 21066.2362ef^6 - 16169.3767ef^7 + 4134.254ef^8$$

$$(\text{£}^*)_{ssp} = 338.235528$$

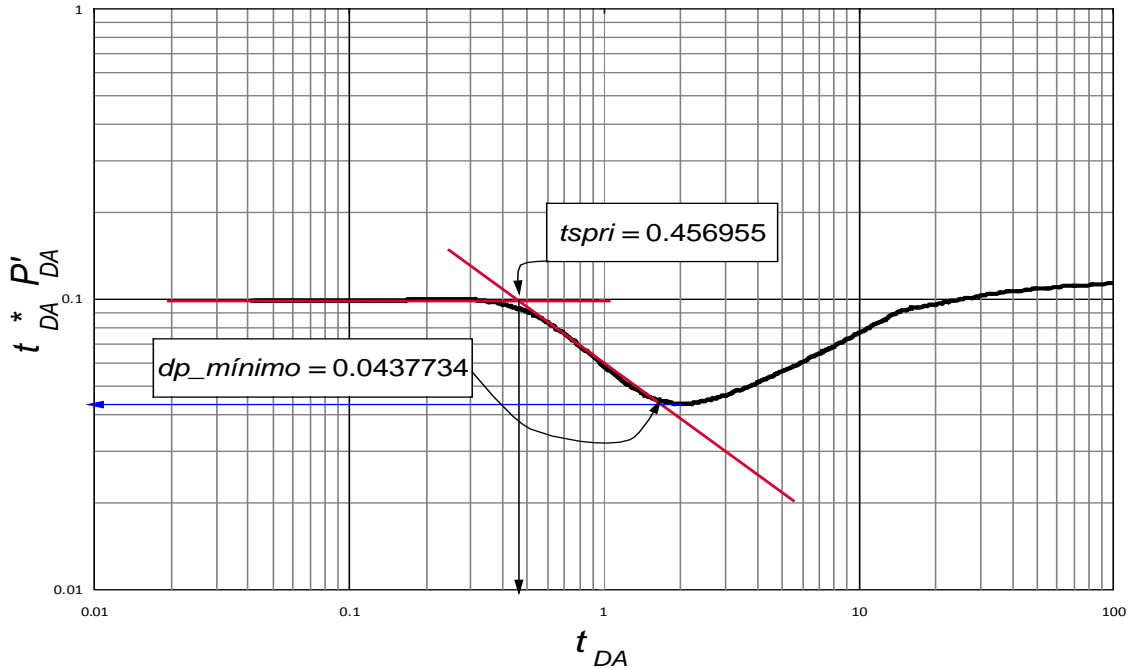
$$A = \frac{kt_{rpi}}{338.235528\theta\mu ct}$$

$$A = \frac{3000 * 0.2019}{338.235528 * 0.18 * 2.2 * 3e^{-6}}$$

$$A = 1507377.087 \text{ ft}^2$$

La área simulada para este ejercicio es de 1440000 ft^2 , el error generado es de 4.67% por lo que se puede observar la eficiencia en la metodología propuesta para la determinación del área.

Ejemplo 4. Yacimiento cuadrado con fronteras laterales parcialmente activas, en la que se evidencia la presencia del estado estable:



Gráfica 37: Simulación correspondiente a un yacimiento rectangular con frontera lateral hidráulica parcialmente activa.

En la gráfica 37, se observan las líneas de la primera y segunda pendiente, el punto de intersección entre ellas y el valor del máximo de la derivada presentado en la prueba; para este caso, no existe la presencia de un mínimo. Se hace uso de la siguiente fórmula:

$$(t_D * \Delta P'_D)_{\min} = \frac{kh(t_{DA} * \Delta P'_{DA})_{\min}}{(141.2q\mu\beta)}$$

$$(t_D * \Delta P'_D)_{\min} = \frac{3000 * 100 * 0.04377}{(141.2 * 200 * 1.8 * 1.22)}$$

$$(t_D * \Delta P'_D)_{\min} = 0.2214$$

Con el valor de mínimo se calcula la eficiencia de flujo de la frontera para estado estable, (ver tabla 5).

$$ef = -0.998 - 0.1334(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{0.5} + 4.6517(t_D * \Delta P'_D)_{\min} - 53.64347(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{1.5} + 393.9981(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^2 \dots$$

$$-1643.5885(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{(2.5)} + 4055.3488(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^3 - 5854.4595(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{3.5} + 4566.8528(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^4 \dots$$

$$-1485.773(t_D * \Delta P'_D)_{\min}^{4.5}$$

$$ef = -0.80621593$$

Con la eficiencia de flujo ya calculada hace uso de la tabla 5 donde obtengo la ecuación para determina el valor de la constante para estado estable.

$$(\mathcal{E}^*)_{ss} = \frac{622.777 + 4387.2965ef + 8941.984ef^2 + 9817.963ef^3 + 5428.62ef^4 + 797.441ef^5}{1 + 12.556ef + 44.6051ef^2 + 75.663ef^3 + 61.005ef^4 + 18.397ef^5}$$

$$\mathcal{E}^* = 826.1952288$$

$$A = \frac{kt_{rpi}}{743.29\theta\mu ct}$$

$$A = \frac{3000 * 0.4569}{743.29 * 0.18 * 2.2 * 3e^{-6}}$$

$$A = 1396507.555 \text{ ft}^2$$

El área simulada para este ejercicio es de 1440000 ft^2 , el error generado es de 3% por lo que se puede observar la eficiencia en la metodología propuesta para la determinación del área.

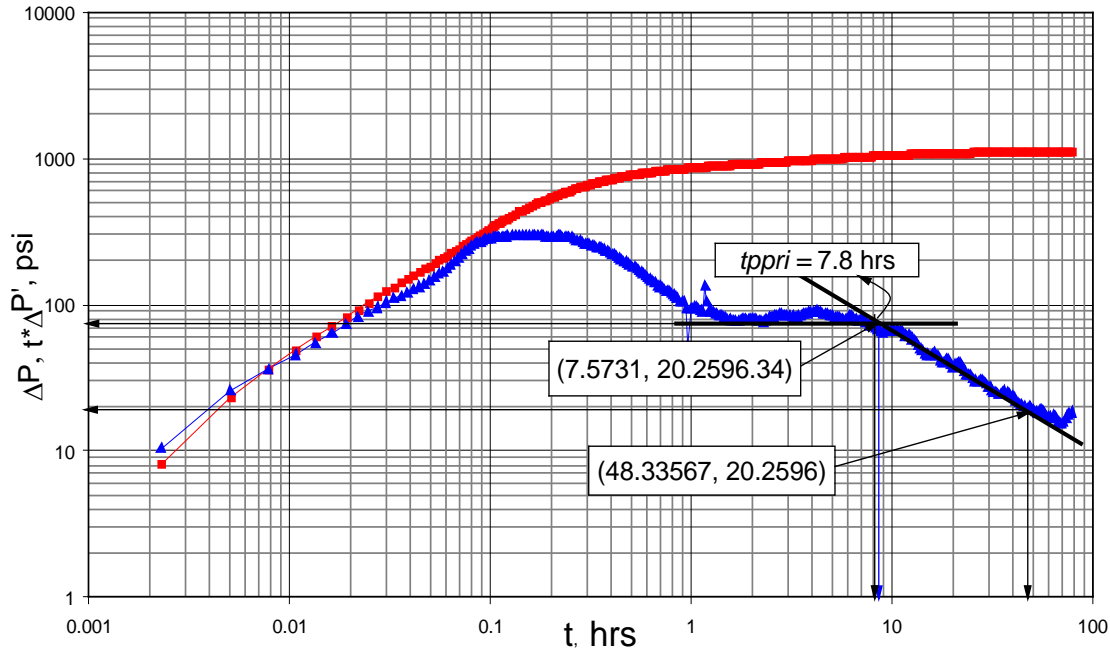
Ejemplo 5. Prueba de presión real, de un pozo descentrado cuadrado con fronteras laterales parcialmente activas; con los siguientes datos:

$$\begin{aligned} q &= 123 \text{ BPD} & \mu &= 1.137 \text{ cp} & \phi &= 13 \% & B &= 1.22 \\ c_t &= 9.84 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1} & r_w &= 0.359 \text{ ft} & h &= 22 \text{ ft} & k &= 7 \text{ md} \\ P_{uw} &= 429.08 \text{ psi} \end{aligned}$$

t , hr	ΔP , psi	$t^* \Delta P'$, psi	t , hr	ΔP , psi	$t^* \Delta P'$, psi	t , hr	ΔP , psi	$t^* \Delta P'$, psi
0.00229	8.12	10.4347592	0.61619	810.5	152.84426	7.75231	1041.31	75.955355
0.00507	23.29	25.8805513	0.63285	814.47	148.703864	7.93287	1043.47	73.7167036
0.00785	36.55	36.4137771	0.64953	818.26	143.927273	8.1162	1045.06	71.5268289
0.01064	49.12	45.6725416	0.66619	821.74	141.240594	8.30509	1046.46	70.0518391
0.01342	60.48	55.1869681	0.68285	825.26	136.598999	8.49675	1048.97	68.341786
0.01619	71.9	64.4660583	0.69953	828.51	133.378326	8.69397	1050.26	65.769586
0.01897	82.58	73.0708432	0.71619	831.54	131.286661	8.89675	1051.25	65.2461365
0.02175	93.28	83.0719334	0.73285	834.65	129.044113	9.1023	1052.41	67.2723829
0.02453	103.79	89.808481	0.75229	837.84	125.55777	9.31342	1053.8	67.1473193
0.0273	113.6	95.8371352	0.77175	840.95	123.068577	9.53008	1055.24	66.3967835
0.03008	123.25	104.269213	0.79119	844.13	120.310239	9.75231	1056.92	66.027823
0.03286	132.91	110.613935	0.81063	847.01	118.240448	9.9773	1058.65	67.3547543
0.03563	141.95	116.207149	0.83008	849.73	115.705373	10.20786	1060.76	67.6237184
0.03841	150.94	122.52379	0.84952	852.47	112.7393	10.44397	1062.78	67.4595179
0.04119	159.72	128.044305	0.87174	855.19	106.940932	10.68564	1063.59	66.6576937

0.04397	168.28	133.491164	0.89397	858.19	106.832949	10.93287	1064.96	66.5346932
0.04674	176.46	139.783617	0.91619	860.66	105.133838	11.18564	1066.31	65.4381278
0.04952	184.74	147.554261	0.93841	862.97	93.5893278	11.44397	1067.68	61.2943027
0.0523	192.98	155.687915	0.96064	864.77	53.0638072	11.71064	1069.09	62.3182071
0.05507	201.29	163.424275	0.98285	867.6	94.0621065	11.98287	1070.55	63.190232
0.05785	209.48	167.344841	1.00786	870.13	95.7307582	12.26064	1072.65	60.5822931
0.06063	217.74	177.283858	1.03286	872.67	96.1065845	12.54398	1073.78	58.4774204
0.06341	224.96	187.660748	1.05785	863.6	97.7852594	12.83564	1075.18	57.6673118
0.06618	233.54	197.265328	1.08286	876	94.8580363	13.13286	1076.78	56.364678
0.06896	242.21	211.359224	1.10785	878.79	92.9355683	13.43842	1077.66	52.5045856
0.07174	250.67	223.828809	1.13564	881.31	90.8466081	13.74953	1078.43	49.901867
0.07453	259.24	233.048149	1.16341	883.6	135.482119	14.06897	1079.69	48.6974839
0.07731	268.1	242.087763	1.19118	885.78	105.316881	14.39397	1080.87	46.7542721
0.08008	276.91	252.027789	1.21897	887.8	92.0248902	14.72732	1082.03	45.7961687
0.08286	285.61	259.126884	1.24952	889.88	90.0626762	15.06897	1083.01	46.0072522
0.08564	294.27	265.61831	1.28008	892.2	88.7602112	15.41898	1083.95	44.5843669
0.08841	303.01	271.81509	1.31063	894.17	88.2266958	15.77454	1085.22	46.099852
0.09119	311.32	276.318459	1.34119	896.25	86.9091651	16.13842	1086.11	47.1807472
0.09397	319.73	280.499149	1.37452	898.48	85.7431313	16.51064	1087.15	44.8838055
0.09675	328.22	283.608862	1.40786	900.49	84.3041621	16.89399	1087.68	44.5127658
0.09952	336.28	285.473347	1.44118	902.62	83.3526385	17.28565	1088.92	42.187276
0.1023	344.01	288.800032	1.47452	904.41	81.6275034	17.68564	1090.9	40.4784559
0.10508	351.98	289.656389	1.51064	906.18	80.2446417	18.09398	1091.26	40.5408387
0.10785	359.51	291.126581	1.54674	908.12	79.5894339	18.51204	1092.23	43.0254907
0.11063	366.66	291.847495	1.58286	909.97	78.6795716	18.9412	1092.95	43.3056254
0.11341	374.19	293.551574	1.62174	911.72	78.0897858	19.38009	1093.57	38.8885506
0.11619	381.2	293.758277	1.66063	913.6	79.0369847	19.82732	1094.39	37.5671021
0.11896	388.32	294.764224	1.69953	915.43	78.3192969	20.28565	1095.69	38.8077859
0.12174	395.01	296.393219	1.74119	917.44	78.1410564	20.76204	1096.78	39.7753373
0.12729	408.31	296.320431	1.78286	919.2	79.3332154	21.2412	1097.72	40.2210236
0.13285	421.05	296.816421	1.82453	921.17	80.0544935	21.73287	1098.32	40.3145465
0.13842	433.11	297.379935	1.86896	922.92	80.3435753	22.23565	1099.21	37.7452421
0.14397	444.91	297.836252	1.91341	924.75	80.18588	22.74955	1100.38	34.7991743
0.14953	456.17	298.790831	1.95786	926.67	80.9317001	23.27454	1101.09	33.5008805
0.15508	466.99	300.505631	2.00509	928.68	79.6334127	23.81344	1101.89	33.3175244
0.16063	477.61	299.10608	2.0523	930.6	79.294171	24.36342	1102.6	33.0848709
0.16619	487.83	299.629847	2.1023	932.5	79.5824234	24.92731	1103.05	31.2209037
0.17174	497.89	299.45317	2.1523	934.53	78.8018728	25.50232	1103.81	30.357756
0.1773	507.14	297.210042	2.20231	936.18	77.3670538	26.09121	1104.49	30.5231044
0.18285	516.42	296.164495	2.25509	937.85	75.8662615	26.69399	1105.2	29.9060174
0.18841	525.41	294.353973	2.30785	939.7	77.3242155	27.31066	1105.97	30.9574197
0.19396	533.69	294.317777	2.36341	941.51	79.966498	27.94121	1106.53	31.1637043
0.19953	542.03	294.362731	2.41897	943.23	81.376343	28.58565	1107.49	30.1621937
0.20508	550.02	293.287724	2.4773	944.78	82.5965411	29.24677	1108.02	28.9172522
0.21064	557.9	292.843242	2.53563	946.78	83.2959977	29.92177	1108.79	27.862299
0.21619	565.53	295.481525	2.59675	949.44	84.7419757	30.61344	1109.53	27.2805854
0.22175	573.12	295.57361	2.65786	951.54	85.7745684	31.32177	1110.12	26.1479889
0.2273	580.31	294.909181	2.72175	953.47	88.0539761	32.04677	1110.5	25.4180771
0.23285	587.31	294.802604	2.78563	955.34	87.7241722	32.78844	1111.07	25.0808348

0.23841	594.63	294.302113	2.8523	957.52	85.9035895	33.54677	1111.55	24.9353448
0.24396	601.47	292.191912	2.91897	959.38	84.3720925	34.32038	1112.15	24.8420846
0.25229	611.09	289.431725	2.98841	961.53	84.0359174	35.11205	1112.7	25.4735264
0.26064	620.75	284.414712	3.05785	963.21	85.0458583	35.92177	1113.24	25.7104397
0.26897	629.53	276.996973	3.18563	966.89	84.2594154	36.75232	1113.97	24.8432954
0.2773	637.96	272.680764	3.26064	968.66	83.1618219	37.60094	1114.68	25.0737766
0.28563	646.02	266.925652	3.33841	970.66	83.2773517	38.469	1115.17	24.8769105
0.29397	653.27	263.654522	3.41619	972.82	83.9712887	39.3565	1115.91	23.8210304
0.3023	660.56	260.912898	3.49674	974.72	84.6709085	40.26623	1116.13	23.0730619
0.31063	667.51	258.434265	3.58008	976.44	87.1075169	41.19678	1116.67	22.1083197
0.31896	674.27	255.463112	3.66341	978.37	87.6363124	42.14817	1117.37	21.4876746
0.32731	681.11	253.860777	3.74953	980.34	88.093775	43.1204	1117.62	20.8150033
0.33564	687.52	250.507824	3.83841	982.47	89.1419283	44.11623	1118.09	20.884517
0.34397	693.8	248.859753	3.9273	984.96	89.9718477	45.13567	1118.66	20.2314725
0.3523	699.56	245.348066	4.01897	986.9	90.3856776	46.17734	1119.11	19.3495726
0.36063	705.26	240.878834	4.11341	989.06	90.5542833	47.24401	1119.56	19.6207104
0.36896	710.55	237.168511	4.21064	991.38	91.1337818	48.33567	1120.17	20.259649
0.38007	717.73	231.879754	4.30785	993.27	90.813765	49.45234	1120.31	19.4128199
0.39119	724.27	227.667885	4.40786	995.17	89.0725919	50.5954	1120.84	19.4460293
0.4023	730.6	223.247145	4.51064	997.16	88.1665791	51.76484	1121.19	18.8024661
0.41341	736.65	219.179847	4.61619	999.13	87.744601	52.96067	1121.88	18.0948898
0.42452	742.47	213.307197	4.72452	1001.7	86.1402943	54.18429	1122.1	19.1971427
0.43563	747.82	210.052474	4.83564	1003.53	85.5532077	55.43567	1122.7	19.1099746
0.44675	753.07	205.604206	4.94953	1005.24	85.1467805	56.71485	1123.04	18.6517585
0.45786	758.13	200.824715	5.0662	1007.61	84.7999485	58.02318	1123.33	17.868776
0.46897	762.69	196.312484	5.18564	1009.34	82.8300471	59.36345	1123.93	17.4871
0.48008	767.44	192.734496	5.30787	1011.11	82.6035432	60.73845	1124.37	17.0217106
0.49119	771.84	188.690794	5.43287	1013.02	83.5080753	62.14124	1124.61	16.8584778
0.50507	776.94	183.774138	5.56064	1014.9	80.6221975	63.57457	1125.08	17.7149332
0.51897	781.88	180.311672	5.6912	1016.91	79.2498933	65.04262	1125.37	17.1536776
0.53286	786.54	175.629155	5.82453	1018.88	79.3973124	66.54264	1125.75	15.8738945
0.54674	790.96	171.046092	5.96064	1020.94	80.5793104	68.07735	1126.08	15.2919958
0.56063	795.25	167.928021	6.09952	1022.52	84.1371691	69.64818	1126.61	15.3400245
0.57453	799.3	163.853522	6.2412	1024.09	85.2319239	71.25513	1127.01	16.0132332
0.58841	803.26	160.143364	6.84397	1032.85	79.0509	72.89959	1127.33	16.8153618
6.38564	1025.81	82.3819161	7.00231	1034.12	79.7532794	74.58153	1127.45	17.6539586
6.53563	1027.66	80.4722376	7.23563	1036.45	80.8519279	76.30375	1127.78	18.0359033
6.68842	1030.23	78.902485	7.40508	1037.87	75.6497186	78.06485	1128.27	18.4923348
0.6023	806.83	156.126822	7.57731	1039.49	72.0850283			



Gráfica 38. Gráfico log-log de presión y derivada de presión para prueba real de un pozo descentrado cuadrado con fronteras laterales parcialmente activas.

En el gráfico 38, se identifican y ubican las líneas correspondientes para cada flujo. Sobre la línea del estado estable se toma nota de dos puntos para la determinación de la pendiente y se toma el tiempo donde se interceptan las dos líneas ingresadas.

Para la determinación de la pendiente se hace uso de la fórmula:

$$m = \frac{\log y_2 - \log y_1}{\log x_2 - \log x_1}$$

$$m = \frac{\log 7.57731 - \log 72.0850286}{\log 48.33567 - \log 20.2596}$$

$$m = -1.36869$$

Con el valor de la pendiente se dirige a la tabla 5, donde halla la ecuación para calcular la eficiencia de flujo de la frontera en estado estable.

$$ef = \frac{-0.5193 + 0.7201m_2 + 2.7844m_2^2 + 1.824m_2^3 + 0.3277m_2^4 + 0.0715m_2^5}{1 + 0.472m_2 - 1.7285m_2^2 - 1.4114m_2^3 - 0.2518m_2^4 - 0.06613m_2^5}$$

$$ef = -0.915$$

Con la eficiencia de flujo ya calculada hace uso de la ecuación para determinar el valor de la constante para estado estable, (ver tabla 5).

$$(\mathcal{L}^*)_{ss} = \frac{-28.261 - 273.3356ef - 752.523ef^2 - 901.9745ef^3 - 560.213ef^4 - 165.404ef^5}{1 + 5.5427ef + 11.3421ef^2 + 11.741ef^3 + 6.535ef^4 + 1.5937ef^5}$$

$$\mathcal{L}^* = 334.624671$$

$$A = \frac{kt_{rpi}}{334.6246711\theta\mu ct}$$

$$A = \frac{7*9}{334.624671*0.13*1.137*9.48e^{-6}}$$

$$A = 129972.8672 ft^2$$

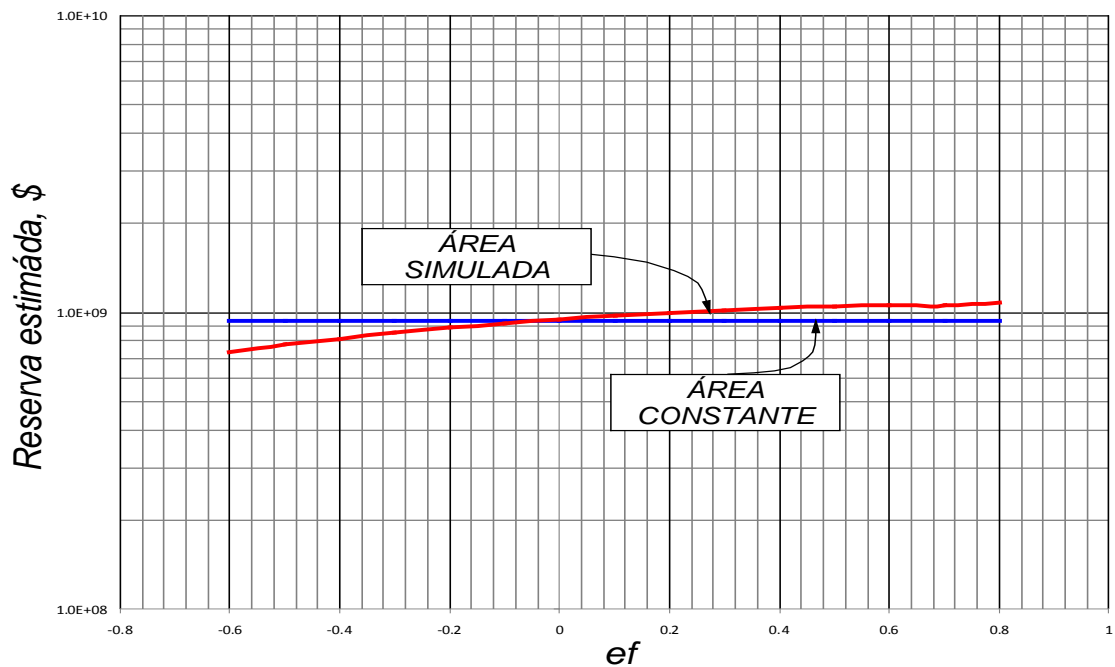
E área simulada para este ejercicio es de 138544 ft^2 , el error generado es de 6% por lo que se puede observar la eficiencia en la metodología propuesta para la determinación del área.

2.4.2. Análisis Económico.

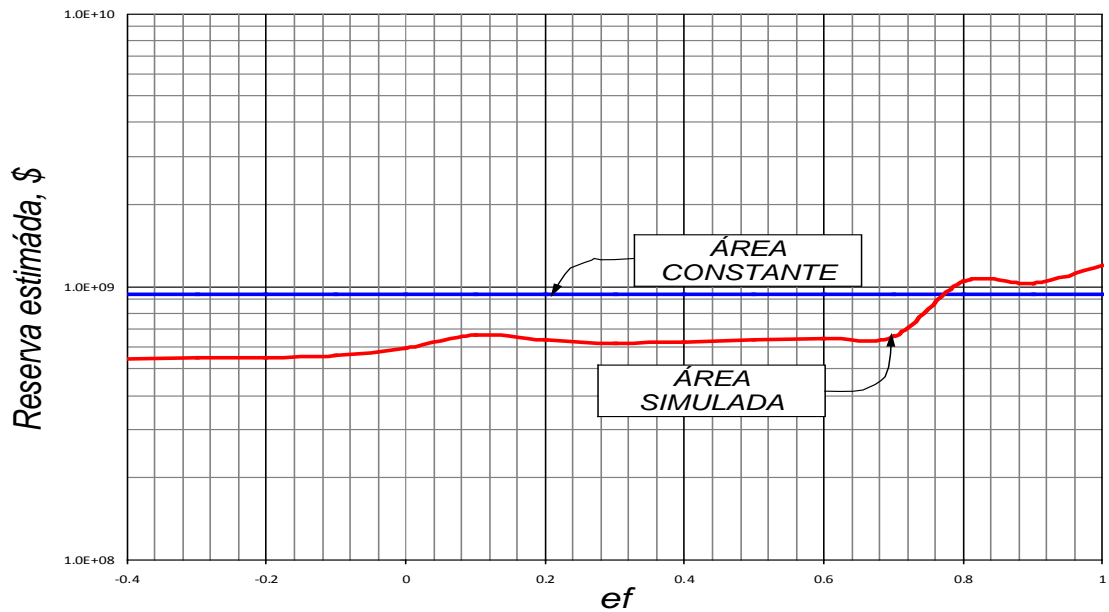
Para conocer el impacto que tiene la eficiencia de flujo en las fronteras, se presentó el cálculo de reservas estimadas, partiendo de los mismos resultados que obtuvimos en el proceso de simulación; a pesar de ser un ejercicio muy sencillo nos mostrará de manera esquemática la desviación en el cálculo de reservas potenciales.

Para este ejercicio se toman diversos resultados que reflejen los escenarios ya identificados para la interpretación de resultados; Se realizó los cálculos respectivos para la determinación del área del yacimiento (con el uso de las ecuaciones con las constantes convencionales). A partir de los resultados se determina la cantidad de fluido en el medio poroso del yacimiento y estimando las reservas partiendo del precio del barril a 93.45 dólares, el día 17 de marzo de 2013. Estos resultados finales se comparan con el volumen saturante de fluido real en el yacimiento simulado.

Se presentan todos los resultados obtenidos cuando se desarrolla el estado pseudoestable:

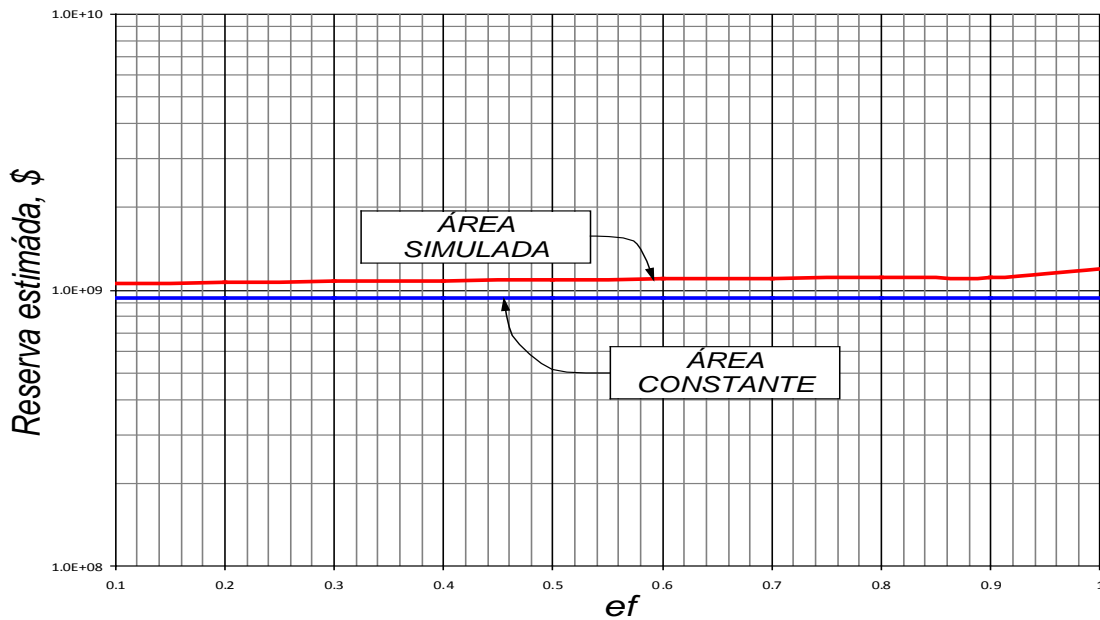


Gráfica 39. Gráfica semilogarítmico, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con frontera lateral parcialmente activa.



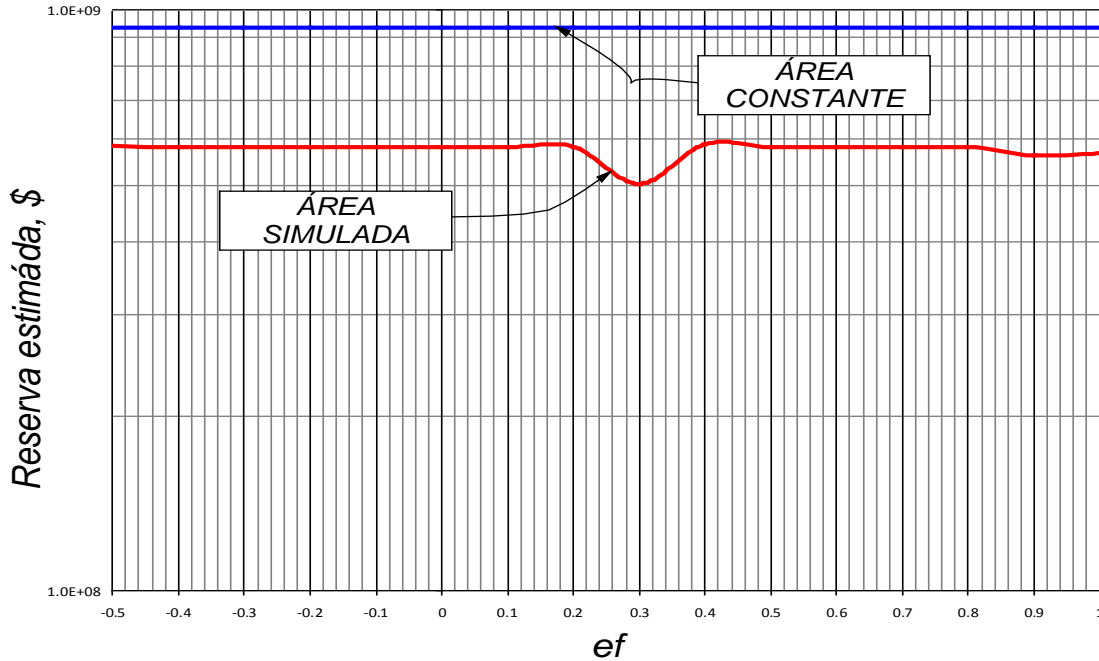
Gráfica 40. Gráfica semilogarítmico, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activa.

Cuando el pozo se encuentra centrado, las reservas son subvaloradas hasta que la eficiencia de flujo en la frontera se acerca a uno; cerca de este punto existe un valor de quiebre en el que las reservas pasarán a ser sobre estimadas.

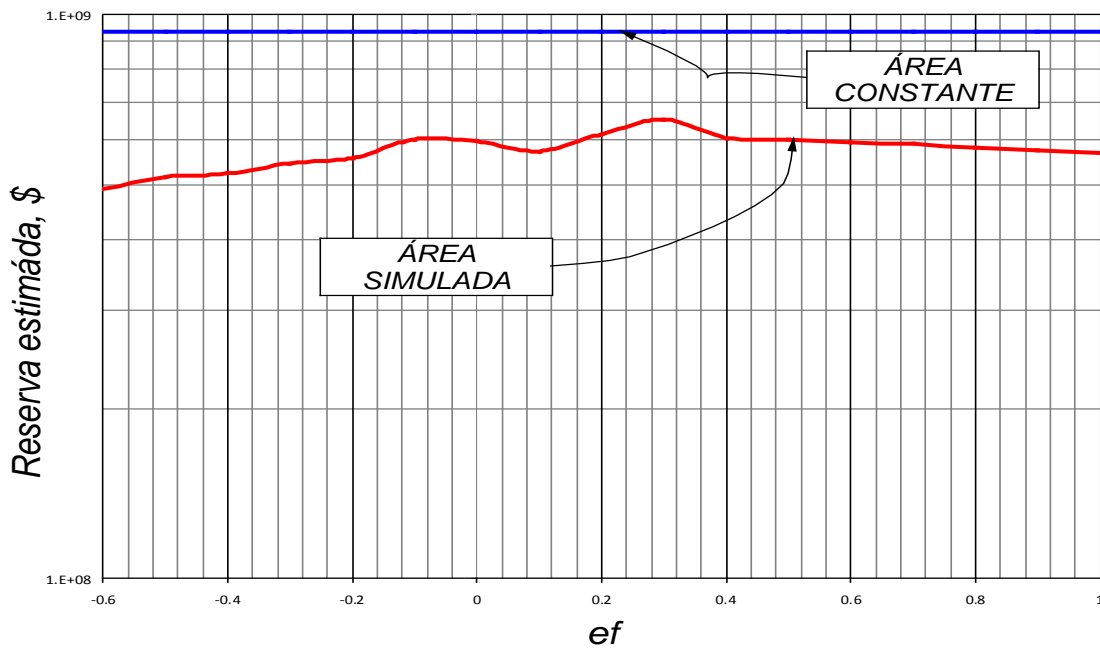


Gráfica 41. Gráfica semilogarítmico, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con todas las fronteras parcialmente activa.

Se observó la sobre estimación en las reservas para los casos en que todas las fronteras presentan una eficiencia de flujo.

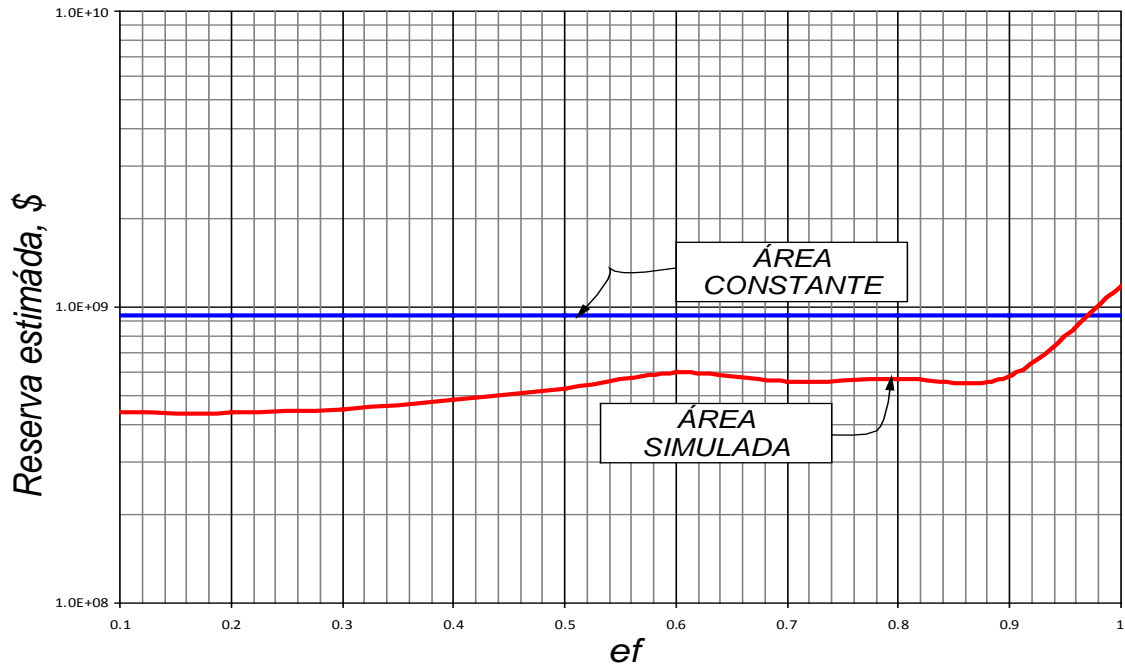


Gráfica 42. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con frontera lateral parcialmente activa.



Gráfica 43. Gráfica semilogarítmico, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activa.

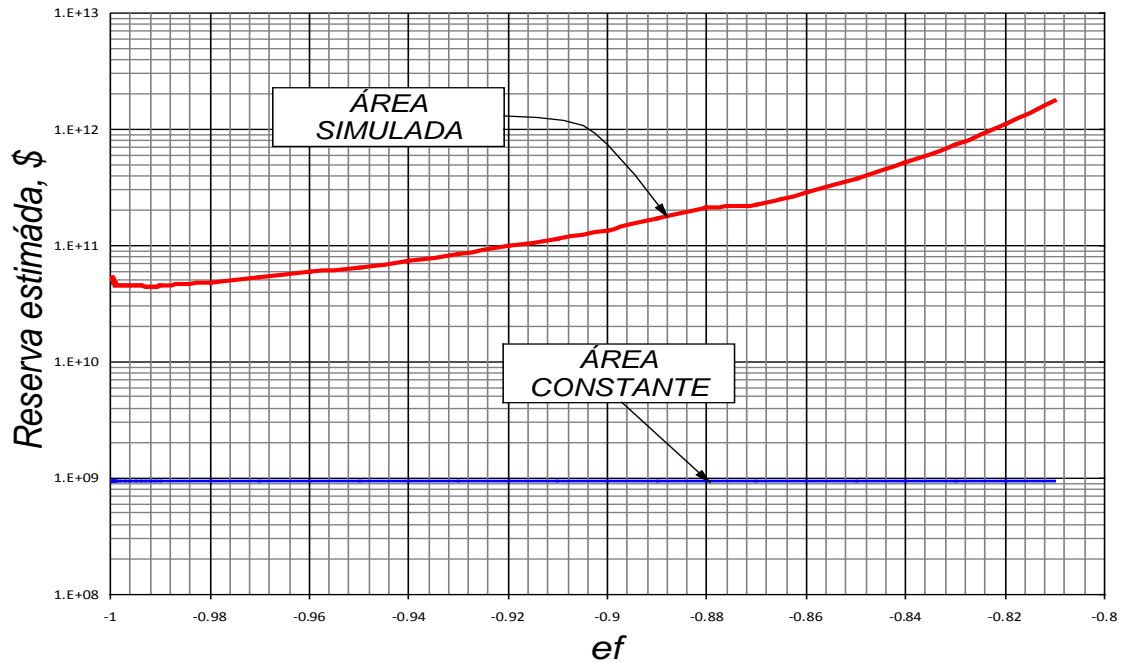
Podría para los dos casos anteriormente presentados, se presentó una subestimación de las reservas calculadas.



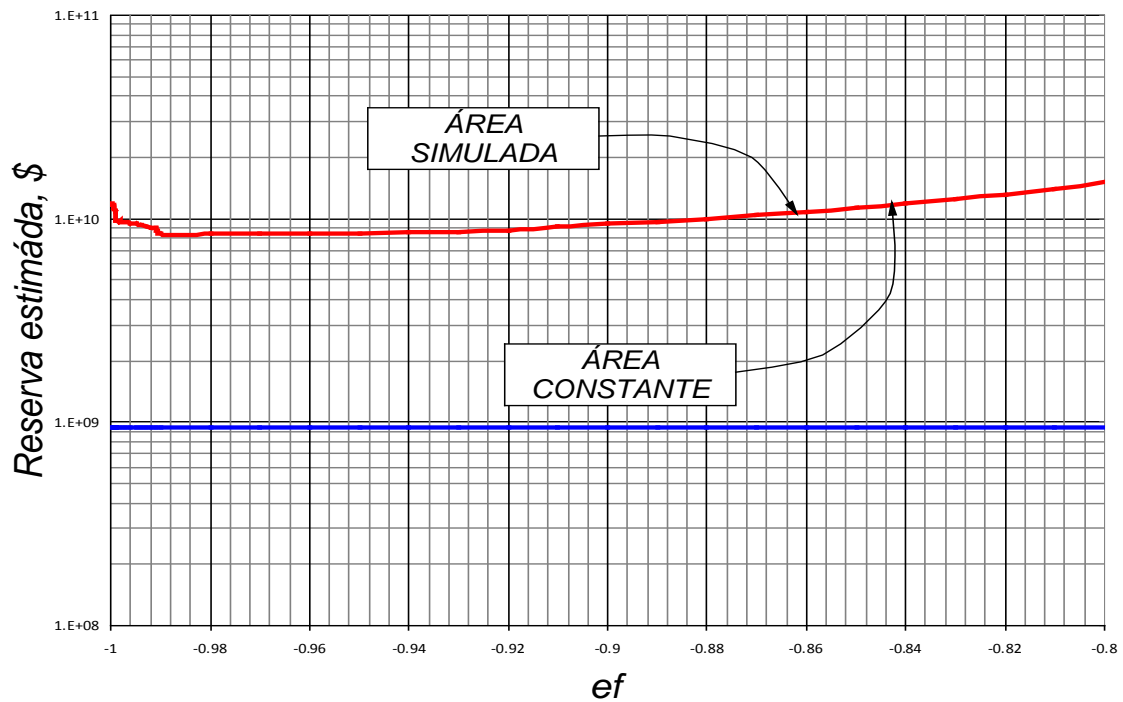
Gráfica 44. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con todas las fronteras parcialmente activas.

La reserva se ve afectada por la ubicación del pozo, se espera que en un momento las reservas pasen de estar subestimadas a sobrevaloradas.

Ahora se presentan los resultados obtenidos cuando el sistema desarrolla estado pseudoestable.

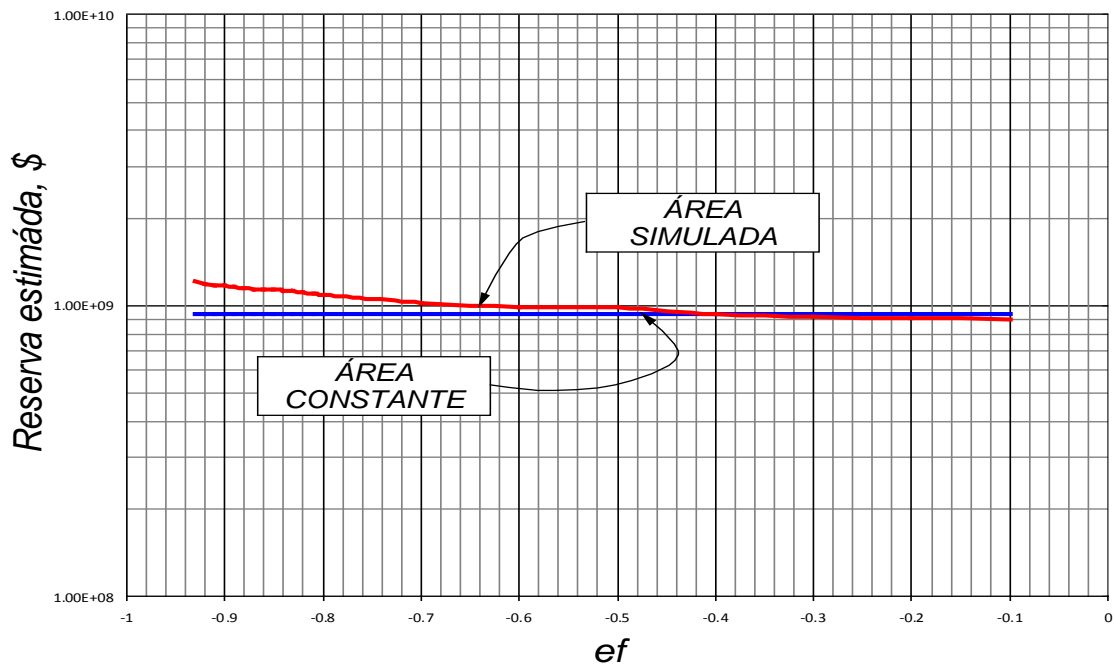


Gráfica 45. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con frontera lateral parcialmente activa.

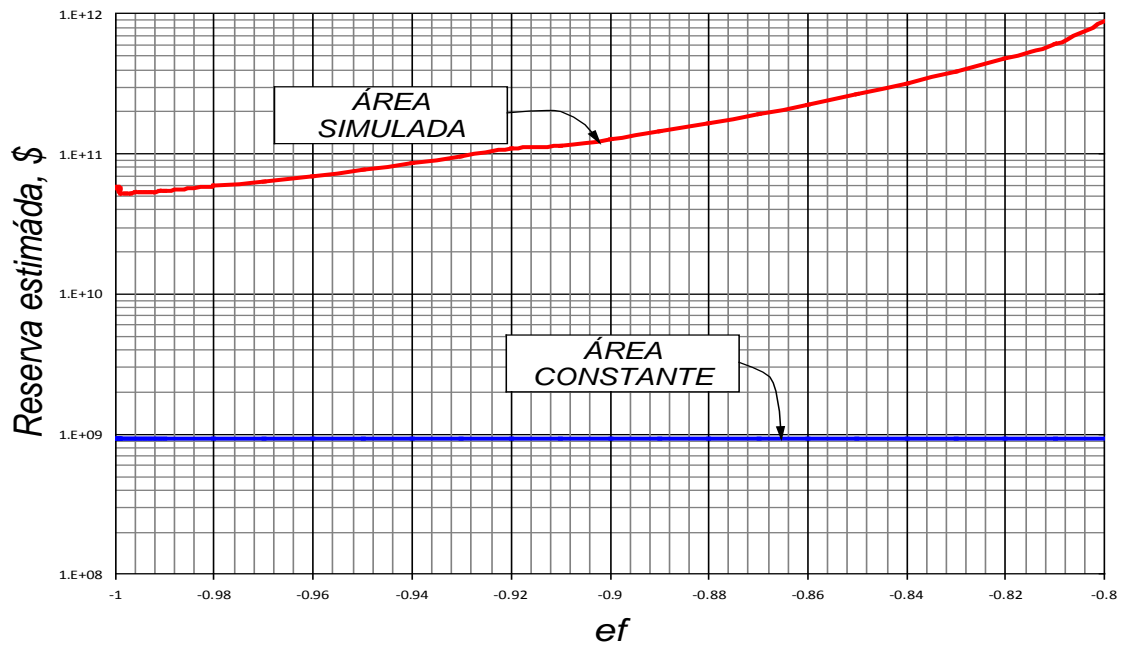


Gráfica 46. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con fronteras laterales parcialmente activas.

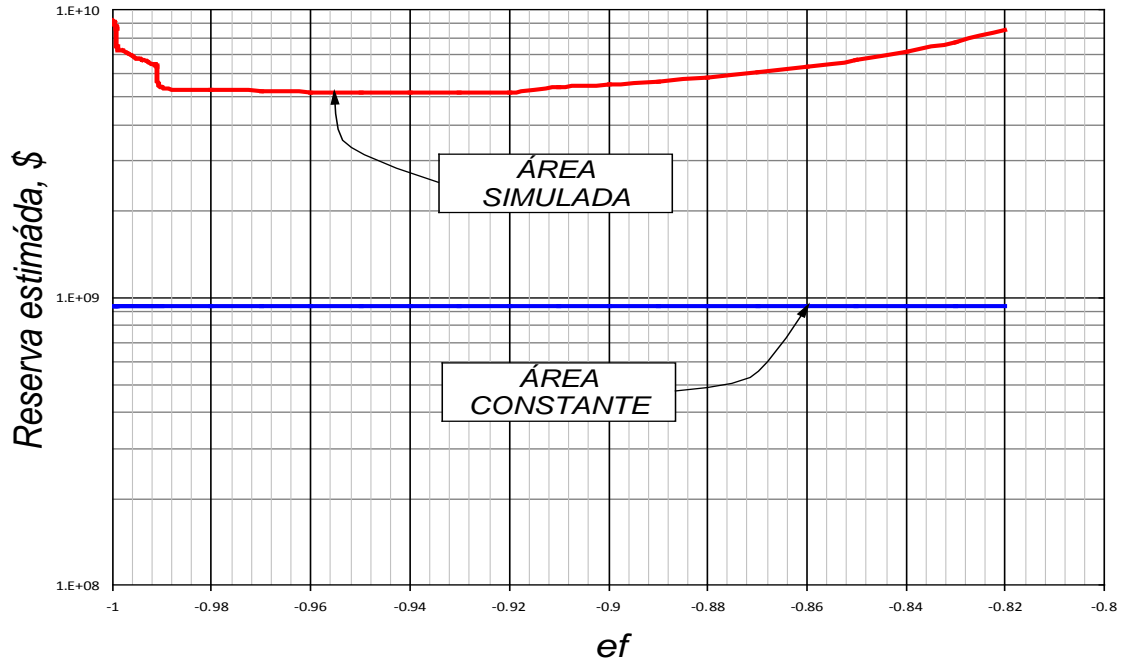
En los dos casos analizados, se observó una clara sobre estimación de las reservas calculadas.



Gráfica 47. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo centrado con todas las fronteras parcialmente activas.

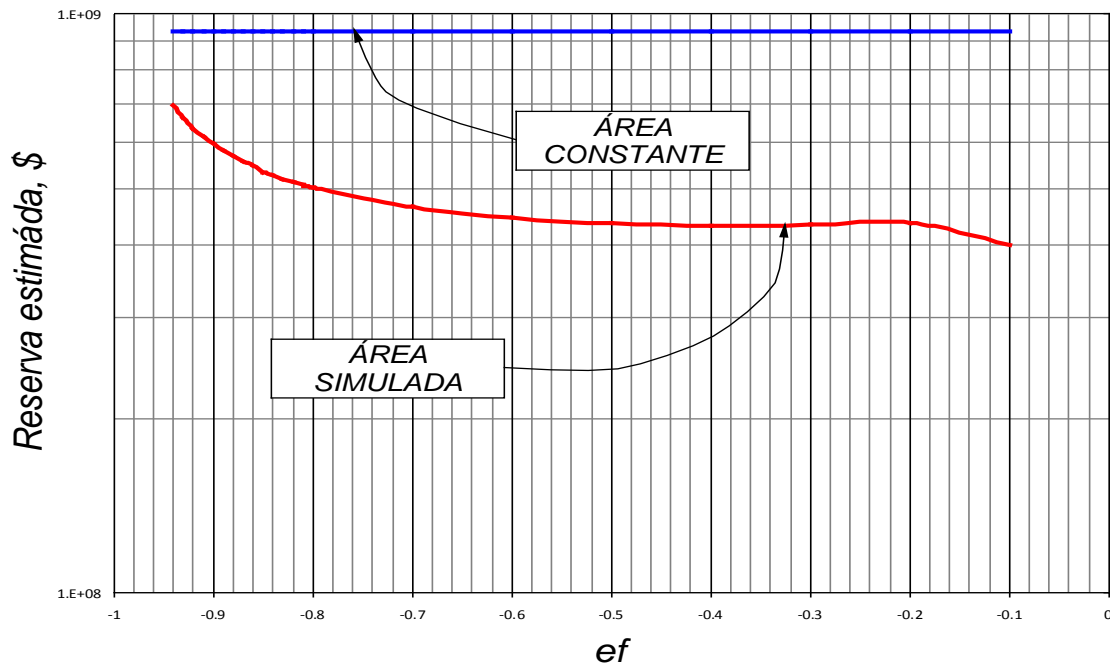


Gráfica 48. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con frontera lateral parcialmente activa.



Gráfica 49. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con fronteras laterales parcialmente activas.

Se presentó una clara sobre estimación de todos los resultados obtenidos.



Gráfica 50. Gráfica semilogarítmica, relación de áreas para la determinación de reserva estimada (dólares); en función de la eficiencia de flujo. Resultado con pozo descentrado con todas las fronteras parcialmente activas.

En este ejemplo se observa una subvaloración de las reservas determinadas.

De los anteriores gráficos presentados se observó una clara y dramática desviación de los cálculos de reservas, lo que plantea la importancia en la determinación de la eficiencia de flujo en las fronteras; también se observa que la eficiencia de flujo en el estado pseudoestable tiende a subvalorar las reservas calculados, de manera inversa se observa cuando se desarrolla estado estable.

3. CONCLUSIONES

- Se generaron ecuaciones para determinar la eficiencia de flujo y las constantes para calcular el área de drenaje para diferentes posiciones de pozo y fallas permeables aplicadas a geometrías rectangular y cuadrada; con un máximo porcentaje de error del 5 % respecto al valor de una prueba real.
- la inferencia de la eficiencia de flujo sobre la afectación del área, depende de las propiedades a analizar: ubicación. Cantidad de fronteras y geometría.
- Una de las características generales más representativas dentro del análisis para los estados estable y pseudoestable; es la estrecha relación que coexiste en todos los resultados.
 - Para pozos descentrado a la derecha, los casos 1, 2, 3 y 4 son iguales a los casos 2, 1, 3 y 4 respectivamente, para pozo descentrado a la izquierda.
 - Para pozos descentrados, la constante para estado pseudoestable es de 381, la pendiente y eficiencia es 1.
 - Para pozos centrados, se observó una igualdad en los resultados para los casos 1, 2 y una singularidad para los casos 3 y 4.
 - Para pozos descentrados, la constante para estado pseudoestable es de 385, la pendiente y eficiencia es 1.
 - Para los casos 1, 2 y 3 donde se visualizan el máximo y mínimo, los resultados en estado estable, a valores de eficiencia de -0.93 la pendiente es -1 y la pendiente después del mínimo, tiene un valor de 0.35 .

4. RECOMENDACIONES

- Conocer el impacto que tiene la cantidad de fronteras abiertas para un sistema, ya que los valores de la pendiente en el estado pseudoestable se ven afectados de manera exponencial. Este fenómeno también se ve presente en los resultados obtenidos en la determinación de puntos máximos y mínimos en el estado estable.
- Es necesario conocer el efecto de diferentes geometrías en las repuestas de derivada de presión, ya que este trabajo solo estaba enfocado en caracterizar las respuestas obtenidas cuando se simulaban yacimientos de geometría rectangular.
- Realizar un estudio que determine en qué circunstancias rodean en cambio de estado pseudoestable–estable, ya que se observó que aun cuando los valores simulados en la frontera no fueran negativos, la respuesta obtenida en la prueba de presión indicaba que se desarrollaba un estado estable.

5. BIBLIOGRAFÍA

Bendekim, G., Tiab, D., and Escobar, F.H. “*Pressure Behavior of a Well in an Anisotropic Reservoir*”. Paper SPE 76772 presented at SPE Western Regional/AAPG Pacific Section Joint Meeting held in Anchorage, Alaska, U.S.A., 20–22 May 2002.

Ehlig-Economides, C., and Economides, M.J.: “*Pressure Transient Analysis in an Elongated Linear Flow Systems,*” SPEJ (Dec. 1985), pp. 839-847.

Ispas, V., and Tiab, D. “*New Method of Analyzing the Pressure behavior of a Well Near Multiple Boundary System*”. Paper SPE 53933 presented at the 1999 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Caracas, Venezuela, 21–23 April 1999.

Massonet, G.J., Norris, R.J., and Chalmette, J-C., “*Well Test Interpretation in Geologically Complex Channelized Reservoirs,*” Paper SPE 26464 presented at the 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Houston, TX, 3-6 Oct., 1993.

Mattar, L. “*Derivative Analysis without Type Curves*”. The Petroleum Society. Paper 97-51 presented at the 48th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society in Calgary, Alberta, Canada, June 8-11, 1997.

Miller, F.G.: “*Theory of Unsteady-State Influx of Water in Linear Reservoirs,*” J. Inst. Pet., 1962. Vol. 48, No. 467, pp. 365-379.

Nutakki, R. and Mattar, L.: “*Pressure Transient Analysis of Wells in Very Long Narrow reservoirs*” Paper SPE 11221 presented at the 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Dallas, TX, Sept. 26-29, 1982.

Raghavan, R. and Chu, W.: “*On the Determination of Reservoir Pressure when Radial-Flow Conditions are Nonexistent,*” Paper SPE 35619 presented at the Gas Technology Conference held in Calgary, Alberta, Canada, 28 Apr. – May 1st, 1996.

Rhagavan, R. “*Well Test Analysis*”. Prentice Hall. New Jersey. 1993

Tiab, D. “*Analysis of Pressure and Pressure Derivative without Type-Curve Matching: 1-Skin and Wellbore Storage*”. Paper SPE 25426 presented at the Production Operations Symposium held in Oklahoma City, OK, Mar. 21-23, 1993. P. 203-216. Also, Journal of Petroleum Science and Engineering 12 (1995), p. 171-181.

Tiab, D. “*Analysis of Pressure and Pressure Derivatives without Type-Curve Matching-III. Vertically Fractured Wells in Closed Systems*”. Paper SPE 26138 presented at the SPE Western Regional Meeting, Anchorage, Alaska, May 26-28, 1993.

Wong, D.W., Motherssele, C.D., Harrington, A.G. and Cinco-Ley, H.: “*Pressure Transient Analysis in Finite Linear Reservoirs Using Derivative and Conventional Techniques: Field Examples*,” Paper SPE 15421 presented at the 61st Annual technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in New Orleans, LA, Oct. 5-8, 1986.

6. NOMENCLATURA

A	Área de drenaje, ft ²
B_o	Factor volumétrico del petróleo, bbl/STB
c_t	Compresibilidad, 1/psi
h	Espesor de la formación, ft
k	Permeabilidad de la formación, md
P	Presión, psi
P_D'	Derivada de la presión adimensional
P_D	Caída de presión adimensional en el pozo
P_i	Presión inicial del yacimiento, psia
P_e	Presión en la frontera del yacimiento, psia
P_{wf}	Presión de pozo fluyendo, psi
q	Caudal de petróleo, bbl/d
r_D	Radio adimensional
r_e	Radio de drenaje, ft
r_w	Radio de pozo, ft
S	Factor de daño
T	Tiempo de prueba, hr
t_{DSR}	Tiempo adimensional del comienzo de la línea de flujo radial
t_D	Tiempo adimensional
$G_{L,n}$	Símbolo del coeficiente de la contribución de presión del pozo imagen sobre el lado izquierdo
$G_{r,n}$	Símbolo del coeficiente de la contribución de presión del pozo imagen sobre el lado derecho.

$G_{F.n}$	Símbolo del coeficiente de la contribución de presión del pozo imagen sobre la frontera de flujo.
$G_{NF.n}$	Símbolo del coeficiente de la contribución de presión del pozo imagen sobre la frontera de no flujo.
r_D	Radio adimensional.
r_{DR}	Radio adimensional al pozo real.
r_{DI}	Distancia adimensional al pozo imagen.
$r_{L.n}$	Distancia a los n pozos imágenes sobre el lado izquierdo, ft.
$r_{r.n}$	Distancia a los n pozos imágenes sobre el lado derecho, ft.

SÍMBOLOS

Δ	Cambio, caída
ΔP	Diferencial de presión, psi
ΔP_D	Diferencial adimensional de presión
$\Delta P'$	Derivada del diferencial adimensional de pseudo presión, psi^2/cp
Δt	Tiempo de flujo, hr o días
ϕ	Porosidad, fracción
μ_o	Viscosidad del petróleo, cp

SUBINDICES

app	Aparente
D	Adimensional

<i>DL</i>	Dual lineal
<i>I</i>	Intersección o condiciones iniciales
<i>L</i>	Lineal
<i>PSS</i>	Flujo pseudo estable
<i>SS</i>	Flujo estable
<i>R_{Pi}</i>	Intersección entre la línea de flujo pseudo estable y la línea de flujo radial
<i>R_{Li}</i>	Intersección entre la línea de flujo radial y la línea de flujo lineal
<i>o</i>	Petróleo
<i>R_r</i>	Flujo radial
<i>P</i>	Estado pseudo estable
<i>US</i>	Pendiente unitaria
<i>W</i>	Pozo
<i>ef</i>	Eficiencia de flujo

Nota de aceptación

Firma director del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Neiva, 20 de Mayo de 2013

DEDICATORIA

A Dios por habernos brindado la oportunidad de pertenecer a esta familia tan maravillosa.

A mi mamá Gladys Castro por su dedicación, entrega, sacrificio, por su constante presencia en todos estos años y sobre todo por ser una verdadera madre que con sus principios y valores sacó hoy día dos profesionales con un futuro muy promisorio, a mi papá José Garzón por su ejemplo de ser un excelente trabajador y desear que sus dos hijos menores fuesen unos grandes profesionales e ingenieros, “al parecer lo estamos logrando”.

A mi único hermano Cristian Darío Garzón Castro, gracias mil gracias por creer en mí, dar ese ejemplo de trabajo, compromiso, superación y por traer a la casa por esa satisfacción del deber cumplido, “los dos podemos seremos grandes”.

Mi abuelita Belén Cuellar de Castro Q.E.P.D, Chavez es ya un profesional, la extraño, sé que estabas ahí, porque mi logro es el tuyo abuelita!, mi tito Gabriel Castro Castañeda, abuelo gracias por abrir las puertas ya que fue en ese nicho donde se crean profesionales agradezco mucho su ejemplo y perseverancia lo quiero mucho tito.

A mis primos Luis Abel, Brayan, Karen, Marlon, Gabriela, Leo, Yeison, Juan Pa., David, María F. Johan Sebastian, Gabriel Alexis, Camila y mis tías Sara, Aleyda, Miryam, Milena y tío Gabriel Castro, muchas gracias por los consejos, por guiarme en momentos difíciles, ustedes siempre están ahí unidos como hermanos, enseñar el valor de hermandad y lo buenas madres y padres que son con los hijos.

A mi hermosa novia, María del Pilar Gómez Mora, te amo mi linda, gracias por estar ahí, por presenciar mis logros y no dejar que los días sean pasajeros si no experiencias vividas para fortalecer más nuestro amor, dejando en mí una sonrisota de oreja a oreja al escribir esta dedicatoria.

Benjamín Armando Garzón Castro

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Surcolombiana y la Facultad de Ingeniería, ya que brindo las herramientas necesarias para forma un profesional, en general posee un cuerpo humano de excelente calidad y principios, que labran profesionales para Colombia y el Mundo.

A Freddy Humberto Escobar Macualo, Doctor en Ingeniería de Petróleos; Director de este proyecto, por su entrega, esmero, y dedicación en todas las etapas del proyecto, además por ser el amigo y padre incondicional, guía camino, no solo profesional sino personal, que acaba de comenzar.

A Jairo Antonio Sepúlveda Gaona, Master en Ingeniería de Petróleos por su asesoría la cual fué muy valiosa en el desarrollo de la investigación.

A Luis Enrique Mantilla Ramírez, Ingeniero de Petróleos, evaluadora de este proyecto; por su colaboración en la investigación y tiempo prestado.

A Carlos Andrés Morales, Ingeniero de Petróleos, por su apoyo, colaboración, opinión en este proyecto, su amistad es y será siendo muy valiosa. Se logró este objetivo POKE.

A Haydeé Morales Mondragón, Ingeniera de Petróleos, por su apoyo, amistad y ser la gran maestra “ejemplo a seguir”.

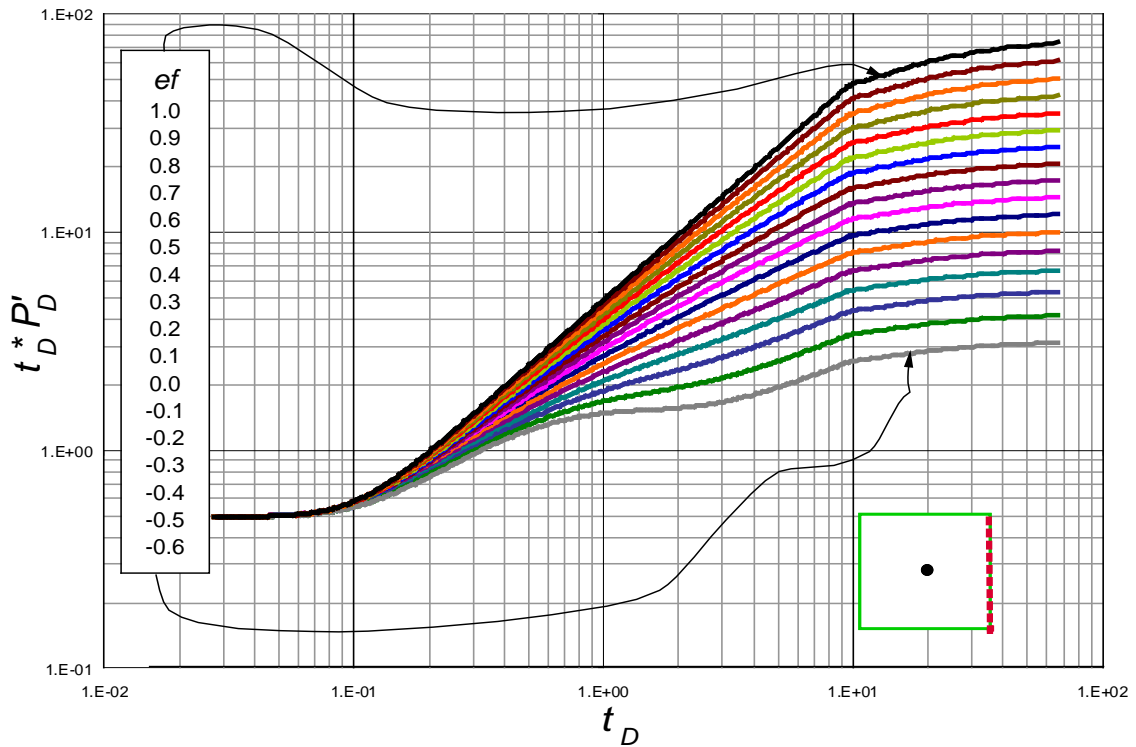
A los compañeros Jesús David, Tatiana, Poter, Victoria, Uldaricio, María José, Almonacid, Andrés Buitrago, Marlio, James Vega Q.E.P.D, Felipe Quintero, Toro, Angel, Johana Garzón, Cedric, Víctor, Yused, Francy, Abendaño, Manuel, Montoya, John Castañeda y compañeros de código de carrera y de la facultad de ingeniería, quienes fueron un apoyo constante en el paso como estudiante, durante el desarrollo del proyecto y hoy día profesional.

Muchas gracias por el apoyo prestado.

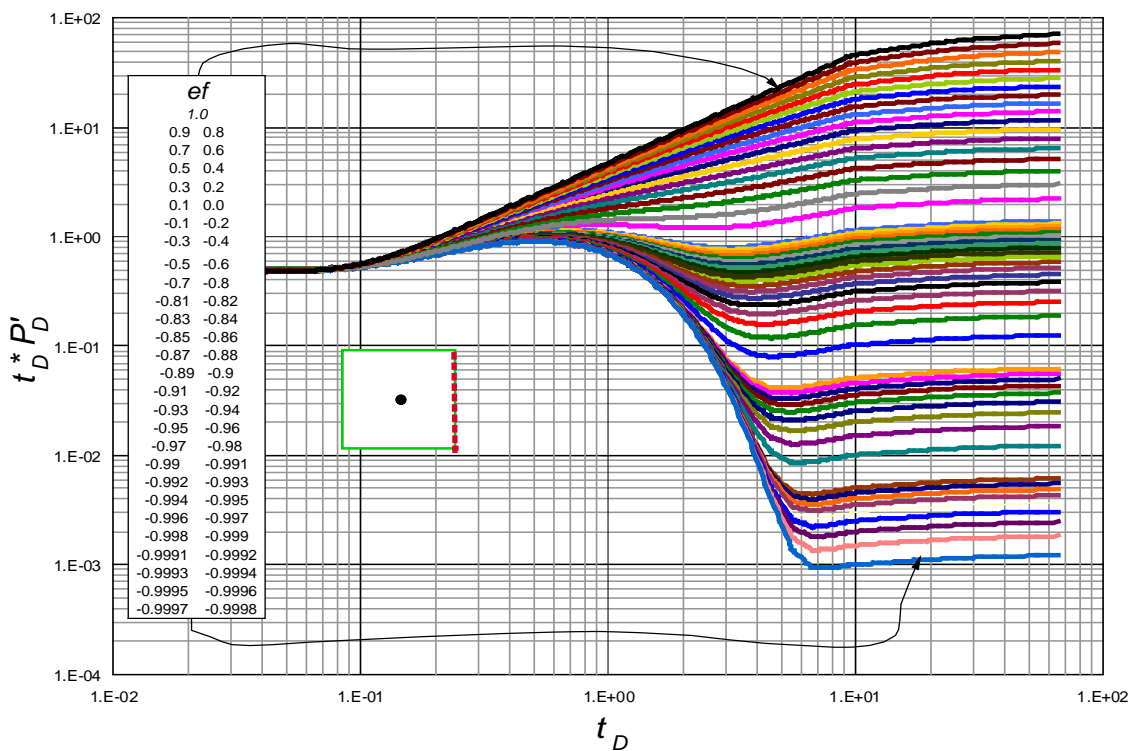
ANEXOS

A. Gráficas log-log obtenidas para yacimientos cuadrados y rectangulares.

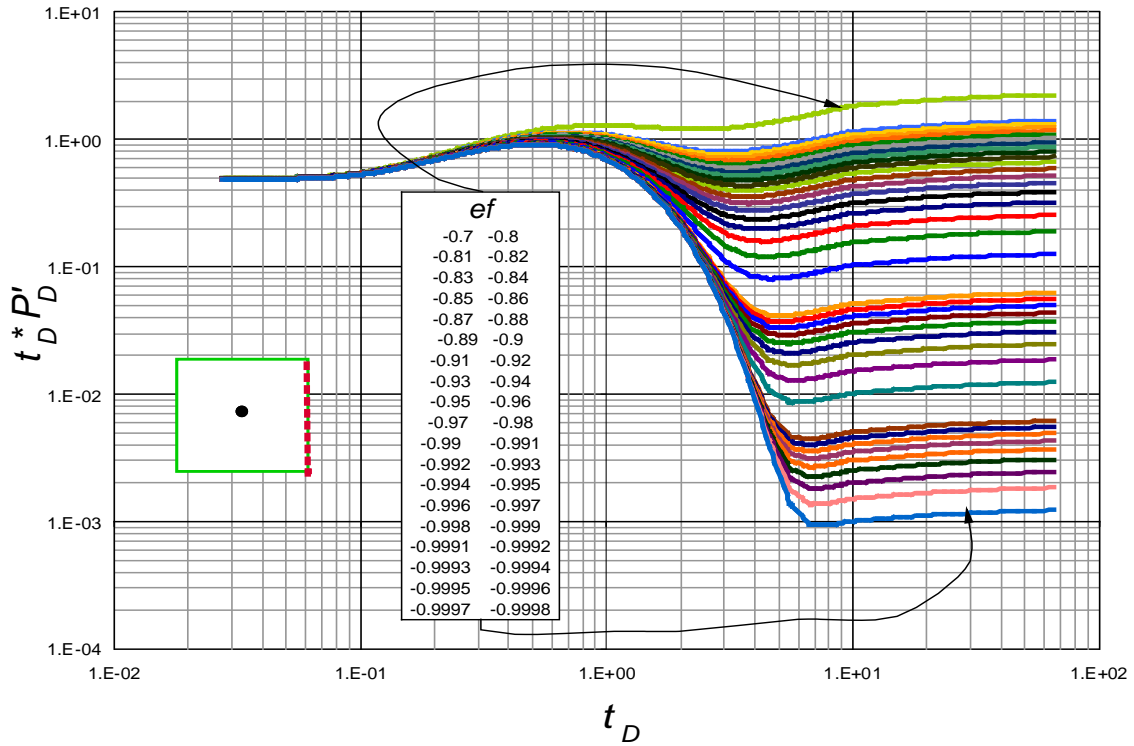
Yacimiento cuadrado con pozo centrado.



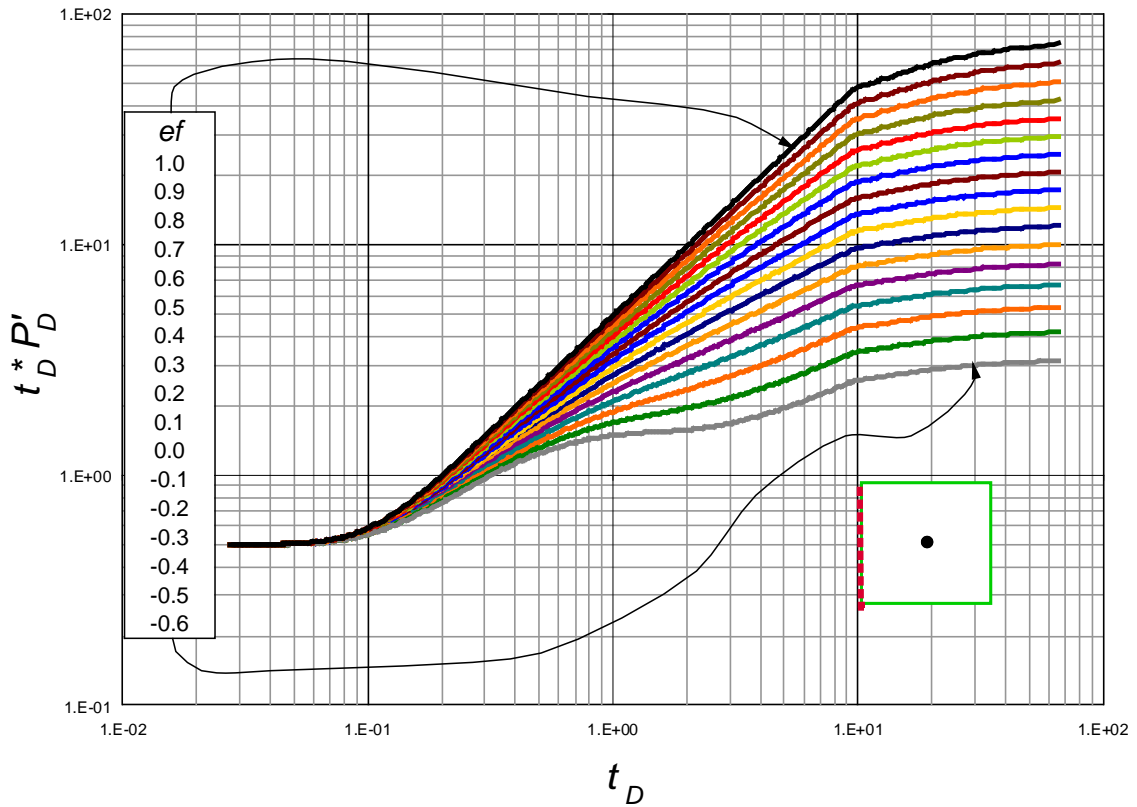
Gráfica A1. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable derecha. Estado pseudoestable.



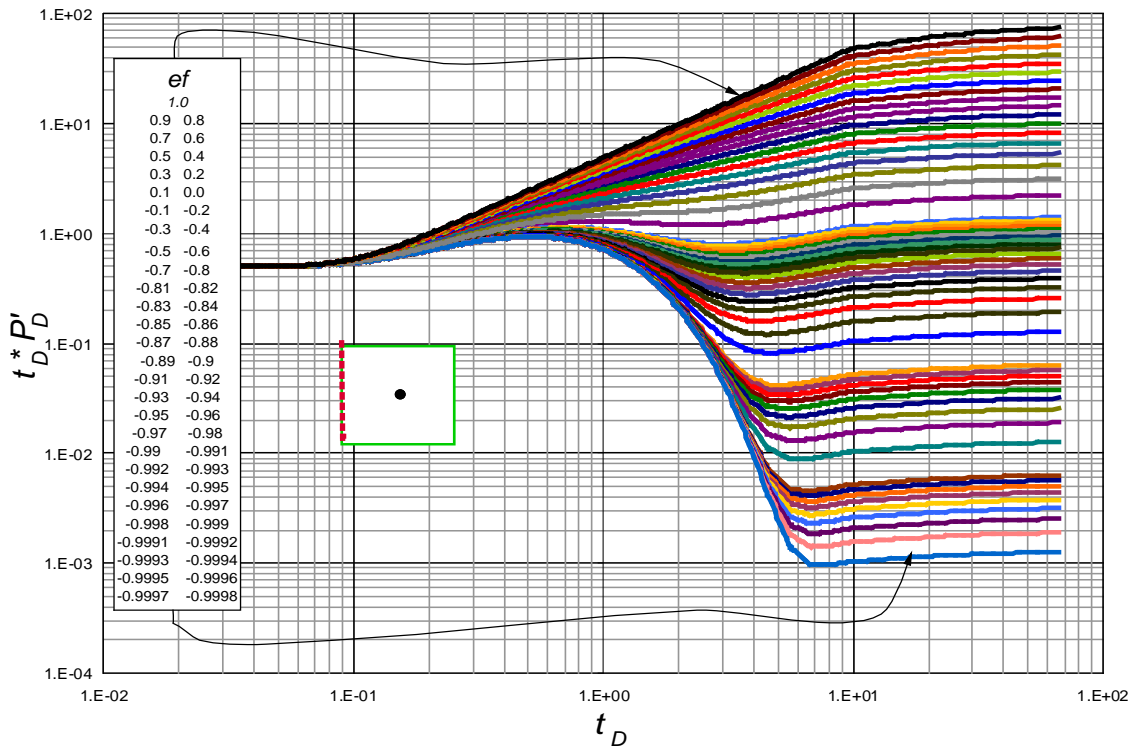
Gráfica A2. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable derecha.



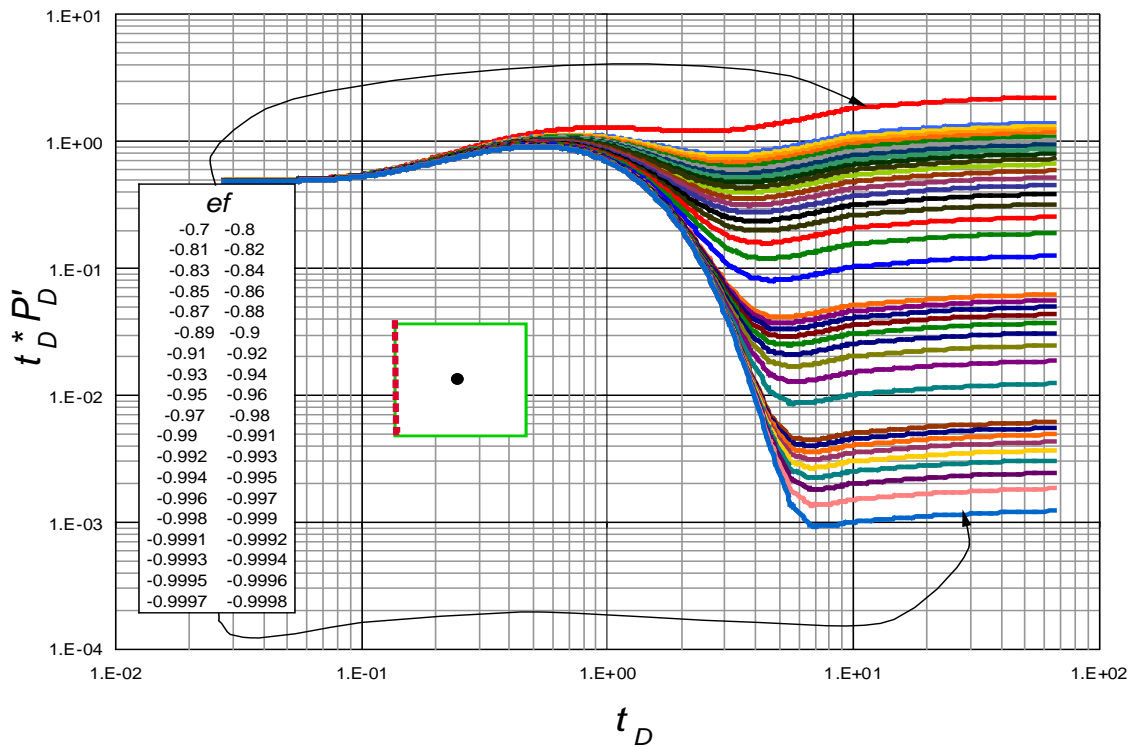
Gráfica A3. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable derecha. Estado estable.



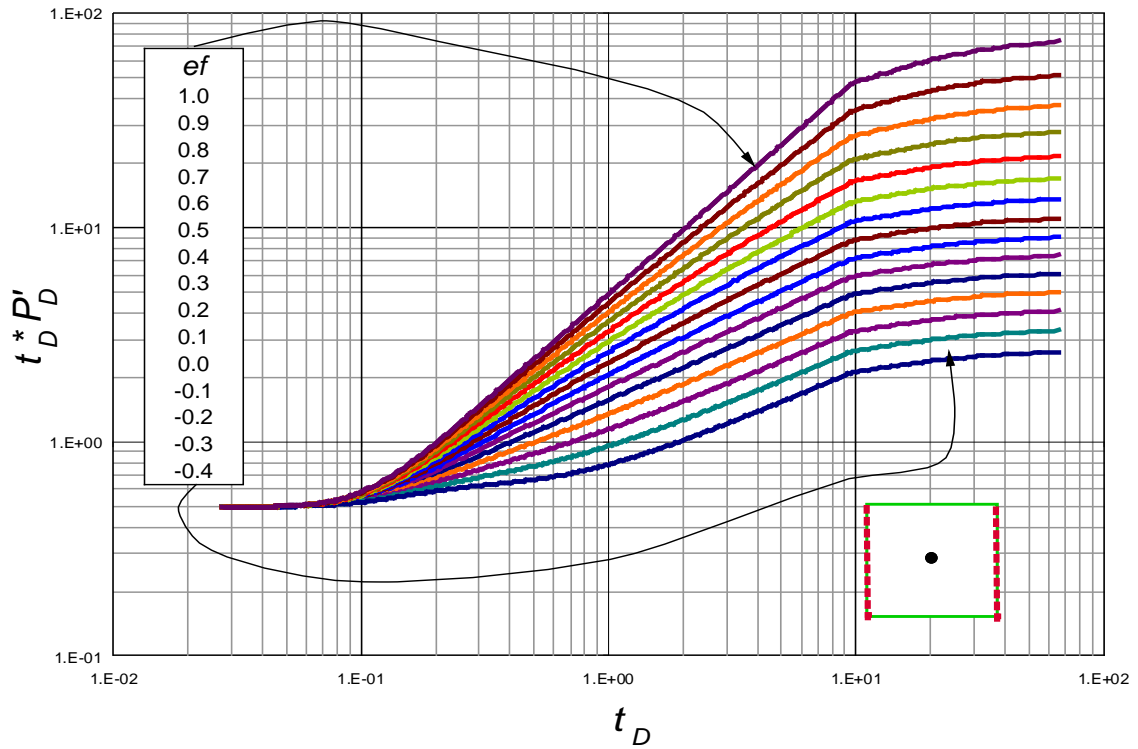
Gráfica A4. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable izquierda. Estado pseudoestable.



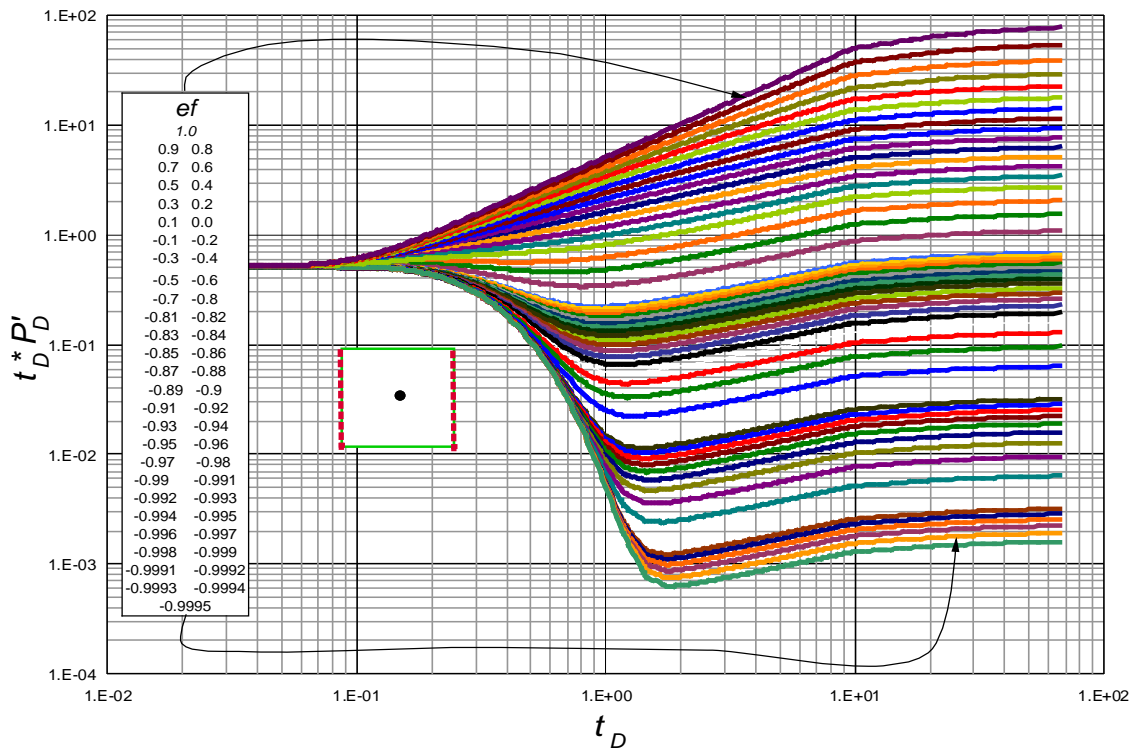
Grafica A5. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable izquierda.



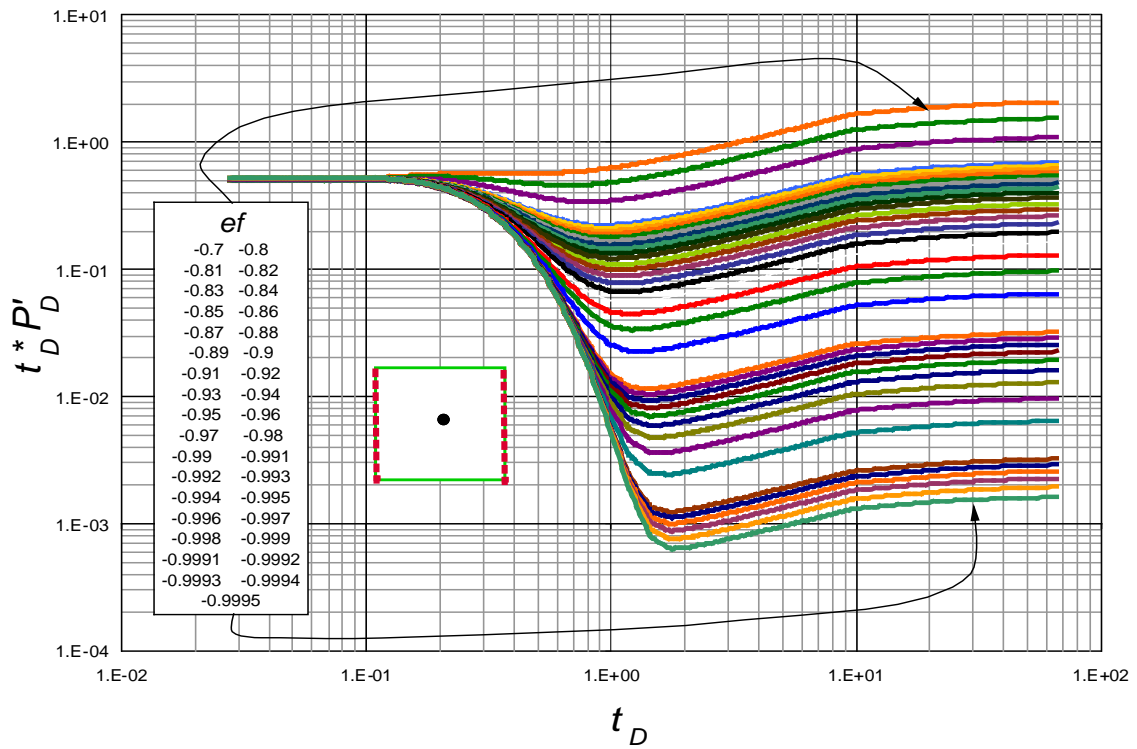
Gráfica A6. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y su falla leaky permeable izquierda. Estado estable.



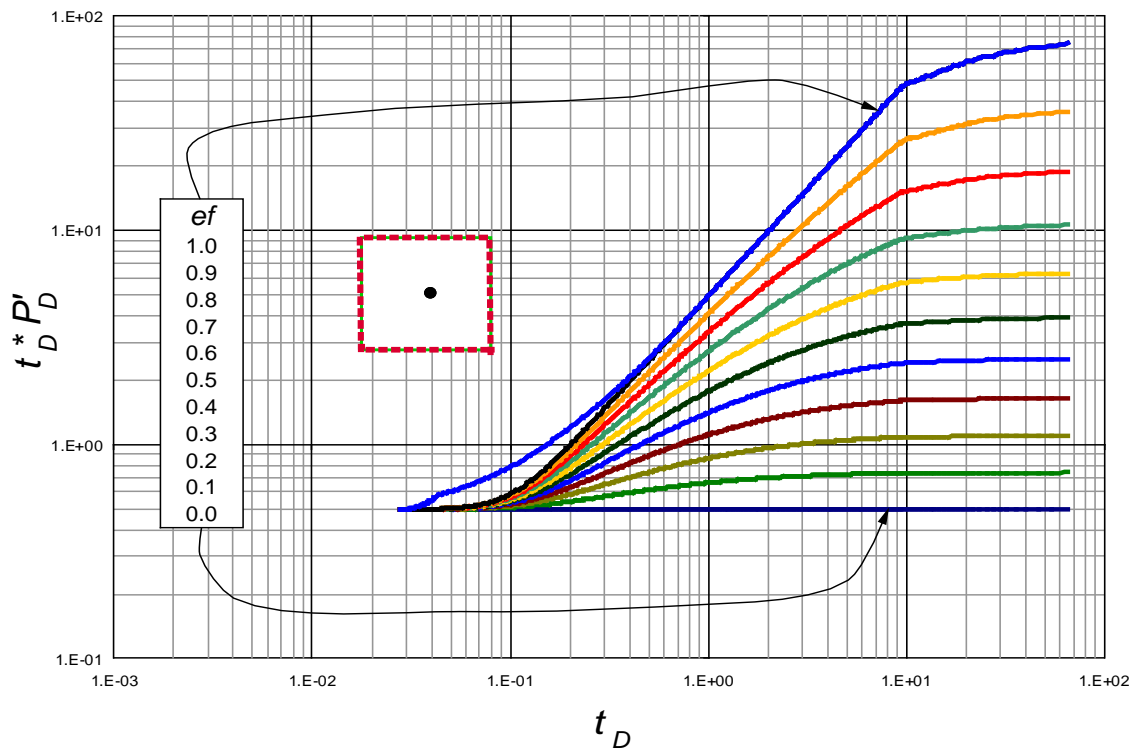
Gráfica A7. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado pseudoestable.



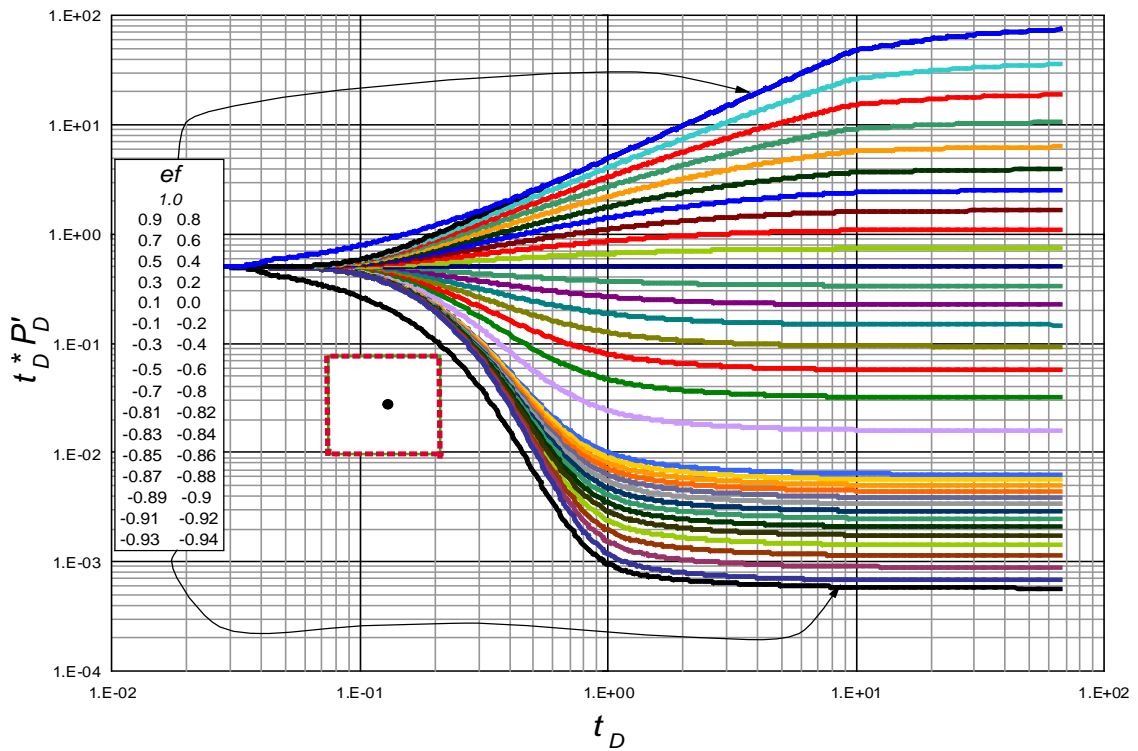
Gráfica A8. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas laterales *leaky* permeables.



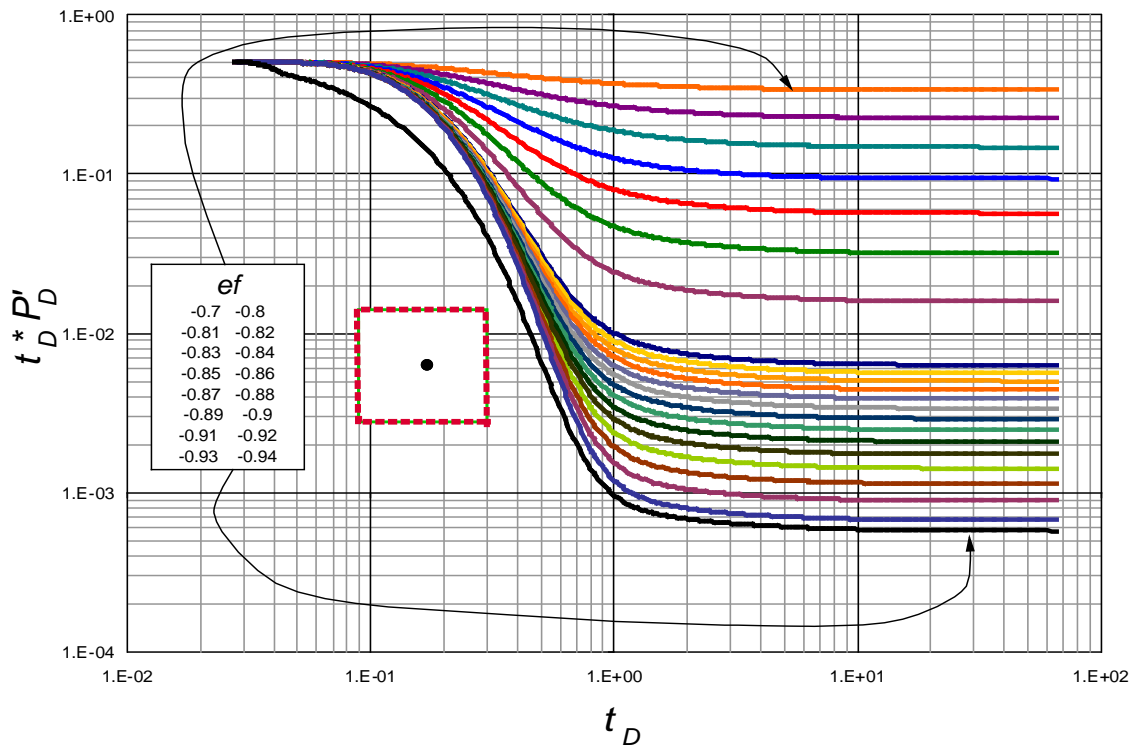
Gráfica A9. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado estable.



Gráfica A10. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado pseudoestable.

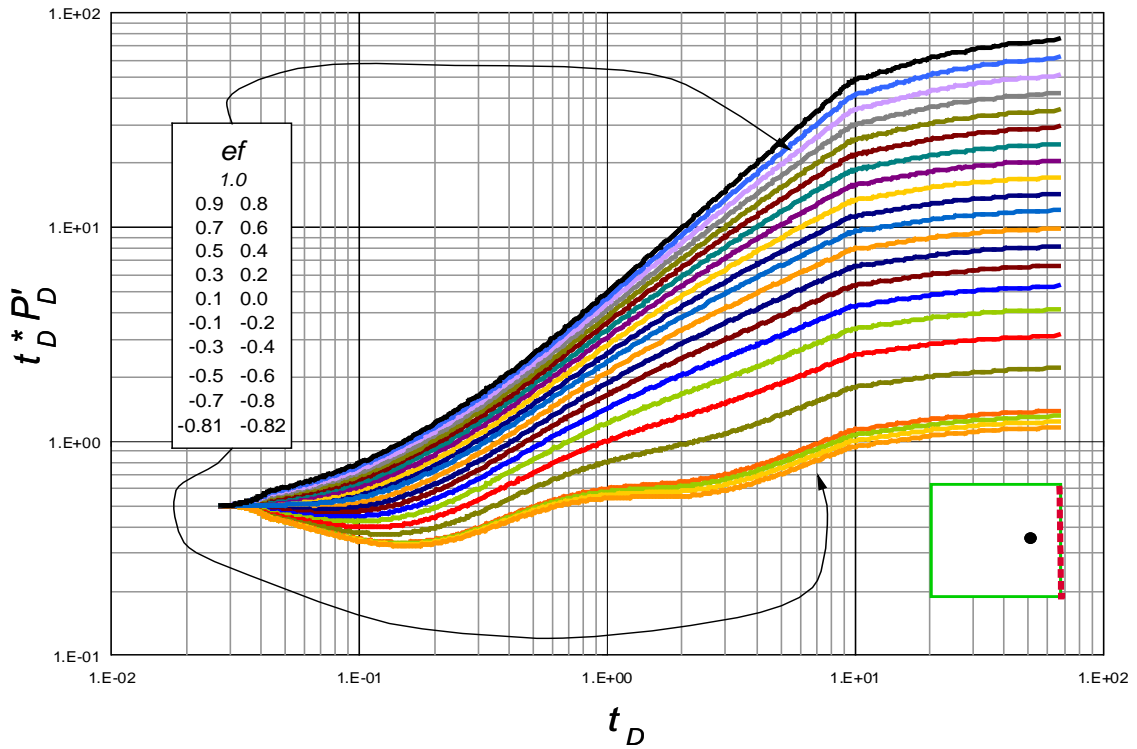


Gráfica A11. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras.

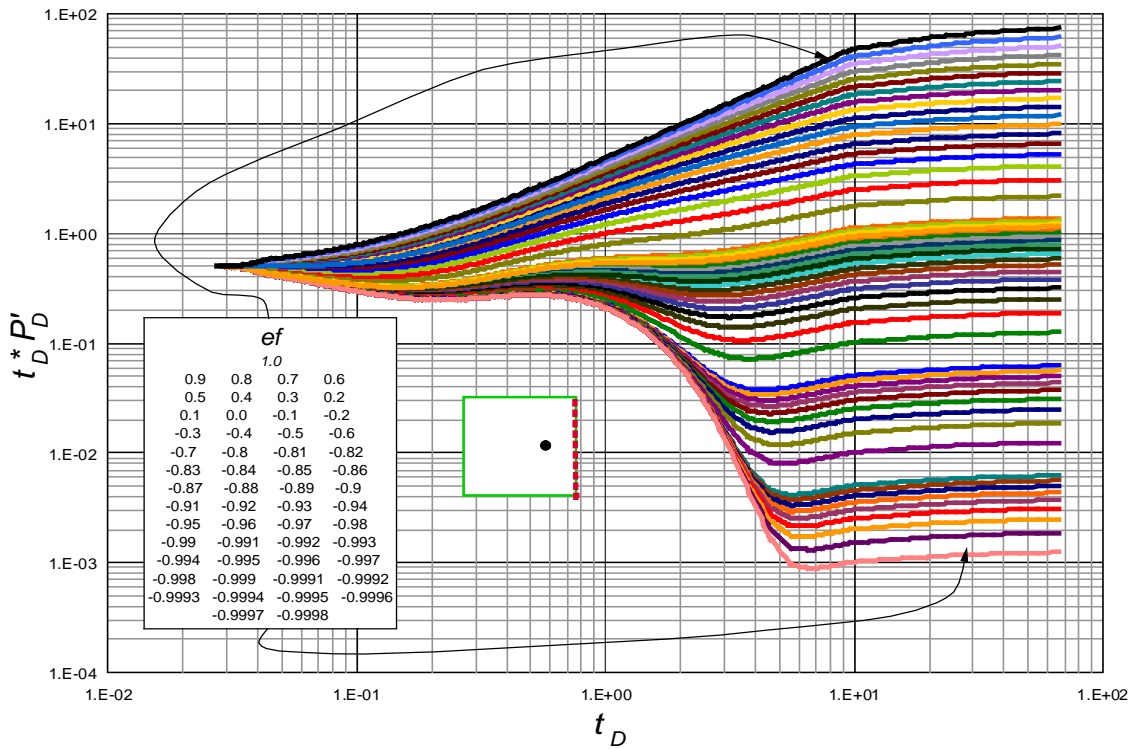


Gráfica A12. Resultados obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo centrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado estable.

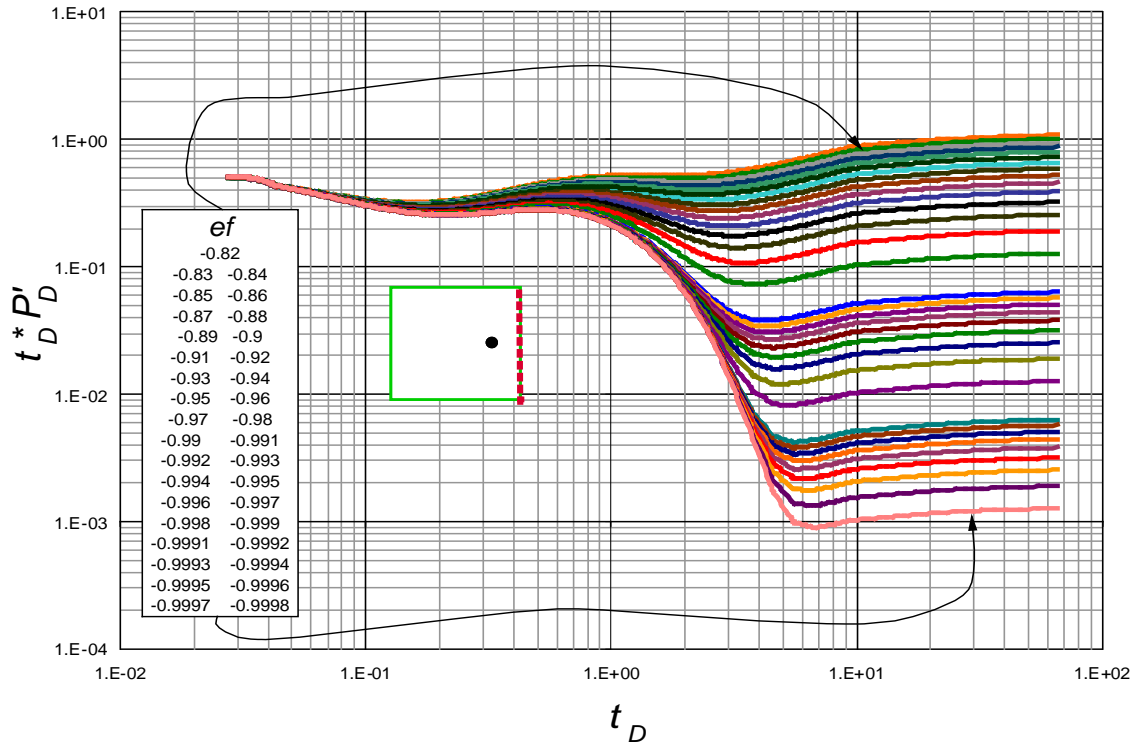
Yacimiento cuadrado con pozo descentrado a la derecha.



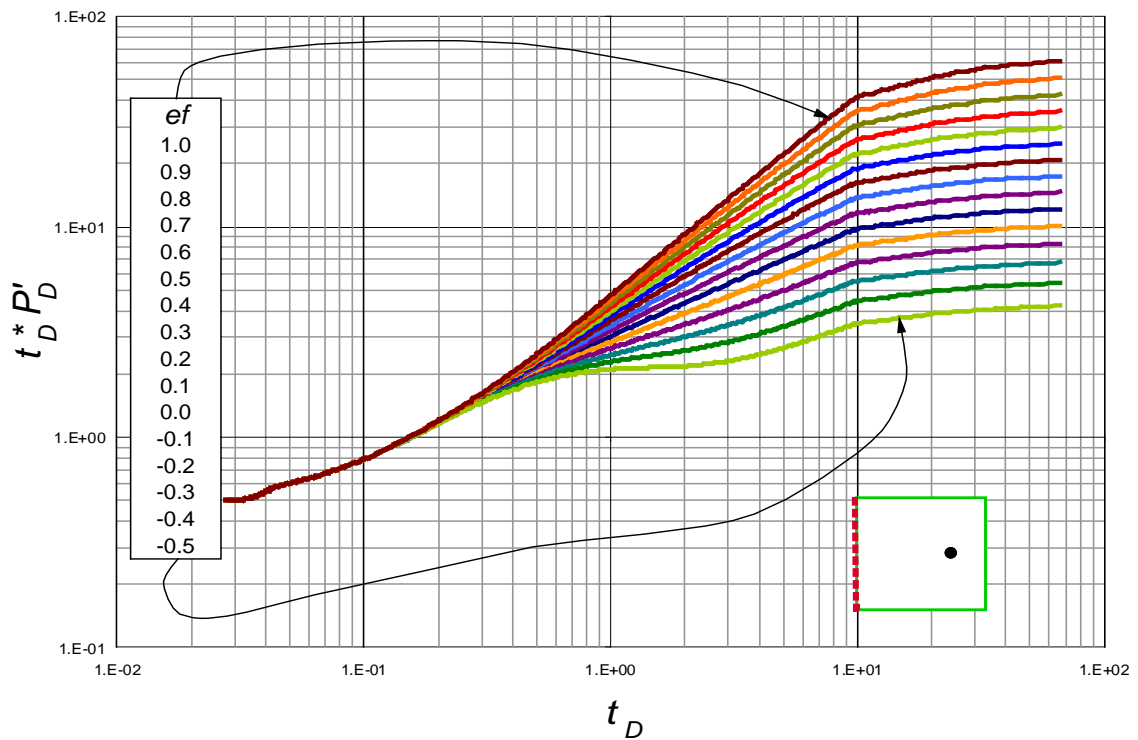
Gráfica A13. Resultado adimensional de $t_D^* P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla *leaky* permeable cercano. Estado pseudoestable.



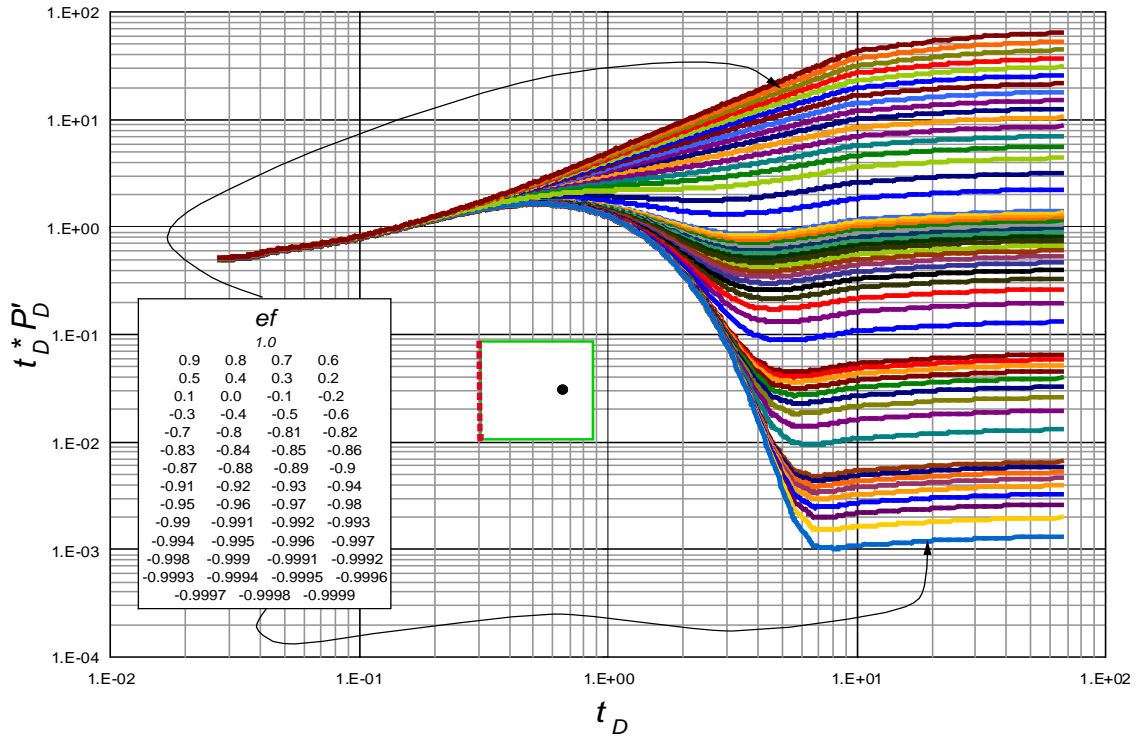
Gráfica A14. Resultado adimensional de $t_D^* P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla *leaky* permeable cercano.



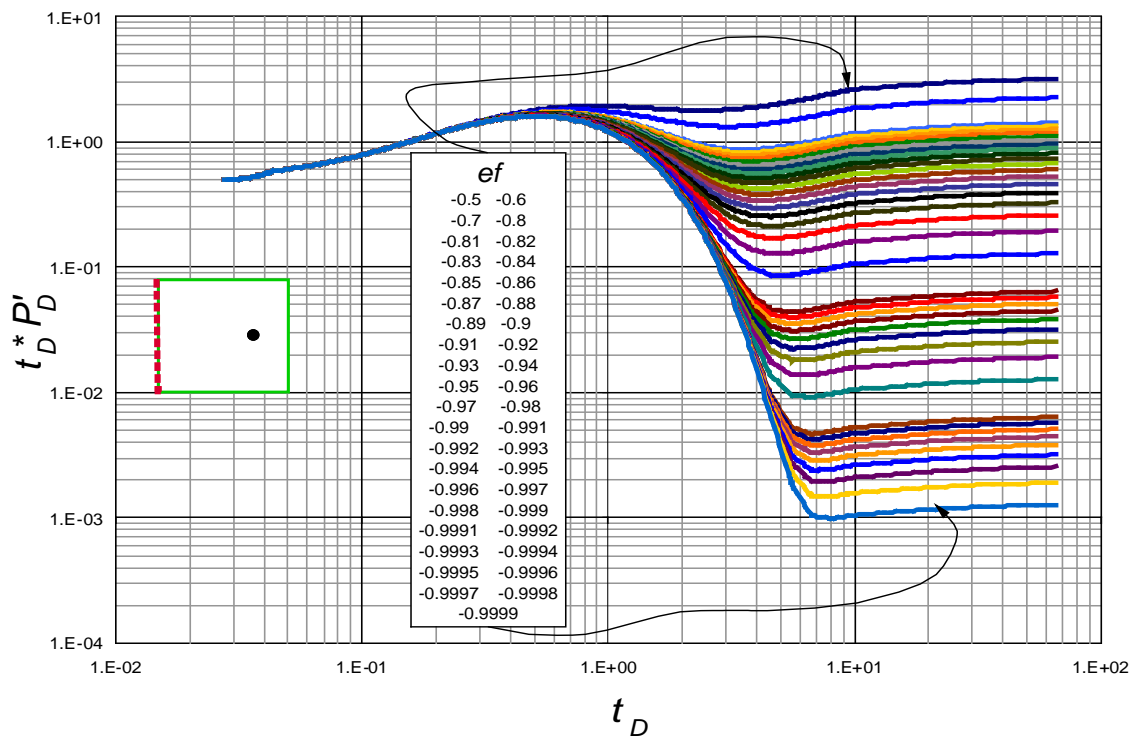
Gráfica A15. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla leaky permeable cercano. Estado Estable.



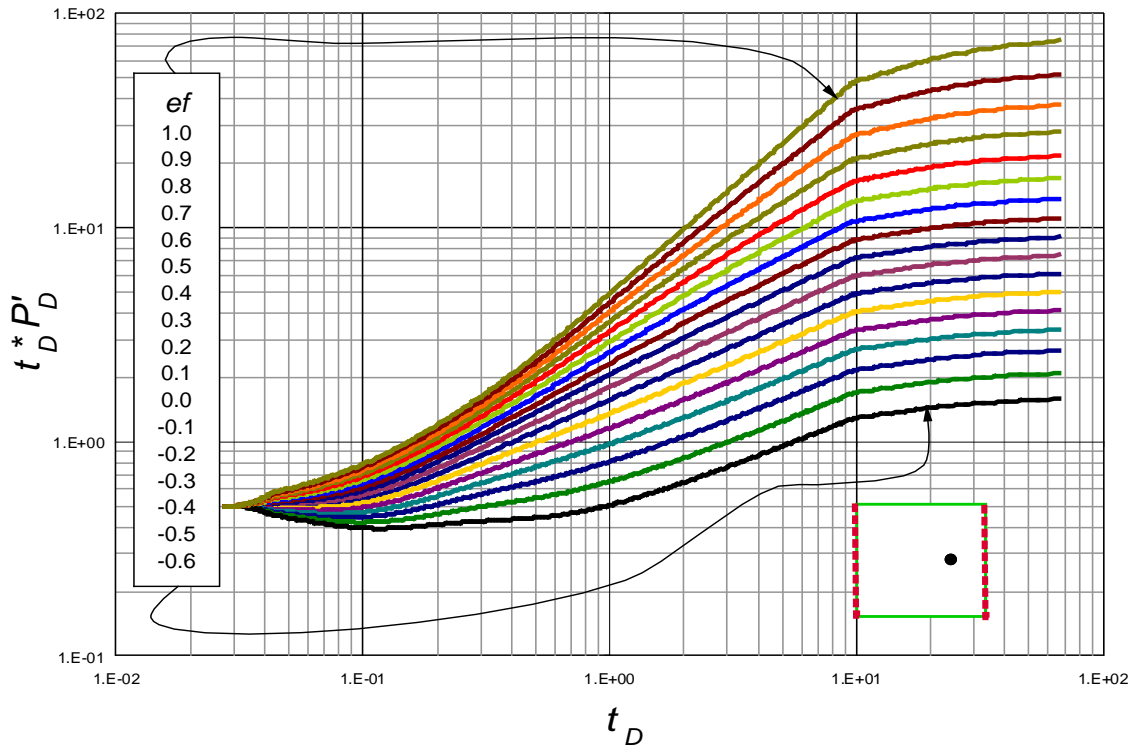
Gráfica A16. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla leaky permeable lejana. Estado pseudoestable.



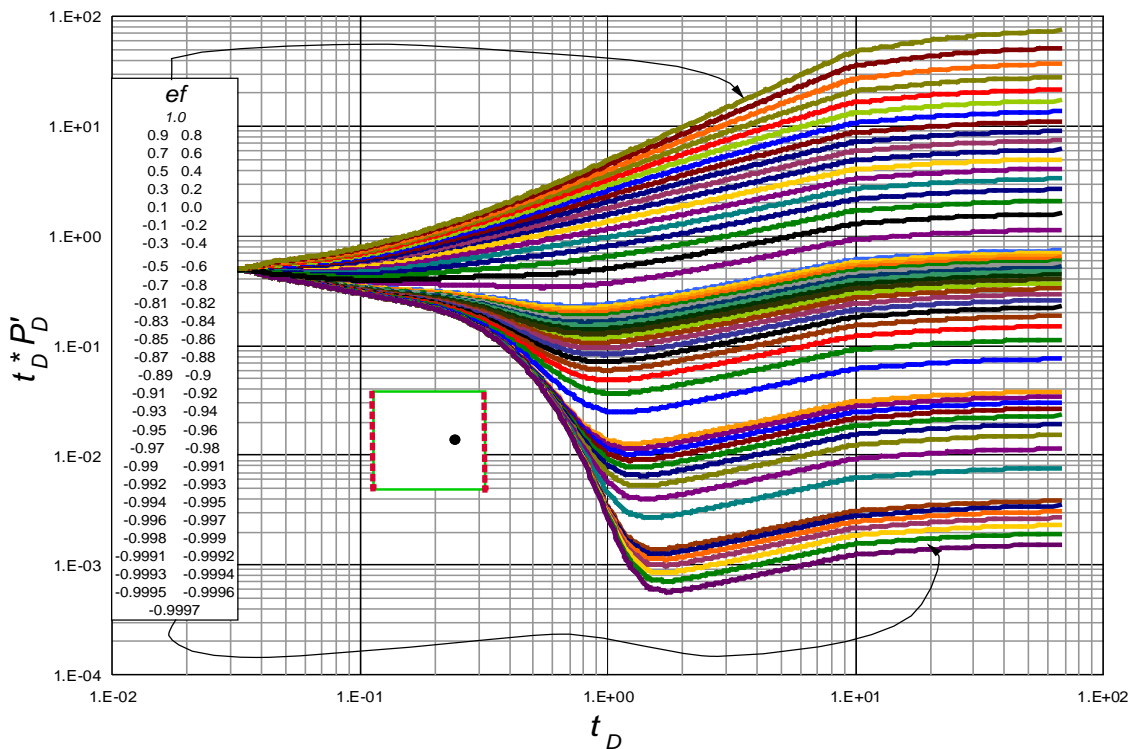
Gráfica A17. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla leaky permeable lejano.



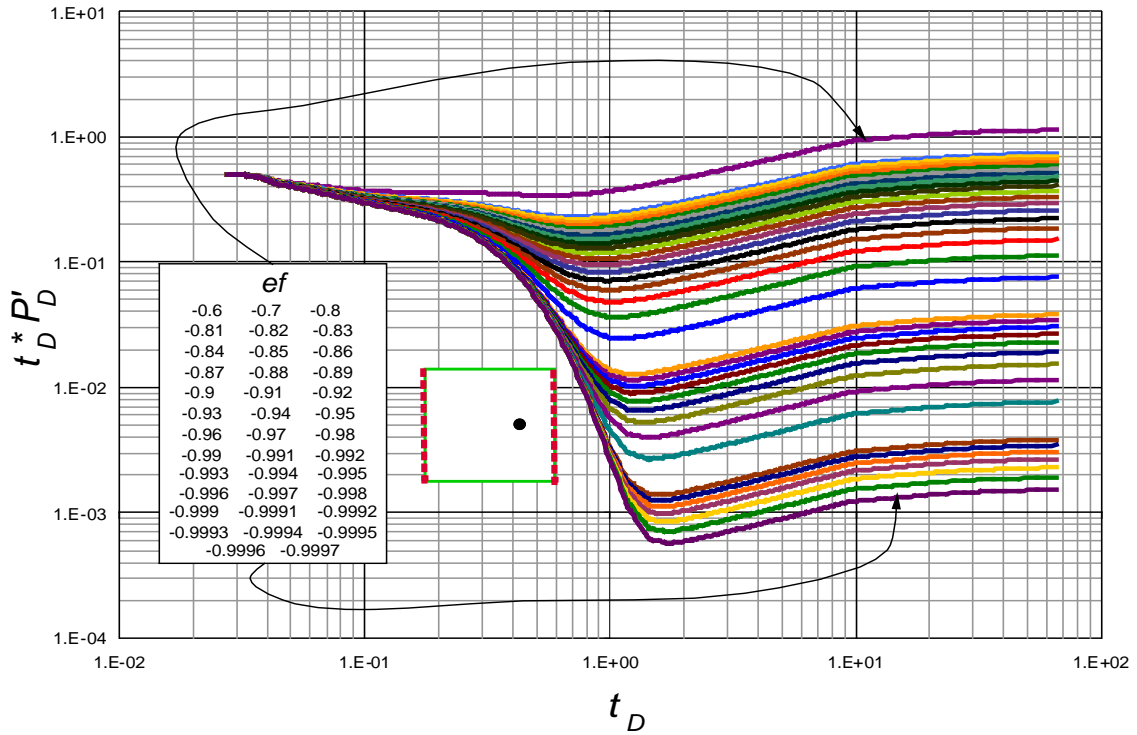
Gráfica A18. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla leaky permeable lejano. Estado estable.



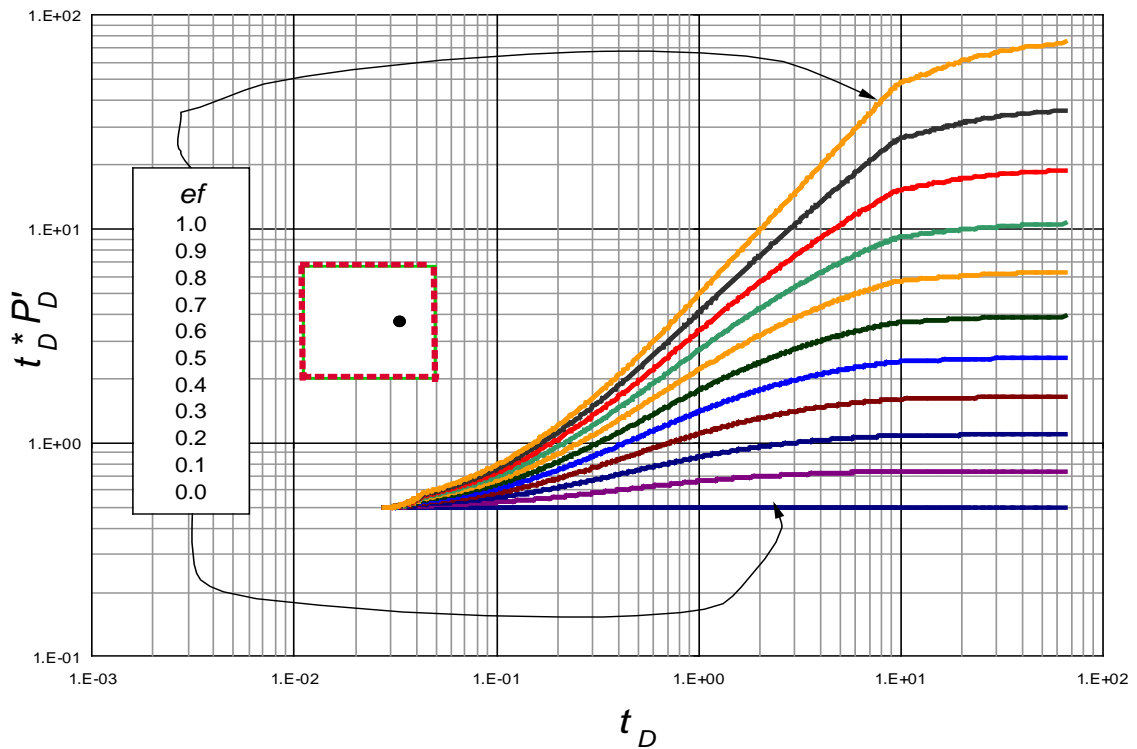
Gráfica A19. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado pseudoestable.



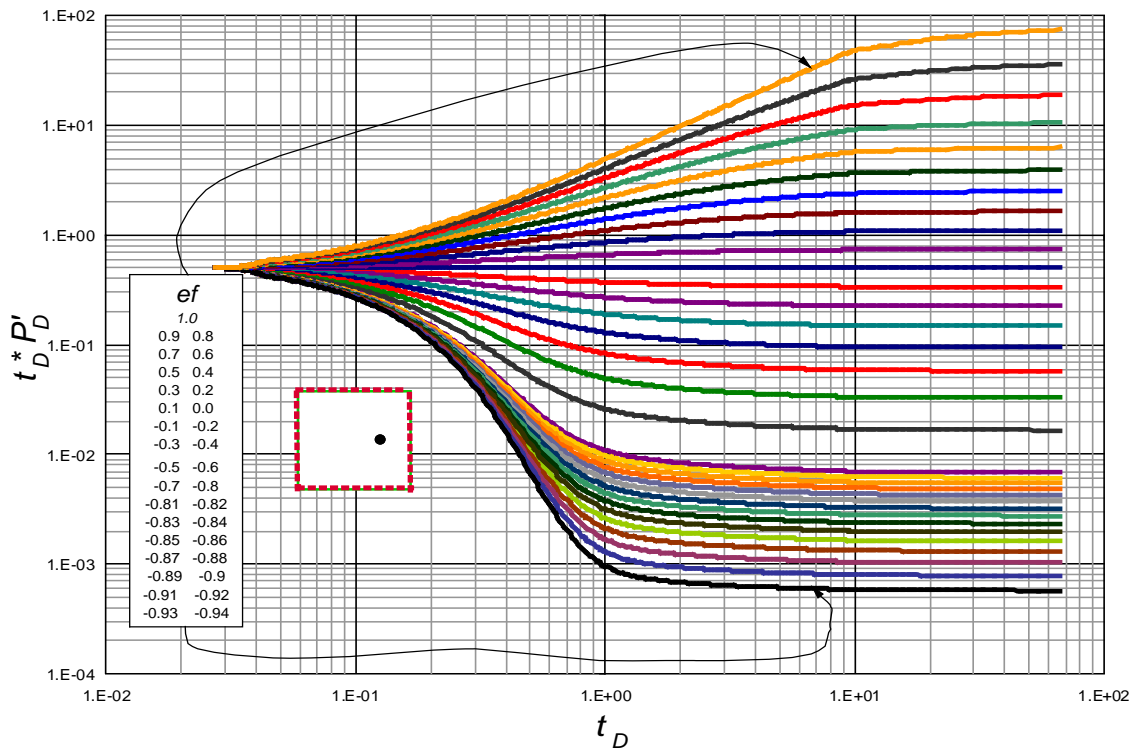
Gráfica A20. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables.



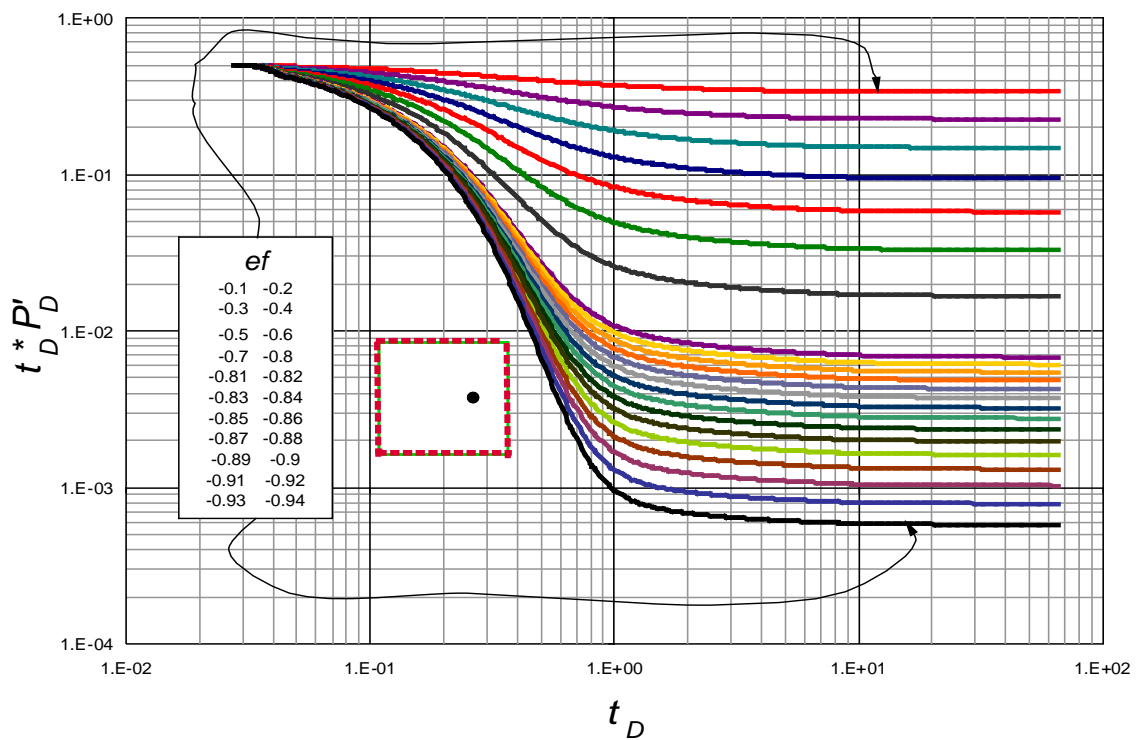
Gráfica A21. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado estable.



Gráfica A22. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado pseudoestable.

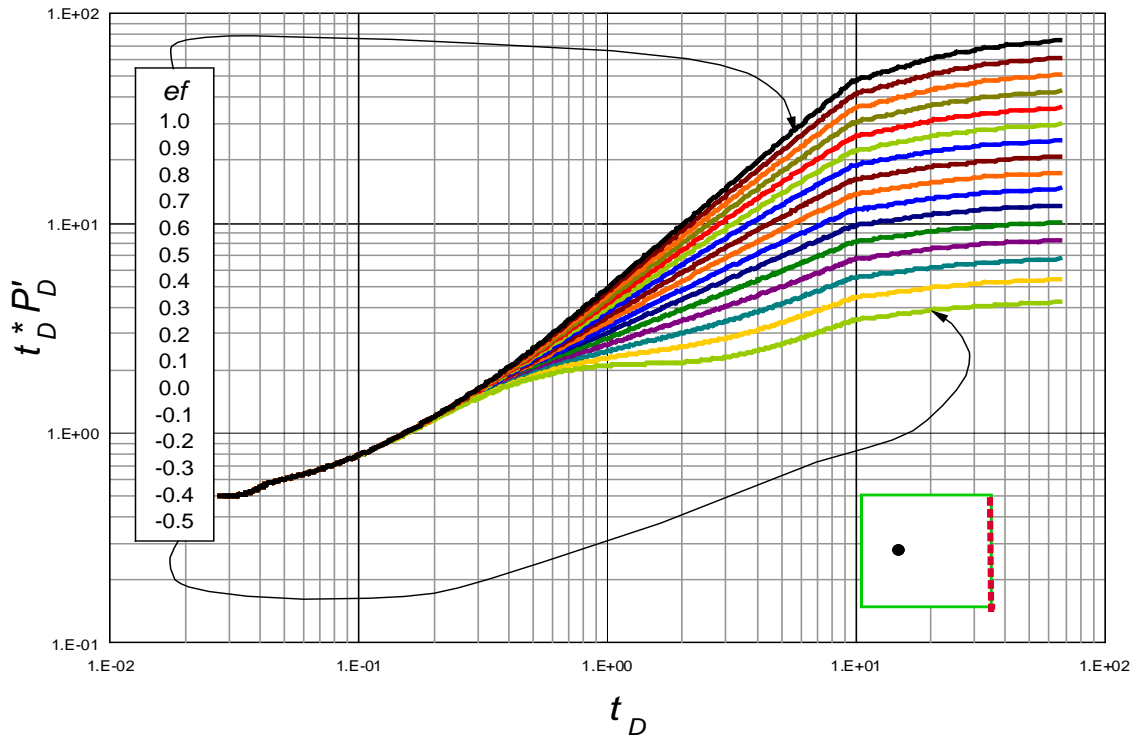


Gráfica A23. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras.

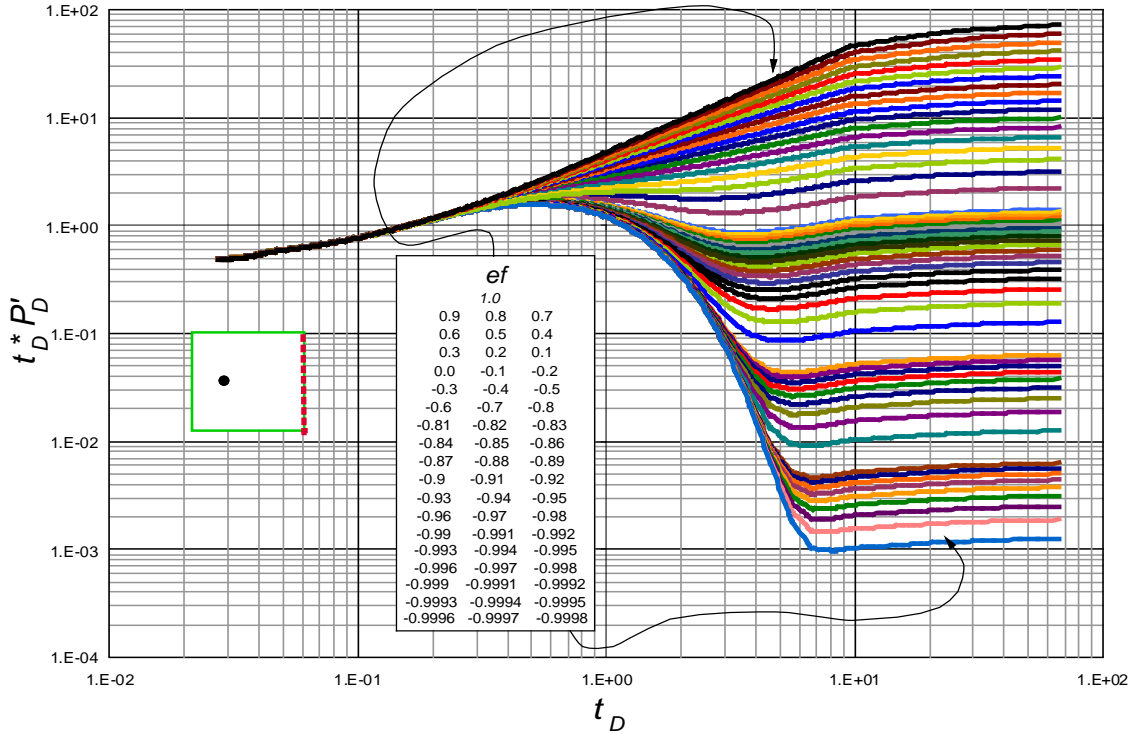


Gráfica A24. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado estable.

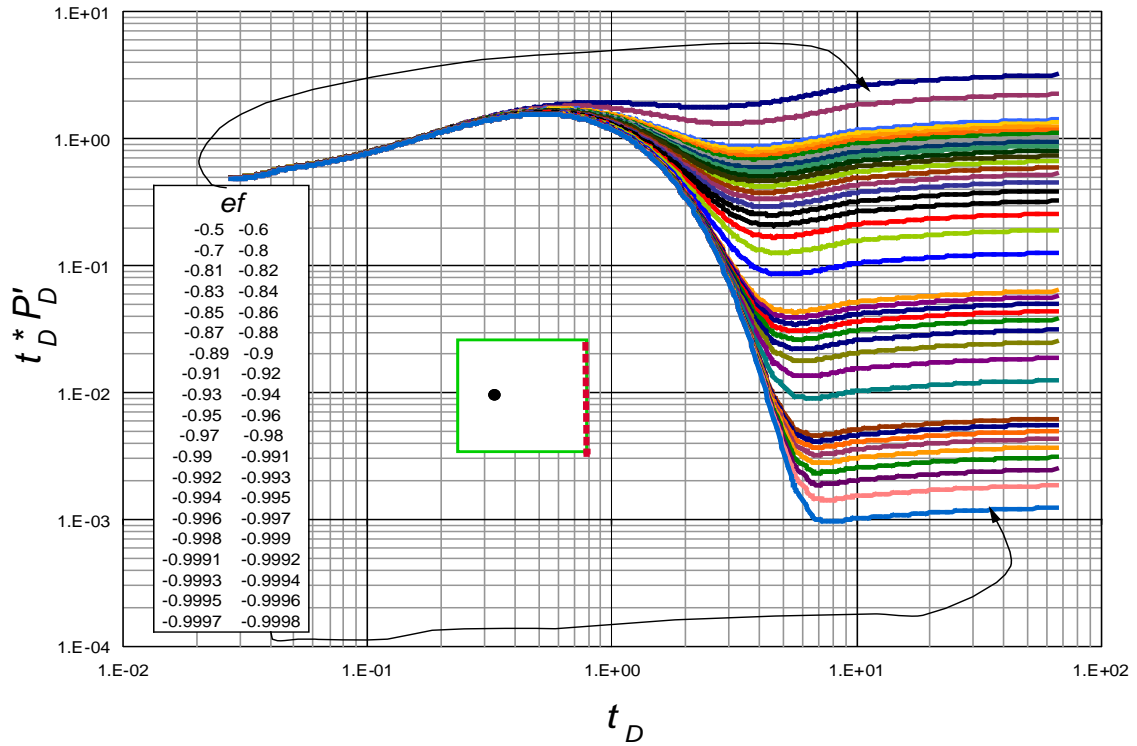
Yacimiento cuadrado con pozo descentrado a la izquierda.



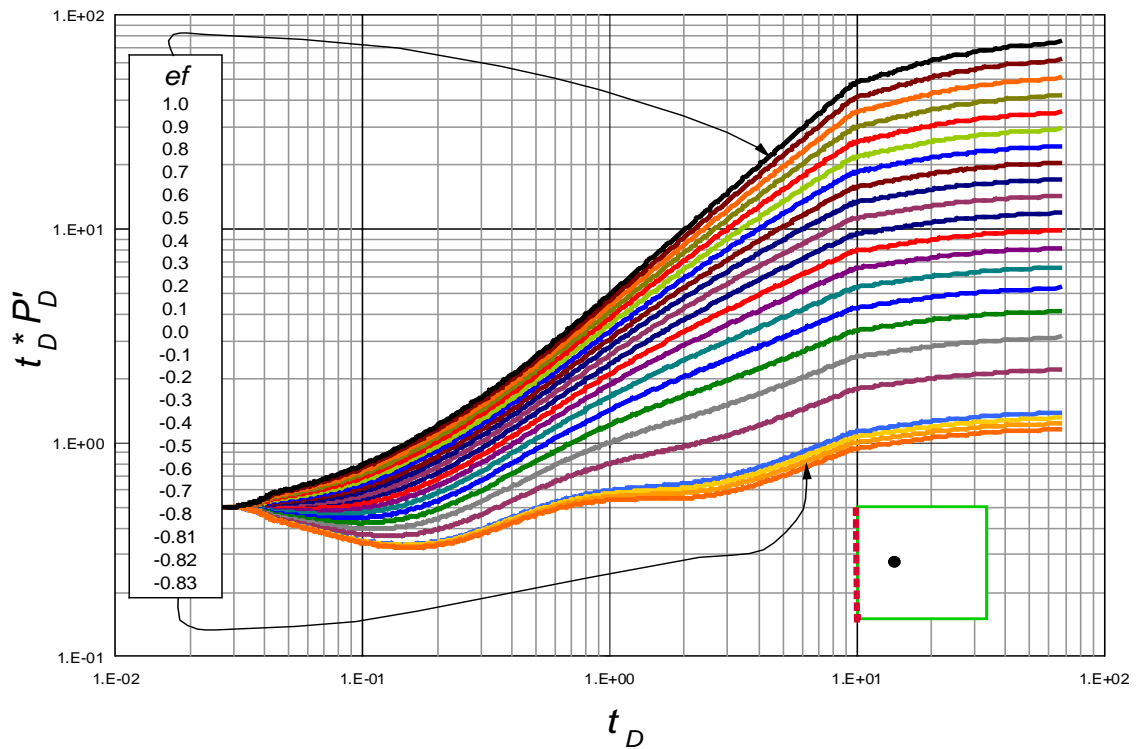
Gráfica A25. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla *leaky* lejana. Estado pseudoestable.



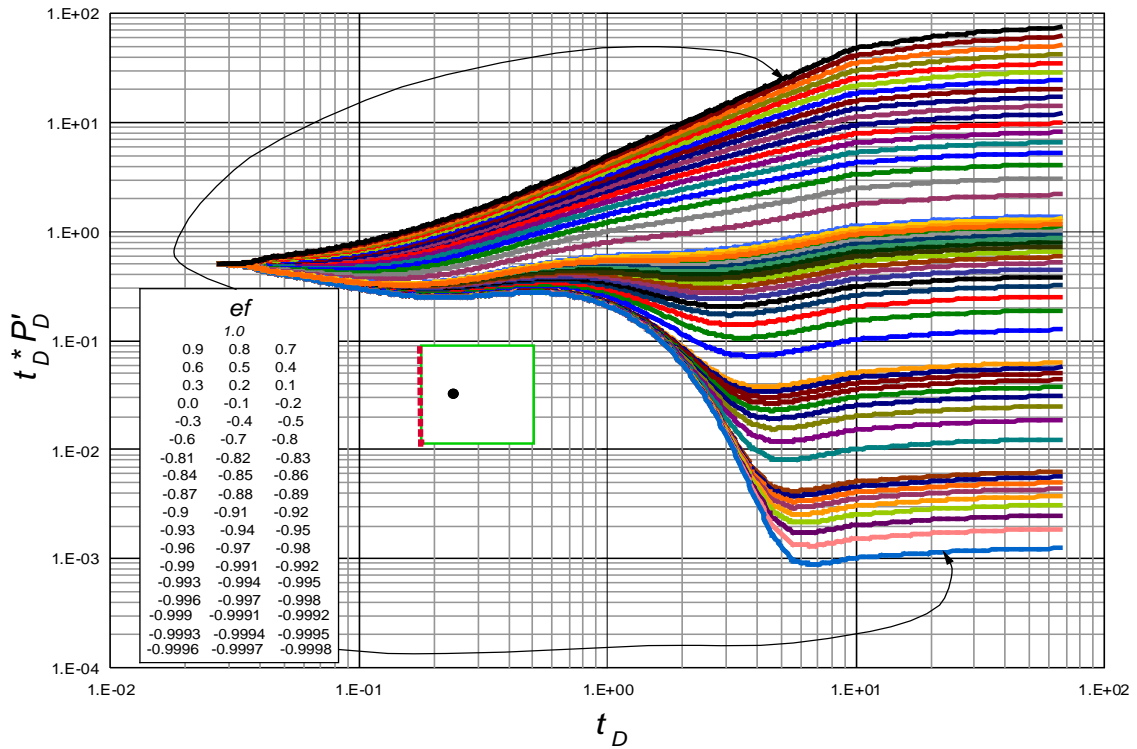
Gráfica A26. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla *leaky* lejana.



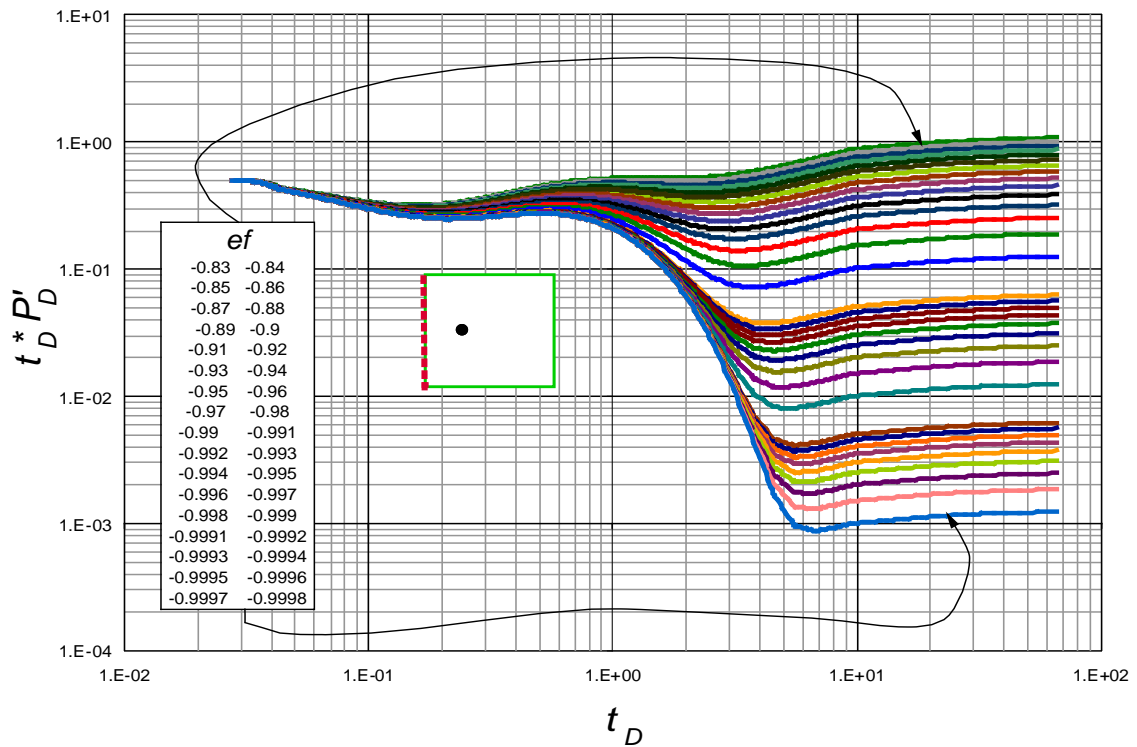
Gráfica A27. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla *leaky* lejana a la derecha. Estado estable.



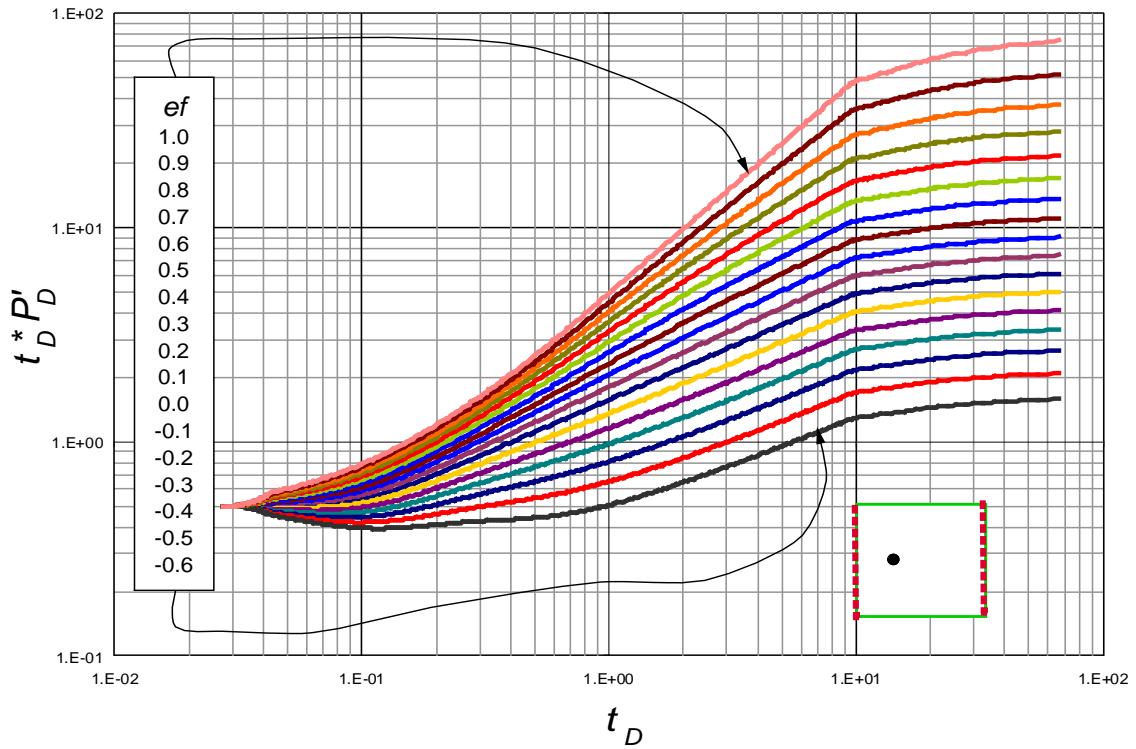
Gráfica A28. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla *leaky* cercana. Estado pseudoestable.



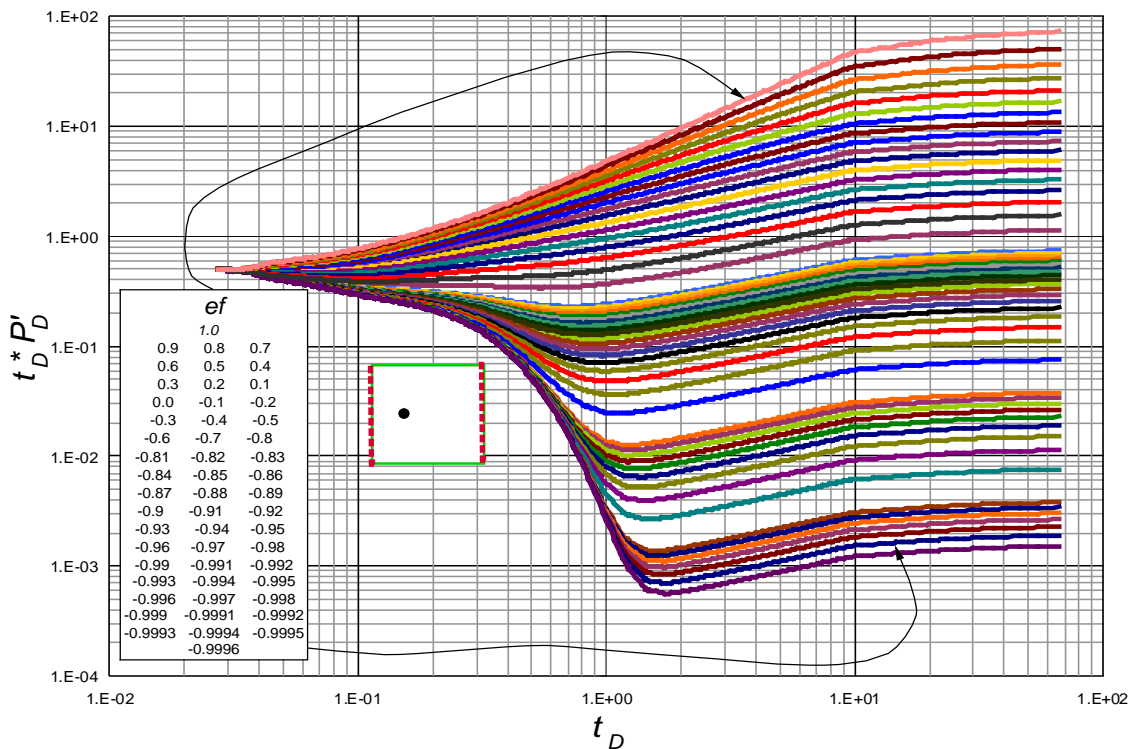
Gráfica A29. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla leaky cercana.



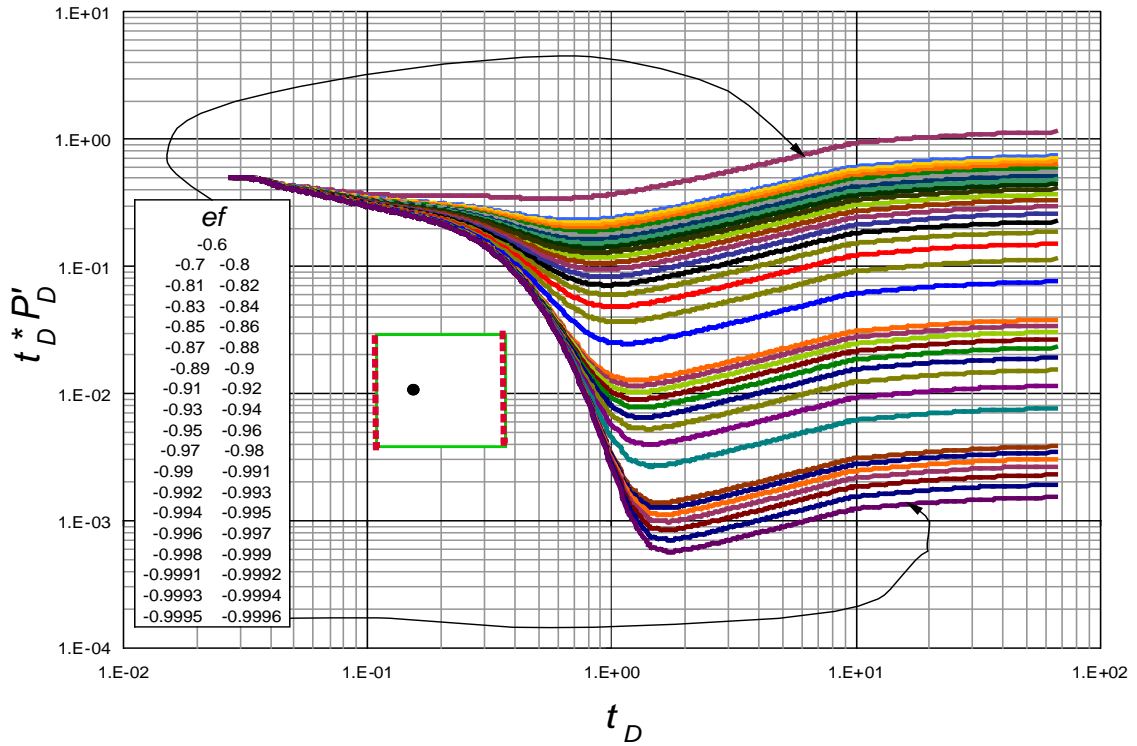
Gráfica A30. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y falla leaky cercana. Estado estable.



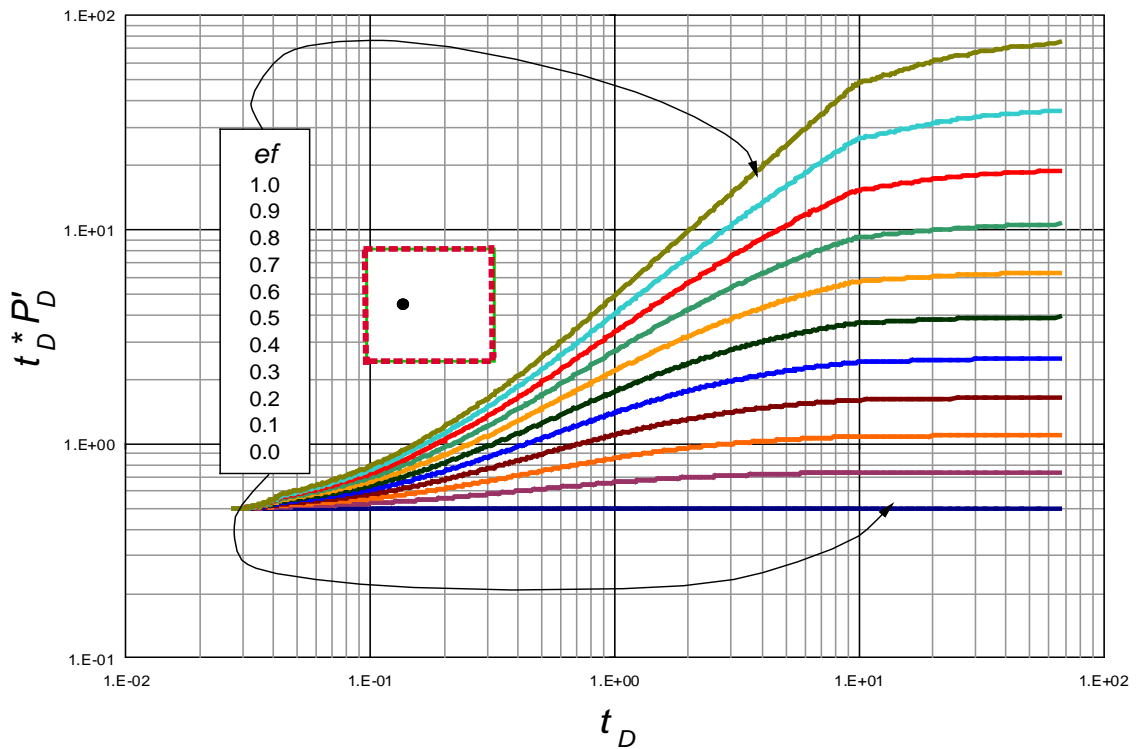
Gráfica A31. Resultado adimensional de $t_D^* P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado pseudoestable.



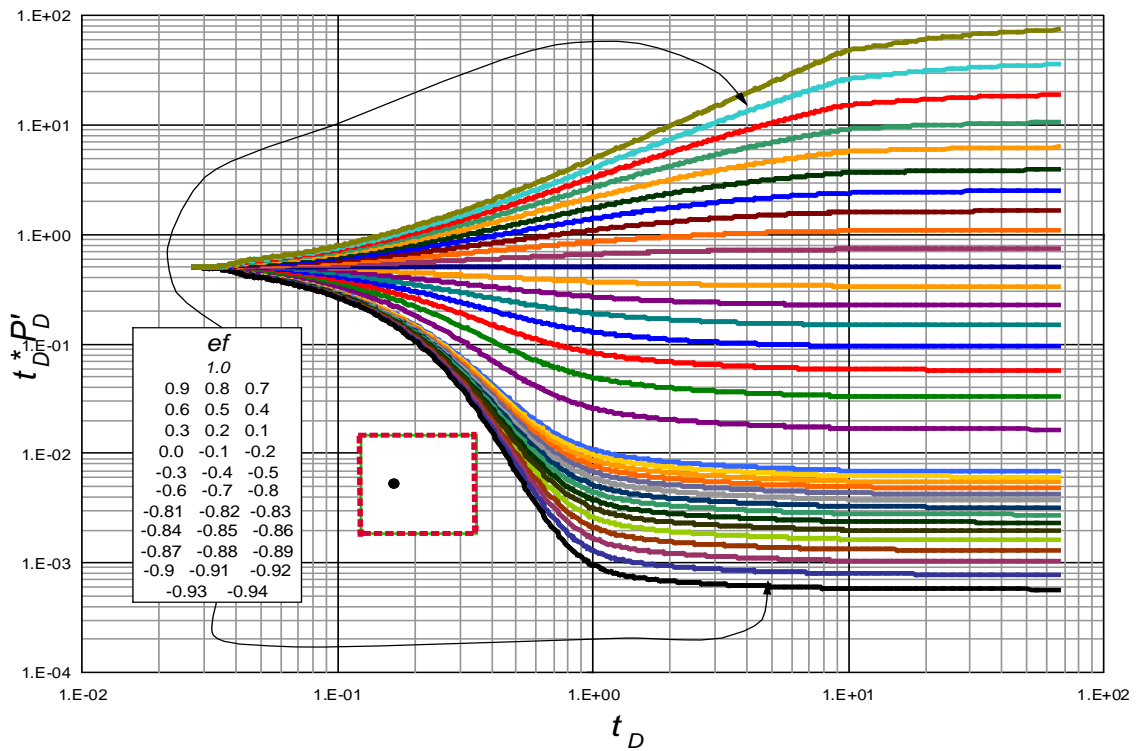
Gráfica A32. Resultado adimensional de $t_D^* P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables.



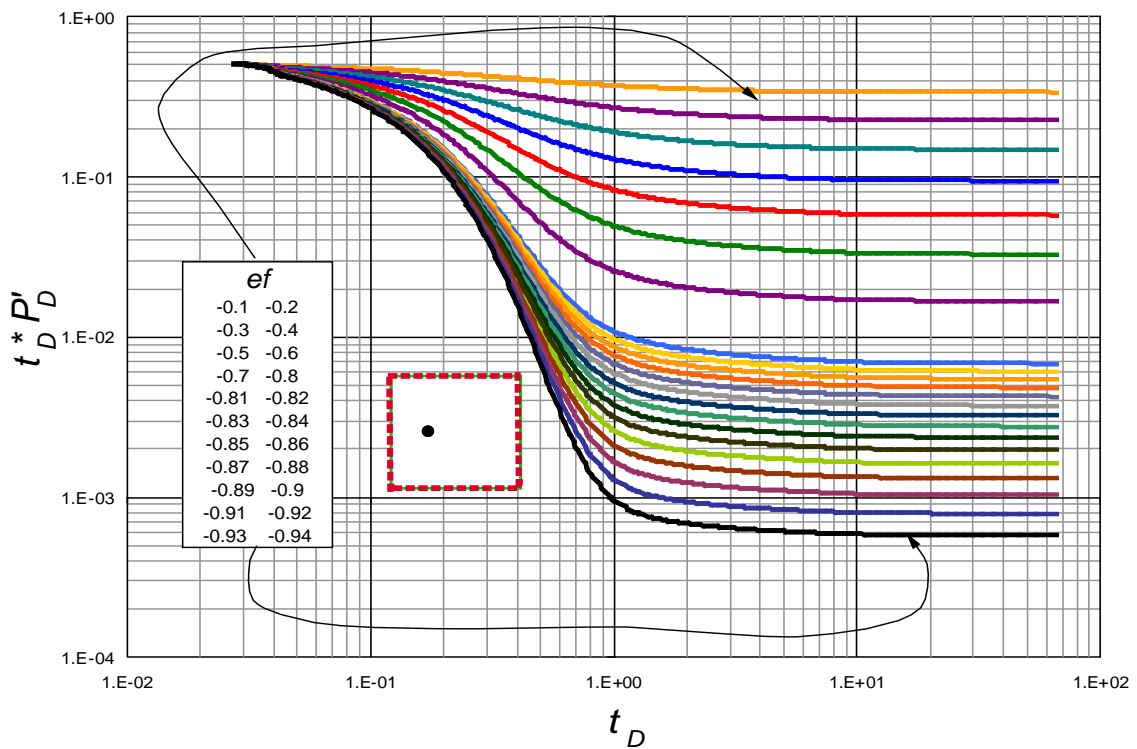
Gráfica A33. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado estable.



Gráfica A34. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado pseudoestable.

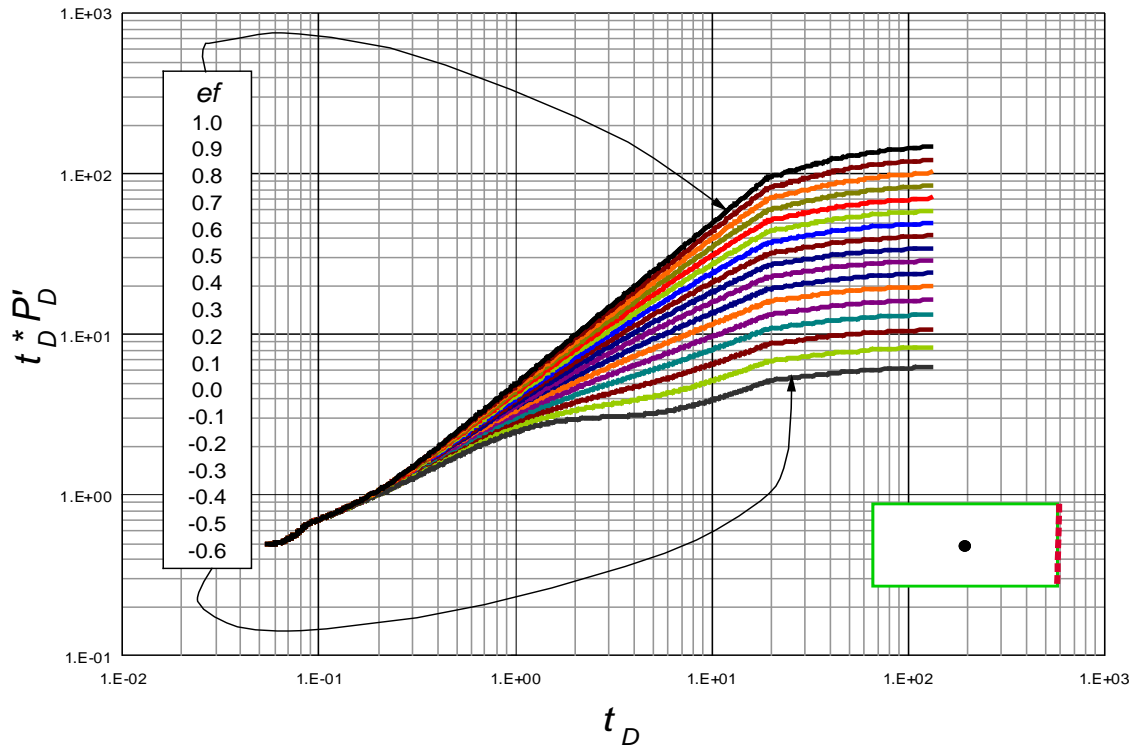


Gráfica A35. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras.

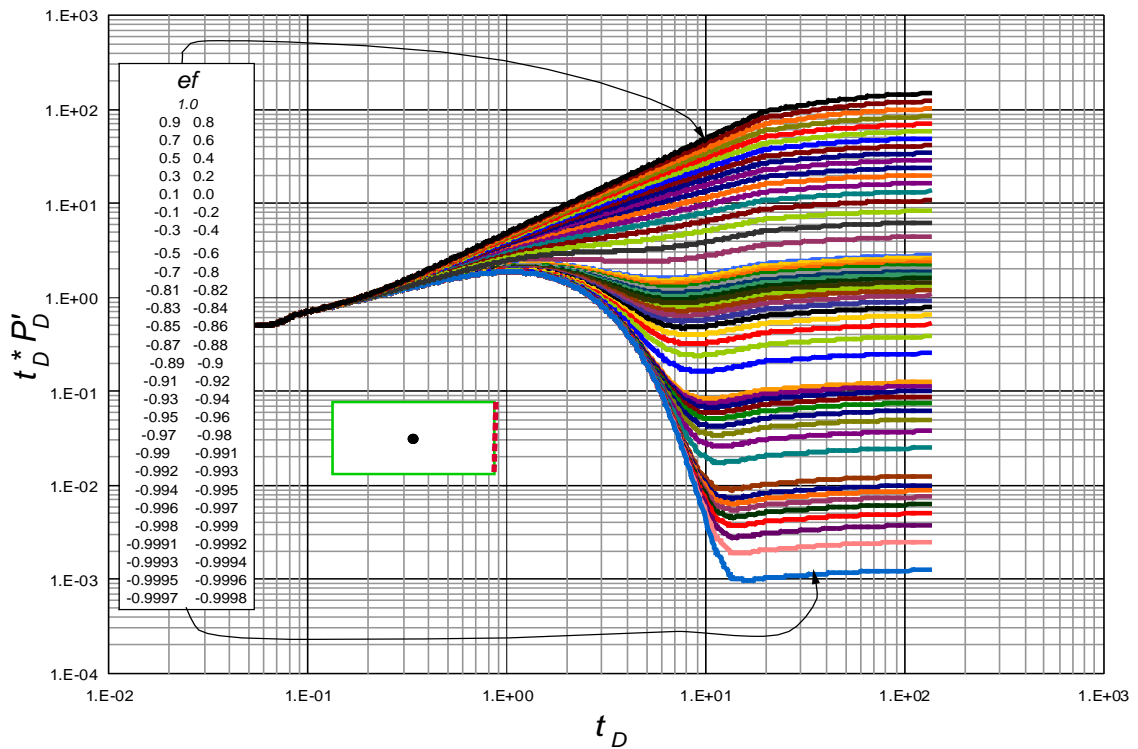


Gráfica A36. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento cuadrado con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado estable.

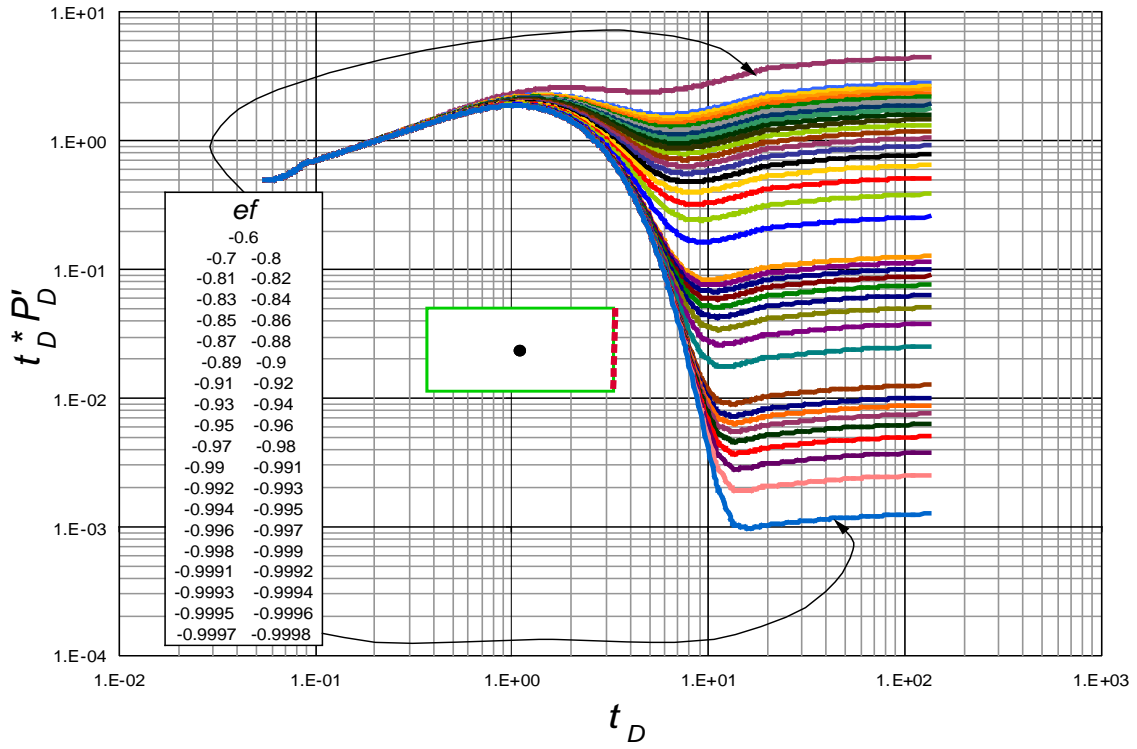
Yacimiento rectangular con pozo centrado.



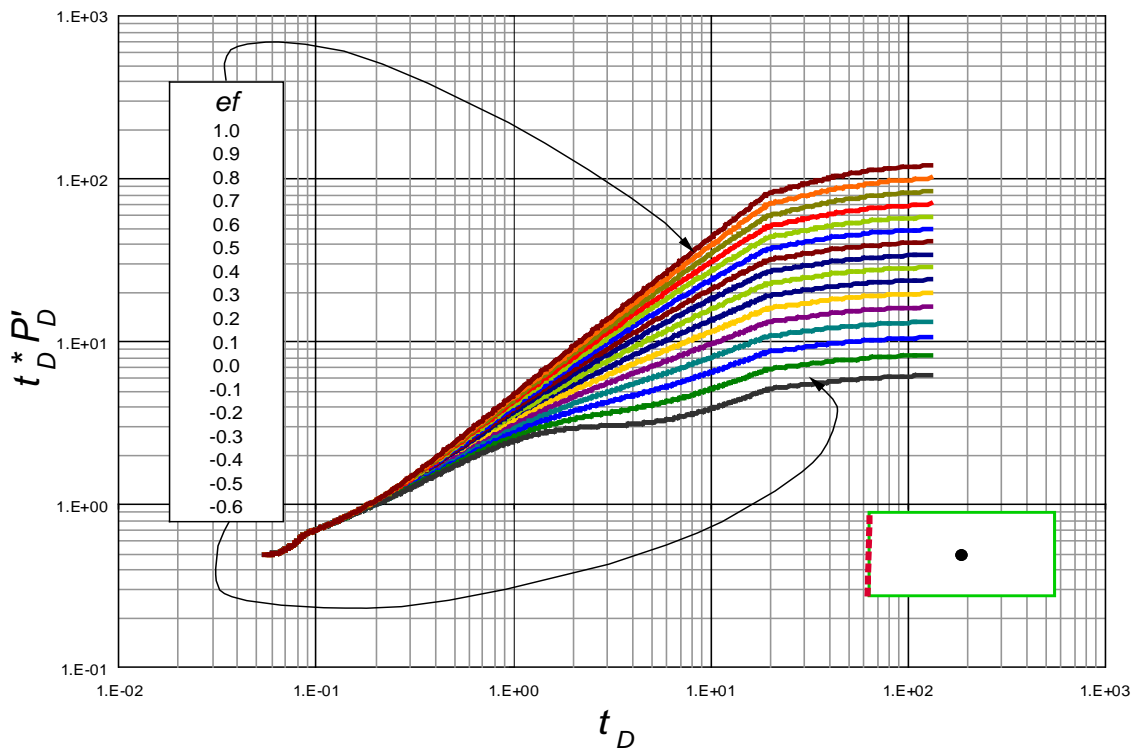
Gráfica A37. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y falla *leaky* cercana. Estado pseudoestable.



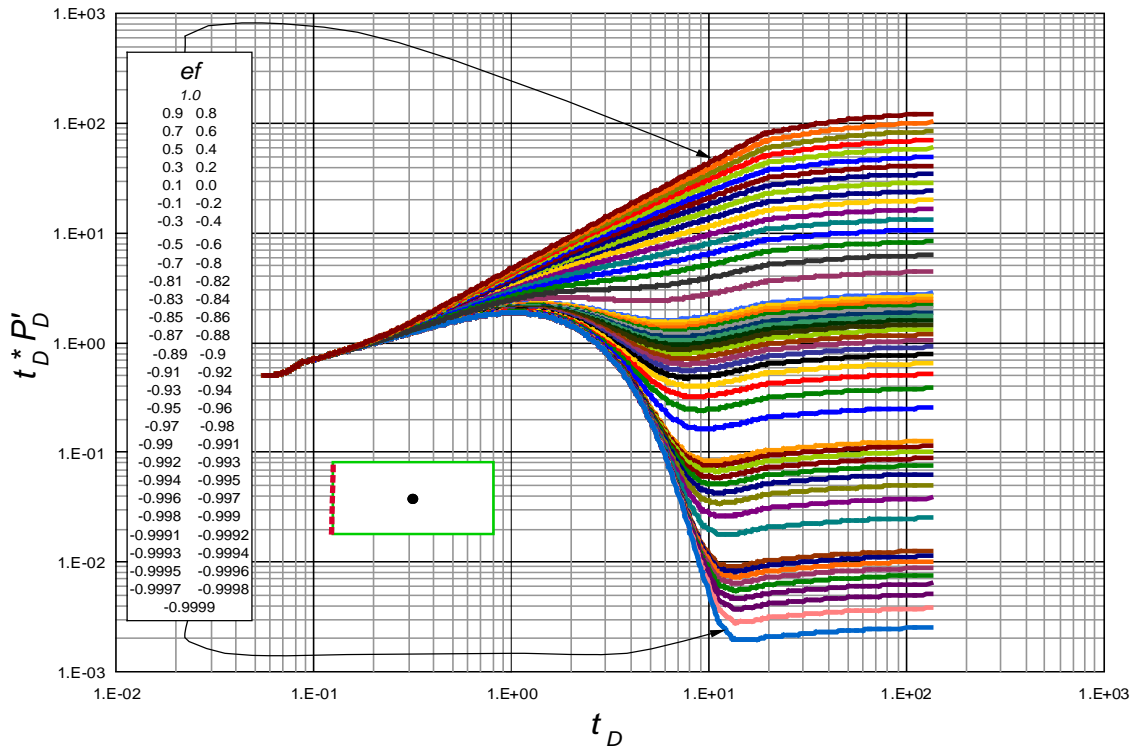
Gráfica A38. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y falla *leaky*.



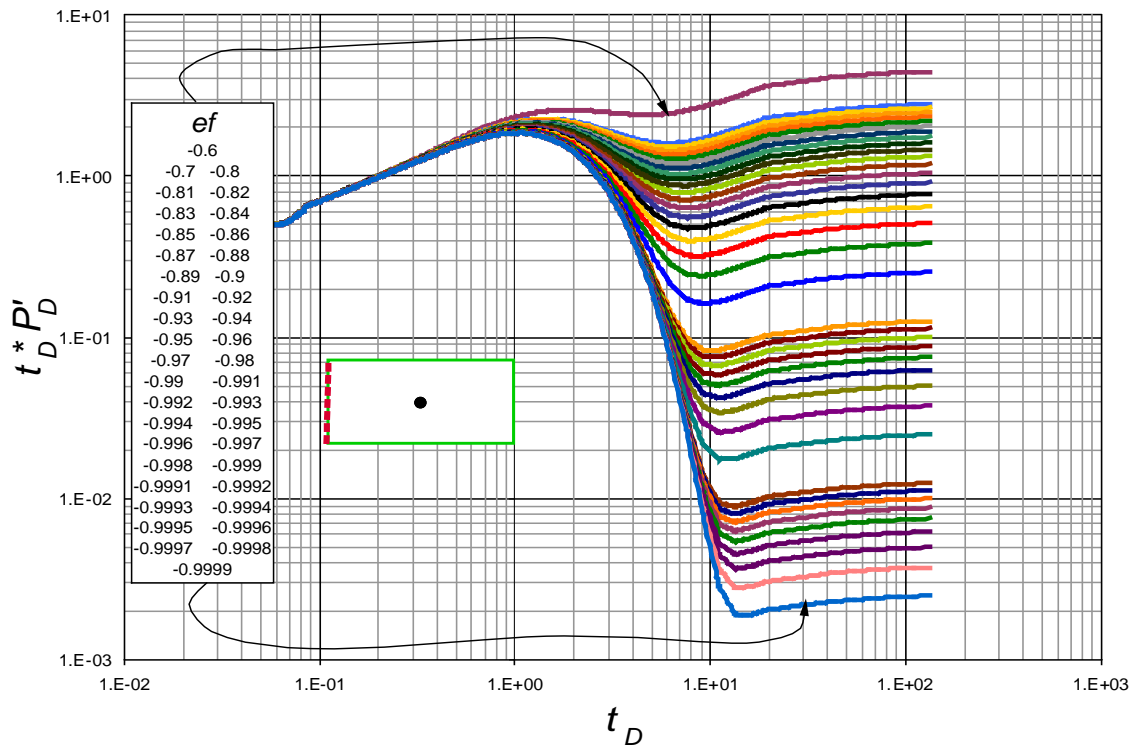
Gráfica A39. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y falla *leaky*. Estado estable.



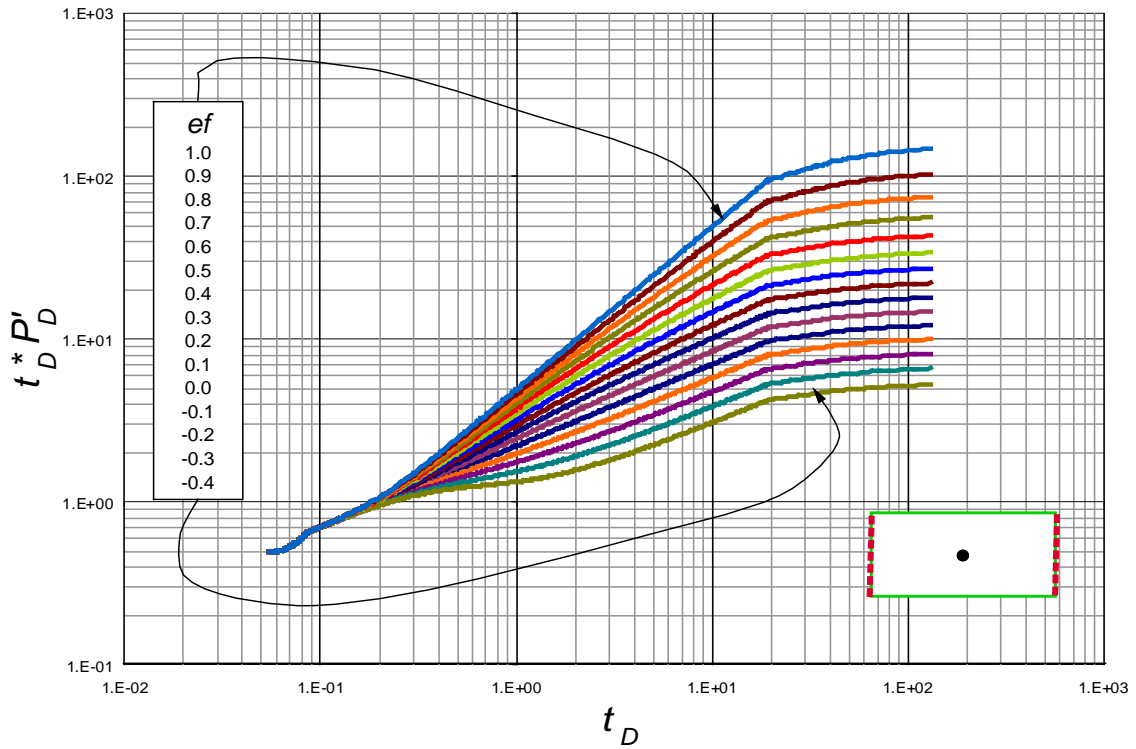
Gráfica A40. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y falla *leaky*. Estado pseudoestable.



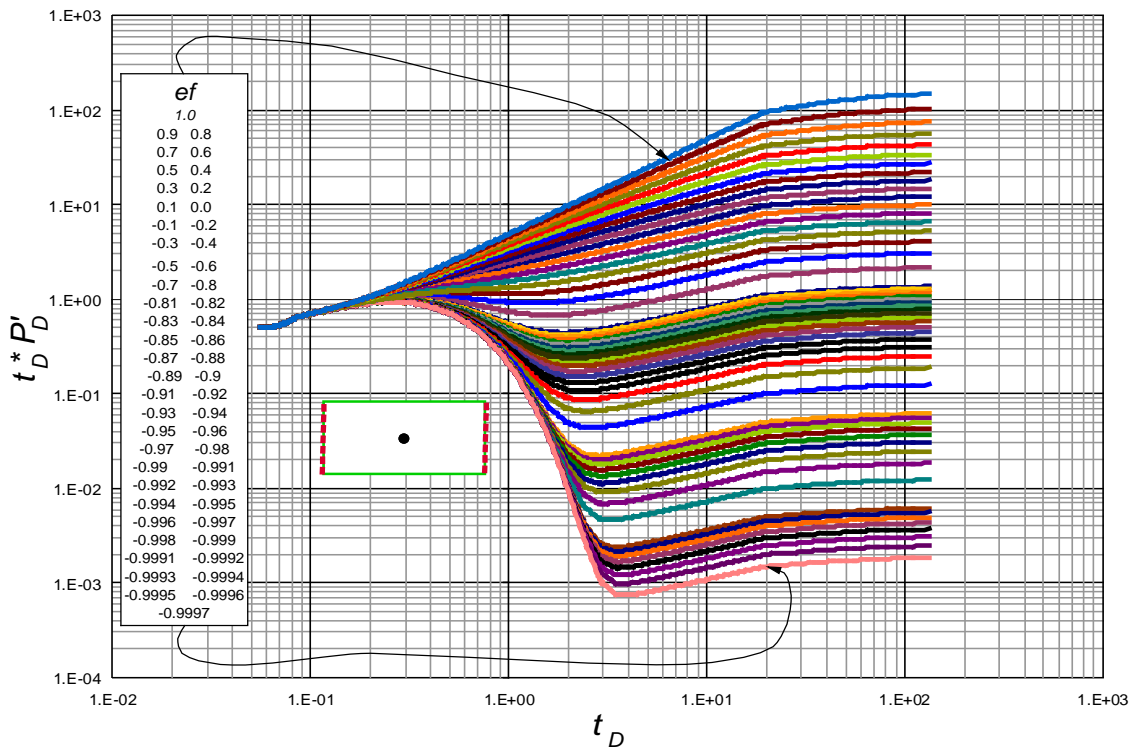
Gráfica A41. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y falla leaky.



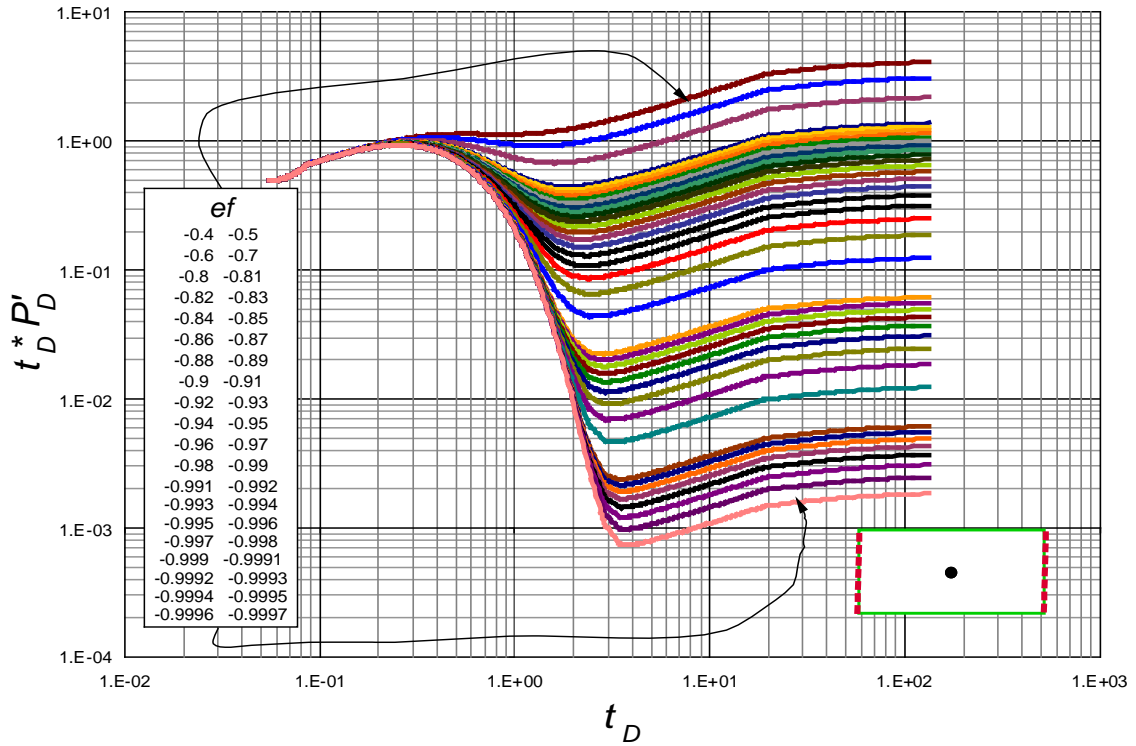
Gráfica A42. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y falla leaky. Estado estable



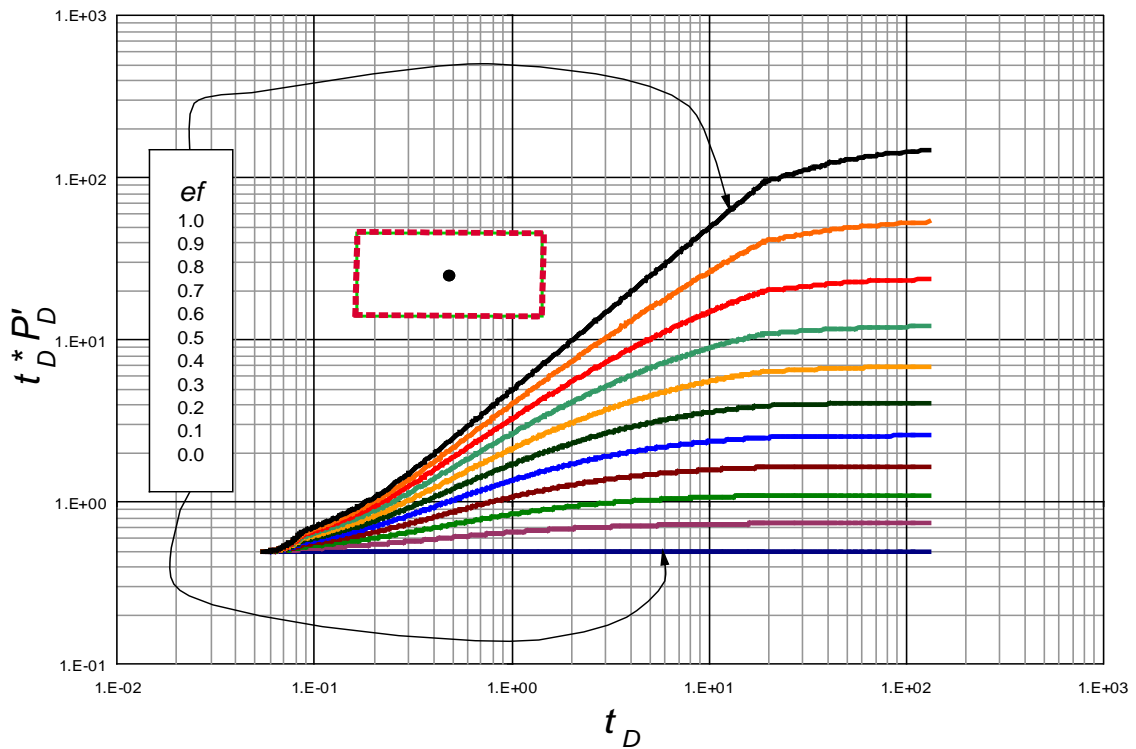
Gráfica A43. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado pseudoestable.



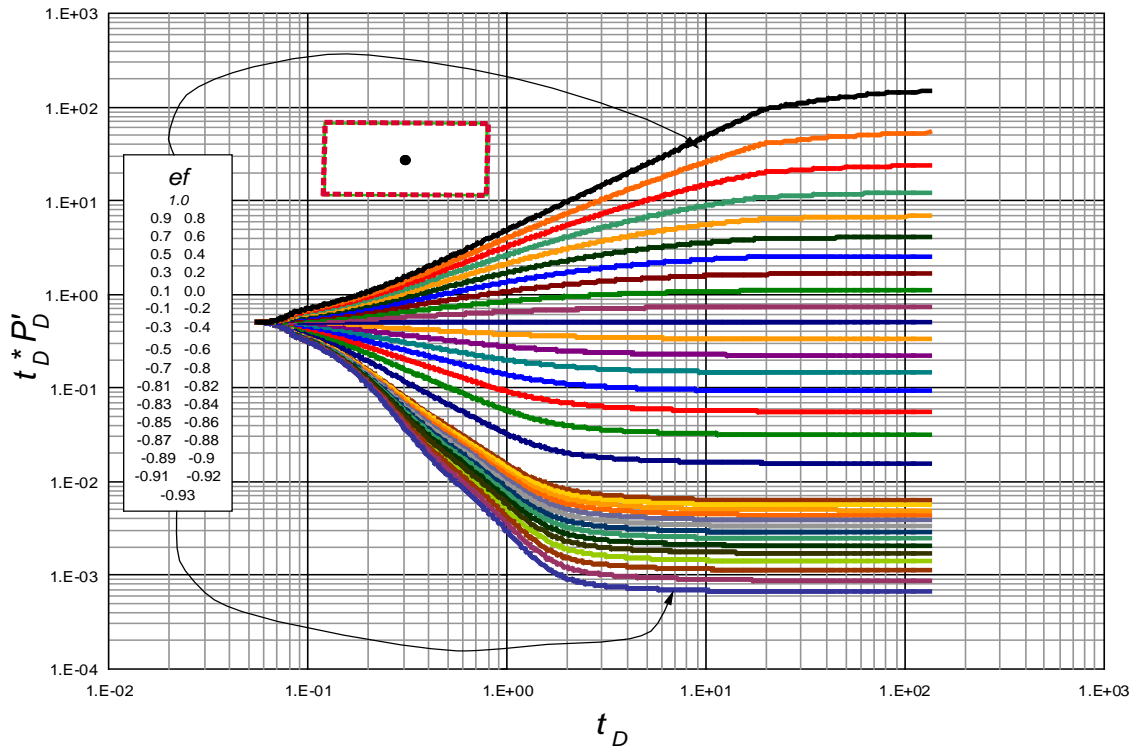
Gráfica A44. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y fallas laterales *leaky* permeables.



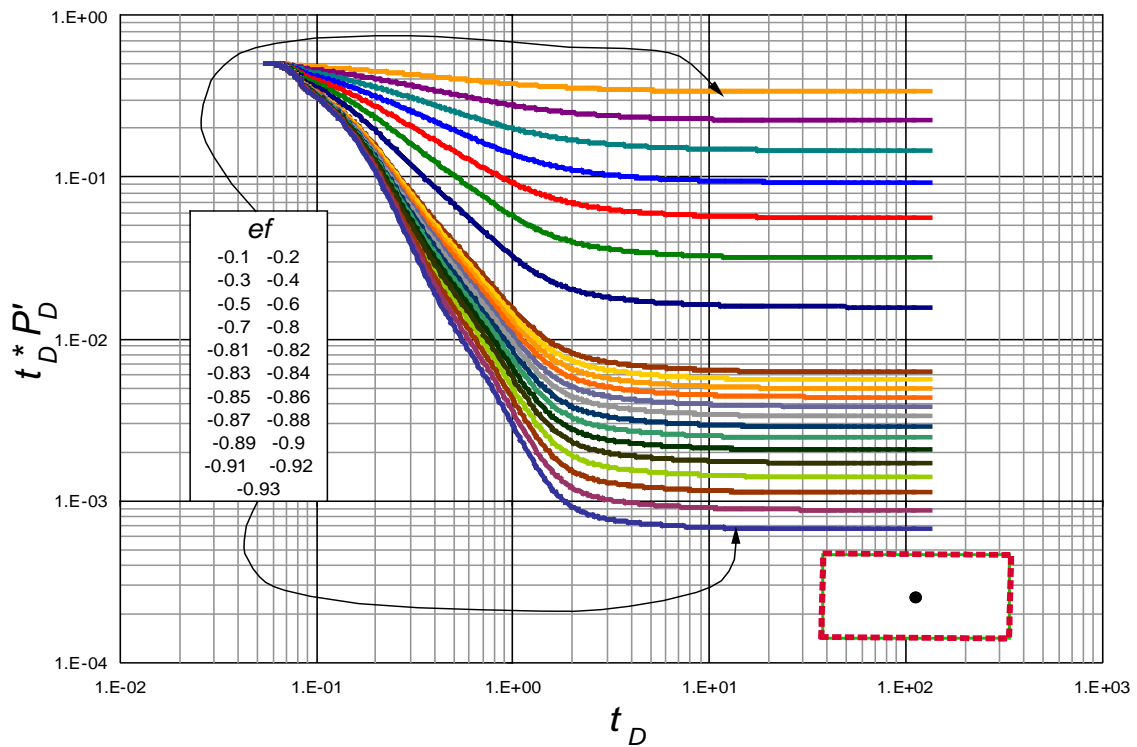
Gráfica A45. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y fallas laterales leaky permeables. Estado estable.



Gráfica A46. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y fallas leaky permeables en sus fronteras. Estado pseudoestable.

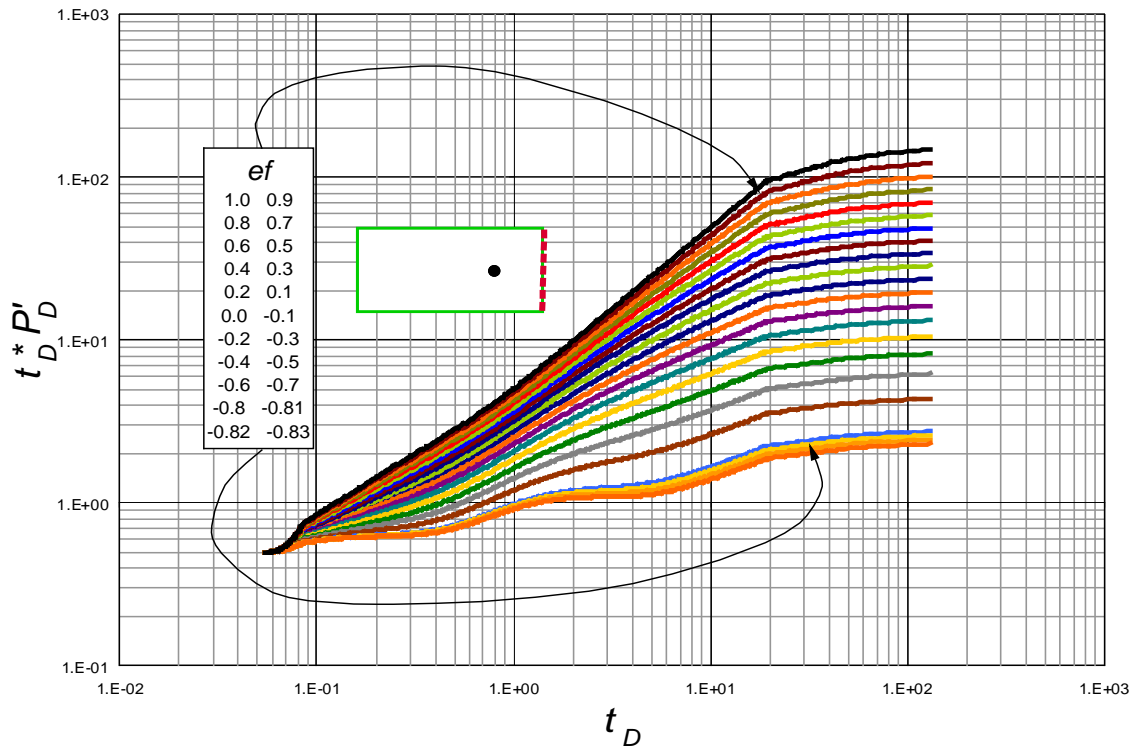


Gráfica A47. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo centrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras.

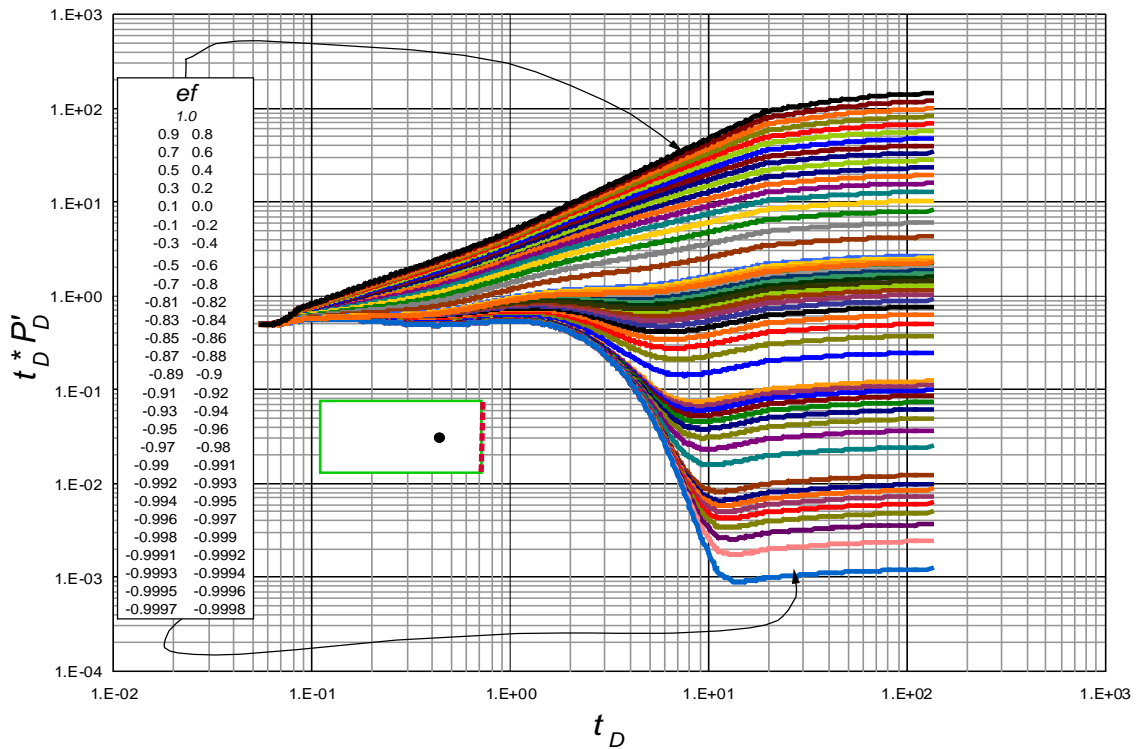


Gráfica A48. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado a la derecha y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado estable.

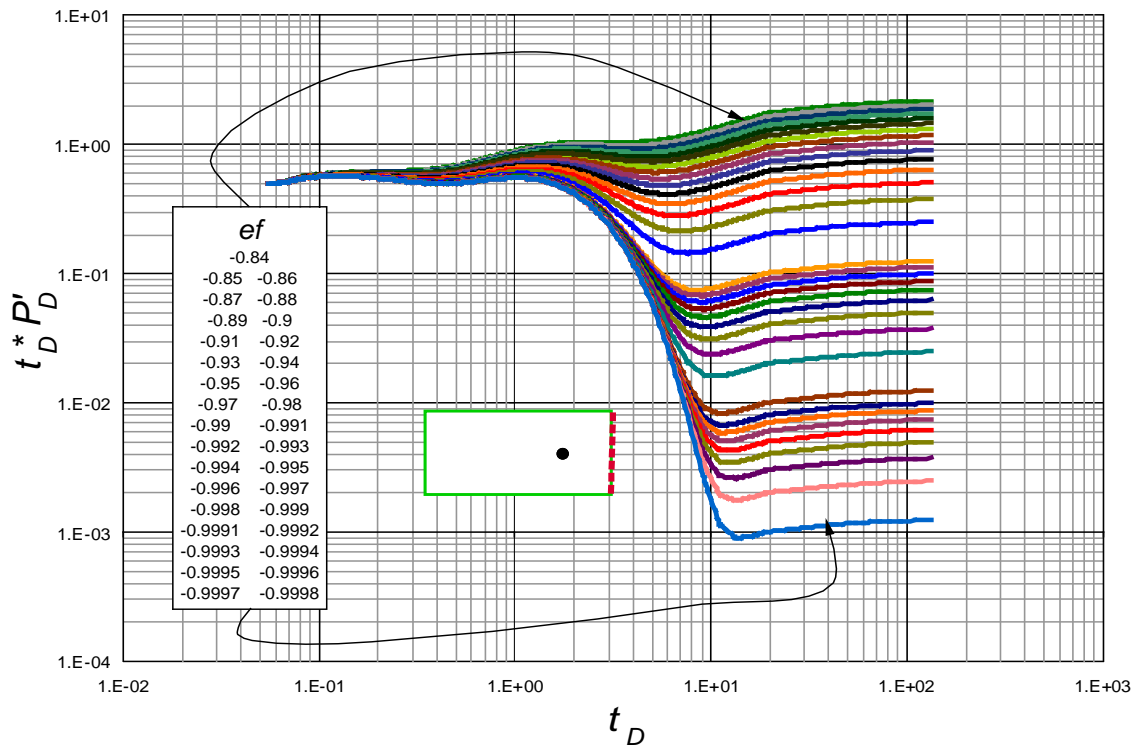
Yacimiento rectangular con pozo descentrado a la derecha.



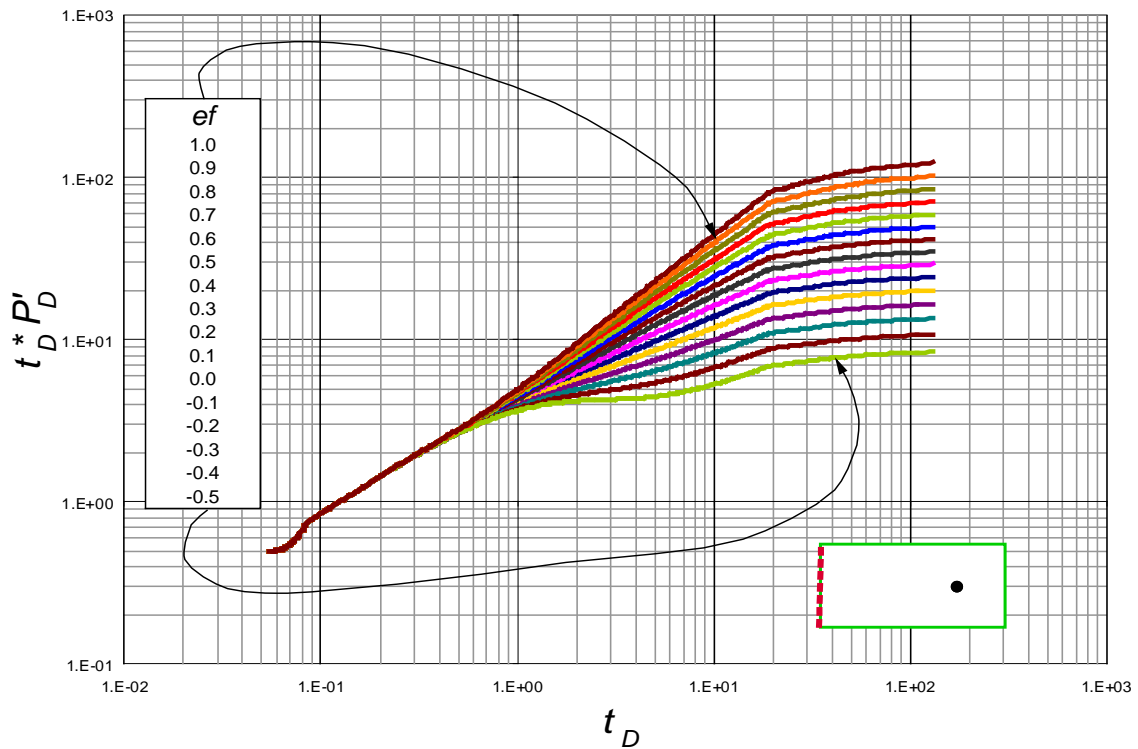
Gráfica A49. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla leaky. Estado pseudoestable.



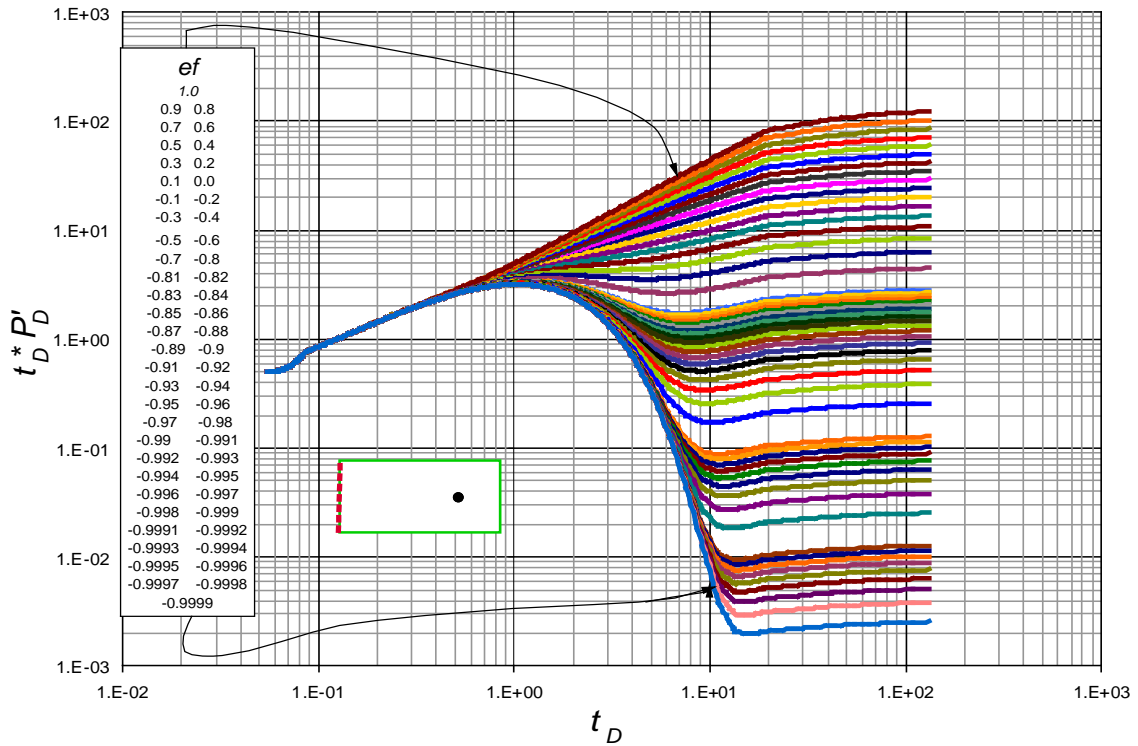
Gráfica A50. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla leaky.



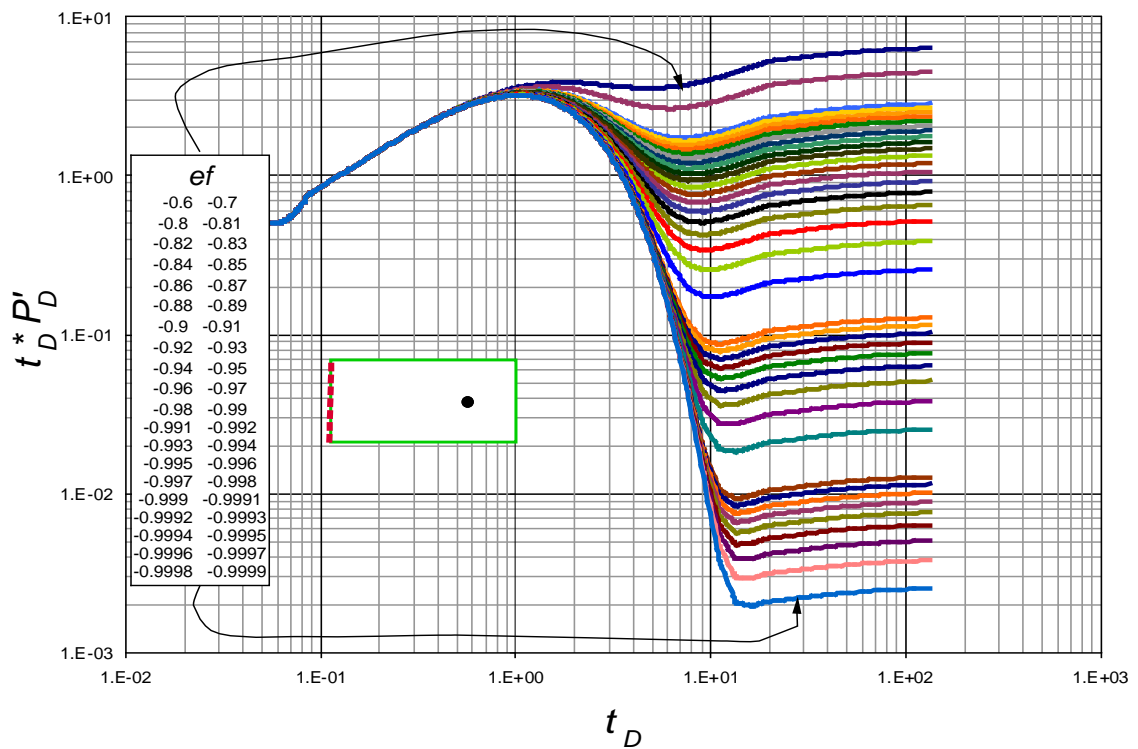
Gráfica A51. Resultado adimensional de $t_D^* P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leary* cercana. Estado estable.



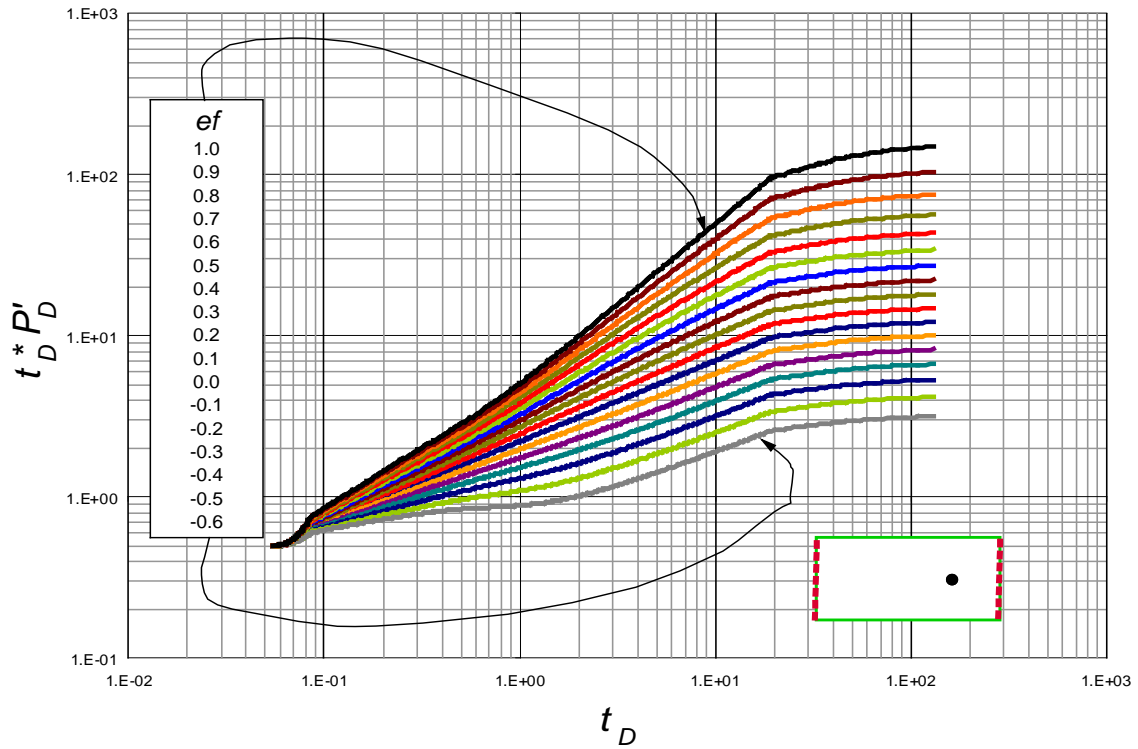
Gráfica A52. Resultado adimensional de $t_D^* P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana. Estado pseudoestable.



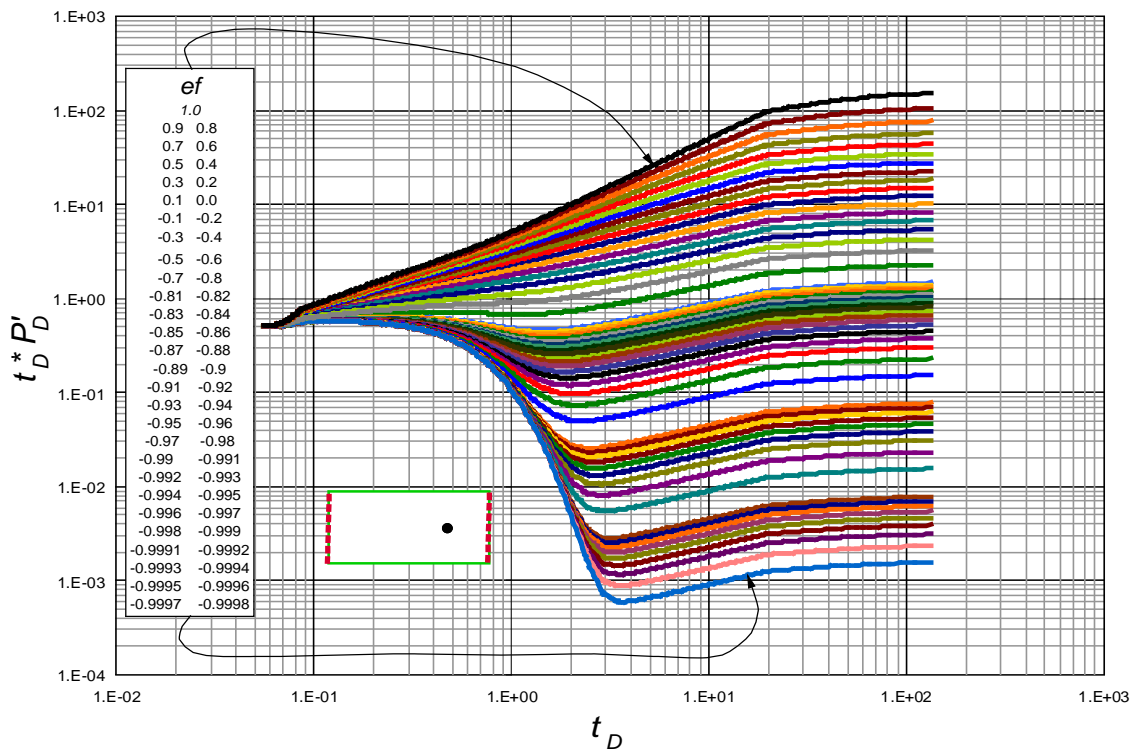
Gráfica A53. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana.



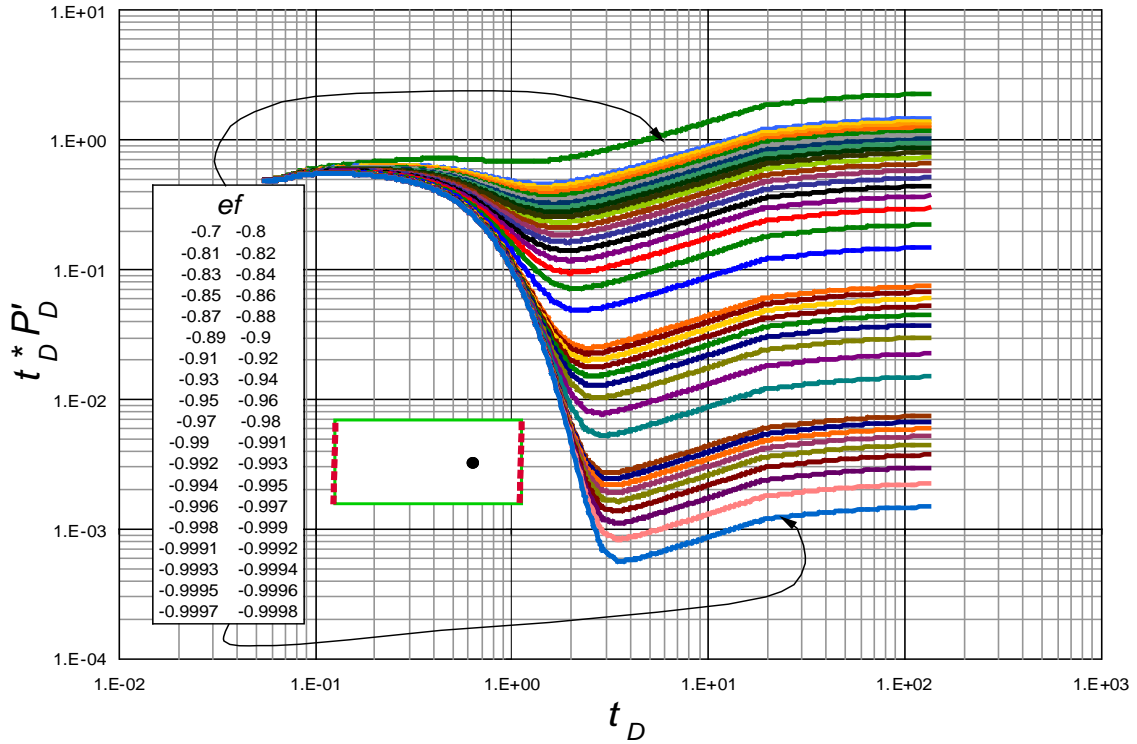
Gráfica A54. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana. Estado estable.



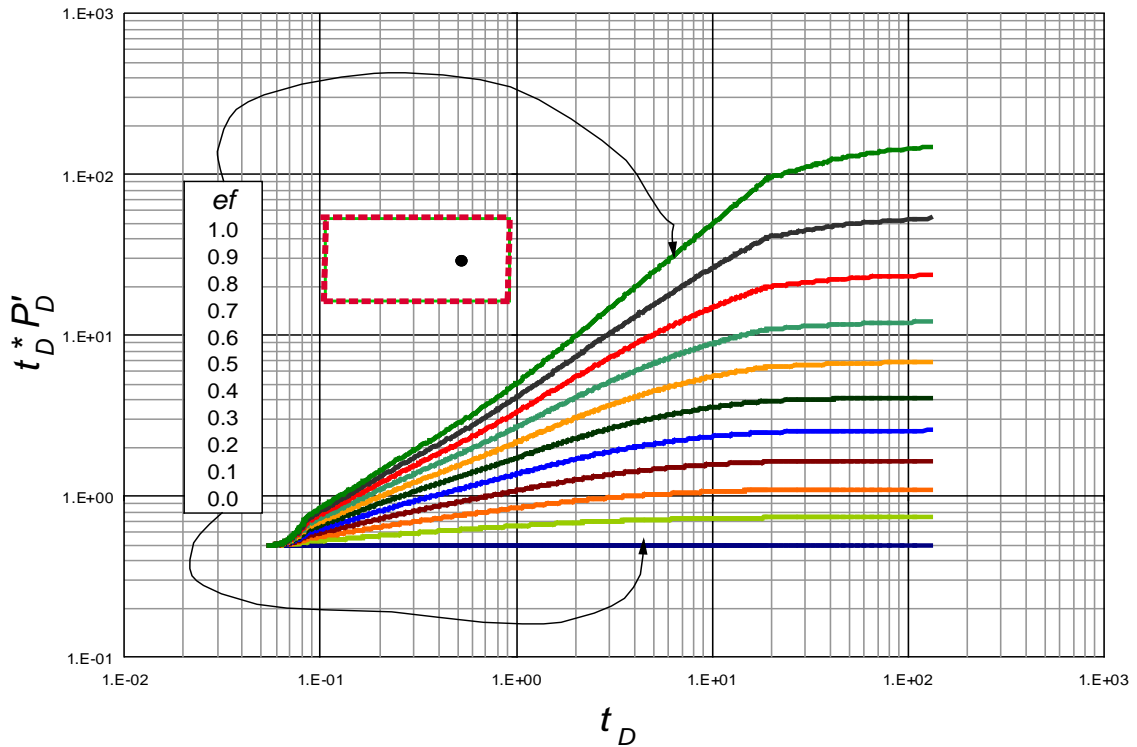
Gráfica A55. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado pseudoestable.



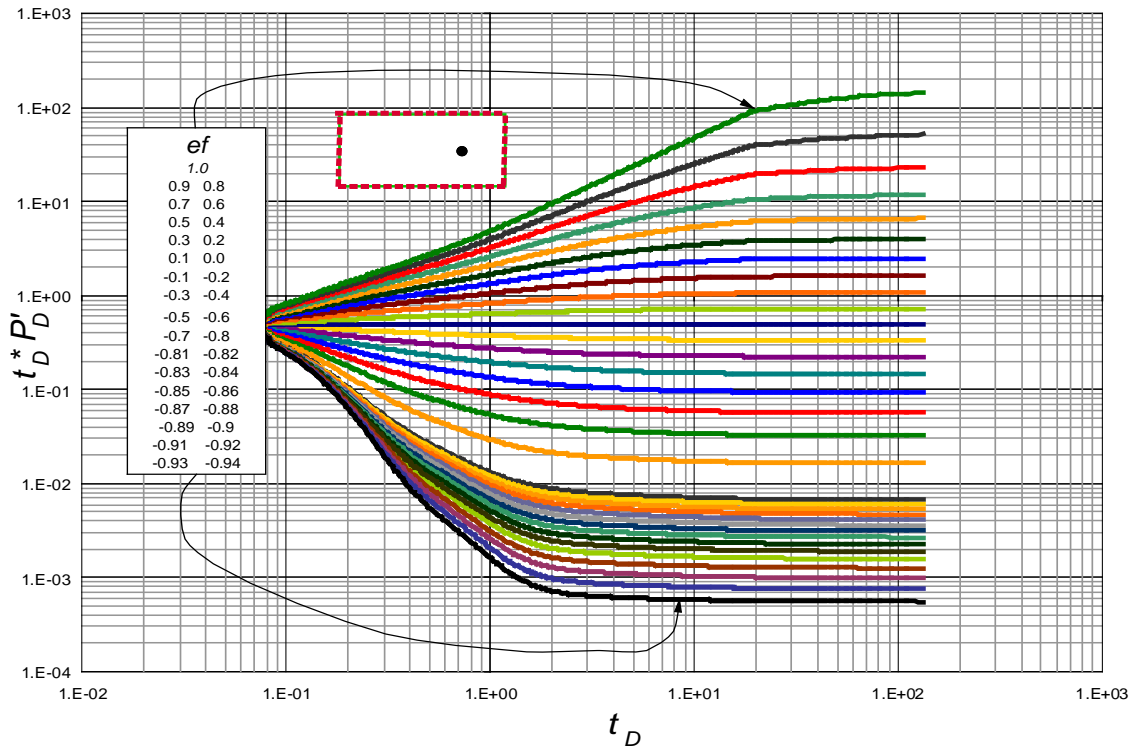
Gráfica A56. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables.



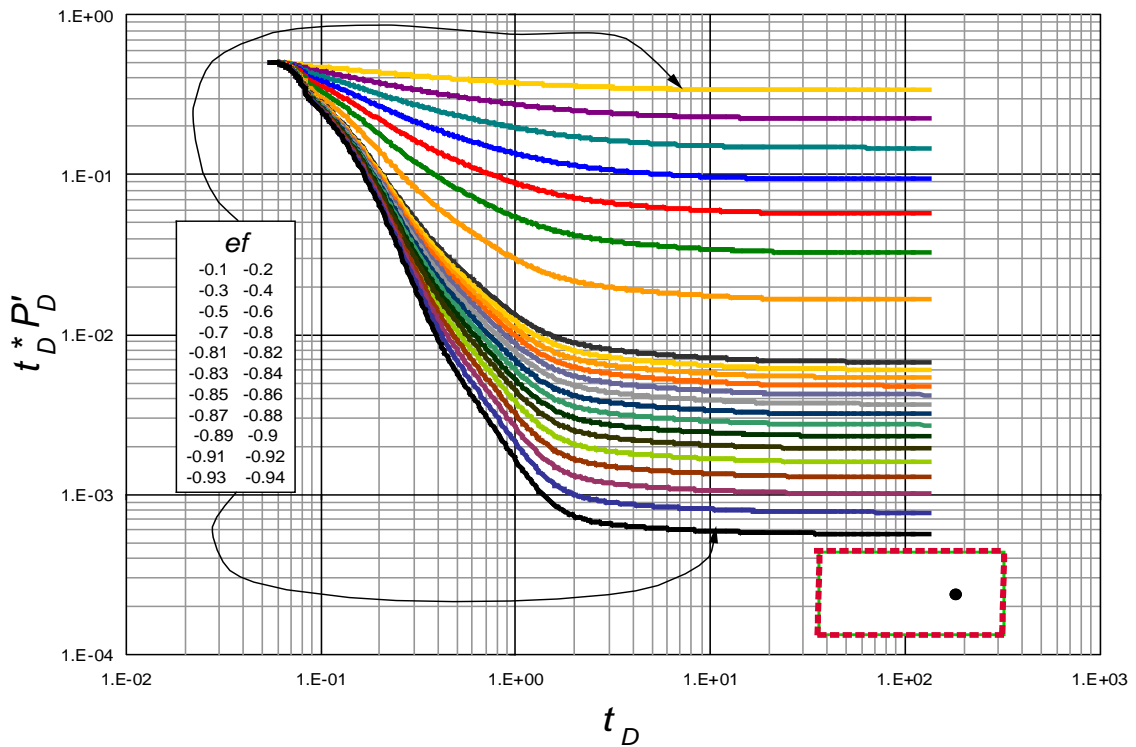
Gráfica A57. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado estable.



Gráfica A58. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado pseudoestable.

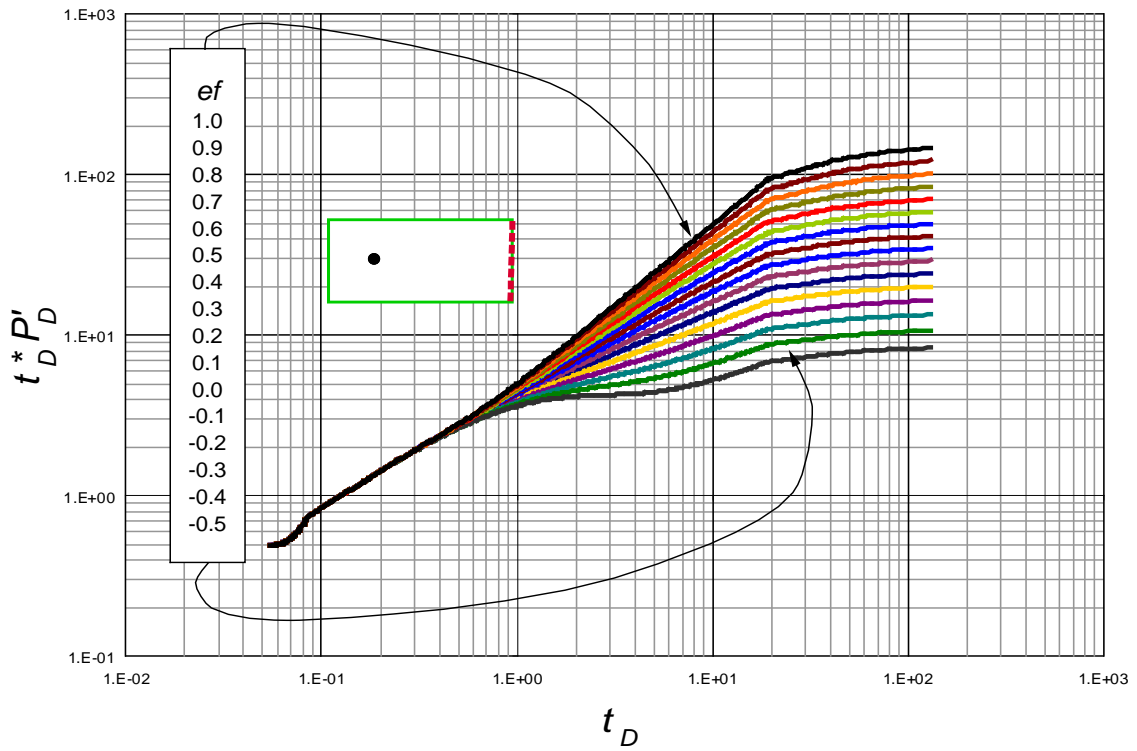


Gráfica A59. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras.

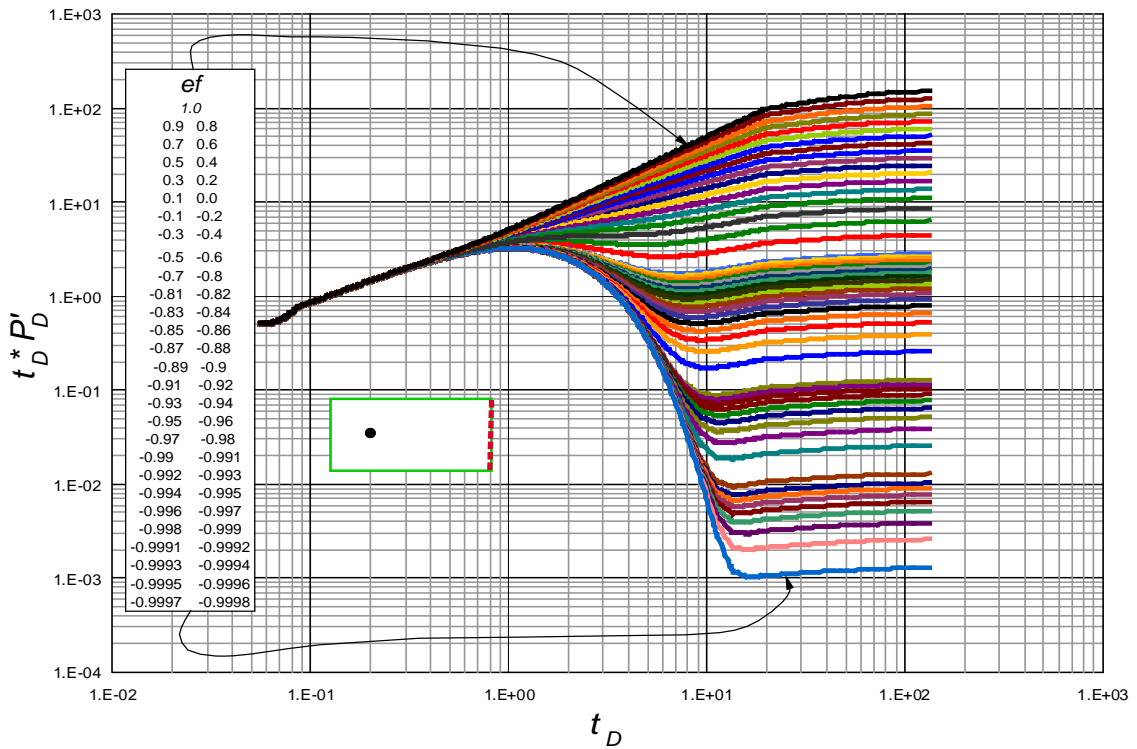


Gráfica A60. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado estable.

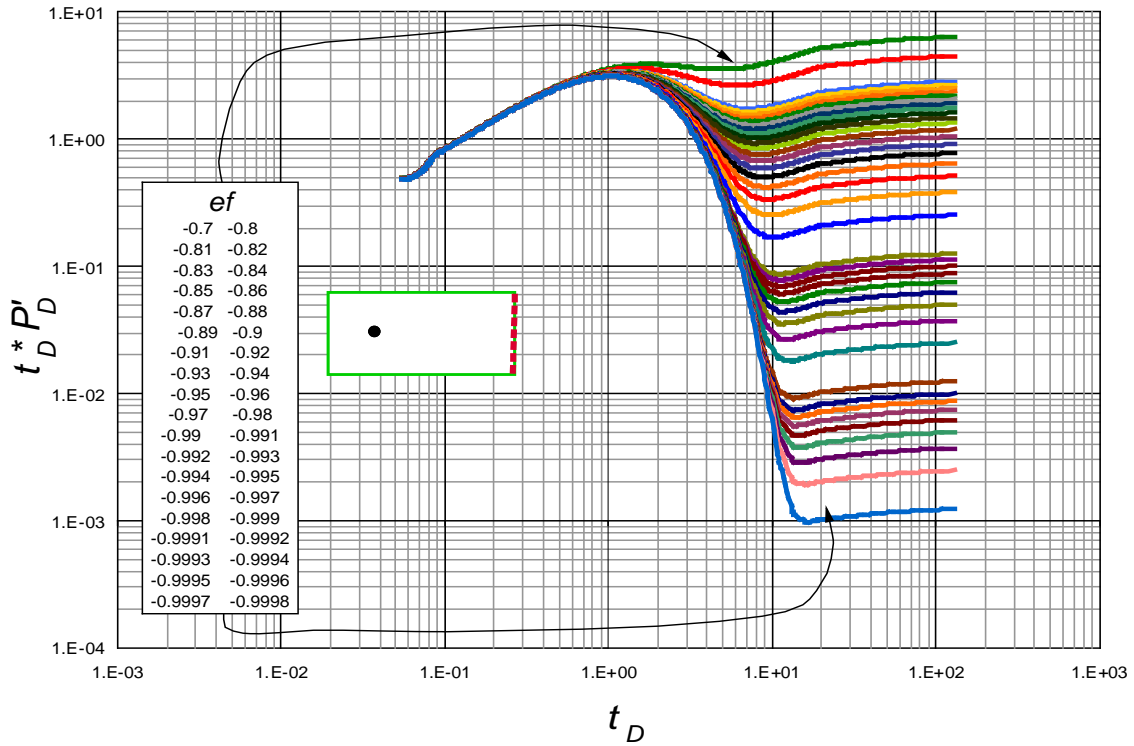
Yacimiento rectangular con pozo descentrado sesgado a la izquierda.



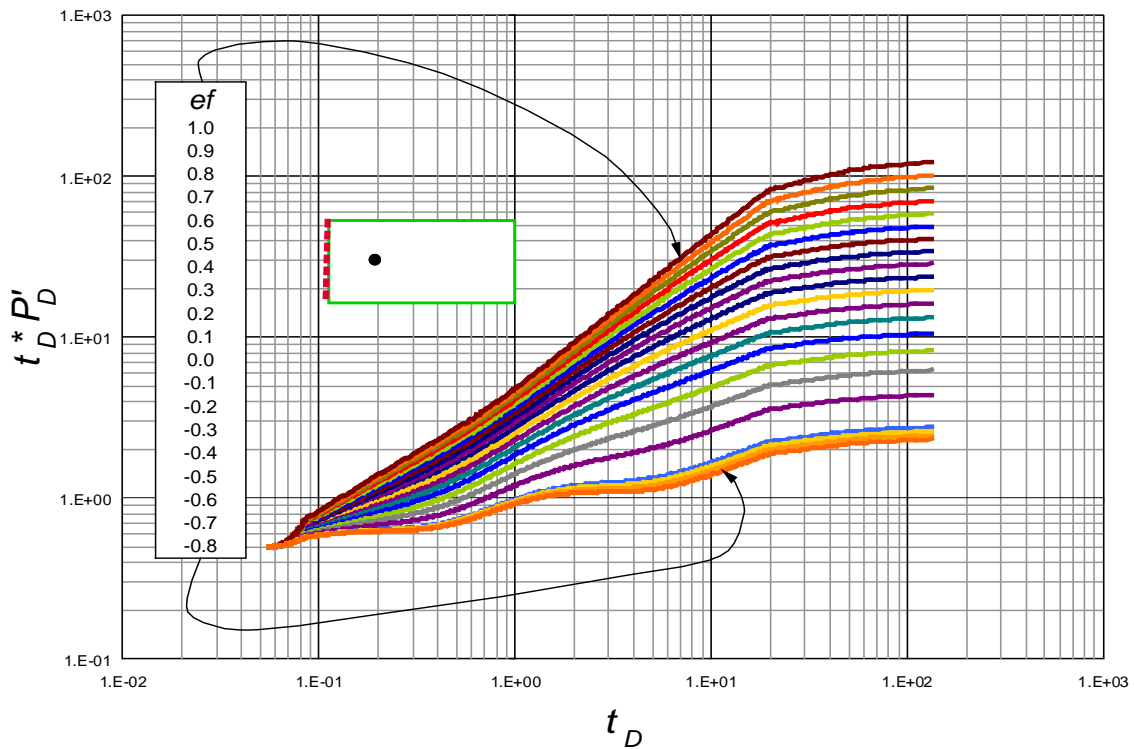
Gráfica A61. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana. Estado pseudoestable.



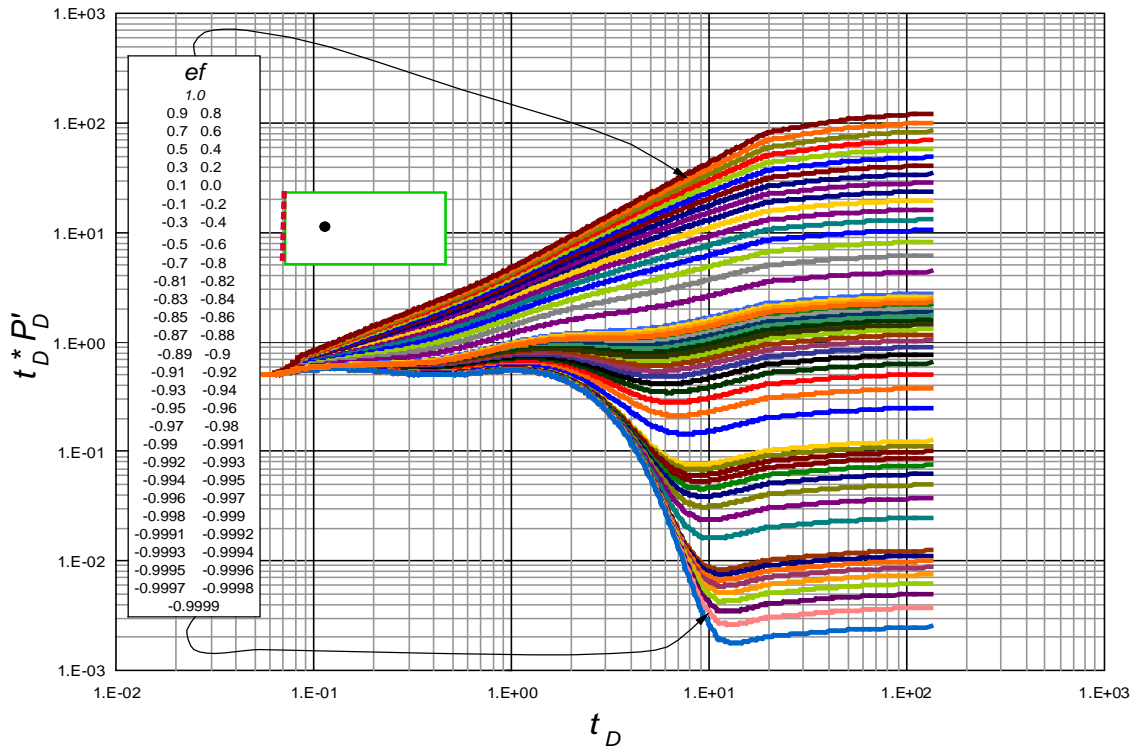
Gráfica A62. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana.



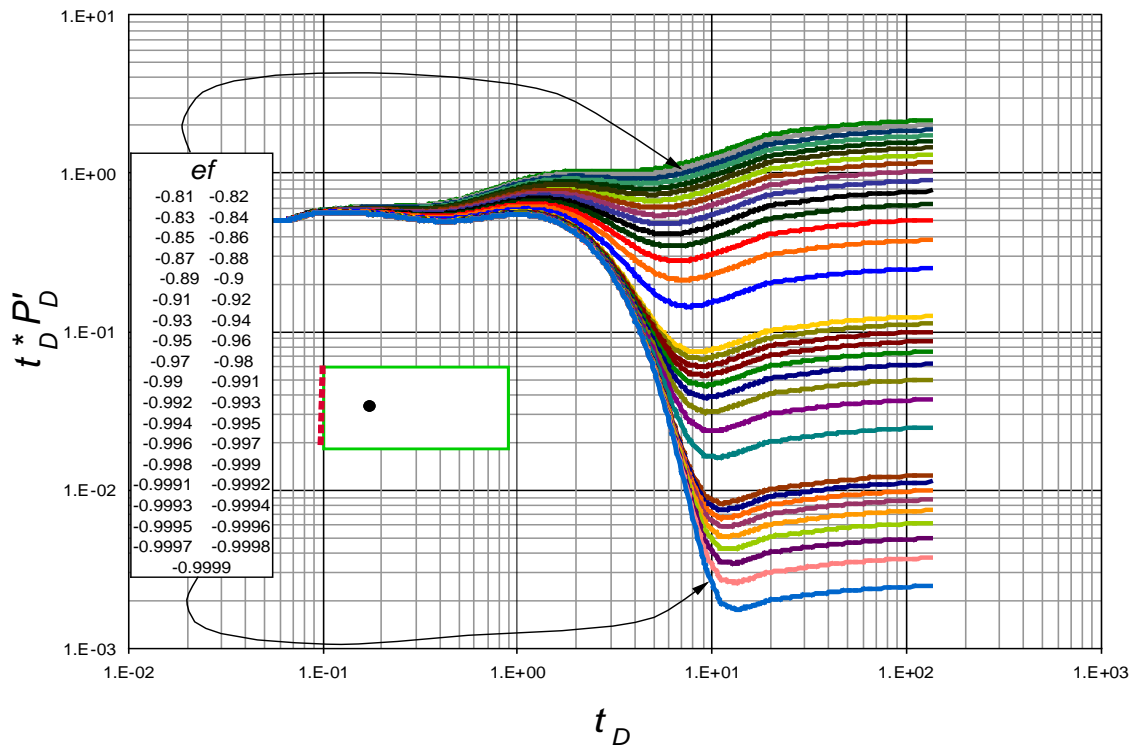
Gráfica A63. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana. Estado pseudoestable.



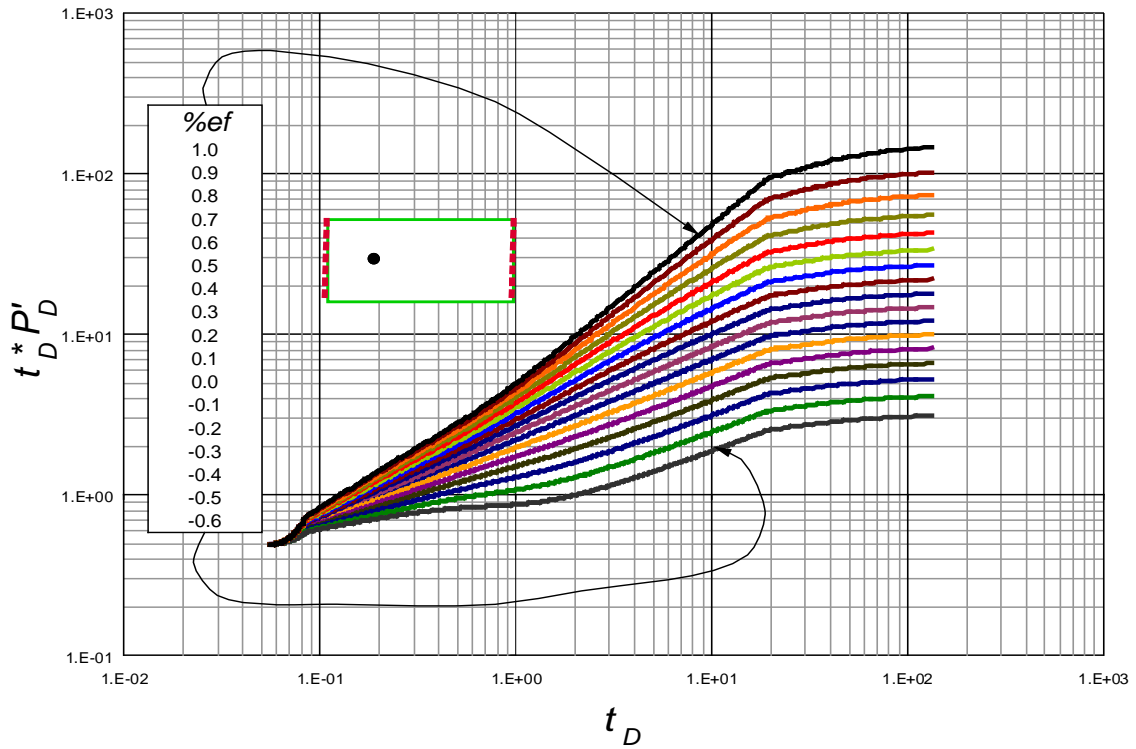
Gráfica A64. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana. Estado pseudoestable.



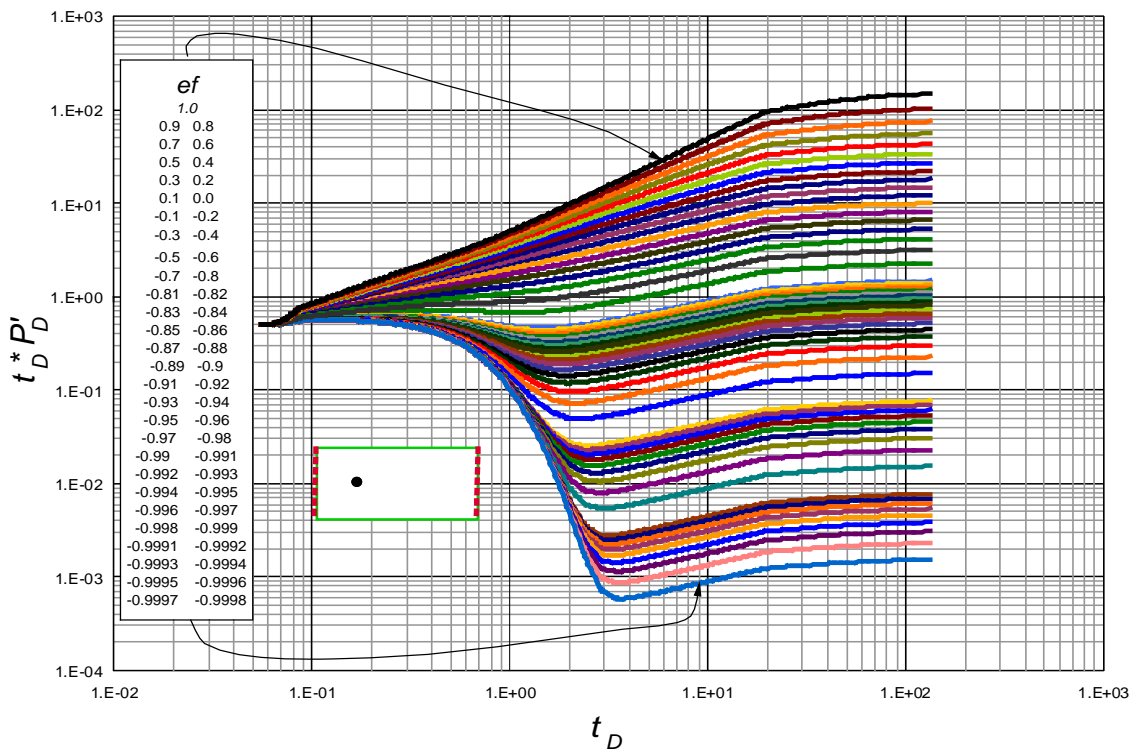
Gráfica A65. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana.



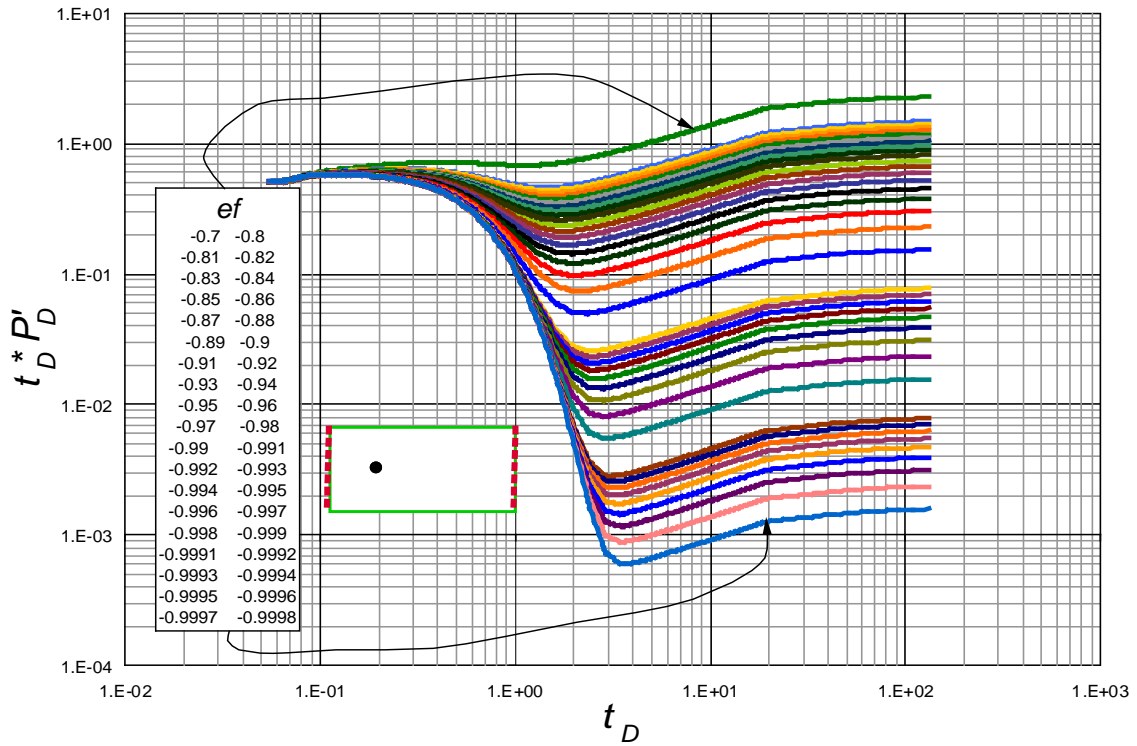
Gráfica A66. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y falla *Leaky* lejana. Estado estable.



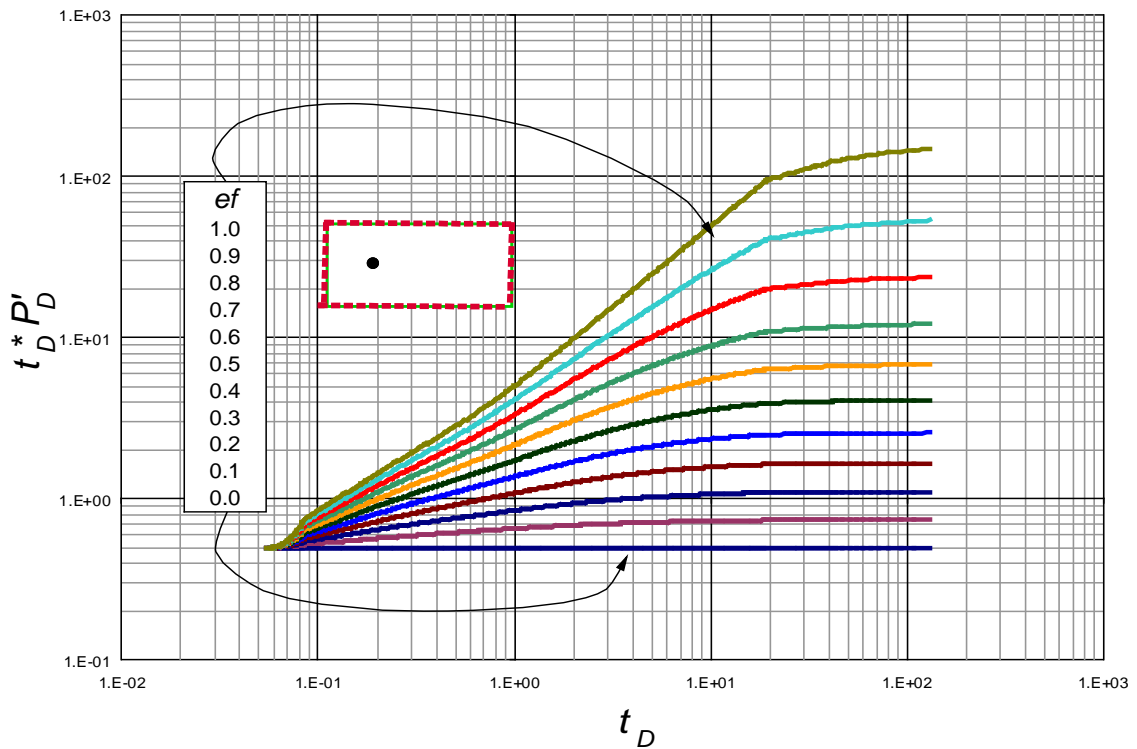
Gráfica A67. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas laterales leaky permeables. Estado pseudoestable.



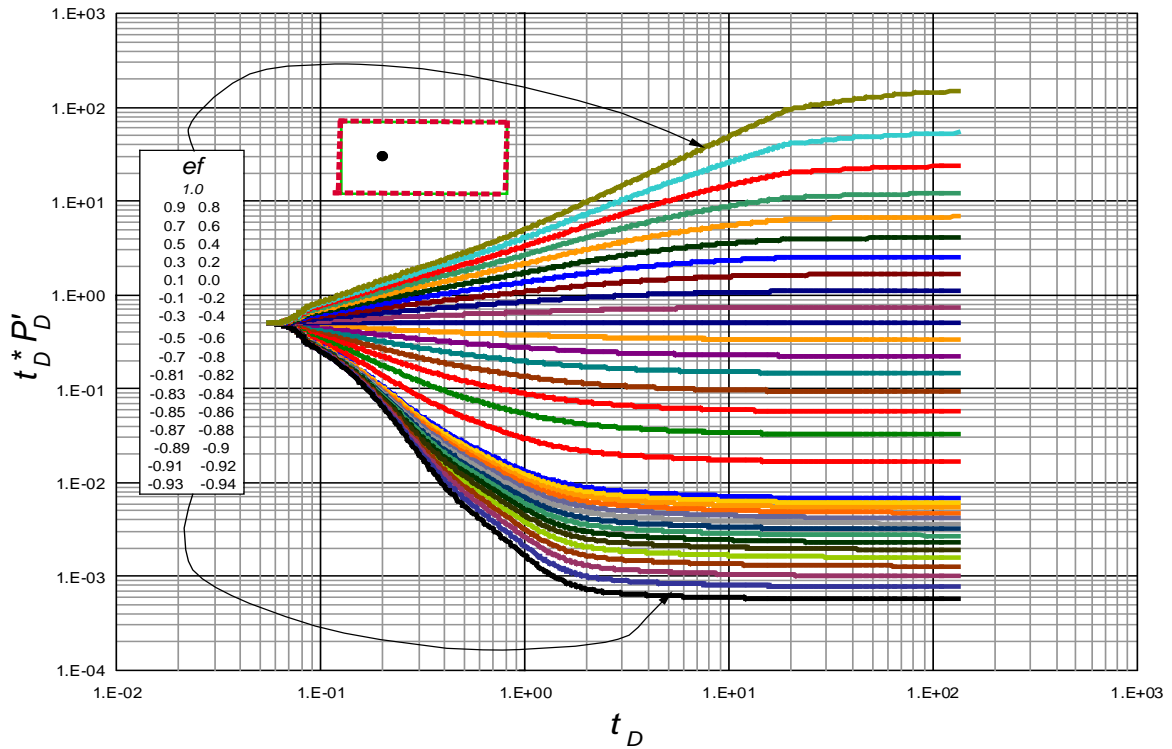
Gráfica A68. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas laterales leaky permeables.



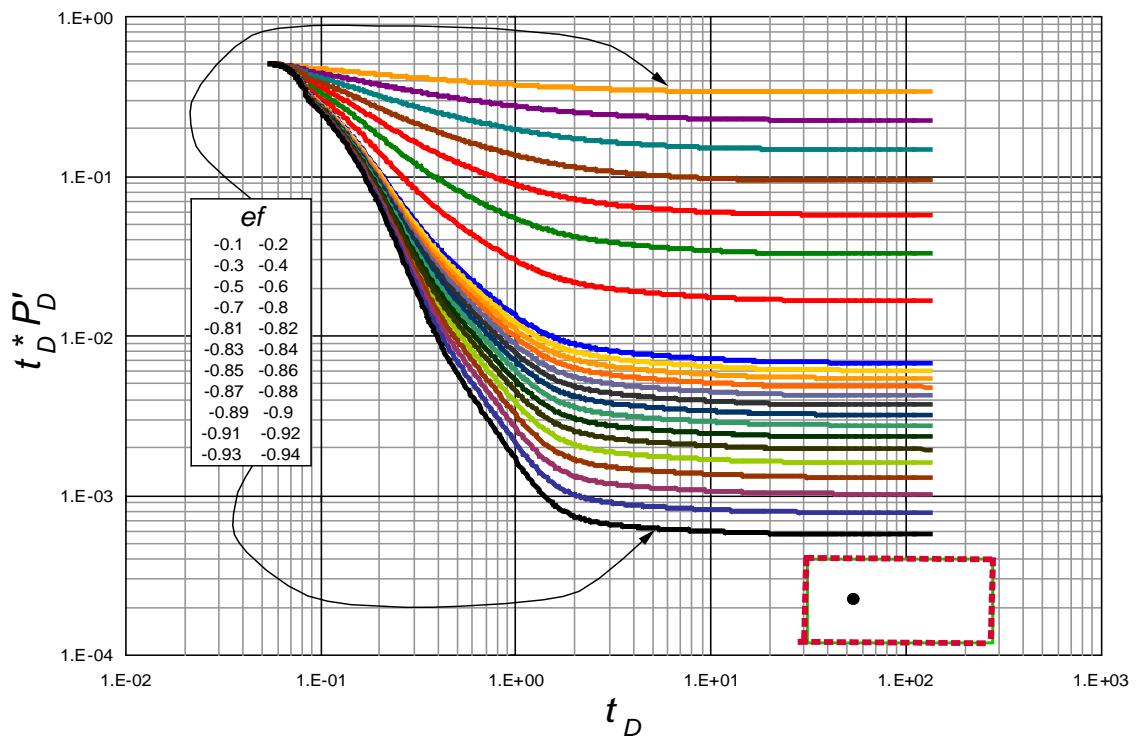
Gráfica A69. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas laterales *leaky* permeables. Estado estable.



Gráfica A70. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas *leaky* permeables en sus fronteras. Estado pseudoestable.



Gráfica A71. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas leaky permeables en sus fronteras.



Gráfica A72. Resultado adimensional de $t_D * P'_D$ y t_D , obtenidos para un yacimiento rectangular con pozo descentrado y fallas leaky permeables en sus fronteras. Estado estable.