



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN AGUA SUBTERRÁNEA

ANÁLISIS SECUENCIAL DE GEOMETRÍAS DE FLUJO EN LA DERIVADA DEL
ABATIMIENTO: UNA METODOLOGÍA ALTERNATIVA PARA EVALUAR PRUEBAS
EN ACUÍFEROS

TESINA
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
ESPECIALISTA EN AGUA SUBTERRÁNEA

PRESENTA:
FELIX EDUARDO ALVAREZ ARZATE

TUTOR PRINCIPAL
DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ-ESPRIÚ
DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA (FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. SEPTIEMBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

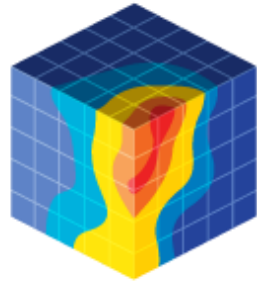


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



The
HYDRO
geology
Group
FACULTY OF ENGINEERING
UNAM



CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Esta tesina representa un aporte del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación cuantitativa de acuíferos.

www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology

Twitter: @hydrogeologymx

Resumen

Las pruebas de bombeo representan una de las herramientas hidrogeológicas más robustas para la caracterización del funcionamiento de un acuífero, por lo que su correcta interpretación es fundamental para la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero. El análisis de los registros de las pruebas de bombeo implica el ajuste de modelos matemáticos para condiciones idealizadas de un acuífero para tratar de inferir cuál de estos modelos es el más adecuado para representar el abatimiento a lo largo del tiempo, no obstante, el uso de gráficos de diagnóstico y el análisis de la derivada del abatimiento pueden simplificar este proceso.

Para este estudio se consideraron 15 pruebas de bombeo que fueron recopiladas en una base de datos, y posteriormente acondicionadas para su interpretación mediante el análisis de dimensiones de flujo, lo que permitió asociar regímenes de flujo a segmentos de la curva de la derivada del abatimiento. Este enfoque permitió caracterizar las unidades acuíferas de manera cualitativa y se obtuvieron parámetros no convencionales como son el ancho del acuífero canal y el factor de daño en pozo mediante el uso del programa *AquiDPlot Suite* ®. Adicionalmente se realizó la interpretación de las pruebas de bombeo mediante Cooper Jacob y con el programa *AQTESOLV* ®. Se analizaron, compararon y discutieron los resultados obtenidos mediante cada enfoque para obtener una interpretación integral con información cualitativa y cuantitativa del acuífero correspondiente a cada prueba de bombeo. La interpretación mediante geometrías de flujo permitió identificar heterogeneidades en el sistema acuífero, por lo que fue posible estimar valores de transmisividad hidráulica diferentes para cada porción del gráfico diagnóstico que presentara una geometría de flujo radial infinita. También fue posible asociar y corroborar, mediante la secuencia de geometrías de flujo, la geología del acuífero con base en un catálogo de modelos conceptuales creado por Ferroud (2018). Sin embargo, se presentaron casos en los que no fue posible identificar geometrías de flujo para su interpretación.

La aplicación de curvas diagnóstico y el análisis de geometrías de flujo mostró ser una herramienta que simplifica el proceso de interpretación de pruebas de bombeo y la aplicación de modelos matemáticos para obtener parámetros hidráulicos del acuífero.

Abstract

Pumping tests represent one of the most robust hydrogeological tools for characterizing the operation of an aquifer, so their correct interpretation is fundamental for determining the aquifer's hydraulic parameters. The analysis of pumping test records involves adjusting mathematical models for idealized conditions of an aquifer to try to infer which of these models is most suitable to represent drawdown over time. However, the use of diagnostic graphs and the analysis of drawdown derivative can simplify this process.

For this study, 15 pumping tests were considered, which were compiled in a database and subsequently conditioned for interpretation through flow dimension analysis. This allowed associating flow regimes with segments of the drawdown derivative curve. This approach allowed characterizing aquifer units qualitatively and obtaining unconventional parameters such as the width of the channel aquifer and the well damage factor using the AquidPlot Suite® program. Additionally, pumping tests were interpreted using Cooper Jacob and with the AQTESOLV® software. The results obtained through each approach were analyzed, compared, and discussed to obtain a comprehensive interpretation with qualitative and quantitative information from the aquifer corresponding to each pumping test. The interpretation through flow geometries allowed identifying heterogeneities in the aquifer system, so it was possible to estimate different hydraulic transmissivity values for each portion of the diagnostic graph that presented an infinite radial flow geometry. It was also possible to associate and corroborate, through the sequence of flow geometries, the geology of the aquifer based on a catalog of conceptual models created by Ferroud (2018). However, there were cases where it was not possible to identify flow geometries for interpretation.

The application of diagnostic curves and flow geometry analysis proved to be a tool that simplifies the process of interpreting pumping tests and applying mathematical models to obtain aquifer hydraulic parameters.

INDICE

1. Introducción	6
2. Datos y métodos	8
3. Resultados y discusión	10
3.1 Borden Base, Ontario, Canadá	10
3.2 Pozos y Acuíferos	20
3.3 Gridley, Illinois, EUA	26
3.4 CapeCod, Massachusetts, EUA	29
3.5 Tecámac, México	33
3.6 Buenavista, Tlaxcala	37
3.7 Celaya, Guanajuato	40
3.8 León, Guanajuato	43
3.9 Aguascalientes	47
3.10 Applied Hydrogeology p.172	49
3.11 Acuífero Spiritwood, Dakota del Norte, EUA	52
3.12 Lynden, EUA	57
4. Conclusiones y recomendaciones	61
5. Referencias citadas	63

1. Introducción

Los recursos de agua subterránea están sujetos actualmente a una presión creciente debido principalmente al incremento de la población, al desarrollo industrial y al cambio climático. El decremento en cantidad y calidad de agua se está volviendo un problema a nivel global (Behmel et al., 2016). Las herramientas de la investigación en agua subterránea han permitido en las últimas décadas proveer rutinas de evaluación más precisas de las propiedades hidráulicas de los acuíferos, lo cual requiere de un entendimiento de su naturaleza compleja. Se requiere, por lo tanto, de más investigación hidrogeológica para desarrollar herramientas de modelado de acuíferos que tomen en cuenta las condiciones de flujo heterogéneas.

Una forma robusta de evaluar las propiedades hidráulicas de los acuíferos es mediante la interpretación de pruebas de bombeo a caudal constante ajustando curvas-tipo teóricas obtenidas a partir de modelos derivados del modelo de Theis, asumiendo de esta manera la homogeneidad del acuífero y el flujo radial infinito (IARF, por sus siglas en inglés Infinite Acting Radial Flow). Este procedimiento de ajuste requiere que se asuma de manera implícita que el régimen de flujo es cilíndrico radial. La aplicación del método de Theis para todo tipo de flujos podría conllevar a un grado significativo de error (con sobrestimaciones de hasta 89% y subestimaciones de hasta el 100 % (Ferroud et al., 2018)) y a un entendimiento erróneo del comportamiento hidrodinámico del acuífero.

En 1989, en la literatura petrolera, se propone que además de graficar los datos de presión, se debería también graficar la señal de la derivada de la presión $dp/d\log t$ (Bourdet et al., 1989). Esta técnica es fácilmente implementada en hidrogeología en la forma de una derivada logarítmica de abatimiento $ds/d\log t$ (Renard et al., 2009). El enfoque derivativo permite resaltar las variaciones de la señal de abatimiento durante una prueba de bombeo. Los gráficos diagnósticos representan las gráficas combinadas del abatimiento s y de $ds/d\log t$ contra el tiempo, y de esta manera son utilizados en particular para mejorar la interpretación de pruebas de bombeo a caudal constante.

Se pueden emplear dos métodos diferentes para interpretar esta señal derivativa: mediante ajuste de curvas tipo sobre la señal entera, o descomponiendo la señal en líneas rectas. Para el primer método, se selecciona un modelo de flujo analítico y se ajusta su curva teórica a los datos de la derivada. El ajuste es generalmente utilizado usando códigos automáticos de mejor ajuste (Kuusela-Lahtinen et al., 2003; Leveinen et al., 1998).

El análisis secuencial de geometrías de flujo consiste en identificar, en un gráfico logarítmico, segmentos de la curva derivada donde esta se comporte como una línea recta estable, para así obtener su pendiente y calcular un valor de dimensión de flujo (n), valor que está asociado directamente con un régimen de flujo específico que involucra condiciones hidrodinámicas estables en una ventana de espacio y tiempo, en

el entendido de que la geometría del área del frente de pulso (que asocia de acuerdo al valor n) conforme avanza se mantiene constante. Algunos ejemplos de geometrías de flujo son: cuando se tiene un valor de $n=1$ se asocia a una geometría lineal, y la propagación del frente de pulso es a lo largo de una sola dimensión (canales, fracturas); la dimensión $n=2$ indica que el área de propagación del frente crece conforme incrementa la distancia radial. Esta suposición es hecha en la solución de Theis considerando un régimen radial cilíndrico infinito; si se tiene $n=3$ el área transversal de flujo tiene forma de esfera con $A = 4\pi r^2$.

La dimensión de flujo con un valor de $n=2$, identifica la ocurrencia de un régimen de flujo radial-cilíndrico durante la prueba de bombeo, asociado con una pendiente cero de $ds/d\log t$ cuando es graficada en un eje bilogarítmico. Las dimensiones de flujo que no son cilíndrico -radiales son fácilmente identificables cuando la curva derivada exhibe una línea recta ascendente (pendiente positiva) para $n < 2$, y una línea recta descendente (pendiente negativa) para $n > 2$. La interpretación de pruebas de bombeo que supone flujo cilíndrico radial es así, efectuada más precisa y rápidamente, detectando fácilmente dónde las suposiciones derivadas de Theis son adecuadas. Identificar las geometrías de flujo reales puede reducir la incertidumbre en la determinación de propiedades hidráulicas.

Se tiene entonces que el enfoque derivativo mejora significativamente el método de interpretación de la prueba transitoria ya que hace posible investigar los regímenes de flujo detectados por la prueba, en lugar de asumirlos. A pesar de su potencial diagnóstico para interpretar pruebas de pozo transitorias, el parámetro n es raramente utilizado, debido a la dificultad para relacionar los valores de dimensión de flujo con condiciones conceptuales de acuíferos tales como patrones de flujo y configuraciones geológicas.

Se han logrado avances en el entendimiento conceptual de n a través de diversos estudios de modelado numérico. Estos estudios se concentran en la influencia ejercida por varias configuraciones o mecanismos en la señal $ds/d\log t$. Algunos de ellos se han enfocado en: la geometría de las fronteras (Beauheim et al., 2004; Escobar & Montealegre M, 2007; Walker & Roberts, 2003), los efectos de pozo (Escobar et al., 2012), las propiedades de rocas fracturadas (Cello et al., 2009) y las propiedades de fallas (Rafini & Larocque, 2012). Estos estudios contribuyen a la evolución de la conceptualización física de los regímenes de flujo, proponiendo modelos conceptuales específicos para interpretar las geometrías de flujo, la configuración de propiedades hidráulicas y condiciones de frontera de una secuencia de regímenes de flujo específica.

Ferroud et al. (2018) demostró que los comportamientos de flujo no radiales son generalmente predominantes en respuestas de acuíferos naturales. Ellos observaron que interpretaciones comunes de abatimientos no son capaces de representar con exactitud la transición de geometrías de flujo que ocurre en los acuíferos, así también como que

los modelos no radiales permanecen raramente usados y aún son insuficientes para explicar comportamientos de flujo fraccional. Estos hechos nos dicen que se ha de poner un foco de atención mayor en este tipo de análisis ya que tiene mucho por ofrecer, tanto en la aplicación, como en la investigación.

Este trabajo pretende emplear una metodología de interpretación de pruebas de bombeo que además de utilizar las técnicas convencionales como la determinación de parámetros mediante Cooper Jacob -que consiste en el cálculo de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento, mediante el trazado de una línea recta que se ajuste a los datos de abatimiento en un gráfico semilogarítmico- y la determinación del tipo de acuífero solo mediante la visualización de los gráficos del abatimiento, también emplee el uso de curvas tipo como elemento auxiliar al cálculo de parámetros hidráulicos y a la conceptualización de acuíferos, lo que conllevaría a una integración más robusta. Además, se efectúa un análisis secuencial de las geometrías de flujo de la curva $ds/dlogt$ en cada prueba, con el fin de identificar regímenes de flujo que aporten información paramétrica y no paramétrica muy valiosa sobre el comportamiento y estructura del acuífero, particularmente en lo que se refiere a identificar heterogeneidades y estructuras tales como fallas o fracturas

2. Datos y métodos

Para la realización de este trabajo se recopilaron pruebas de bombeo de diversos estudios, artículos y reportes de una base de datos del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Del documento de interés se identificaron los gráficos de las pruebas de bombeo para posteriormente digitalizarlas. Asimismo, se identificó la información más relevante sobre la geología del sitio ya sea mediante cortes litológicos o mediante la descripción de secuencias estratigráficas y estructurales y el diseño de pozo, que resulta necesaria para la interpretación de las pruebas. En la mayoría de los casos fue necesario complementar la información geológica e hidrogeológica del área de estudio en cuestión, con otras fuentes. La digitalización de las pruebas de bombeo fue llevada a cabo mediante el uso del software libre “WebPlotDigitizer” (Rohatgi, 2014). La interpretación de las pruebas de bombeo se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se realizó una interpretación de manera convencional para cada una de las pruebas, mediante Cooper Jacob (Cooper & Jacob, 1946). Se obtuvieron y reportaron parámetros hidráulicos mediante este enfoque tales como la transmisividad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento (en el caso de la existencia de pozos de observación). Asimismo, se reportó otro valor de transmisividad hidráulica, este obtenido mediante el promedio de la derivada logarítmica, que fue calculada a partir de los datos digitalizados de las pruebas. Se verifica la validez de estos datos mediante el valor de la función de pozo ($W(u)$) de Cooper Jacob, y mediante el valor del coeficiente de determinación

asociado al ajuste de la recta en el gráfico semilogarítmico del tiempo contra el abatimiento.

- Se exportaron los datos digitalizados de las pruebas al software AQTESOLV® (Duffield, 2007a), en donde se procedió a realizar un ajuste de la prueba de bombeo con una curva tipo, también llamadas soluciones analíticas. Para este procedimiento fue necesario contar con un antecedente sólido y lo más claro posible de la geología del sitio. Se eligió una curva tipo acorde al tipo de acuífero reportado. Se introdujo la curva derivada para realizar el ajuste de la solución analítica con ambas curvas, aplicando el algoritmo de diferenciación L de Bourdet (1989) para el suavizado de la curva. Este paso fue un filtro en donde se descartaron pruebas con curvas derivada extremadamente ruidosas, debido a que sería imposible la identificación de las geometrías de flujo. En algunos casos se agregaron efectos de frontera de carga constante, reportados por los autores de las pruebas o la geología del sitio, para obtener un mejor ajuste. Se obtuvieron y reportaron los parámetros hidráulicos principales, a decir, transmisividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica.
- Los datos de las pruebas fueron exportados al software libre AquidPlot Suite 1.0® (Hernández-Espriú et al., 2018). En donde se realizó el análisis de geometrías de flujo mediante el suavizado de la curva derivada y el estudio de su pendiente, ya que el software permite calcular parámetros hidráulicos convencionales con base en una geometría de flujo específica. La dimensión de flujo n es un parámetro propuesto por Barker (1988). Este expresa la evolución de la forma del pulso de frente de presión conforme este se difusa a través del acuífero durante la etapa transitoria de bombeo. Representa el área A , formada por la despresurización del frente de pulso (área de flujo transversal), que se manifiesta a través de la siguiente relación por ley de potencia $A(r) \sim r^{(n-1)}$. Donde r es la distancia radial desde el pozo de observación. Asimismo, se tiene la siguiente relación entre la dimensión de flujo y la pendiente de la curva derivada $n = 2(1 - p)$ donde p representa la pendiente de la curva derivada. Se analizó cada prueba, segmento por segmento, para identificar aquellas geometrías de flujo asociables a un régimen de flujo específico y de esta manera reportar un gráfico que exhibe todas las geometrías de flujo presentes en una prueba. Se obtuvieron los parámetros no convencionales que el software permitiera adquirir dependiendo de la geometría de flujo, y se obtuvieron parámetros hidráulicos convencionales mediante Cooper Jacob en diferentes porciones de los resultados graficados de una prueba de bombeo, en donde se identificó la presencia de varios regímenes de flujo radial infinito.

Los resultados se estudiaron, se analizaron y se compararon entre sí y con los reportados por el autor. Asimismo, se buscó hacer hincapié en las características cualitativas que la identificación de geometrías de flujo pudiera significar.

3. Resultados y Discusión

3.1 Pruebas de bombeo P-14, P-15, P-1, Borden Base, Ontario, Canadá (Bevan et al., 2005).

Se realizó una prueba de bombeo con una duración de 7 días. La prueba fue efectuada por Bevan et al. (2005) a un caudal constante de descarga de $57.6 \text{ m}^3/\text{día}$ ($40 \pm 1 \text{ L/min}$). El caudal de extracción fue verificado en intervalos regulares determinando el tiempo necesario para llenar un contenedor de volumen conocido con agua bombeada del pozo. Para obtener datos detallados del tiempo de abatimiento, los niveles de carga hidráulica fueron medidos en 11 pozos de observación usando transductores de presión y un sistema de registro de datos, resultando abatimientos del nivel de agua con una precisión de 0.007 m. El pozo de bombeo del sitio tiene un diámetro interno de 0.13 m con una ranura telescópica de acero inoxidable sobre los 3.65 m inferiores del acuífero. Los pozos de observación a considerar son el P-14, el P-15 y el P-1 que se encuentran a 1.5, 3 y 5 metros respectivamente, del pozo de bombeo en dirección sur (Bevan et al., 2005).

El sitio de estudio es la Base Borden de las Fuerzas Canadienses, cerca de Barrie, Ontario. Este sitio ha sido objeto de estudios anteriores. Se reportó un acuífero libre compuesto principalmente por arenas de grano medio de origen glacio-deltaico o glaciofluvial. Puede ser localmente heterogéneo debido a lentes y capas de arenas de grano fino, medio y grueso (MacFarlane et al., 1983). El acuífero tiene un espesor aproximado de 9 m, siendo mayor su espesor en la parte sur y se va reduciendo conforme se avanza hacia el norte. El acuífero se encuentra sobre un acuitardo de limo arcilloso (Figura 1). Cuando la prueba se realizó la profundidad del nivel freático fue de 2.75 m, dando como resultado un espesor saturado de 6.25 m

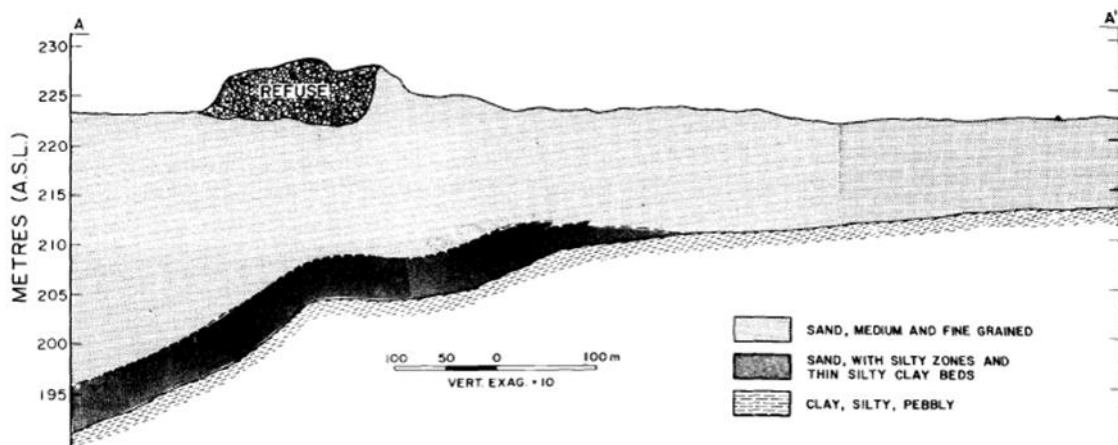


Figura 1. Sección geológica a lo largo de la dirección principal del flujo de agua subterránea (S-N).
Tomado de MacFarlane et al. (1983).

En la Tabla 1 se muestran los parámetros considerados para la configuración en AQTESOLV.

Pozo	d (m)	L (m)	r (c)	r (eq)	R (m)	Q (m ³ /día)
Bombeo	2.6	3.65	0.065	0.065	0.065	57.6
P-14	4.5	0.35	0.065	0.065	1.5	-
P-15	4.5	0.35	0.065	0.065	3	-
P-1	4.35	0.35	0.065	0.065	5	-

Tabla 1. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio de Borden, Canadá. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (m³/día) es el caudal de extracción.

Prueba P-14

La figura 2 muestra el gráfico semilogarítmico de la prueba P-14, ubicada a 1.5 m del pozo de bombeo. La prueba presenta una respuesta que parece ser una curva típica de tres etapas para acuíferos libres (Neuman, 1972). Se tiene también una disminución de la tasa del abatimiento a partir de los 5800 min aproximadamente (en la última parte de la etapa final), indicando la posible interacción con una frontera de recarga constante distante (Bevan et al., 2005). Se aplicó Cooper Jacob (Cooper & Jacob, 1946) en la porción naranja del gráfico. Se obtuvieron valores de 81 m²/día para la transmisividad, de 8 m/día para la conductividad hidráulica y un valor de 2.6E-03 para el coeficiente de almacenamiento. El valor calculado de u fue de 1E-04 y es válido para la aplicación de Cooper Jacob. El valor del coeficiente de Pearson es de 0.9987. Se calculó un valor de 54 m²/día para la transmisividad a partir del promedio de la derivada logarítmica del abatimiento en la misma porción del gráfico. Los parámetros hidráulicos calculados se resumen en la Tabla 2.

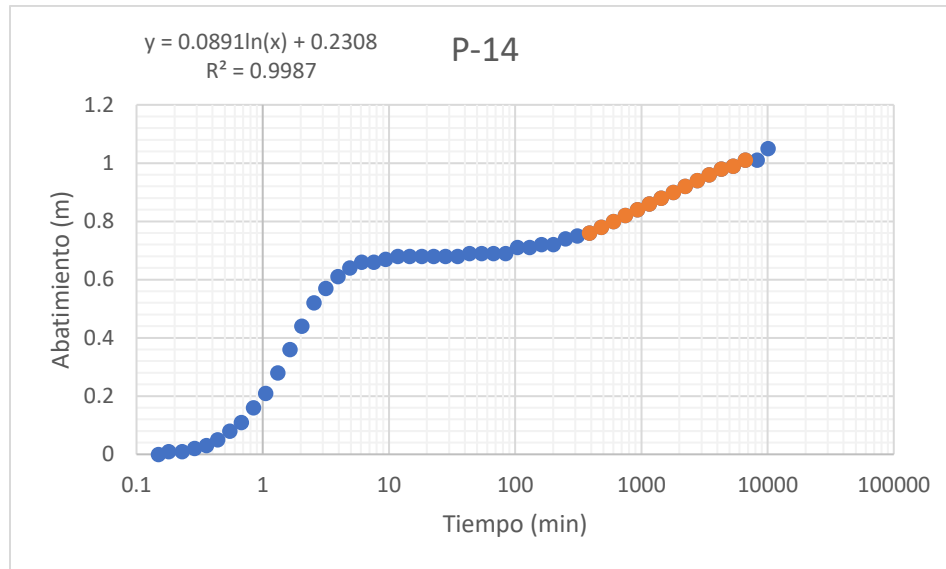


Figura 2. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba P-14. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

Se realizó un ajuste a los datos con una solución analítica en el software AQTESOLV. La Figura 3 muestra los datos de abatimiento de la prueba y los de la derivada logarítmica del abatimiento. Así mismo se visualiza el ajuste de la solución analítica empleada, en este caso fue la de Moench para acuíferos libres que considera un acuífero libre de extensión infinita, homogéneo de espesor uniforme con pozo de bombeo de penetración parcial o total (Moench, 1997). Se empleó un suavizado de Bourdet con $L=0.5$ (Bourdet et al., 1989). La curva del modelo analítico se acopla bien a los datos de la derivada. Sin embargo, había un desajuste aproximadamente alrededor del minuto 1000 por lo que se agregó un efecto de frontera de carga constante, para mejorar el ajuste. Se obtuvo un valor para la transmisividad de $25 \text{ m}^2/\text{día}$ y de $5.7\text{E}-03$ para el coeficiente del almacenamiento.

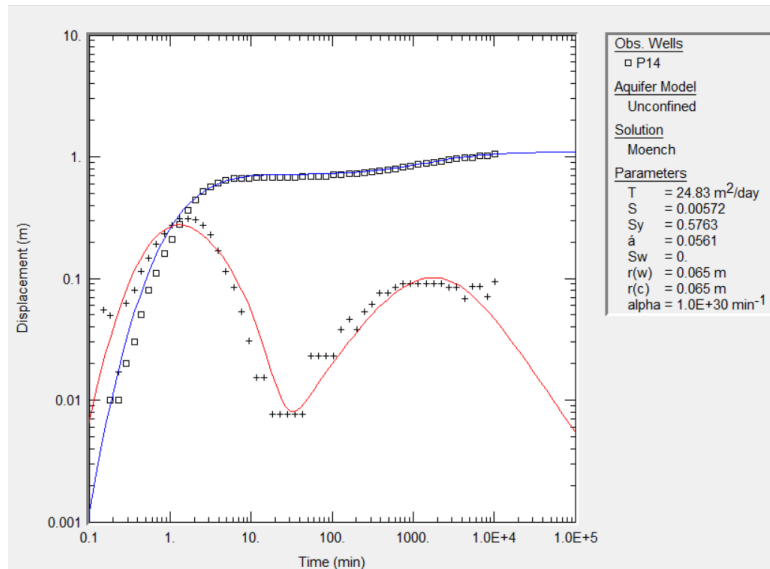


Figura 3. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba P-14. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, Sy el rendimiento específico, Sw es el factor adimensional de daño en pozo, r(w) es el radio de pozo, r(c) es el radio nominal del ademe, alpha es la constante empírica de Moench para drenaje instantáneo del nivel freático.

La figura 4 muestra un gráfico diagnóstico generado en el software AquidPlot. Se observan los datos de abatimiento y derivada. Se empleó un suavizado de Bourdet con $L=0.5$ y se procedió a identificar dimensiones de flujo mediante el estudio de la pendiente de la curva de la derivada logarítmica del abatimiento. De este análisis se identificaron dos regímenes: uno lineal que comienza a partir del minuto 100 de bombeo y se extiende hasta aproximadamente 800 min y uno radial infinito que comienza inmediatamente después y se extiende con una duración de 4000 minutos. El primero asociado con una pendiente de la curva derivada igual a 0.5 y el segundo siendo igual a cero. El flujo lineal es asociable, de acuerdo con Ferroud (2019) a sistemas granulares canalizados largos y estrechos (depósitos glaciofluviales). La geometría del flujo radial denota un régimen de flujo cilíndrico-radial, característico de un acuífero isotrópico de espesor uniforme. Se obtuvo, gracias a la geometría del primer flujo, el ancho del acuífero canal y de la segunda, la porción del gráfico en donde se empleó Cooper Jacob, dado que el modelo de Theis asume que existe un flujo radial y la estimación de parámetros es correcta solo cuando dicha suposición se cumple (Beauheim et al., 2004). Los parámetros estimados se muestran en la Tabla 2. No hay evidencia de efecto de almacenamiento en pozo ni daño de pozo, la pendiente inicial de la curva derivada es diferente de 1. Se obtuvo un valor de transmisividad de $55 \text{ m}^2/\text{día}$, una conductividad hidráulica de 9 m/día y un coeficiente de almacenamiento de $1.8 \text{ E-}03$, el ancho del acuífero canal estimado fue 422 m.

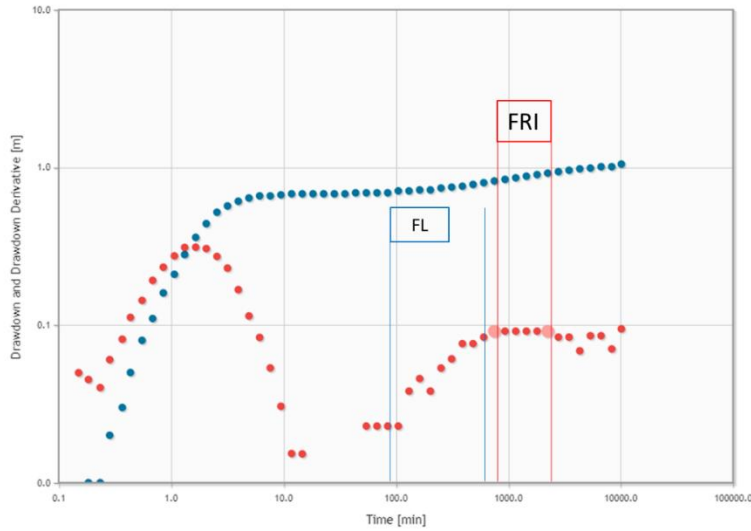


Figura 4. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba P-14. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FL- Flujo Lineal, FRI- Flujo Radial Infinito.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	Ancho Acuífero canal (m)	u
CJ	51.44	8.23	0.0027	422	0.0001
AQTESOLV	24.83	3.97	0.0057		
AquidPlot	53.55	8.56	0.0018		
T'	54.00				

Tabla 2. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba P-14. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

Prueba P-15

La Figura 5 muestra el gráfico semilogarítmico de la prueba de bombeo P-15, ubicada a 3 m del pozo de bombeo. El comportamiento se asocia al de una prueba de 3 etapas para acuíferos libres. La tasa de variación del abatimiento respecto al tiempo disminuye en tiempos tardíos, efecto que se puede asociar a una frontera de carga constante (Pfannkuch et al., 2021). El ajuste mediante Cooper Jacob se realizó en tiempos tardíos, en la porción naranja del gráfico, así como el cálculo de la transmisividad con la derivada logarítmica (Renard et al., 2009). El valor de la función de validez u fue de $2.8E-03$ y por lo tanto está dentro del rango aceptable para emplear Cooper Jacob. Se obtuvo una transmisividad de $48 \text{ m}^2/\text{día}$, una conductividad hidráulica de 8 m/día y un coeficiente de almacenamiento de $5E-02$. La transmisividad obtenida a partir del promedio de la derivada en la zona de ajuste del gráfico fue de $45 \text{ m}^2/\text{día}$. El coeficiente de Pearson del modelo matemático ajustado a los datos fue de 0.9951 por lo que es un buen ajuste. Los parámetros hidráulicos obtenidos mediante este proceso se visualizan en la Tabla 3.

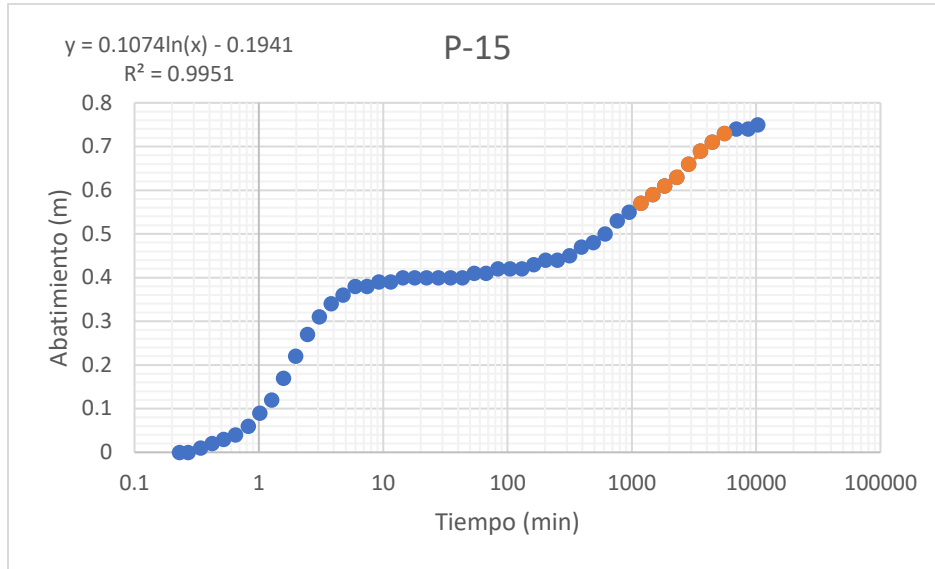


Figura 5. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba P-15. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

La Figura 6 muestra el ajuste de una solución analítica a los datos de la prueba en AQTESOLV. Nuevamente se aplicó la solución de Moench para acuíferos libres (Moench, 1997) con un suavizado de Bourdet con $L=0.5$. Obsérvese que los valores de la derivada empiezan a caer después de los tiempos tardíos, efecto que es asociable a una frontera de carga constante (Renard et al., 2009). Por esta razón, se configuró un efecto de frontera de carga constante en el software para obtener un ajuste más exacto. De esta manera se consiguió un valor para la transmisividad de 35 m²/día, una conductividad hidráulica de 6 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 1.2E-03. Los parámetros obtenidos de este ajuste se muestran en la Tabla 3.

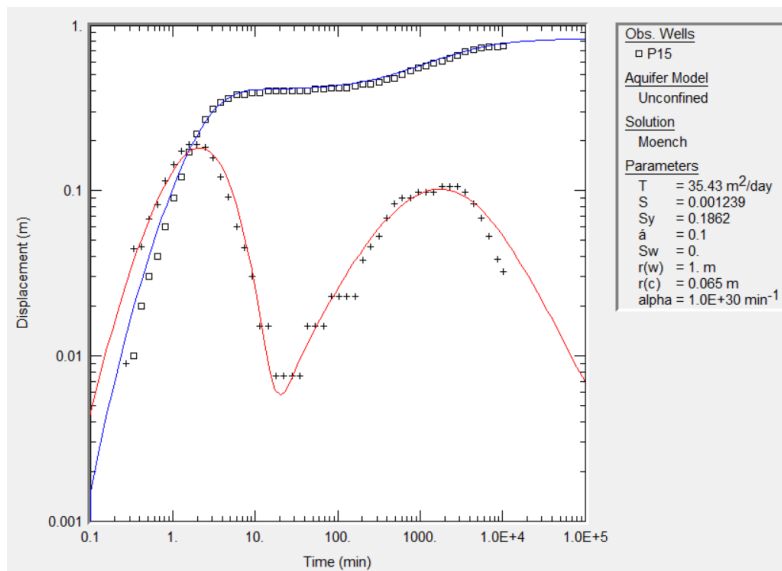


Figura 6. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba P-15. Los cuadros representan los datos del

abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, Sy el rendimiento específico, Sw es el factor adimensional de daño en pozo, r(w) es el radio de pozo, r(c) es el radio nominal del ademe, alpha es la constante empírica de Moench para drenaje instantáneo del nivel freático.

La Figura 7 exhibe el gráfico diagnóstico de la prueba P-15, en donde se identificaron las geometrías de flujo. Se aplicó un suavizado con el algoritmo de Bourdet con L=0.5. después de la respuesta inicial de la curva derivada, esta cae abruptamente llegando a un periodo de pseudo-estabilización que va aproximadamente del minuto 10 a un poco menos del minuto 100. Aunque parecería ser que se trata de un flujo radial infinito, más bien es parte de un efecto de doble porosidad, en donde la derivada cae, parece estabilizarse y posteriormente se reincorpora. La reincorporación de la curva derivada va desde el minuto 100 hasta el minuto 800 con una pendiente fraccionaria. Cuando finaliza este efecto, se identificó un flujo radial infinito presente desde el minuto 800 hasta el minuto 5000, asociable a un acuífero isotrópico de espesor uniforme con régimen de flujo cilíndrico radial infinito. Y a partir del minuto 5000 hasta el final de la prueba se identificó un flujo estacionario (pendiente igual a -1). La presencia del estado estacionario ($n=4$) en lapso final de la prueba corrobora con más contundencia de la presencia de una frontera de carga constante (Ferroud et al., 2019). Se obtuvo una transmisividad de 48 m²/día, una conductividad hidráulica de 8 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 2.5 E-03. Los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 3.

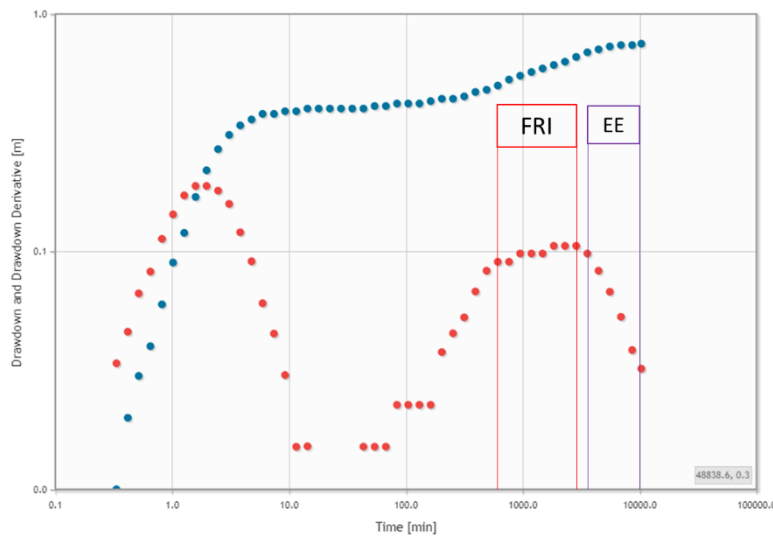


Figura 7. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba P-15. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI- Flujo Radial Infinito, EE- Estado Estacionario.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	47.20	7.55	0.0499	0.0029
AQTESOLV	35.43	5.67	0.0012	
AquidPlot	47.92	7.66	0.0026	
T'	45.00			

Tabla 3. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba P-15. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

Prueba P-1

La Figura 8 muestra el gráfico semilogarítmico correspondiente a la prueba P-1 ubicada a 5 metros de distancia del pozo de observación. Al igual que en las dos pruebas anteriores, se observa una respuesta típica de acuífero libre (Neuman, 1972). También es visible una reducción de la tasa de abatimiento en los datos finales de la prueba. Se aplicó Cooper Jacob en la sección resaltada del gráfico. Se obtuvo un valor de u de 0.01, lo que indica que es válida su aplicación de. El cálculo de la transmisividad mediante el promedio de la derivada logarítmica también se realizó con los datos de la porción resaltada de color naranja en el gráfico. De esta forma, se obtuvo un valor de transmisividad de 47 m²/día. Se obtuvo mediante Cooper Jacob un valor de transmisividad de 47 m²/día, una conductividad hidráulica de 8 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 6.4 E-02. El valor del coeficiente de Pearson de la curva ajustada a los datos es de 0.9903 por lo que es un buen ajuste. Los parámetros hidráulicos calculados se muestran en la Tabla 4.

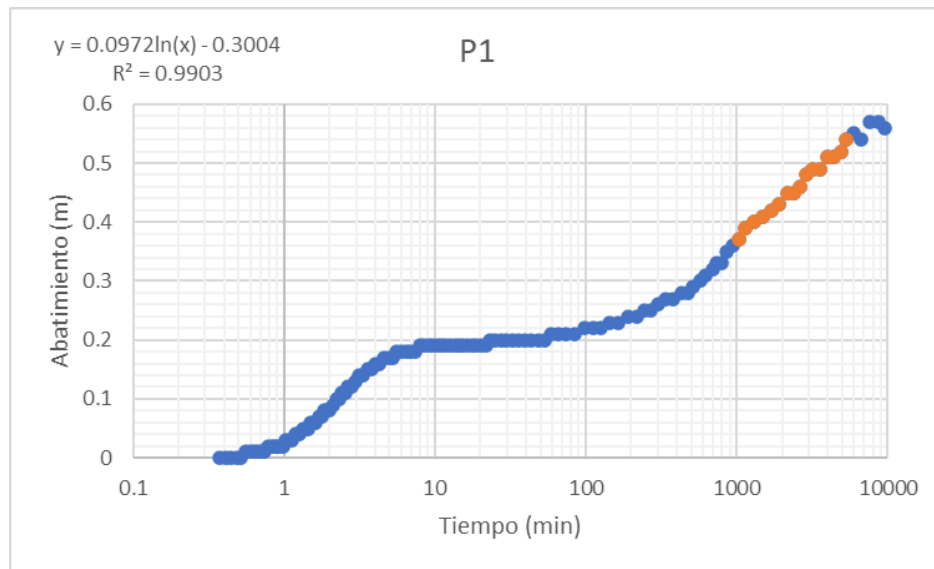


Figura 8. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba P-1. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

La Figura 9 muestra el ajuste realizado mediante curvas tipo en AQTESOLV. Al tratarse del mismo acuífero se empleó nuevamente la solución de Moench para acuíferos libres (Moench, 1997). Se visualiza un descenso en los datos de la derivada en el segmento final de la prueba por lo que se agregó un efecto de frontera de carga constante para obtener un mejor ajuste de la solución analítica con los datos calculados de la derivada. Se empleó un suavizado con el algoritmo de Bourdet con $L=0.5$ (Bourdet et al., 1989). Se obtuvo una transmisividad de $34 \text{ m}^2/\text{día}$, una conductividad hidráulica de 8 m/día y un coeficiente de almacenamiento de $3.3\text{E-}03$. Los parámetros obtenidos se visualizan en la Tabla 4.

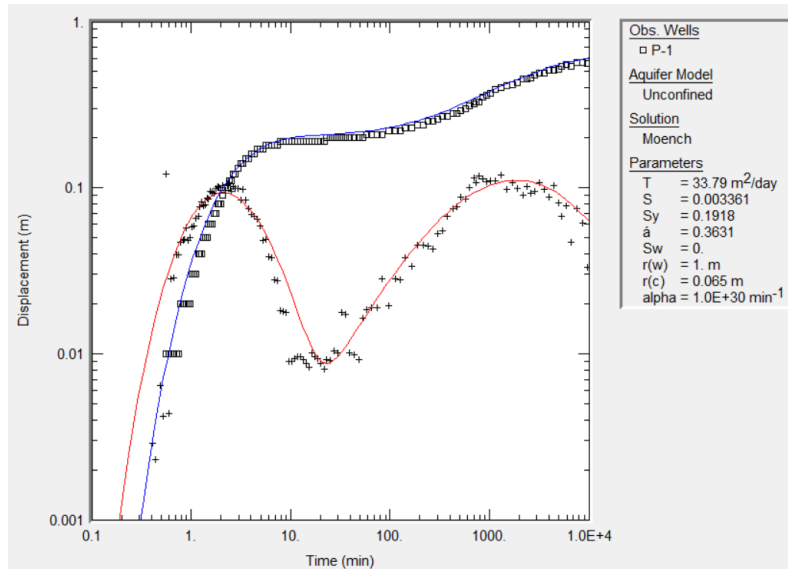


Figura 9. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba P-1. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, Sy el rendimiento específico, Sw es el factor adimensional de daño en pozo, r(w) es el radio de pozo, r(c) es el radio nominal del ademe, alpha es la constante empírica de Moench para drenaje instantáneo del nivel freático.

En la Figura 10 se muestra el gráfico diagnóstico de la prueba P-1. Nuevamente se visualiza el efecto típico de un acuífero libre de doble porosidad. Se identificó la pseudo-estabilización de la curva derivada en tiempos intermedios, de los 10 minutos a los 90 minutos, seguido de la reincorporación de la curva con pendiente fraccionaria menor a 1, iniciando aproximadamente en el minuto 90 hasta el minuto 800. La prueba finaliza con un régimen de flujo radial infinito iniciando a partir de los 800 minutos de bombeo hasta el final de la prueba. Lo que indica una estabilización de las condiciones hidrodinámicas en donde es posible aplicar Cooper Jacob (Ferroud, 2019). Cabe destacar que la curva se visualiza de manera diferente a como lo hace en el software AQTESOLV, en donde es apreciable un efecto de frontera de carga constante. Sin embargo, no es posible identificar en AquidPlot un régimen de flujo asociable a un estado estacionario. Se estimaron valores de $46 \text{ m}^2/\text{día}$ para la transmisividad, de 7

m/día para la conductividad hidráulica y de $7.2E-02$ para el coeficiente de almacenamiento. Se condensan los resultados obtenidos en la Tabla 4.

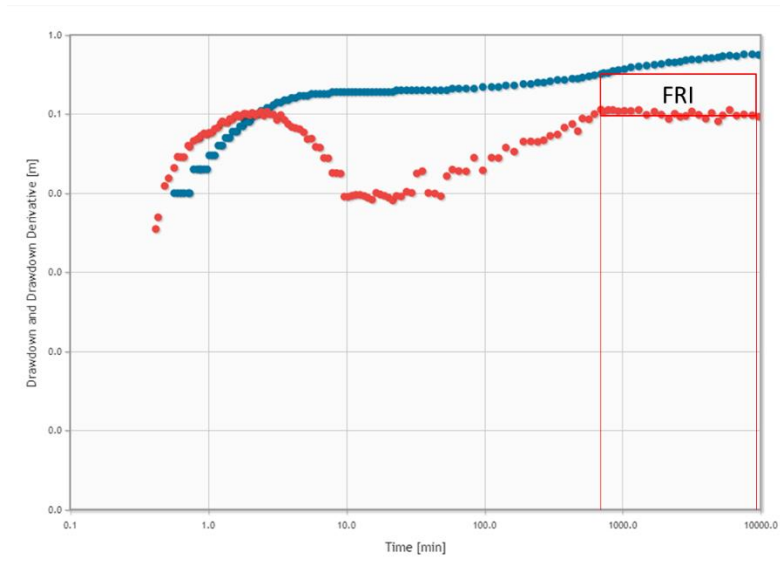


Figura 10. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba P-1. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI- Flujo Radial Infinito.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	47.15	7.54	0.0648	0.0120
AQTESOLV	33.79	5.41	0.0036	
AquidPlot	45.96	7.35	0.0725	
T'	47.00			

Tabla 4. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba P-1. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

Análisis Compuesto

La figura 11 muestra el gráfico de un análisis compuesto (composite analysis) de las pruebas P-14, P-15, P-1. El gráfico compuesto permite analizar datos de abatimiento de uno o más pozos de observación, cuando el tiempo se normaliza por la distancia radial al cuadrado del pozo de bombeo al pozo de observación (Duffield, 2007a). En el eje de las abscisas se colocan los valores del tiempo dividido entre la distancia radial al cuadrado y en el eje de las ordenadas el abatimiento. El software genera y ajusta a cada serie de datos correspondiente a las pruebas, una curva tipo. Se consideró un efecto de carga constante y se obtuvo un mejor ajuste. Nuevamente se aprecia en primera instancia, un efecto de doble porosidad, seguida de un régimen de flujo radial infinito en tiempos tardíos que es influenciado por un efecto de frontera de carga constante. Los parámetros obtenidos mediante esta técnica fueron una transmisividad hidráulica de $34 \text{ m}^2/\text{día}$ y un coeficiente de almacenamiento de $3.3E-03$.

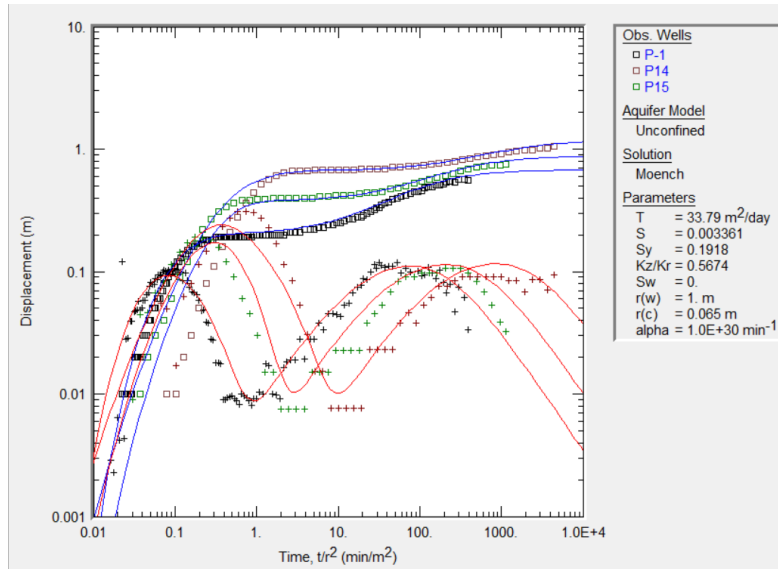


Figura 9. Gráfico compuesto de las pruebas P-14, P-15, P-1. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a las pruebas. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, Sy el rendimiento específico, Sw es el factor adimensional de daño en pozo, r(w) es el radio de pozo, r(c) es el radio nominal del ademe, alpha es la constante empírica de Moench para drenaje instantáneo del nivel freático.

3.2 Pozos y Acuíferos (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984)

Villanueva Martínez & Iglesias López (1984) reportaron los datos de una prueba de bombeo en régimen variable, a un caudal constante de 3888 m³/día (45 L/s), midiendo descensos en un pozo de bombeo, y en un pozo de observación, ubicado a 60 metros de distancia del primero.

La unidad acuífera estudiada, de 10 km², está constituida por los siguientes materiales a partir de la superficie: un acuífero de 10 m de espesor de gravas conectado hidráulicamente a un río; un acuitardo (paquete semipermeable) de limos de 12 m de espesor; un acuífero de arenas de 50 m de espesor; y la base impermeable de la unidad, formada por materiales arcillosos de gran espesor (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984). El nivel inicial del acuífero superior e inferior es de 5 m por debajo de la superficie.

El pozo de bombeo tiene más de 72 m de profundidad y llega hasta la base arcillosa impermeable. Dicho pozo, de 300 mm de diámetro, se cementa en la parte superior dejándosele rejilla solamente en el acuífero inferior. El pozo de observación tiene las mismas características. Los parámetros de la configuración de pozos para la prueba son visibles en la Tabla 5.

Pozo	d (m)	L (m)	r (c)	r (eq)	R (m)	Q (m ³ /día)
Bombeo	50	S.I	0.15	0.15	0.15	3888
Observación	50	S.I	0.15	0.15	60	-

Tabla 5. Parámetros y configuración de pozos para la prueba efectuada por Villanueva Martínez & Iglesias López (1984). d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (L/s) es el caudal de extracción.

Pozo de Bombeo

La Figura 12 muestra el gráfico semilogarítmico de las mediciones realizadas en el pozo de bombeo. Se observa que la magnitud de los abatimientos descende en tiempos tardíos, lo que nos indica, dado que la geología reporta un acuífero superior (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984), el efecto de goteo de este sobre la unidad acuífera bombeada. Se realizó la estimación de parámetros mediante Cooper Jacob (Cooper & Jacob, 1946), el cálculo de la derivada logarítmica para calcular la transmisividad, y el cálculo de u. Se obtuvo un valor de transmisividad mediante Cooper Jacob de 218 m²/día y un valor de 222 m²/día mediante el promedio de la derivada; y una conductividad hidráulica de 4 m/día. El valor de la función u es de 1.4E-04 por lo que la aplicación de Cooper Jacob es válida. El valor del coeficiente de Pearson de la curva de ajuste de los datos es de 0.9975 por lo que es un buen ajuste. Los parámetros hidráulicos se sintetizan en la Tabla 6.

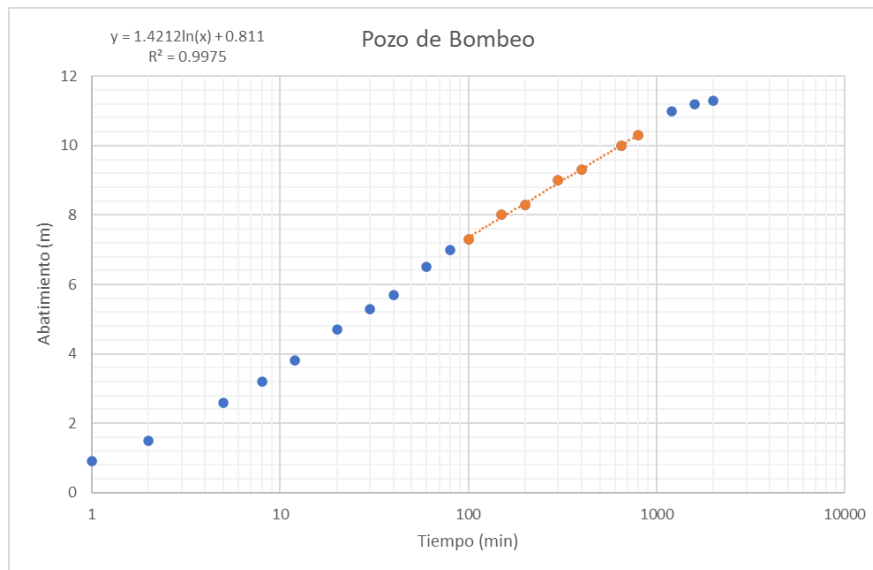


Figura 12. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba Pozo de Bombeo. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

La Figura 13 muestra el ajuste realizado mediante curvas tipo en AQTESOLV, a los datos de la prueba. Se empleó la solución analítica de Hantush que considera un acuífero con extensión de área infinita, homogéneo y de espesor uniforme, con pozo de bombeo

parcial o totalmente penetrante, para acuífero semiconfinado, y que el flujo en el acuitardo es vertical (Hantush, 1961). Se empleó un suavizado $L=0.5$ para la derivada. El ajuste obtenido es muy bueno como se puede observar en la figura. Se obtuvo una transmisividad de $118 \text{ m}^2/\text{día}$, una conductividad hidráulica de 2 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.389 . Los parámetros obtenidos mediante este ajuste se muestran en la Tabla 6.

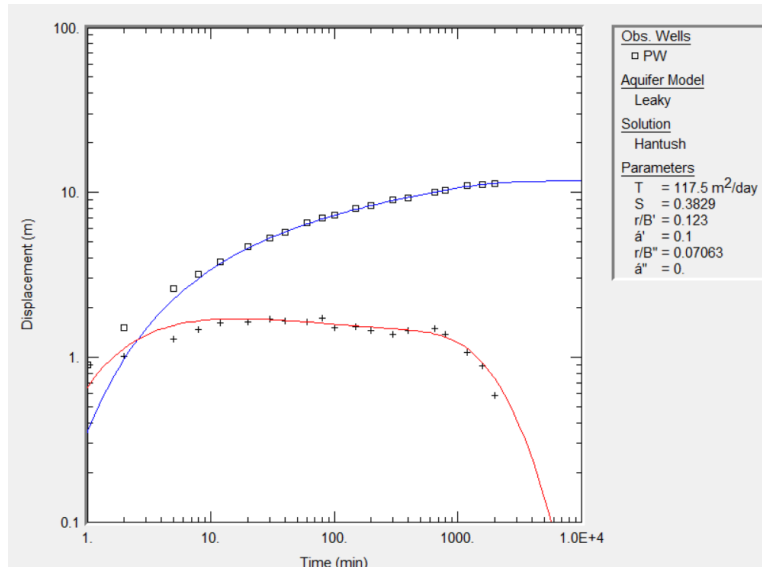


Figura 13. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba Pozo de Bombeo. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, r/B' es el parámetro de goteo del primer acuitardo, r/B'' es el parámetro de goteo del segundo acuitardo.

En la Figura 14 se identificó regímenes de flujo, mediante el estudio de geometrías de flujo en el gráfico diagnóstico de la prueba (Ferroud et al., 2019). No obstante, Esta prueba de bombeo no exhibe un comportamiento que pueda asociarse a un régimen de flujo. Se trata de una respuesta de acuífero semiconfinado que se apega a las suposiciones establecidas por Hantush (1960) y el acuífero puede considerarse como homogéneo y de espesor uniforme (Hantush, 1960). En este caso las simplificaciones que establece el modelo de Hantush, funcionan.

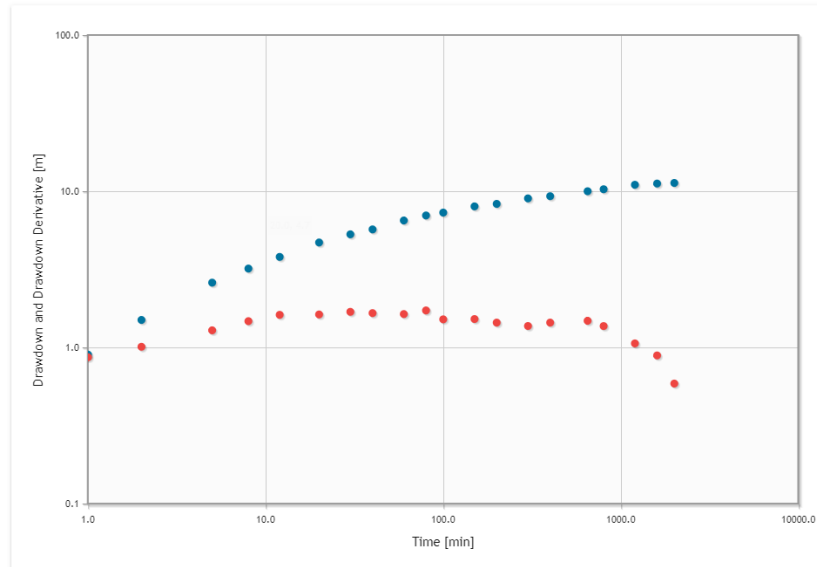


Figura 14. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba Pozo de Bombeo. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. No se identifican geometrías de flujo.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	217.67	4.35	-	0.0001
AQTESOLV	117.50	2.35	0.389	
AquidPlot	185.30	3.70	-	
T'	222.00			

Tabla 6. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba Pozo de Bombeo. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

Pozo de observación

Se observa en la figura 15 el gráfico semilogarítmico sobre el cual se realizó la estimación de parámetros mediante Cooper Jacob. Estos resultados junto con los obtenidos con el uso de los softwares de interpretación se resumen en la Tabla 7. El valor de u obtenido fue de 0.122, que es mayor a 0.01, límite que han establecido ciertos autores (Schwartz & Zhang, 2002; Todd & Mays, 2004). No obstante, es posible emplear Cooper Jacob hasta un valor de u igual de 0.2 dado que este valor puede ser influenciado por la distancia radial de los pozos de observación (Alexander & Saar, 2012). Se obtuvo una transmisividad de 273 m²/día, una conductividad hidráulica de 5 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 5.1E-04. El valor de la transmisividad obtenido mediante el promedio de la curva derivada fue de 289 m²/día.

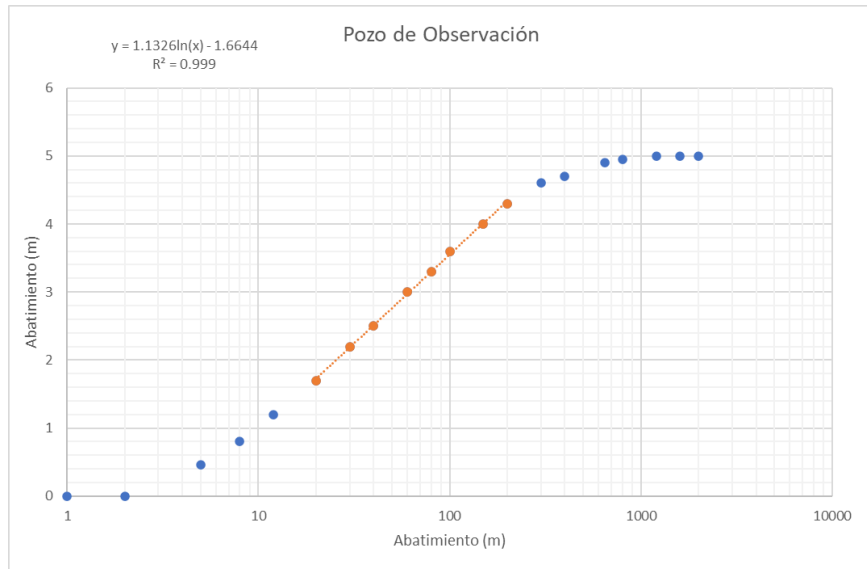


Figura 15. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba Pozo de Observación. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

La figura 16 muestra el ajuste de una curva tipo a los datos del pozo de observación en AQTESOLV. Se empleó la solución de Hantush para acuíferos semiconfinados (Hantush, 1960). Se utilizó el suavizado de Bourdet con $L=0.3$ y se obtuvo un muy buen ajuste. La respuesta de la curva derivada fue muy clara y no presentó ruido que distorsionara la curva. De la aplicación de la solución analítica se obtuvo un valor de $186 \text{ m}^2/\text{día}$ para la transmisividad, $4 \text{ m}/\text{día}$ para la conductividad hidráulica y $4.3\text{E}-04$ para el coeficiente de almacenamiento.

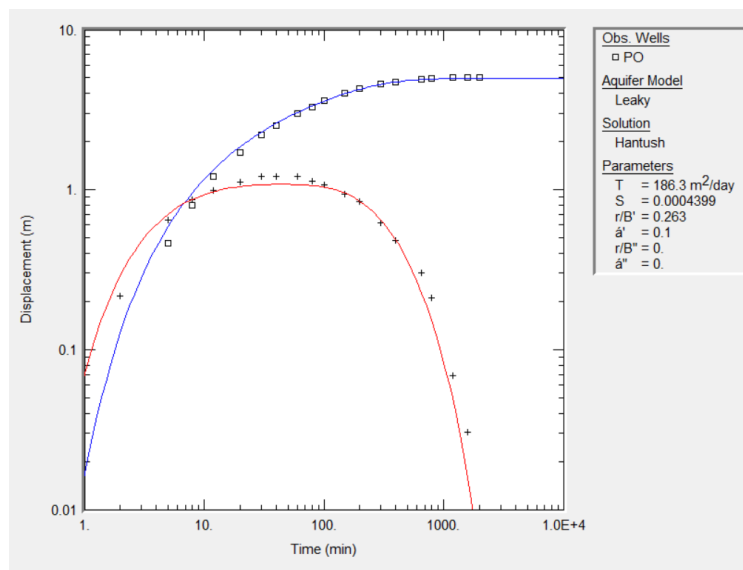


Figura 16. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba Pozo de Observación. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución

analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, r/B' es el parámetro de goteo del primer acuitardo, r/B'' es el parámetro de goteo del segundo acuitardo.

La Figura 17 muestra el gráfico diagnóstico de la prueba Pozo de Observación. Se buscó identificar regímenes de flujo, pero, como se discutió anteriormente la solución analítica de Hantush (1960) y las simplificaciones que esta hace, funcionan en este caso por lo que no hay visibles geometrías de flujo que puedan asociarse a heterogeneidades en el medio. Se obtuvo una transmisividad de $267 \text{ m}^2/\text{día}$, una conductividad hidráulica de 5 m/día y un coeficiente de almacenamiento de $5.2\text{E-}04$.

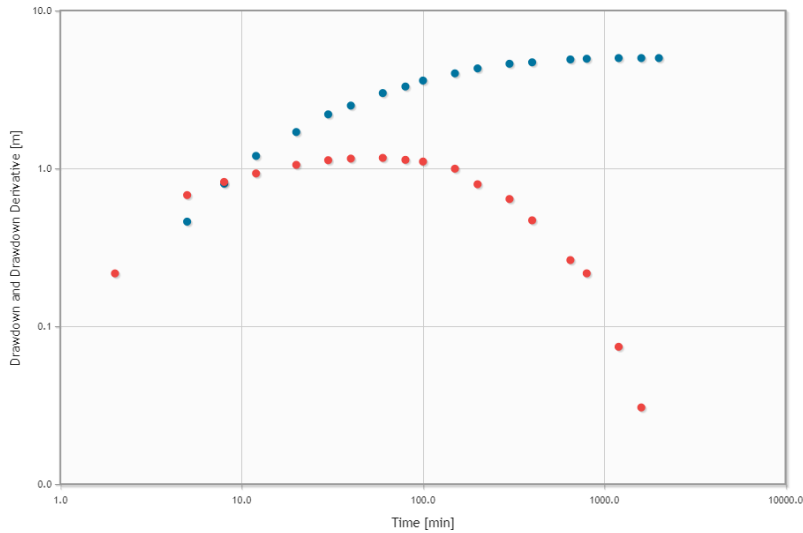


Figura 17. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba Pozo de Observación. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. No se identificaron geometrías de flujo.

En la Tabla 7 se muestra un resumen de los parámetros hidráulicos obtenidos mediante los distintos enfoques. Cabe mencionar que el autor reportó un valor de $208 \text{ m}^2/\text{día}$ para la transmisividad; un valor de $6.7\text{E-}04$ para el coeficiente de almacenamiento; y un valor de 0.03 m/día para la conductividad hidráulica, por lo que en general las estimaciones realizadas mediante las herramientas descritas están dentro de un margen en el orden de $\pm 70 \text{ m}^2/\text{día}$ para la transmisividad, $\pm 6 \text{ m/día}$ para la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento reportado se encuentra en el mismo orden de magnitud que los estimados.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	273.13	5.46	0.0005	0.1221
AQTESOLV	186.30	3.73	0.0004	
AquidPlot	267.30	5.34	0.0005	
T	288.72			

Tabla 7. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba Pozo de Observación. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.3 Gridley, Illinois, EUA (Walton, 1962)

La compañía Layne Western realizó en 1953 una prueba a un acuífero en el pozo del pueblo en Gridley, McLean County, Illinois (Walton, 1962). Se reportó el registro de pozo: el acuífero está conformado por gravas arenas y arcillas (ver Figura 18). Los efectos del pozo 3 (pozo de bombeo) fueron medidos en el pozo 1 y 2 (Pozos de Observación). En este trabajo se analizó la prueba correspondiente al pozo 1 (Well 1).

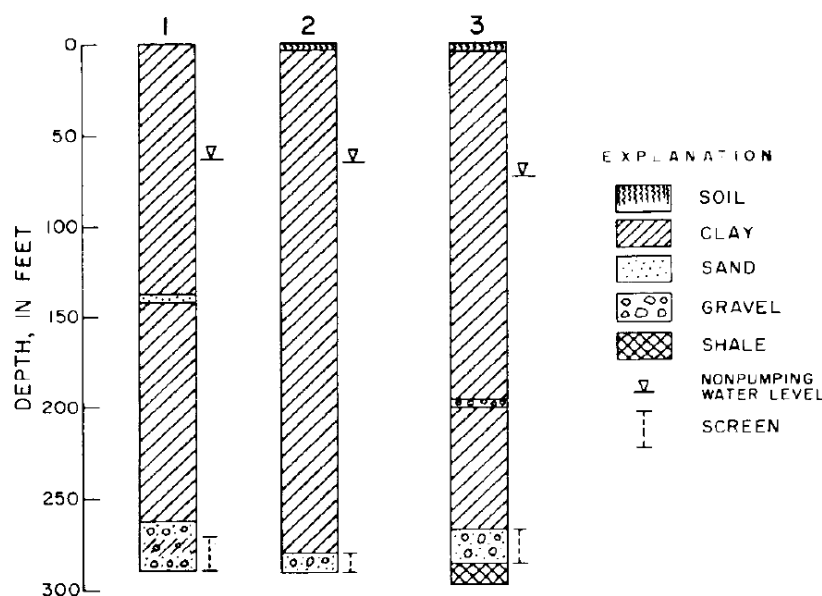


Figura 18. Registro de pozos en el área de estudio de Gridley, Illinois. Tomado de Walton (1962).

El bombeo inició a las 9:45 am del 2 de julio y continuó con un caudal constante de 1388 m³/día (220 gpm) durante 8 horas. El pozo 1 se encuentra a 251 m (824 ft) en dirección oeste del pozo 3. Los datos de construcción del pozo son: profundidad de 87 m (286 ft) por debajo del suelo, ranura de 4.5 m (15 ft) de acero inoxidable (Bruin et al., 1955) . El pozo de bombeo penetró completamente el acuífero de 5.5 m (18 ft) de espesor bajo condiciones artesianas y sin goteo (Duffield, 2007b). Los parámetros de configuración de pozo se muestran en la Tabla 8.

Pozo	d (m)	L (m)	r (c)	r (eq)	R (m)	Q (m ³ /día)
Well 3 (bombeo)	5.5	S.I	0.5	0.5	-	1388
Well 1 (observación)	5.5	S.I	0.5	0.5	251	-

Tabla 8. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio de Gridley, Illinois. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (m³/día) es el caudal de extracción.

Prueba Well 1

La Figura 19 muestra el gráfico semilogarítmico de la prueba de bombeo. Esta exhibe un comportamiento como el que describe Theis en su solución para acuíferos confinados (Theis, 1935). Se realizó la estimación de parámetros mediante Cooper Jacob en la porción del gráfico que corresponde a los tiempos tardíos (Pfannkuch et al., 2021). El valor de u obtenido es mayor a 0.01, no obstante, se consideró un margen de error de hasta 0.2 por los efectos que puedan ser provocados en el cálculo de este parámetro debido a la distancia radial del pozo de observación (Alexander & Saar, 2012). Se obtuvo una transmisividad de 130 m²/día, mediante Cooper Jacob y una de 125 m²/día, mediante el promedio de la derivada logarítmica, la conductividad hidráulica calculada fue de 24 m/día y el coeficiente de almacenamiento fue de 1.78 E-05. El coeficiente de Pearson de la curva ajustada en Cooper Jacob es de 0.9934 por lo que es un buen ajuste. Los parámetros hidráulicos se visualizan en la Tabla 9.

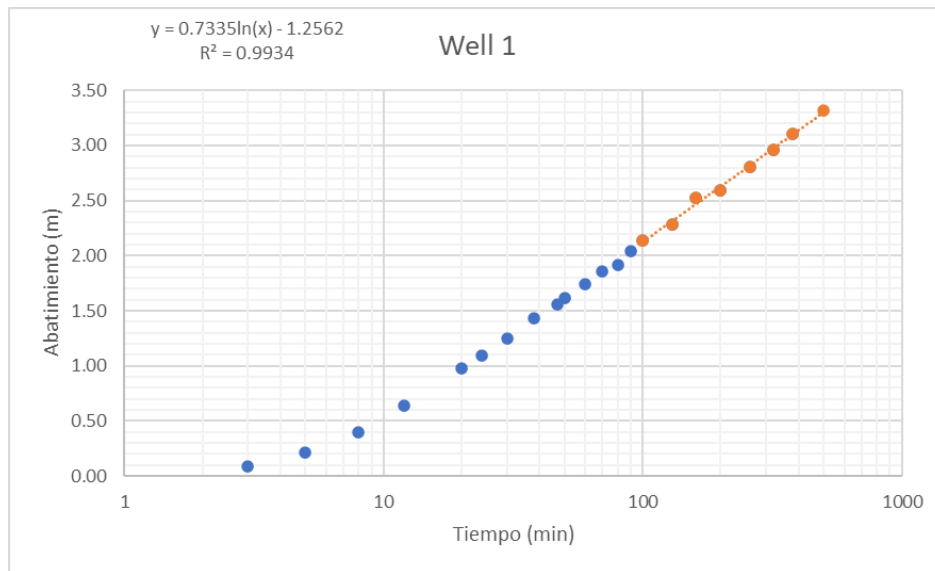


Figura 19. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba Well 1. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

En la Figura 20 se muestra el ajuste mediante una solución analítica en AQTESOLV. La solución empleada fue la de Theis para acuífero confinado. Cabe resaltar que esta solución considera un acuífero homogéneo, de extensión infinita, y un flujo radial infinito (Theis, 1935), es decir con una dimensión de flujo $n=2$ (Barker, 1988). Se obtuvo un buen ajuste, se aplicó un suavizado con algoritmo de Bourdet con $L=0.5$. se obtuvo mediante este enfoque una transmisividad de 122 m²/día, una conductividad hidráulica de 22 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 2.19E-05. Los parámetros hidráulicos se resumen en la Tabla 9.

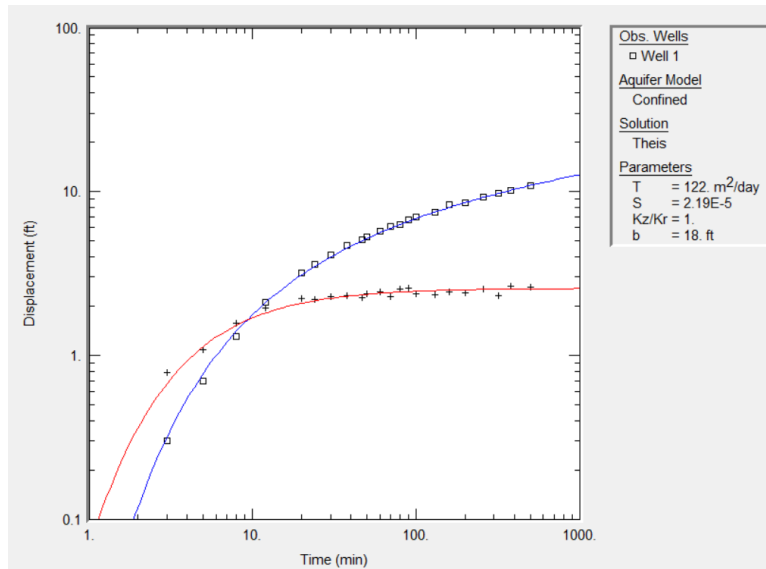


Figura 20. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba Well 1. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, K_z/K_r es la tasa de anisotropía de la conductividad hidráulica, b es el espesor saturado.

En la Figura 21 se muestra el gráfico diagnóstico de la prueba Well 1, en él se identificó el régimen de flujo que corresponde al que considera Theis en su solución, es decir el flujo radial infinito, que se hace presente desde los 20 min hasta el final de la prueba. Este flujo se asocia a un acuífero confinado, isotrópico de espesor uniforme, y extensión lateral infinita, en donde el área transversal de flujo crece proporcionalmente a la distancia radial. Cooper Jacob se aplicó en esta porción de la prueba ya que el acuífero está exhibiendo las condiciones ideales que plantea la solución analítica. Se obtuvo una transmisividad de 132 m²/día, una conductividad hidráulica de 24 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 1.75E-05

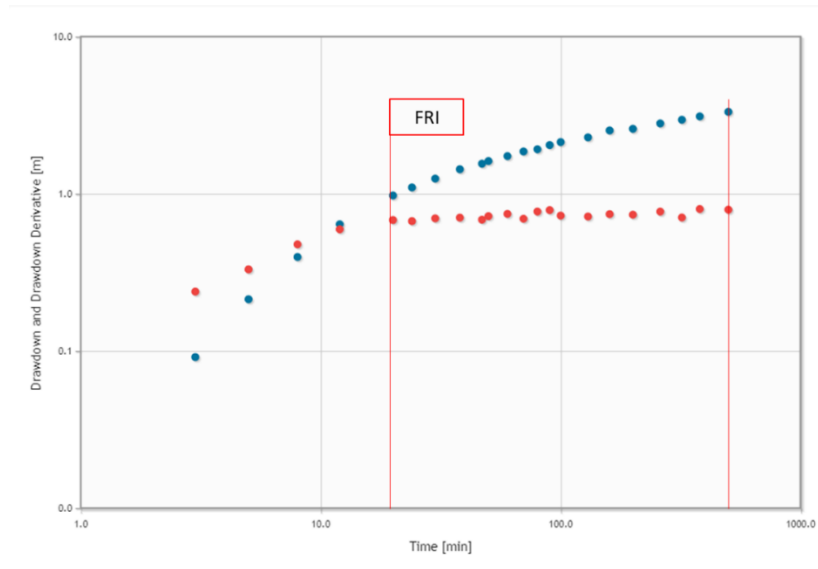


Figura 21. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba Well 1. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI- Flujo Radial Infinito.

En la tabla 9 se muestran los resultados calculados mediante las 3 herramientas empleadas. Walton (1962) reportó un valor de 11,000 gpd/ft (aproximadamente 137 m²/día) para la transmisividad y un valor de 2.2 E-05 para el coeficiente de almacenamiento. Los valores calculados se encuentran dentro de un margen de ± 20 m²/día para la transmisividad, y se encuentran en el mismo orden de magnitud para el coeficiente de almacenamiento, que los valores reportados por el autor.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/dia)	S	u
CJ	130.08	23.71	1.79E-05	0.0312
AQTESOLV	122.00	22.18	2.19E-05	
AquidPlot	132.41	24.07	1.75E-05	
T'	125.00			

Tabla 9. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba Well 1. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.4 CapeCod, Massachusetts, EUA USGS (1990)

El acuífero en el área de estudio está compuesto por sedimentos de inundación glacial que fueron depositados durante la recesión de hace 15,000 a 14,000 años atrás, del casquete glacial del Wisconsiniano tardío que había cubierto Nueva Inglaterra.

A pesar de que sedimentos no consolidados en el área de estudio sobreyacen capa de roca cristalina a una profundidad aproximada de 300 pies, estudios litológicos detallados indican que depósitos limpios, de grano medio a grueso, de inundación glacial altamente permeables sobre yacen material relativamente de baja permeabilidad y grano fino a una profundidad de aproximadamente 160 pies debajo del nivel freático (Moench et al., 2001).

Se realizó una prueba de bombeo de 3 días cerca de Falmoeth, CapeCod Massachussets, efectuada por el USGS, del 28 al 31 de agosto de 1990. La prueba se condujo bombeando un pozo a caudal constante y observando los cambios resultantes en la carga hidráulica en los pozos de observación. En la Figura 22 se observa la vista en planta de la configuración del proyecto. El pozo de bombeo (F507-080) penetró parcialmente una tabla de agua de un acuífero de 51.82 m de espesor (170 ft), descrito como depósito glacial consistente de arena y grava. Se mantuvo un caudal constante de 2020 m³/día (320 gpm) por 72 horas. El abatimiento fue monitoreado en el pozo de observación (F377-037) a una distancia de 26 m (85.1 ft) del pozo de bombeo (Duffield, 2007b). Se observa en la Tabla 10 la configuración de los pozos en campo.

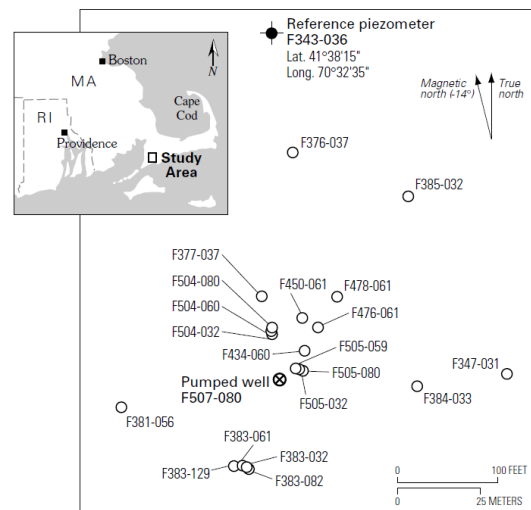


Figura 22. vista en planta del área de estudio. Tomado de Moench et al. (2001).

Pozo	d (m)	L (m)	r (c)	r (eq)	Q (m ³ /día)	R (m)
F507-080	4.0	14.3	0.333	0.333	2020	-
F377-037	4.1	0.6	0.333	0.333	-	26

Tabla 10. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio de CapeCod, Massachusetts. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (m³/día) es el caudal de extracción.

Prueba F377-037

El gráfico diagnóstico de la prueba F377-037 se muestra en la Figura 23. Se aplicó un suavizado de Bourdet $L= 0.5$ y se puede observar diferentes porciones en donde se detecta una geometría de flujo radial infinito. El primer flujo radial infinito se localizó en tiempos tempranos, en los primeros minutos de la prueba, el segundo se localizó aproximadamente desde el minuto 8 hasta el minuto 20. Enseguida se detectó un flujo radial infinito desde el minuto 20 hasta el minuto 200. Finalmente se identificó un tercer flujo radial infinito que va desde el minuto 600 hasta el final de la prueba. Esto indica, de antemano, que existen heterogeneidades en el acuífero. Ferroud (2019), en

su catálogo de curvas describe la secuencia de geometría de flujo con valor de dimensión de flujo n 2-1-2 es decir, flujo radial, lineal y flujo radial nuevamente. El autor asocia esta secuencia a acuíferos glacio-fluviales multicapa con flujo micro transversal dentro de los depósitos o a un sistema largo y estrecho que canaliza el flujo entre dos barreras impermeables paralelas. Se calculó el ancho del acuífero canal como parámetro no convencional asociable a la geometría de flujo lineal y se obtuvo un valor de 277 m. Se estimaron parámetros hidráulicos en los 3 regímenes de flujo radial infinito. Se obtuvieron valores de transmisividad de 48,238, 11,153 y 5,233 m²/día respectivamente para el primero, segundo y tercer flujo radial infinito. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos fueron de 931, 215 y 101 m/día. Y los valores de coeficiente de almacenamiento obtenidos fueron 2.1E-03, 3E-02 y 9.8E-02.

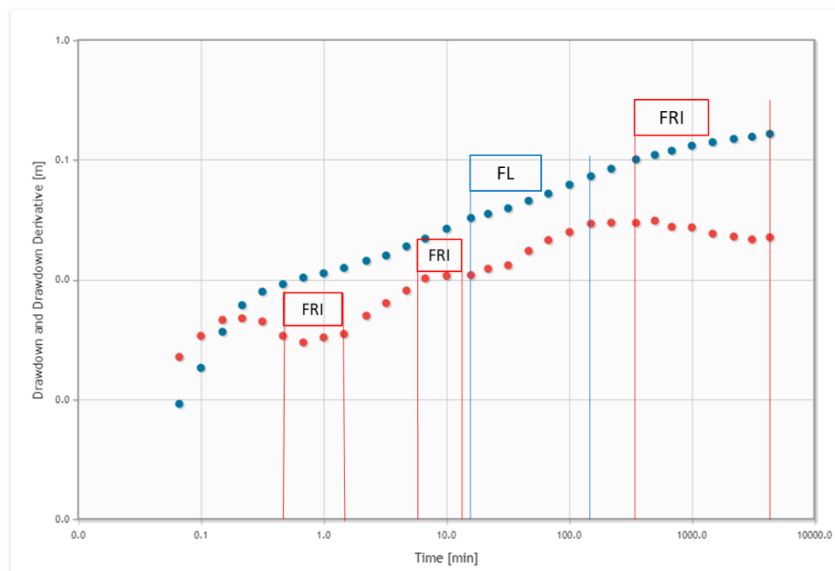


Figura 23. Identificación de geometrías de flujo en AquIDPlot de la prueba F377-037. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FL- Flujo Lineal, FRI- Flujo Radial Infinito.

En la Figura 24 se muestra el ajuste mediante AQTESOLV. La solución empleada para el ajuste fue el modelo de Tartakovsky-Neuman. Esta solución considera un acuífero libre, homogéneo, de espesor uniforme, cuya extensión de área es infinita, y con respuesta de gravedad atrasada (Tartakovsky & Neuman, 2007). Se aplicó un suavizado con el algoritmo de Bourdet $L=0.5$. De manera general la solución analítica sigue la tendencia de los valores de derivada, pero se observa que el ajuste no es preciso en ciertos segmentos. Mismos en los que se identificaron los regímenes de flujo radiales que dilucidan heterogeneidad en el medio. Se obtuvo un valor de transmisividad de 4181 m²/día, una conductividad hidráulica de 81 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 2E-03.

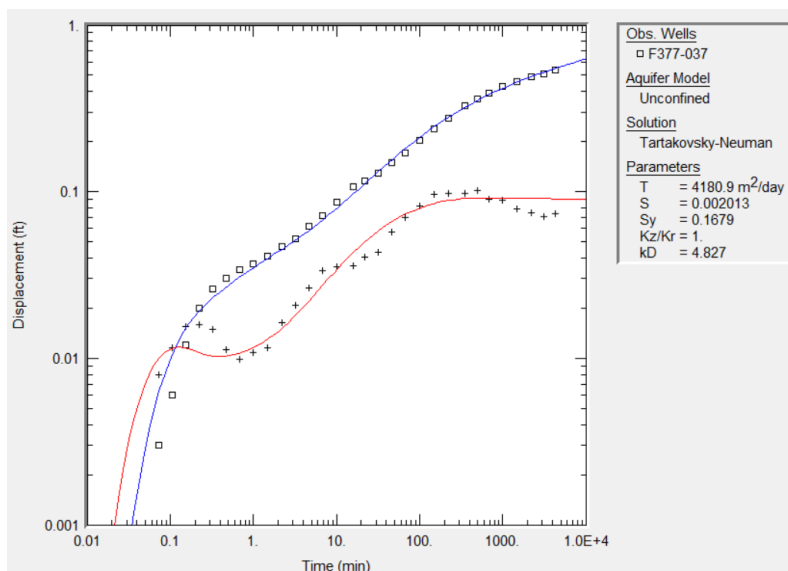


Figura 24. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba F377-037. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, Sy es el rendimiento específico Kz/Kr es la tasa de anisotropía de la conductividad hidráulica, kD es el parámetro adimensional de Gardner.

Evaluada la información anterior se procedió a realizar un análisis mediante Cooper Jacob, en el gráfico semilogarítmico de la Figura 25. Se realizaron los cálculos de parámetros hidráulicos en 3 secciones del gráfico que son en donde se intuyen características hidráulicas del acuífero diferentes, debido a la presencia de régimen de flujo radial infinito. Los valores de estos parámetros obtenidos mediante Cooper Jacob, AQTESOLV y AqIDPlot se muestran en la Tabla 11. Los valores obtenidos de u para la primera y segunda sección del gráfico rondan en el límite (0.023 y 0.097) si se considera el máximo como 0.01. Utilizando el criterio de Alexander & Saar (2012) estos valores se vuelven muy válidos. También se calculó un valor de transmisividad para sección del gráfico considerando el promedio de la derivada logarítmica de cada sección. Se obtuvieron valores de transmisividad de 47884, 11199 y 6199 m²/día mediante Cooper Jacob. Mediante el promedio de la derivada logarítmica se obtuvieron valores de 46,175, 12,485 y 5,602 m²/día. La conductividad hidráulica obtenida mediante este enfoque fue de 931, 215 y 101 m/día. Los valores de coeficiente de almacenamiento fueron de 2.1E-03, 3E-02 y 9.8E-02. Los valores de coeficiente de Pearson son de 0.9969, 0.9979 y 0.9973.

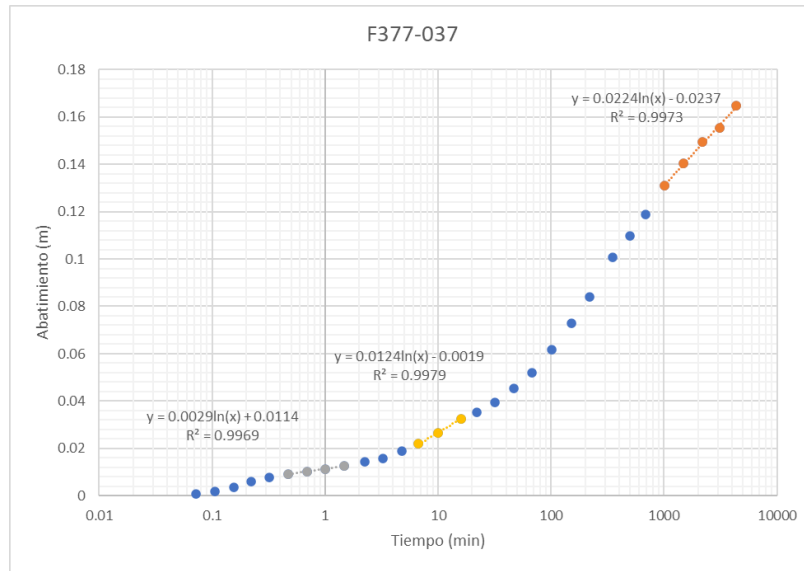


Figura 25. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba F377-037. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva gris es la primera sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob; la amarilla es la segunda; y la naranja la tercera.

Método	T1 (m2/día)	T2 (m2/día)	T3 (m2/día)	K1 (m/día)	K2 (m/día)	K3 (m/día)	S1	S2	S3	u1	u2	u3	Ancho Acuífero-Canal (m)
CJ	47884	11199	6199	924	216	120	0.00218	0.03031	0.04147	0.023	0.097	0.002	277
AQTESOLV	4181	4181	4181	81	81	81	0.00201	0.00201	0.00201				
AquidPlot	48238	11153	5233	931	215	101	0.00218	0.03050	0.09890				
T'	46175	12485	5602										

Tabla 11. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba F377-037. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob. El número que acompaña a cada parámetro indica la sección del gráfico a que corresponde.

3.5 Tecámac, México (Ariel Consultores, 2007)

La zona correspondiente a Tecámac, México pertenece al acuífero Cuautitlán-Pachuca, clave 1508, de acuerdo con CONAGUA. Se considera de tipo semiconfinado, heterogéneo y anisotrópico. Se divide en tres unidades, la basal, representada por riolitas, con fracturamiento moderado y concediéndole una permeabilidad baja; la unidad superior, comprende a materiales andesíticos con intenso fracturamiento, asociada con brechas volcánicas poco consolidadas y tobas arenosas de grano grueso y bastante alteradas, por lo que les concede buena permeabilidad y constituyen el principal acuífero profundo. Sobre esta secuencia se tienen arenas, arcillas y tobas poco permeables del Reciente, considerada como la tercera unidad con baja capacidad productora (CONAGUA, 2016).

El subsuelo se divide en tres zonas con características hidrogeológicas diferentes:

Zona 1: Se localiza entre los poblados de Tizayuca y Jesús María, donde la estructura del subsuelo tiene un arreglo subhorizontal, y está constituido en general, por capas de

sedimentos volcanoclásticos y lacustres, asociados con intercalaciones de derrames lávicos, que corresponden a la unidad volcánica superior.

Zona 2: Se define a la altura de Vicente Guerrero, correspondiendo a una zona de transición entre los depósitos de la Zona 1 y la unidad rocosa 3, claramente definida hacia el noreste. La parte inferior está compuesta por gravas y arcillas consideradas como depósitos de talud, cuerpos que subyacen a derrames volcánicos y están cubiertos por materiales semejantes a la zona anterior.

Zona 3: Entre las poblaciones de Zapotlán de Juárez y San Pedro Huaquilpan, el subsuelo está formado por una estructura rocosa de origen ígneo extrusivo de composición andesítica, correspondiendo a los materiales de las vulcanitas del Mioceno.

El 15 de octubre de 2007 se realizó una prueba de bombeo en Tecámac, México por Ariel Consultores S.A. Se empleó un caudal constante de extracción de 28 L/s, y se reportó una profundidad al nivel estático de 82 m (Ariel Consultores, 2007). Los parámetros de configuración de pozo se muestran en la Tabla 12.

Pozo	d(m)	L(m)	r(c)	r(eq)	Q (m3/día)	R(m)
Bombeo	150	S.I	0.305	0.305	2419.2	0.305

Tabla 12. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio de Tecámac, México. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (L/s) es el caudal de extracción.

Se observa en la Figura 26 el gráfico semilogarítmico de la prueba. Al tratarse de un acuífero semiconfinado se realiza el ajuste mediante Cooper Jacob en tiempos intermedios (Pfannkuch et al., 2021). El valor de u es de 5.2E-12 por lo que está dentro del rango de validez. Se obtuvo un valor de transmisividad de 443 m²/día mediante Cooper Jacob y un valor de 230 mediante el promedio de la derivada logarítmica. El valor de la conductividad hidráulica obtenido fue de 7 m/día y el valor de coeficiente de Pearson fue de 0.9051. Los resultados de este procedimiento se visualizan en la Tabla 13.

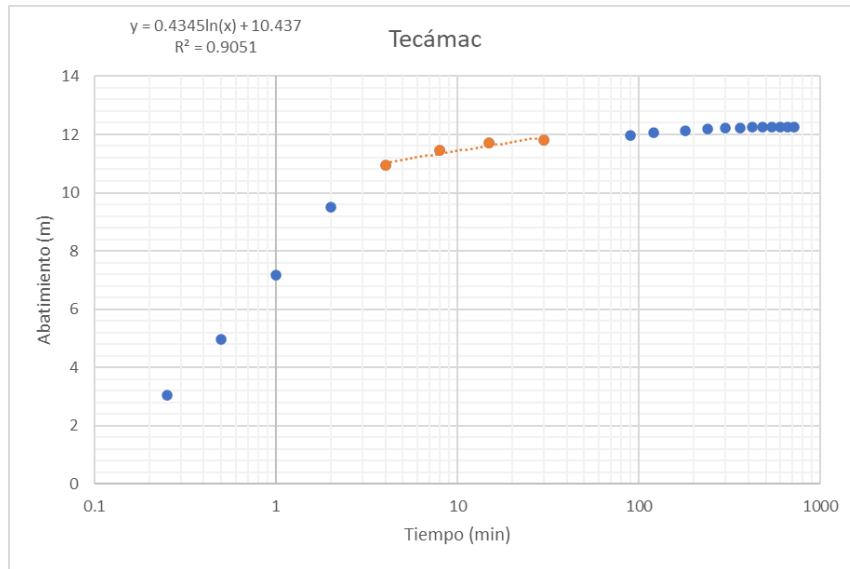


Figura 26. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba Tecámac. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

La Figura 27, muestra el ajuste obtenido mediante AQTESOLV. Se realizó empleando la solución analítica de Moench Case 1, esta solución considera que el acuífero semiconfinado es homogéneo, isotrópico y de espesor uniforme, además considera un plano de frontera de carga constante adyacente a las capas confinantes del acuífero (Moench, 1985). Se utilizó $L=0.1$. se obtuvo un valor de transmisividad de $176 \text{ m}^2/\text{día}$, un valor de coeficiente de almacenamiento de 0.2 y una conductividad hidráulica de 3 m/día .

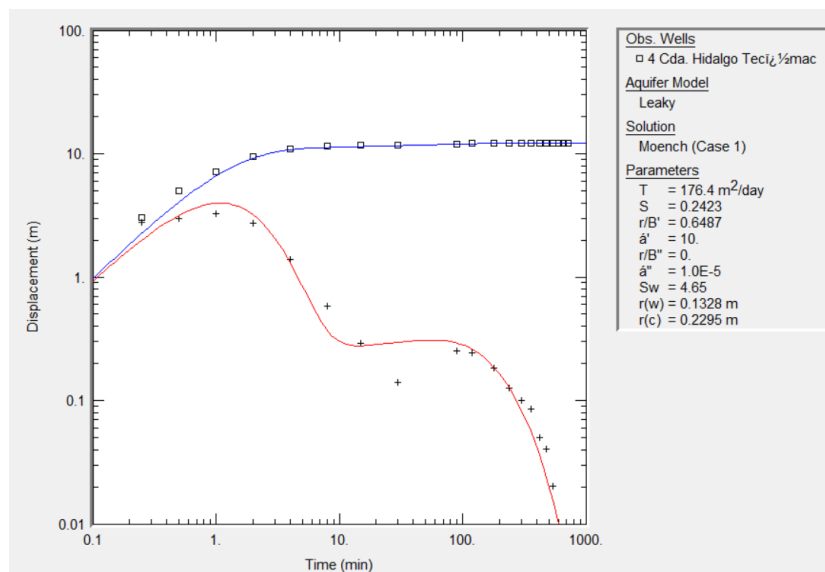


Figura 27. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba Tecámac. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, r/B' es el parámetro

adimensional de goteo del primer acuitardo, r/B'' es el parámetro adimensional de goteo del segundo acuitardo. S_w es el factor de daño en pozo, $r(w)$ es el radio del pozo, $r(c)$ es el radio nominal del ademe.

El análisis de la geometría de flujo (Figura 28), con suavizado de Bourdet $L=0.5$, exhibe una porción del gráfico con pendiente de -1 y una dimensión de flujo $n=0$, identificada en los tiempos intermedios de la prueba, desde el minuto hasta el minuto 50. Este régimen de flujo está asociado a una frontera de carga constante, sin embargo, es poco probable que la prueba esté mostrando efectos de carga constante con tan solo 10 minutos de bombeo. Se optó por considerar este régimen de flujo como un periodo de transición hacia un régimen de flujo radial infinito que inicia desde el minuto 90 hasta el minuto 400. Se realizó la estimación mediante Cooper Jacob en esta porción del gráfico. Se obtuvieron valores de $322 \text{ m}^2/\text{día}$ para la transmisividad y de 4.75 para la conductividad hidráulica. Los resultados se visualizan en la Tabla 13.

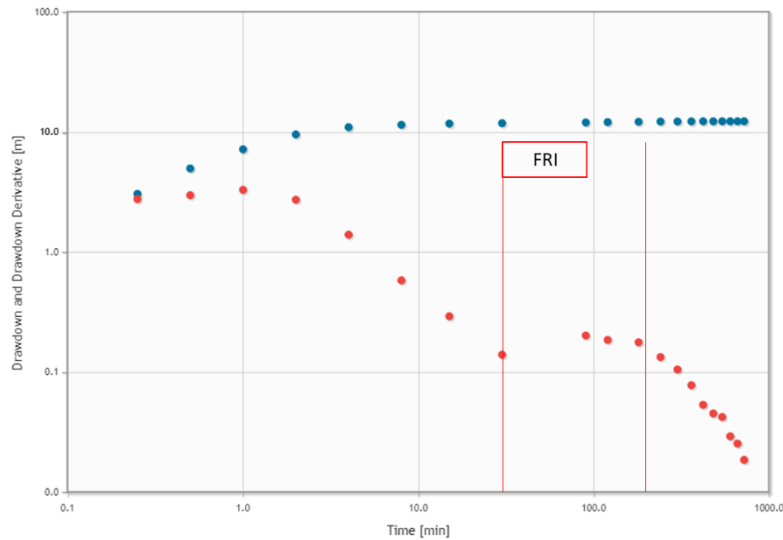


Figura 28. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba Tecámec. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI- Flujo Radial Infinito.

Los parámetros hidráulicos calculados mediante las técnicas anteriores se condensan en la Tabla 13, cabe mencionar que el autor de la prueba reporta un valor final de transmisividad de $347 \text{ m}^2/\text{día}$.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	442.96	6.53	-	5.2E-12
AQTESOLV	176.40	2.60	0.2423	
AquidPlot	322.42	4.75	2.22E-07	
T'	230.00			

Tabla 13. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba Tecámec. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.6 Buenavista, Tlaxcala (Base de datos, Facultad Ingeniería UNAM)

El acuífero que corresponde a esta zona de estudio es el acuífero Soltepec, ubicado en el estado de Tlaxcala. Se encuentra alojado en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como en los depósitos vulcanoclásticos que constituyen los cauces de los arroyos y las planicies, los cuales pueden tener algunos cientos de metros de espesor hacia el centro de los valles.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas extrusivas, integrada por derrames volcánicos, andesitas, riolitas, basaltos y por tobas, así como rocas calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas carbonatadas. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento hidrogeológico del acuífero están representadas por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias al desaparecer el fracturamiento a profundidad. Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas e interestratificadas con depósitos arcillosos. La alternancia de rocas que no presentan fracturamiento con depósitos aluviales, forman acuíferos locales independientes; en las laderas de las sierras se pueden presentar acuíferos colgados en medio el fracturado.

En general se define como un acuífero de tipo libre heterogéneo y anisótropo, que presenta condiciones locales de semiconfinamiento en la región central. Constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales y depósitos vulcanoclásticos entremezclados, con nivel profundo de saturación. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas (principalmente tobas, andesitas y riolitas) y sedimentarias marinas (calizas), que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calcáreas. Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por depósitos lacustres. Su espesor saturado es hasta de 400 m (CONAGUA, 2020b).

El 29 de enero de 2003 se efectuó una prueba de bombeo en la localidad de Buenavista, ubicada en el municipio de Tlaxco, Tlaxcala. La duración de la prueba fue de 12 horas, a caudal constante de extracción de 302.4 m³/día. La profundidad al nivel estático reportada fue de 89.705 m. Los parámetros de configuración del pozo se muestran en la Tabla 14.

Pozo	d(m)	L(m)	r(c)	r(eq)	Q (m ³ /día)	R(m)
Bombeo	170	S.I	0.3048	0.3048	302.4	0.3048

Tabla 14. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio de Buenavista, Tlaxcala, México. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (m³/día) es el caudal de extracción.

Se observa en la Figura 29 el gráfico semilogarítmico de la prueba. se trata de un acuífero semiconfinado y se realiza el ajuste mediante CJ en tiempos intermedios (Pfannkuch et al., 2021). Los parámetros hidráulicos obtenidos (Tabla 15) indican que es un acuífero de muy pobre conductividad hidráulica. El valor de u obtenido para este cálculo es de 0.03, el cual da un margen de estimación aceptable de acuerdo con Alexander & Saar (2012). La transmisividad obtenida es de $5 \text{ m}^2/\text{día}$, la conductividad hidráulica es 0.06 m/día y el coeficiente de almacenamiento fue de $5.8\text{E-}02$. El valor del coeficiente de Pearson fue de 0.9804 lo que indica un buen ajuste. El valor de la transmisividad mediante el promedio de la derivada logarítmica fue de $5 \text{ m}^2/\text{día}$.

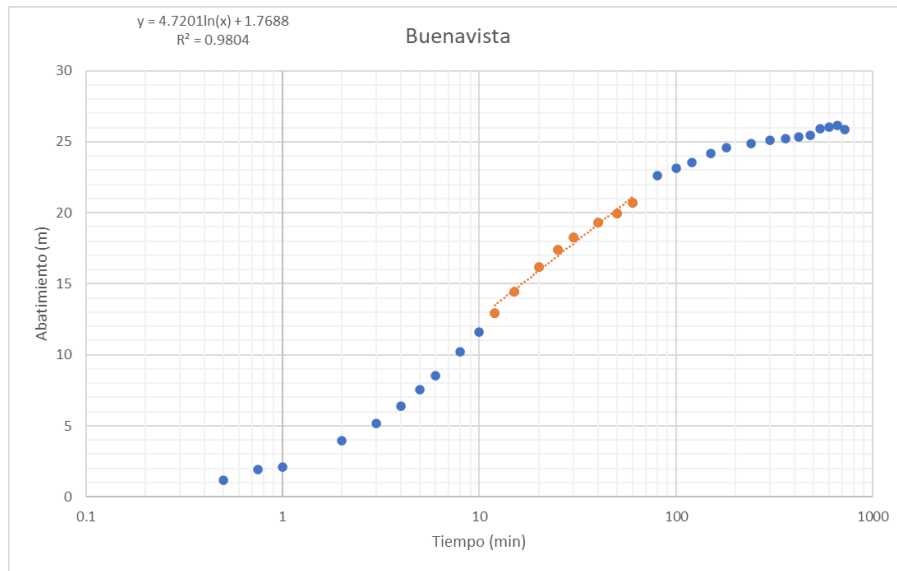


Figura 29. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba Buenavista. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

El ajuste mediante AQTESOLV en la Figura 30 se realizó empleando la solución analítica de Moench Case 1, esta solución considera que el acuífero semiconfinado es homogéneo, isotrópico y de espesor uniforme, además considera un plano de frontera de carga constante adyacente a las capas confinantes del acuífero. Se obtuvo un buen ajuste mediante esta solución. Los valores obtenidos de transmisividad son muy bajos, se trata de un acuífero pobre. La transmisividad obtenida mediante este método fue de $6 \text{ m}^2/\text{día}$, la conductividad hidráulica fue de 0.08 m/día y el coeficiente de almacenamiento fue de $3.3\text{E-}02$

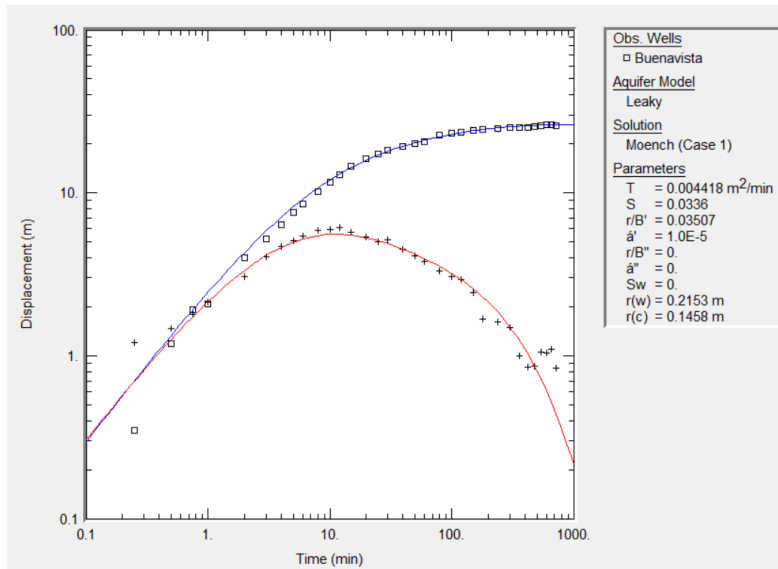


Figura 30. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba Buenavista. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, r/B' es el parámetro adimensional de goteo del primer acuitardo, r/B'' es el parámetro adimensional de goteo del segundo acuitardo. Sw es el factor de daño en pozo, $r(w)$ es el radio del pozo, $r(c)$ es el radio nominal del ademe.

En la Figura 31 se muestra el gráfico sobre el cual se lleva a cabo el análisis de geometrías de flujo. No se encontraron geometrías de flujo que fueran predominantes, manifestándose como cambios de pendiente en la curva derivada y con dimensión de flujo n identificable.

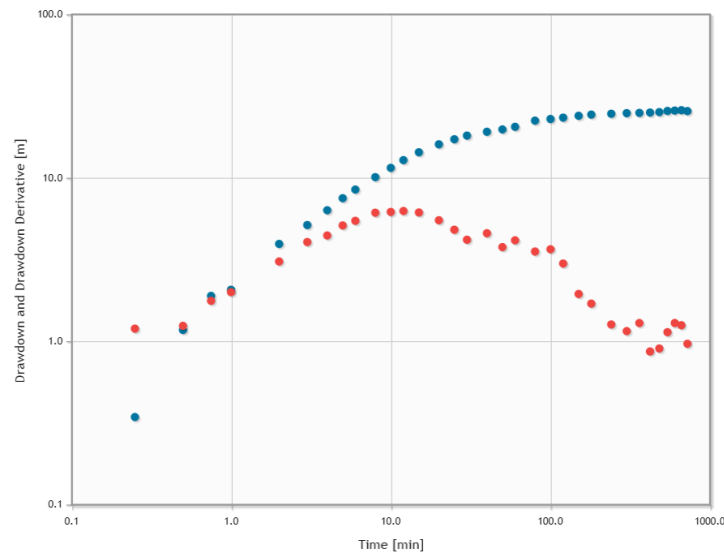


Figura 31. Identificación de geometrías de flujo en AqidiPlot de la prueba Buenavista. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. No se identificaron regímenes de flujo.

Se tienen los resultados de las estimaciones de los parámetros hidráulicos de la prueba Buenavista en la Tabla 15. En General se puede inferir que el acuífero bombeado es de pobre conductividad hidráulica. Los valores del coeficiente de almacenamiento son

aceptables. No se cuenta con el reporte original de la prueba de bombeo por lo que resulta imposible hacer una comparación con los resultados del autor.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	5.10	0.06	0.0589	0.0322
AQTESOLV	6.36	0.08	0.0336	
AquidPlot	5.73	0.07	0.0386	
T'	4.69			

Tabla 15. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba Buenavista. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.7 Celaya, Guanajuato, prueba IGC-373 (IGC, 1999)

El acuífero Valle de Celaya se presenta en un ambiente hidrogeológico constituido por un sistema distensivo de bloques tectónicos escalonados (horts y grabens) que se formaron en rocas volcánicas y piroclásticas, en el que las fosas o grabens están rellenas de material terrígeno de origen continental, que presenta granulometría y compactación variables, ocasionando heterogeneidad y anisotropía importantes.

El sistema-acuífero está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, areniscas y conglomerados; y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición basáltica y en menor proporción riolítica. La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava y su espesor oscila entre algunas decenas de metros hasta varias centenas, de acuerdo con la distribución y forma de las fosas tectónicas que los contienen. Por su parte, el medio volcánico fracturado presenta un gran espesor y doble porosidad por su permeabilidad primaria y secundaria por fracturamiento, con marcadas propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea.

La dinámica del sistema-acuífero es libre a semiconfinado, tipo granular-fracturado con doble porosidad, heterogéneo y anisótropo de continuidad hidráulica regional, entre unidades volcánicas, piroclásticas, vulcano-sedimentarias y depósitos terrígenos de compacidad y granulometría variables (CONAGUA, 2015).

El 17 de septiembre de 1999 Ingeniería Geológica Computarizada (IGC) llevó a cabo una prueba de bombeo a caudal constante en Celaya, Guanajuato. La duración de la prueba fue de 3 horas, el caudal de extracción fue de 15.00 L/s. Se reportó una profundidad al nivel estático de 67.120 m (IGC, 1999). Los datos de configuración de pozo se muestran en la Tabla 16.

Pozo	d(m)	L(m)	r(c)	r(eq)	Q (m ³ /día)	R(m)
Bombeo	150	S.I	0.3048	0.3048	1382.4	0.305

Tabla 16. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio de Celaya, Guanajuato. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el

radio del equipo del pozo, $R(m)$ es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q ($m^3/día$) es el caudal de extracción.

En la Figura 32 se tiene el gráfico semilogarítmico de la prueba de bombeo, en este se observa, que en tiempos intermedios la tasa de abatimiento disminuye, lo que indica que se está extrayendo un volumen de agua extra, situación que no prevalece en tiempos tardíos, por lo que se descarta el efecto de una frontera de carga constante. Dado que la geología del sitio hay presencia de rocas volcánicas fracturadas (IGC, 1999), es posible asociar dicho efecto a un comportamiento hidráulico de doble porosidad. Se aplicó Cooper Jacob en tiempos tardíos, el cálculo de transmisividad mediante derivada también se obtuvo en este segmento de la prueba. se obtuvo un valor de transmisividad mediante Cooper Jacob de $47 m^2/día$, por otra parte, la transmisividad obtenida mediante el promedio de la derivada logarítmica del abatimiento fue de $45 m^2/día$. El valor de la conductividad hidráulica obtenida fue de $0.45 m/día$. El valor de la función de validez u es de $5.1E-12$ y el valor del coeficiente de Pearson es de 0.9589 por lo que se trata de un buen ajuste.

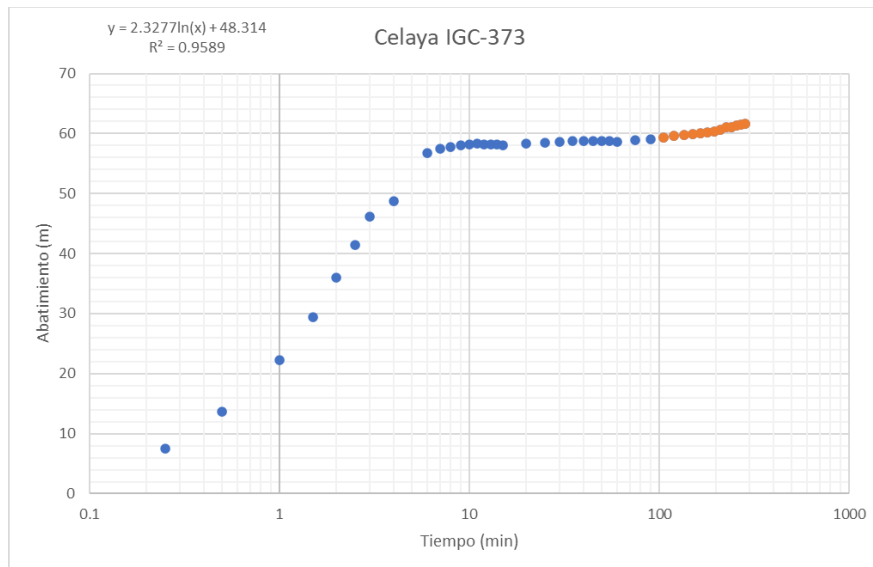


Figura 32. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba IGC-373. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R .

En la Figura 33 se realizó el ajuste con el modelo de Moench para acuíferos fracturados de doble porosidad. Este modelo considera una extensión de área infinita, espesor uniforme, que el acuífero es confinado con doble porosidad y que la forma de los bloques de la matriz es en forma de losa (slab) o esféricos (Moench, 1984). Se utilizó un suavizado con Bourdet de $L=0.5$. También es importante resaltar que fue posible realizar el ajuste mediante la solución de Moench para acuíferos libres (Moench, 1997). En el caso del modelo de acuífero fracturado se obtuvieron valores de conductividad hidráulica de $0.35 m/día$ para el valor de fractura y de $2.15E-06$ para el valor de matriz.

El valor de coeficiente de almacenamiento de fractura fue de $6.0E-09$ y el de la matriz fue de $3.1E-07$. Los parámetros de Transmisividad y coeficiente de almacenamiento obtenidos mediante la solución de Moench fueron de $28 \text{ m}^2/\text{día}$ para la transmisividad, $0.27 \text{ m}/\text{día}$ de conductividad hidráulica y de $2.55E-05$ para el coeficiente de almacenamiento. Los parámetros hidráulicos obtenidos mediante esta solución se muestran junto con los demás enfoques de este trabajo en la Tabla 17.

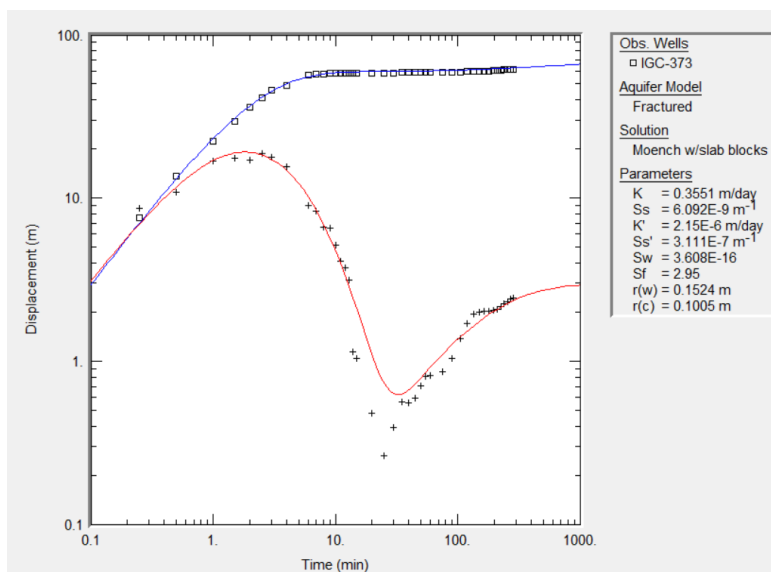


Figura 33. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba IGC-373. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. K es la conductividad hidráulica de fractura, Ss es el coeficiente de almacenamiento de la fractura, K' es la conductividad hidráulica de la matriz, Ss' es el coeficiente de almacenamiento de la matriz, Sw es el factor de daño del pozo, Sf es el factor de daño de fractura, r(w) es el radio del pozo, r(c) es el radio nominal del ademe.

En la Figura 34 se visualiza el gráfico diagnóstico en AquIDplot, se aplicó un sauzizado de Bourdet $L=0.5$. No obstante, existen ciertas variaciones en la visualización que modifican la interpretación. Se observa un efecto de doble porosidad en acuífero libre, expresado por la caída abrupta de la curva derivada seguida de un período de pseudo-estabilización, finalizando con una reincorporación de la curva derivada. El periodo de pseudo-estabilización va del minuto 20 hasta el minuto 80. La reincorporación de la derivada va desde el minuto 80 hasta el 180. Se aplicó CJ en tiempos intermedios. Finalmente se identificó un flujo lineal ($n=1$) en tiempos tardíos, desde el minuto 180 hasta el final de la prueba. Este régimen lineal puede asociarse a una transición y/o al bombeo a través de fracturas conductivas (Ferroud et al., 2019) que son características presentes en el sistema acuífero estudiado. Cabe resaltar que la prueba de bombeo fue de corta duración (3 horas). Se obtuvo un valor de transmisividad de $22 \text{ m}^2/\text{día}$ y una conductividad hidráulica de $2 \text{ m}/\text{día}$. Se resumen los parámetros hidráulicos en la Tabla 17.

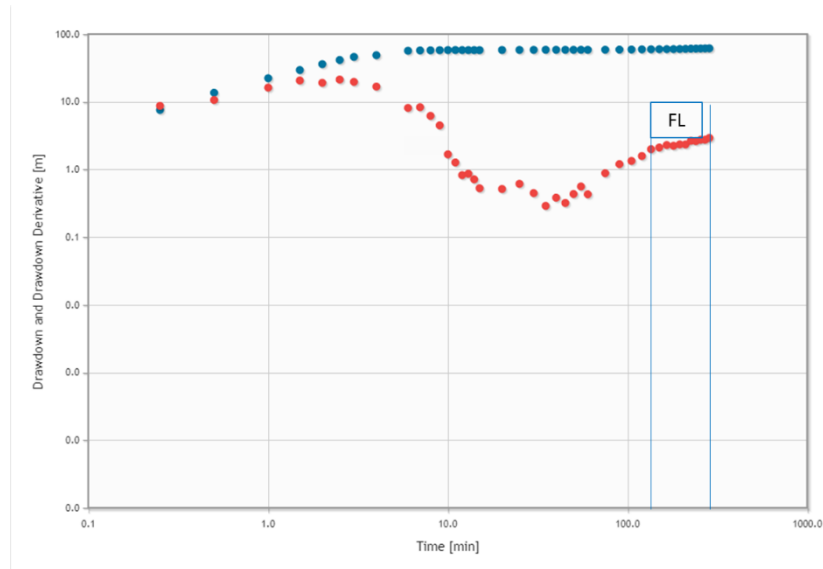


Figura 34. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba IGC-373. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI- Flujo Radial Infinito; FL- Flujo Lineal.

La Tabla 17 muestra los parámetros obtenidos aplicando las técnicas anteriormente descritas. cabe mencionar que el autor reportó valores de transmisividad de 8.21 m²/día, y 0.0781 m/día para la conductividad hidráulica. El valor de u está dentro del rango establecido.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	47.25	0.45	-	5.184E-12
AQTESOLV	28.28	0.27	2.55E-05	
AquidPlot	21.56	2.05	-	
T'	45.00			

Tabla 17. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba IGC-373. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.8 León, Guanajuato (Ariel Construcciones, 1982)

En el valle de León afloran las siguientes unidades litológicas: sedimentos marinos, conglomerados rojos, areniscas tobáceas, depósitos continentales, así como los suelos recientes, entre las rocas sedimentarias; pizarras, entre las rocas metamórficas; los granitos como rocas intrusivas y andesitas, rolitas, tobas riolíticas y derrames de basalto como rocas extrusivas, que abarcan desde el Triásico al Cuaternario. El acuífero que corresponde a esta región geográfica es el de Valle de León.

El acuífero consta de dos medios diferenciados: uno granular –tobas semicompactas y rocas de baja a mediana compactación- y otro fracturado. En la porción superior se encuentra el material granular al que le subyace el paquete del medio fracturado que, en conjunto, forman la fosa tectónica conocida como Valle de León, la cual está rellena por rocas sedimentarias de compactación variable; estos paquetes granulares

se encuentran separados por ignimbritas fracturadas, sin que dejen de comunicarse; alcanzan espesores de 200 a 900 m (Ariel Construcciones, 1982).

Prueba L-0488

El 20 de mayo de 1998 se llevó a cabo una prueba de bombeo con un caudal constante de extracción de 1469 m³/día (17 L/s), y una duración de 6 horas. El pozo se perforó a una profundidad de 300 m, el diámetro del ademe fue de 0.51 m. Se reportó el acuífero estudiado como libre y una profundidad al nivel estático de 169.48 m (Ariel Construcciones, 1982). Los datos de configuración de pozo se presentan en la Tabla 18.

Pozo	d(m)	L(m)	r(c)	r(eq)	Q (m ³ /día)	R(m)
Bombeo	300	S.I	0.51	0.51	1468.8	0.51

Tabla 18. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio de León, Guanajuato. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (m³/día) es el caudal de extracción.

En la Figura 36 se muestra el gráfico semilogarítmico de la prueba de bombeo L0488. Se realizó la interpretación mediante CJ en tiempos intermedios. La estimación de los parámetros hidráulicos obtenidos mediante este método se presenta en la Tabla 19. El valor de la función de validez u es 6.7E-04 por lo que se encuentra dentro del rango adecuado. Se obtuvo un valor de transmisividad mediante Cooper Jacob y mediante el promedio de la derivada logarítmica de 13 m²/día; el valor de la conductividad hidráulica calculada fue de 4.4E-02. El valor del coeficiente de Pearson es de 0.9827.

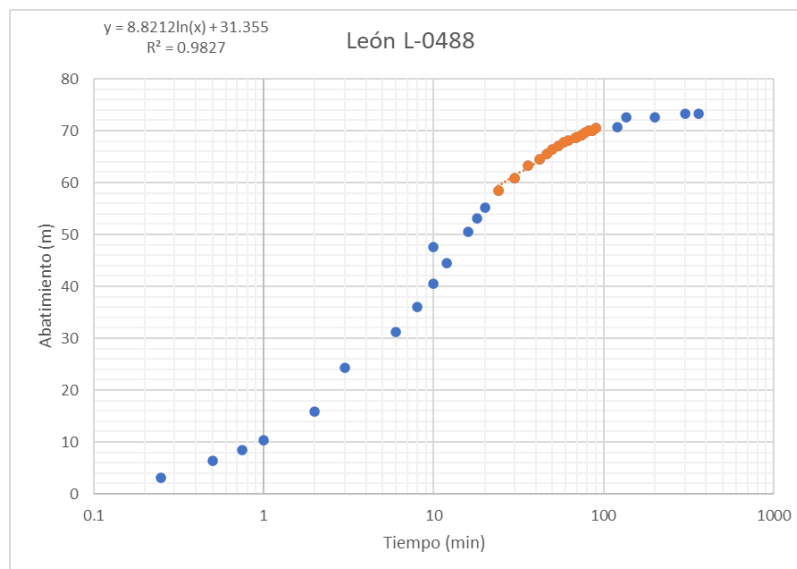


Figura 36. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba L-0488. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

La Figura 37 muestra el análisis de las geometrías de flujo y se observa una corta ventana de tiempo en donde se asocia un flujo radial infinito, con pendiente de la curva derivada igual a cero, que va desde el minuto 20 hasta el minuto 50, es en esta porción donde se estiman los parámetros hidráulicos en el software AquidPlot. En tiempos tardíos se identificó una geometría de flujo que corresponde a un régimen de estado estacionario (pendiente igual a -1) desde el minuto 50 hasta el final de la prueba, que sugiere la presencia de una frontera de carga constante. Se obtuvo un valor de transmisividad de $8 \text{ m}^2/\text{día}$ y de conductividad hidráulica de $2.7\text{E-}02 \text{ m}/\text{día}$.

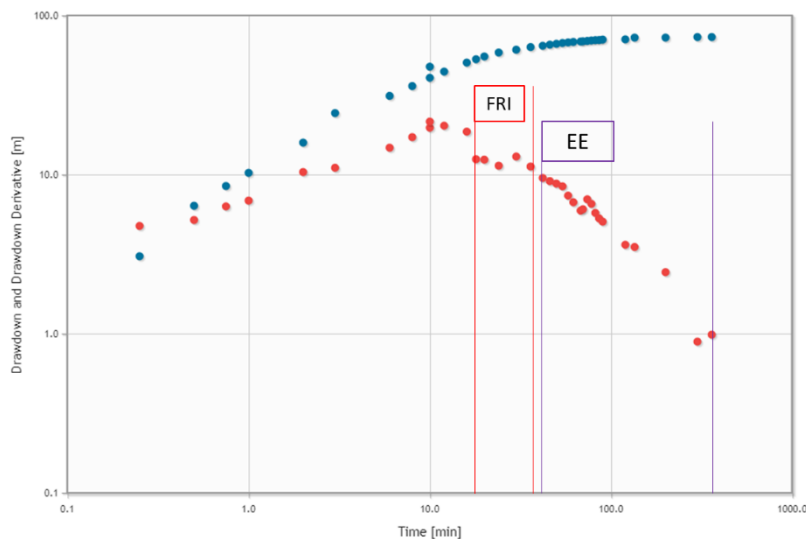


Figura 37. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba L-0488. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI-Flujo Radial Infinito, EE- Estado Estacionario.

En la Figura 38 se realizó con el Software AQTESOLV el ajuste mediante una solución analítica. La forma de la curva derivada parecería indicar que se trata de un acuífero semiconfinado donde la caída es debido al efecto de goteo, sin embargo, el ajuste realizado mediante una solución de acuífero semiconfinado deja fuera una serie de datos que se identificaron con una pendiente de -1 asociada a una frontera de carga constante (ver Figura 37). Esto, aunado a que el autor reportó que se trata de un acuífero libre llevó a reconsiderar el ajuste mediante una solución analítica de acuífero libre, más la consideración de un efecto de carga constante. El resultado obtenido es uno bueno. Se empleó la solución analítica Neuman, con un suavizado de Bourdet $L=0.5$, esta solución considera un flujo no estacionario para un pozo parcial o totalmente penetrante en un acuífero libre homogéneo, anisotrópico, con respuesta retrasada de gravedad. El modelo de Neuman asume un drenaje instantáneo en el nivel freático. La solución también considera una línea fuente para el pozo bombeado y por lo tanto niega un efecto de almacenamiento de pozo (Neuman, 1974). Se obtuvo un valor de transmisividad de $6 \text{ m}^2/\text{día}$, una conductividad hidráulica de $2\text{E-}02 \text{ m}/\text{día}$ y un coeficiente de

almacenamiento de $1.6E-01$. Los parámetros obtenidos mediante este ajuste se muestran en la Tabla 19.

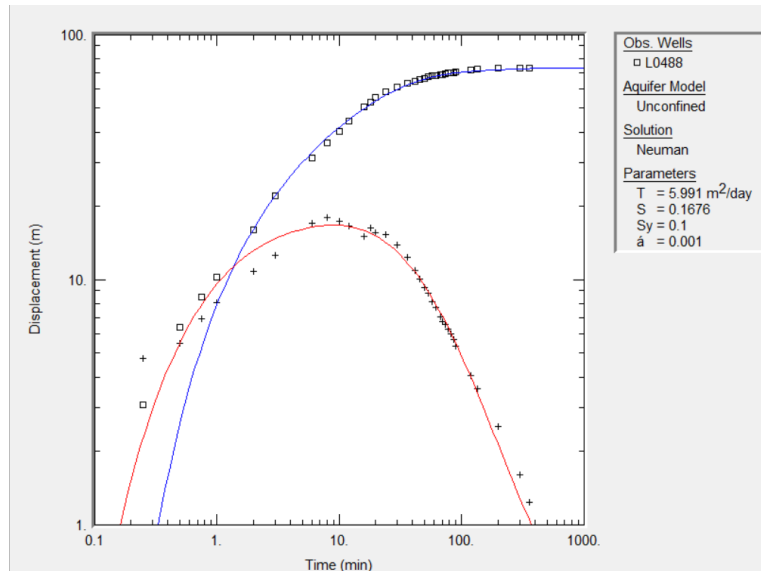


Figura 37. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba L-0488. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la Transmisividad, S es el coeficiente de almacenamiento, Sy es el rendimiento específico y Kz/Kr es la tasa de anisotropía de la conductividad hidráulica. Se aplicó un efecto de carga constante para obtener un mejor ajuste con la solución analítica.

La tabla 19 muestra los parámetros estimados mediante las técnicas anteriores, cabe resaltar que el autor reportó valores de 0.0492 m/día para la conductividad hidráulica y de 6.42 m²/día para la transmisividad. Pese a que no fue posible una estimación del coeficiente de almacenamiento mediante Cooper Jacob en pozos de bombeo, sí que lo fue mediante la solución analítica en AQTESOLV por lo que se consiguió un parámetro extra a los obtenidos en la interpretación original.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	13.2482	0.0441	-	0.00067021
AQTESOLV	5.991	0.01997	0.1676	
AquidPlot	8.141	0.0271	-	
T'	13			

Tabla 19. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba L-0488. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.9 Aguascalientes (Consultores S.A., 1981)

CONAGUA clasifica el acuífero Valle de Aguascalientes como un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar algunos cientos de metros en el centro del valle tectónico. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas con lutitas y limolitas (CONAGUA, 2020a).

El 12 de julio de 1981 la empresa Consultores S.A. efectuó una prueba de bombeo a caudal constante durante 6 horas en un pozo de bombeo. El pozo tiene una profundidad de 200 m, el caudal empleado fue de 1728 m³/día (20 L/s), se reportó una profundidad al nivel estático de 61.72 m (Consultores S.A., 1981). Los datos de configuración de pozo se visualizan en la Tabla 20.

Pozo	d(m)	L(m)	r(c)	r(eq)	Q (m ³ /día)	R(m)
Bombeo	200	S.l.	0.3048	0.3048	1728	0.3048

Tabla 20. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio de Aguascalientes. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (m³/día) es el caudal de extracción.

Se muestra en la Figura 39, el gráfico semilogarítmico de la prueba. se realizó la estimación mediante Cooper Jacob en tiempos intermedios (Pfannkuch et al., 2021). La estimación de parámetros se muestra en la Tabla 21. El valor de u es de 0.15 y no rebasa el límite de 0.2 por lo que cae dentro de un rango adecuado de acuerdo con Alexander & Saar (2012). Se obtuvo un valor de transmisividad mediante Cooper Jacob de 8.5 m²/día, y de 7 m²/día mediante el promedio de la derivada logarítmica y una conductividad hidráulica de 6.1E-02 m/día. El valor del coeficiente de determinación para la curva de ajuste es de 0.9725 por lo que se trata de un buen ajuste.

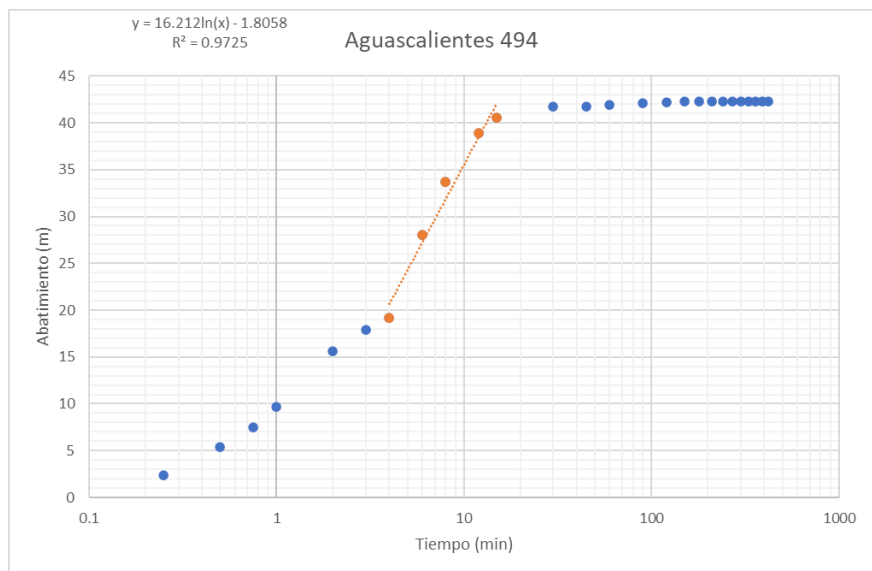


Figura 39. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba 494. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

La Figura 40 muestra el ajuste obtenido mediante AQTESOLV. Se empleó la solución analítica de Moench para acuíferos semiconfinados (Moench, 1985). Se obtuvo un buen ajuste con los datos de campo. Se obtuvo un valor para la transmisividad de $19 \text{ m}^2/\text{día}$, un valor de conductividad hidráulica de 0.14 m/día y un valor para el coeficiente de almacenamiento de $2.5\text{E-}05$. Los parámetros se encuentran sintetizados en la Tabla 21.

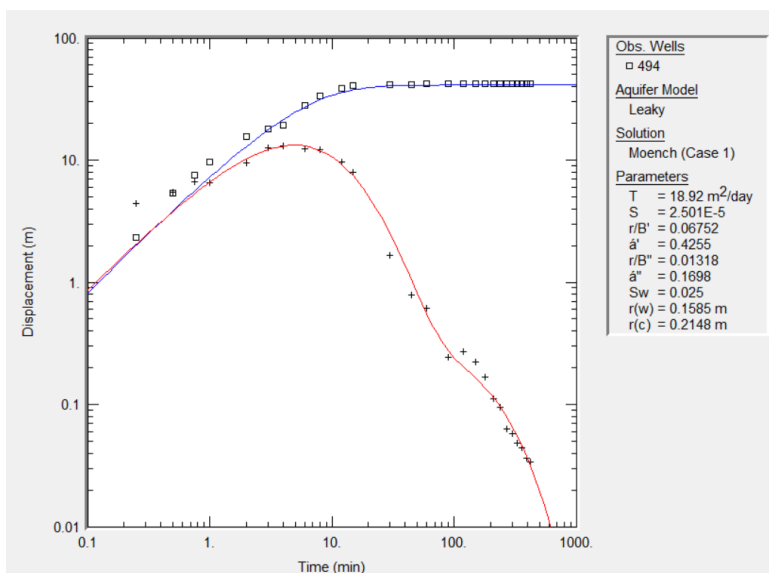


Figura 40. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba 494. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, r/B' es el parámetro adimensional de goteo del primer acuitardo, r/B'' es el parámetro adimensional de goteo del segundo acuitardo. S_w es el factor de daño en pozo, $r(w)$ es el radio del pozo, $r(c)$ es el radio nominal del ademe.

La Figura 41 presenta el gráfico diagnóstico para identificación de régimen de flujo. No se identificaron pendientes en la curva derivada asociables a geometrías de flujo que denoten un régimen de flujo en una ventana de tiempo durante la prueba de bombeo. Se decidió omitir en este caso el análisis del régimen de las geometrías de flujo ya que no son identificables.

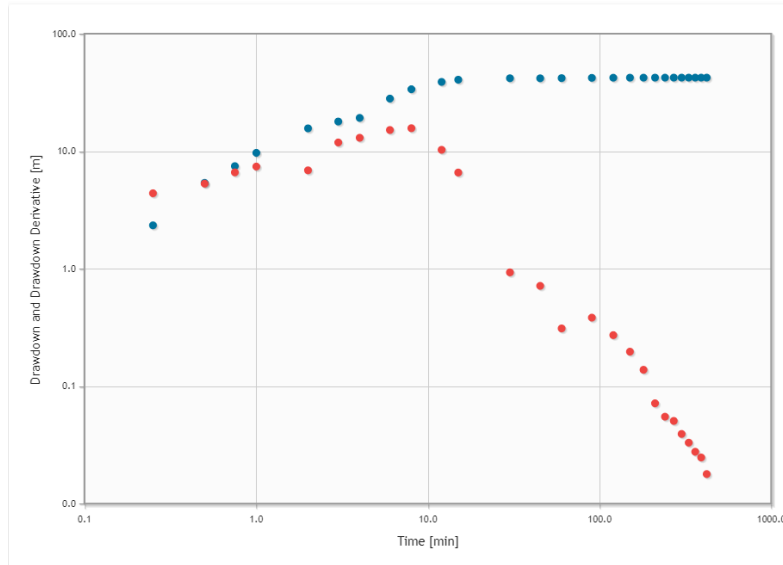


Figura 41. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba 494. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. No se identificaron geometrías de flujo.

En la tabla 21 se muestran los parámetros estimados. El autor reportó un valor de transmisividad de 13 m²/día. Se obtuvo, gracias a la interpretación mediante el ajuste de una curva analítica en AQTESOLV, un valor de coeficiente de almacenamiento.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	8.48	0.06	-	0.16
AQTESOLV	18.92	0.14	2.50E-05	
AquidPlot	8.11	0.06	-	
T'	7			

Tabla 21. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba 494. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.10 Applied Hydrogeology p.172 Fetter (1999)

Un pozo en un acuífero confinado fue bombeado a un caudal de 1210 m³/día (220 gal/min) por 500 min. El acuífero tiene un espesor de 14.6 m (48 ft). Se realizaron las mediciones del abatimiento en un pozo de observación localizado a 251 m (824 ft) de distancia del pozo de bombeo (Fetter, 1999). Los datos de pozo se visualizan en la Tabla 22.

Pozo	d (m)	L (m)	r (c)	r (eq)	R (m)	Q (m ³ /día)
Bombeo	14.6	S.I	0.252	0.252	-	1210
Observación	14.6	S.I	0.252	0.252	251	-

Tabla 22. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (m³/día) es el caudal de extracción.

En la Figura 42 se visualiza el gráfico semilogarítmico de la prueba. Se aplicó Cooper Jacob en tiempos tardíos. Se obtuvo una transmisividad de 118 m²/día mediante Cooper Jacob y de 120 m²/día mediante el promedio de la derivada logarítmica. El valor estimado de la conductividad hidráulica fue de 8 m/día, y el del coeficiente de almacenamiento fue 2.48E-05. Los parámetros hidráulicos se observan en la Tabla 23. El valor de u es de 0.01 por lo que está dentro del rango de validez. El valor del coeficiente de Pearson es de 0.9987 por lo que el ajuste para la estimación mediante Cooper Jacob es bueno.

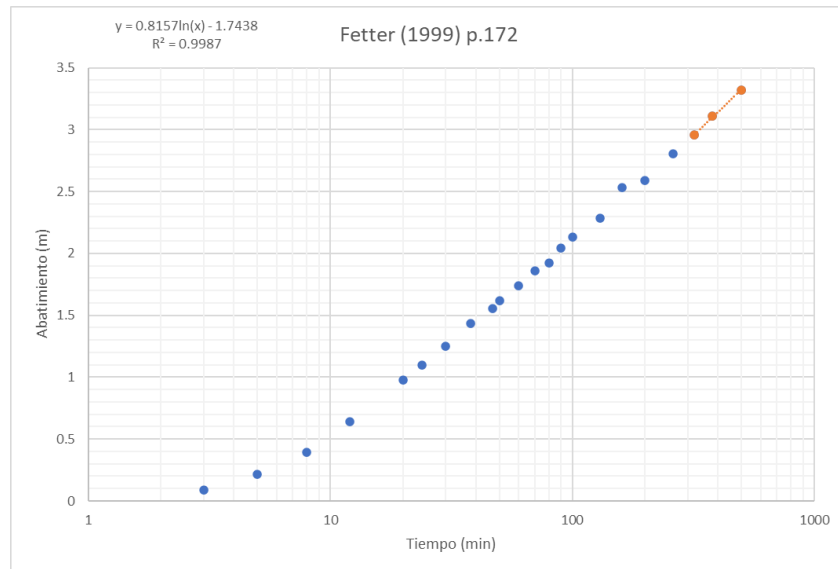


Figura 42. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba p.172. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

En la Figura 43 se muestra el ajuste mediante la solución analítica de Theis/Hantush para acuíferos confinados. Esta solución considera un acuífero confinado, homogéneo de espesor uniforme y de extensión de área infinita con penetración de pozo parcial o total. El ajuste obtenido es muy bueno: la curva analítica se ajusta tanto a los datos de abatimiento como a los de la derivada. Se aplicó un suavizado de Bourdet de L=0.3. Los parámetros obtenidos mediante este enfoque fueron una transmisividad de 125 m²/día, una conductividad hidráulica de 9 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 2.24E-05.

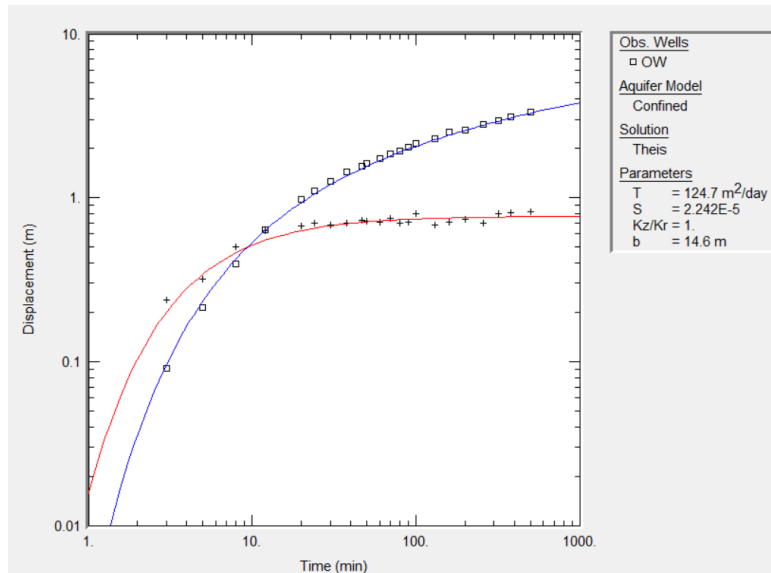


Figura 43. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba p.172. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, Kz/Kr es la tasa de anisotropía, b es el espesor del acuífero.

Finalmente, en la Figura 44 se realiza el estudio de regímenes de flujo. Se observa como la derivada alcanza el régimen de flujo radial infinito en tiempos intermedios, a partir del minuto 30 y se mantiene así durante el resto de la prueba aproximadamente hasta el minuto 600. La presencia del flujo radial infinito involucra un aumento del área transversal de flujo de manera proporcional a la distancia radial. Este tipo de régimen puede asociarse a un flujo cilíndrico radial, que es el tipo de flujo que considera Theis en su solución analítica. Dado que el ajuste obtenido mediante curvas tipo (Figura 43) es bastante bueno, se puede inferir con mucha contundencia la presencia de un flujo cilíndrico-radial. Por lo que es en esta ventana de tiempo en donde es válida la interpretación mediante Cooper Jacob. Se obtuvo un valor de 132 m²/día para la transmisividad, un valor de 9 m/día para la conductividad hidráulica y un valor de 1.76E-05 para el coeficiente de almacenamiento. Estos parámetros hidráulicos se resumen en la Tabla 23.

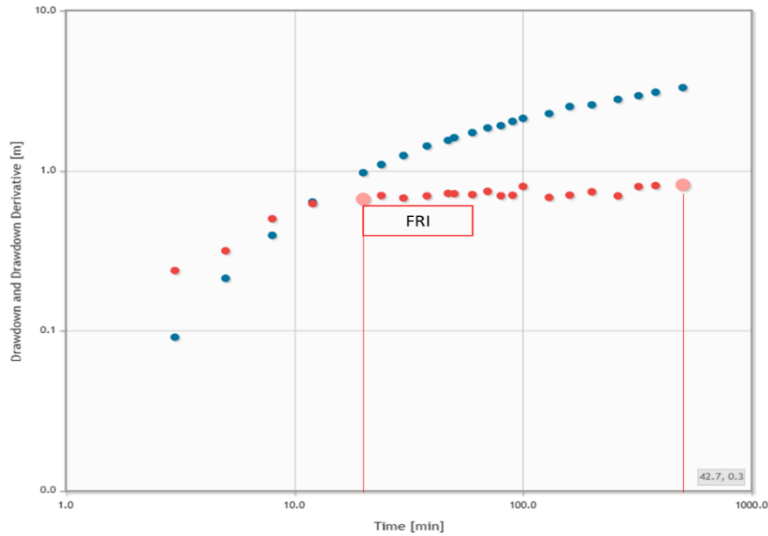


Figura 44. Identificación de geometrías de flujo en AqidiPlot de la prueba p.172. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI-Flujo Radial Infinito.

La Tabla 23 muestra los parámetros hidráulicos estimados obtenidos a partir de las diferentes técnicas. El autor reportó un valor para transmisividad de 130 m²/día, una conductividad hidráulica de 8.8 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 2E-05. Los resultados obtenidos en este análisis se asemejan a los reportados por el autor en un margen de ± 15 m²/día para la transmisividad, ± 1 m/día para la conductividad hidráulica, y en el mismo orden de magnitud para el coeficiente de almacenamiento.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	u
CJ	117.98	8	2.48E-05	0.0149
AQTESOLV	124.7	9	2.24E-05	
AquidPlot	132.16	9.05	1.76E-05	
T'	120.4			

Tabla 23. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba p.172. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.11 Acuífero Spiritwood, Dakota del Norte, EUA (Shaver & Pusc, 1992)

La geología del acuífero Spiritwood está compuesta, en principio por una capa de sedimento glacial (till) de aproximadamente 50 m. el acuífero comienza a estar presente a partir de esta profundidad y está conformado por grava y arena. El espesor varía a lo largo de toda el área que abarca. Se considera en este trabajo un espesor de 15 m. el acuífero está intercalado con el till (ver Figura 45) y como base impermeable se tiene una capa de roca de lutita. Se reportan presencia de barreras hidráulicas longitudinales compuestas de limos y arcilla (Shaver & Pusc, 1992).

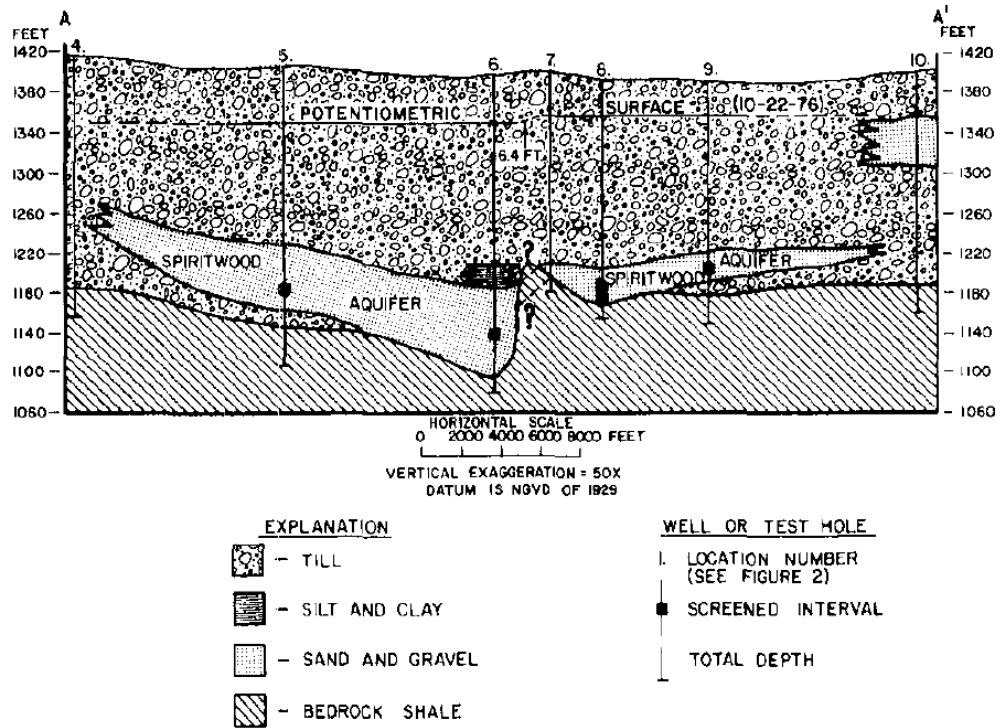


Figura 45. Geología del acuífero Spiritwood. Tomado de Shaver & Pusc (1992).

La prueba de bombeo se realizó en el pozo 8, en el acuífero Spiritwood, en Dakota del Norte, EUA. La duración de la prueba de bombeo fue de 76 horas y se llevó a cabo a caudal constante de 6869 m³/d. Las medidas tiempo-abatimiento se tomaron en los tres pozos de observación 8A, 8B y 8C, localizados al norte del pozo de bombeo a 60.96 m, 152.4 m y 304.8 m, respectivamente. En este trabajo se consideró únicamente los datos correspondientes al pozo de observación 8A. Los parámetros empleados para configurar la prueba se visualizan en la Tabla 24.

Pozo	d (m)	L (m)	r (c)	r (eq)	R (m)	Q (m ³ /día)
Bombeo	15	S.I	0.252	0.252	-	6869
Observación	15	S.I	0.252	0.252	61	-

Tabla 24. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio Spiritwood Aquifer. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (L/s) es el caudal de extracción.

La Figura 46 muestra el gráfico diagnóstico de la prueba 8A, en ella se observa una geometría de flujo radial infinito, un flujo bilineal en tiempos intermedios y un flujo radial infinito seguido de un flujo lineal en tiempos tardíos. La secuencia de parámetro de dimensión n 2-1.5-2 (radial, bilineal, radial), se asocia a medios fracturados en donde el flujo bilineal indica la interacción con una falla (Ferroud et al., 2019). La presencia consecuente del flujo lineal puede asociarse a un paleocanal, hecho que concuerda con el área de estudio dado que se trata de un acuífero valle enterrado (buried-valley aquifer) con presencia de barreras hidráulicas longitudinales y transversales (Shaver &

Pusc, 1992). Se empleó un suavizado de Bourdet $L=0.5$ y se obtuvieron valores de transmisividad, mediante Cooper Jacob de 2031 y 748 $m^2/día$ para la primera y segunda sección del gráfico con flujo radial infinito, respectivamente. Los valores de conductividad hidráulica fueron de 135 y 50 $m/día$ respectivamente. Los valores de coeficiente de almacenamiento fueron $3.19E-04$ y $3.66E-03$. La geometría de flujo lineal permitió calcular como parámetro hidráulico no convencional, el ancho del acuífero canal, obteniendo un valor de 1390 m.

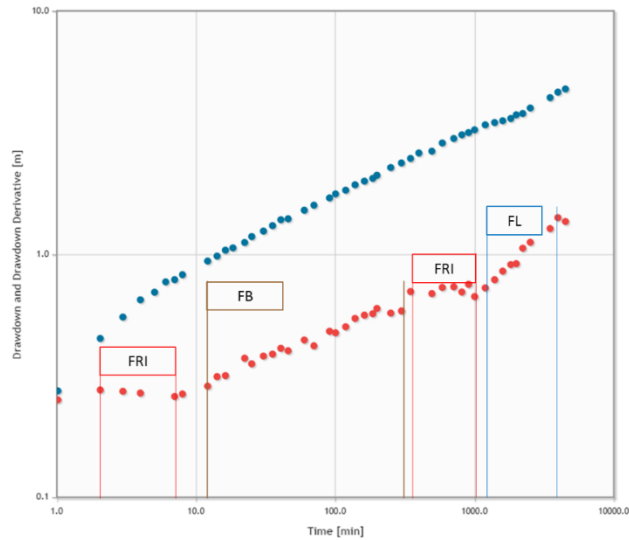


Figura 46. Identificación de geometrías de flujo en AqidiPlot de la prueba OW 8A. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI-Flujo Radial Infinito, FB-Flujo Bilineal, FL-Flujo lineal.

En la Figura 47 se ajustó una solución analítica en AQTESOLV. La solución empleada es la de Moench para acuíferos semiconfinados (Case 2). Solución que al contrario del Caso 1 que considera barreras de flujo constante, esta considera barreras de no flujo. Lo que se correlaciona adecuadamente con la geología del sitio. Se aplicó un suavizado con el algoritmo de Bourdet $L=0.5$. El ajuste obtenido mediante las curvas tipo no es perfecto, esto se debe principalmente a la variedad de geometrías de flujo que presenta la prueba, lo que vuelve complicada que se ajuste una solución analítica que simplifica la geología del acuífero y además el régimen de flujo de la prueba. Se obtuvieron mediante este ajuste valores de 1717 $m^2/día$ para la transmisividad, 114 $m/día$ para la conductividad hidráulica y de $8.95E-07$ para el coeficiente de almacenamiento. Los parámetros hidráulicos obtenidos mediante este enfoque se resumen en la Tabla 25.

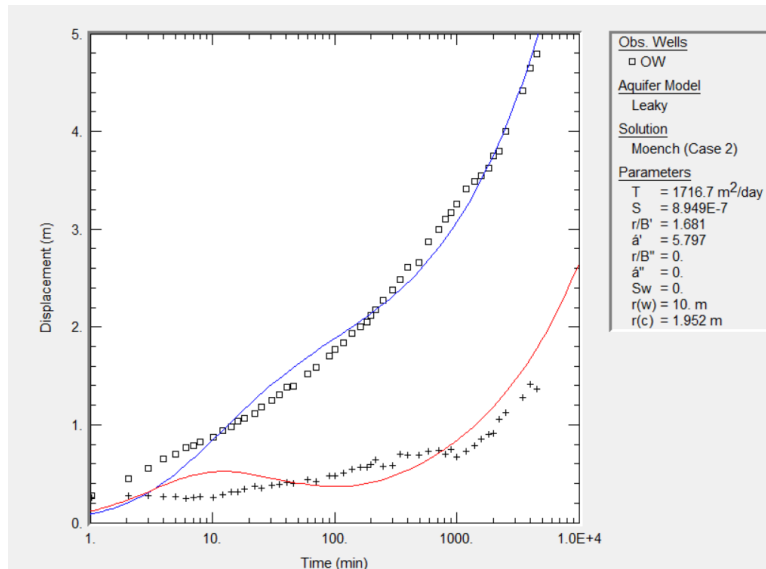


Figura 47. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba 8A. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, r/B' es el parámetro adimensional de goteo del primer acuitardo, r/B'' es el parámetro adimensional de goteo del segundo acuitardo. S_w es el factor de daño en pozo, $r(w)$ es el radio del pozo, $r(c)$ es el radio nominal del ademe.

Finalmente, en la Figura 48 se muestra el gráfico semilogarítmico. Se realizó la interpretación mediante Cooper Jacob en las porciones del gráfico en donde se encuentra un flujo radial infinito. Los resultados de los parámetros hidráulicos obtenidos se muestran en la Tabla 25. Los parámetros están enumerados considerando como primeros los correspondientes al primer flujo radial infinito y así sucesivamente. Se obtuvieron valores de transmisividad mediante Cooper Jacob de 2035 y 749 $m^2/día$, y para la primer y segunda sección respectivamente. Mediante el promedio de la derivada logarítmica los valores obtenidos fueron 2113 y 729 $m^2/día$. Los valores de conductividad hidráulica estimados fueron de 136 y 50 $m/día$; los coeficientes de almacenamiento fueron 3.18E-04 y 3.68E-03. Los coeficientes de Pearson correspondientes al ajuste tienen un valor de 0.9935 y 0.9871 por lo que se trata de buenos ajustes. Los valores de la función u es de 0.102 y 0.019, siendo ambos válidos si consideramos el criterio de Alexander & Saar (2012).

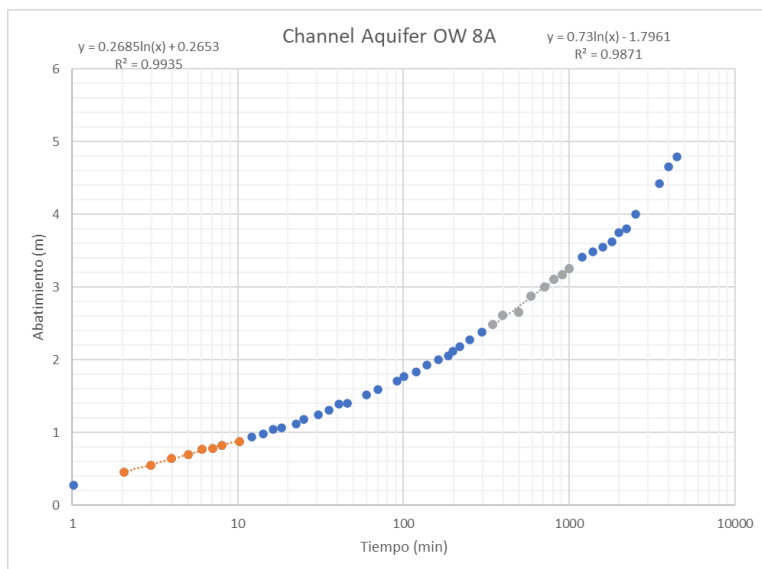


Figura 48. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba OW 8A. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la primera sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob; la gris es la segunda. Se muestran las ecuaciones de la curva de ajuste para la porción naranja y gris además del valor de error R.

La Tabla 25 muestra los parámetros calculados obtenidos mediante la aplicación de las herramientas anteriores. El valor de la transmisividad hidráulica varía de aquellos que son estimados mediante Cooper Jacob y el promedio de la derivada logarítmica y de aquel que es obtenido mediante el ajuste de una solución analítica. La diferencia es de aproximadamente 300 m²/día. En cuanto a la conductividad hidráulica los valores se asemejan más. El coeficiente de almacenamiento obtenido mediante el ajuste de la solución analítica difiere en 3 órdenes de magnitud con aquellos que son obtenidos mediante Cooper Jacob en las diferentes porciones de la prueba, y que a su vez tienen un orden de magnitud que se asemeja más a lo común en acuíferos semiconfinados o confinados.

Metodo	T1 (m2/día)	T2 (m2/día)	K1 (m/día)	K2 (m/día)	S	S2	u1	u2	Ancho Acuífero Canal
CJ	2035	749	136	50	3.18E-04	3.68E-03	0.102	0.019	1390
AQTESOLV	1717	1717	114	114	8.95E-07	8.95E-07			
AquidPlot	2031	748	135	50	3.19E-04	3.66E-03			
T'	2113	729							

Tabla 25. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba OW 8A. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

3.12 Lynden, EUA (Reichhardt & Ebe Engineering & Association, 2007)

El sitio del proyecto está ubicado dentro de la cuenca de drenaje Fishtrap Creek, aproximadamente 2 millas al norte de la ciudad de Lynden. La cuenca Fishtrap Creek se origina en Canadá y está localizada en una planicie glacial, consistente de arenas no consolidadas, limos, y sedimentos de grava que fueron depositados por corrientes de agua emitidas desde el término del avance y retroceso de los glaciares continentales (Reichhardt & Ebe Engineering & Association, 2007). Se reportó la profundidad del nivel estático a 39.5 pies de profundidad.

Durante la perforación del pozo PW3 se encontraron las siguientes capas. La primera de alrededor de unos 30.48 m de gravas y arenas grises con un contenido mínimo de limos. Debajo de esta primera capa, entre los 30.48 m y 94.49 m de profundidad, se encuentra un material gris limo-arcilloso con trazas de arenas. Una tercera secuencia gris, entre los 94.49 m y 143.25 m de profundidad, de gravas y arenas que tienen granulometrías finas a gruesas. La última capa, entre los 143.25 m y 228.6 m de profundidad, es un paquete de intercalaciones de limos y arenas de granulometría fina. La duración de la prueba es de 307 horas. En la Tabla 26 se observan los parámetros de configuración del pozo.

Pozo	d (m)	L (m)	r (c)	r (eq)	R (m)	Q (m ³ /día)
PW3	9.144	3.048	0.0762	0.0762	0.0762	272.55

Tabla 26. Parámetros y configuración de pozos para el área de estudio. d(m) es la longitud de tubería lisa, L(m) es la longitud de tubería ranurada, r(c) es el radio del pozo, r(eq) es el radio del equipo del pozo, R(m) es la distancia radial del pozo de bombeo al pozo de observación. Q (m³/día) es el caudal de extracción.

Prueba PW3

Se trata de un acuífero confinado. En la Figura 49 se muestra el gráfico semilogarítmico de la prueba. Se realizó el ajuste mediante Cooper Jacob en los tiempos tardíos. Los parámetros calculados se muestran en la Tabla 27. Se obtuvo un valor de transmisividad mediante Cooper Jacob y de 24 m²/día. Un valor de conductividad hidráulica de 2 m/día y un valor coeficiente de almacenamiento del orden (10^{-17}) por lo que se infiere un posible daño en el pozo. El valor de la función de validez u es de 0.01, lo que indica que la interpretación mediante Cooper Jacob es válida. El valor del coeficiente de determinación es de 0.9794, hecho que demuestra que el ajuste es aceptable.

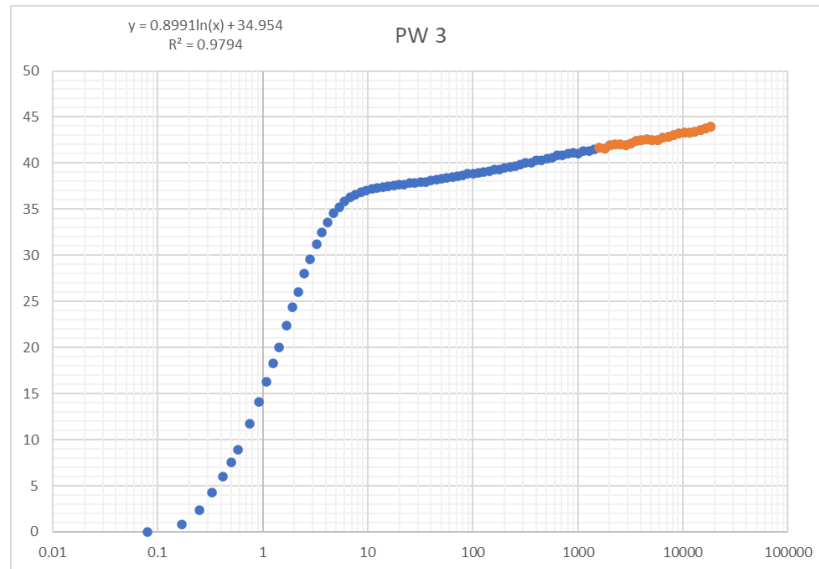


Figura 49. Gráfico semilogarítmico del Tiempo vs Abatimiento de la prueba PW 3. La curva azul representa los valores de la prueba, la curva naranja es la sección del gráfico donde se estiman las propiedades hidráulicas mediante Cooper Jacob. Se muestra la ecuación de la curva de ajuste para la porción naranja y el valor de error R.

Se procedió el análisis con el estudio de las geometrías de flujo en el gráfico diagnóstico de la Figura 51, se analizaron las pendientes de la curva para obtener más información. Se tiene de entrada, desde que inicia la prueba hasta el primer minuto, una pendiente en la curva derivada igual a 1, esto se puede asociar a dos efectos: almacenamiento de pozo y daño de pozo (Renard et al., 2009). Pero el efecto de almacenamiento de pozo queda descartado dado que para que dicha condición funcione la curva de abatimiento debe compartir la misma pendiente al inicio de la prueba, cosa que no ocurre. Se hace más evidente el daño de pozo al ver el gran desfase en metros que hay de la curva derivativa con la de abatimiento en el régimen de flujo radial infinito, identificado en tiempos intermedios a partir del minuto 10 hasta el final de la prueba, además de que el cálculo del coeficiente de almacenamiento arrojó valores del orden de 10^{-16} . Se obtuvo un valor de transmisividad de $24 \text{ m}^2/\text{día}$ y una conductividad hidráulica de $2 \text{ m}/\text{día}$. Fue posible mediante esta herramienta, calcular un factor de daño en pozo igual a 14, el abatimiento adicional de 27 m a causa del daño, y la eficiencia del pozo de 38.73%. el pozo está trabajando a menos del 50% de eficiencia. Estos parámetros se condensan en la Tabla 27.

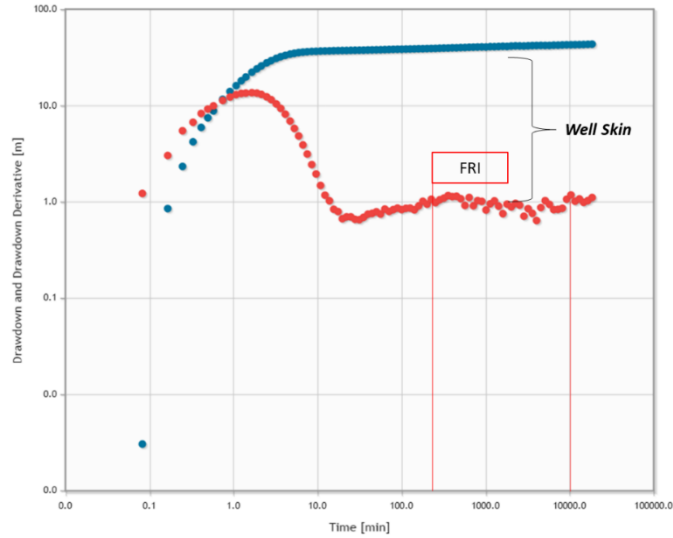


Figura 51. Identificación de geometrías de flujo en AquidPlot de la prueba PW3. La curva azul representa el abatimiento, la curva roja la derivada. FRI-Flujo Radial Infinito. Se identificó un efecto de daño de pozo en tiempos intermedios hasta el final de la prueba.

En la Figura 50 se ajustó la solución analítica de Dougherty-Babu (1984) que considera un flujo transitorio en un pozo total o parcialmente penetrante, con diámetro de pozo finito y con efecto de almacenamiento y daño de pozo en un acuífero confinado, homogéneo e isotrópico. Esta solución también incluye la respuesta retrasada en un pozo de observación (Duffield, 2007a). En este esquema fue posible asociar un factor de daño de pozo para el cálculo de parámetros hidráulicos y de esta manera obtener un coeficiente de almacenamiento libre del efecto de daño de pozo. Se obtuvo una transmisividad de $20 \text{ m}^2/\text{día}$, una conductividad hidráulica de 1.6 m/día y un coeficiente de almacenamiento de $7.09\text{E-}04$. Los parámetros hidráulicos obtenidos se muestran en la Tabla 27.

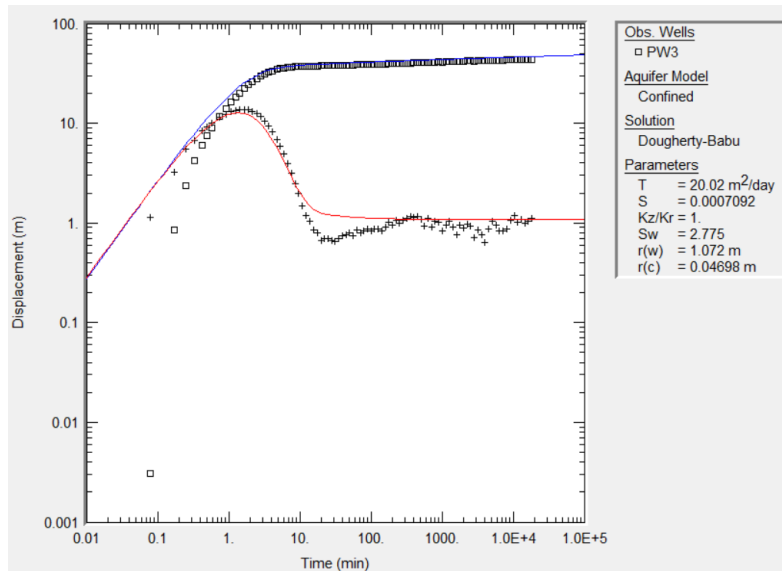


Figura 50. Ajuste de curva tipo en AQTESOLV de la prueba PW3. Los cuadros representan los datos del abatimiento, las cruces los de la derivada. La curva azul y roja es la solución analítica ajustada a la prueba. T es la transmisividad, S el coeficiente de almacenamiento, Kz/Kr es la tasa de anisotropía de la conductividad hidráulica, Sw es el factor de daño en pozo, r(w) es el radio del pozo, r(c) es el radio nominal del ademe.

La Tabla 27 muestra los valores obtenidos mediante los distintos enfoques de este trabajo. Cabe mencionar que el autor del reporte de donde proviene esta prueba no reportó un daño en pozo y tampoco un valor de coeficiente de almacenamiento. El valor de transmisividad reportado por el autor es de 23.56 m²/día, valor que está muy acertado con las estimaciones realizadas. Se identifica un efecto de daño de pozo y eso permite calcular un valor de un coeficiente de almacenamiento real. El valor del factor de daño de pozo es de 2.775 y 14, cifras positivas que indican que se trata de un pozo azolvado. Se obtuvo también el valor de abatimiento adicional a causa del daño en el pozo y el porcentaje de eficiencia del pozo.

Metodo	T (m ² /día)	K (m/día)	S	Skin Well Factor	Abatimiento adicional (m)	Eficiencia del pozo (%)	u
CJ	24	2	7.69E-17	-	27	38.73	0.0149
AQTESOLV	20	1.6	7.09E-04	3			
AquidPlot	24	2	1.01E-16	14			
T'	24			-			

Tabla 27. Parámetros hidráulicos calculados de la prueba PW3. T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, S es el coeficiente de almacenamiento, T' es la transmisividad calculada mediante la derivada logarítmica del abatimiento, u es la función de validez de Cooper Jacob.

4. Conclusiones y recomendaciones

Basado en 15 pruebas de bombeo a caudal constante, se presentó una metodología para el cálculo de parámetros hidráulicos, y para la conceptualización de un acuífero apoyado fuertemente en el uso del análisis secuencial de las dimensiones de flujo de la prueba en cuestión usando la derivada logarítmica del abatimiento. Esta herramienta dilucidó, a lo largo de este trabajo, información sobre el acuífero que podría pasarse por alto si se omitiese su uso, especialmente en acuíferos complejos y heterogéneos. Queda expuesto, mediante algunos ejemplos, cómo los modelos analíticos pueden llegar a idealizar y simplificar la complejidad existente de un acuífero; y también la posibilidad que ofrece el uso de estas herramientas como parte de una metodología para el análisis de pruebas de bombeo cuyo objetivo sea la caracterización de un acuífero, ya que aportará a dicha caracterización algo más relevante sobre la composición del acuífero. Cabe mencionar la practicidad que demuestra tener este método ya que el software AquidDPlot[®] es de licencia libre.

La identificación exitosa de geometrías de flujo estuvo directamente ligada con la calidad de los datos obtenidos en campo, entendiéndose una óptima calidad como un comportamiento de la curva derivada suave y continuo. Pruebas de bombeo como las efectuadas en Ontario, Canadá; CapeCod Massachusetts; o en el acuífero Spiritwood en Dakota del Norte fueron las pruebas con más variedad de geometrías de flujo y claramente identificables. Pruebas con una respuesta clara fueron también observables en los casos de los ejercicios del libro Pozos y acuíferos de Villanueva & Iglesias (1984); en Gridley Illinois (1962); en el ejemplo del libro Applied Hydrogeology (Fetter, 1999); Lynden, EUA (2007), en donde fue posible identificar claramente el flujo radial infinito para el caso de los acuíferos confinados, pero siendo imposible identificarlas para el caso del acuífero semiconfinado del libro pozos y acuíferos. Las pruebas realizadas en México fueron las que mostraron mayor ruido comparadas con las demás, sin embargo, fue posible asociarles regímenes de flujo en algunos casos, como el de la prueba IGC 373 en Celaya donde se identifica un efecto de doble porosidad y después un régimen de flujo lineal. La prueba en León, Guanajuato demostró ser también un ejemplo interesante de conceptualización de acuífero libre a pesar de que la respuesta de la curva derivada parecía ser la de un acuífero semiconfinado. Con las demás pruebas en donde se reportaron acuíferos semiconfinados (Buenavista, Tecamac, Aguascalientes) se tienen geometrías de flujo prácticamente nulas. Se obtuvieron parámetros no convencionales como son el ancho del acuífero canal para el acuífero Spiritwood y el de las pruebas en Ontario Canadá. En Lynden, EUA se identificó un daño de pozo y se calculó el factor de daño de pozo, la eficiencia del pozo y el efecto de abatimiento adicional en metros. En CapeCod Massachusetts fue posible identificar distintos regímenes de flujo radial infinito en donde se estimaron propiedades hidráulicas para cada uno, siendo ventanas estables en tiempo y espacio que reflejan heterogeneidad en el sistema acuífero. Para los casos de acuíferos confinados, la identificación se limita a

un claro régimen de flujo radial infinito, ventana en la que se procedió a calcular los parámetros hidráulicos.

Las principales limitaciones de este estudio están relacionadas a la cantidad y calidad de los datos para la interpretación del análisis de las geometrías de flujo. Muchas pruebas fueron descartadas de este estudio debido al ruido que presentaba su señal derivada. Sin embargo, cabe mencionar que existen diversas herramientas que permiten suavizar el ruido de la curva derivada tales como el algoritmo de diferenciación de Bourdet (1989), la convolución y deconvolución (Gringarten, 2008), y herramientas más recientes como el uso B-Splines con nodos libres (Tago & Hernández-Espriú, 2018), pero el alcance de este trabajo no consideró más que el suavizado de Bourdet. En resumen, si se cuenta con datos de calidad -sin ignorar que siempre es posible mejorar la calidad de los datos para su procesamiento efectivo mediante la aplicación de las técnicas anteriormente descritas- el análisis de geometrías de flujo puede mejorar la caracterización de un acuífero o sistema acuífero.

Surgen varios caminos a partir de la realización de este trabajo. Se puede ahondar en el estudio de una dimensión de flujo específica e investigar a qué regímenes de flujo se asocia en diferentes configuraciones geológicas estructurales. Hay muy poca información de los valores de dimensión de flujo n fraccionarios, por lo que se abre toda una amplia gama de escenarios por descifrar y asociar a estos valores de n , haciendo esto se vuelve a ampliar el escenario con nuevas combinaciones secuenciales de geometrías de flujo. Un porcentaje considerable de las pruebas estudiadas fueron efectuadas hace más de 20 años, por lo que también se vuelve interesante la aplicación del análisis secuencial de geometrías de flujo para las mismas pruebas si se efectuaran hoy en día, ¿cuál sería la evolución de las geometrías de flujo? Son cuestiones a las cuales vale la pena dedicar un tiempo para obtener su respuesta.

Pese a que existen limitaciones en este trabajo en cuanto a la dependencia de datos de calidad, y de que aún hay mucho por investigar en la teoría de las dimensiones de flujo, específicamente los valores de n fraccionarios, en principio se buscó demostrar y resaltar las cualidades que el método tiene para ofrecer en la conceptualización de un acuífero o sistema acuífero, resultando en una visión más completa, integral, de calidad e informativa sobre las características del acuífero que no se limita a la mera obtención de parámetros hidráulicos convencionales sino que también permite la integración de mayor información relevante mediante la identificación de regímenes de flujo que señalan condiciones hidrodinámicas asociables a estructuras internas del sistema acuífero, o efectos externos influyendo sobre él. Además de que permite en algunos casos obtener parámetros hidráulicos no convencionales que robustecen la interpretación y conceptualización del sistema acuífero comparándolo con un análisis convencional.

5. Referencias citadas

- Alexander, S. C., & Saar, M. O. (2012). Improved Characterization of Small “u” for Jacob Pumping Test Analysis Methods. *Ground Water*, 50(2), 256–265. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00839.x>
- Ariel Construcciones, S. A. (1982). *Actualización del Estudio Geohidrológico del Valle de León, Gto.*
- Ariel Consultores, S. A. (2007). *Pruebas de Bombeo en Pozos de la Cuenca del Valle de México.*
- Barker, J. A. (1988). A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resources Research*, 24(10), 1796–1804. <https://doi.org/10.1029/WR024i010p01796>
- Beauheim, R. L., Roberts, R. M., & Avis, J. D. (2004). Well testing in fractured media: Flow dimensions and diagnostics plots. *Journal of Hydraulic Research*, 42(EXTRA ISSUE), 69–76. <https://doi.org/10.1080/00221680409500049>
- Behmel, S., Damour, M., Ludwig, R., & Rodriguez, M. J. (2016). Water quality monitoring strategies — A review and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 571, 1312–1329. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.235>
- Bevan, M. J., Endres, A. L., Rudolph, D. L., & Parkin, G. (2005). A field scale study of pumping-induced drainage and recovery in an unconfined aquifer. *Journal of Hydrology*, 315(1–4), 52–70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.006>
- Bourdet, D., Ayoub, J. A., & Pirard, Y. M. (1989). Use of pressure derivative in well-test interpretation. *SPE Reprint Series*, 57 PART 1, 83–92. <https://doi.org/10.2118/12777-pa>
- Bruin, J., Hudson, H. E., & Ackermann, W. C. (1955). *Report of Investigation 25 State of Illinois Department of Registration and Education.*
- Cello, P. A., Walker, D. D., Valocchi, A. J., & Loftis, B. (2009). Flow Dimension and Anomalous Diffusion of Aquifer Tests in Fracture Networks. *Vadose Zone Journal*, 8(1), 258–268. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0040>
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Valle de Celaya (1115), Estado de Guanajuato.*
- CONAGUA. (2016). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Cuautitlán-Pachuca, clave 1508, En el Estado de México, Región Hidrológica-Administrativa Aguas del Valle de México.* DOF. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5452613

- CONAGUA. (2020a). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Valle de Aguascalientes (0101), Estado de Aguascalientes.*
- CONAGUA. (2020b). *Actualización de la Disponibilidad Medial Anual de Agua en el Acuífero Soltepec (2902), Estado de Tlaxcala.*
- Consultores S.A. (1981). *Actualización del Estudio Geohidrológico en los Valles de Aguascalientes-Chicalote-Calvillo y Venadero, en el Estado de Aguascalientes.*
- Cooper, H. H., & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 27(4), 526–534. <https://doi.org/10.1029/TR027i004p00526>
- Duffield, G. M. (2007a). *AQTESOLV for Windows*. Version.
- Duffield, G. M. (2007b). *AQTESOLV for Windows Version 4.5 User's Guide*. In *Software Manual* (pp. 1–530).
- Escobar, F. H., Corredor, C. M., Gomez, B. E., Cantillo, J. H., & Prent, L. A. (2012). Pressure and pressure derivative analysis for slanted and partially penetrating wells. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(8), 932–938.
- Escobar, F. H., & Montealegre M, M. (2007). A complementary conventional analysis for channelized reservoirs. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(3 SE-Scientific and Technological Research Articles), 137–146. <https://doi.org/10.29047/01225383.482>
- Ferroud, A., Chesnaux, R., & Rafini, S. (2018). Insights on pumping well interpretation from flow dimension analysis: The learnings of a multi-context field database. *Journal of Hydrology*, 556, 449–474. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.008>
- Ferroud, A., Rafini, S., & Chesnaux, R. (2019). Using flow dimension sequences to interpret non-uniform aquifers with constant-rate pumping-tests: A review. *Journal of Hydrology X*, 2, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100003>
- Fetter, C. W. (1999). *Applied Hydrogeology*.
- Gringarten, A. C. (2008). From straight lines to deconvolution: The evolution of the state of the art in well test analysis. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 11(1), 41–62. <https://doi.org/10.2118/102079-pa>
- Hantush, M. S. (1960). *Middle Pandad Water*. 65(1), 3713–3725.
- Hantush, M. S. (1961). Aquifer tests on partially penetrating wells. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(5), 171–195.

- Hernández-Espriú, A., Gómez-Espinoza, V., Cruz, A., Riestra, E., & Pérez-Márquez, R. (2018). *AquiDPlot Suite*.
- IGC. (1999). *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Celaya*.
- Kuusela-Lahtinen, A., Niemi, A., & Luukkonen, A. (2003). Flow Dimension as an Indicator of Hydraulic Behavior in Site Characterization of Fractured Rock. *Groundwater*, 41(3), 333–341. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02602.x>
- Leveinen, J., Rönkä, E., Tikkanen, J., & Karro, E. (1998). Fractional flow dimensions and hydraulic properties of a fracture-zone aquifer, Leppävirta, Finland. *Hydrogeology Journal*, 6(3), 327–340. <https://doi.org/10.1007/s100400050156>
- MacFarlane, D. S., Cherry, J. A., Gillham, R. W., & Sudicky, E. A. (1983). Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study. 1. Groundwater flow and plume delineation. *Journal of Hydrology*, 63(1–2), 1–29. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90221-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90221-4)
- Moench, A. F. (1984). Double-Porosity Models for a Fissured Groundwater Reservoir. *Water Resources Research*, 20(7), 831–846.
- Moench, A. F. (1985). Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers. *Water Resources Research*, 21(August), 1121–1131.
- Moench, A. F. (1997). Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water table aquifer. *Water Resources*, 33(6), 1397–1407.
- Moench, A. F., Garabedian, S. P., & LeBlanc, D. R. (2001). Estimation of hydraulic parameters from an unconfined aquifer test conducted in a glacial outwash deposit, Cape Cod, Massachusetts. In *US Geological Survey Professional Paper* (Issue 1629).
- Neuman, S. P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, 8(4), 1031–1045. <https://doi.org/10.1029/WR008i004p01031>
- Neuman, S. P. (1974). Effect of Partial Penetration on Flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response. *Water Resources Research*, 10(2).
- Pfannkuch, H. O., Mooers, H. D., Siegel, D. I., Quinn, J. J., Rosenberry, D. O., & Alexander, S. C. (2021). Review: “Jacob’s Zoo”—how using Jacob’s method for aquifer testing leads to more intuitive understanding of aquifer characteristics. *Hydrogeology Journal*, 29(6), 2001–2015. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02363-7>

- Rafini, S., & Larocque, M. (2012). Numerical modeling of the hydraulic signatures of horizontal and inclined faults. *Hydrogeology Journal*, 20(2), 337–350. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0812-4>
- Reichhardt & Ebe Engineering, Inc., & Association, D. W. (2007). *Installation and Testing of Production Well PW-3*.
- Renard, P., Mejias, M., & Glenz, D. (2009). Understanding diagnostic plots for well-test. *Journal of Hydrogeology*, 3, 12.
- Rohatgi, A. (2014). WebPlotDigitizer user manual version 3.4. In URL <http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/app> (pp. 1–18).
- Schwartz, F. W., & Zhang, H. (2002). *Fundamentals of ground water*. John Wiley & Sons.
- Shaver, R. B., & Pusc, S. W. (1992). *Hydraulic Barriers in Pleistocene Buried Valley Aquifers*.
- Tago, J., & Hernández-Espriú, A. (2018). A B-Spline Framework for Smooth Derivative Computation in Well Test Analysis Using Diagnostic Plots. *Groundwater*, 56(1), 131–142. <https://doi.org/10.1111/gwat.12579>
- Tartakovsky, G. D., & Neuman, S. P. (2007). Three-dimensional saturated-unsaturated flow with axial symmetry to a partially penetrating well in a compressible unconfined aquifer. *Water Resources Research*, 43(1), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2006WR005153>
- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 16(2), 519–524. <https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.
- Villanueva Martínez, M., & Iglesias López, A. (1984). Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. In *Instituto Geológico Y Minero de España*.
- Walker, D. D., & Roberts, R. M. (2003). Flow dimensions corresponding to hydrogeologic conditions. *Water Resources Research*, 39(12), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2002WR001511>
- Walton, W. (1962). Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. *Illinois State Water Survey Bulletin*, 49, 81.