



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**AquiDplot: Hoja de cálculo interactiva para la
interpretación de pruebas de bombeo en acuíferos
usando análisis derivativos y gráficos de diagnóstico**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de
Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Victor Manuel Gómez Espinosa

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dr. José Antonio Hernández Espriú





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

Este documento representa la contribución No. 22 del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos en la evaluación cuantitativa de acuíferos.

This document represents the contribution No. 22 of the Hydrogeology Group, Faculty of Engineering (UNAM) as part of our scientific contribution and human resources development in quantitative groundwater hydrology.

AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN112815, “Interpretación avanzada de pruebas hidráulicas en acuíferos, integrando técnicas analíticas, simulación numérica y metodologías adaptadas de la Ingeniería Petrolera”, a cargo del Dr. José Antonio Hernández Espriú. Particularmente agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida que me permitió culminar la realización de este material didáctico.

AGRADECIMIENTOS

A mis mejores amigos, Héctor Gómez y Leticia Espinosa, a quienes agradezco enseñarme el valor de la amistad, su cariño, los consejos y el apoyo incondicional que me han brindado siempre.

A mis abuelos por mostrarme la humildad y el valor del esfuerzo ante la adversidad.

Al Dr. Leopoldo Gómez por sus consejos y por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Antonio Hernández, por la confianza, los consejos y sobretodo la oportunidad de involucrarme en este proyecto del que he aprendido mucho.

A los doctores Iván Guerrero, Josué Tago y al ingeniero Israel Castro por sus contribuciones a la realización de este trabajo.

Índice

	Página
Lista de tablas.....	6
Lista de figuras	7
1. Introducción.....	8
2. AquiDplot con aplicaciones docentes.....	10
3. AquiDplot aspectos generales	13
3.1. Desarrollo de AquiDplot.....	13
3.2. Descripción de AquiDplot	15
3.3. Modelos y soluciones analíticas de AquiDplot	19
3.4. Limitaciones.....	25
4. Ejemplo de aplicación.....	28
4.1. Resultados y comparación con software comercial.....	35
5. Conclusiones y recomendaciones.....	37
6. Referencias citadas	38

Lista de tablas

Tabla 1 Comparación de AquiDplot con el software comercial.	9
Tabla 2 Aplicación de AquiDplot a las asignaturas de los programas académicos de licenciatura 2010 ¹ y 2016 ² de la Facultad de Ingeniería (UNAM).	11
Tabla 3 Aplicación de AquiDplot a los programas académicos de especialidad y maestría.....	12
Tabla 4 Modelos directos y parámetros según la geometría o régimen de flujo en ingeniería petrolera y en hidrogeología.	20
Tabla 5 Términos equivalentes en ingeniería petrolera y en hidrogeología.....	21
Tabla 6 Resumen de diagnóstico del régimen o geometría de flujo, significado y parámetros.....	24
Tabla 7 Listado de acrónimos.....	27
Tabla 8 Ejemplo 1. Resumen comparativo de los resultados obtenidos con AquiDplot y software comercial.....	36

Lista de figuras

Figura 1 a) Formularios de AquiDplot; b) módulos de AquiDplot	14
Figura 2 Menu para iniciar nuevo proyecto o continuar trabajando con uno previamente cargado.....	15
Figura 3 Formulario de datos: a) Tipo de prueba; b) unidades, c) información del acuífero, pozo y bombeo..	16
Figura 4 Formulario para importar datos.....	17
Figura 5 Gráficos en AquiDplot: a) Gráfico diagnóstico; b) Gráfico especializado.....	17
Figura 6 Herramientas en el gráfico diagnóstico: a) volver al menu; b) cambiar tipo de vista, c) activar o desactivar el abatimiento y/o derivada; d) zoom, cálculo de pendientes, análisis, reporte.....	18
Figura 7 Formulario de análisis: suavizado, geometrías de flujo, estimación de parámetros	18
Figura 8 Formulario de modelos y parámetros de flujo.....	18
Figura 9 Ejemplo 1. Nuevo proyecto.....	28
Figura 10 Ejemplo 1. a) Tipo de prueba; b) unidades; c) datos del acuífero, pozo y bombeo	29
Figura 11 Ejemplo 1. Importar datos: a) Hoja, botón importar datos y botón análisis; b) formulario para importar datos.....	30
Figura 12 Ejemplo 1. Análisis: a) suavizado; b) inspección visual de las geometrías de flujo; c) estimación de parámetros.....	31
Figura 13 Ejemplo 1. Gráfico diagnóstico: a) sin suavizado; b) con suavizado; c) inspección visual de geometrías de flujo; d) ajuste lineal del rango de datos seleccionado y dimensión de flujo; e) Gráfico especializado: ajuste lineal del rango de datos seleccionado	32
Figura 14 Ejemplo 1. Modelos/parametros	33
Figura 15 Ejemplo 1. Cálculo de la transmisividad con: a) Renard (2009); b) Cooper and Jacob (1946)	33
Figura 16 Ejemplo 1. Selección de carpeta para guardar reporte	34
Figura 17 Ejemplo 1. Reporte	34
Figura 18 Ejemplo 1. Resultados con AQTESOLV con el modelo de Cooper and Jacob (1946)	35
Figura 19 Ejemplo 1. AquiferTest: a) Diagnóstico Graph; b) Resultados con con el modelo de Cooper and Jacob (1946)	35

Introducción

1. Introducción

En ingeniería petrolera, la interpretación de las pruebas de pozos mediante el gráfico diagnóstico, que es un gráfico en escala log-log de la presión y su derivada, se ha convertido en el estándar para la industria. Sin embargo, en hidrogeología recientemente ha empezado a ser utilizada como herramienta para interpretar las pruebas de bombeo pero su impacto no ha sido el mismo (Beauheim et al. 2004; Renard et al. 2009; Hernández-Espriú 2015; Sun et al. 2015; Giese et al. 2017).

Las técnicas de interpretación tuvieron sus comienzos en hidrogeología, con métodos como las curvas tipo (Theis 1935), los modelos lineales (Cooper and Jacob 1946) y posteriormente analizando la derivada (Chow 1952), que realmente comenzó a cobrar importancia gracias a los diversos trabajos de Bourdet y colaboradores (Bourdet et al. 1983; Bourdet et al. 1989) y que ha sido popularizado en una gran cantidad de libros y artículos (Earlougher 1977; Bourdet 2002; Hosseinpour-Zonoozi et al. 2006; Gringarten 2008; Ahmed and Meehan 2012).

En hidrogeología, las pruebas de bombeo son importantes para ayudar a caracterizar el acuífero permitiendo obtener parámetros básicos como la transmisividad, conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, así como información relevante acerca del estado del pozo y las fronteras. En cuanto a software para interpretar estas pruebas mediante el gráfico diagnóstico y la derivada como herramientas, existen softwares comerciales entre los que destacan AquiferTest (Waterloo-Hydrogeologic) y AQTESOLV (HydroSOLVE Inc.). Sin embargo, como herramientas para enseñar el método tienen dos principales desventajas:

1. No hay un procedimiento lógico y ordenado para aplicar la derivada, por lo que el proceso de aprendizaje puede no ser claro.
2. El software al ser comercial tiene características limitadas.

[AquiDplot](#) no fue desarrollado como competencia a los programas comerciales, sino que aparece como respuesta a los problemas anteriores por tratarse de una herramienta computacional libre, gratuita y fácil de utilizar. Ésta fue desarrollada principalmente con fines docentes, para facilitar el aprendizaje o enseñanza de la interpretación de pruebas de bombeo utilizando el gráfico diagnóstico y así ayudar a extender la aplicación de este método en los actuales y futuros profesionales dedicados a las aguas subterráneas.

En la Tabla 1 se muestra un resumen comparativo de las características de [AquiDplot](#) con respecto al software comercial.

Introducción

Características	AquiferWin32 ⁵	AquiferTest	AQTESOLV	AquiDplot
Precio versión estándar (dólares)	\$650	\$895	\$400	Gratis
Limitaciones de la versión Demo	Información no detallada	1. 15 días de prueba	1. No hay límite de tiempo 2. No permite imprimir resultados, guardar archivos y modulo para evaluar infiltración	No hay limitaciones
Análisis derivativos (Bourdet)	Sí	Sí	Sí	Sí
Análisis de recuperación (Agarwal)	Si (NO Agarwal)	Sí	Sí	Sí
1 sólo pozo	Sí	Sí	Sí	Sí
Múltiples pozos	Sí	Sí	Sí	No
Gasto constante	Sí	Sí	Sí	Sí
Gasto variable	Sí	Sí	Sí	No
Gráficos especializados	No	No	Sí	Sí
Curvas tipo y ajuste automático	Sí	Sí	Sí	No
Confinado	Sí	Sí	Sí	Sí
Semi confinado	Sí	Sí	Sí	No
Libre	Sí	Sí	Sí	No
Doble porosidad	Sí	Sí	Sí	No
Fractura única	No	Sí	Sí	Sí
Efectos de pozo	No	Sí	Sí	Sí
Dimensiones de flujo	No	No	No	Sí
# de métodos disponibles de suavizado de la derivada	Información no detallada	3	4	1
# de modelos/parámetros disponibles	14	17	35	10
Estimación de parámetros convencionales ³	Sí	Sí	Sí	Sí
Estimación de parámetros no convencionales ⁴	No	No	Algunos	Sí

Tabla 1 Comparación de AquiDplot con el software comercial. (Elaborada con datos de <https://www.waterloohydrogeologic.com/aquifertest/>, <http://www.aqtesolv.com/>, <http://www.groundwatersoftware.com/aquifertest.htm>⁵)

*Parámetros convencionales:*³ Transmisividad, coeficiente de almacenamiento.

*Parámetros no convencionales:*⁴ daño, almacenamiento de pozo, eficiencia, índice de productividad, tasa de anisotropía, ancho de canal, conductividad hidráulica de la fractura, área de drenaje, distancia a la frontera, radio de investigación (Ver Tabla 4 y Tabla 7).

2. AquiDplot con aplicaciones docentes

En la literatura se han revisado las ventajas que las hojas de cálculo tienen en la docencia de ciencias como matemáticas, física, química. Entre las principales ventajas se encuentra que son interactivas, permite a los estudiantes control sobre su propio aprendizaje ya que pueden resolver diversos tipos de problemas sin la necesidad de saber programar ([Vacher and Lardner 2010](#)).

En el caso de geociencias existen diversos trabajos, sobre la aplicación de las hojas de cálculo en la docencia, en las que se ha demostrado que utilizando estas, se ha mejorado el aprendizaje de los alumnos y que es ampliamente recomendable aplicarlas en proyectos, ejercicios de campo y en clases ([Tinker 1989](#); [Hudak 1996](#); [Marshall et al. 2015](#)).

En cuanto a las hojas de cálculo programables, como lo es [AquiDplot](#), se menciona que alguna de las ventajas es que permite al estudiante aprender las funcionalidades básicas de las hojas de cálculo, aprender o mejorar sus habilidades en programación, puesto que este tipo de hojas son fácilmente programables, es decir permiten gastar más tiempo comprendiendo los fundamentos de los modelos y las matemáticas involucradas que aprendiendo lenguajes de programación complejos ([Roberts 2000](#); [Vacher 2000](#); [Devlin et al. 2012](#)).

Existen diversas aplicaciones de las hojas de cálculo como apoyo a la docencia, como auxiliar en la interpretación geoquímica en geotermia ([Powell and Cumming 2010](#)), en libros relacionados a la ingeniería de producción petrolera como ayuda en los ejemplos ([Guo 2011](#)), en interpretación de pruebas de bombeo, hay aportes básicos que ayudan al estudio de los modelos de [Theis \(1938\)](#) y [Cooper and Jacob \(1946\)](#) principalmente, aunque ninguno de estos involucra análisis derivativos ([Gao et al.](#); [Molano; USGS; Leelaruban and Padmanabhan 2013](#)).

Entonces, el desarrollo de una hoja de cálculo para interpretar pruebas de pozos, como [AquiDplot](#), beneficiaría en la docencia de todas las asignaturas de los programas de estudio de licenciatura de la [Facultad de Ingeniería](#) de la [UNAM](#) que estén relacionadas a pruebas de pozos en acuíferos, yacimientos geotérmicos y yacimientos de hidrocarburos. Como se puede observar en la Tabla 2, [AquiDplot](#) beneficiaría a los alumnos y profesores de 13 asignaturas, 5 carreras de los planes de estudio de licenciatura 2010 y 2016.

Adicionalmente se podría beneficiar también a programas de especialidad y de maestría de la [UNAM](#) (Tabla 3) así como prácticamente cualquier programa del mundo que esté relacionado al estudio de las aguas subterráneas, exploración y explotación de recursos naturales ya que es una herramienta libre, intuitiva, sencilla de utilizar sin necesidad de leer un manual y está en inglés.

AquiDplot con aplicaciones docentes

Asignaturas	Temas	Carreras en las que se imparte
Agua subterránea ²	Cuantificación del agua subterránea	Ingeniería Civil
Hidrología ¹	Introducción al estudio del agua subterránea.	Ingeniería Civil
Abastecimiento de agua potable y alcantarillado ¹	Obras de captación de aguas subterráneas.	Ingeniería Civil
Hidrogeología ^{1,2}	Determinación de parámetros hidráulicos.	Ingeniería Geofísica Ingeniería Geológica Ingeniería Petrolera Ingeniería de Minas y Metalurgia
Hidrogeología de contaminantes ^{1,2}	Metodología para caracterizar zonas contaminadas.	Ingeniería Geofísica Ingeniería Geológica
Exploración y evaluación de aguas subterráneas ²	Relaciones agua dulce-agua salada: acuíferos costeros	Ingeniería Geológica
Ingeniería de yacimientos geotérmicos ¹	Mediciones y pruebas en pozos geotérmicos.	Ingeniería Petrolera
Caracterización dinámica de yacimientos ^{1,2}	Metodología de la interpretación de pruebas de presión. Análisis integral de la información. Aplicaciones especiales del proceso de caracterización dinámica.	Ingeniería Petrolera
Productividad de pozos ^{1,2}	Factor de daño y su relación con el comportamiento de afluencia.	Ingeniería Petrolera
Ingeniería de yacimientos de gas ^{1,2}	Pruebas de presión producción en yacimientos de gas.	Ingeniería Petrolera
Caracterización estática y dinámica de YNF ^{1,2}	Pruebas de presión en yacimientos naturalmente fracturados.	Ingeniería Petrolera
Yacimientos de gas de baja permeabilidad ^{1,2}	Evaluación de los fracturamientos hidráulicos.	Ingeniería Petrolera
Fracturamiento hidráulico ^{1,2}	Evaluación post-fracturamiento.	Ingeniería Petrolera

Tabla 2 Aplicación de AquiDplot a las asignaturas de los programas académicos de licenciatura 2010¹ y 2016² de la Facultad de Ingeniería (UNAM).

AquiDplot con aplicaciones docentes

Programa académico	Campo del conocimiento	Campo disciplinario
Especialidad en Ingeniería	1. Ingeniería Civil	1. Hidráulica
Maestría en Ingeniería	1. Ingeniería civil 2. Ingeniería ambiental 3. Ingeniería en exploración y explotación en recursos naturales	1. Hidráulica 2. Suelo y aguas subterráneas 3. Yacimientos
Maestría en Ciencias de la tierra	1. Exploración, aguas subterráneas, modelación y percepción remota	

Tabla 3 Aplicación de AquiDplot a los programas académicos de especialidad y maestría (UNAM especialidad; UNAM posgrado).

3. AquiDplot aspectos generales

En esta sección se describe [AquiDplot](#), su desarrollo, modelos y soluciones analíticas empleadas, así como las limitaciones del programa.

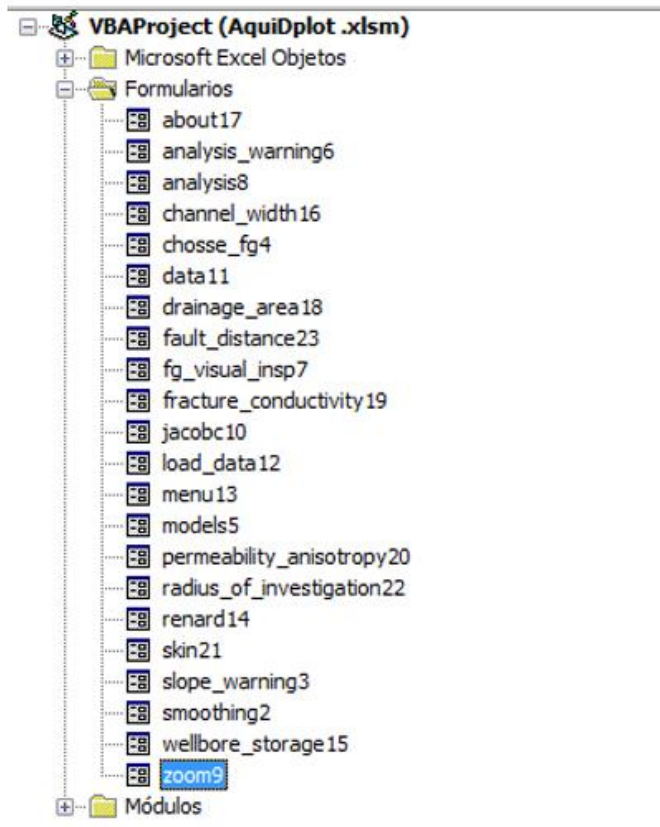
3.1. Desarrollo de [AquiDplot](#)

La hoja de cálculo interactiva [AquiDplot](#) fue desarrollada en el lenguaje de programación *Visual Basic for Applications* que viene integrado en los programas del software [Microsoft Office](#) permitiendo extender la funcionalidad de estos ([Microsoft](#)).

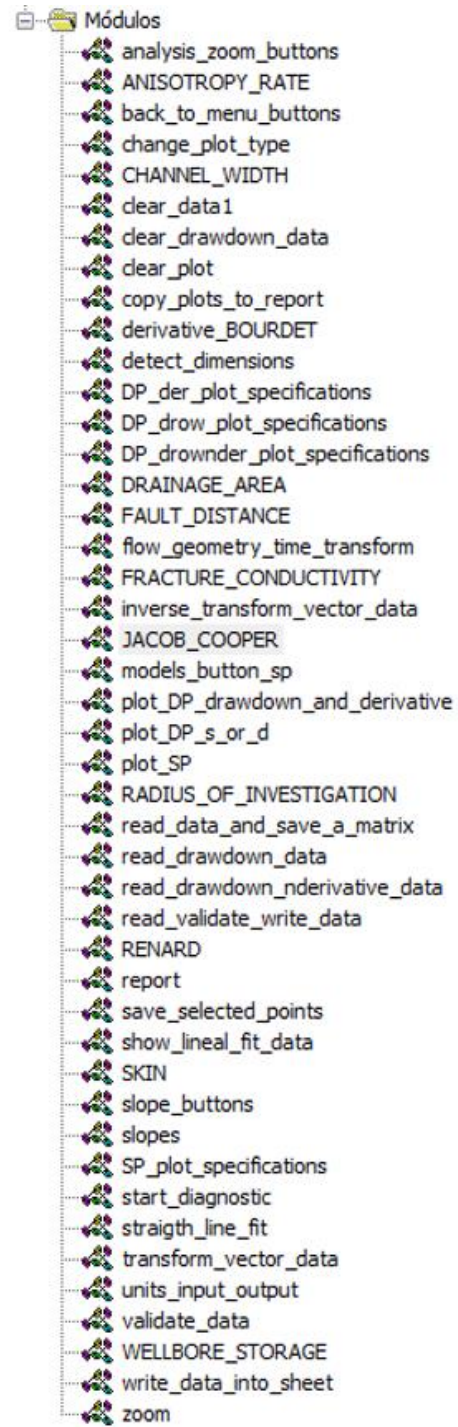
Visual Basic para Excel fue desarrollado por Alan Cooper en 1991 cuando trabajó para Microsoft ([Cooper 2002](#)), que es un lenguaje de programación dirigido por eventos que tiene la ventaja de ser muy fácil de aprender y aplicar bajo entornos de Windows con los que la mayoría de los usuarios están familiarizados.

La hoja de cálculo [AquiDplot](#) emplea en su funcionamiento un total de 22 formularios (Figura 1a) y 45 módulos (Figura 1b), esto debido a que, para el usuario resulta más simple utilizar los formularios para introducir únicamente la información necesaria, mediante una serie de pasos lógicos y para el desarrollador significa un mejor control de la información de entrada y salida. Además, programar la hoja por módulos permite al desarrollador, dividir el problema en pequeñas partes más simples de resolver y a toda persona que desee modificar o extender las capacidades de esta herramienta les permite hacerlo de forma sencilla, simplemente modificando los módulos y formularios existentes o agregando nuevos.

AquiDplot aspectos generales



a)



b)

Figura 1 a) Formularios de AquiDplot; b) módulos de AquiDplot

3.2. Descripción de [AquiDplot](#)

A continuación, se describirán las partes de [AquiDplot](#), sin embargo, se recomienda consultar el manual de usuario (User Guide) donde viene a más detalle y con ejemplos.

1. Formulario de inicio, que permite crear un nuevo proyecto o trabajar en uno cargado previamente (Figura 2).



Figura 2 Menu para iniciar nuevo proyecto o continuar trabajando con uno previamente cargado

2. Formulario para seleccionar el tipo de prueba (Figura 3a), unidades (Figura 3b), e introducir la información del acuífero, pozo y bombeo (Figura 3c).
3. Sección de la hoja para introducir los datos de tiempo y abatimiento, puede hacerlo de forma manual o empleando el botón y formulario para importar datos desde un archivo de Excel, txt o csv (Figura 4).
4. AquiDplot contiene **dos tipos de Gráficos**, el **diagnóstico** (Figura 5a) y el **especializado** (Figura 5b). El gráfico diagnóstico, sirve como su nombre lo indica para diagnosticar el tipo de geometría de flujo, mediante la pendiente de la derivada y la dimensión de flujo. El gráfico especializado ayuda al cálculo de los parámetros una vez que se encontró o seleccionó una geometría de flujo.

AquiDplot aspectos generales

a)

b)

c)

*Field in red color is required

Figura 3 Formulario de datos: a) Tipo de prueba; b) unidades, c) información del acuífero, pozo y bombeo

AquiDplot aspectos generales

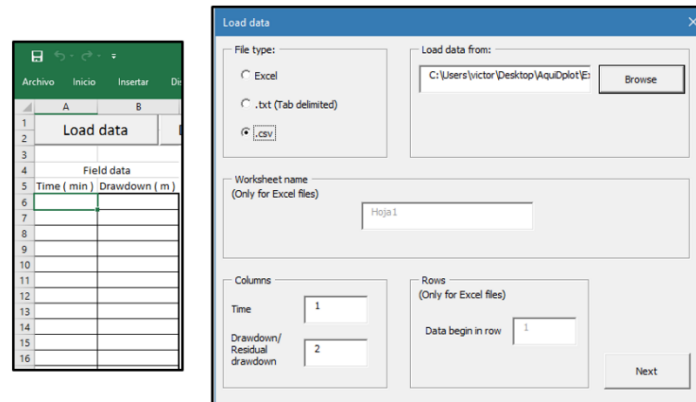


Figura 4 Formulario para importar datos

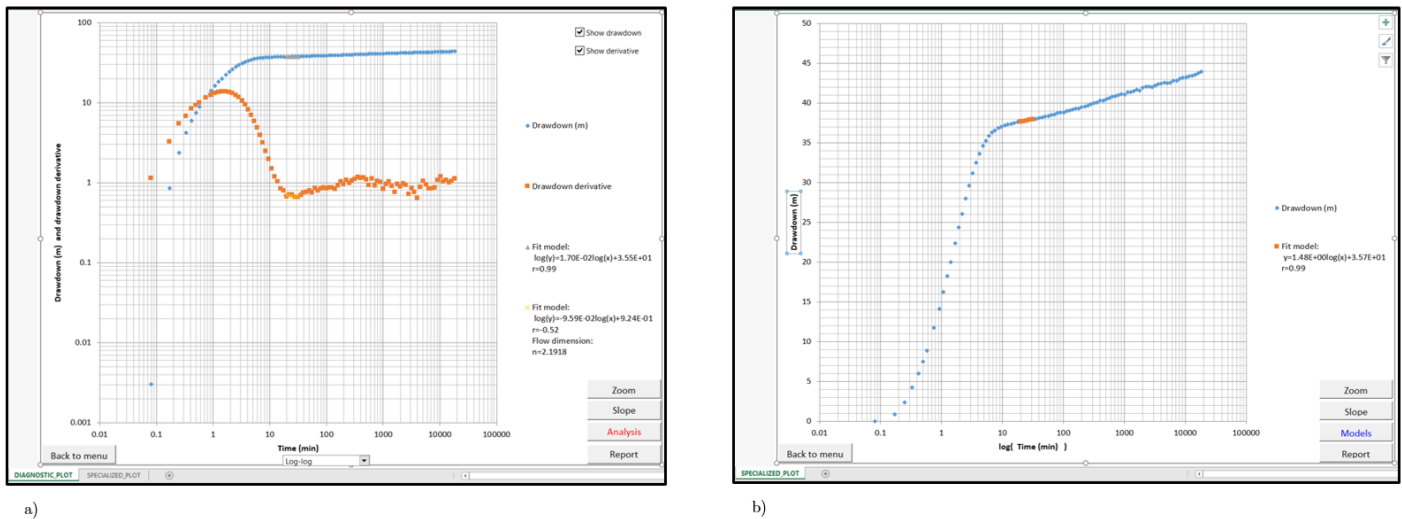


Figura 5 Gráficos en AquiDplot: a) Gráfico diagnóstico; b) Gráfico especializado

5. El gráfico diagnóstico (Figura 5a) tiene 4 tipos de herramientas, un botón para regresar y modificar la información que se introdujo previamente (Figura 6a), una pestaña (Figura 6b) para cambiar el tipo de vista de Log-log a semi-log o cartesiana, dos casillas (Figura 6c) para activar o desactivar que se muestre en el gráfico el abatimiento o la derivada, y un conjunto de botones (Figura 6d) para ayudar al análisis; estos son: **Zoom** para aumentar o disminuir la escala del gráfico, **Slope** para ayudar un rápido cálculo de la pendiente, **Analysis** para comenzar con el análisis y **Report** para generar un reporte con la información de entrada, parámetros calculados y los gráficos generados.

AquiDplot aspectos generales

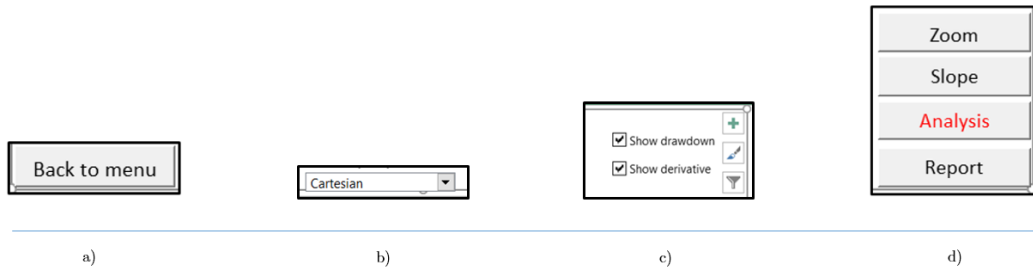


Figura 6 Herramientas en el gráfico diagnóstico: a) volver al menu; b) cambiar tipo de vista, c) activar o desactivar el abatimiento y/o derivada; d) zoom, cálculo de pendientes, análisis, reporte

6. El botón **Analysis** da opciones para ayudar al análisis, como suavizado de la derivada, inspección visual de las geometrías de flujo mediante líneas rectas con la pendiente de cada geometría y la estimación de parámetros mediante gráfico especializado de la geometría seleccionada (Figura 7).

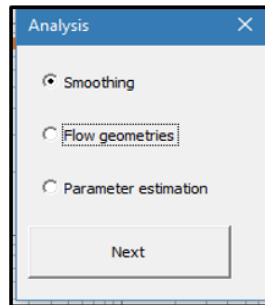


Figura 7 Formulario de análisis: suavizado, geometrías de flujo, estimación de parámetros

7. El **gráfico especializado** (Figura 5b) en lugar del botón Analysis, se encuentra el botón **Models**, que abre un formulario con la lista de modelos o parámetros que se pueden calcular para la geometría de flujo seleccionada (Figura 8).

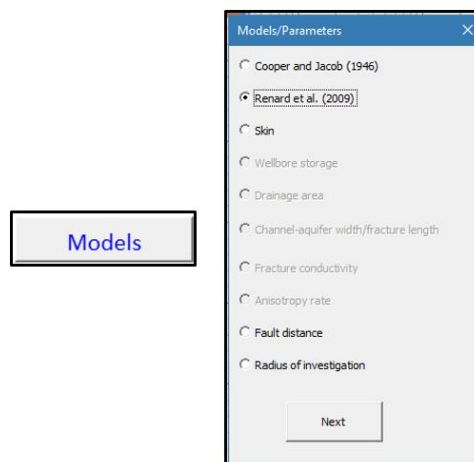


Figura 8 Formulario de modelos y parámetros de flujo

3.3. Modelos y soluciones analíticas de [AquiDplot](#)

Como se ha mencionado en secciones anteriores, la hoja de cálculo [AquiDplot](#) incluye dos modelos para el cálculo de la transmisividad en acuíferos confinados ([Cooper and Jacob 1946](#); [Renard et al. 2009](#)):

$$T = \frac{0.183Q_w}{m_R} \quad (1)$$

$$T = \frac{Q_w}{4\pi d} \quad (2)$$

Donde τ [$m^2/día$] representa la transmisividad, Q_w [$m^3/día$] la tasa de bombeo de agua, m_R [$m/ciclo$] la pendiente del abatimiento contra tiempo del gráfico especializado semi logarítmico, y d [m] es el valor de la intercepción con el eje vertical del modelo lineal ajustado para la derivada en el gráfico diagnóstico.

Así mismo [AquiDplot](#) puede calcular el coeficiente de almacenamiento cuando el pozo es de observación mediante el modelo de [Cooper and Jacob \(1946\)](#):

$$s = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad (3)$$

Donde s [-] representa el coeficiente de almacenamiento, τ [$m^2/día$] la transmisividad, t_0 [$días$] tiempo cero, y r [m] es la distancia radial al pozo de bombeo.

Adicionalmente se adaptaron algunas ecuaciones de la ingeniería petrolera a hidrogeología y se programaron en [AquiDplot](#), con el fin de hacer cálculos rápidos de parámetros en las diferentes geometrías de flujo, sin embargo, es importante mencionar que estas ecuaciones adaptadas aún necesitan ser evaluadas y comparadas con otros trabajos, ya que el análisis y adaptación de las ecuaciones de ingeniería petrolera para aplicarlas en hidrogeología ha sido tema de estudio en artículos y libros ([Nielsen 2007](#); [Hernández-espriú et al. 2016](#)).

La lista completa de ecuaciones adaptadas y sus equivalentes en ingeniería petrolera se pueden consultar en la Tabla 4 y la lista de acrónimos en la Tabla 7.

AquiDplot aspectos generales

Geometría o régimen de flujo	Gráfico especializado (Cartesiano)		Modelo directo	Parámetros	Modelo directo	Parámetros
	Eje-x	Eje-y	Ingeniería Petrolera	Ingeniería Petrolera	Hidrogeología	Hidrogeología
Almacenamiento de pozo	t	s Δp	$\Delta p = \frac{Q_o B_o}{24C} \Delta t$	$C = \frac{Q_o B_o}{24m_{ws}}$	$s = \frac{Q_w}{C} \Delta t$	$C = \frac{Q_w}{m_{ws}}$
Pseudo estacionario	t	s Δp	$\Delta p = 0.234 \frac{Q_o B_o}{\phi C_T h A} \Delta t$	$A = \frac{0.234 Q_o B_o}{(C_T \phi h) m_{pss}}$	$s = \frac{Q_w}{SA} \Delta t$	$A = \frac{Q_w}{Sm_{pss}}$
Lineal	$\frac{1}{t^2}$	s Δp	$\Delta p = 8.12 \frac{Q_o B_o}{h W_{CA}} \sqrt{\frac{\mu_o}{\phi C_T k}} \sqrt{\Delta t}$	$W_{CA} = 8.12 \frac{Q_o B_o}{hm_L} \sqrt{\frac{\mu_o}{C_T \phi k}}$	$s = 0.5641 \frac{Q_w}{TW_{CA}} \sqrt{\frac{T}{S}} \sqrt{\Delta t}$	$W_{CA} = 0.5641 \frac{Q_w}{Tm_L} \sqrt{\frac{T}{S}}$
Bilineal	$\frac{1}{t^4}$	s Δp	$\Delta p = 44.11 \frac{Q_o B_o \mu_o}{h \sqrt{k_f w_f} \sqrt[4]{\phi \mu_o C_T k}} \sqrt[4]{\Delta t}$	$k_f w_f = 1944.8 \sqrt{\frac{1}{\phi \mu_o C_T k}} \left(\frac{Q_o B_o \mu_o}{hm_B} \right)^2$	$s = 0.3939 \frac{Q_w}{b \sqrt{k_f w_f}} \sqrt[4]{\frac{b}{SK}} \sqrt[4]{\Delta t}$	$K_f w_f = 0.1552 \sqrt{\frac{b}{SK}} \left(\frac{Q_w}{bm_B} \right)^2$
Radial	(Semi-log) $\log(t)$	s Δp	$\Delta p = 162.6 \frac{Q_o B_o \mu_o}{kh} \left[\log \frac{0.000264k \Delta t}{\phi \mu_o C_T r^2} + 0.87S \right]$	$T = 162.6 \frac{Q_o B_o}{m_R}$ $k = \frac{T \mu_o}{h}$ $s = 1.151 \left[\frac{\Delta P_{thr}}{m_R} - \log \left(\frac{k}{\phi \mu_o C_T r_w^2} \right) + 3.23 \right]$ $\Delta P_s = 0.89 m_R s$ $E = \frac{\Delta P_{real} - \Delta P_s}{\Delta P_{real}}$	$s = 0.183 \frac{Q_w}{T} \left[\log \frac{2.25T \Delta t}{Sr^2} + 0.87S \right]$	$T = 0.183 \frac{Q_w}{m_R}$ $K = \frac{T}{b}$ $\sigma = 1.151 \left[\frac{s_{thr}}{m_R} - \log \left(\frac{T}{Sr_w^2} \right) + 1.03 \right]$ $s_\sigma = 0.89 m_R \sigma$ $E = \frac{J_r}{J_i} = \frac{s - s_\sigma}{s}$
Esférico	$\frac{1}{t^2}$	s Δp	$\Delta p = 70.6 \frac{Q_o B_o \mu_o}{k_s r_s} - 2452.9 \frac{Q_o B_o \mu_o \sqrt{\phi \mu_o C_T}}{k_s^{3/2} \sqrt{\Delta t}}$	$k_s = \left(2452.9 Q_o B_o \mu_o \frac{\sqrt{\phi \mu_o C_T}}{m_{sph}} \right)^{2/3}$ $\frac{k_v}{k_h} = \left(\frac{k_s}{k_h} \right)^3$	$s = 0.0457 \frac{Q_w \sqrt{S/b}}{k_s^{3/2} \sqrt{\Delta t}}$	$K_s = 0.128 \left(Q_w \frac{\sqrt{S/b}}{m_{sph}} \right)^{2/3}$ $\frac{K_v}{K_h} = \left(\frac{K_s}{K_h} \right)^3$
Cualquier geometría				$L = 0.01217 \sqrt{\frac{k \Delta t_s}{\phi \mu_o C_T}}$ $r_i = 0.029 \sqrt{\frac{kt}{\phi \mu_o C_T}}$		$L = 0.744 \sqrt{\frac{T \Delta t_s}{S}}$ $r_i = 1.5 \sqrt{\frac{Tt}{S}}$

Tabla 4 Modelos directos y parámetros según la geometría o régimen de flujo en ingeniería petrolera y en hidrogeología. (Adaptada de Bourdet, 2002)

AquiDplot aspectos generales

Los términos similares o equivalentes en ambas disciplinas que permiten realizar las adaptaciones se muestran en la Tabla 5 con sus respectivas unidades.

Termino en ingeniería petrolera	Termino en hidrogeología
$T/S \left[\frac{(md/cp)}{psi} \right]$ Difusividad hidráulica	$T/S \left[\frac{m^2}{día} \right]$ Difusividad hidráulica
$T \left[\frac{md-ft}{cp} \right]$ Transmisividad	$T \left[\frac{m^2}{día} \right]$ Transmisividad
$k[md]$ Permeabilidad	$K \left[\frac{m}{día} \right]$ Conductividad hidráulica
$S \left[\frac{ft}{psi} \right]$ Capacidad de almacenamiento	$S[-]$ Coeficiente de almacenamiento

Tabla 5 Términos equivalentes en ingeniería petrolera y en hidrogeología

En ingeniería petrolera la difusividad hidráulica es equivalente a:

$$T/S \left[\frac{(md/cp)}{psi} \right] = \frac{k[md]}{\phi[-] \mu[cp] C_T [psi^{-1}]} \quad (4)$$

Además, la permeabilidad $k[cm^2]$ se puede relacionar con la conductividad hidráulica $K[cm/s]$ mediante la siguiente ecuación:

$$k[cm^2] = \left(\frac{\mu \left[\frac{g}{cm-s} \right]}{\rho \left[\frac{gr}{cm^3} \right] g \left[\frac{cm}{s^2} \right]} \right) K \left[\frac{cm}{s} \right] \quad (5)$$

Donde $\mu \left[\frac{g}{cm-s} \right]$ representa la viscosidad del fluido, $\rho \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$ la densidad y $g \left[\frac{cm}{s^2} \right]$ la aceleración de gravedad.

La ecuación (5) para agua, en las unidades comúnmente empleadas es equivalente a:

$$k[md] = 1179.824K \left[\frac{m}{día} \right] \quad (6)$$

AquiDplot aspectos generales

Por lo que, si sustituimos la ecuación (6) en la ecuación (7) con el respectivo factor de conversión de [ft] a [m] nos da la ecuación (8):

$$T\left[\frac{md-ft}{cp}\right] = \frac{k[md]h[ft]}{\mu[cp]} \quad (7)$$

$$T\left[\frac{md-ft}{cp}\right] = \frac{\left(1179.824K\left[\frac{m}{día}\right]\right)\left(\frac{b[m]}{0.3048}\right)}{1[cp]} \quad (8)$$

Y si la combinamos con la ecuación (9) podemos obtener una ecuación equivalente para la transmisividad (10)

$$T\left[\frac{m^2}{día}\right] = K\left[\frac{m}{día}\right]b[m] \quad (9)$$

$$T\left[\frac{md-ft}{cp}\right] = 3870.8136T\left[\frac{m^2}{día}\right] \quad (10)$$

De forma similar, si para la capacidad de almacenamiento, ecuación (11), expresamos el espesor saturado en [m] y las unidades de presión [psi] de la compresibilidad total las expresamos en [m] equivalentes de columna de agua (12), obtenemos la ecuación (13):

$$S\left[\frac{ft}{psi}\right] = \phi[-]C_T[psi^{-1}]h[ft] \quad (11)$$

$$S\left[\frac{ft}{psi}\right] = \phi[-]\left(\frac{C_T[m^{-1}]}{1.4223}\right)\left(\frac{b[m]}{0.3048}\right) \quad (12)$$

$$S\left[\frac{ft}{psi}\right] = 2.3067\phi[-]C_T[m^{-1}]b[m] \quad (13)$$

O expresado de otra forma:

$$S\left[\frac{ft}{psi}\right] = 2.3067S[-] \quad (14)$$

Por lo tanto, las ecuaciones (4), (6), (10) y (14) las podemos utilizar para adaptar las ecuaciones de ingeniería petrolera a hidrogeología.

A continuación, se muestra un ejemplo de adaptación de ecuaciones:

1. Primero partimos de la ecuación de ingeniería petrolera para flujo monofásico, en este caso la ecuación para calcular la transmisividad (15):

$$T \left[\frac{md - ft}{cp} \right] = 162.6 \frac{Q_w \left[\frac{bbl}{día} \right]}{m_R \left[\frac{psi}{ciclo} \right]} \quad (15)$$

2. Posteriormente de la ecuación (10) despejamos la transmisividad en unidades utilizadas en hidrogeología y en combinación con la ecuación (15) y aplicando los respectivos factores de conversión para mantener las consistencia de unidades obtenemos la ecuación (18) que si observamos es muy similar a la ecuación (1) que es la ecuación para el cálculo de la transmisividad del modelo de [Cooper and Jacob \(1946\)](#).

$$T \left[\frac{m^2}{día} \right] = \frac{T \left[\frac{md - ft}{cp} \right]}{3870.8136} \quad (16)$$

$$T \left[\frac{m^2}{día} \right] = \frac{\left(\frac{162.6 \left(\frac{6.2898 Q_w \left[\frac{m^3}{día} \right]}{1.4223 m_R \left[\frac{m}{ciclo} \right]} \right)}{3870.8136} \right)}{3870.8136} \quad (17)$$

$$T \left[\frac{m^2}{día} \right] = \frac{0.185 Q_w \left[\frac{m^3}{día} \right]}{m_R \left[\frac{m}{ciclo} \right]} \quad (18)$$

En resumen, el procedimiento para adaptar las ecuaciones consiste en tomar como base una ecuación de ingeniería petrolera para flujo monofásico, posteriormente pasar la ecuación a términos equivalentes en hidrogeología mediante simples sustituciones algebraicas y por último revisar que se eliminen o modifiquen las constantes de las ecuaciones de ingeniería petrolera debido a las unidades consistentes utilizadas en hidrogeología.

AquiDplot aspectos generales

Para ayudar al diagnóstico de la geometría o régimen de flujo y así poder hacer uso correcto del gráfico especializado para posteriormente calcular los parámetros (Tabla 4), **AquiDplot** en el gráfico diagnóstico muestra tres importantes indicadores que son: la pendiente del abatimiento s , la derivada del abatimiento $\frac{ds}{d\ln(t)}$, y las dimensiones de flujo n (Chakrabarty 1994; Beauheim et al. 2004; Renard et al. 2009; Giese et al. 2017):

$$n = 2(1 - m) \quad (19)$$

Donde m representa la pendiente de la derivada del abatimiento $\frac{ds}{d\ln(t)}$ en el gráfico diagnóstico.

En la *Tabla 6*, se muestra de forma resumida los valores de las pendientes en el gráfico diagnóstico, además de la dimensión de flujo necesaria para poder diagnosticar una geometría o régimen de flujo, su significado y los parámetros que se pueden calcular en hidrogeología.

Geometría o régimen de flujo	Pendiente en el gráfico diagnóstico (Log-log)		Dimensiones de flujo	Significado	Parámetros
	s	$\frac{ds}{d\ln(t)}$			
Almacenamiento de pozo	1	1		Almacenamiento de pozo	c
Pseudo estacionario	1	1		Frontera de No – flujo	A, L, r_i
Lineal	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	Acuífero – canal, Flujo en fracturas conductivas, pozos horizontales...	W_{ca}, L, r_i
Bilineal	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$		Flujo en fracturas rellenas	$K_f w_f, L, r_i$
Radial		0	2	Yacimiento homogéneo	$T, K, \sigma, s_\sigma, E, L, r_i$
Esférico		$-\frac{1}{2}$	3	Pozo parcialmente penetrante	$\frac{K_v}{K_h}, L, r_i$
Estacionario	0	-1 o $-\infty$		Frontera de recarga	L, r_i

Tabla 6 Resumen de diagnóstico del régimen o geometría de flujo, significado y parámetros. (Adaptada de Bourdet, 2002; Renard et al. 2009)

[AquiDplot aspectos generales](#)

Para el caso de las pruebas de recuperación, [AquiDplot](#) hace uso del tiempo equivalente para convertir los datos de recuperación en un equivalente de abatimiento y poder aplicar el mismo análisis ([Agarwal 1980](#)):

$$\Delta t_e = \frac{t_p \Delta t}{t_p + \Delta t} \quad (20)$$

Donde Δt_e [día] representa el tiempo equivalente de [Agarwal \(1980\)](#), Δt [día] el tiempo de cierre de pozo, y t_p [día] el tiempo total que duró bombeando anterior al cierre.

3.4. Limitaciones

Algunas de las limitantes de [AquiDplot](#) son:

1. Por el momento su uso está limitado a la aplicación a acuíferos.
2. Faltan modelos para el caso semi confinado, libre y doble porosidad.
3. Únicamente contiene dos modelos para acuíferos confinados.
4. No emplea la segunda derivada como herramienta de diagnóstico.
5. No tiene curvas tipo.
6. Todos los análisis son para un solo pozo.
7. Todas las pruebas que puede analizar son a gasto constante.

AquiDplot aspectos generales

<i>Ingeniería Petrolera</i>	<i>Hidrogeología</i>
C =Coeficiente de almacenamiento $\left[\frac{BBL}{Psi} \right]$	C =Coeficiente de almacenamiento $\left[\frac{m^3}{m} \right]$
A =Área de drene $[ft^2]$	A =Área de drene $[m^2]$
W_{CA} =Ancho del canal $[m]$	W_{CA} =Ancho del canal $[m]$
$k_f w_f$ =Conductividad hidráulica la fractura $[mD-ft]$	$K_f w_f$ =Conductividad hidráulica la fractura $\left[\frac{m^2}{día} \right]$
T =Transmisividad $\left[\frac{mD-ft}{cp} \right]$	T =Transmisividad $\left[\frac{m^2}{día} \right]$
k = Permeabilidad $[mD]$	K = Conductividad hidráulica $\left[\frac{m}{día} \right]$
s =Daño $[-]$	σ =Daño $[-]$
ΔP_s =Caída de presión adicional debida al daño $[Psi]$	s_σ =Abatimiento adicional debido al daño $[m]$
E =Eficiencia del pozo $[-]$	E =Eficiencia del pozo $[-]$
k_s =Permeabilidad esférica $[mD]$	K_s =Conductividad hidráulica esférica $\left[\frac{m}{día} \right]$
$\frac{k_v}{k_h}$ =Tasa de anisotropía $[-]$	$\frac{K_v}{K_h}$ =Tasa de anisotropía $[-]$
L =Distancia a la falla $[ft]$	L =Distancia a la falla $[m]$
r_i =Radio de investigación $[ft]$	r_i =Radio de influencia $[m]$
m_{WBS} =Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para almacenamiento de pozo $\left[\frac{Psi}{hr} \right]$	m_{WBS} =Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para almacenamiento de pozo $\left[\frac{m}{día} \right]$
m_{Pss} =Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Pseudo-estacionario $\left[\frac{Psi}{hr} \right]$	m_{Pss} =Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Pseudo-estacionario $\left[\frac{m}{día} \right]$
m_L = Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Lineal $\left[\frac{Psi}{hr^{\frac{1}{2}}} \right]$	m_L = Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Lineal $\left[\frac{m}{día^{\frac{1}{2}}} \right]$
m_b = Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Bilineal $\left[\frac{Psi}{hr^{\frac{1}{4}}} \right]$	m_b = Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Bilineal $\left[\frac{m}{día^{\frac{1}{4}}} \right]$
m_R = Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Radial $\left[\frac{Psi}{ciclo} \right]$	m_R = Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Radial $\left[\frac{m}{ciclo} \right]$
m_{Sph} = Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Esférico $\left[\frac{Psi}{hr^{-\frac{1}{2}}} \right]$	m_{Sph} = Pendiente que se obtiene del gráfico especializado para la geometría de flujo Esférico $\left[\frac{m}{día^{-\frac{1}{2}}} \right]$
Q_o = Gasto de aceite $\left[\frac{BBL}{día} \right]$	Q_w = Tasa de bombeo de agua $\left[\frac{m^3}{día} \right]$
h =Espesor de la formación $[ft]$	b =Espesor saturado $[m]$
r_w =Radio del pozo $[ft]$	r_w =Radio del pozo $[m]$
Δt_x =Tiempo de transición en la derivada $[hrs]$	Δt_x =Tiempo de transición en la derivada $[día]$
t =Tiempo $[hrs]$	t =Tiempo $[día]$
ΔP_{real} =Abatimiento de presión real $[Psi]$	s =Abatimiento $[m]$

AquiDplot aspectos generales

ΔP_{1hr} = Abatimiento de presión a 1 hora que se obtiene de extrapolar en el modelo lineal ajustado del grafico especializado para la geometría de flujo radial [<i>Psi</i>]	S_{1hr} = Abatimiento de presión a 1 hora que se obtiene de extrapolar en el modelo lineal ajustado del grafico especializado para la geometría de flujo radial [<i>m</i>]
J = índice de productividad $\left[\frac{(bb/d)/psi}{m} \right]$	J = Caudal específico $\left[\frac{(m^3/d)/m}{m} \right]$
ϕ = Porosidad [-]	S = Coeficiente de almacenamiento [-]
μ_o = Viscosidad del aceite [<i>cp</i>]	
C_T = Compresibilidad total $\left[\frac{1}{Psi} \right]$	
B_o = Factor de volumen del aceite $\left[\frac{rBBL}{STB} \right]^1$	

Tabla 7 Listado de acrónimos

¹ *rBBL* = Barriles del yacimiento, *STB* = Barriles en el tanque de almacenamiento

4. Ejemplo de aplicación

Se analizó una prueba de bombeo de 307 horas a gasto constante, ejecutada en agosto del 2006 en el acuífero Abbotsford-Sumas localizado en Washington, USA (Reichhardt & Ebe Engineering and Association 2007).

El gasto de bombeo en el pozo PW-3 fue de 272.55 (m³/día), el abatimiento fue monitoreado en el mismo pozo. La litología reportada es arena y grava con variaciones de limo/arcilla.

En este ejemplo se muestra de forma resumida los pasos a seguir, sin embargo, se puede revisar a mayor detalle en el **Ejemplo 1** que viene en el manual de usuario (User Guide) de éste documento.

1. En el menú presionar el botón **New project** (Figura 9) y seleccionar **Drawdown** de las opciones de tipo de prueba (Figura 10a), seleccionar las **unidades** (Figura 10b) e introducir la información del **acuífero, pozo y bombeo** (Figura 10c).



Figura 9 Ejemplo 1. Nuevo proyecto

Ejemplo de aplicación

a)

Aquidplot

Type of test | Units | Aquifer and well data |

Type of test

Drawdown

Recovery test

Next

<http://www.ingenieria.upam.mx/hidrogeologia/>

b)

Aquidplot

Type of test | Units | Aquifer and well data |

Time: m

Drawdown or recovery: m

Discharge rate: m³/day

Saturated thickness: m

Wellbore radius: in

Radial distance to the pumping well: m

Transmissivity: m²/day

Hydraulic conductivity: m/day

Wellbore storage: m³/m

Channel-aquifer width/fracture length: m

Drainage area: m²

Fracture conductivity: m²/day

Radius of investigation: m

Fault distance: m

Next

c)

Aquidplot

Type of test | Units | Aquifer and well data |

Aquifer info

(b) Saturated thickness: m

Pumping info

(Qw) Discharge rate: m³/day

(t) Pumping duration: min

Well info

Well name:

Location:

Type of well:

(rw) Wellbore radius: in

(r) Radial distance to the pumping well: m

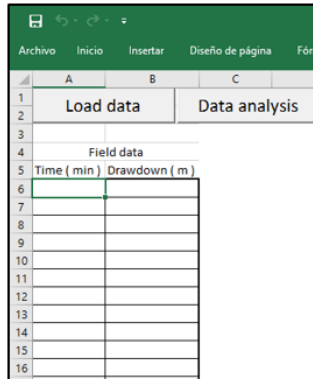
*Field in red color is required

Next

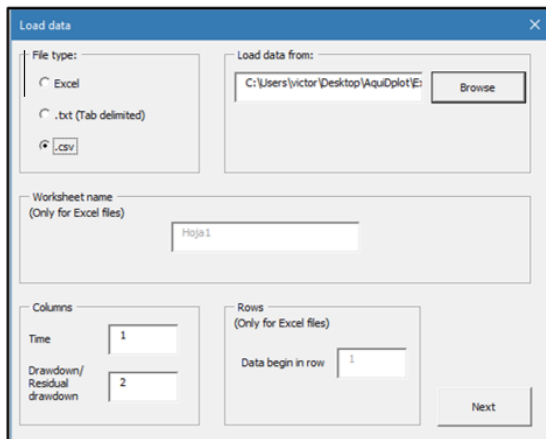
Figura 10 Ejemplo 1. a) Tipo de prueba; b) unidades; c) datos del acuífero, pozo y bombeo

Ejemplo de aplicación

- Ahora se deben de cargar los datos presionando el botón **Load data** que se encuentra en la hoja (Figura 11a) y posteriormente presionar el botón **Browse** para seleccionar el archivo **PW3.csv** de la carpeta **Examples** (Figura 11b) y finalmente presionar el botón **Data analysis** para continuar con el análisis (Figura 11a).



a)



b)

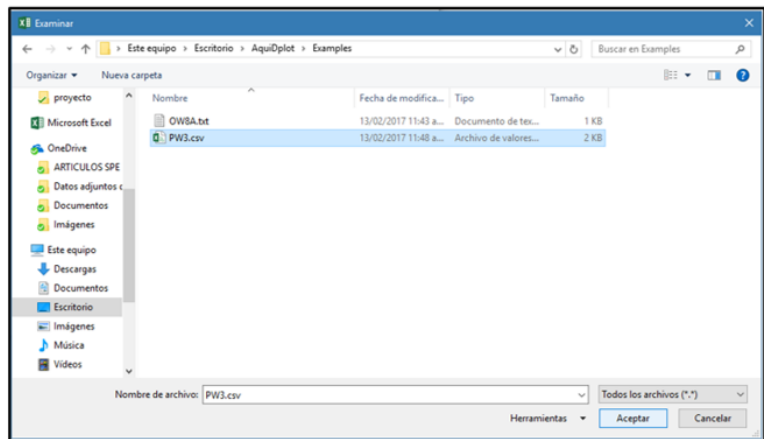


Figura 11 Ejemplo 1. Importar datos: a) Hoja, botón importar datos y botón análisis; b) formulario para importar datos

- A continuación, en el **gráfico diagnóstico** (Figura 13a) presionar el botón **Analysis** y seleccionar la opción **Smoothing** e introducir un valor de **0.5** y dar click en **Calculate** (Figura 12a). De forma automática se actualiza el gráfico con el suavizado como se muestra en la Figura 12b.
- Posterior al suavizado, se realizará una inspección visual de las geometrías de flujo, presionando el botón **Analysis** y seleccionar la opción **Flow geometries** y la opción **Radial** (Figura 13b). A continuación, aparecerá una **línea horizontal**, que hay que **mover** sobre los puntos de la derivada **hasta encontrar un ajuste lineal** (Figura 13c).
- Ahora se debe **borrar la línea horizontal** y **seleccionar el rango de puntos** que previamente se ajustaron a ella, dando primero un **click en la derivada**, después dando **doble click en el primer punto** y después **doble click en el segundo punto** después presionar el botón **Analysis** y seleccionar la opción **Parameter estimation** y la opción **Radial** (Figura 12c). A continuación,

Ejemplo de aplicación

aparecerá un nuevo **gráfico especializado** de la geometría seleccionada con el modelo lineal del rango de puntos seleccionado (Figura 13e), así mismo en el **gráfico diagnóstico** también aparecerá el **modelo lineal del rango de puntos seleccionado** tanto para la curva derivada como para la del abatimiento y la **dimensión de flujo** (Figura 13d).

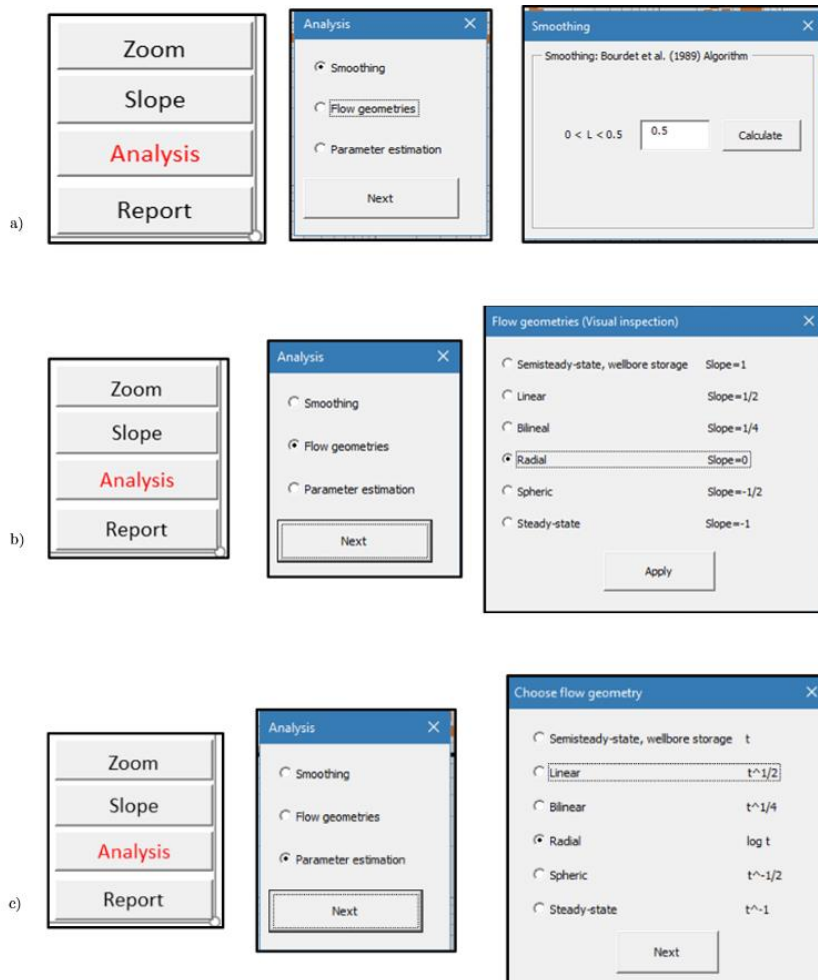


Figura 12 Ejemplo 1. Análisis: a) suavizado; b) inspección visual de las geometrías de flujo; c) estimación de parámetros

Ejemplo de aplicación

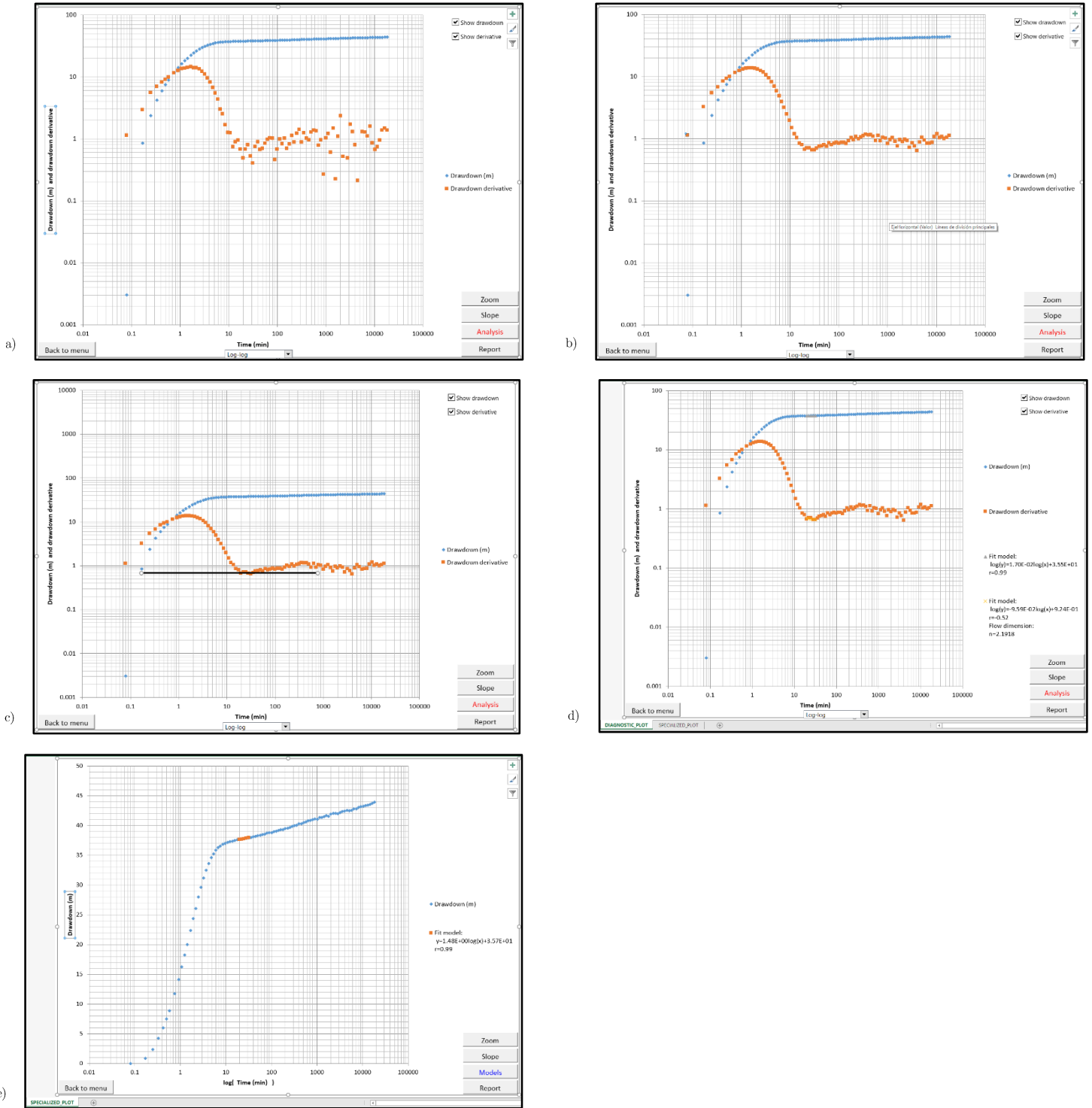


Figura 13 Ejemplo 1. Gráfico diagnóstico: a) sin suavizado; b) con suavizado; c) inspección visual de geometrías de flujo; d) ajuste lineal del rango de datos seleccionado y dimensión de flujo; e) Gráfico especializado: ajuste lineal del rango de datos seleccionado

Ejemplo de aplicación

6. En el **gráfico especializado**, presionar el botón **Models** y **seleccionar una opción** la lista (Figura 14). En este caso se evaluó la transmisividad con el modelo de **Renard (2009)** (Figura 15a) y con el modelo de **Cooper and Jacob (1946)** (Figura 15b).

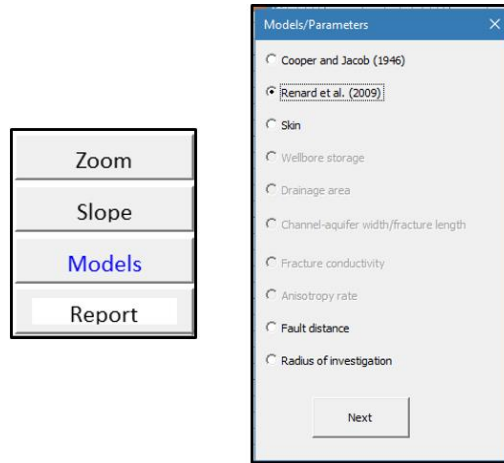


Figura 14 Ejemplo 1. Modelos/parametros

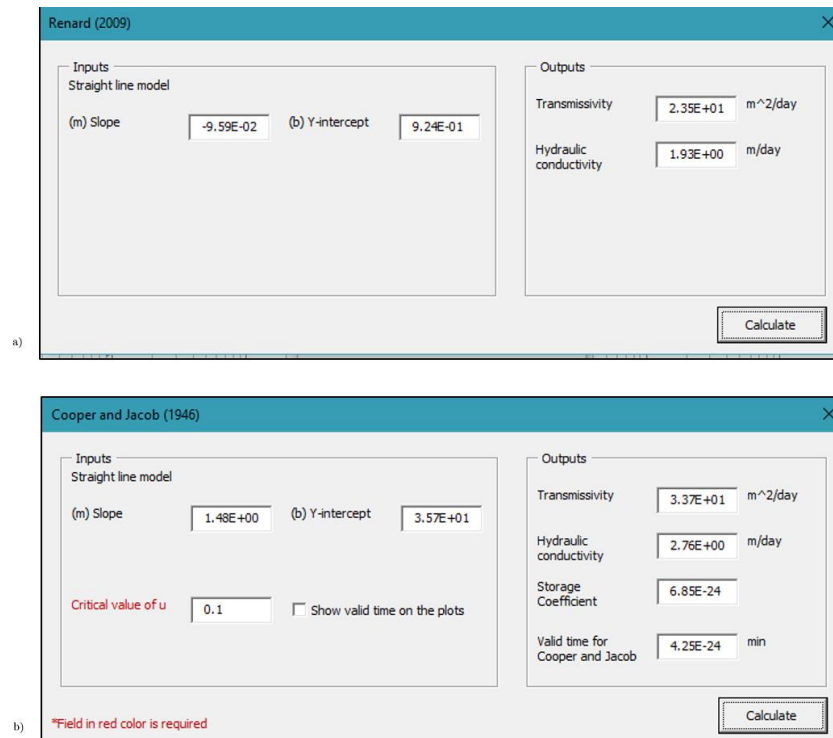


Figura 15 Ejemplo 1. Cálculo de la transmisividad con: a) Renard (2009); b) Cooper and Jacob (1946)

Ejemplo de aplicación

7. Por último, presionar el botón **Report** y **seleccionar la carpeta** donde se desea guardar el reporte (Figura 16) y automáticamente aparecerá el reporte generado (Figura 17).

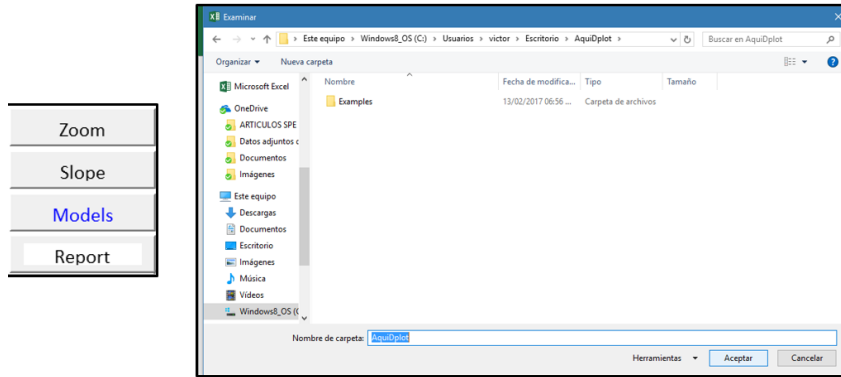


Figura 16 Ejemplo 1. Selección de carpeta para guardar reporte

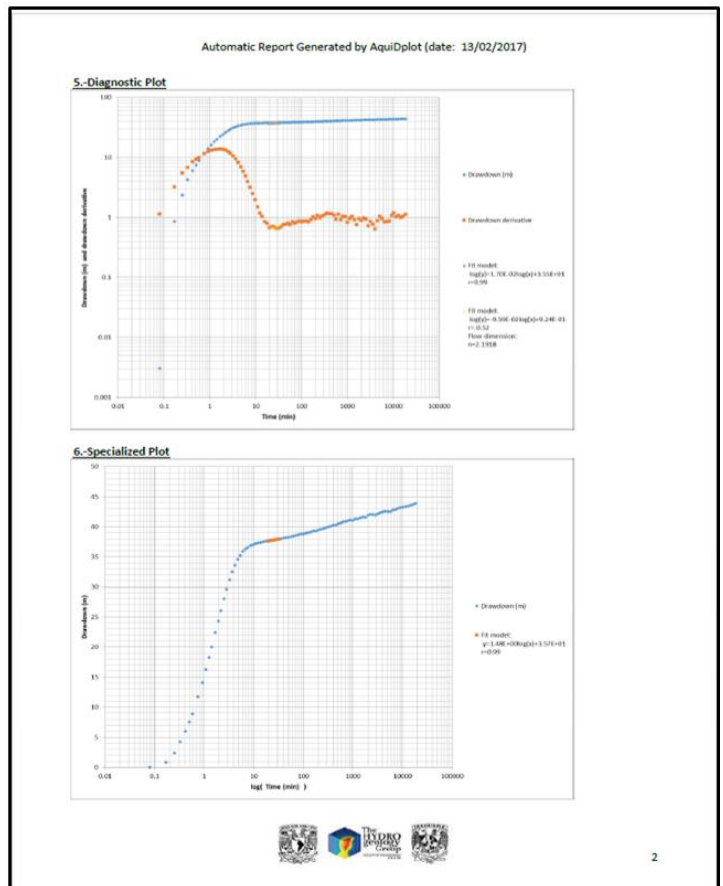
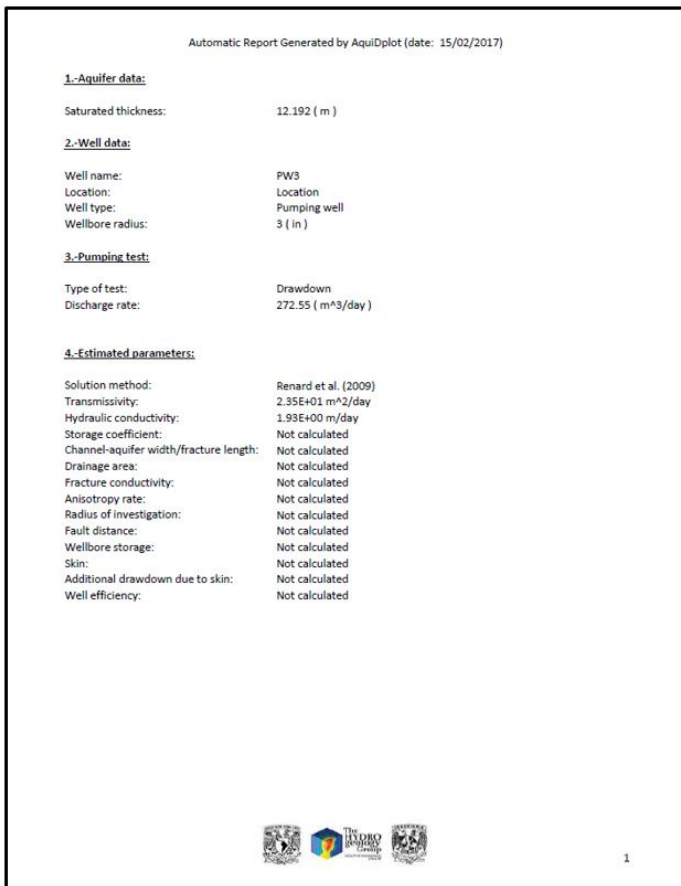


Figura 17 Ejemplo 1. Reporte

Ejemplo de aplicación

4.1. Resultados y comparación con software comercial

El **Ejemplo 1**, se repitió con el software comercial **AQTESOLV** (Figura 18) y **AquiferTest** (Figura 19) con el modelo de **Cooper and Jacob (1946)** y los resultados se muestran a continuación.

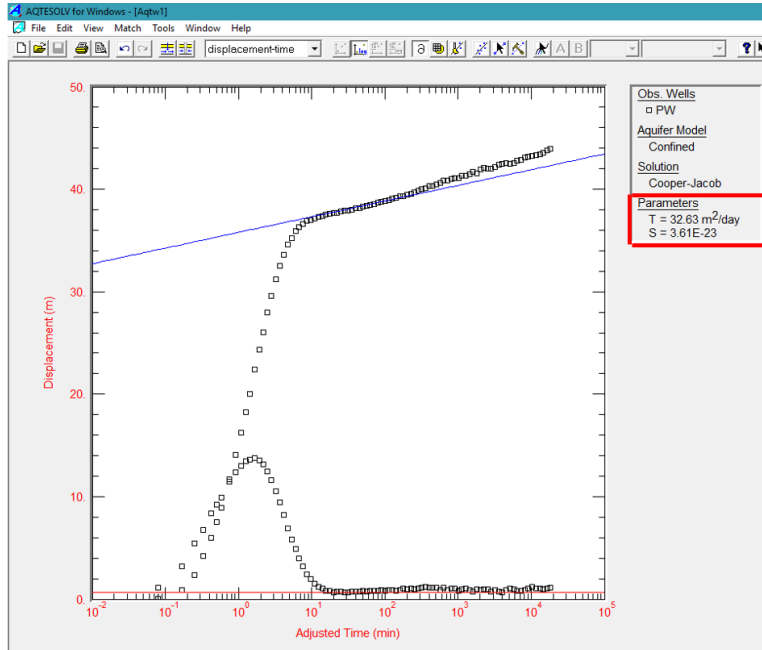


Figura 18 Ejemplo 1. Resultados con AQTESOLV con el modelo de Cooper and Jacob (1946)

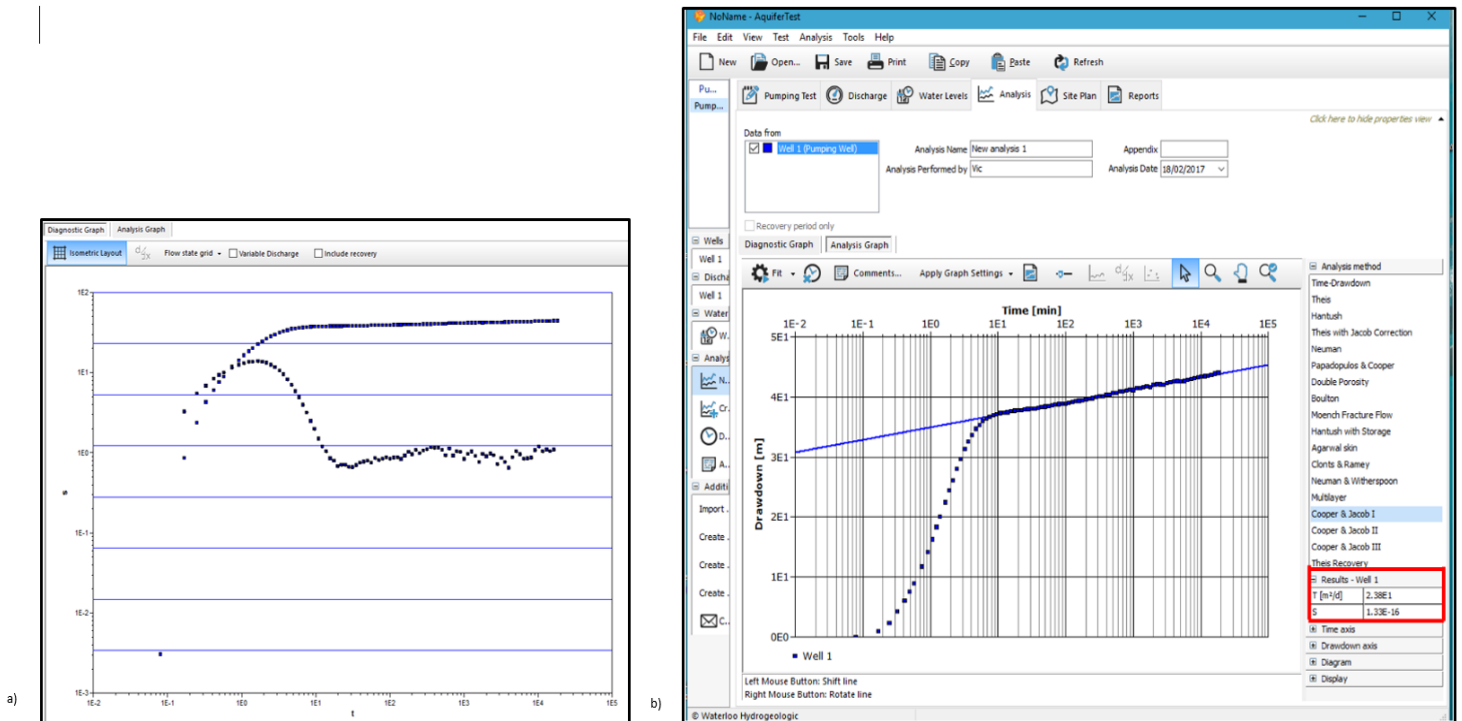


Figura 19 Ejemplo 1. AquiferTest: a) Diagnóstico Graph; b) Resultados con con el modelo de Cooper and Jacob (1946)

Ejemplo de aplicación

Los resultados obtenidos con el software comercial y con [AquiDplot](#) se resumen en la siguiente Tabla 8.

	AquiferTest	AQTESOLV	AquiDplot	AquiDplot
Modelo	Cooper and Jacob (1946)	Cooper and Jacob (1946)	Cooper and Jacob (1946)	Renard (2009)
Transmisividad	23.8	32.63	33.7	23.5

Tabla 8 Ejemplo 1. Resumen comparativo de los resultados obtenidos con AquiDplot y software comercial

Como se observa los resultados obtenidos son muy similares, sin embargo, las pequeñas diferencias radican en que el modelo es muy sensible a la pendiente utilizada para el rango de datos que se quiere analizar y el proceso para obtenerla en el software comercial, aunque simple puede no ser muy preciso, en cambio [AquiDplot](#) hace un ajuste lineal automático al conjunto de puntos seleccionado y con el coeficiente de Pearson nos permite cuantificar que tan bueno fue el ajuste a esos puntos, brindando mayor certidumbre al aplicar los modelos.

Algo importante es que, como se mencionó en secciones anteriores, los softwares comerciales incluyen análisis derivativos, sin embargo, no tienen un uso claro.

Principalmente el programa AquiferTest que incluye un gráfico diagnóstico (Figura 19a) en el que se aplica la derivada y líneas estáticas con una determinada pendiente según el régimen de flujo deseado, sin embargo, la utilidad de este gráfico es apenas cualitativa puesto que no permite hacer nada ni tiene una relación directa con el gráfico de análisis (Figura 19b).

En el caso de AQTESOLV siempre se trabaja sobre un mismo gráfico (Figura 18), habilitando o deshabilitando la derivada y permite calcular las pendientes, además posee algo similar a los gráficos especializados de [AquiDplot](#), sólo que ellos les llaman a estos como *gráficos diagnósticos*.

5. Conclusiones y recomendaciones

[AquiDplot](#) es una herramienta intuitiva, fácil de utilizar y que puede beneficiar a prácticamente cualquier programa académico relacionado a la interpretación de pruebas de pozos y que, a pesar de sus limitaciones actuales, al ser software libre tiene la ventaja de que se puede modificar o extender sus funcionalidades, de modo que fácilmente se puede realizar una versión para estudiar yacimientos de aceite, gas seco o geotérmicos, además de permitir que cualquiera puede agregar más modelos a los existentes para estudiar acuíferos, o resolver alguna otra de las limitantes mencionadas.

Algunas de las recomendaciones son:

1. [AquiDplot](#) podría servir como base para los proyectos de las asignaturas, donde se les deje explorar nuevos modelos no vistos en clase, programarlos y aplicarlos.
2. Se recomienda crear un canal de YouTube con ejemplos de aplicación de [AquiDplot](#) para facilitar aún más la comprensión del manejo de la hoja.
3. [AquiDplot](#) **no** debe recaer en una sola persona, su continuo desarrollo debe provenir de la comunidad de estudiantes y profesores de todas las áreas relacionadas a la interpretación de pruebas de pozos.
4. Con base en el punto anterior se recomendaría la creación de una agrupación estudiantil dedicada a la hidrogeología donde entre otras actividades, se impartan cursos semestrales o inter semestrales sobre las aplicaciones y el manejo de [AquiDplot](#), así como cursos específicos de programación de Visual Basic para [AquiDplot](#), lo cual traería los siguientes beneficios:
 - a. Permitir ampliar los temas vistos en clase
 - b. Ampliar los modelos y características disponibles
 - c. Detectar futuros candidatos que puedan continuar con el desarrollo y docencia de la hoja, que además se beneficien de la opción de titulación por la modalidad de apoyo a la docencia
 - d. Permitir dar un continuo soporte a la compatibilidad para las subsecuentes versiones de office.

6. Referencias citadas

- Agarwal R (1980) A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data. SPE Annu Tech Conf Exhib 20 pp. doi: 10.2118/9289-MS
- Ahmed T, Meehan N (2012) Well Testing Analysis. Adv Reserv Manag Eng (Second Ed 1–226.
- Beauheim RL, Roberts RM, Avis JD (2004) Well testing in fractured media: flow dimensions and diagnostic plots Essais de puits dans les milieux fracturés: dimensions d’écoulement et relevés de diagnostic. J Hydraul Res EXTRA ISSUE 42:69–76.
- Bourdet D (2002) Well test analysis: the use of advanced interpretation models.
- Bourdet D, Ayoub JA, Pirard YM (1989) Use of Pressure Derivative in Well Test Interpretation. SPE Form. Eval. 4:293–302.
- Bourdet D, Whittle T., Douglas A, Pirard Y (1983) A new set of type curves simplifies well test analysis. World Oil 196:95–106.
- Chakrabarty C (1994) A note on fractional dimension analysis of constant rate interference tests. Water Resour Res 30:2339–2341. doi: 10.1029/94WR00759
- Chow V Te (1952) On The Determination of Transmissibility and Storage Coefficients from Pumping Test Data.
- Cooper A (2002) Why I am called “the father of Visual Basic.”
- Cooper HH, Jacob CE (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans Am Geophys Union 27:526. doi: 10.1029/TR027i004p00526
- Devlin JF, Brookfield A, Huang B, Schillig PC (2012) Using the Domenico Solution to Teach Contaminant Transport Modeling. J Geosci Educ 60:123–132. doi: 10.5408/11-230.1
- Earlougher RC (1977) Advances in Well Test Analysis. Monogr. Vol. 5 - Henry L. Doherty Ser. 264.
- Gao Y, Hsieh P, Survey USG, Alexander S Using Excel for Aquifer Test.
- Giese M, Reimann T, Liedl R, et al (2017) Application of the flow dimension concept for numerical drawdown data analyses in mixed-flow karst systems. Hydrogeol J 1–13. doi: 10.1007/s10040-016-1523-7
- Gringarten AC (2008) From Straight Lines to Deconvolution: The Evolution of the State of the Art in Well Test Analysis. SPE Reserv Eval Eng 11:18. doi: 10.2118/102079-PA
- Guo B (2011) Petroleum production engineering, a computer-assisted approach. Gulf Professional Publishing.
- Hernández-Espriú A (2015) Interpretación moderna de pruebas hidráulicas en acuíferos, adaptando metodologías de la ingeniería petrolera.
- Hernández-espriú A, Castro-herrera I, Zapata-norberto B, et al (2016) Channel-Aquifer width estimation from pumping test data: a simple approach using oil reservoir techniques . doi: 10.13140/RG.2.1.3971.8009
- Hosseinpour-Zonoozi N, Ilk D, Blasingame TA (2006) The Pressure Derivative Revisited--Improved

Referencias citadas

- Formulations and Applications. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers,
- Hudak PF (1996) Hydrogeology Lessons and Exercises for Introductory Physical-Geology Students. *J Geosci Educ* v. 44:315.
- HydroSOLVE Inc. Glenn M. Duffield.: HydroSOLVE, Inc.
http://www.aqtesolv.com/hydrosolve/glenn_m_duffield.htm. Accessed 16 Feb 2017
- Leelaruban N, Padmanabhan G (2013) An EXCEL Tool for Teaching Theis Method of Estimating Aquifer Parameters. doi: 10.13140/2.1.1848.6721
- Marshall JA, Castillo AJ, Bayani Cardenas M (2015) The Effect of Modeling and Visualization Resources on Student Understanding of Physical Hydrology. *J Geosci Educ* 63:127–139. doi: 10.5408/14-057.1
- Microsoft Microsoft Office Hogar. <https://www.office.com/>. Accessed 19 Feb 2017
- Molano C CarlosMolanoWebSite.
https://sites.google.com/a/hidrogeocol.com.co/carlos_molano/goog_660474998. Accessed 25 Feb 2017
- Nielsen K (2007) Fractured Aquifers-Formation evaluation by well testing.
- Powell T, Cumming W (2010) SPREADSHEETS FOR GEOTHERMAL WATER AND GAS GEOCHEMISTRY. In: PROCEEDINGS, Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
- Reichhardt & Ebe Engineering I, Association DW (2007) Installation and Testing of Production Well PW-3. 23.
- Renard P, Glenz D, Mejias M (2009) Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeol J* 17:589–600. doi: 10.1007/s10040-008-0392-0
- Roberts SJ (2000) Using a Spreadsheet to Introduce Aqueous- Speciation Calculations to Geochemistry Students. *J Geosci Educ* 48:203–208.
- Sun X, Xu Y, Lin L (2015) The diagnostic plot analysis of artesian aquifers with case studies in Table Mountain Group of South Africa.
- Theis C V. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage.
- Tinker JR (1989) Undergraduate Education in Hydrogeology. *J Geol Educ* v. 27:20.
- UNAM Facultad de Ingeniería / Licenciaturas.
http://www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura.php. Accessed 18 Feb 2017
- UNAM especialidad .: UNAM:: Secretaría de Posgrado e Investigación, F.I.:
<http://www.ingenieria.unam.mx/spifi/especial1.html>. Accessed 18 Feb 2017
- UNAM posgrado .: UNAM:: Secretaría de Posgrado e Investigación, F.I.:
<http://www.ingenieria.unam.mx/spifi/posgrado1.html>. Accessed 18 Feb 2017
- USGS USGS OFR 02-197 Spreadsheets for the Analysis of Aquifer-Test and Slug-Test Data.
<https://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr02197/spreadsheets.html>. Accessed 25 Feb 2017

Referencias citadas

- Vacher HL (2000) A Course in Geological-Mathematical Problem Solving A Course in Geological. J Geosci Educ 48:478–481.
- Vacher HL, Lardner E (2010) Numeracy Advancing Education in Quantitative Literacy Spreadsheets Across the Curriculum, 1: The Idea and the Resource. Numeracy. doi: 10.5038/1936-4660.3.2.6
- Waterloo-Hydrogeologic AquiferTest | Waterloo Hydrogeologic.
<https://www.waterloohydrogeologic.com/aquifertest/>. Accessed 16 Feb 2017