



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL
DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA
INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN
YACIMIENTOS Y ACUÍFEROS.**

TESINA

Que para obtener el título de

INGENIERA PETROLERA

P R E S E N T A

DAYANA DE LAS MERCEDES MESA BABASTRO

DIRECTOR DE TESINA

DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

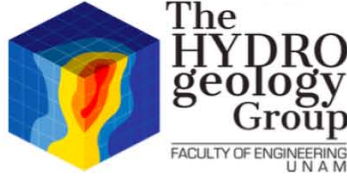


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

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.



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

Este documento representa la Tesis No. 21 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.

This bachelor's dissertation represents the Thesis No. 21 of the Hydrogeology Group, Faculty of Engineering (UNAM) as part of our scientific contribution and human resources development in quantitative groundwater hydrology.

www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology

Twitter: @hydrocologymx

AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN112815, “Interpretación avanzada de pruebas hidráulicas en acuíferos, integrando técnicas analíticas, modelación numérica y técnicas adaptadas de la Ingeniería Petrolera”, a cargo del Dr. José Antonio Hernández Espriú.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Isabel, gracias por el impulso para ser mejor cada día. La frase “Tú puedes hacerlo mejor” siempre me obliga a exigirme y no conformarme.

A mi padre, tío Sergio y padrinos sus consejos son siempre un pilar en mi vida. Ustedes me han enseñado a confiar en mi instinto. Gracias por la confianza.

Jesús por el soporte que nos has brindado y ser el mejor cementante para nuestra familia, gracias.

Diana, Adrian gracias por mantenerme cuerda y estar conmigo en los ratos menos agradables.

A mi amigo, Raúl, por todo lo que haces por mí, gracias.

A mi director, Toño, te agradezco el no dejarme flaquear.

A cada uno de mis profesores y a mi Universidad; gracias por esta gran etapa.

A toda mi familia Babastro y Mesa; son la mejor y de ustedes no he recibido más que cariño. Los quiero.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT.....	4
CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN	5
I.1. Generalidades y antecedentes.....	5
I.2. Objetivos.....	7
CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA.....	8
II.1. Conceptos Generales.....	8
Función Derivada.....	8
Suavizado de la señal.....	8
Tiempo de Agarwal, Superposición y Horner.....	9
Bombeo a gasto constante.....	10
II.2. Algoritmo de suavizado de Bourdet.....	11
II.3. Algoritmo de Spane y Wurstner.....	13
II.4. Algoritmo de ventana Móvil.....	15
II.5. Algoritmo de ventana de Hanning.....	16
CAPÍTULO III – METODOS Y MATERIALES.....	17
III.1. Recopilación de Información.....	17
III.2. Algoritmos de suavizado e interpretación.....	18
CAPÍTULO IV – RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
IV.1. Casos de análisis.....	20
Caso 1. Arabia.....	20
Caso 2. Saratoga.....	28
Caso 3. Lynden.....	37
Caso 4. Querétaro.....	46
Caso 5. Boca del Río.....	54
Caso 6. Bourdet (prueba de presión en yacimientos).....	63
Caso 7. Agua Fría.....	69
IV.3. Integración de resultados.....	74

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

CAPÍTULO V - CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.75
CAPÍTULO VI – REFERENCIAS CITADAS..... 76

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

RESUMEN

El análisis de pruebas transitorias de presión y/o abatimiento, basadas en la respuesta derivativa respecto al logaritmo natural del tiempo, ha generado una mejoría en el diagnóstico y análisis cuantitativo de yacimientos y acuíferos. El progreso del análisis se atribuye a la sensibilidad de la derivada de la presión para determinar las condiciones de formación y su uso para proporcionar respuestas. Las propiedades dinámicas del medio se miden a través de estas pruebas también. Se ha determinado que la pendiente de la derivada de la presión en los campos petroleros y sistemas de acuíferos, proporciona una poderosa herramienta de diagnóstico en la interpretación de las pruebas de pozos.

Los datos recopilados en pruebas de presión y de bombeo por las características de las herramientas y el factor humano generan ruido en la señal de la derivada. Lo que conduce a una mala interpretación de la prueba, lo que nos lleva a la importancia del suavizado en la derivada. Así mismo un exceso de suavizado provoca la pérdida de datos importantes en el gráfico para detectar las áreas de análisis, degradando la señal.

Estimar la derivada de un conjunto de datos que presentan ruido es un problema común en el procesamiento de señales. Cuando se analiza y evalúa una prueba de presión en pozos, estrictamente dos problemas interconectados aparecen: el ruido en la señal de la derivada de la presión y el suavizado de los datos. El análisis derivativo amplifica el ruido en el conjunto de datos. Un proceso de suavizado es requerido para reducir el ruido medido después de la derivada. En este trabajo se presentan, comparan y prueban cuatro algoritmos de suavizado para estudiar su aplicabilidad en la interpretación de pruebas transitorias en pozos petroleros y de agua subterránea. Los algoritmos analizados son: (1) ventana móvil, (2) Bourdet, (3) Spane y Wurstner y (4) ventana de Hanning. Por tanto, esta tesina tiene como objetivo explorar los algoritmos de suavizado para optimizar la señal de la derivada y eliminar el ruido, mientras se preservan datos claves para la interpretación.

Se discuten con base en pruebas petroleras e hidrogeológicas a nivel de campo, las particularidades de cada algoritmo, y se mide, con base en estadísticos y residuales, los ajustes de la curva derivativa suavizada con respecto a modelos matemáticos de la respuesta transitoria de la presión y carga hidráulica sometida a extracciones constantes. Con base en ello, se concluye la aplicabilidad y efectividad de estos algoritmos en la interpretación de pruebas en pozos usando curvas diagnóstico.

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

ABSTRACT

The analysis of studies of pressure surges and reductions based on the derivative response in respect to the natural logarithm of time, has generated sensitivity of the pressure derivative to determine the conditions of formation and its utilization to provide answers. The dynamic properties of oil fields and systems of aquifers produce a powerful tool for diagnosis of the observations found in well tests.

The data gathered from pressure and pumping tests, caused by tools and the human factor, produce noise in the derivative signal. For this reason, an access of smoothing causes loss of important data to detect areas of analysis, degrading the signal.

Determining the derivative of a compilation of data that contains noise is a common problem in the processing of signals. When the data is smoothed out and pressure is analyzed, the derivative analysis amplifies the noise in a group of data. A process of smoothing is required in order to reduce the noise and to study its applicability in the interpretation of test changes in oil wells and subterranean waters. The algorithms analyzed are: sliding window algorithm, and smoothing algorithm, to optimize the derivative signal and eliminate the noise, while preserving key data for interpretation.

The characteristics of each algorithm are discussed under the light of hydrogeological and petrological tests from open fields, and for statistical purposes, the pressure and hydraulic head are measured in accordance with extraction constants. Based on all this the applicability and effectiveness of these algorithms are determined.

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

I.1. Generalidades y antecedentes

El objetivo del análisis de las pruebas de presión en yacimientos petroleros y acuíferos es describir un sistema al que nombraremos “S” (pozo; yacimiento), en el que se induce una señal de entrada “I” que representa la extracción. El sistema genera una señal de salida “O” (Gringarten et al. 1979), como se muestra en la **figura I.1.1** :

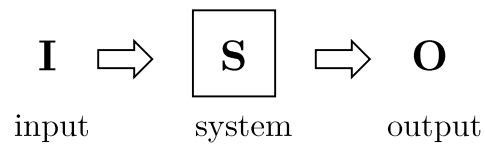


Figura I.1.1 Teoría de Señales (Adaptada de Gringarten et al. 1979)

Contrario al problema directo ($O=IxS$), la solución al problema inverso usualmente no es única. Esto implica un proceso de identificación y la interpretación provee el modelo cuyo comportamiento es idéntico al comportamiento del yacimiento analizado (Bourdet 2002). El esquema se muestra en la **figura I.1.2**. La señal de salida “O” se mide en términos de $\Delta P_{wf}(t)$ [yacimientos] o de $\Delta h(t)$ [acuíferos] y ambas se pueden interpretar de la misma manera:

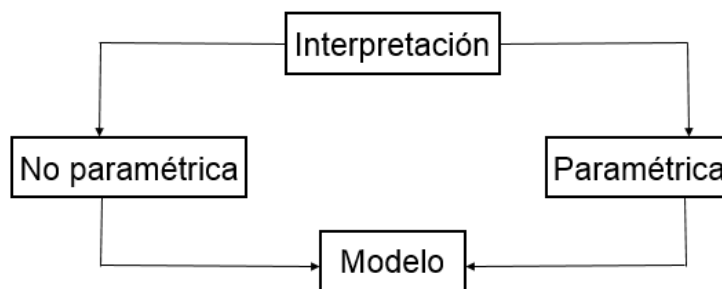


Figura I.1.2. Modelo de Interpretación

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Los modelos usados pueden ser descritos como una función de transferencia; solo define el comportamiento (homogéneo o heterogéneo, con frontera o infinito). Frecuentemente estos modelos son diferentes de los modelos geológicos o logarítmicos, debido a la variación de las propiedades del yacimiento.

Los modelos de interpretación están hechos de varios componentes, relativamente independientes y exhiben características diferentes de acuerdo a tiempos de respuesta variables. Una vez que se han identificado todos los componentes, el modelo es definido. Las soluciones analíticas y/o modelos numéricos se usan para generar cambios de presión como respuesta a gastos específicos en el histórico de producción del pozo, de manera que los parámetros del modelo son ajustados hasta que el comportamiento del modelo O es idéntico al del sistema S .

En el caso de yacimientos con comportamientos complejos, varios modelos son aplicables para describir la respuesta de la presión durante la prueba. La “no-unicidad” durante el problema inverso puede solucionarse con el uso de información adicional, como datos geológicos o geofísicos. En algunos casos, una nueva prueba puede ser diseñada para complementar o mejorar una respuesta ambigua.

El análisis derivativo (Bourdet, et al. 1983; 1989) de los datos obtenidos durante una prueba de bombeo ha sido utilizado para caracterizar yacimientos por muchos años y recientemente se ha extrapolado al ámbito hidrogeológico (Renard et al. 2009). El análisis derivativo convencional $ds/dlgt$, es descrito por metodologías conceptuales y métodos computacionales. Las dos principales aplicaciones del análisis derivativo son (Renard et al. 2009): 1) Identificación de modelos y 2) estimación de parámetros.

La identificación del modelo se facilita por el análisis derivativo de gráfico de la prueba de gasto. La derivada prueba ser altamente sensible a los cambios en el comportamiento del gasto, lo cuales son difíciles de observar en una curva normal (Xiao y Xu 2014).

El análisis derivativo implica estudiar y seleccionar un método de cálculo apropiado para eliminar los efectos negativos del ruido (Bourdet et al. 1989; Spane y Wurstner ,1993- Bourdet 2002) recomienda usar puntos adyacentes (ceranos al punto de interés) para análisis derivativos preliminares. Para remover el ruido de los cálculos, el método de Bourdet et al. (1989) usa puntos separados por una distancia (L) medida en tiempo

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

logarítmico. Generalmente, el intervalo requerido para quitar el ruido es entre 0.1 y 0.5 de un ciclo logarítmico.

Spane y Wurstner (1993) presentan un método alternativo. También usan un intervalo logarítmico diferencial. Sin embargo, en lugar de usar tres puntos en la derivada, el método calcula las derivadas a la izquierda y a la derecha, aplicando regresión lineal a todos los puntos que caen dentro del intervalo.

I.2. Objetivos

Estudiar y aplicar los algoritmos de suavizado en caracterización dinámica (con énfasis en análisis derivativos) para desarrollar una metodología que aplicada a pruebas en yacimientos petroleros y acuíferos mejore su interpretación. Particularmente exploraremos los algoritmos de: (1) ventana móvil, (2) Bourdet (Bourdet et al. 1989), (3) Spane (Spane y Wurstner, 1993) y (4) ventana de Hanning, además de una combinación de todos los anteriores. Para ello se analizan diferentes pruebas preseleccionadas, tanto petroleras (e.g. pruebas de presión) como hidrogeológicas (e.g. pruebas de bombeo) que permitan realizar un comparativo sobre su aplicabilidad, complejidad y efectividad durante la interpretación de pruebas transitorias en pozos.

CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

II.1. Conceptos Generales

Función Derivada

La derivada logarítmica de la presión/abatimiento (ej. tasa de cambio de la presión/abatimiento) se define como (Bourdet, et al. 1983):

$$\frac{\partial P}{\partial \ln t} = t \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.1)$$

donde:

P representa el abatimiento de presión en el yacimiento, expresada como una caída de presión al interior del pozo. Análogamente en el campo de hidrogeología se expresa como s [L] que representa el abatimiento del acuífero expresado como la diferencia de la carga hidráulica estática y dinámica, en el pozo de bombeo y/o en piezómetros de observación. La ecuación (2.1) comúnmente se evalúa numéricamente usando diferencias finitas (*backward finite-difference approximation*), para una serie discreta de n abatimientos y tiempos, s_i e t_i , de la siguiente manera (Renard, 2009):

$$\left. \frac{\partial s}{\partial \ln t} \right|_{t_m} = \frac{s_i - s_{i-1}}{\ln(t_i) - \ln(t_{i-1})} \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) se asocia a un tiempo t_m correspondiente a (Renard, 2009):

$$t_m = \frac{t_i + t_{i-1}}{2} \quad (2.3)$$

$$t_m = \sqrt{t_i t_{i-1}} \quad (2.4)$$

Las ecuaciones 2.3 y 2.4 representan la media aritmética y media geométrica del tiempo, respectivamente.

Suavizado de la señal

Para mejorar la relación señal/ruido, Bourdet et al. (1989) proponen un algoritmo de diferenciación que calcula la primera derivada del cambio de la presión (o del abatimiento) con respecto al \ln del cambio del tiempo.

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

Este algoritmo calcula una media pesada en el punto de interés a lo largo de una distancia en el eje de las abscisas (**L**), antes y después del punto de interés, *i*. Es por tanto un método de suavizado de la señal de la derivada. Las pendientes del cambio de la presión/abatimiento vs el cambio en el tiempo, $\Delta P/\Delta X$ se ponderan y la derivada del abatimiento para el punto de interés se calcula mediante la siguiente expresión en su estado original:

$$\left(\frac{dP}{dX}\right)_i = \frac{\left[\left(\frac{\Delta P_1}{\Delta X_1}\right) \cdot \Delta X_2 + \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta X_2}\right) \cdot \Delta X_1\right]}{\Delta X_1 + \Delta X_2} \quad (2.5)$$

donde el subíndice 1 representa el(los) punto(s) antes (izquierda) de *i*, el subíndice 2 representa el(los) punto(s) después (derecha) de *i*, y $X = \ln \Delta t^*$.

Tiempo de Agarwal, Superposición y Horner

Con el tiempo de Superposición se comprime la escala del tiempo en la corrección de la prueba de incremento. El principio de Horner (1951) señala que si el periodo actual de flujo es al menos dos veces mayor al anterior, el comportamiento se rige por el periodo actual de flujo. Esto permite desestimar los anteriores.

Cuando la respuesta de la presión es flujo radial al tiempo t_p , Δt y $t_p + \Delta t$ (al tiempo de cierre, durante el periodo de incremento y durante el decremento extrapolado), los tres p_D de la ecuación (2.6) se transforman en la aproximación semilogarítmica. Usando la presión real para flujo radial y agrupando las tres funciones logarítmicas, la ecuación del incremento resultante (2.7) muestra que un gráfico semi-log de un cierre también es una línea recta de pendiente *m* cuando el tiempo cambia en el tiempo de superposición (también llamado tiempo efectivo).

$$p_D(\Delta t)_D = p_D(\Delta t)_D - p_D(t_p + \Delta t)_D + p_D(t_p)_D \quad (2.6)$$

$$\Delta p_t(\Delta t) = 162.6 \frac{qB\mu}{kh} \left[\log \frac{t_p \Delta t}{t_p + \Delta t} + \log \frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} - 3.23 + 0.87S \right] \quad (2.7)$$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Con el Método de Horner, desarrollado 5 años antes en el ámbito hidrogeológico por (Cooper & Jacob 1946), se usa un tiempo de superposición simplificado, la constante t_p como indica la **figura II.1.1**. se ignora y la presión al cierre se grafica como función de:

$$\log \frac{(t_p + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.8)$$

Se toma $t=1$ para simplificar operaciones matemáticas.

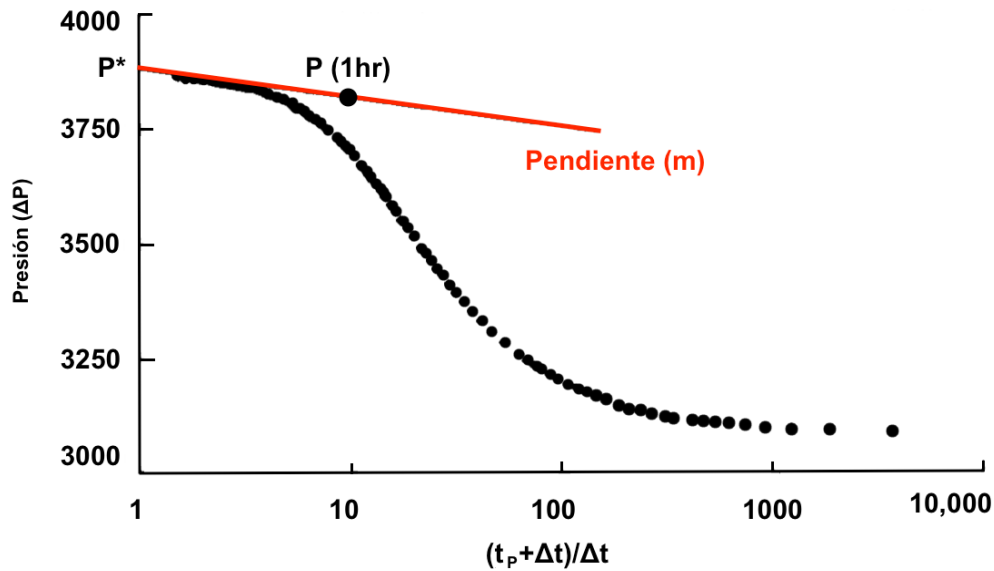


Figura II.1.1 Tiempo de Horner (Adaptado de Bourdet, 2002)

Bombeo a gasto constante

En la caracterización hidráulica de acuíferos el principal método de investigación son las pruebas de abatimiento a bombeo constante. Para implementar esta prueba se extrae agua del acuífero usando una bomba a través de un pozo. El bombeo durante el periodo de abatimiento es regulado y se mantiene a gasto constante. La respuesta es medida en el nivel de agua durante la fase de bombeo activo (abatimiento) y durante la fase de recuperación que sigue al terminar el bombeo indicado en la **figura II.1.2**. El análisis ayuda a estimar las propiedades del acuífero, así como a discernir condiciones de flujo. Los métodos estándar incluyen curva tipo en log-log y línea recta en semi-log. (Spane & Wurstner 1993)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

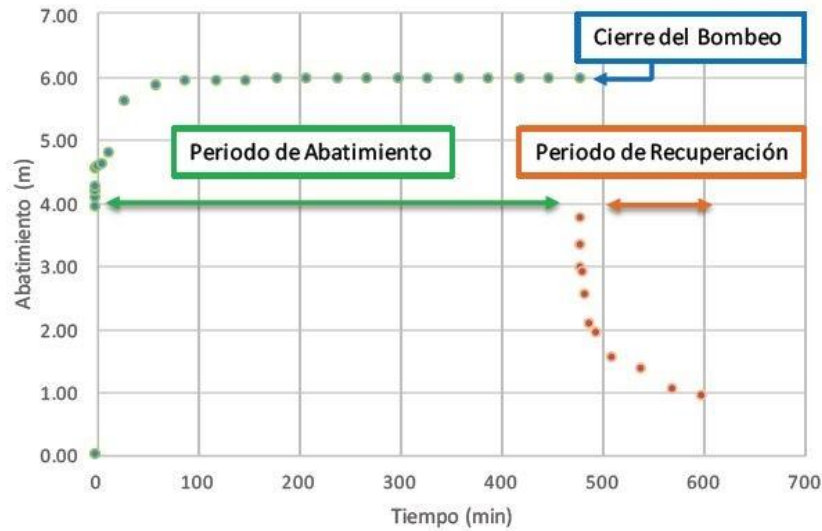


Figura II.1.2. Periodo de abatimiento y recuperación (Grupo Hidrogeología, 2016)

II.2. Algoritmo de suavizado de Bourdet

Con el enfoque de la derivada, la tasa de cambio de la presión durante un periodo de prueba es considerada para su análisis. Con el fin de hacer hincapié en el régimen de flujo radial, la derivada se toma con respecto al logaritmo del tiempo. Mediante el uso del logaritmo natural, la derivada se puede expresar como la derivada del tiempo, multiplicado por el tiempo transcurrido (Δt) desde el comienzo del período (Bourdet et al. 1983):

$$\Delta p' = \frac{dp}{d \ln \Delta t} = \Delta t \frac{dp}{dt} \quad (2.9)$$

Siendo un análisis de presión, la derivada se grafica contra Δt en log-log.

De la **figura II.2.1**, se aprecia que el algoritmo de diferenciación de datos usa tres puntos, uno antes (izquierda = 1) y otro después (derecha = 2), el punto i de interés. El método estima la pendiente a la izquierda y a la derecha, y se atribuye la media ponderada al punto i .

En un gráfico p vs t semi logarítmico:

$$\left(\frac{dp}{dX}\right) = \frac{\left[\left(\frac{\Delta P}{\Delta X}\right)_1 \Delta X_2 + \left(\frac{\Delta P}{\Delta X}\right)_2 \Delta X_1\right]}{\Delta X_1 + \Delta X_2} \quad (2.10)$$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Se recomienda empezar usando puntos consecutivos. Si el resultado de la curva derivada es muy ruidoso, se aplica suavizado incrementando la distancia ΔX entre el punto i y los puntos 1 y 2. El suavizado es definido como la distancia L , expresada en el eje del tiempo. Los puntos 1 y 2 son los primeros en la distancia $\Delta X_{1,2} > L$.

El coeficiente de suavizado incrementa hasta que la derivada se suaviza lo suficiente, pero no de más, para no introducir distorsiones. Generalmente L varía de 0-0.5.

Cuando se requiere mayor suavizado para producir una curva derivada razonable y bien definida, es recomendable examinar los datos en una escala semi-log con el tiempo de superposición y la definición de presión en el eje y como se muestra en la **figura II.2.1** Cualquier comportamiento de presión usual puede ser identificado y analizado, para determinar el mejor coeficiente de suavizado L . Por ejemplo, cuando los datos de presión están distribuidos solo en un pequeño intervalo del periodo de prueba, es mejor ignorarlos, y adaptar el suavizado de la derivada, en el resto de los datos de buena calidad.

Al final de la prueba, el punto i se acerca más al ultimo punto registrado que a la distancia L . No es posible suavisar ya del lado derecho, se alcanzó el denominado efecto final. Este efecto provoca distorsiones al final de la respuesta de la derivada (Bourdet 2002).

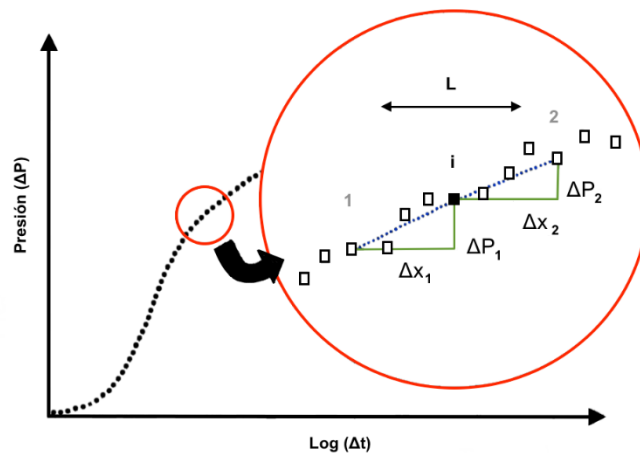


Figura II.2.1. Ventana de suavizado L (Adaptado de Bourdet, 2002)

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

II.3. Algoritmo de Spane y Wurstner

Spane y Wurstner (1993) presentan un método alternativo para calcular derivadas suavizadas. También Spane usa intervalos logarítmicos de diferenciación, sin embargo, en lugar de usar tres puntos en el cálculo de la derivada, se calcula la derivada a la izquierda y a la derecha aplicando regresión lineal a todos los puntos dentro del intervalo de diferenciación. En algunos casos, Spane otorga una derivada más suavizada que Bourdet.

$$\left(\frac{dP}{dX}\right) = \frac{\left[\left(\frac{\Delta P}{\Delta X}\right)_1 \Delta X_2 + \left(\frac{\Delta P}{\Delta X}\right)_2 \Delta X_1\right]}{\Delta X_1 + \Delta X_2} \quad (2.11)$$

La regresión lineal es otra forma de describir la relación entre dos variables “x” e “y”. Mientras que el coeficiente de Pearson indica únicamente una medida de tendencia lineal; modelos obtenidos mediante un análisis de regresión lineal permiten predecir valores arbitrarios de “y” para cualquier valor de “x” dentro de un rango de datos. Análisis estadísticos de la importancia del modelo lineal proporcionan algunas ideas sobre la exactitud de sus predicciones.

La regresión clásica asume que “y” responde a “x” y que la dispersión está completamente contenida en el rango de datos “y”. Esto significa que “x” es la variable independiente (también conocida como variable predictora, o regresiva). Los valores de “x” están definidos y supuestamente libres de errores. Un ejemplo es localizar a “x” en el núcleo de un sedimento desde el cual la variable “y” debe ser medida. La variable dependiente “y” contiene errores cuya magnitud no puede ser determinada con exactitud. La regresión lineal minimiza la desviación Δy entre los puntos “xy” y el valor “y” estimado por la línea t que mejor se ajusta. $y = b_0 + b_1x$ de acuerdo a mínimos cuadrados.

La ecuación general para el modelo de regresión lineal es:

$$y = b_0 + b_1x \quad (2.12)$$

donde:

b_0 y b_1 son los coeficiente de regresión.

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

El valor de b_0 es la intercepción con el eje “y” y b_1 es la pendiente de la línea. La suma al cuadrado de la desviación Δy en la **figura II.3.1.** es minimizada por:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (b_0 + b_1 x_i))^2 \quad (2.13)$$

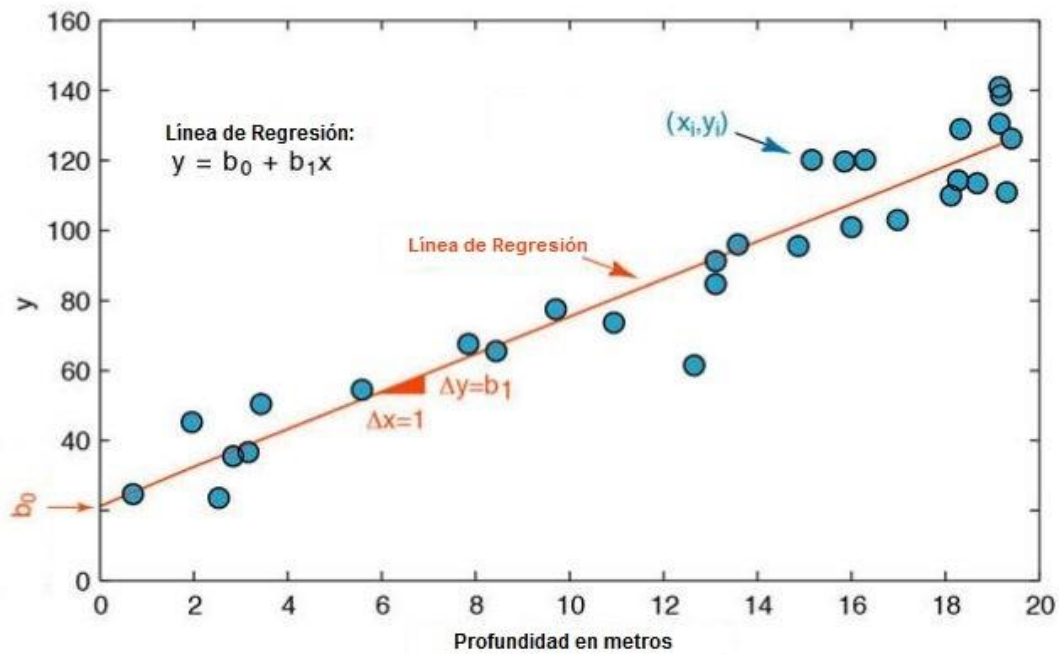


Figura II.3.1. Regresión Lineal (Adaptado de Trauth, 2007)

Mientras que la regresión lineal clásica minimiza la desviación Δy , la reducción del eje mayor minimiza el área triangular $0.5 * (\Delta x \Delta y)$ entre los datos y la línea de regresión, donde Δx y Δy son las distancias entre el valor estimado y el real de “x” y “y”. La intercepción de la línea con el eje “y” es b_0 y la pendiente es b_1 . Estos dos parámetros definen la ecuación de regresión lineal (Trauth 2007).

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

II.4. Algoritmo de ventana Móvil

La derivada propuesta por Renard et al. (2009) es un modelo de diferenciación en el que se usa el punto de interés, i , como punto fijo y se calcula como:

$$\Delta p' = \frac{dp}{d \ln \Delta t} = \Delta t \frac{dp}{dt} \quad (2.14)$$

donde:

i : punto de interés

$i-1$: punto anterior de i

En hidrogeología el número de datos disponibles puede ser limitado y espaciado irregularmente en el tiempo debido al muestreo manual. Una solución robusta y simple consiste en recrear la señal (con una interpolación Spline) en intervalos numéricos definidos y espaciados regularmente en escala logarítmica. La derivada se calcula con la señal rediseñada. Generalmente es suficiente usar de 20 a 30 puntos para obtener una buena estimación de la derivada.

El movimiento medio de orden N de una serie de valores $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ se define por la sucesión de valores correspondientes a las medias aritméticas:

Utilizando adecuadamente estos movimientos medios se eliminan los movimientos o variaciones estacionales, cíclicas e irregulares, quedando sólo el movimiento de tendencia. Una desventaja de aplicar este método es la pérdida de datos iniciales y finales de la serie original. También se puede observar que a medida que N crece, la cantidad de nuevos datos se reduce.

Si se emplean medias aritméticas ponderadas en el método de ventana móvil, el método toma de nombre Promedios Móviles Ponderados de Orden N .(Vargas Sabadia 2014)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

II.5. Algoritmo de ventana de Hanning

Las ventanas son funciones matemáticas usadas con frecuencia en el análisis y el procesamiento de señales para evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados. En el procesamiento de señales, una ventana se utiliza cuando el análisis se centra en una señal de longitud voluntariamente limitada. En efecto, una señal real tiene que ser de tiempo finito; además, un cálculo sólo es posible a partir de un número finito de puntos. Para observar una señal en un tiempo finito, se multiplica por una función ventana. La más simple es la ventana rectangular. La utilización de una ventana cambia el espectro en la frecuencia de la señal.

La ventana de Hanning se nombra por Julius von Hann, un meteorólogo australiano. También conocida como la campana Cosine. Algunos autores prefieren llamarle así que Ventana Hann, para evitar confusiones con la la Ventana de Hammming.

Muchas de las referencias a la Ventana de Hanning vienen de la literatura de Procesamiento de señales, donde se usa como una de las muchas funciones de suavizado de valores. Suavizando discontinuidades al principio y final de la señal muestreada.(Trauth 2007)

La ventana de Hanning se define como:

$$w(n) = 0.5 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right) \quad 0 \leq n \leq M-1 \quad (2.15)$$

donde:

w es la ventana

n es un número natural que determina el tamaño de la ventana.

M es el ancho del bloque analizar

La ventana Hanning realiza un buen trabajo, forzando las extremidades hacia cero, pero también agrega distorsión a la forma de onda que se está analizando, bajo la forma de modulación de amplitud, eso es la variación en amplitud de la señal sobre la grabación de tiempo. Este algoritmo se exploró como método alternativo, para suavizar inicialmente la curva del abatimiento en acuíferos. Posteriormente analizamos si la derivada tendría mejor respuesta en la remoción del ruido.

CAPÍTULO III – METODOS Y MATERIALES

III.1. Recopilación de Información

La etapa inicial de la investigación consistió en una búsqueda de información realizada por el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, en artículos científicos que tuvieran relación con las pruebas de pozos. La finalidad de esta búsqueda fue conformar una base de datos en el software Mendeley (Mendeley Ltd. 2016). Se reunieron 109 artículos en esta primera fase. En general todos los artículos tratan sobre pruebas en pozos, con diferencias importantes entre sí, incluyendo trabajos con aplicaciones de técnicas convencionales e investigaciones en las que algunos autores aplican el uso de análisis derivativos. Existen artículos que aportan estudios sobre cómo ha evolucionado la interpretación de las pruebas en pozos, nuevos algoritmos para la eliminación del ruido y el suavizado en la señal que se obtiene al calcular la derivada, así como la aplicación de nuevas técnicas de interpretación como la deconvolución. Por lo anterior, los artículos se clasificaron en tres grupos:

- Pruebas en acuíferos: incluyen los artículos en los cuales se han realizado pruebas de bombeo con interpretaciones tanto por modelos convencionales como por el uso de la derivada.
- Pruebas en yacimientos petroleros: son aquellos artículos que contienen información de aplicación de la de la derivada a la caracterización dinámica de yacimientos de fluidos.
- Otros: estos artículos no están enfocados como estudios a caracterizar formaciones, más bien son investigaciones realizadas acerca de nuevos desarrollos teóricos con el fin de mejorar los procesos y los algoritmos con que las pruebas son interpretadas.

Con nuestra base completa y disponible la información acerca de pruebas de pozos se clasificó y llevó a cabo una selección de pruebas de bombeo con el fin de contar con distintos tipos de acuíferos para caracterizar con el uso de la derivada, suavizar y comparar resultados. La compilación se muestra en la **tabla 1**:

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Tabla 1 Prueba seleccionadas para análisis

Pruebas Seleccionadas				
<i>Ubicación</i>	<i>Tipo</i>	<i>Duración</i>	<i>País</i>	<i>Referencia</i>
Arabia	<i>Hidráulica</i>	<i>3.3 hras.</i>	<i>Arabia Saudi</i>	<i>(Sen 1995)</i>
Saratoga	<i>Hidráulica</i>	<i>48 hras.</i>	<i>Estados Unidos</i>	<i>(Robert A. Greenkorn 1983)</i>
Lynden	<i>Hidráulica</i>	<i>360 hras.</i>	<i>Estados Unidos</i>	<i>Associated Earth Sciences, Inc.,2007</i>
Querétaro	<i>Hidráulica</i>	<i>1.3 hras.</i>	<i>México</i>	<i>(CONAGUA 1995)</i>
Boca del Río	<i>Hidráulica</i>	<i>7 hras.</i>	<i>México</i>	<i>Esta tesina.</i>
Bourdet	<i>Presión</i>	<i>30 hras.</i>		<i>(Bourdet et al. 1989).</i>
Agua Fría	<i>Presión</i>	<i>500 hras.</i>	<i>México</i>	<i>Esta tesina</i>

III.2. Algoritmos de suavizado e interpretación

Las pruebas seleccionadas fueron analizadas de acuerdo a los siguientes algoritmos de suavizado de la señal de la derivada:

- Ventana móvil
- Bourdet et al. (1983)
- Spane y Wurstner (1993)
- Hanning (1959)

Del conjunto de pruebas recopiladas, se seleccionaron 7 distintas, que corresponden a 2 pruebas de presión en yacimientos y 5 pruebas de bombeo en acuíferos. Las pruebas de presión se seleccionaron con el fin de ejemplificar como es que éstas se interpretan en ingeniería petrolera, utilizando la derivada y sus distintos algoritmos de suavizado.

Las pruebas de bombeo se interpretaron en distintas etapas, con la finalidad de mostrar la influencia de los algoritmos de suavizado de la derivada en las interpretaciones de los acuíferos. En primera instancia los datos de las pruebas de bombeo se interpretaron utilizando los modelos convencionales para los distintos tipos de acuíferos y obtener resultados preliminares. Posteriormente, se aplicó la derivada con un suavizado de Bourdet con una $L=0.5$ a la prueba, para realizar la interpretación no paramétrica y obtener un

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

primer modelo de ajuste, para comprobar o descartar el modelo interpretado de manera convencional.

Una vez que se tiene el modelo de ajuste, se realiza una comparación de todos los algoritmos de suavizado y los distintos valores que puede tomar el parámetro de suavizado (L) para observar cómo la curva derivada cambia con respecto al modelo de interpretación seleccionado y mediante el cálculo de distintos valores estadísticos, se seleccionó el mejor comportamiento.

Para determinar el algoritmo que otorga el mejor ajuste con respecto al modelo matemático seleccionado, calculamos la suma de los residuales cuadráticos (RSS por sus siglas en inglés *Residual Sum of Squares*) El RSS se calcula de la siguiente manera:

$$RSS = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (3.1)$$

donde; $e = y_i - \hat{y}_i$; a su vez i se refiere a la derivada modelada e \hat{i} a la derivada suavizada.

Por último, para interpretar la prueba de manera paramétrica se utiliza la derivada con el menor rango de ajuste y se calculan los valores característicos del acuífero.

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización dinámica del acuífero, se aplica el algoritmo de suavizado de Hanning (1959) a los datos crudos de la prueba de bombeo, para realizar un suavizado preliminar en la curva del abatimiento, antes de aplicar la derivada. Se deriva la curva y se calcula nuevamente el error con respecto al modelo de interpretación. En caso de que sea necesario, se realizará nuevamente la caracterización del acuífero para obtener mejores resultados. Lo anterior se realiza para comprobar cómo realizando un suavizado antes de iniciar la interpretación afectará más adelante, tanto de manera positiva como negativa.

Para el procesamiento y análisis de las pruebas se usaron las siguientes herramientas computacionales:

- AQTESOLV (HydroSOLVE 2015)
- PYTHON (Python Software Foundation 2016)
- PANSYSTEM (Well-Test Analysis Software)
- Ms EXCEL

CAPÍTULO IV – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. Casos de análisis

Caso 1. Arabia

Se realizó una prueba de bombeo a caudal constante de $0.478 \text{ m}^3/\text{min}$, donde las observaciones se realizaron directamente en el pozo de bombeo, el cual se encuentra totalmente penetrante en el acuífero, con un espesor saturado de 100 m. La geología del acuífero consiste de arenas de grano fino y grueso del Cuaternario, con una capa de limo.

El **gráfico IV.1.1** muestra los datos crudos medidos de la prueba, debido a que la literatura (HydroSOLVE, 2015) lo reporta como acuífero confinado se interpretó por medio del modelo de (Theis, 1935) para acuíferos confinados. Sin embargo, como se señala en la gráfica, la parte final de la curva de abatimiento no coincide con el ajuste realizado, lo que indica que algo está afectando su comportamiento característico, que puede ser debido al efecto de algún tipo de frontera o régimen de flujo, que no es posible identificar únicamente con el uso de modelos convencionales.

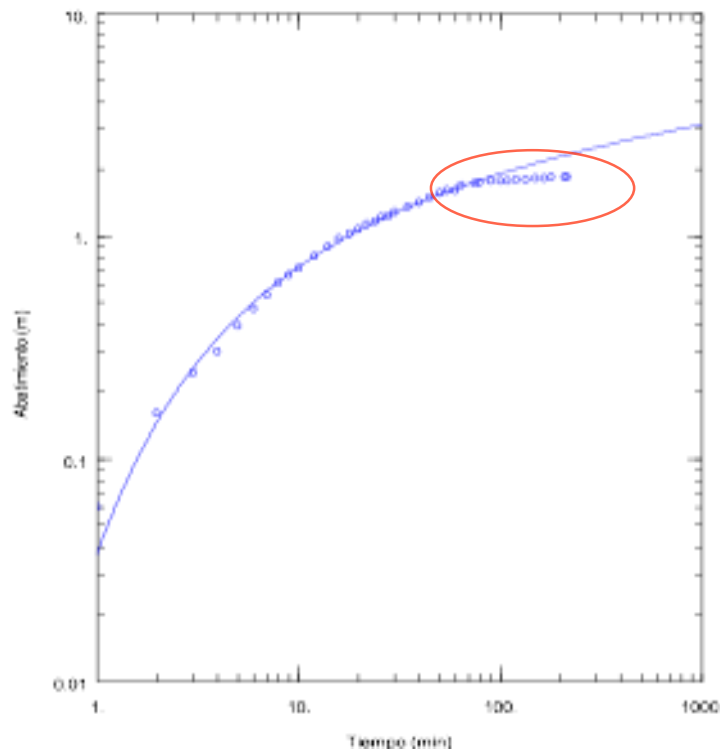


Gráfico IV.1.1. Datos crudos de la prueba de bombeo y su ajuste mediante el modelo de Theis (1935)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Para poder determinar el modelo teórico de ajuste de la prueba de bombeo, es necesario realizar una primera interpretación por medio de la derivada. Como lo recomiendan distintos autores (Bourdet, 2002; Gringarten, 2008; Spane y Wurstner, 1993), para comprobar el comportamiento del acuífero se utilizó el algoritmo de Bourdet con $L=0.5$, la prueba se interpretó de manera no paramétrica como se muestra en el **gráfico IV.1.2**. Se observa inicialmente un periodo de almacenamiento de pozo, seguido de una estabilización en flujo radial y finalizando con una frontera de recarga del acuífero, se puede comprobar que el modelo de acuífero confinado no es el correcto para realizar la interpretación, por lo que nuevamente se llevará a cabo utilizando el modelo de Hantush-Jacob (1955) para acuíferos semiconfinados.

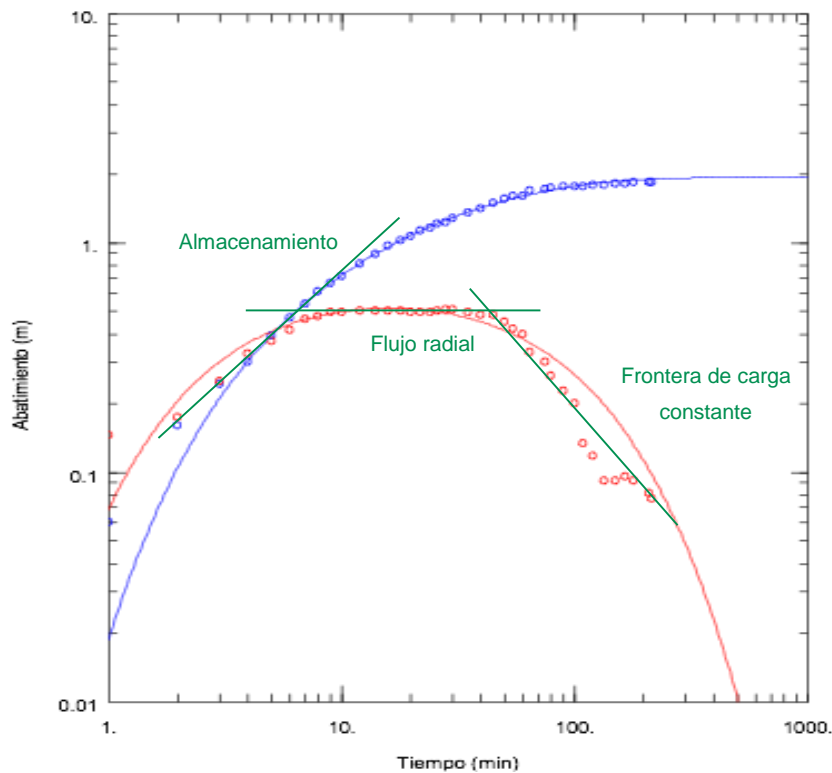


Gráfico IV.1.2. Interpretación no paramétrica con Bourdet (1983) con $L=0.5$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Aun cuando la derivada calculada por el algoritmo de Bourdet presenta un suavizado de calidad, se utilizarán los demás algoritmos con el fin de mostrar que tanta variación se tiene de la derivada con los distintos suavizados, para elegir aquel que muestre el mejor comportamiento. La **figura IV.1.3** muestra la comparación de los tres distintos tipos de algoritmos de suavizado con la finalidad de determinar cuál de ellos es el que realiza un mejor ajuste y así poder llevar a cabo la comprobación del modelo anterior. Las gráficas muestran una serie de puntos, donde la curva de abatimiento representa los datos del bombeo medidos en el pozo y las siguientes curvas muestran las distintas formas que la derivada puede tomar al calcularse con distintos valores de suavizado.

Se observa que tanto el modelo de Bourdet como Spangne presentan un comportamiento similar en los distintos valores del factor de suavizado L . Analizando estas gráficas en conjunto, los valores de L que van desde 0 hasta 0.4, presentan un suavizado pobre con una dispersión de puntos de consideración y que se sitúan por encima de la curva generada con valor de $L=0.5$. Los valores de L que van desde 0.6 hasta 1 se sitúan por debajo de la curva de $L=0.5$, presentando un mejor suavizado y generando curvas más delineadas, sin embargo, estas curvas presentan una disminución del tiempo en que el periodo de flujo radial se muestra, lo que llevaría a una interpretación incorrecta. La gráfica que muestra el suavizado utilizando el algoritmo de Ventana Móvil presenta la mayor distorsión de puntos, se observa que con un valor de 2% y 3%, se tienen suavizados aceptables que muestran los periodos de flujo presentes en la prueba, sin embargo, con un mayor valor las curvas comienzan a distorsionarse presentando comportamientos que no son correctos.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

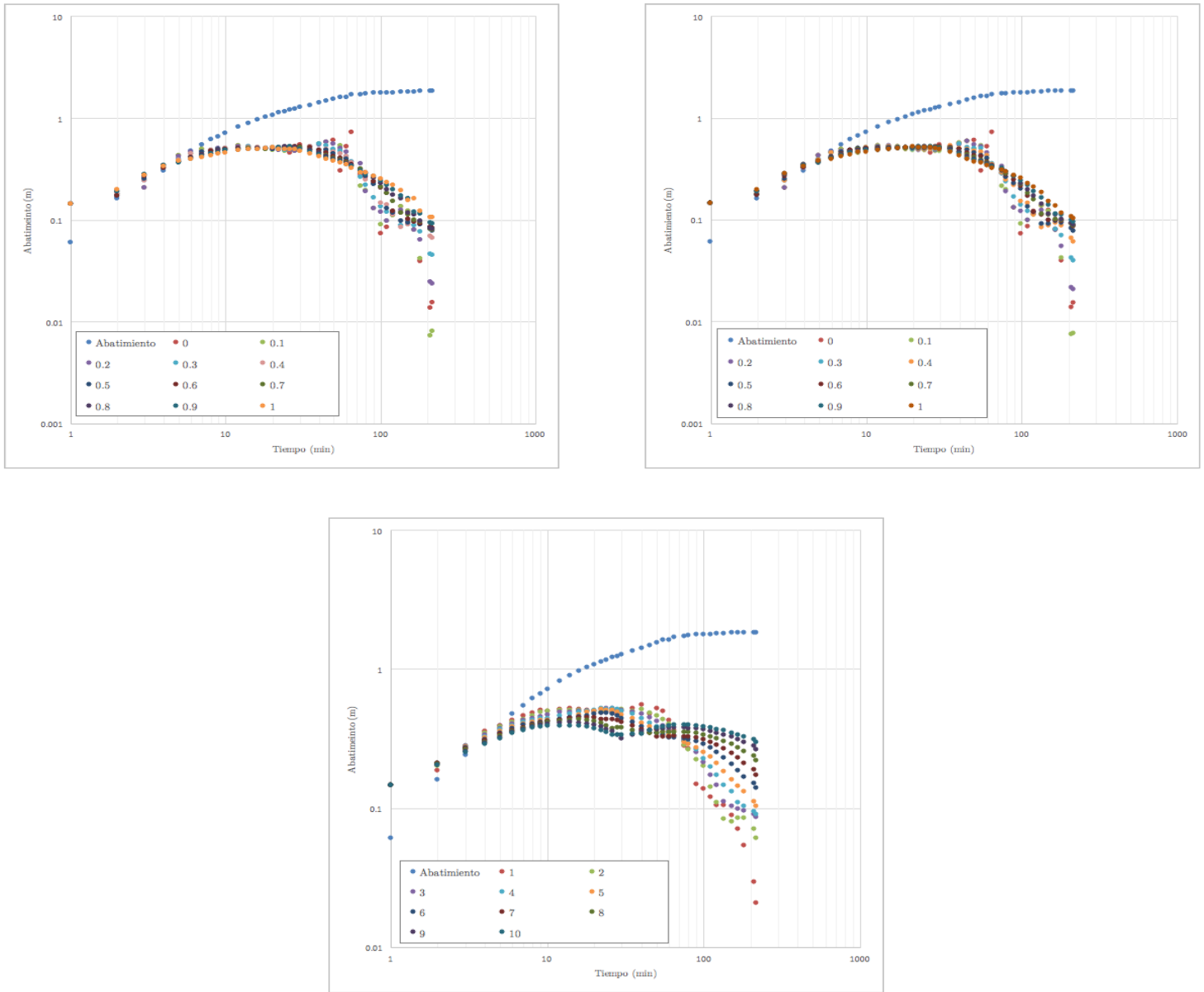


Figura IV.1.3. Gráfica de la prueba de bombeo y sus derivadas por los modelos de a) Bourdet (1983), b) Spane (1993) y c) Ventana Móvil

Analizando las gráficas anteriores es posible definir que existen grandes cambios dentro de un rango de puntos en específico; para Bourdet (1983) corresponde a aquellos puntos calculados con un suavizado de $L= 0.1$, $L= 0.3$ y $L= 0.5$, para Spane (1993) los valores de $L= 0.1$, $L= 0.5$ y $L= 0.7$ y para el algoritmo de Ventana Móvil son 1%, 2% y 10%.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Las figuras IV.1.4., IV.1.5. y IV.1.6. muestran la comparación realizada a los distintos algoritmos de suavizado y el modelo de ajuste teórico que permite un mejor análisis de la prueba.

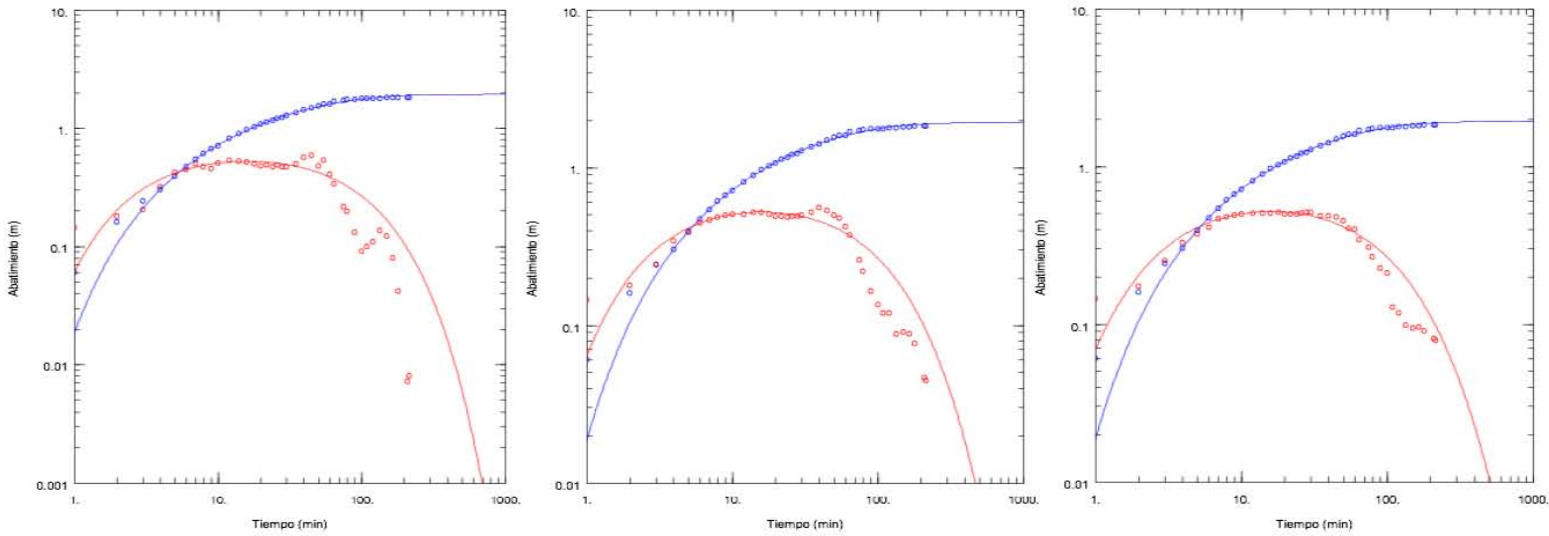


Figura IV.1.4. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Bourdet (1983) de $L=0.1$, $L=0.3$ y $L=0.5$

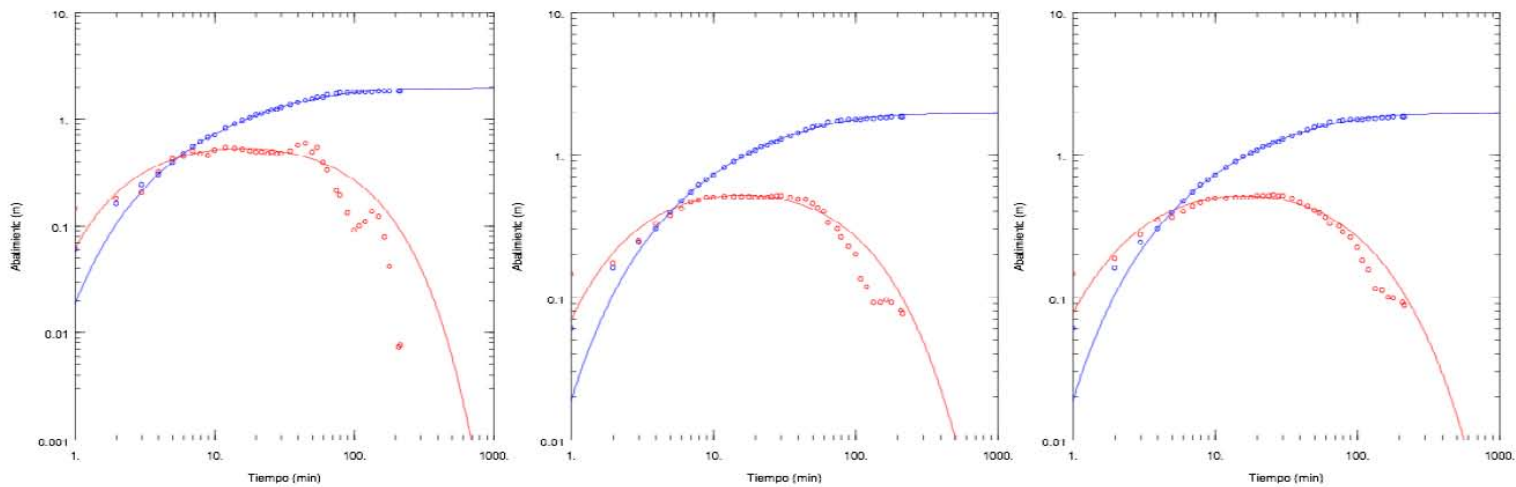


Figura IV.1.5. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Spane (1993) de $L=0.1$, $L=0.5$ y $L=0.7$

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

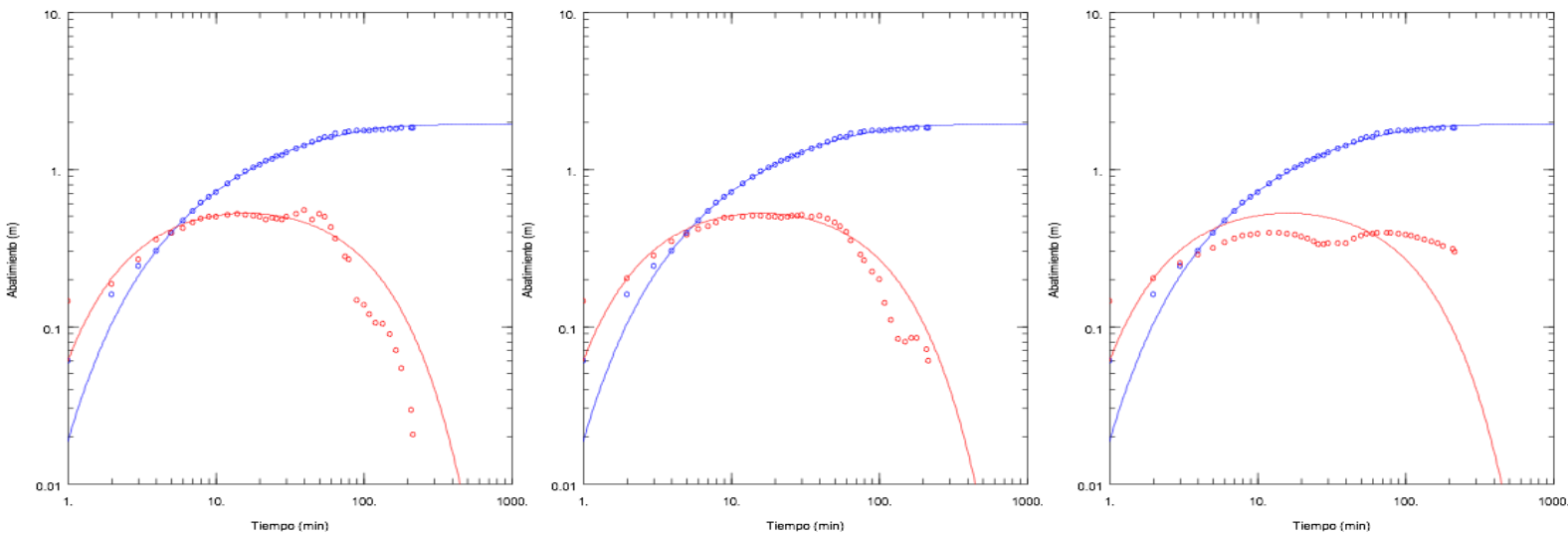


Figura IV.1.6. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Ventana Móvil de rangos 1%, 2% y 10%

Con base en los resultados obtenidos para los distintos algoritmos y el modelo teórico de ajuste de la deriva, se calculan los valores residuales entre ambos, para así poder identificar el que presenta el menor rango de error, estos se muestran en la **tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Análisis estadístico de los algoritmos de suavizado de la derivada

Algoritmo	Modelo de ajuste	RSS	Varianza	Desv. Estd.
Ventana Móvil (%)	Hantush-Jacob			
1		0.003920	0.016986	0.130331
2		0.002321	0.010060	0.100298
10		0.016881	0.073150	0.270463
Bourdet (L)	Hantush-Jacob			
L= 0.1		0.006106	0.026458	0.162660
L= 0.3		0.003923	0.017001	0.130387
L= 0.5		0.002025	0.008777	0.093685
Spane (L)	Hantush-Jacob			
L= 0.1		0.002138	0.009263	0.096244
L= 0.5		0.006123	0.026532	0.162885
L= 0.7		0.001283	0.005561	0.074569

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Como resultado del análisis estadístico, el algoritmo de Spane con $L=0.7$ es el que presenta el menor valor de RSS (valor resaltado en "negritas" en la tabla), sin embargo, al realizar el análisis visual de la curva, se puede observar que existe una alteración en la geometría de flujo radial, disminuyendo el periodo de tiempo en el que éste se encuentra activo. Por lo anterior, se seleccionará Spane (1993) con $L=0.7$ para realizar la interpretación paramétrica, debido a que es el siguiente algoritmo con el menor RSS con un ajuste visual adecuado y así estimar los parámetros característicos del acuífero, los cuales se presentan en el gráfico IV.1.7. y la tabla 1.2.

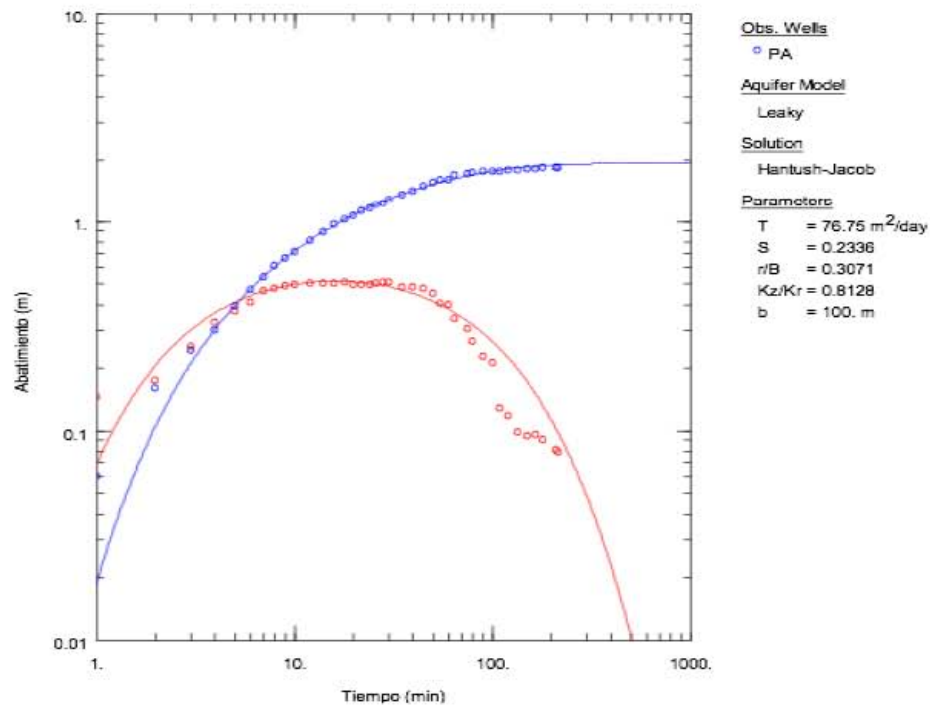


Gráfico IV.1.7. Interpretación paramétrica mediante Spane (1993) con $L=0.7$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Tabla 1.2. Resultados de ambas interpretaciones y sus valores estadísticos

	Theis	Hantush-Jacob
Transmisividad (T)	100.5 m ² /día	76.75 m ² /día
Conductividad Hidráulica (K)	1.005 m/día	0.77 m/día
Coef. de Almacenamiento (S)	0.22	0.23
Coef. de Almacenamiento Específico (S _s)	0.002 m ⁻¹	0.002 m ⁻¹
RSS (s)	-0.03 m	0.002 m
Varianza	0.006 m ²	0.0006 m ²

Una vez que se tienen los resultados de la interpretación de la prueba de bombeo, se utiliza el algoritmo de suavizado de Hanning (1959) con la finalidad de observar si la curva que contiene los datos crudos del abatimiento medido en el pozo, muestra una variación de importancia y así realizar un mejor ajuste. Sin embargo, como se observa en la **tabla 1.3** y en el **gráfico IV.1.8.** ambas curvas no presentan una diferencia de consideración, por lo que se finaliza con la interpretación.

Tabla 1.3. Valores estadísticos del suavizado por medio del algoritmo de Hanning (1959)

Algoritmo	Modelo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Hanning+Spane	Hantush-Jacob	0.001676	0.007261	0.085211

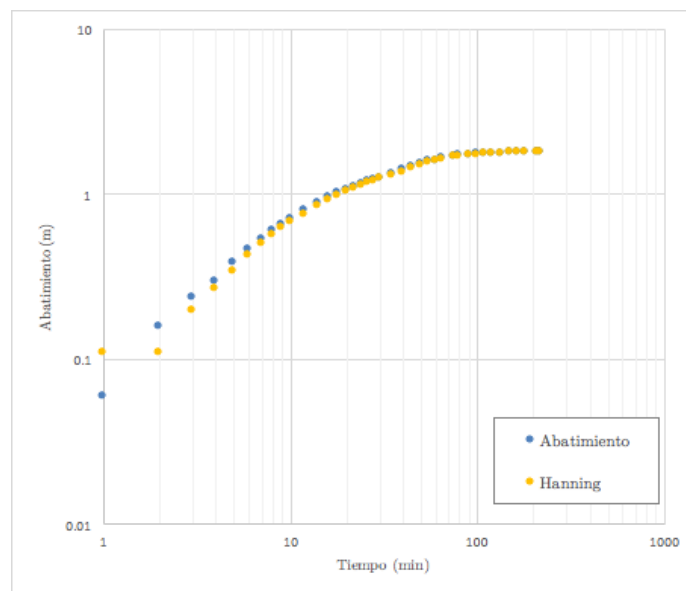


Gráfico IV.1.8. Comparativo de la curva del abatimiento medido y suavizada con el algoritmo de Hanning (1959)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Caso 2. Saratoga

Se realizó una prueba de bombeo a caudal constante de $0.065 \text{ m}^3/\text{min}$, donde las observaciones se realizaron en un pozo de observación situado a 4.17 m del pozo de bombeo, el cual se encuentra parcialmente penetrante en el acuífero, con un espesor saturado de 5 m . La geología del acuífero consiste de arenas de grano fino y grueso del cuaternario, con una capa de lino (Grantcorn, 1983).

La **figura IV.2.1.** muestra la gráfica de los datos crudos medidos de la prueba, de manera convencional se interpretó por medio del modelo de Neuman (1975) para acuíferos libres. Se utilizará la derivada, para comprobar el modelo elegido de interpretación y los valores característicos del acuífero ajustando las distintas geometrías de flujo.

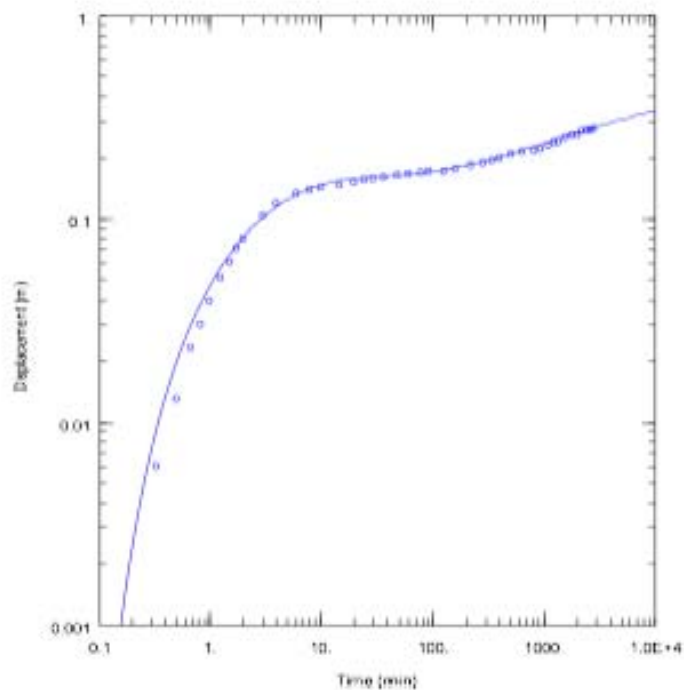


Figura IV.2.1. Gráfica de los datos crudos de la prueba de bombeo y su ajuste mediante el modelo de Neuman (1975)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Para poder determinar el modelo teórico de ajuste de la prueba de bombeo, es necesario realizar una primera interpretación por medio de la derivada. Como lo recomiendan distintos autores (Bourdet, 2002; Gringarten, 2008; Spane y Wurstner, 1993), para comprobar el comportamiento del acuífero se utilizó el algoritmo de Bourdet (1983) con $L=0.5$, la prueba se interpretó de manera no paramétrica como se muestra en la **figura IV.2.2**. En ella se observa inicialmente la intersección de la curva de abatimiento y su derivada se lleva a cabo, la cual es característica de los pozos de observación, seguido de un largo periodo de transición característico de los acuíferos libres y finalizando con una pequeña estabilización en flujo radial. Con lo anterior, se puede comprobar que el modelo de acuífero libre es el correcto para realizar la interpretación, únicamente se utilizará la derivada para ajustar de mejor manera el modelo seleccionado.

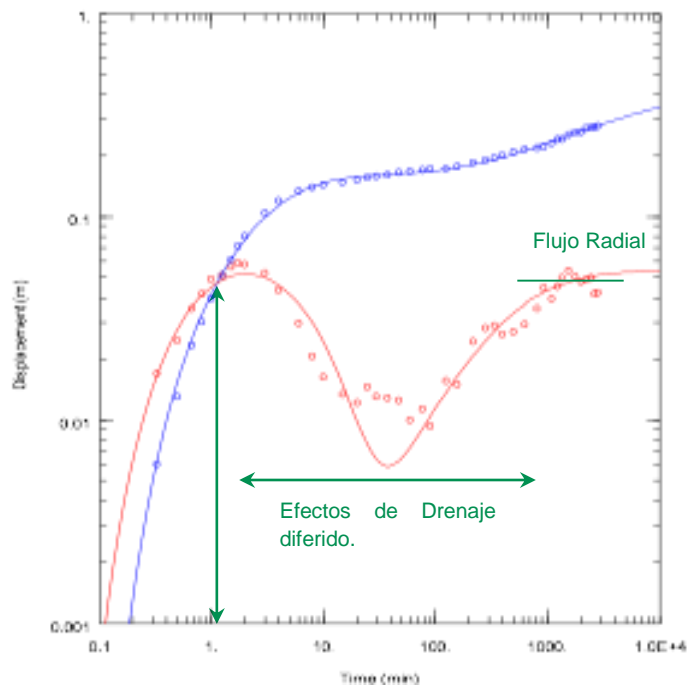


Figura IV.2.2. Interpretación no paramétrica por el modelo de Bourdet (1983) con $L=0.5$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Aun cuando la derivada calculada por el algoritmo de Bourdet presenta un buen suavizado, se utilizarán los demás algoritmos con el fin de mostrar que tanta variación se tiene de la derivada, para elegir aquel que muestre el mejor comportamiento. La **figura IV.2.3.** muestra la comparación de los tres distintos tipos de algoritmos de suavizado con la finalidad de determinar cuál de ellos es el que realiza un mejor ajuste y así poder llevar a cabo la comprobación del modelo seleccionado. Las gráficas muestran una serie de puntos, donde la curva de abatimiento representa los datos del bombeo medidos en el pozo y las siguientes curvas muestran las distintas formas que la derivada puede tomar al calcularse con distintos valores de suavizado.

Se observa que tanto el modelo de Bourdet como Spangne presentan un comportamiento similar en los distintos valores del factor de suavizado L . Analizando estas gráficas en conjunto, los valores de L que van desde 0 hasta 0.4, presentan un suavizado pobre con una dispersión de puntos de consideración. Los valores de L que van desde 0.6 hasta 1 presentan un mejor suavizado y generando curvas más delineadas, favoreciendo el ajuste de la derivada y el modelo de interpretación.

La gráfica que muestra el suavizado utilizando el algoritmo de Ventana Móvil presenta la mayor distorsión de puntos, se observa que con el valor de 1% se tiene un ajuste cercano al modelo teórico, aunque no es bueno, la derivada mantiene su comportamiento, sin embargo, con valores de suavizado mayores las curvas comienzan a distorsionarse eliminando el efecto del drenaje diferido del acuífero libre y mostrando pendientes que tienden a estabilizarse en periodo de flujo radial, las cuáles son incorrectas.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

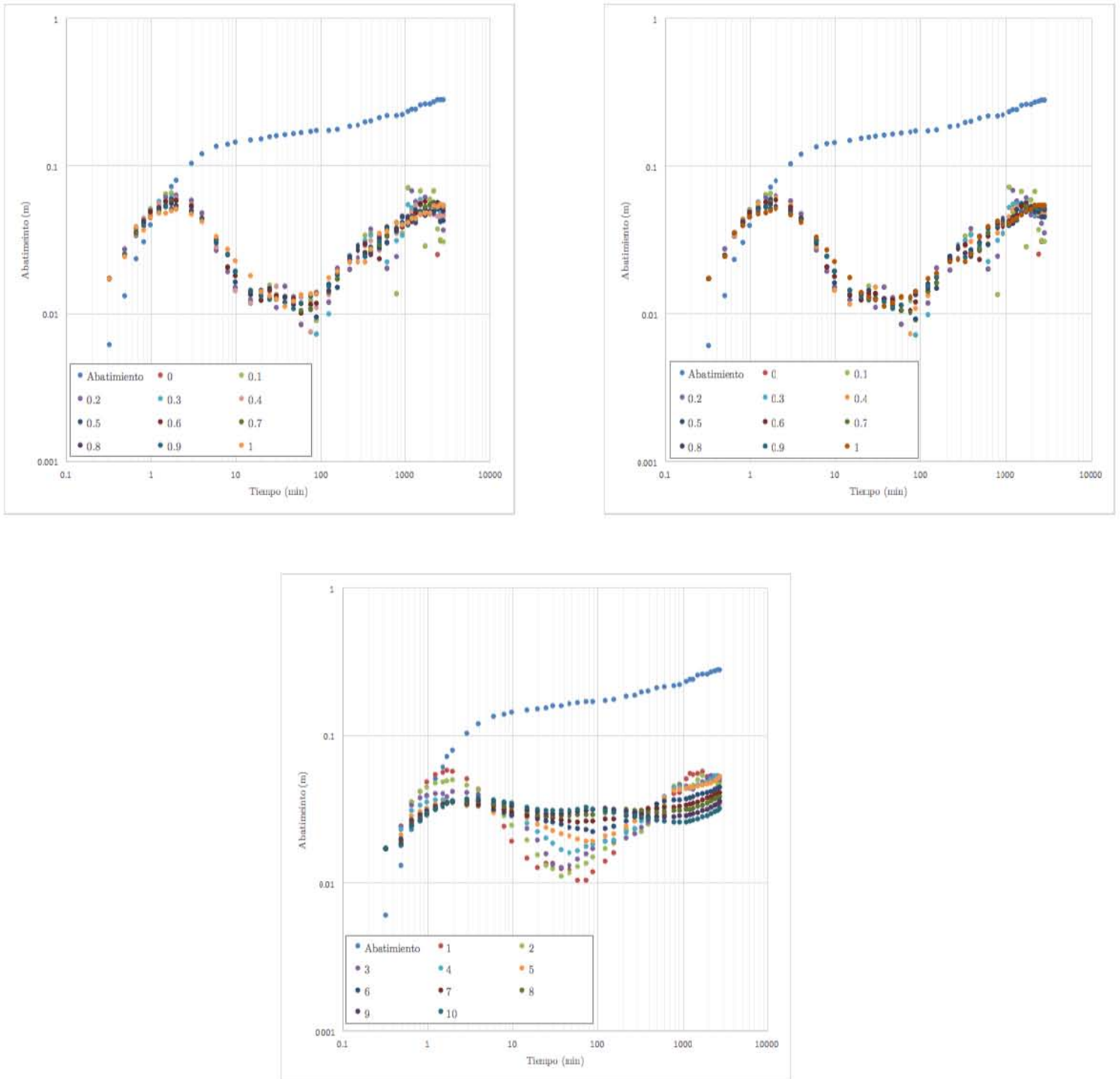


Figura IV.2.3. Gráfica de la prueba de bombeo y sus derivadas por los modelos de a) Bourdet (1983), b) Spane (1993) y c) Ventana Móvil

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Analizando las gráficas anteriores es posible definir que existen grandes cambios dentro de un rango de puntos en específico; para Bourdet corresponde a aquellos puntos calculados con un suavizado de $L=0.1$, $L=0.3$ y $L=0.5$, para Spane los valores de $L=0.1$, 0.5 y 0.7 y para el algoritmo de Ventana Móvil son 1%, 3% y 10%. Las figuras IV.2.4., IV.2.5. y IV.2.6. muestran la comparación realizada a los distintos algoritmos de suavizado y el modelo de ajuste teórico que permite un mejor análisis de la prueba.

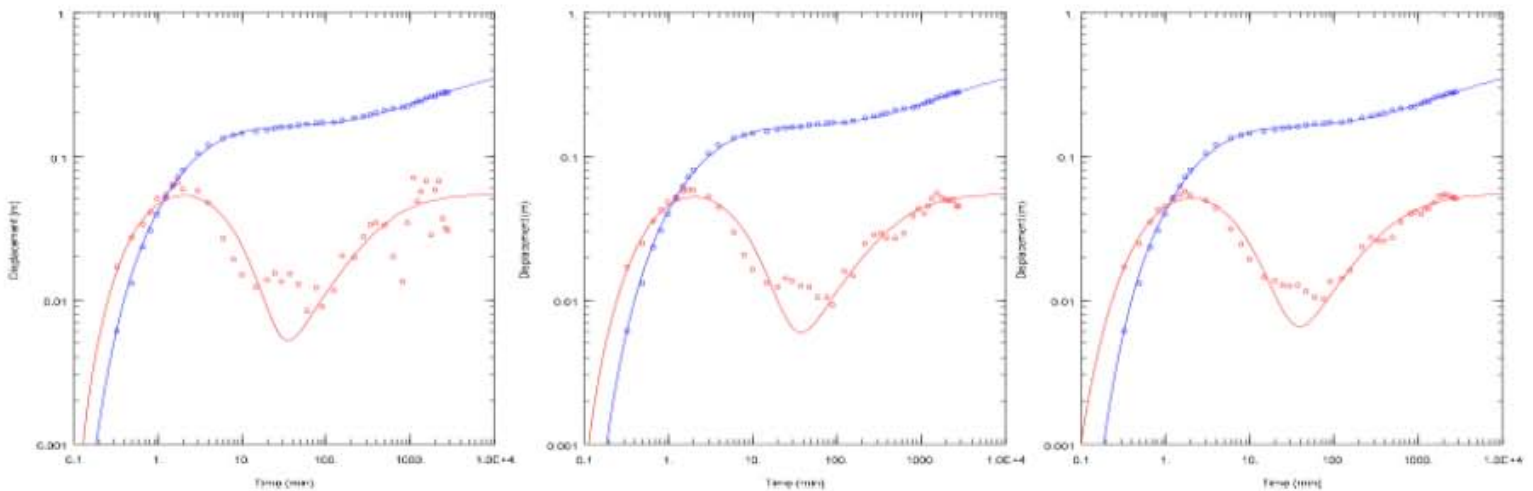


Figura IV.2.4. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Bourdet (1983) de $L=0.1$, $L=0.3$ y $L=0.5$

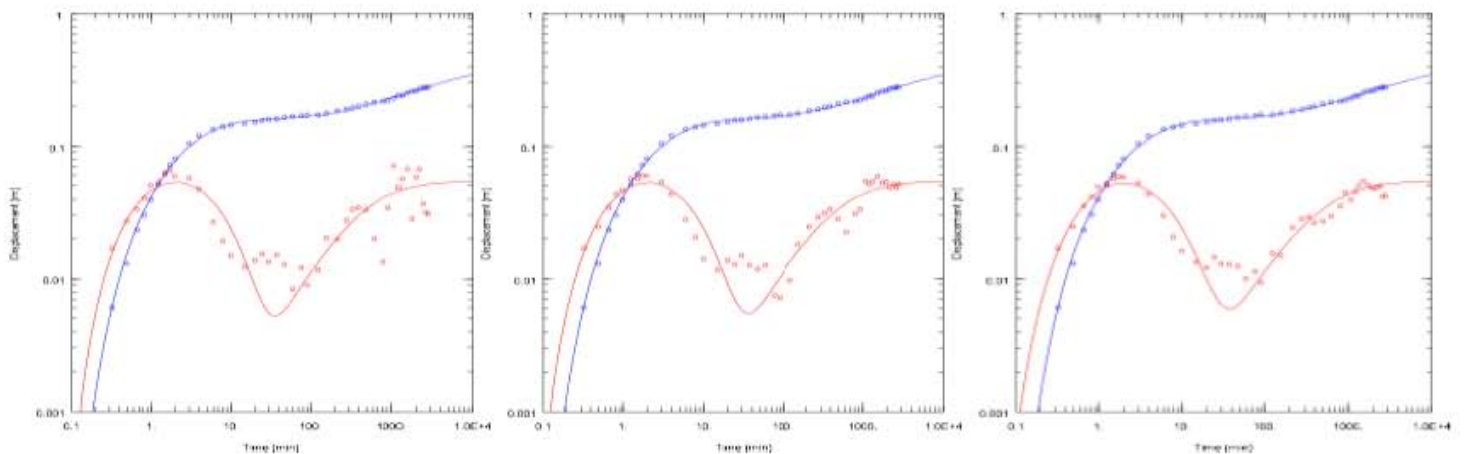


Figura IV.2.5. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Spane (1993) de $L=0.1$, $L=0.5$ y $L=0.7$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

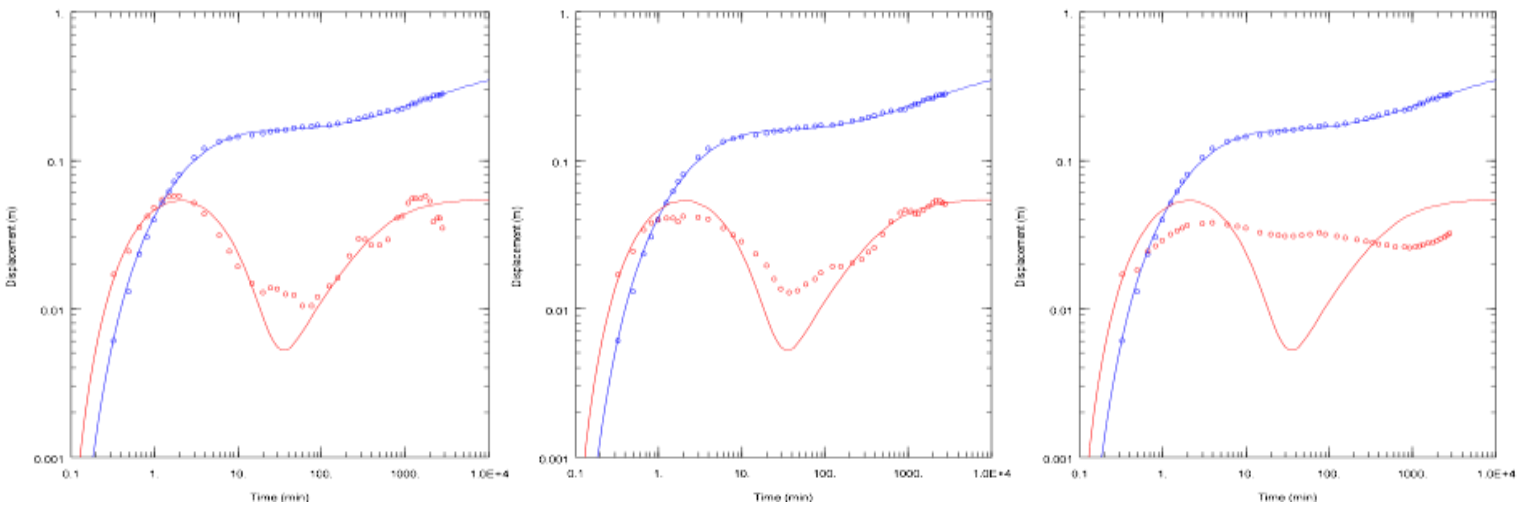


Figura IV.2.6. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Ventana Móvil de rangos 1%, 3% y 10%

Con base en los resultados obtenidos para los distintos algoritmos y el modelo teórico de ajuste de la deriva, se calculan los valores residuales entre ambos, para así poder identificar cuál de ellos es el que presenta el menor rango de error, estos se muestran en la **tabla 2.1**.

Tabla 2.1. Análisis estadístico de los algoritmos de suavizado de la derivada

Algoritmo	Modelo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Ventana Móvil (%)	Neuman			
1		0.000038	0.001616	0.040194
3		0.000037	0.001601	0.040012
10		0.000303	0.013036	0.114175
Bourdet (L)	Neuman			
L= 0.1		0.000121	0.005214	0.072207
L= 0.3		0.000038	0.001614	0.040171
L= 0.5		0.000025	0.001085	0.032939
Spane (L)	Neuman			
L= 0.1		0.000121	0.005218	0.072233
L= 0.5		0.000023	0.000974	0.031204
L= 0.7		0.000014	0.000582	0.024120

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Como resultado del análisis estadístico, el algoritmo de Spane (1993) con $L=0.7$ es el que presenta el menor valor de RSS, por lo que es el seleccionado para ser interpretado, debido a que es el algoritmo con el menor RSS, además de que cuenta con un ajuste visual adecuado que permite observar las geometrías de flujo presentes sin distorsionar la derivada, para así estimar los parámetros característicos del acuífero, los cuales se presentan en la **figura IV.2.7**. La **tabla 2.2** muestra los resultados de la interpretación paramétrica tanto del modelo interpretado de manera convencional, como por el modelo ajustado utilizando la derivada. Se puede observar que los resultados son aproximadamente iguales debido a que el modelo seleccionado de acuífero libre es el correcto para la prueba realizada, sin embargo, la pequeña variación se presenta al realizar un mejor ajuste del modelo de interpretación utilizando la derivada.

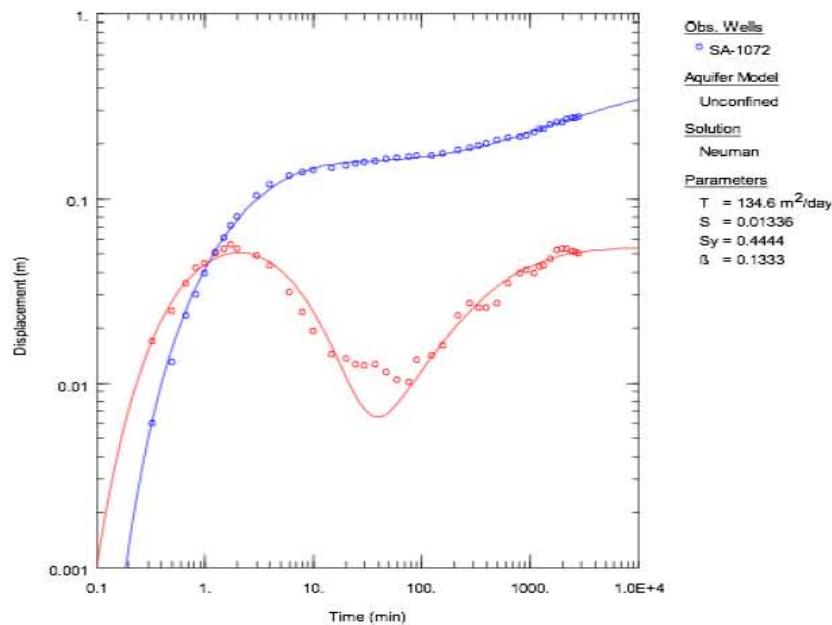


Figura IV.2.7. Gráfico de la interpretación paramétrica mediante Spane (1993) con $L=0.7$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Tabla 2.2. Resultados de ambas interpretaciones y sus valores estadísticos

	Neuman	Neuman (Corregido)
Transmisividad (T)	154.6 m ² /día	134.6 m ² /día
Conductividad Hidráulica (K)	31.18 m/día	27.14 m/día
Coef. de Almacenamiento (S)	0.126	0.133
Coef. de Almacenamiento Específico (S _s)	0.0025 m ⁻¹	0.0027 m ⁻¹
RSS (s)	-0.0037 m	0.0002 m

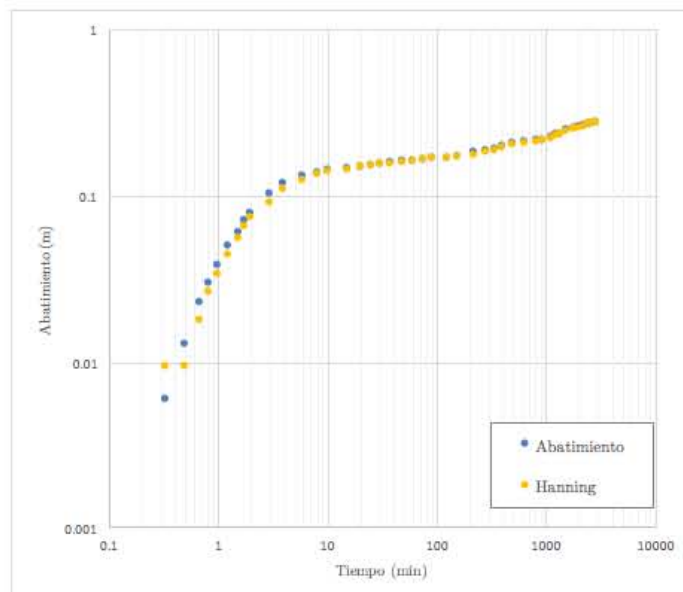
Una vez que se tienen los resultados de la interpretación de la prueba, se utiliza el algoritmo de suavizado de Hanning (1959) con la finalidad de observar si la curva que contiene los datos crudos del abatimiento medido en el pozo, muestra una variación de importancia y así realizar un mejor ajuste. Como se observa en la **tabla 2.3** y en la **figura IV.2.8**, ambas curvas no presentan una diferencia de consideración y además los residuales obtenidos con los datos crudos son mejores que al aplicar el suavizado, por lo que se finaliza con la interpretación.

Tabla 2.3. Valores estadísticos del suavizado por medio del algoritmo de Hanning (1959)

Algoritmo	Modelo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Hanning+Spane	Neuman	0.000028	0.001202	0.034676

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Figura IV.2.8. Gráfica comparativa de la curva del abatimiento medido y suavizada por el algoritmo de Hanning (1959)



ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Caso 3. Lynden

Se realizó una prueba de bombeo a caudal constante de $0.222 \text{ m}^3/\text{min}$, donde las observaciones se realizaron en un pozo de observación situado a 30.9 m del pozo de bombeo, totalmente penetrante en el acuífero, con un espesor saturado de 33.57 m. La geología del acuífero consiste de arenas de grano fino y grueso del cuaternario, con una capa de limo.

La **figura IV.3.1** muestra la gráfica de los datos crudos medidos de la prueba, de manera convencional se interpretó por medio del modelo de Theis (1935) para acuíferos confinados. Como se señala en la gráfica existe una serie de puntos que no ajustan por completo en el modelo, por lo que se utilizará la derivada, para comprobar el modelo elegido de interpretación y los valores característicos del acuífero ajustando las distintas geometrías de flujo.

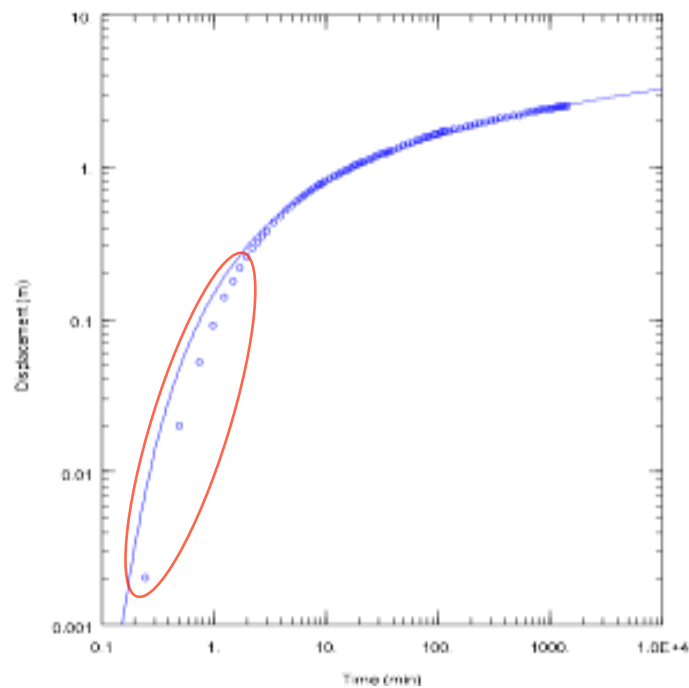


Figura IV.3.1. Gráfica de los datos crudos de la prueba de bombeo y su ajuste mediante el modelo de Theis (1935)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Para determinar el modelo teórico de ajuste de la prueba de bombeo, es necesario realizar una primera interpretación por medio de la derivada. Como lo recomiendan distintos autores (Bourdet, 2002; Gringarten, 2008; Spane y Wurstner, 1993), para comprobar el comportamiento del acuífero se utilizó el algoritmo de Bourdet con $L=0.5$, la prueba se interpretó de manera no paramétrica como se muestra en la **figura IV.3.2**. En ella se observa inicialmente la intersección de la curva de abatimiento y su derivada, la cual es característica de los pozos de observación y que coincide con los puntos anteriormente señalados; seguidos de un largo periodo de estabilización de flujo radial. Con lo anterior, se puede comprobar que el modelo de acuífero confinado es el correcto para realizar la interpretación, aunque debido al ruido que la prueba contiene, se pueden observar discordancias entre los puntos de la derivada y el modelo teórico de ajuste, por lo que es necesario recurrir a los distintos algoritmos para realizar una mejor interpretación.

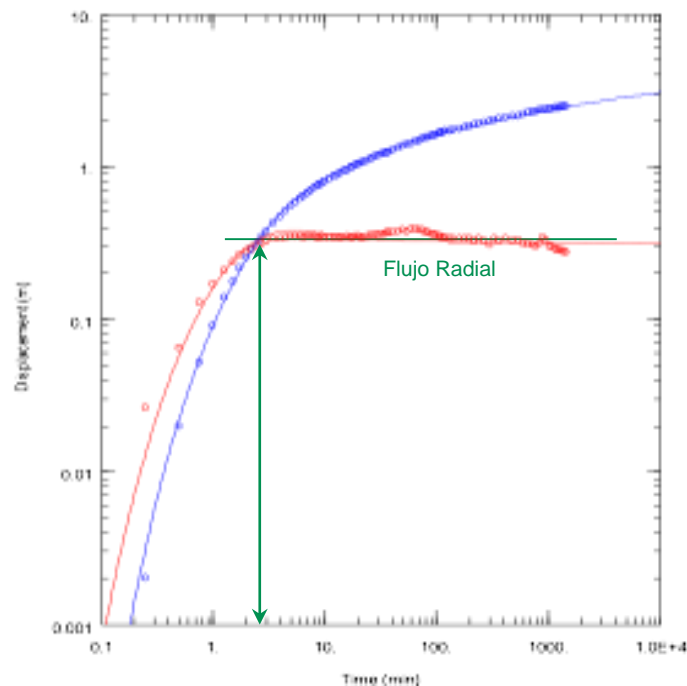


Figura IV.3.2. Interpretación no paramétrica por el modelo de Bourdet (1983) con $L=0.5$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

La **figura IV.3.3** muestra la comparación de los tres distintos tipos de algoritmos de suavizado con la finalidad de determinar cuál de ellos es el que realiza un mejor ajuste y así poder llevar a cabo la comprobación del modelo seleccionado. Las gráficas muestran una serie de puntos, donde la curva de abatimiento representa los datos del bombeo medidos en el pozo y las siguientes curvas muestran las distintas formas que la derivada puede tomar al calcularse con distintos valores de suavizado.

Se observa que los tres modelos presentan un comportamiento similar en los distintos valores de suavizado, Analizando las tres gráficas en conjunto, exceptuando algunos puntos que salen de tendencia, todas las curvas presentan una tendencia de línea recta con pendiente igual a cero, por lo que el análisis estadístico de las curvas será de gran importancia para determinar cuál de ellas es la que presenta el mejor ajuste. Se analizarán aquellas en las que existen grandes cambios dentro de un rango de puntos en específico; para Bourdet (1983) corresponde a aquellos puntos calculados con un suavizado de $L= 0.1, 0.3$ y 0.5 , para Spane (1993) los valores de $L= 0.1, 0.5$ y 0.7 y para el algoritmo de Ventana Móvil son 1%, 3% y 10%. Las **figuras IV.3.4., IV.3.5. y IV.3.6.** muestran la comparación realizada a los distintos algoritmos de suavizado y el modelo de ajuste seleccionado.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

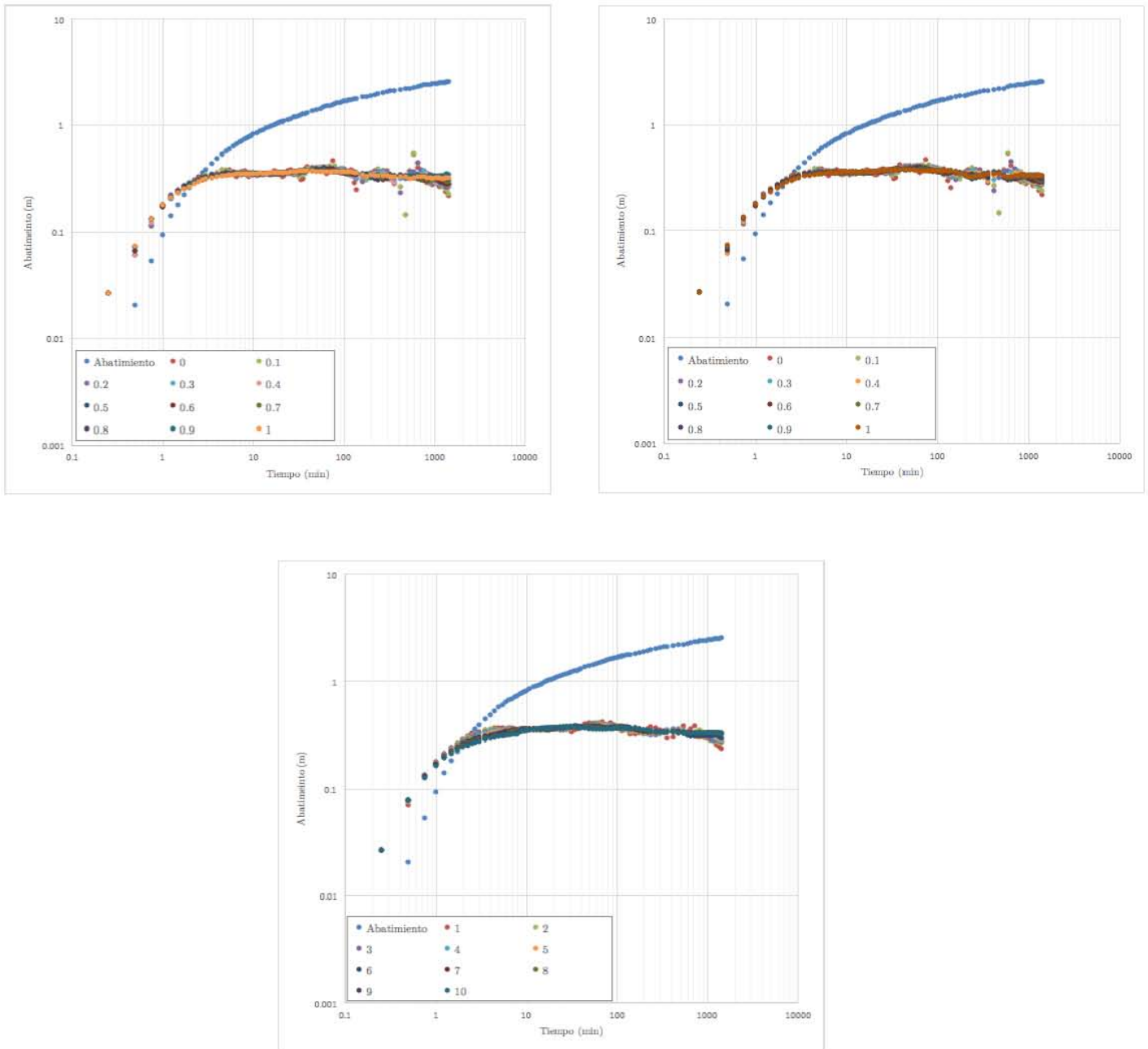


Figura IV.3.3. Gráfica de la prueba de bombeo y sus derivadas por los modelos de a) Bourdet (1983), b) Spane (1993) y c) Ventana Móvil

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

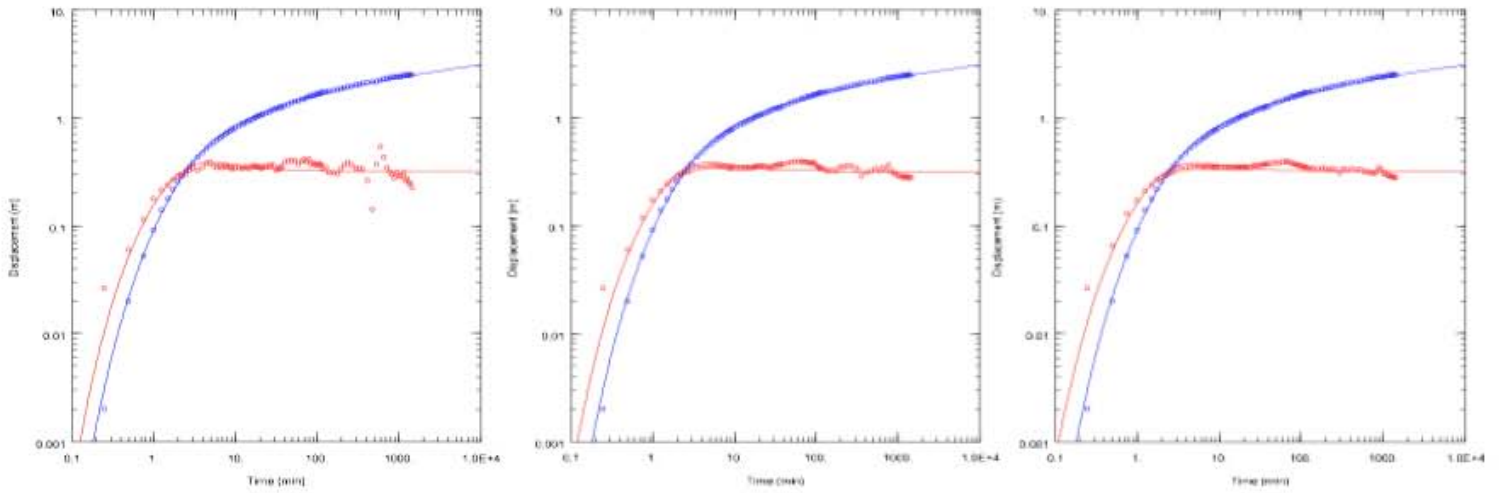


Figura IV.3.4. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Bourdet (1988) de rangos 0.1, 0.3 y 0.5

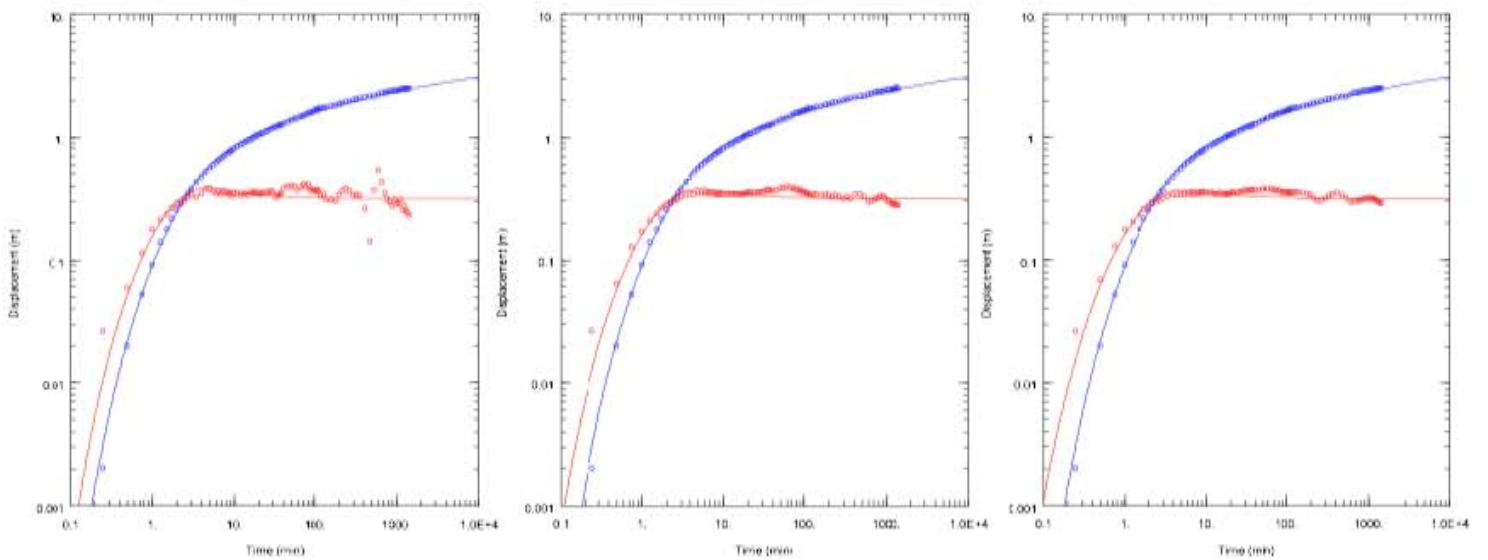


Figura IV.3.5. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Spane (1993) de rangos 0.1, 0.5 y 0.7

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

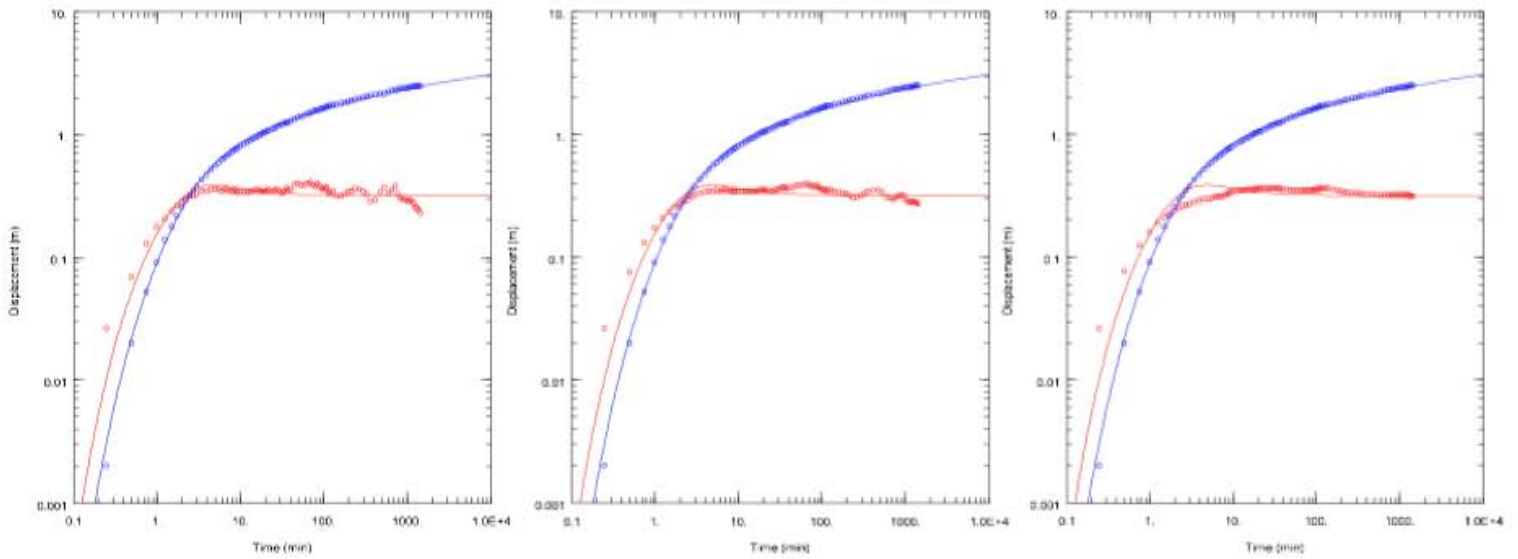


Figura IV.3.6. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Ventana Móvil de rangos 1, 3 y 10

Con base en los resultados obtenidos para los distintos algoritmos y el modelo teórico de ajuste de la derivada, se calculan los valores residuales entre ambos, para así poder identificar cuál de ellos es el que presenta el menor rango de error y estos se presentan en la tabla 3.1.

Como resultado del análisis estadístico, el algoritmo de Spanc (1993) con $L = 0.7$ es el que presenta el menor valor de RSS, por lo que es el seleccionado para ser interpretado, debido a que es el algoritmo con el menor RSS, además de que cuenta con un ajuste visual adecuado que permite observar el periodo de flujo radial presente sin distorsionar la derivada y así estimar los parámetros característicos del acuífero, los cuales se presentan en la figura IV.3.7.

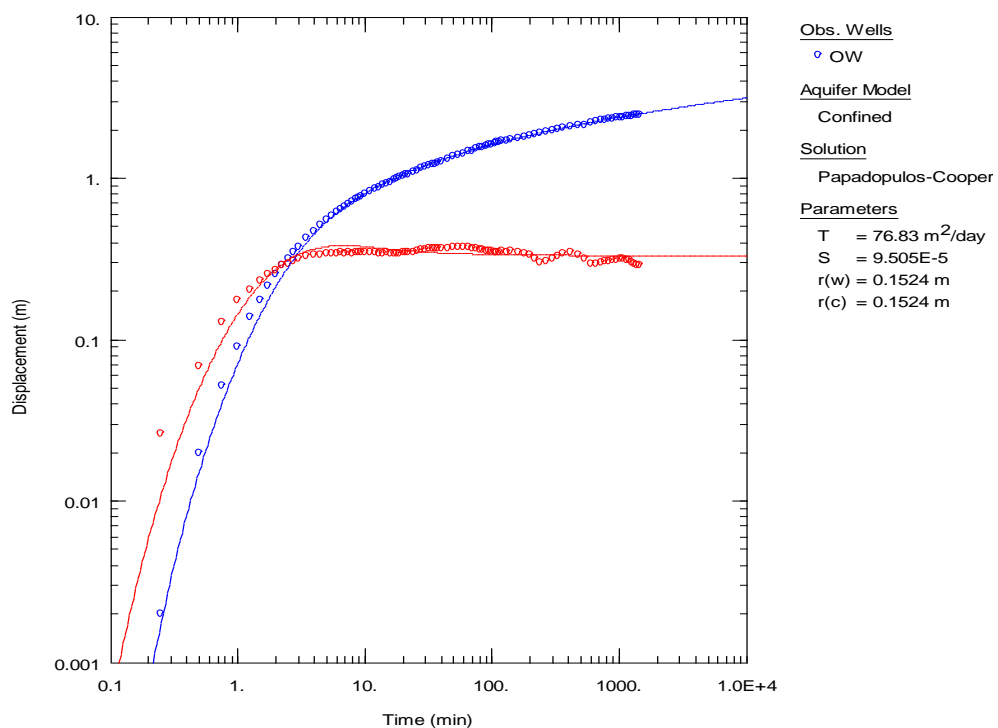
La tabla 3.2 muestra los resultados de la interpretación paramétrica para el modelo de Theis y para el modelo de Papadopulos-Cooper (1967) utilizando la derivada. Se puede observar que los resultados son aproximadamente iguales debido a que el modelo seleccionado de acuífero libre es el correcto para la prueba realizada, sin embargo, la pequeña variación se presenta al realizar un mejor ajuste del modelo de interpretación utilizando la derivada.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Algoritmo	Modelo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Ventana Móvil (%)	Papadopulos -Cooper			
1		0.001257	0.002142	0.046284
3		0.000999	0.001702	0.041255
10		0.001552	0.002645	0.051429
Bourdet (L)	Papadopulos -Cooper			
L= 0.1		0.002301	0.003920	0.062606
L= 0.3		0.000974	0.001659	0.040737
L= 0.5		0.000816	0.001391	0.037290
Spane (L)	Papadopulos -Cooper			
L= 0.1		0.002305	0.003928	0.062670
L= 0.5		0.000822	0.001400	0.037418
L= 0.7		0.000796	0.001356	0.036825

Tabla 3.1. Análisis estadístico de los algoritmos de suavizado de la derivada

Figura IV.3.7. Gráfico de la interpretación paramétrica mediante Spane (1993) con L= 0.7



ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Gracias a que el periodo de flujo radial tiene una duración suficientemente larga, es posible comprobar los resultados calculados por el modelo de Papadopulos-Cooper (1967) utilizando tanto el modelo de Theis (1935) utilizado inicialmente y el modelo de Jacob-Cooper (1946) para acuíferos confinados. Los resultados se muestran en la **figura 3.8** con una mínima variación y se debe a que en todos los casos los parámetros se calculan utilizando el periodo de flujo radial que, al ser el único periodo de flujo presente, favorece la interpretación.

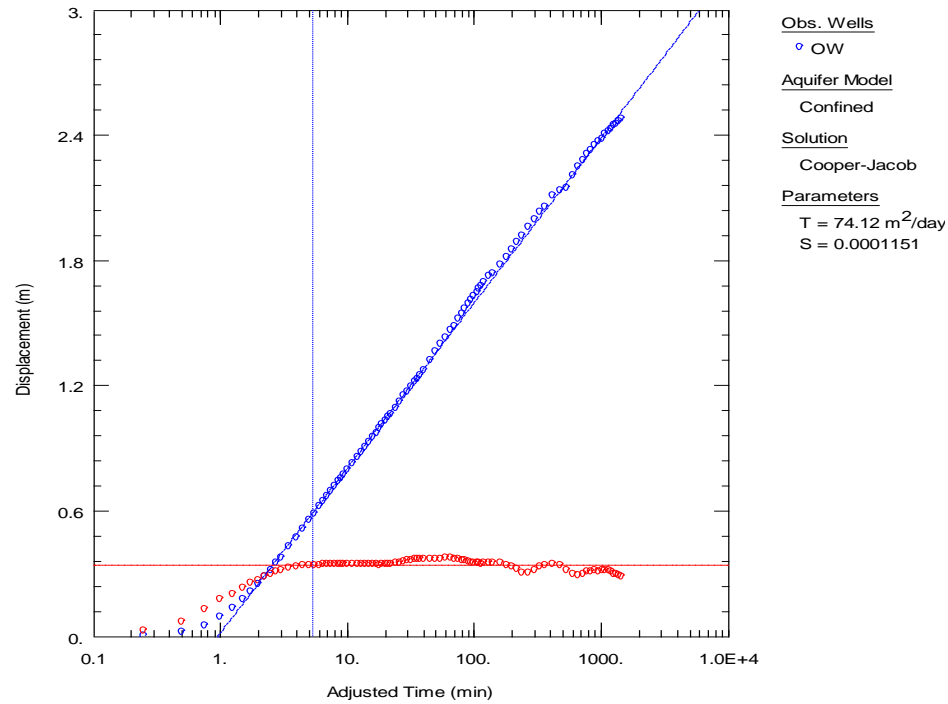


Figura IV.3.8. Gráfico de la interpretación paramétrica mediante Jacob-Cooper (1946)

Tabla 3.2. Resultados de ambas interpretaciones y sus valores estadísticos

	Theis	Papadopulos-Cooper	Jacob-Cooper
Transmisividad (T)	71.4 m ² /día	76.83 m ² /día	74.12 m ² /día
Conductividad Hidráulica (K)	1.95 m/día	2.10 m/día	2.27 m/día
Coef. de Almacenamiento (S)	0.0001	0.00009	0.0001
Coef. de Almacenamiento Específico (S _s)	0.000003 m ⁻¹	0.000002 m ⁻¹	0.000003 m ⁻¹
RSS (s)	-0.002 m	0.001 m	0.009 m
Varianza	0.0007 m ²	0.0004 m ²	0.0003 m ²

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Obtenidos los resultados de la interpretación de la prueba realizada, se utiliza el algoritmo de suavizado de Hanning (1959) con la finalidad de observar si la curva de los datos crudos del abatimiento, muestran una variación de importancia para así realizar un mejor ajuste. Sin embargo, como se observa en la **tabla 3.3** y en la **figura IV.3.9**, ambas curvas no presentan una diferencia de consideración ni de manera visual como en el RSS calculado, por lo que no se considera necesario una reinterpretación de la prueba.

Tabla 3.3. Valores estadísticos del suavizado por medio del algoritmo de Hanning (1959)

Algoritmo	Modelo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Hanning+Spane	Papadopulos-Cooper	0.000673	0.001147	0.033870

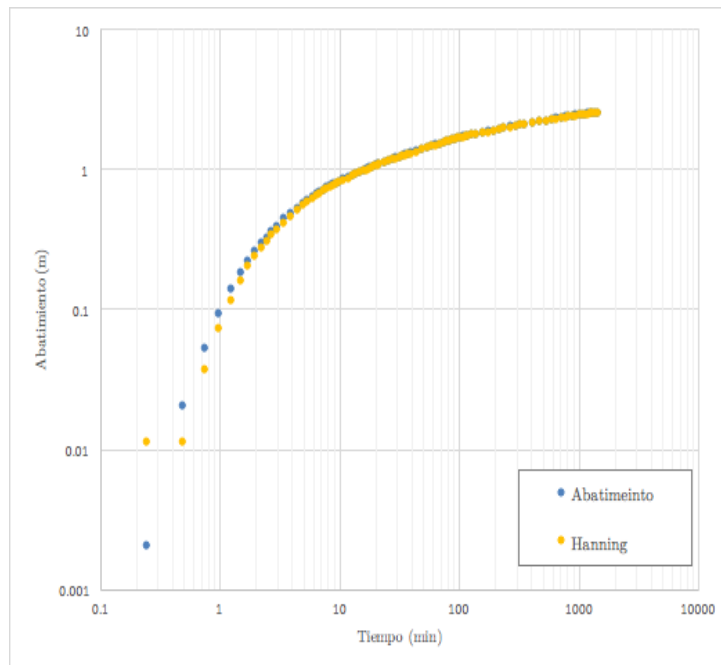


Figura IV.3.9. Gráfica comparativa de la curva del abatimiento medido y suavizada por el algoritmo de Hanning (1959)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUÍFEROS.

Caso 4. Querétaro

Se realizó una prueba de bombeo a caudal constante de 2.25 m³/min, donde las observaciones se realizaron directamente en el pozo de bombeo, el cual se encuentra totalmente penetrante en el acuífero, con un espesor saturado de 110.81 m. De manera general la geología del acuífero está conformado por depósitos aluviales Terciarios, tobas arenosas y sedimentos vulcanoclasticos del Cuaternario que se encuentran rellenando la fosa tectónica de Querétaro como cuerpos lenticulares; mientras que el medio fracturado está definido tectónicamente por andesitas, ignimbritas, rielitas del Terciario y basaltos, brechas volcánicas y tabas del Cuaternario (CONAGUA, 1995).

La figura IV.4.1 muestra la gráfica de los datos crudos medidos de la prueba, inicialmente se interpretó por medio del modelo de Theis (1935) para acuíferos confinados. Sin embargo, como se observa en la gráfica, la curva de abarimiento no coincide con el modelo establecido, lo que indica que algún tipo de frontera o régimen de flujo está afectando su comportamiento característico y es necesario el uso de la derivada para identificar su comportamiento.

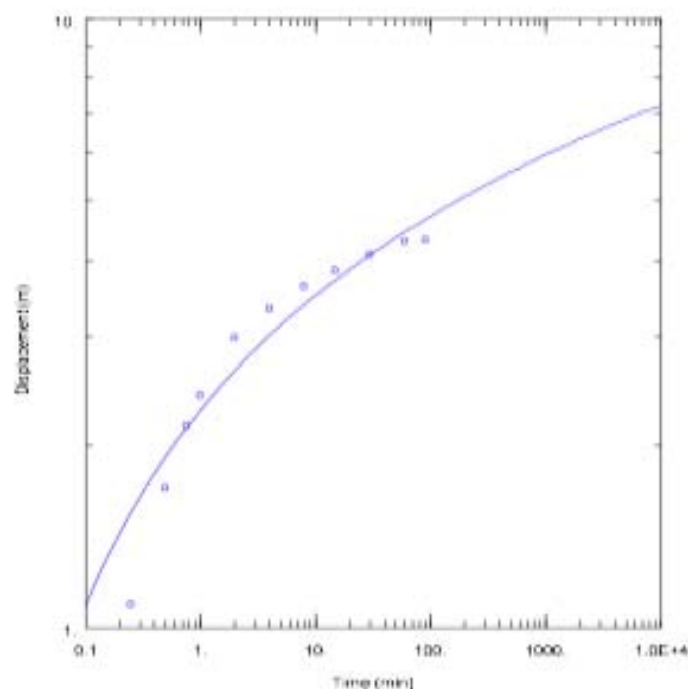


Figura IV.4.1. Gráfica de los datos crudos de la prueba de bombeo y su ajuste no lineal al modelo de Theis (1935)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Para poder determinar el modelo teórico de ajuste de la prueba de bombeo, es necesario realizar una primera interpretación por medio de la derivada. Como lo recomiendan distintos autores (Bourdet, 2002; Gringarten, 2008; Spane y Wurstner, 1993), para comprobar el comportamiento del acuífero se utilizó el algoritmo de Bourdet (1983) con $L=0.5$, la prueba se interpretó de manera no paramétrica con el objetivo de identificar las distintas geometrías de flujo presentes en la prueba, como se muestra en la **figura IV.4.2**. Se observa inicialmente un pequeño periodo de almacenamiento de pozo, seguido de un periodo en el que no es posible de identificar ningún régimen debido a la poca cantidad de datos medidos y finalizando con una frontera de carga constante, se puede comprobar que el modelo de acuífero confinado no es el correcto para realizar la interpretación, por lo que nuevamente se llevará a cabo utilizando el modelo de Moench (1985) para acuíferos semiconfinados.

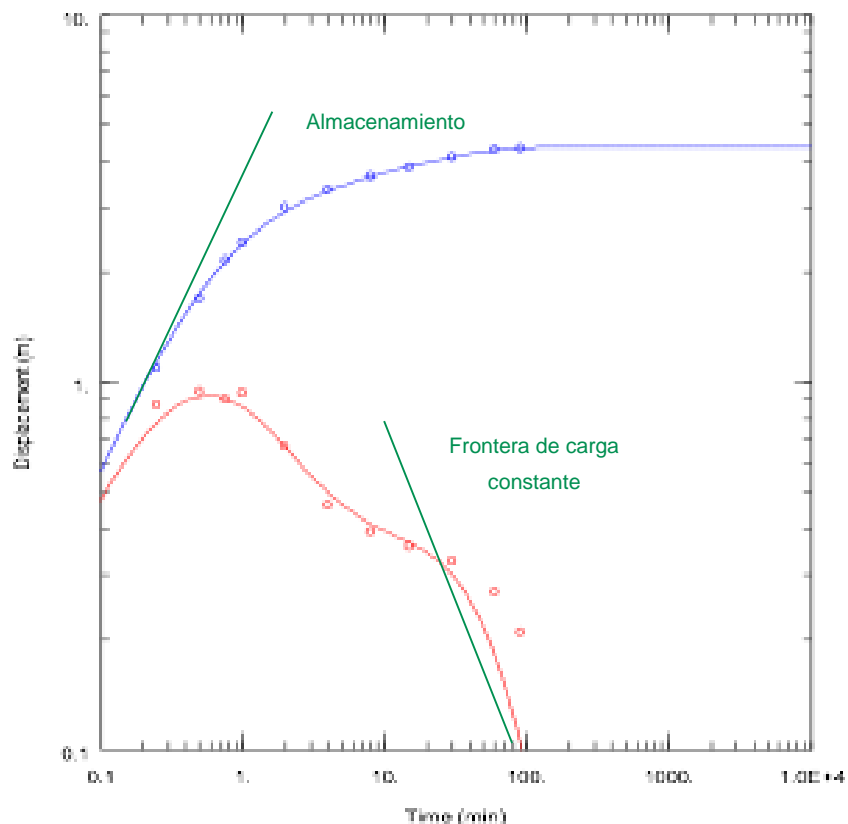


Figura IV.4.2. Interpretación no paramétrica por el modelo de Bourdet (1983) con $L=0.5$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Aun cuando la derivada calculada por el algoritmo de Bourdet permitió identificar el comportamiento del acuífero y establecer un modelo teórico de interpretación, es importante utilizar los demás algoritmos de suavizado con el fin de mostrar que tanta variación se tiene de la derivada debido a la poca cantidad de datos medidos y si es posible identificar algún otro régimen de flujo.

La **figura IV.4.3** muestra la comparación de los tres distintos tipos de algoritmos de suavizado con la finalidad de determinar cuál de ellos es el que realiza un mejor ajuste, las gráficas muestran una serie de puntos, donde la curva de abatimiento representa los datos del bombeo medidos y las siguientes curvas muestran las distintas formas que la derivada puede tomar al calcularse con distintos valores de suavizado.

La gráfica que muestra el suavizado utilizando el algoritmo de Ventana Móvil presenta la mayor distorsión de puntos, donde sin importar el valor del ajuste realizado para el algoritmo, todas las curvas se distorsionan del modelo seleccionado, lo que indica que no es el modelo indicado para interpretar la prueba. Analizando tanto el modelo de Bourdet (1983) como el de Spane (1993), se observa que distintos conjuntos de datos presentan un comportamiento similar, sin embargo, entre ellos se presentan diferencias de consideración. En algunos casos se puede observar una pequeña estabilización en lo que podría ser un periodo de flujo de radial, mientras que en otros el efecto de frontera parece desaparecer, debido a la poca cantidad de datos disponibles es necesario realizar un análisis individual para cada algoritmo, tanto de manera visual como analizando sus datos estadísticos con el objetivo de obtener una mejor interpretación y elegir el algoritmo de suavizado que presente el mejor comportamiento del acuífero.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

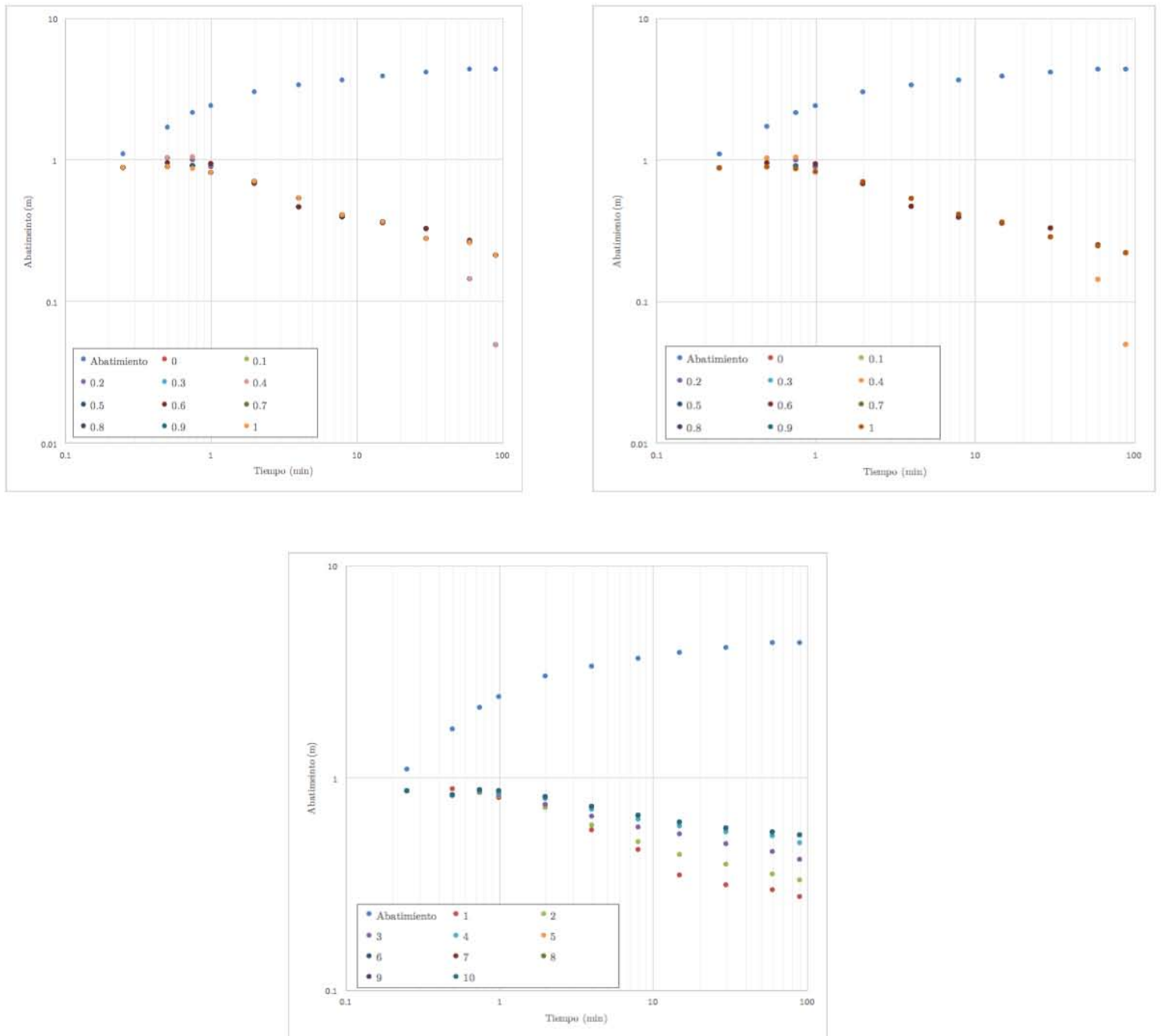


Figura IV.4.3. Gráfica de la prueba de bombeo y sus derivadas por los modelos de a) Bourdet (1983), b) Spang (1993) y c) Ventana Móvil

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Analizando las gráficas anteriores es posible definir que existen grandes cambios dentro de un rango de puntos en específico; para Bourdet (1983) corresponde a aquellos puntos calculados con un suavizado de $L=0.1$, $L=0.3$ y $L=0.5$, para Spane (1993) los valores de $L=0.1$, $L=0.5$ y $L=0.7$ y para el algoritmo de Ventana Móvil son 1%, 2% y 10%.

Las figuras IV.4.4., IV.4.5. y IV.4.6. muestran la comparación realizada a los distintos algoritmos de suavizado y el modelo de ajuste teórico que permite un mejor análisis de la prueba.

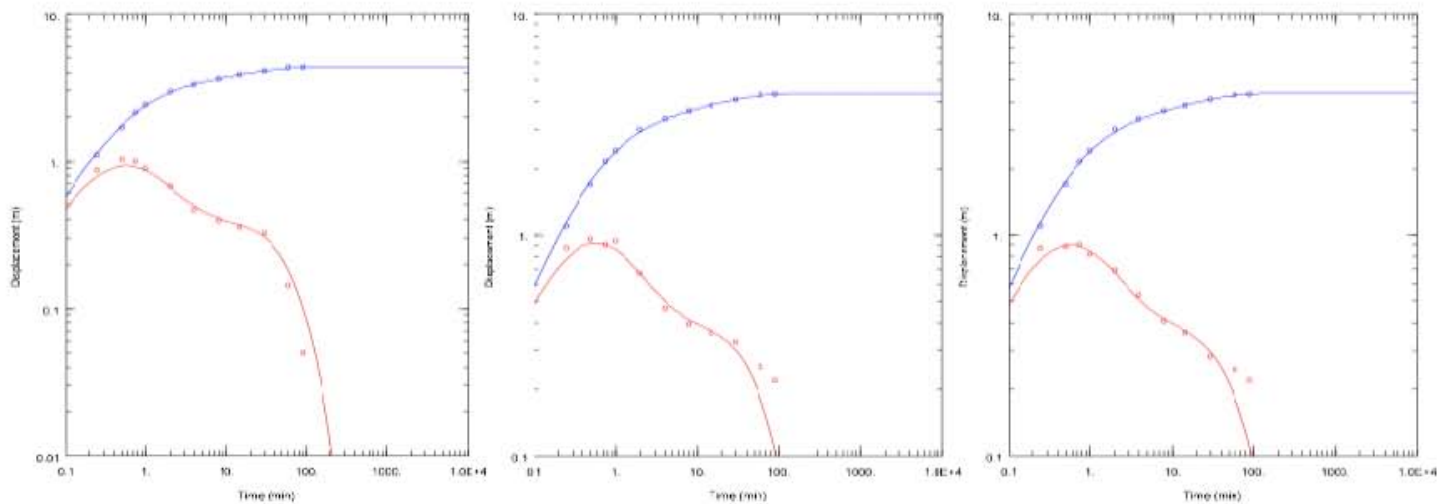


Figura IV.4.4. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Bourdet (1983) de $L=0.1$, $L=0.3$ y $L=0.5$

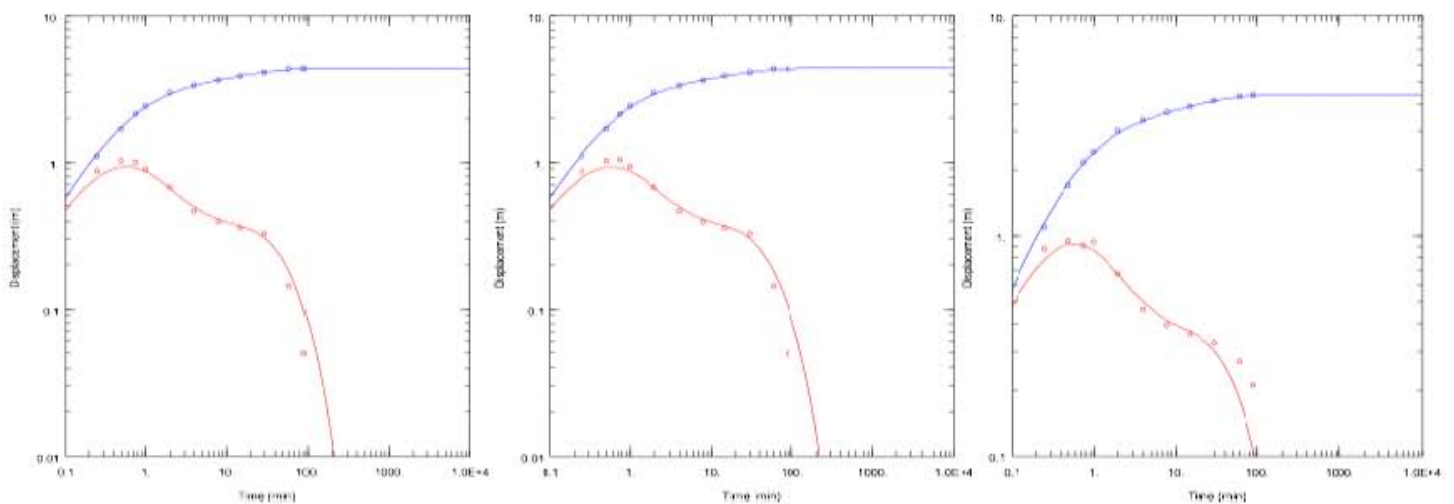


Figura IV.4.5. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Spane (1993) de $L=0.1$, $L=0.5$ y $L=0.7$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

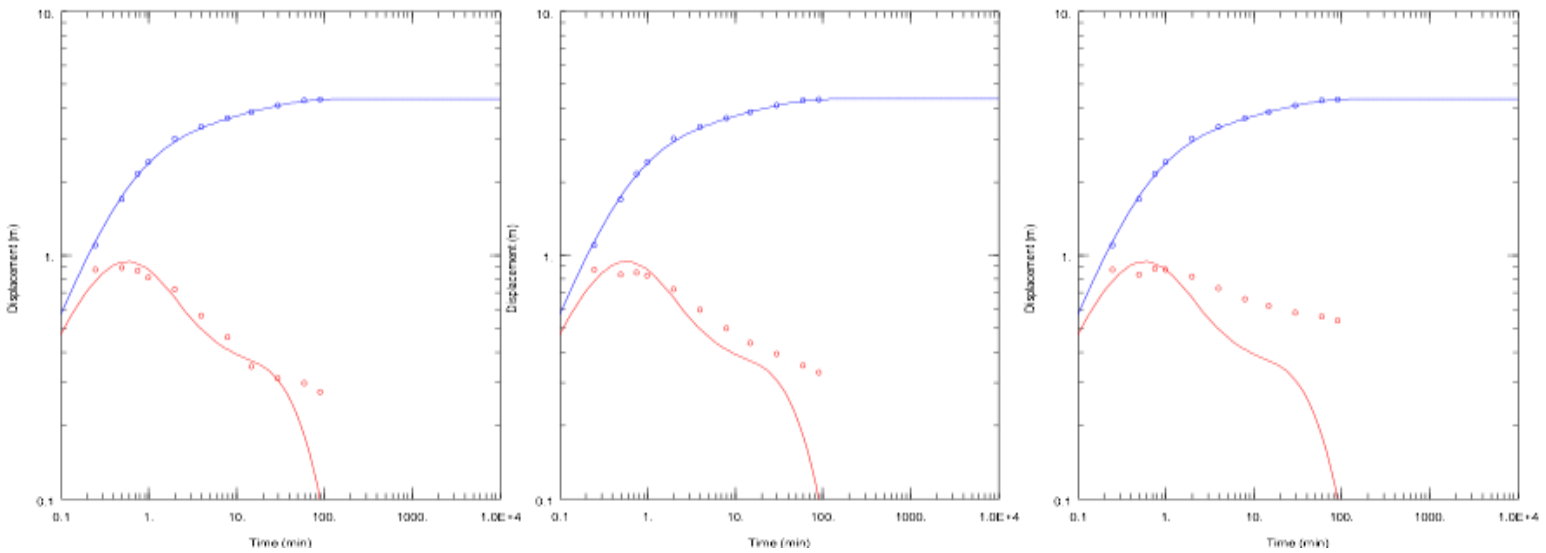


Figura IV.4.6. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Ventana Móvil de rangos 1%, 2% y 10%

Con base en los resultados obtenidos para los distintos algoritmos y el modelo teórico de ajuste de la deriva, se calculan los valores residuales entre ambos, para así poder identificar cuál de ellos es el que presenta el menor rango de error, estos se muestran en la **tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Análisis estadístico de los algoritmos de suavizado de la derivada

Algoritmo	Modelo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Ventana Móvil (%)	Moench			
1%		0.006286	0.005763	0.075912
2%		0.012253	0.011232	0.105982
10%		0.055632	0.050996	0.225823
Bourdet (L)	Moench			
L=0.1		0.002105	0.001930	0.043931
L=0.3		0.003139	0.002877	0.053640
L=0.5		0.002657	0.002435	0.049348
Spane (L)	Moench			
L=0.1		0.002105	0.001930	0.043931
L=0.5		0.002693	0.002468	0.049683
L=0.7		0.002950	0.002705	0.052006

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Como resultado del análisis estadístico, los algoritmos de Bourdet (1983) y Spanc (1993) con $L=0.1$ presentan el menor valor de RSS. En este caso se selecciona el modelo de Bourdet (1983) para interpretar la prueba de manera paramétrica, cuyos resultados se presentan en la **figura IV.4.6**. La **tabla 4.2** presenta los resultados de las interpretaciones realizadas, se puede observar que existe una gran diferencia entre los resultados obtenidos para ambas pruebas, esto se debe a que el modelo que mejor describe el comportamiento del acuífero es el de Moench (1985) para acuíferos semiconfinados. Analizando el modelo seleccionado, es posible identificar un periodo de flujo radial con una duración aproximada desde los 10 (min) hasta los 30 (min), que es el momento en que la frontera de carga constante se hace presente, lo anterior analizado en conjunto de la geología de la zona, se puede determinar que el pozo se encuentra perforado en el relleno de la fosa tectónica y por ello presenta ese comportamiento.

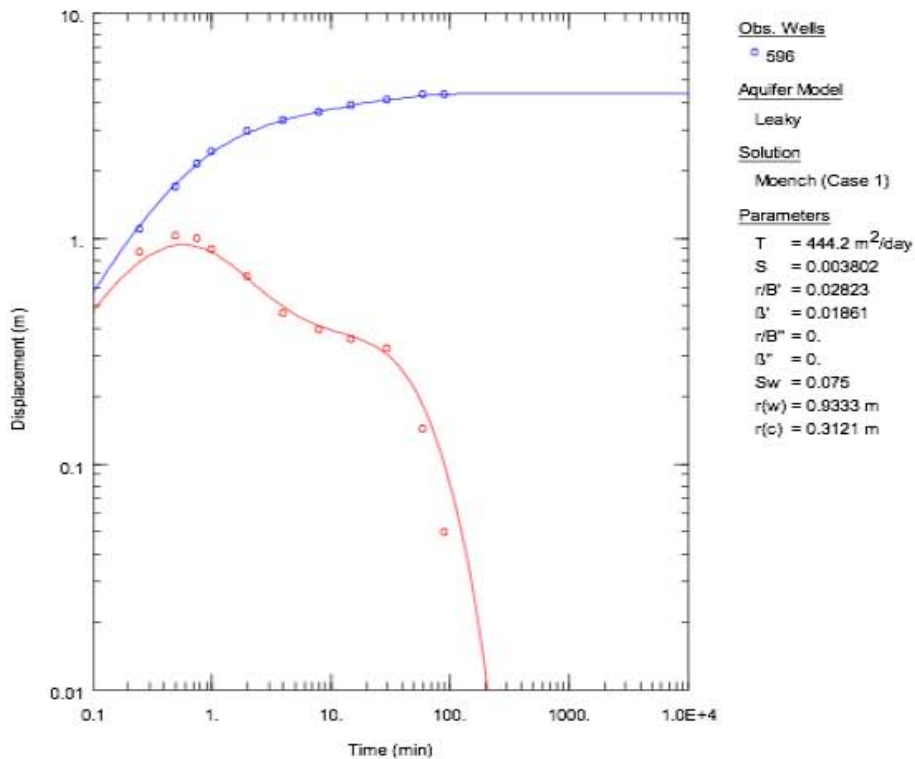


Figura IV.4.6. Gráfico de la interpretación paramétrica mediante Bourdet (1983) con $L=0.1$

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

Tabla 4.2. Resultados de ambas interpretaciones y sus valores estadísticos

	Theis	Moench
Transmisividad (T)	482.6 m ² /día	444.2 m ² /día
Conductividad Hidráulica (K)	4.36 m/día	4.01 m/día
Coef. de Almacenamiento (S)	0.012	0.004
Coef. de Almacenamiento Específico (S _s)	0.0001 m ⁻¹	0.00003 m ⁻¹
RSS (s)	-0.0013 m	-0.006 m
Varianza	0.08 m ²	0.002 m ²

Con los resultados obtenidos del análisis estadístico, se puede definir que debido a la poca cantidad de datos que contiene la prueba de bombeo, no se recomienda realizar grandes suavizados a la curva de la derivada debido a que los puntos se distorsionan con gran facilidad, por lo que no se recomienda realizar ajustes previos con Hanning (1959) ya que la curva de abatimiento se verá afectada por ese mismo efecto y la prueba presentaría errores incluso antes de ser interpretada, por lo que se concluye la interpretación.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUÍFEROS.

Caso 5. Boca del Río

Se realizó una prueba de bombeo a caudal constante de $0.708 \text{ m}^3/\text{min}$, donde las observaciones se realizaron directamente en el pozo de bombeo, el cual se encuentra totalmente penetrante en el acuífero, con un espesor saturado de 20 m. La geología del área de estudio está compuesta por depósitos aluviales, eólicos Plio-Cuaternarios y albanicos aluviales. Del valle hacia la costa hay material de origen volcánico como conchas y posteriormente areniscas, conglomerados y depósitos lacustres. Los depósitos eólicos y de paleocanales que se encuentran por la zona de Boca del Río representan la parte somera del acuífero superior en la región.

La **figura IV.5.1** muestra la gráfica de los datos crudos medidos de la prueba, al compararla con los gráficos de modelos convencionales, se interpretó por el modelo de Hantush-Jacob (1955) para acuíferos semiconfinados. Visualmente se tiene un buen ajuste por lo que deberá ser comprobado por medio de la derivada, para observar si el modelo elegido es que mejor representa el comportamiento del acuífero.

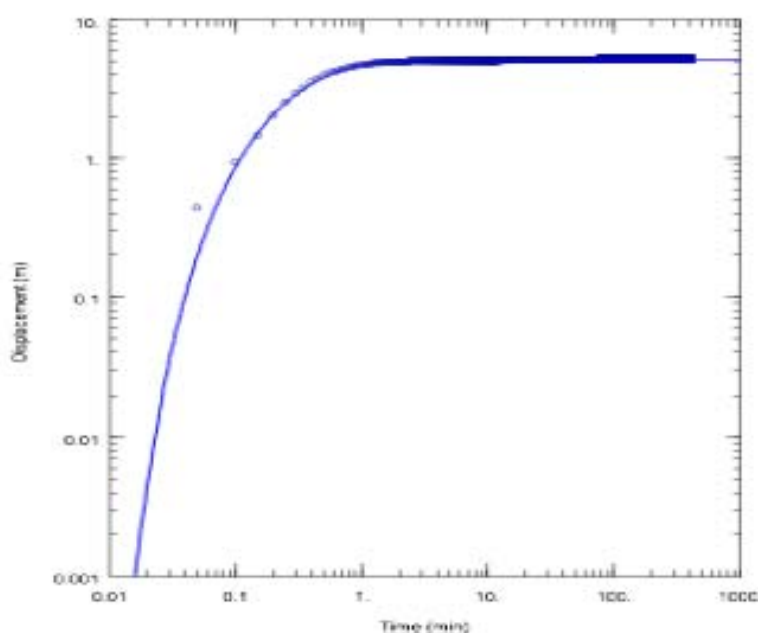


Figura IV.5.1. Gráfica de los datos crudos de la prueba de bombeo y su ajuste mediante el modelo de Hantush-Jacob (1955)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Para poder determinar el modelo teórico de ajuste de la prueba de bombeo, es necesario realizar una primera interpretación por medio de la derivada. Como lo recomiendan distintos autores (Bourdet, 2002; Gringarten, 2008; Spane y Wurstner, 1993), para comprobar el comportamiento del acuífero se utilizó el algoritmo de Bourdet (1983) con $L=0.5$, la prueba se interpretó de manera no paramétrica como se muestra en la **figura IV.5.2**. En ella se observa inicialmente un periodo de almacenamiento de pozo, seguido de un periodo de transición, para finalizar en una estabilización de flujo radial, mostrando un factor de daño (*skin*) de aproximadamente dos ciclos logarítmicos, como se señala hacia el final de la gráfica, existe una serie de puntos que caen de manera abrupta del comportamiento de flujo radial pero debido a la cantidad de ruido que la prueba contiene no es posible diagnosticar ese comportamiento. Con base al diagnóstico realizado se puede definir que el modelo que define el comportamiento de la prueba, corresponde al de un acuífero radial infinito, confinado con almacenamiento de pozo y daño, por lo que se utilizará el modelo de Barker (1988) como el modelo teórico de interpretación.

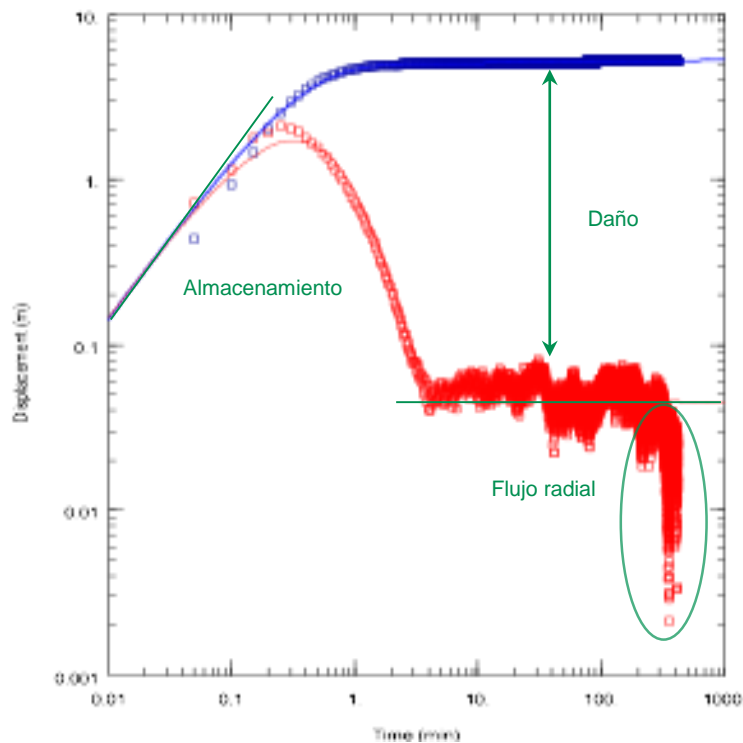


Figura IV.5.2. Interpretación no paramétrica por el modelo de Bourdet (1983) con $L=0.5$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Debido a la gran cantidad de datos que la prueba contiene y al ruido que la gráfica presenta, además del algoritmo de Bourdet (1983) se utilizarán los demás suavizados con el fin de mostrar que tanta variación se tiene de la derivada, para elegir aquel que muestre el mejor comportamiento del acuífero. La **figura IV.5.3** muestra la comparación de los tres distintos tipos de algoritmos de suavizado con la finalidad de determinar cuál de ellos es el que realiza un mejor ajuste y así poder llevar acabo la comprobación del modelo anterior. Las gráficas muestran una serie de puntos, donde la curva de abatimiento representa los datos del bombeo medidos en el pozo y las siguientes curvas muestran las distintas formas que la derivada puede tomar al calcularse con distintos valores de suavizado.

Se observa que tanto el modelo de Bourdet (1983) como el de Spane (1993) presentan un comportamiento similar en los distintos valores del factor de suavizado L . Analizando estas gráficas en conjunto, los valores de L que van desde 0 hasta 0.4, presentan un suavizado pobre con una dispersión de puntos de consideración y que a partir de $L= 0.5$ presentan la tendencia de flujo radial diagnosticada anteriormente.

Para la gráfica que muestra el suavizado utilizando el algoritmo de Ventana Móvil se utilizó una ventana de mayor amplitud debido a la gran cantidad de ruido, en la cual aún se presenta la mayor distorsión de puntos, se observa que con aún con valores desde 1% hasta 100%, no se presenta ningún tipo de suavizado que permita realizar algún tipo de diagnóstico. Por la cantidad de diferencias que existen entre los distintos modelos, es de suma importancia recurrir no sólo al análisis visual, sino realizar el análisis estadístico el cual nos mostrará el algoritmo de suavizado que se ajuste mejor al modelo teórico seleccionado.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

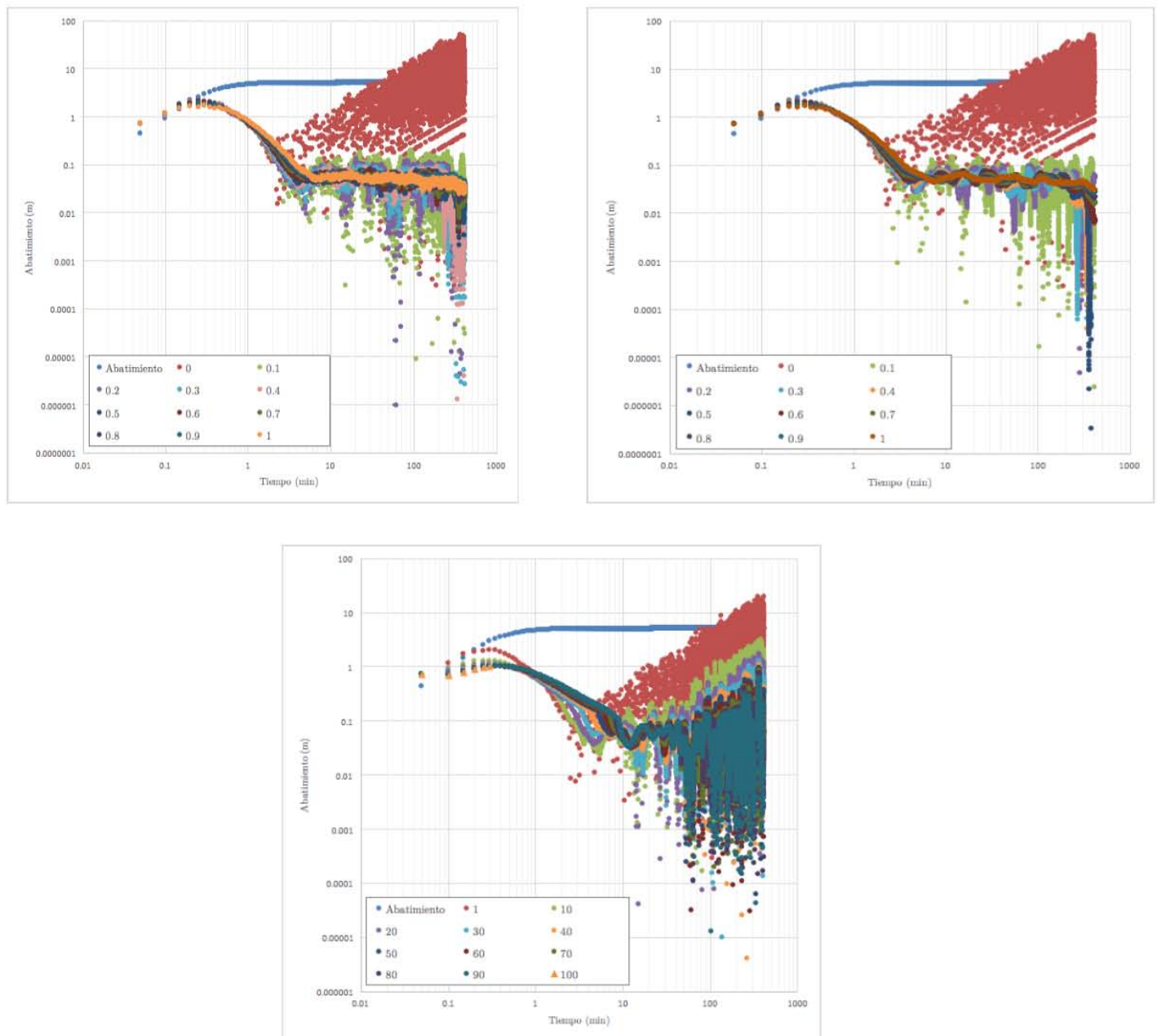


Figura IV.5.3. Gráfica de la prueba de bombeo y sus derivadas por los modelos de a) Bourdet (1983), b) Spane (1993) y c) Ventana Móvil

Analizando las gráficas anteriores es posible definir que existen grandes cambios dentro de un rango de puntos en específico; para Bourdet (1983) corresponde a aquellos puntos calculados con un suavizado de $L= 0.1$, $L= 0.3$ y $L= 0.5$, para Spane (1993) los valores de

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

L= 0.1, L= 0.5 y L= 0.7 y para el algoritmo de Ventana Móvil son 1%, 10% y 100%. Las figuras IV.5.4., IV.5.5. y IV.5.6. muestran la comparación realizada a los distintos algoritmos de suavizado y el modelo de ajuste teórico que permite un mejor análisis de la prueba.

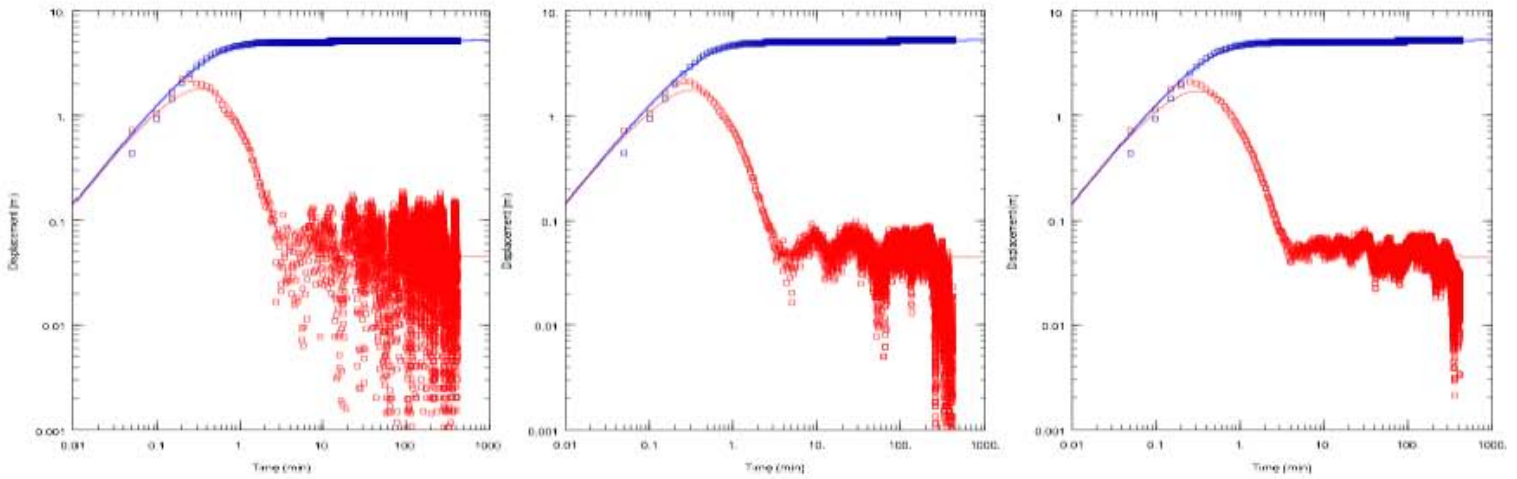


Figura IV.5.4. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Bowdler (1983) de L= 0.1, L= 0.5 y L= 0.7

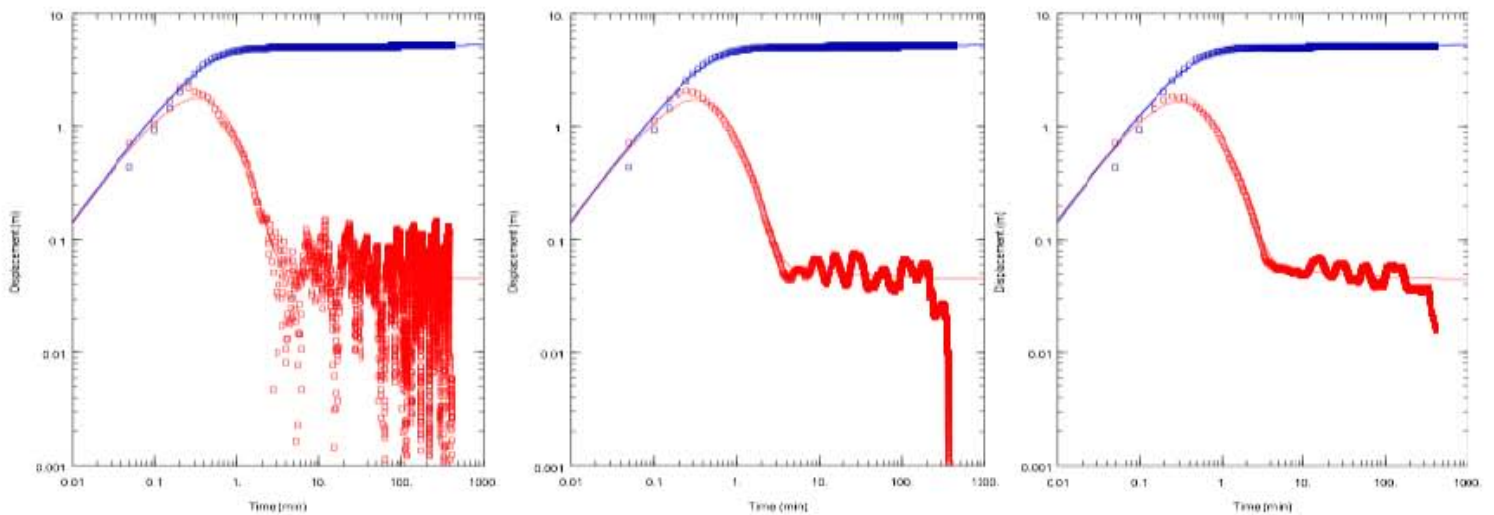


Figura IV.5.5. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Spivey (1993) de L= 0.1, L= 0.5 y L= 0.7

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

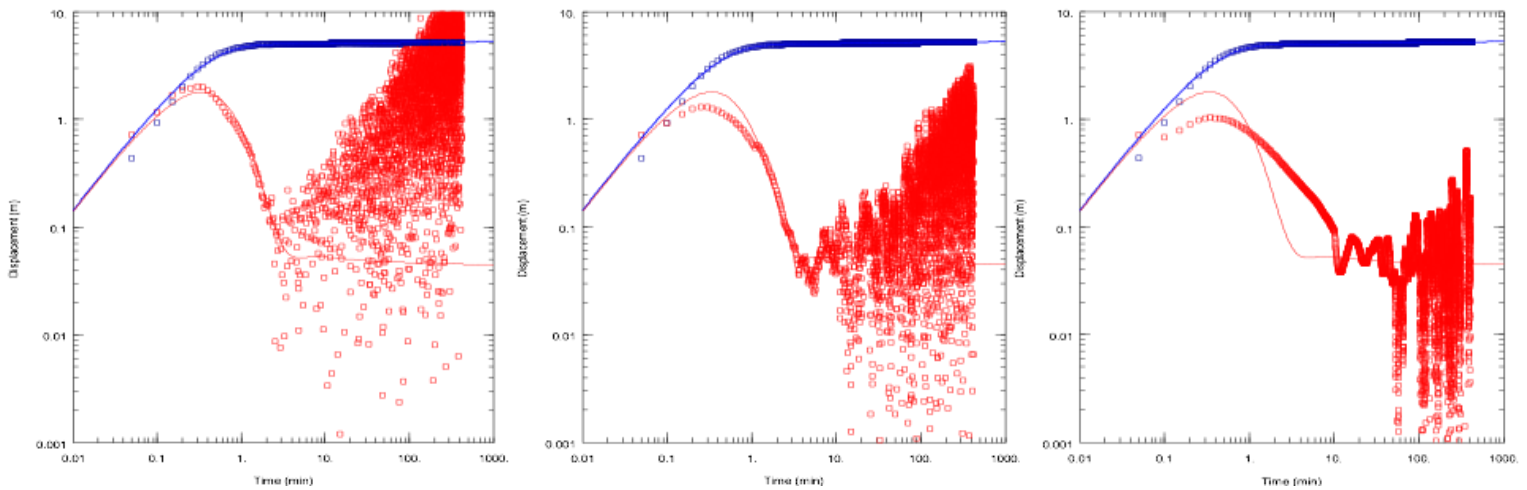


Figura IV.5.6. Los gráficos log-log representan un suavizado de la derivada con Ventana Móvil de rangos 1%, 10% y 100%

Con base en los resultados obtenidos para los distintos algoritmos y el modelo teórico de ajuste de la deriva, se calculan los valores residuales entre ambos, para así poder identificar cuál de ellos es el que presenta el menor rango de error, estos se muestran en la **tabla 5.1**.

Tabla 5.1. Análisis estadístico de los algoritmos de suavizado de la derivada

Algoritmo	Modelo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Ventana Móvil (%)	Hantush-Jacob			
1		19.207408	19.311457	4.394480
10		0.539408	0.542330	0.736431
100		0.014455	0.014533	0.120553
Bourdet (L)	Hantush-Jacob			
L=0.1		0.003147	0.003164	0.056253
L=0.3		0.000869	0.000874	0.029559
L=0.5		0.000341	0.000343	0.018515
Spane (L)	Hantush-Jacob			
L=0.1		0.003845	0.003866	0.062175
L=0.5		0.000723	0.000727	0.026969
L=0.7		0.000230	0.000231	0.015206

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Como resultado del análisis estadístico, el algoritmo de Spane (1993) con $L=0.7$ es el que presenta el menor valor de RSS, por lo que es el seleccionado para ser interpretado y así estimar los parámetros característicos del acuífero, los cuales se presentan en la **figura IV.5.7**. La **tabla 5.2**. presenta los resultados de las interpretaciones realizadas, se puede observar que existe una gran diferencia entre los resultados de ambos modelos. Analizando el modelo Hantush-Jacob (1955) para acuíferos semiconfinados, el valor de coeficiente de almacenamiento es mayor a 1, lo cual por definición es físicamente imposible, por lo que la interpretación por ese modelo es incorrecta. Para el modelo de Barker (1988), el factor de $n=2$ indica que la interpretación se está realizando en el periodo de estabilización de flujo radial y valor negativo de S_w , indica que el pozo se encuentra dañado, por lo que la selección de éste modelo de interpretación representa de mejor manera el comportamiento característico del acuífero.

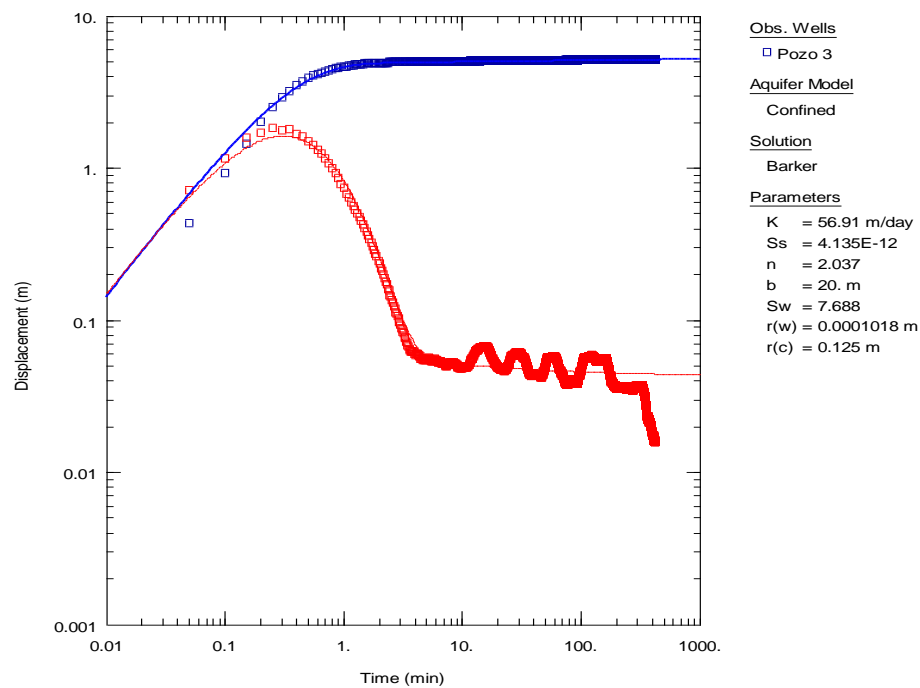


Figura IV.5.7. Gráfico de la interpretación paramétrica mediante Spane (1993) con $L=0.7$

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Tabla 5.2. Resultados de ambas interpretaciones y sus valores estadísticos

	Hantush-Jacob	Barker
Transmisividad (T)	17.44 m ² /día	1138.1 m ² /día
Conductividad Hidráulica (K)	0.87 m/día	56.91 m/día
Coef. de Almacenamiento (S)	4.86x10 ⁵	8.27x10 ⁻¹¹
Coef. de Almacenamiento Específico (S _s)	2.43x10 ⁴	4.13x10 ⁻¹² m ⁻¹
Daño (S _w)		7.68
RSS	2.67x10 ⁻⁵ m	0.08 m
Varianza	0.01345 m ²	0.00673 m ²

Una vez que se tienen los resultados de la interpretación de la prueba de bombeo, se utiliza el algoritmo de suavizado de Hanning (1959) con la finalidad de observar si la curva que contiene los datos crudos del abatimiento medido en el pozo, muestra una variación de importancia y así realizar un mejor ajuste. Sin embargo, como se observa en la **tabla 5.3** y en la **figura IV.5.8.**, ambas curvas no presentan una diferencia de consideración y más aún, la interpretación de la prueba utilizando el suavizado por el algoritmo de Hanning (1959) presenta un RSS mayor que el residual seleccionado anteriormente, por lo que se da por finalizada la interpretación debido a que anteriormente se tuvo un mejor ajuste.

Tabla 5.3. Valores estadísticos del suavizado por medio del algoritmo de Hanning (1959)

Algoritmo	Modelo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Hanning+Spane	Barker	0.000297	0.000298	0.017276

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

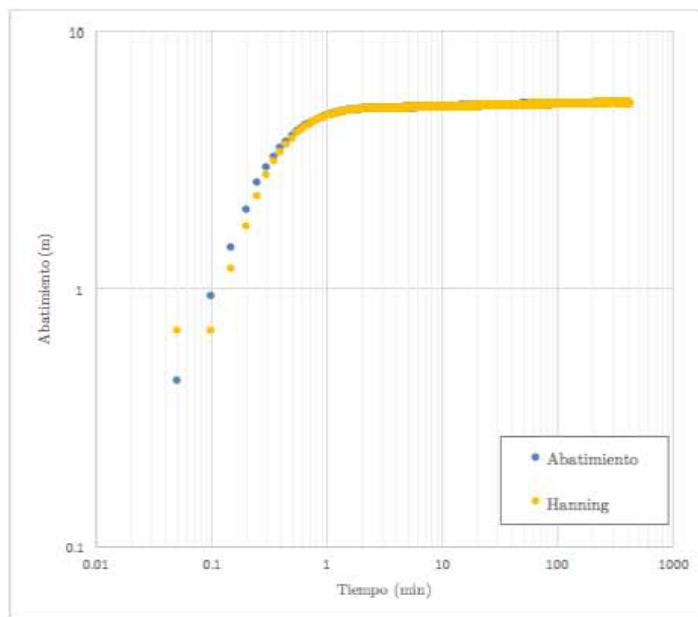


Figura IV.5.8. Gráfica comparativa de la curva del abatimiento medido y suavizada por el algoritmo de Hanning (1959)

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Caso 6. Bourdet (prueba de presión en yacimientos)

Se realizó una prueba de presión a un gasto constante de 174 bpd con un radio de 0.29 ft, el yacimiento cuenta con espesor de 107 ft, porosidad de 25%, compresibilidad total de 4.2×10^{-6} psi⁻¹, con viscosidad de 2.5 cp y un factor volumétrico del aceite igual a 1.06 bls@c.s./bls@c.y, durante un tiempo de producción igual a 15.33 hrs en el que se cierra el pozo y se mide el incremento de presión (Bourdet, et al. 1989).

La **figura IV.6.1.** muestra la gráfica de los datos medidos de la prueba de presión, donde en primera instancia se realiza la interpretación del modelo no paramétrico, utilizando la derivada por medio del algoritmo de Bourdet (1983) con un suavizado de $L=0.5$. Inicialmente se señala que existe un desfazamiento entre la curva de presión y su derivada, esto se debe a un error al momento de tomar el tiempo en el que el pozo se cerró (Bourdet, 2002).

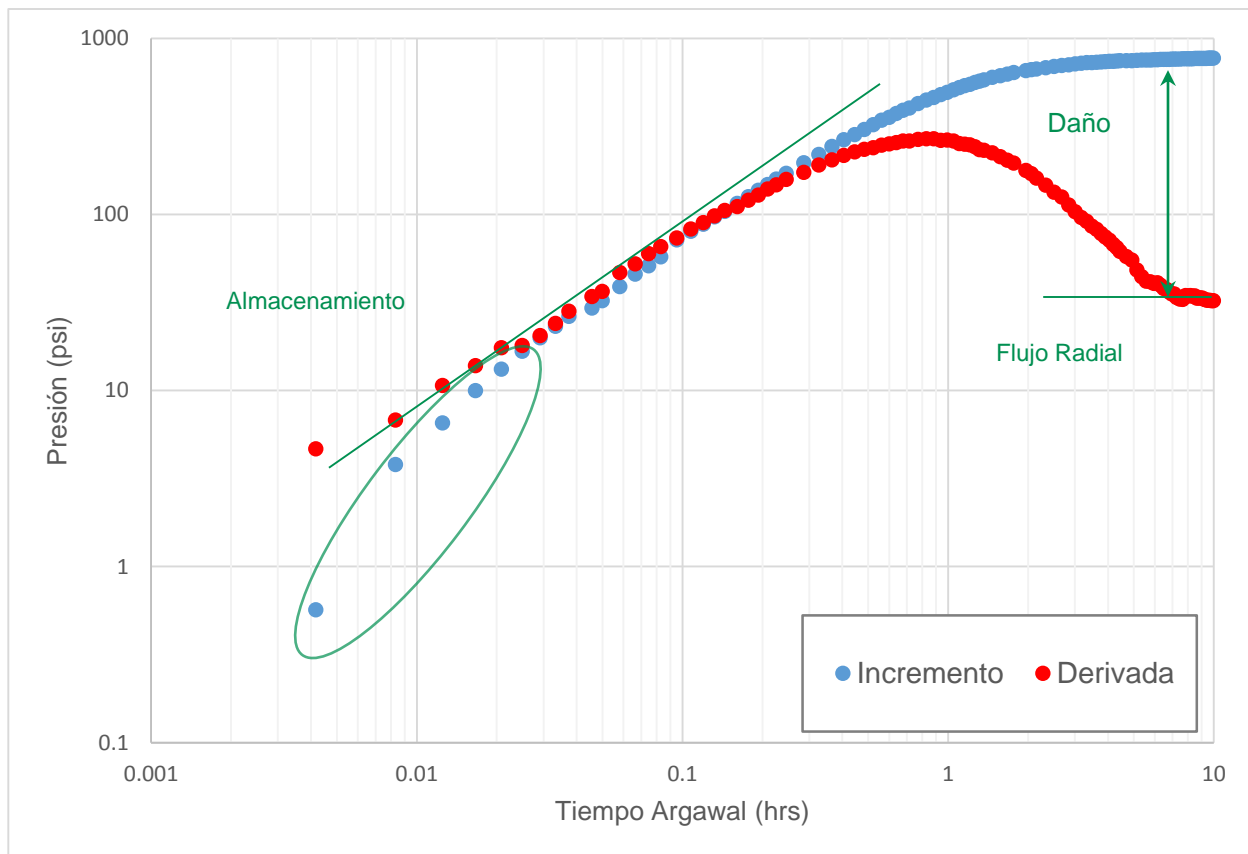


Figura IV.6.1. Gráfica de la prueba de decremento y su derivada

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Se puede observar la pendiente igual a 1 indicando el periodo de almacenamiento de pozo con un periodo de tiempo que transcurre desde el comienzo de la prueba hasta aproximadamente las 0.3 horas, seguido de un periodo de transición que finaliza aproximadamente a las 7 horas, continuando con un periodo de estabilización en flujo radial que continúa hasta finalizar la prueba.

La derivada calculada por el algoritmo de Bourdet (1983) muestra un buen suavizado, pero se utilizarán los demás algoritmos de suavizado con el fin de mostrar que tanta variación se tiene de la derivada y así elegir aquel que muestre el mejor comportamiento. La **figura IV.6.2.** muestra la comparación de los tres distintos tipos de algoritmos de suavizado.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

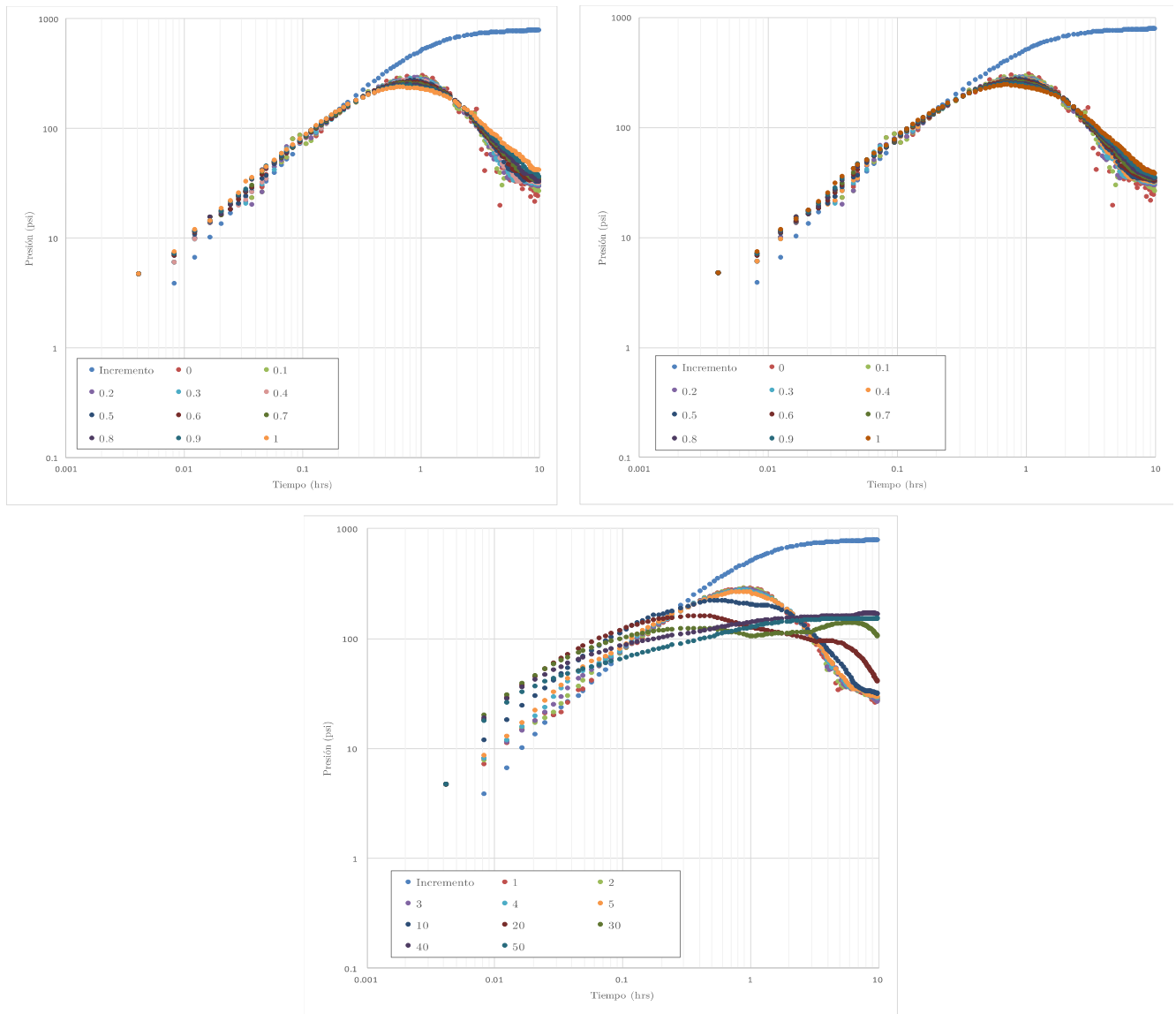


Figura IV.6.2. Gráfica de la prueba de presión y sus derivadas por los modelos de a) Bourdet (1983), b) Spane (1993) y c) Ventana Móvil

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Se observa que tanto el modelo de Bourdet (1983) como el de Spane (1993) presentan un comportamiento similar en los distintos valores del factor de suavizado L . Analizando estas gráficas en conjunto, los valores de L iguales a 0 y 0.1, presentan un suavizado pobre con una dispersión de puntos de consideración, los valores de L que van desde 0.2 hasta 0.5 presentan un mejor suavizado, generando curvas más delineadas y que muestran de mejor manera el periodo de flujo radial; sin embargo, las curvas generadas con el modelo de Spane (1993) se comportan de mejor manera que el modelo de Bourdet (1983), observando una disminución de la dispersión de los puntos y curvas con un comportamiento más definido.

La gráfica que muestra el suavizado utilizando el algoritmo de Ventana Móvil presenta la mayor variedad de curvas, se observa que con valores de 1% hasta 5%, se puede observar el mismo comportamiento que con los modelos anteriores, con suavizados aceptables que muestran los periodos de flujo presentes las tres gráficas, pero con valores de suavizado de 10%, 20%, 30%, 40% y 50% las curvas comienzan a distorsionarse presentando comportamientos que generarían errores en la interpretación. Para seleccionar cuál de los distintos suavizados se utilizarán, se realizará un análisis con base en los resultados obtenidos para los distintos algoritmos y el modelo de ajuste de la deriva, se calculan los valores residuales entre ambos, para así poder identificar cuál de ellos es el que presenta el menor rango de error, estos se muestran en la **tabla 6.1**.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Tabla 6.1. Análisis estadístico de los algoritmos de suavizado de la derivada

Algoritmo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Ventana Móvil (%)			
1	2.6990	3.4653	1.8615
3	2.8157	3.6153	1.9014
5	1.4089	1.8090	1.3450
Bourdet (L)			
L=0.1	2.5574	3.2836	1.8120
L=0.3	0.7035	0.9033	0.9504
L=0.5	0.1185	0.1522	0.3901
Spane (L)			
L=0.1	2.7357	3.5125	1.8741
L=0.5	0.1760	0.2259	0.4753
L=0.7	0.0016	0.0021	0.0466

Como resultado del análisis estadístico, el algoritmo de Spane (1993) con $L=0.7$ es el que presenta el menor valor de RSS, por lo que será seleccionado para ser interpretado. Para calcular los parámetros del yacimiento, se necesita del uso de gráficos especializados, para analizar el periodo de flujo radial se utiliza una gráfica en escala semilogarítmica con una pendiente igual a 62 psi/ciclo como se muestra en la **figura IV.6.3.** y los resultados de la interpretación paramétrica se presentan en la **tabla 6.2.**

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

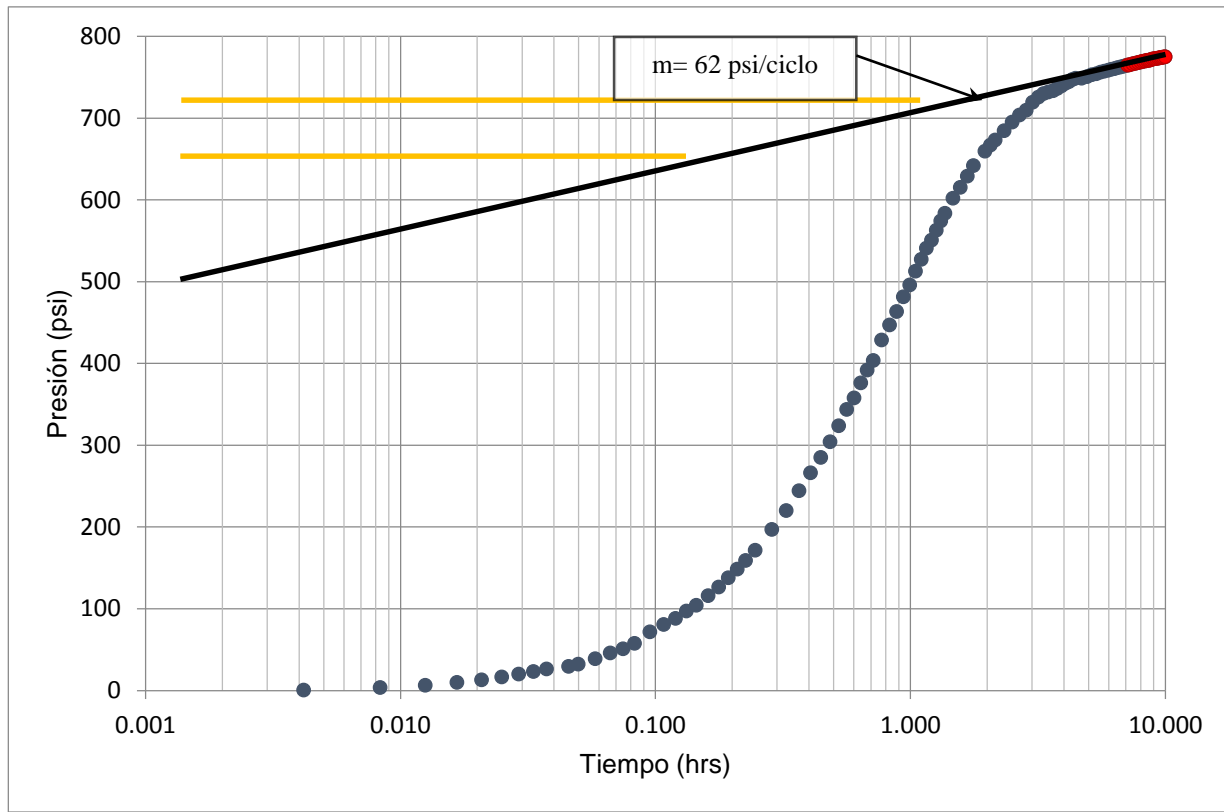


Figura IV.6.3. Gráfico especializado de flujo radial

Tabla 6.2. Resultados de la caracterización dinámica del yacimiento

	Permeabilidad (k)	Daño (S)	Radio de investigación (r_i)
Caracterización	11.30 md	5.04	235.60 ft

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Caso 7. Agua Fría

Se realizó una prueba de decremento de presión a un gasto constante de 700 bpd. El pozo se encuentra perforado a una profundidad de 2071 m con un radio de 0.3 ft, en el estado de Veracruz, México. Geológicamente se ubica en un sistema turbidítico que presenta cambios litológicos laterales y verticales abruptos, que lo ubican como un yacimiento discontinuo, aislado y de forma irregular (Porrás-Falcón 2014). El yacimiento cuenta con espesor de 200 ft, porosidad de 8%, compresibilidad total de 1.7×10^{-5} , con viscosidad de 0.8 cp y un factor volumétrico del aceite igual a 1.5 bls@c.s./bls@c.y.

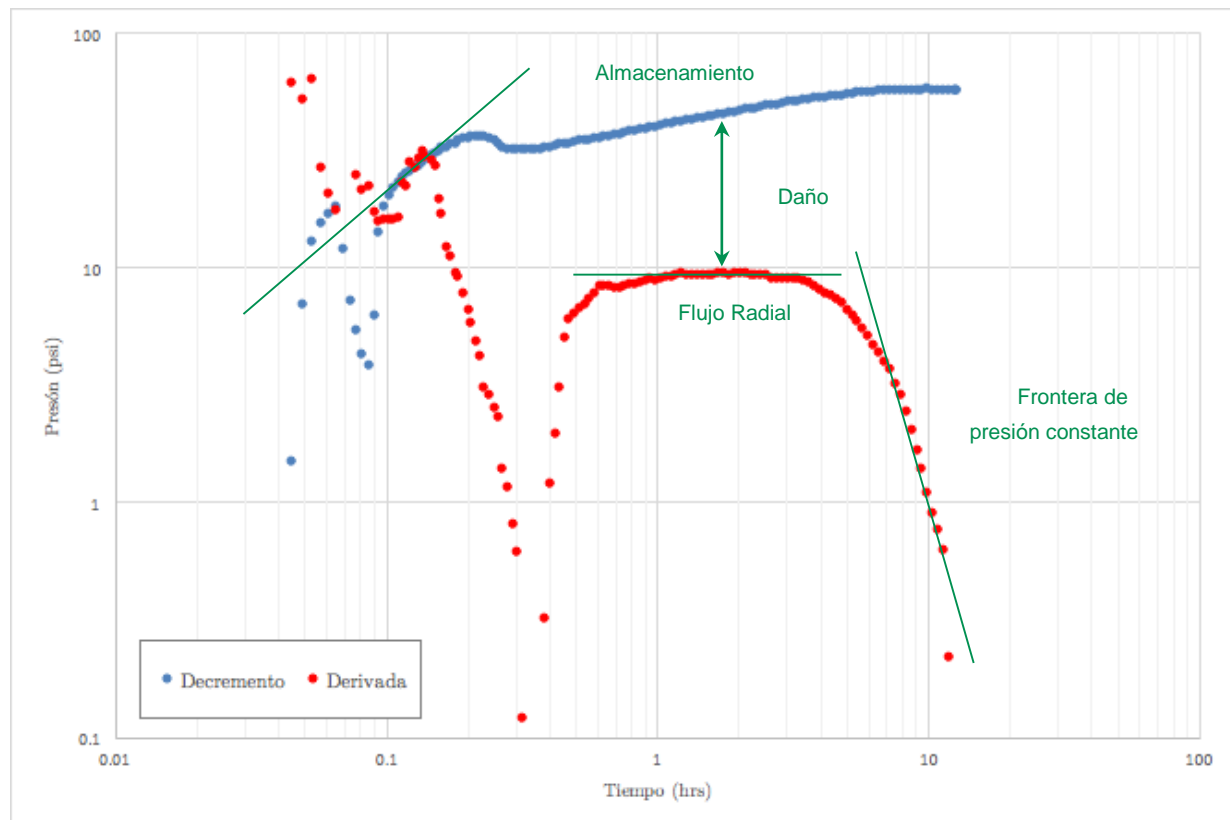


Figura IV.7.1. Gráfica de la prueba de decremento y su derivada

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

La **figura IV.7.1.** muestra la gráfica de los datos medidos de la prueba de presión, donde en primera instancia se realiza un primer ajuste de la derivada por medio del algoritmo de Bourdet (1983) con un suavizado de $L=0.5$ para realizar una primera interpretación del modelo no paramétrico. Como se indica en la gráfica, se puede observar la pendiente igual a 1 que indica el periodo de almacenamiento de pozo que va desde el comienzo de la prueba hasta aproximadamente las 0.15 horas de transcurrida la prueba, sin embargo, en primera instancia se señala que al comenzar la prueba se tienen una serie de puntos que generan ruido en la prueba y que no siguen esa tendencia general, esto puede ser generado debido a que el pozo no se encontraba completamente estabilizado al momento de comenzar a registrar la prueba.

Continuando con el análisis, se observa un periodo de transición donde se presenta una caída de la derivada que simula un posible efecto de doble porosidad. A partir de la primera hora de la prueba y hasta aproximadamente 3 horas se observa una estabilización de flujo radial que después de un periodo de transición, la prueba finaliza con un régimen característico de una frontera a carga constante.

Aun cuando la derivada calculada por el algoritmo de Bourdet (1983) presenta un suavizado de calidad, se utilizarán los demás algoritmos con el fin de mostrar que tanta variación se tiene de la derivada, para elegir aquel que muestre el mejor comportamiento. La **figura IV.7.2.** muestra la comparación de los tres distintos tipos de algoritmos de suavizado con la finalidad de determinar cuál de ellos es el que realiza un mejor ajuste y así poder llevar acabo la comprobación del modelo anterior. Las gráficas muestran una serie de puntos, donde la curva de decremento representa los datos de la prueba de presión y las siguientes curvas muestran las distintas formas que la derivada puede tomar al calcularse con distintos valores de suavizado.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

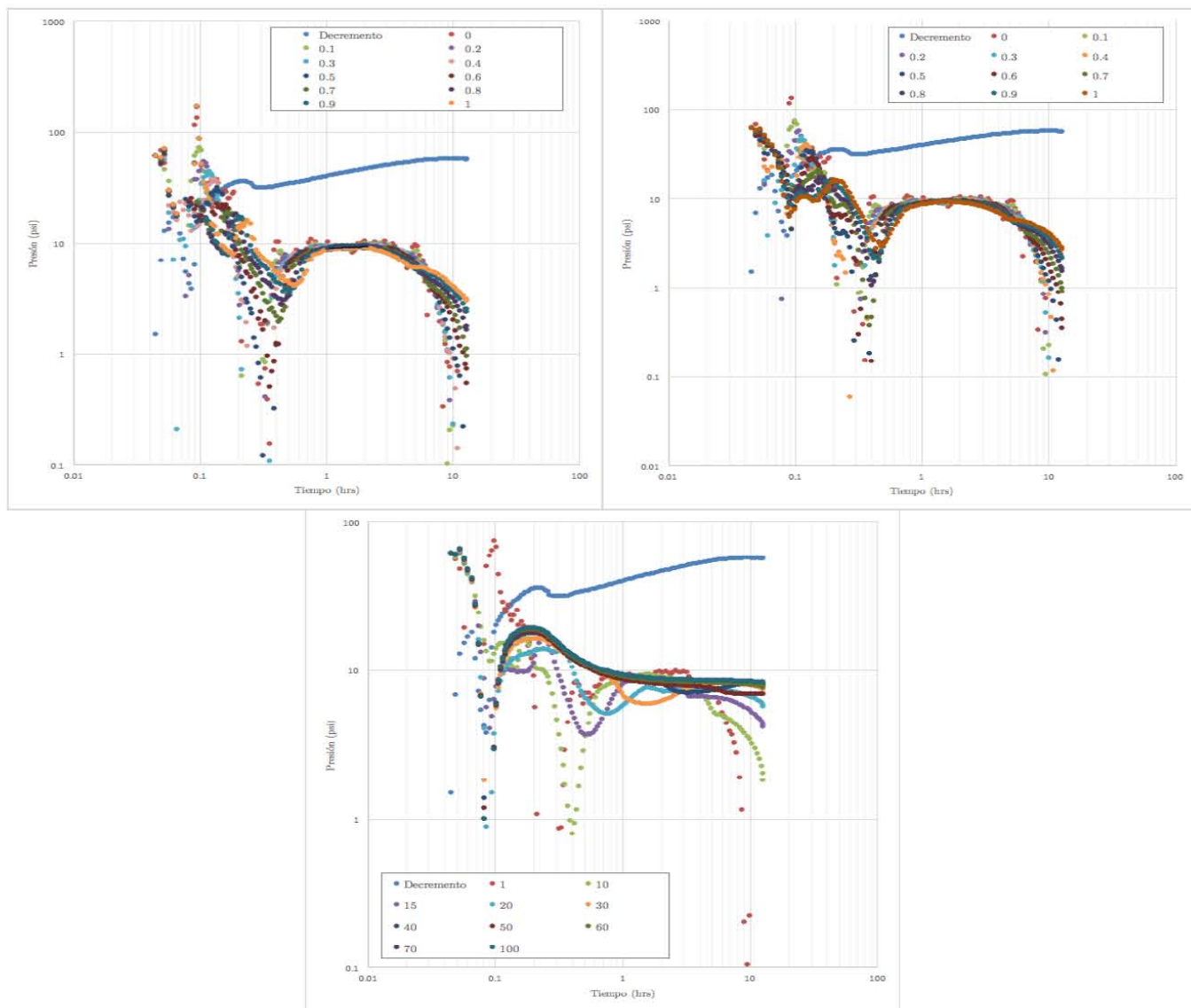


Figura IV.7.2. Gráfica de la prueba de presión y sus derivadas por los modelos de a) Bourdet (1983), b) Spane (1993) y c) Ventana Móvil

Se observa que tanto el modelo de Bourdet (1983) como el de Spane (1993) presentan un comportamiento similar en los distintos valores del factor de suavizado L. Analizando estas gráficas en conjunto, los valores de L que van desde 0 hasta 0.4, presentan un suavizado pobre con una dispersión de puntos de consideración, los valores de L que van desde 0.5 hasta 1 presentan un mejor suavizado, generando curvas más delineadas; sin embargo, las curvas generadas con el modelo de Spane (1993) se comportan de una mejor manera que el

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

modelo de Bourdet (1983), observando una disminución de la dispersión de los puntos y curvas con un comportamiento más definido.

La gráfica que muestra el suavizado utilizando el algoritmo de Ventana Móvil presenta la mayor variedad de curvas, se observa que con valores de 1%, 10%, 15% y 20% se tienen suavizados aceptables que muestran los periodos de flujo presentes las tres gráficas, pero con valores mayores de suavizado, las curvas comienzan a distorsionarse presentando comportamientos que generarían errores en la interpretación.

De acuerdo al análisis anterior, es posible definir que existen grandes cambios dentro de un rango de puntos en específico; para Bourdet (1983) corresponde a aquellos puntos calculados con un suavizado de $L= 0.1, 0.3$ y 0.5 , para Spane (1993) los valores de $L= 0.1, 0.5$ y 0.7 y para el algoritmo de Ventana Móvil son 1%, 10% y 15%. Para seleccionar cuál de los distintos suavizados se utilizarán, se realizará un análisis con base en los resultados obtenidos para los distintos algoritmos y el modelo de ajuste de la deriva, se calculan los valores residuales entre ambos, para así poder identificar cuál de ellos es el que presenta el menor rango de error, estos se muestran en la **tabla 7.1**.

Tabla 7.1. Análisis estadístico de los algoritmos de suavizado de la derivada

Algoritmo	Residual	Varianza	Desv. Estd.
Ventana Móvil (%)			
1	0.2016	2.4193	1.5554
10	0.0914	1.0973	1.0475
15	0.7226	8.6713	2.9447
Bourdet (L)			
L=0.1	0.2047	2.4568	1.5674
L=0.3	0.1161	1.3933	1.1803
L=0.5	0.0487	0.5845	0.7645
Spane (L)			
L=0.1	0.2016	2.4193	1.5554
L=0.5	0.0499	0.5988	0.7738
L=0.7	0.0515	0.6179	0.6870

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

Como resultado del análisis estadístico, el algoritmo de Bourdet (1983) con $L= 0.5$ es el que presenta el menor valor de RSS, por lo que será seleccionado para ser interpretado y cuya interpretación no paramétrica es la indicada. Utilizando el gráfico especializado en escala semilogarítmica se pueden calcular los parámetros para flujo radial y para la frontera de presión constante, los resultados de la interpretación paramétrica se muestran en la **tabla 7.2**.

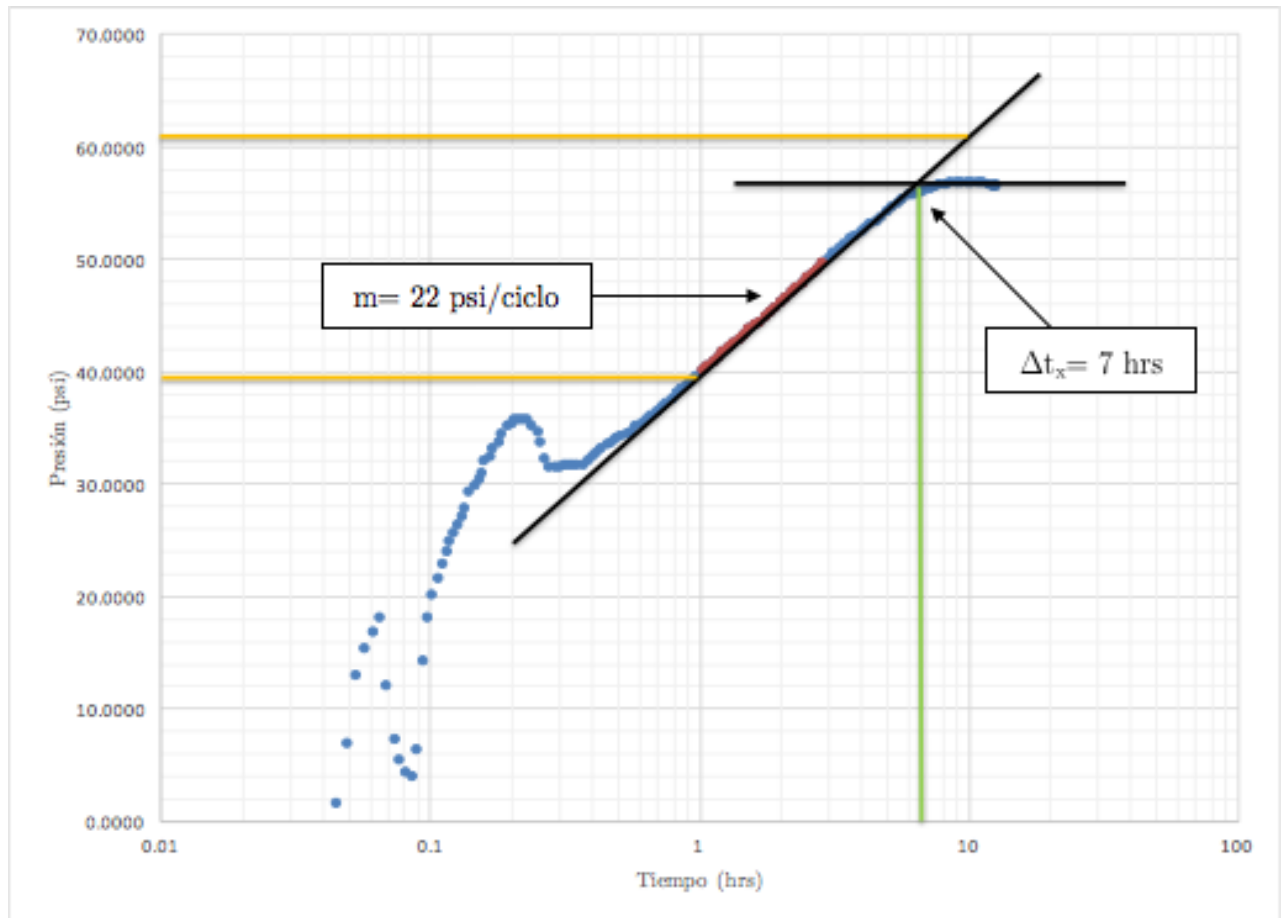


Figura IV.7.3. Gráfico especializado en escala semilogarítmica

	Permeabilidad (k)	Daño (S)	Radio de investigación (r _i)	Distancia a la frontera (L)
Caracterización	31.04 md	-7.74	55.04 ft	171.98 ft

Tabla 7.2. Resultados de la prueba de presión

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

IV.3. Integración de resultados

Caso	Algoritmo	L	Residual	Varianza	Desv. Estd.	Hanning
<i>Arabia</i>	<i>Bourdet</i>	0.3	0.002025	0.008777	0.093685	Se aplica, sin gran variación.
<i>Saratoga</i>	<i>Spane</i>	0.7	0.000014	0.000582	0.024120	Se aplica, sin gran variación.
<i>Lynden</i>	<i>Bourdet</i>	0.7	0.000796	0.001356	0.036825	Se aplica, sin gran variación.
<i>Querétaro</i>	<i>Bourdet y Spane</i>	0.1	0.002105	0.001930	0.043931	Debido a la corta duración de esta prueba no se tienen suficientes datos para aplicar.
<i>Boca del Río</i>	<i>Spane</i>	0.7	0.000230	0.000231	0.015206	Esta prueba presenta ruido considerable en la derivada. Resulta contraproducente.
<i>Bourdet</i>	<i>Spane</i>	0.7	0.0016	0.0021	0.0466	Se aplica, sin gran variación.
<i>Agua Fría</i>	<i>Bourdet</i>	0.5	0.0487	0.5845	0.7645	Esta prueba presenta ruido considerable en la derivada. Resulta contraproducente.

CAPÍTULO V - CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- Las técnicas y procedimientos desarrollados, constituyen una opción de análisis que supera lo disponible hasta el momento. Su uso permite contar con bases más firmes para tomar las decisiones para la selección de políticas de explotación, con los beneficios económicos consecuentes; adicionalmente, con su aplicación se consiguen ahorros en los costos de toma de información de los registros de presión de fondo, ya que el tiempo requerido para la medición puede reducirse sustancialmente.
- La derivada debe ser analizada simultáneamente con la curva de abatimiento y su derivada. Solo se analizarán las tendencias principales de la curva; las pequeñas variaciones son ruido generalmente. Usar los gráficos log-log y semi-log es muy útil en el análisis.
- En ocasiones tenemos más de un modelo que ajusta; los datos geológicos disponibles son de utilidad para definir el modelo de análisis.
- El suavizado de la derivada permite observar las distintas geometrías y regímenes de flujo presentes en las pruebas y permite diagnosticarlas de manera más sencilla
- No se recomienda usar un único tipo de algoritmo o valor de L, es necesario analizar cómo cambia la derivada entre los 4 métodos recomendados para así escoger el mejor ajuste
- En pruebas cuya duración es escasa o se cuenta con pocos datos de la prueba no se debe usar valores muy grandes de L para no sobre suavizar la derivada
- Es altamente recomendable realizar un análisis estadístico del ajuste que complementa el análisis gráfico, contando así con otra manera de validar los resultados.
- Hanning debe ser usado en los datos crudos solo cuando la curva de abatimiento original presenta ruido visible, sino los resultados del ajuste varían muy poco.
- Hanning es una línea de investigación que presenta un área de oportunidad para futuras tesis.
- En acuíferos, el algoritmo de Spane mostró resultados alentadores, porque lo que se recomienda explorar a fondo esta herramienta, considerando un espectro más representativo de condiciones geológicas e hidráulicas.

ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.

CAPÍTULO VI – REFERENCIAS CITADAS

- Bourdet, D. et al., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil*, 196(6), pp.95–106.
- Bourdet, D., 2002. *Well test analysis: the use of advanced interpretation models* J. Cubitt, ed., Amsterdam-Boston-London-New York-Oxford-Paris-San Diego-San Francisco-Singapore- Sidney- Tokyo: Elsevier.
- Bourdet, D., Ayoub, J.A. & Pirard, Y.M., 1989. Use of Pressure Derivative in Well Test Interpretation. *SPE Formation Evaluation*, 4(2).
- CONAGUA, 1995. *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación en los acuíferos de Aguascalientes y Querétaro, México.*, Mexico.
- Cooper, H.H. & Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method of evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions, American Geophysical Union*, 27(IV), pp.526–534. Available at:
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+generalized+graphical+method+for+evaluating+formation+constants+and+summarizing+well-field+history#0>.
- D. R. Horner, 1951. Pressure Build-up in Wells. In The Hague, the Netherlands: World Petroleum Congress, p. 19. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/WPC-4135>.
- D Bourdet, T. M. Whittle , A. A. Douglas, Y.M.P., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil*, 196(6), pp.95–106.
- Gringarten, A.C. et al., 1979. A Comparison Between Different Skin And Wellbore Storage Type-Curves For Early-Time Transient Analysis. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. Available at:
<http://www.onepetro.org/doi/10.2118/8205-MS>.
- Porrás-Falcón, J., 2014. *Evaluación petrolera de los campos agua fría, Coapechaca y Tajín, en el paleocanal de Chicontepec*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Renard, P., Glenz, D. & Mejias, M., 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*, 17(3), pp.589–600.

**ALGORITMOS DE SUAVIZADO EN LA SEÑAL DE LA DERIVADA PARA MEJORAR
LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS EN YACIMIENTOS Y ACUIFEROS.**

- Robert A. Greenkorn, 1983. Flow phenomena in porous media, by Robert A. Greenkorn, published by Marcell Dekker(1983), 560 pages. *AIChE Journal*, 30(1), pp.172–173. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690300126>.
- Sen, Z., 1995. Applied Hydrogeology for Scientists and Engineers. *Lewis Publishers*, p.464p.
- Spaine, F.A., 1993. *Selected Hydraulic test Analysis Techniques for Constant-Rate Discharge Tests*, Washington.
- Spaine, F. & Wurstner, S., 1993. DERIV: A computer program for calculating pressure derivatives for use in hydraulic test analysis. *Groundwater*, 31(5), pp.814–822.
- Trauth, M.H., 2007. *MATLAB® Recipes for Earth Sciences* 4th ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Available at: <papers2://publication/uuid/9EDB56D6-1074-42D3-91B5-677746C89F6C>.
- Vargas Sabadia, A., 2014. *Estadística descriptiva e inferencial* U. C. LA MANCHA, ed.,
- Xiao, L. & Xu, Y., 2014. Diagnostic analysis of pumping tests using derivative of $dlgs/dlgt$ with case study. *Groundwater*, p.10.