

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**OBTENCIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y  
TRANSMISIVIDAD MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE  
PRUEBAS DE BOMBEO UTILIZANDO EL MÉTODO  
DE RATHOD Y RUSHTON**

**POR:**

**ING. JOSÉ LUIS HUERTA GARCÍA**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA**

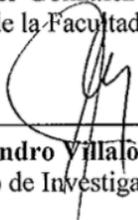
**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

**DICIEMBRE DE 2020**



*Obtención de conductividad hidráulica y transmisividad mediante la interpretación de pruebas de bombeo utilizando el método Rathod y Ruston. Tesis presentada por el Ing. José Luis Huerta García como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:*

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. Miguel Ángel González Núñez**  
Coordinador(a) Académico

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Humberto Silva Hidalgo**  
Director(a) de Tesis

**Diciembre 2020**

Fecha

Comité:

**Dr. Humberto Silva Hidalgo**  
**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
**M.I. María Alejandra Velázquez Cásares**  
**Dr. Perla Ivonne Cordero de los Ríos**

© Derechos Reservados

**Ing. José Luis Huerta García**  
Circuito Universitario No. 1  
Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih. México  
Diciembre 2020





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

16 de diciembre de 2020

**ING. JOSÉ LUIS HUERTA GARCÍA**  
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de maestría en ingeniería en hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta dirección, propuesto y dirigido por el director la Dr. Humberto Silva Hidalgo para que lo desarrolle como tesis con el título **“OBTENCIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y TRANSMISIVIDAD MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO UTILIZANDO EL MÉTODO DE RATHOD Y RUSHTON”**

### ÍNDICE DE CONTENIDO

- Agradecimientos
- Resumen Índice de Contenido Índice de Tablas Índice de Figuras
- 1. Introducción
- 1.2 Justificación
- 1.3 Alcances y objetivos
- 1.4 Hipótesis
- 1.5 Metodología
- 2. Marco teórico para la interpretación de pruebas de bombeo
- 2.1 Formaciones hidrogeológicas
- 2.2 Tipos de acuífero
- 2.3 Propiedades físicas del medio
- 2.4 Ley de Darcy
- 2.5 Estados del flujo
- 2.6 Ejecución de pruebas de bombeo y su utilidad
- 2.7 Métodos convencionales para interpretar pruebas de bombeo
- 2.8 Método de Rathod y Rushton
- 3. Interpretación de pruebas de bombeo de larga duración sin pozo de observación
- 3.1 Análisis de los datos de campo
- 3.2 Interpretación por métodos convencionales
- 3.3 Interpretación por el método de Rathod y Rushton

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

- 4. Análisis y comparación de resultados
- 4.1 Prueba de bombeo pozo Camargo CM4
- 4.2 Prueba de bombeo pozo Camargo CM8.
- 4.3 Prueba de bombeo pozo J213.
- 4.4 Prueba de bombeo pozo P216.
- 4.5 Prueba de bombeo pozo P220.
- 4.6 Prueba de bombeo pozo SN8.
- 4.7 Prueba de bombeo pozo TA9.
- 4.8 Prueba de bombeo pozo UNI.
- 4.9 Prueba de bombeo pozo VASG.
- 4.10 Tablas resumen de resultados
- 5. Conclusiones y Recomendaciones
- 5.1 Conclusiones
- 5.2 Recomendaciones
- Referencias
- Anexos
- Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTU

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)

## **Agradecimientos**

A todos aquellos que me apoyaron en mi formación en hidrología.

A los profesores con los que llevé mis cursos introductorios en preparatoria, con los que cursé las primeras materias de Hidrología en Ingeniería Civil y a todos los catedráticos que me compartieron un poco de su conocimiento en esta maestría, entre ellos: Guadalupe Gutiérrez Estrada, Alejandro Villalobos Aragón, Adán Pinales Munguía, Carmen Julia Navarro Gómez, Rodrigo de la Garza Aguilar, Fernando Arévalo Ruiz, Alejandra Velázquez Cázares, Lourdes Villalba y Cecilio Pérez.

A mis compañeros de maestría, con los cuales compartí dos años de clases en aulas, con los que trabajé en equipo temas de gabinete y de campo, con los que estudié para diversos exámenes y con los que discutí diferentes puntos de vista en este proceso de aprendizaje.

Agradecimientos en especial a mi profesor y amigo Humberto Silva Hidalgo, que nos compartió sus conocimientos en el aula de Hidrología de la zona no saturada y que llevó el programa de curso planteado desde el día uno al pie de la letra. También por permitirme dar continuación a un trabajo previo a esta Tesis, por compartirme los datos para llevar a cabo este trabajo, por explicarme conceptos, sugerirme lecturas y dar seguimiento a este trabajo.

A mi familia por apoyarme en todas mis decisiones.

## **Resumen**

El presente trabajo considera nueve pruebas de bombeo, ejecutadas entre el año de 1970 al año 2000 en el estado de Chihuahua, México. Estas pruebas contienen la descripción de los pozos, así como las lecturas de tiempo y profundidad del nivel del agua, observadas durante la ejecución de pruebas de bombeo, con las cuales se obtiene una gráfica de tiempo-abatimiento y de tiempo-recuperación. Las lecturas de tiempo y niveles se tomaron en el propio pozo de bombeo, dado que no se dispuso de piezómetros de observación. Considerando estos parámetros e información contenida en la literatura, se utilizan los métodos convencionales aplicables así como el modelo de Rathod y Rushton para pozos sin pozo de observación, lo anterior con la finalidad de obtener la transmisividad y consecuentemente la conductividad hidráulica horizontal de un acuífero. El objeto de la investigación fue evaluar la funcionalidad del modelo numérico con respecto a los métodos convencionales en la interpretación de pruebas de bombeo de larga duración sin pozo de observación. Es importante hacer mención que la literatura considera la construcción de un pozo de observación con ciertas características para medir las variables en cuestión para un pozo convencional. La construcción de estos pozos suele resultar costosa, por lo que rara vez se construyen y se operan. Obtener la transmisividad y conductividad hidráulica horizontal sin tener un pozo de observación puede ser muy relevante, ya que, al tener un dato representativo de estas variables a un bajo costo, significa que el universo o base de estas variables podrá incrementar sustancialmente. Conjuntando estos valores, las entidades administradoras de acuíferos tendrán una “materia prima” con la cual tomar mejores decisiones. Como resultado se observó la importancia de contar con los registros tanto de abatimiento, como de recuperación del pozo, siendo de mayor importancia estos últimos en la confiabilidad de los parámetros hidráulicos que se obtienen con el modelo en relación con los métodos convencionales.

## **Abstract**

This work considers nine pumping tests performed between 1990 and 2000 in Chihuahua, Mexico. These tests include the well description and the time – depth of water lectures from whom the time-drawdown and time-recovery graphics were obtained. Time and water level lectures were taken at the well, since there were no observation wells. With these terms and with the information contained in books, the applicable conventional methods and the one from Rathod and Rushton were used for wells without observation wells, this with the intention of obtaining the “transmissivity” and therefore, the horizontal hydraulic conductivity. The purpose of the investigations was to evaluate the numeric model versus the conventional methods (long lasting pumping tests without observation wells). It is important to mention that the literature considers an observation well with certain characteristics to measure the needed variables for a conventional well. These wells are expensive and rarely built. Having the transmissivity and the horizontal hydraulic conductivity without the need of an observation well is relevant, this means that the universe of data at a low cost that can be obtained increases drastically. With these values, the operating companies can take wiser decisions. As a result, it was observed that is really important to have the drawdown and the recovery data from the well, these last being are more important, since hydraulic parameters are more reliable in the model than the conventional methods.



A PARTIR DEL *ÍNDICE* PONER EL LOGO DE LA FACULTAD EN LA PARTE SUPERIOR IZQUIERDA

## Índice de Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	viii
<b>Resumen</b> .....	ix
<b>Índice de Contenido</b> .....	x
<b>Índice de Tablas</b> .....	xii
<b>Índice de Figuras</b> .....	xii
<b>1. Introducción</b> .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Alcances y objetivos .....	2
1.4 Hipótesis .....	3
1.5 Metodología.....	3
<b>2. Marco teórico para la interpretación de pruebas de bombeo</b> .....	5
2.1 Formaciones hidrogeológicas .....	5
2.2 Tipos de acuífero .....	5
2.3 Propiedades físicas del medio.....	6
2.4 Ley de Darcy.....	9
2.5 Estados del flujo .....	10
2.6 Ejecución de pruebas de bombeo y su utilidad.....	10
2.7 Métodos convencionales para interpretar pruebas de bombeo .....	12
<b>2.8 Método de Rathod y Rushton</b> .....	18
<b>3. Interpretación de pruebas de bombeo de larga duración sin pozo de observación</b> .....	21
3.1 Análisis de los datos de campo .....	21
3.2 Interpretación por métodos convencionales .....	22
3.3 Interpretación por el método de Rathod y Rushton .....	47
<b>4. Análisis y comparación de resultados</b> .....	61
4.1 Prueba de bombeo pozo Camargo CM4.....	61

4.2 Prueba de bombeo pozo Camargo CM8.....	61
4.3 Prueba de bombeo pozo J213.....	62
4.4 Prueba de bombeo pozo P216.....	63
4.5 Prueba de bombeo pozo P220.....	63
4.6 Prueba de bombeo pozo SN8.....	64
4.7 Prueba de bombeo pozo TA9.....	64
4.8 Prueba de bombeo pozo UNI.....	65
4.9 Prueba de bombeo pozo VASG.....	65
4.10 Tablas resumen de resultados.....	66
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>69</b>
5.1 Conclusiones.....	69
5.2 Recomendaciones.....	70
<b>Referencias.....</b>	<b>71</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>73</b>
<b>Curriculum Vitae.....</b>	<b>81</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Tiempos recomendados para toma de lecturas de abatimiento de nivel del agua durante una prueba de bombeo.....	11
<b>Tabla 2:</b> Métodos para interpretar pruebas de bombeo en acuíferos libres.....	13
<b>Tabla 3:</b> Métodos para interpretar pruebas de bombeo en acuíferos confinados.....	15
<b>Tabla 4:</b> Métodos para interpretar pruebas de bombeo en acuíferos semi confinados.....	17
<b>Tabla 5:</b> Datos básicos de las pruebas de bombeo interpretadas.....	23
<b>Tabla 6:</b> Espacio de soluciones factibles obtenidas por el método de Rathod y Rushton.....	67
<b>Tabla 7:</b> Comparación de interpretación inicial vs el método de Rathod y Rushton.....	68

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Configuración conceptual del modelo de dos capas (modificado de Rathod y Rushton, 1991). .....	21
<b>Figura 2:</b> Las curvas semi logarítmicas y las curvas logarítmicas de las relaciones teóricas de tiempo-abatimiento de acuíferos no consolidados (granulares). .....	21
<b>Figura 3.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para abatimiento	25
<b>Figura 4.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para recuperación .....	26
<b>Figura 5.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para abatimiento	27
<b>Figura 6.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para recuperación .....	28
<b>Figura 7.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para abatimiento	30
<b>Figura 8.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para recuperación .....	31
<b>Figura 9.</b> Interpretación prueba de bombeo Juárez, método convencional para abatimiento .....	32
<b>Figura 10.</b> Interpretación prueba de bombeo Juárez, método convencional para recuperación.....	33
<b>Figura 11.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para abatimiento .....	35
<b>Figura 12.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para recuperación .....	36
<b>Figura 13.</b> Interpretación prueba de bombeo Juárez, método convencional para abatimiento .....	37
<b>Figura 14.</b> Interpretación prueba de bombeo Sacramento, método convencional para recuperación .....	38
<b>Figura 15.</b> Interpretación prueba de bombeo Tabalaopa-Aldama, método convencional para abatimiento .....	40
<b>Figura 16.</b> Interpretación prueba de bombeo Tabalaopa-Aldama, método convencional para recuperación.....	41
<b>Figura 17.</b> Interpretación prueba de bombeo Chihuahua, método convencional para abatimiento .....	42
<b>Figura 18.</b> Interpretación prueba de bombeo Chihuahua, método convencional para recuperación.....	43
<b>Figura 19.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para abatimiento .....	45
<b>Figura 20.</b> Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para recuperación .....	46
<b>Figura 21:</b> Interpretación prueba CM4, Pozo no.4, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez .....	48
<b>Figura 22:</b> Interpretación prueba CM8, Pozo no.8, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez .....	50

<b>Figura 23:</b> Interpretación prueba 213, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez.....	51
<b>Figura 24:</b> Interpretación prueba P216, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez .....	53
<b>Figura 25:</b> Interpretación prueba 220, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez.....	54
<b>Figura 26:</b> Interpretación prueba SN8, Sacramento, Municipio de Chihuahua .....	56
<b>Figura 27:</b> Interpretación prueba TA9, Tabalaopa, Municipio de Aldama .....	57
<b>Figura 28:</b> Interpretación prueba UNI, Chihuahua, Municipio de Chihuahua .....	59
<b>Figura 29:</b> Interpretación prueba VASG, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez.....	60

## 1. Introducción

Realizar las pruebas de bombeo de un pozo resulta de gran importancia, ya que mediante las mismas se pueden obtener los valores de propiedades del acuífero con las cuales se podrá tomar decisiones para la administración de los acuíferos. Lo anterior dará un marco de referencia a las dependencias encargadas de administrar los recursos y así poder entregar concesiones de una manera sustentable, contribuyendo así para el crecimiento del sector agrario y de la economía en cuestión. De acuerdo con el INEGI (2016), las actividades primarias representan el 6.7% del PIB estatal y las secundarias representan el 43.7 del PIB estatal. Dado que las secundarias (Industria y Construcción) dependen de las primarias (Agricultura, Ganadería y Minería) y las primarias consideran al agua como uno de sus principales insumos, es sumamente importante que exista un suministro sustentable de este insumo para poder seguir ofreciendo productos y/o servicios y poder seguir generando riqueza, la cual se verá reflejada en la calidad de vida de los habitantes.

Conocer las propiedades hidráulicas de un acuífero como son: la conductividad hidráulica y la transmisividad, son de gran importancia para comprender su comportamiento ante los volúmenes que se extraen, así como los que ingresan (recarga). La realización de pruebas de bombeo, es una de las formas mediante las cuales se puede conocer el valor de los parámetros hidráulicos del acuífero. Por tratarse de pruebas en campo, la aproximación en la obtención de los valores más representativos del medio físico es mayor en comparación a otros métodos teóricos, disminuyendo con ello la incertidumbre asociada con su determinación.

Si bien el corte litológico del medio físico que se está estudiando fue compuesto por diversos fenómenos físicos y tipos de depósitos, por lo cual, los materiales contenidos en él, pueden ser muy diversos y con propiedades hidráulicas desiguales; sin embargo, generalmente tienden a constituir estratos relativamente homogéneos, siendo posible identificar una o dos capas, siendo que para los fines prácticos de estudios de pruebas de bombeo, a profundidades no mayores a 400 metros, rara vez se identificarán tres estratos.

Para hacer una prueba de bombeo en condiciones adecuadas, se debe considerar la construcción de un segundo pozo denominado “pozo de observación”; a pesar de ser como lo indica la teoría, la construcción de estos implica elevar significativamente los costos

(Cherry y Johnson, 1982). Es por lo anterior, que los pozos que cuentan con su pozo de observación en operación son mínimos en comparación con los que no lo tienen.

Por lo antes expuesto, es que en la actualidad se están interpretando las pruebas de bombeo sin tener el pozo de observación mediante métodos convencionales (Halford *et al.*, 2006; Bäumle, 2011), lo que implica incumplir una o más de las hipótesis fundamentales de dichos métodos, por lo que no es posible dimensionar la calidad de los resultados que se obtengan.

## **1.2 Justificación**

Debido a que no es común la construcción de pozos de observación, es importante hacer un esfuerzo para obtener valores representativos de las propiedades del acuífero, empleando las pruebas de bombeo que se realizan en los propios pozos de extracción.

Los modelos actualmente se calibran de tal forma que las variables incluidas en el mismo pueden tomar diferentes valores para llegar a un resultado válido, esta no unicidad podría acotarse o eliminarse obteniendo un rango de valores factibles que incluyan los valores representativos de la conductividad hidráulica y la transmisividad.

Si se logran utilizar las pruebas de bombeo para obtener las características del acuífero, los resultados de los estudios geohidrológicos mejorarán considerablemente.

## **1.3 Alcances y objetivos**

Los alcances de esta tesis incluyen el análisis del marco teórico de la interpretación de pruebas de bombeo en diferentes medios o tipos de acuífero, así como los métodos y procedimientos desarrollados para cada caso. Adicionalmente se revisa con detalle un método numérico que aparentemente tiene ventajas sobre los métodos convencionales.

Razón por la cual se hace necesario probar y comparar las diferentes metodologías en la interpretación de pruebas de bombeo existentes. Para tal propósito se tiene como objetivo general y específicos los siguientes:

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinar si mediante la utilización del método de Rathod y Rushton se pueden llegar a resultados válidos de conductividad hidráulica y la transmisividad en pruebas de bombeo de larga duración sin pozo de observación.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Revisar el procedimiento que se debe seguir para efectuar las pruebas de bombeo en campo y los cuidados que se deben de tener durante su ejecución.
- Revisar las hipótesis básicas de los métodos convencionales.
- Revisar las hipótesis del Método de Rathod y Rushton.
- Construir los modelos conceptuales a partir del corte litológico, de las características del pozo, y los datos de campo de la prueba de bombeo, para la interpretación de veinte pruebas de bombeo.
- Interpretar las nueve pruebas de bombeo por métodos convencionales y por el método de Rathod y Rushton.
- Comparar los resultados de pruebas de larga y corta duración obtenidos por el método de Rathod y Rushton.

### **1.4 Hipótesis**

El método de Rathod y Rushton se puede usar para interpretar de manera confiable pruebas de bombeo de larga duración, sin pozos de observación, para obtener valores de conductividad hidráulica y transmisividad representativos del sistema acuífero bajo estudio.

### **1.5 Metodología**

Hablando de temas relativos al agua, se puede dividir en hidrología superficial, la cual estará asociada a cuencas hidrológicas y en hidrología subterránea, la cual estará asociada a acuíferos. Esta tesis se relaciona con el estudio de los acuíferos, los cuales pueden a su vez dividirse en libres, semiconfinados y confinados, consecuentemente habrá diferentes autores, los cuales proponen diferentes métodos con diferentes hipótesis para el análisis de los diferentes tipos de acuíferos.

En este apartado se describe la metodología que se utilizó para el desarrollo de la investigación, la cual consta de cinco actividades:

- Se revisaron los estudios previos en el tema, artículos y libros, la recopilación de datos fue principalmente obtenida de pruebas de bombeo realizadas en años anteriores. Las pruebas de bombeo se recopilaron en la Comisión Nacional del Agua y en la Junta Central de Agua y Saneamiento del estado de Chihuahua.
- Se revisaron los métodos convencionales y el modelo de Rathod y Rushton para obtener: sus hipótesis, teoría, condiciones de frontera, casos de aplicación práctica y formulaciones.
- Considerando la información recabada de cada prueba de bombeo, corte litológico y datos de campo de la prueba de bombeo, así como información general del tipo de acuífero en el cual fue realizada, se interpretó la prueba por los métodos convencionales que conforme a sus hipótesis básicas se han aplicables.
- Posteriormente, se reinterpreto la prueba de bombeo empleando el modelo de Rathod y Rushton, primero considerando sólo la etapa de abatimiento y posteriormente considerando también la de recuperación.-
- Considerando que es un modelo numérico que incorpora múltiples variables en la interpretación de pruebas de bombeo, en este apartado se evaluó el espacio de soluciones factibles de las variables de mayor interés (conductividad hidráulica horizontal y coeficiente de almacenamiento). Para realizar lo anterior, se modificó el valor obtenido inicialmente en la interpretación de la prueba, así como otras de las variables del modelo, buscando un nuevo conjunto de valores que preserven el ajuste entre los datos observados y los que produce el modelo. De esta forma se propone obtener el valor máximo y el mínimo de dicha variable sin perder el ajuste; a este rango de valores se le denominó espacio de soluciones factible.
- El espacio de soluciones factible se obtuvo primero considerando solo la etapa de abatimiento y posteriormente las etapas de abatimiento y de recuperación.
- Se analizaron los resultados obtenidos por métodos convencionales y por el modelo de Rathod y Rushton, es importante destacar que inicialmente se analizaron considerando sólo el abatimiento y después también considerado la recuperación. La misma comparación se realizó para los espacios de soluciones factibles, tomando sólo el abatimiento y también cuando se toma el abatimiento y la recuperación. Se presenta una discusión y una conclusión de los resultados obtenidos.

## 2. Marco teórico para la interpretación de pruebas de bombeo

### 2.1 Formaciones hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas regionales o locales que podemos encontrar en el subsuelo son:

**Acuífero:** Unidad geológica permeable y saturada, la cual es capaz de aportar agua a pozos. Los acuíferos más comunes están formados por materiales no consolidados como gravas y arenas; rocas sedimentarias permeables como areniscas y calizas; rocas volcánicas intemperizadas o altamente fracturadas, así como rocas cristalinas entre otras (Kruseman y De Ridder, 2000),

**Acuitardo:** Unidad geológica que es permeable para transmitir agua en pequeñas cantidades en grandes áreas y en largos períodos, su permeabilidad no es suficiente para poder justificar la construcción de un pozo en estas unidades. Principalmente compuesto por rocas arcillosas, limosas y lutitas (Kruseman y De Ridder, 2000),

**Acuicludo:** Unidad geológica impermeable que no transmite agua. Generalmente son rocas ígneas o metamórficas no fracturadas las que forman este tipo de unidades. (Kruseman y De Ridder (2000).

### 2.2 Tipos de acuífero

**Acuífero libre:** Este tipo de acuífero está caracterizado por tener en la parte superior el nivel freático a presión atmosférica y en el inferior una capa impermeable. Esta capa impermeable hace posible el almacenamiento de agua y este es conocido como la zona saturada (CONAGUA, 2007).

**Acuífero confinado:** Este tipo de acuífero está caracterizado por tener en la parte superior e inferior capas impermeables. A diferencia del acuífero libre en donde la presión es la atmosférica, en este tipo de acuíferos las cargas hidráulicas son mayores que la presión atmosférica por lo que al existir una perforación, el agua podrá brotar como fuente, esto es mejor conocido como “pozo artesiano” (CONAGUA, 2007).

**Acuífero semiconfinado:** Este tipo de acuífero está caracterizado por tener en la parte superior e inferior un acuitardo o tener un acuitardo y un acuícludo. El agua puede moverse libremente a través de los acuitardos de manera ascendente o descendente (CONAGUA, 2007).

### 2.3 Propiedades físicas del medio

**Porosidad:** La porosidad de una roca es la propiedad de contener huecos. La porosidad generalmente es expresada como fracción o porcentaje y resulta de dividir el volumen de vacíos entre el volumen total (CONAGUA, 2007).

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} * 100 \quad \text{Ec. 2.1}$$

En donde:

$n$  = Porosidad (adimensional)

$V_v$  = Volumen de espacio vacíos en el material ( $cm^3$ )

$V_t$  = Volumen total del material ( $cm^3$ )

**Conductividad hidráulica:** La conductividad hidráulica es la constante de proporcionalidad en la ley de Darcy y es definida como el volumen de agua que se moverá en el medio poroso en una unidad de tiempo, en un gradiente hidráulico, en una unidad de área medido en cierto ángulo y dirección de la corriente (Kruseman y De Ridder, 2000).

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad \text{Ec. 2.2}$$

En donde:

$K$  = Conductividad hidráulica ( $\frac{m}{s}$ )

$k$  = Permeabilidad intrínseca (darcys)

$\rho$  = Densidad del agua ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$\mu$  = Viscosidad dinámica del agua (cP)

$g$  = Aceleración de la gravedad ( $\frac{9.81 m}{s^2}$ )

**Transmisividad:** es el producto del promedio de la conductividad hidráulica ( $K_{x,y}$ ) y el espesor saturado del acuífero ( $b$ ),  $T=Kb$ , (Kruseman y De Ridder, 2000).

$$T = \sqrt{T_{f(x)}T_{f(y)}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

En donde:

$T = \text{Transmisividad}$

$f_{(x)} = \text{fracturas en el eje } x$

$f_{(y)} = \text{fracturas en el eje } y$

**Compresibilidad:** Esta propiedad describe el cambio en volumen o la tensión inducida en un acuífero sometido a un esfuerzo (Kruseman y De Ridder, 2000).

$$\alpha = \frac{-dV_T}{V_T d\sigma_e} \quad \text{Ec. 2.4}$$

En donde:

$V_T = \text{Es el volumen total de la masa dada de material}$

$d\sigma_e = \text{Cambio en el esfuerzo efectivo}$

**Coefficiente de almacenamiento:** En forma generalizada es el volumen de agua que cede o almacena un acuífero derivado de un incremento o decremento unitario en carga hidráulica, y determina la capacidad que tiene un acuífero para almacenar o ceder agua y es función de las características físicas del agua, las propiedades físicas del subsuelo, así como las cargas hidráulicas que tienen influencia sobre el material granular o fracturado y en el líquido que se aloja y se desplaza en dicho medio (CONAGUA, 2007) . El mecanismo puede ser de dos formas, el ceder o almacenar agua debido a un cambio en la elevación del nivel estático y/o ceder o almacenar agua a través de la profundidad total del acuífero debido a un cambio en la carga hidráulica que corresponde a un ajuste en la presión dentro del sistema acuífero (Freeze y Cherry, 1979).

El **coeficiente de almacenamiento en un acuífero confinado** ( $S$ ) tiene valores pequeños debido a que la compresión del agua casi no afecta los materiales del subsuelo y consecuentemente el agua que cede o almacena es relativamente limitada.

$$S = Ssb \quad \text{Ec. 2.5}$$

En donde,  $S_s$ , es el **coeficiente de almacenamiento específico**, definido por:

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \quad \text{Ec. 2.6}$$

En donde:

$S_s$  = *Coeficiente de almacenamiento*

$\rho$  = *Masa de densidad de agua*

$g$  = *Aceleración de la gravedad*

$\alpha$  = *Factor de forma que representa la geometría de la matriz de bloques*

$n$  = *Es la porosidad del medio de agua*

$\beta$  = *Compresibilidad de agua en el acuífero*

**Rendimiento específico ( $S_y$ ):** Es el volumen de agua que cede un acuífero libre de su almacenamiento por unidad de área superficial y unidad de disminución de la superficie libre del agua (nivel freático). Dicho volumen es mayor que en los acuíferos confinados debido a la relación de vacíos de los materiales granulares que se vician al ceder el agua (CONAGUA. 2007)

**Factor de goteo:** Es una medida de la distribución espacial del goteo en la transición de un acuitardo a un acuífero semi confinado y viceversa (Kruseman y De Ridder,1979).

$$B = \sqrt{\frac{Kb}{\alpha S_y}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

En donde:

$B = \text{Factor de goteo (m)}$

$K = \text{Conductividad hidráulica del acuífero libre } \left(\frac{m}{\text{día}}\right)$

$b = \text{Espesor del acuífero libre a través del cual se presenta el goteo (m)}$

$\frac{1}{\alpha} = \text{Índice de retardo de Boulton (constante empírica, días)}$

$S_y = \text{Coeficiente de rendimiento específico del acuífero libre (adimensional)}$

**Flujo diferido:** Es un fenómeno que genera que el abatimiento debido al bombeo en un acuífero libre al ser graficado contra el tiempo en papel logarítmico se pueda observar una curva en forma de S, la cual se compone de un segmento pronunciado en el tiempo inicial, una parte plana en los tiempos intermedios y un segmento aún más pronunciado en los tiempos finales (Abdulaziz et al., 1993).

## 2.4 Ley de Darcy

Esta ley describe el movimiento del agua a través de un medio poroso y está dada por la expresión matemática:

$$v = K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{Ec. 2.8}$$

En donde:

$v = \text{Flujo de Darcy}$

$K = \text{Conductividad hidráulica saturada}$

$\Delta h = \text{perdida o diferencial de carga hidráulica entre dos puntos}$

$\Delta l = \text{distancia entre dos puntos}$

La **descarga específica** ( $v$ ) tiene las dimensiones de una velocidad. Este concepto asume que el fluido se está moviendo a través de un medio poroso, en donde hay partículas sólidas y poros. La gran ventaja de este concepto es que la descarga específica puede ser medida con facilidad.

## 2.5 Estados del flujo

De acuerdo con Kruseman y De Ridder (1979), se tienen dos posibilidades en cuanto al flujo de agua hacia un pozo que bombea agua:

**Estado de flujo estacionario:** Éste no está relacionado con el tiempo, es decir, el nivel del agua en el pozo y los piezómetros en el área no cambian en el tiempo ante el bombeo de un pozo. Este tipo de flujo ocurre cuando el acuífero es recargado por una fuente externa, la cual puede ser lluvia, flujo de acuitardos de la cal1pa superior o inferior o de un cuerpo de agua abierto que está en contacto con el acuífero. En la práctica se dice que un flujo estacionario se obtiene si el cambio en los piezómetros es pequeño a través del tiempo.

**Estado de flujo transitorio:** Este se presenta desde que inicia el bombeo y hasta que se logra establecer el estado estacionario se da cuando el nivel del agua empieza a cambiar. Es decir, el estado transitorio es observado en los pozos de bombeo y piezómetros mientras se tengan cambios en el nivel del agua entre lecturas

## 2.6 Ejecución de pruebas de bombeo y su utilidad

El principio de las pruebas de bombeo consiste en bombear agua de un acuífero y medir los niveles del agua en el pozo y en los piezómetros localizados a distancias conocidas.

Como se mencionó previamente, los acuíferos pueden a su vez dividirse en libres, semiconfinados y confinados, consecuentemente habrá diferentes autores, los cuales proponen diferentes métodos con diferentes hipótesis para el análisis de los diferentes tipos de acuíferos.

Las pruebas de bombeo sirven para determinar las características hidráulicas de los acuíferos y del pozo en cuestión, cuando son ejecutadas de manera correcta, se puede obtener información útil y de aplicación en temas locales y regionales. Con lo anterior, se puede seleccionar, por ejemplo, un equipo de bombeo adecuado de acuerdo con la relación caudal-abatimiento del pozo.

La ejecución de la prueba de bombeo consiste en bombear el pozo en cuestión por un tiempo y caudal determinado, de tal manera que se pueda medir el nivel piezométrico del mismo. Esta información en el cambio de nivel piezométrico del pozo (y pozo de observación si existiese) darán información del acuífero como su conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, existencia de barreras impermeables cercanas y tipo de recarga del acuífero.

El proceso para realizar un aforo es más sencillo, este considera sólo el caudal de la descarga y el abatimiento de el pozo en cuestión. Este tipo de pruebas podrán aportar información relativa a la calidad de construcción y desarrollo del pozo, así como las pérdidas de entrada de agua al pozo, caudal de bombeo óptimo y profundidad de colocación de la bomba.

La parte medular de una prueba de bombeo es la medición del abatimiento y la recuperación de este. Como estas variables sufren cambios mayores al inicio de la prueba, deben de ser medidos con mayor frecuencia, conforme va avanzando la prueba se pueden espaciar las lecturas. Lo anterior se puede observar en la Tabla 1, que presenta los tiempos sugeridos para toma de lecturas, de acuerdo con el manual de pruebas de bombeo de la CONAGUA (2007).

**Tabla 1:** Tiempos recomendados para toma de lecturas de abatimiento de nivel del agua durante una prueba de bombeo (CONAGUA, 2007).

No. De lectura	Tiempo a partir de inicio de bombeo	No. De Lectura	Tiempo a partir de inicio de bombeo
1	Antes de iniciar el bombeo	18	40 minutos
2	15 segundos	19	50 minutos
3	30 segundos	20	1 hora
4	45 segundos	21	1:20 hora
5	1 minuto	22	1:40 hora
6	2 minutos	23	2 horas
7	3 minutos	24	2:30 horas
8	4 minutos	25	3 horas
9	5 minutos	26	4 horas
10	6 minutos	27	5 horas
11	8 minutos	28	7 horas
12	10 minutos	29	9 horas
13	12 minutos	30	13 horas
14	15 minutos	21	19 horas
15	20 minutos	32	25 horas
16	25 minutos	33	31 horas
17	30 minutos	34	39 horas

## **2.7 Métodos convencionales para interpretar pruebas de bombeo**

Los métodos convencionales se clasifican de acuerdo con el acuífero en cuestión, de tal manera que los métodos están divididos en métodos aplicables a acuíferos libres, acuíferos confinados y acuíferos semiconfinados.

Los métodos encontrados en la literatura técnica y científica en general tratan de ajustar datos observados de una curva o línea recta (modelo teórico). Esto se hace mediante la superposición del modelo teórico con los datos observados en campo o cuando se trata de una línea recta, se utiliza el análisis de regresión lineal.

Aquí conviene enlistar las hipótesis aplicables a pruebas de bombeo realizadas e cualquier tipo de acuífero, por lo que se les denominará hipótesis básicas:

- El acuífero se toma como si tuviera un área infinita;
- El acuífero es sometido a una prueba de bombeo con una descarga constante; y

### **2.7.1 Métodos para acuíferos libres:**

Un acuífero libre se vacía en el espacio del cono de abatimiento, durante el bombeo reduciendo su espesor. Durante los primeros minutos del bombeo, el agua producida por un pozo en acuífero libre proviene de la expansión de ésta dentro del acuífero, debido al cambio en el estado de esfuerzos en la región afectada por el acuífero.

Los métodos para evaluar pruebas de bombeo en un acuífero libre consideran, además de las hipótesis básicas, las siguientes hipótesis complementarias:

- El acuífero es libre;
- El acuífero es homogéneo y tiene un espesor uniforme sobre el área de influencia de la prueba;
- El pozo penetra completamente en el acuífero y recibe agua de la totalidad del espesor saturado del acuífero;

En la Tabla 2 se presentan los métodos más comúnmente utilizados en la práctica profesional para interpretar pruebas de bombeo realizadas en acuíferos de tipo libre:

**Tabla 2:** Métodos para interpretar pruebas de bombeo en acuíferos libres.

Método	Ecuación	E. del Flujo	Observaciones
NEUMAN (1975)	$S = \frac{Q}{4\pi KD} W(u_A, u_B \beta)$ Ecuación 2.8	Transitorio	Isótropo o anisótropo $\frac{S_Y}{S_A} > 10$ Penetración total Ajuste de curva
BOULTON (1963)	$s = \frac{Q}{4\pi KD J} W(u_A, \frac{r}{B})$ Ecuación 2.9	Transitorio	$y = \text{variable de integración}$ $\gamma = \left(\frac{S_A + S_y}{S}\right) > 100$ Ajuste de curva
THIEM – DUPUIT (1906)	$dQ = (2\pi r h K_h) \frac{dh}{dr}$ Ecuación 2.10	Estacionario	Flujo horizontal Vel. Cte. en sección vertical Cálculo

Además de las hipótesis básicas y las complementarias pueden existir otras específicas que corresponden a cada método y que enlistan a continuación:

Método de Neuman (1975):

- El acuífero es isotrópico y anisotrópico:
- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);
- La influencia de la zona no saturada es mínima y por lo tanto se puede despreciar

Método de Boulton (1963):

- El acuífero es isotrópico y anisotrópico:
- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);

Método de Thiem-Dupuit (1906):

- El Flujo hacia el pozo no es dependiente del tiempo (estado estacionario);
- El flujo es horizontal y uniforme en cualquier sección vertical a lo largo del eje del pozo;

### 2.7.2 Métodos para acuífero confinados

Estos métodos aplican cuando se considera un flujo estable y transitorio, el acuífero es de extensión infinita, homogéneo, isótropo, de espesor uniforme, antes del bombeo la superficie piezométrica es horizontal, el caudal extraído es constante, el diámetro del pozo es pequeño y las pérdidas de carga son despreciables.

Los métodos para evaluar pruebas de bombeo en un acuífero confinado consideran, además de las hipótesis básicas, las siguientes hipótesis complementarias:

- El acuífero es confinado;
- Antes del bombeo, la superficie piezométrica es horizontal (o casi lo es) sobre el área de influencia de la prueba;
- El acuífero es homogéneo, isotrópico y tiene un espesor uniforme sobre el área de influencia de la prueba;
- El pozo penetra completamente el espesor del acuífero y recibe agua por flujo horizontal.

Adicionalmente, para condiciones de flujo transitorio:

- El agua extraída del almacenamiento del acuífero es descarga instantáneamente al declinar la carga hidráulica;
- El diámetro del pozo es pequeño y por lo tanto el almacenamiento en el mismo se puede despreciar.

En la Tabla 3 se presentan los métodos más comúnmente utilizados en la práctica profesional para interpretar pruebas de bombeo realizadas en acuíferos de tipo confinado:

**Tabla 3:** Métodos para interpretar pruebas de bombeo en acuíferos confinados.

Método	Ecuación	Estado de Flujo	Observaciones
THIEM (1906)	$Q = \frac{2\pi T(h_2 - h_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$ <p>Ecuación 2.11</p>	Estacionario	Cálculo
THEIS (1935)	$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) \int_u^\infty e^{-y} \frac{dy}{y}$ <p>Ecuación 2.12</p>	Transitorio	Ajuste de curva
COOPER – JACOB (1946)	$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) \left(-.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{4} + \frac{u^3}{18} - \dots\right. \\ \left. + (-1)^n \left(\frac{u^n}{n \cdot n!}\right)\right)$ <p>Ecuación 2.13</p>	Transitorio	Ajuste línea recta
CHOW (1952)	$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) (W(u))$ <p>Ecuación 2.14</p>	Transitorio	Ajuste de curva

Además de las hipótesis básicas y las complementarias pueden existir otras específicas que corresponden a cada método y que enlistan a continuación:

Método de Thiem (1906):

- El Flujo hacia el pozo no es dependiente del tiempo (estado estacionario);

Método de Theis (1935):

- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);

Método de Cooper-Jacob /1946):

- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);

Método de Chow (1952):

- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);

### 2.7.3 Métodos para acuífero semiconfinados

Cuando un acuífero semiconfinado es sometido a un bombeo, el agua extraída además de provenir del acuífero también proviene de la capa suprayacente. Como resultado del bombeo, el nivel piezométrico del acuífero desciende, creando una carga hidráulica entre el acuífero y la capa semipermeable, generando así que el agua del acuitardo se mueva hacia abajo, por lo tanto, el caudal que fluye del acuitardo hacia el acuífero es directamente proporcional a la diferencia de carga hidráulica entre el nivel freático del acuitardo y el piezómetro del acuífero semiconfinado e inversamente proporcional a la resistencia hidráulica de la capa semipermeable.

Los métodos para evaluar pruebas de bombeo en un acuífero confinado consideran, además de las hipótesis básicas, las siguientes hipótesis complementarias:

- El acuífero es semiconfinado;
- El acuitardo al igual que el acuífero se consideran como si tuvieran un área infinita
- El acuífero y el acuitardo son homogéneos, isotrópicos y tienen un espesor uniforme sobre el área de influencia de la prueba;
- Antes del bombeo, la superficie piezométrica es horizontal sobre el área de influencia de la prueba;
- El pozo penetra completamente el espesor del acuífero y recibe agua del espesor saturado del acuífero por flujo horizontal:
- El flujo en el acuitardo es vertical;
- El abatimiento en el acuífero sin bombeo (o en el acuitardo si no hay acuífero sin bombeo) es tan pequeño que se puede despreciar.

Adicionalmente, para condiciones de flujo transitorio:

- El agua extraída del almacenamiento del acuífero y el agua proveniente del goteo desde el acuitardo se descarga instantáneamente al declinar la carga hidráulica;

- El diámetro del pozo es pequeño y por lo tanto el almacenamiento en el mismo se puede despreciar.

En la Tabla 4 se presentan los métodos más comúnmente utilizados en la práctica profesional para interpretar pruebas de bombeo realizadas en acuíferos de tipo semiconfinado:

**Tabla 4:** Métodos para interpretar pruebas de bombeo en acuíferos semi confinados.

Método	Ecuación	Flujo	Observaciones
GLEE (1930 y 1951)	$s_m = \left(\frac{Q}{2\pi T}\right) K_0\left(\frac{r}{L}\right)$ Ecuación 2.15	Estable	Flujo acuitado vertical, $L > 3D$ Ajuste de curva
HANTUSH – JACOB (1955)	$s_m = \left(\frac{2.30Q}{2\pi T}\right) \left(\text{Log}1.12\left(\frac{L}{r}\right)\right)$ Ecuación 2.16		Ajuste de línea recta
WALTON (1962)	$s = Q \int_u \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{r^2}{4L^2y}\right) dy$ Ecuación 2.17	Transitorio	T,S y c con similitud razonable Ajuste de curva
HANTUSH (1956)	$s_p = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) \left(K_0\left(\frac{r}{L}\right)\right)$ Ecuación 2.18		Punto de inflexión
HANTUSH III (1960)	$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) W(u, \beta)$ Ecuación 2.19		Ajuste de curva
NEUMAN – WITHERSPOON (1972)	$s_c = \left(\frac{Q}{4\pi KD(W(u, u_c))}\right)$ Ecuación 2.20		Ajuste de curva

Además de las hipótesis básicas y las complementarias pueden existir otras específicas que corresponden a cada método y que enlistan a continuación:

Método de Glee (1930 y 1951):

- El Flujo hacia el pozo no es dependiente del tiempo (estado estacionario);
- El Factor de goteo en metros es mayor a 3 veces el espesor el espesor saturado del acuitado (m)

Método de Hantush-Jacob (1955):

- El Flujo hacia el pozo no es dependiente del tiempo (estado estacionario);
- No se presenta abatimiento significativo en el acuitardo suprayacente, por lo que es menor al 5% de su espesor saturado

Método de Walton (1962):

- El acuífero es incompresible, por lo que los cambios en el almacenamiento en el acuitardo son despreciables
- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);

Método de Hantush (1956):

- El acuífero es incompresible, por lo que los cambios en el almacenamiento en el acuitardo son despreciables
- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);

Método de Hantush III (1960):

- El acuífero es incompresible, por lo que los cambios en el almacenamiento en el acuitardo son despreciables
- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);

Método de Neuman-Witherspoon (1972):

- El acuífero es incompresible, por lo que los cambios en el almacenamiento en el acuitardo son despreciables
- El flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo (estado transitorio);
- La distancia radial desde el pozo de bombea al de observación debe ser menor a 100 m.

## **2.8 Método de Rathod y Rushton**

A diferencia de los métodos convencionales, el método de Rathod y Rushton, también llamado modelo de flujo radial, es un modelo matemático el cual resuelve la ecuación de

flujo radial a un pozo en función de los valores dados de las variables involucradas (Rathod y Rushton, 1991).

El modelo numérico (Rushton y Redshaw, 1978; Rathod y Rushton, 1984 y Rushton, 2003) resuelve la ecuación diferencial que describe el flujo radial de agua en un acuífero, incorporando componentes verticales de flujo:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( bK_r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + \frac{b}{r} \left( K_r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + bk_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = S \frac{\partial s}{\partial t} + q \quad \text{Ec. 2.21}$$

En donde,  $s$ , es el abatimiento;  $r$ , la coordenada radial;  $z$ , la coordenada vertical;  $b$ , es el espesor saturado;  $S$  es el coeficiente almacenamiento;  $K_r$  y  $K_z$ , son la conductividad hidráulica radial (horizontal;  $K_h=K_r$ ) y vertical, respectivamente y;  $q$ , el flujo vertical por unidad de área (recarga vertical).

Cuando en un acuífero de tipo libre existe flujo diferido, se incorpora el índice de retardo de Boulton (1963), en términos de un coeficiente de almacenamiento efectivo (Rushton y Redshaw, 1979). En este caso, el coeficiente de almacenamiento confinado ( $S_s b$ ) aplica al inicio del bombeo y se incrementa hasta el rendimiento específico ( $S_y$ ) con el tiempo; adicionalmente, se incorpora una recarga efectiva que representa el drenaje diferido (Rathod y Rushton, 1991).

El modelo de flujo radial requiere como datos de entrada las distancias medidas en sentido vertical descendentemente desde el nivel estático hacia la interface entre las diferentes capas (hasta dos capas acuíferos y hasta dos capas de baja permeabilidad). Para cada capa permeable, el modelo emplea una malla radial que se incrementa en ciclos logarítmicos, desde el radio de la perforación hasta la frontera externa que se defina. De acuerdo con Rathod y Rushton (1991), cada ciclo de la malla se compone de seis intervalos y en la frontera externa puede operar una condición de flujo nulo o de abatimiento nulo, según se elija. También los intervalos de tiempo en los cuales el modelo calcula el abatimiento se incrementan en forma logarítmica, usando diez intervalos por cada ciclo.

El cálculo de abatimientos se realiza en la superficie freática y a la cuarta parte del espesor saturado por arriba de la base del acuífero. El modelo emplea el método de diferencias finitas para el planteamiento de ecuaciones simultáneas en cada nodo (Rushton y Redshaw, 1978), las cuales se resuelven mediante métodos matriciales.

Dicho lo anterior se partirá de lo más simple, incorporando otras variables o incluso más de una capa, si es que la prueba por interpretar así lo requiere. Es importante mencionar que el valor obtenido de la prueba de bombeo es un valor representativo, el cual puede considerarse un valor medio para los diferentes estratos contenidos en el corte litológico.

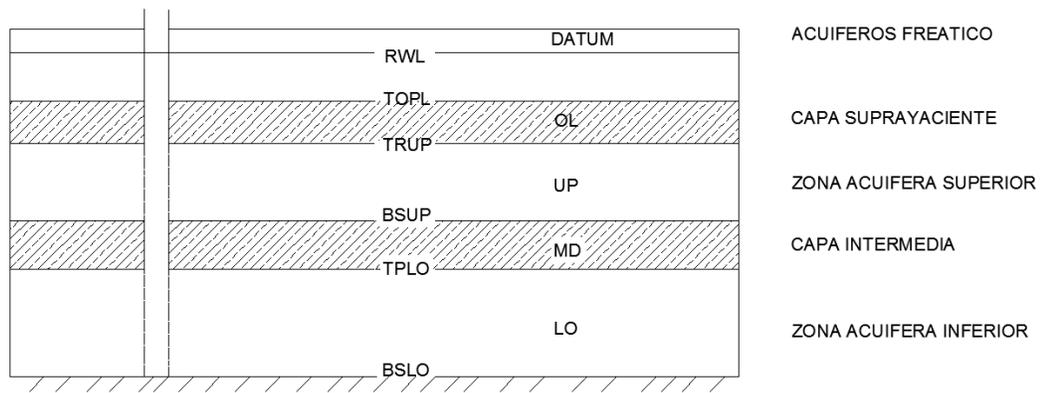
La obtención del coeficiente de almacenamiento es de gran importancia, el cual no se pretende obtener en el presente trabajo, ya que de acuerdo con la teoría (Kruseman y De Ridder, 2000), se necesita de pozo de observación para la obtención del mismo. Cuando no se tiene el pozo de observación, se incumplen las hipótesis de los métodos actuales, considerando lo anterior, algunos autores comentan (Walton, 1970) que se podrían omitir algunas hipótesis para el cálculo de la transmisividad, pero no para el coeficiente de almacenamiento.

El método de Rathod y Rushton tiene un problema de no unicidad, esto debido a la gran cantidad de variables que analiza, esto significa que se pueden tener varios escenarios de posibles respuestas factibles (Silva-Hidalgo, 2004). Cuando se cuenta sólo con los registros de campo de la etapa de abatimiento, el rango de valores de la posible solución puede ser llegar a ser amplio y cuando se cuenta con la recuperación, este rango se reduce considerablemente.

Obtener los valores de recuperación es un costo muy bajo en comparación con los de los abatimientos y puede ser de gran relevancia para poder dar información de la calibración del acuífero. Es de gran importancia trabajar en este tema ya que se están interpretando pruebas de bombeo sin pozo de observación en países como Estados Unidos, obtener resultados representativos sería un gran avance en el tema.

Cuando no hay pozo de observación, para acuíferos confinados, con flujos en estado no estacionario, Theis, (1935) y Jacob, (1944) presentan metodologías que aplican para cuando no se tiene un pozo de observación. Theis (1935) desarrolló una fórmula en la que la pérdida de carga hidráulica multiplicada por el almacenamiento y sumándole el área de influencia iguala a la descarga (Kruseman y De Ridder, 1976), la condición que se tiene que cumplir es que el cambio en el nivel del agua no puede ser despreciado y la carga hidráulica no es constante con el tiempo. El método de Jacob está basado en el método de Theis.

La configuración del modelo puede contener una capa suprayacente e intermedia y zonas acuíferas inferiores y superiores.

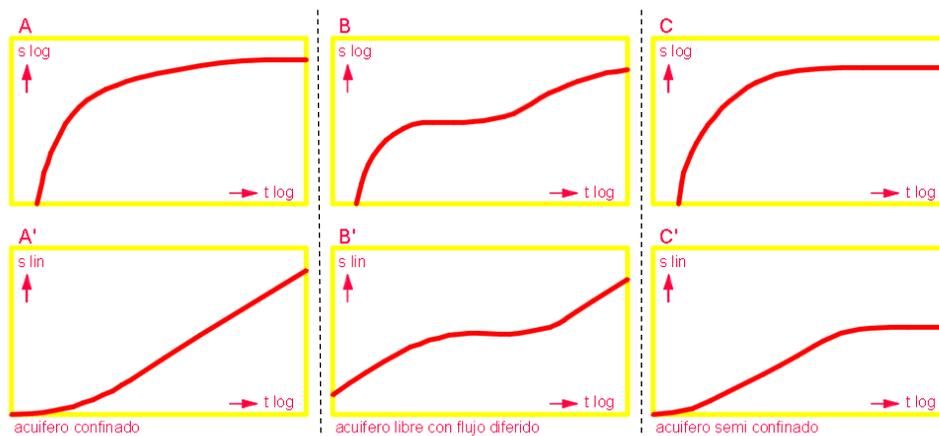


**Figura 1.** Configuración conceptual del modelo de dos capas (modificado de Rathod y Rushton, 1991).

### 3. Interpretación de pruebas de bombeo de larga duración sin pozo de observación

#### 3.1 Análisis de los datos de campo

Los acuíferos están dentro de dos principales categorías: acuíferos consolidados y acuíferos sin consolidar, dentro de ambas categorías, los acuíferos pueden ser confinados, semiconfinados o libres (Kruseman y De Ridder, 2000). Al graficar el abatimiento en el pozo contra el tiempo, se obtiene una gráfica, la cual cuenta con diferentes características, la curva que se forma tiende a tener una geometría dada para acuíferos confinados, acuíferos libres y acuíferos semiconfinados, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2:** Curvas semi logarítmicas y curvas logarítmicas de las relaciones teóricas de tiempo-abatimiento de acuíferos no consolidados (Kruseman y De Ridder, 1979).

### **3.2 Interpretación por métodos convencionales**

En este trabajo se interpretaron 9 pruebas de bombeo. Inicialmente se realizó el análisis gráfico, es decir, se compararon los datos de la prueba de bombeo con las curva tipo con la finalidad de definir el tipo de acuífero, lo que se corroboró con los cortes litológicos cuando estos estuvieron disponibles (Anexo A). De la totalidad de pruebas de bombeo, se logró definir que el pozo CM8 es de tipo semiconfinado mientras que el resto de tipo libre.

Considerando las hipótesis básicas para interpretar pruebas de bombeo en acuíferos de tipo libre y semiconfinados cuando no se dispone de pozo de observación, se definió emplear el método de Jacob-Cooper para interpretar los datos de abatimiento, mientras que el método de recuperación de Theis fue utilizado para los datos de recuperación.

En la tabla 5, se presentan a manera de resumen los datos básicos de cada una de las pruebas de bombeo, así como los resultados que se obtuvieron al interpretarlas por los métodos convencionales referidos en el párrafo anterior.

En los apartados subsecuentes, se presenta la interpretación por método convencional de cada una de las pruebas de bombeo.

**Tabla 5:** Datos básicos de las pruebas de bombeo interpretadas.

Pozo	Tipo de Acuífero	Etapa de Abatimiento (h)	Etapa de Recuperación (h)	Caudal Promedio (lps)	Espesor Saturado b (m)	Transmisividad		Fecha de Ejecución
						Prueba de Abatimiento (m <sup>2</sup> /d)	Prueba de Recuperación (m <sup>2</sup> /d)	
CM4	Libre	79.7	7	58	203	765.43	606.38	1988
CM8	Semi-confinado	63.5	4	55	192.6	2068.61	601.96	1989
J213	Libre	24	12	58.6	130	2250.84	911.76	2000
P216	Libre	24	12	51.64	100	1550.05	726.3	2000
P220	Libre	24	12	60	188	--	1101.48	2000
SN8	Libre	24	12	42.44	172.8	594.11	720.92	2000
TA9	Libre	24	4	34.5	100	739.28	211.61	2000
UNI	Libre	24	3.5	9.2	278.9	25.02	35.73	2000
VASG	Libre	96	16	30.1	383.3	79.01	46.83	1970

### **3.2.1 Interpretación prueba de bombeo pozo Conejos Médanos CM4.**

Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis aplicado a los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 80 horas a un caudal constante de 58 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 7 horas.

De la interpretación de las pruebas se obtuvo un valor de transmisividad de 765.43 m<sup>2</sup>/día para el abatimiento (figura 3) y de 549.57 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 4). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento y la prueba de recuperación es de 28.20%.

### **3.2.2 Interpretación prueba de bombeo pozo Camargo CM8.**

Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis para los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 63.5 horas a un caudal constante de 55 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 4 horas.

De la interpretación de las pruebas se obtuvo un valor de transmisividad de 2,068.61 m<sup>2</sup>/día para el abatimiento (figura 5) y de 601.96 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 6). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento y la prueba de recuperación es de 70.87%.

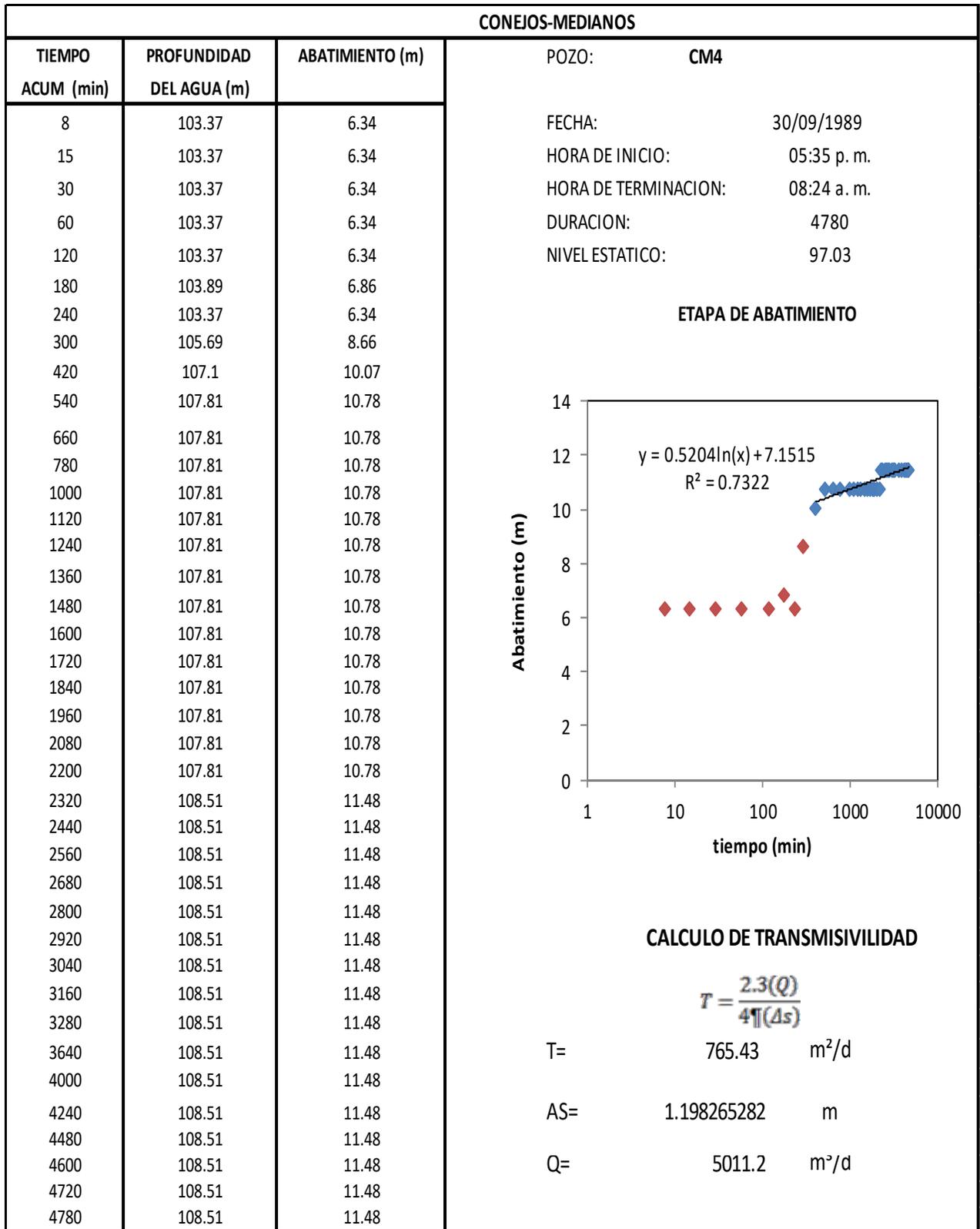
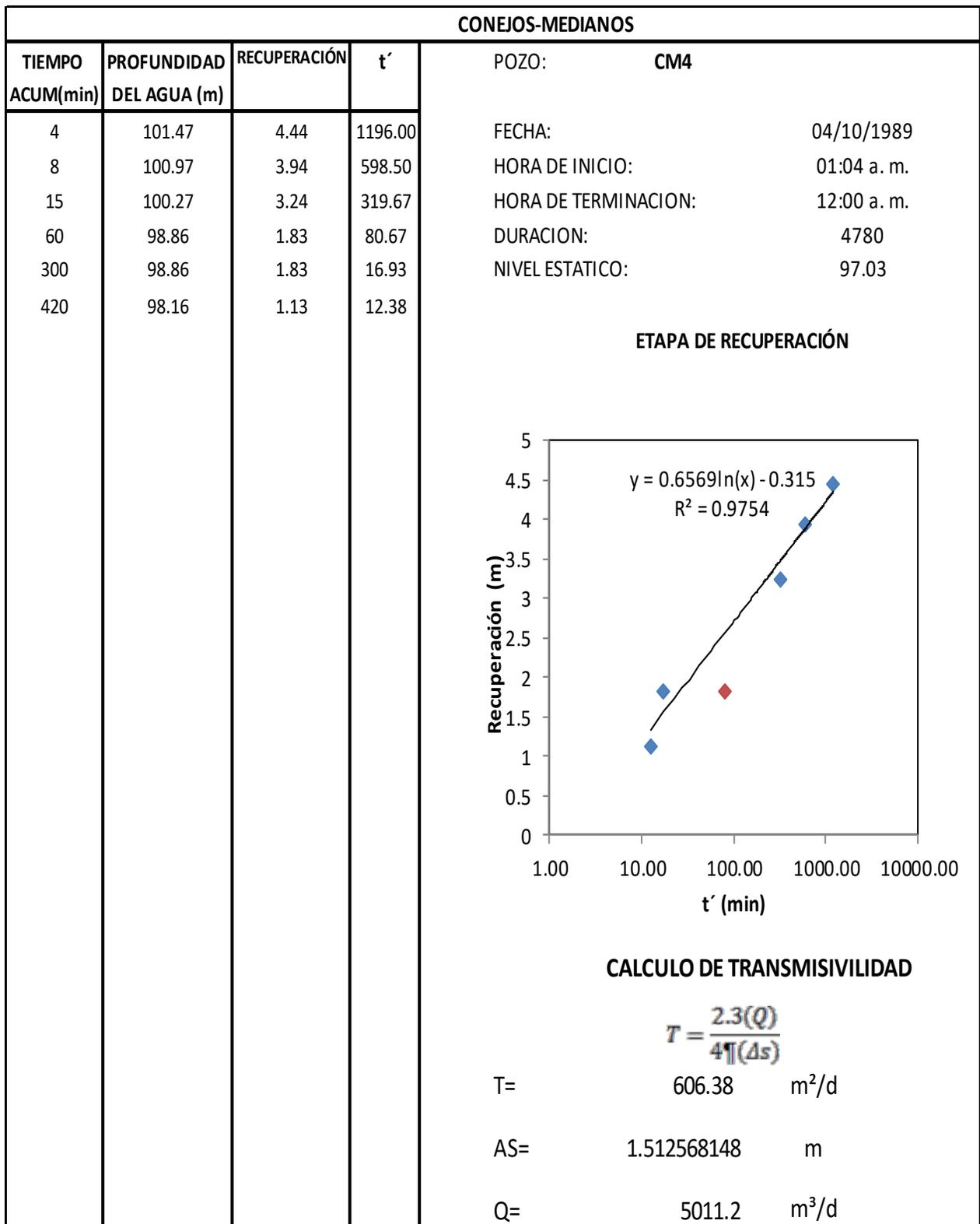
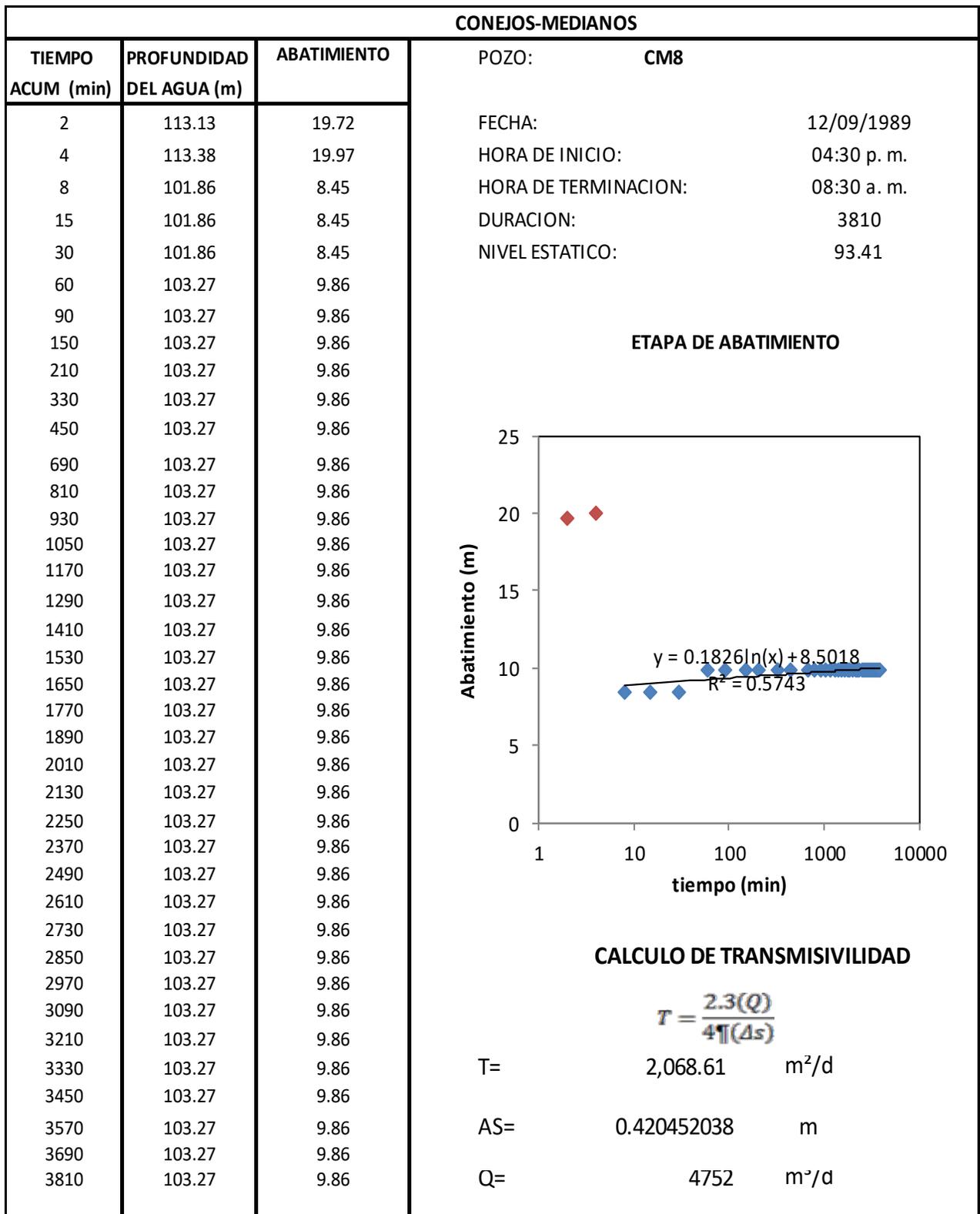


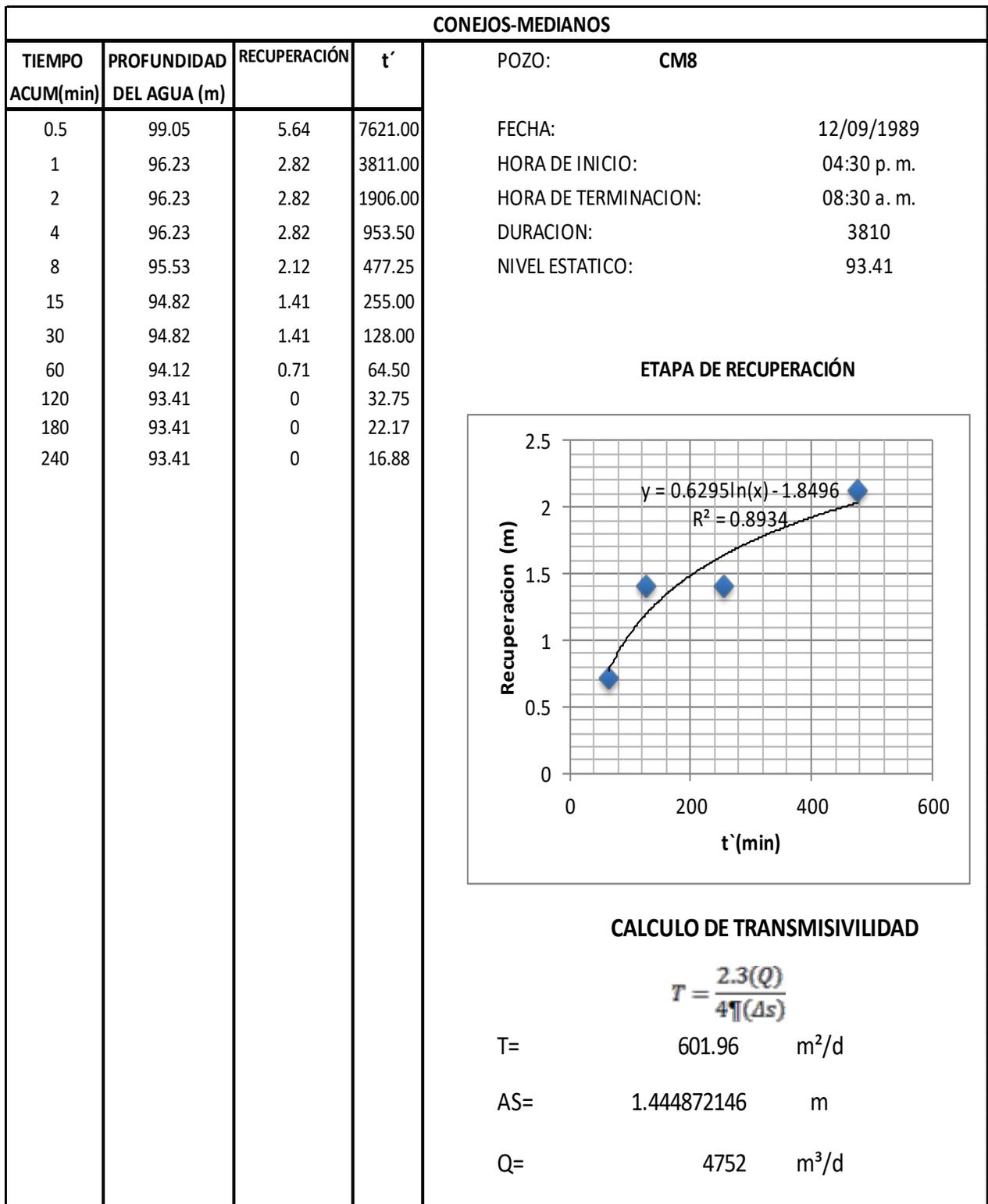
Figura 3. Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos 4, método convencional para abatimiento.



**Figura 4.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos 4, método convencional para recuperación.



**Figura 5.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos 8, método convencional para abatimiento.



**Figura 6.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos 8, método convencional para recuperación.

### **3.2.3 Interpretación prueba de bombeo pozo Conejos Médanos 213.**

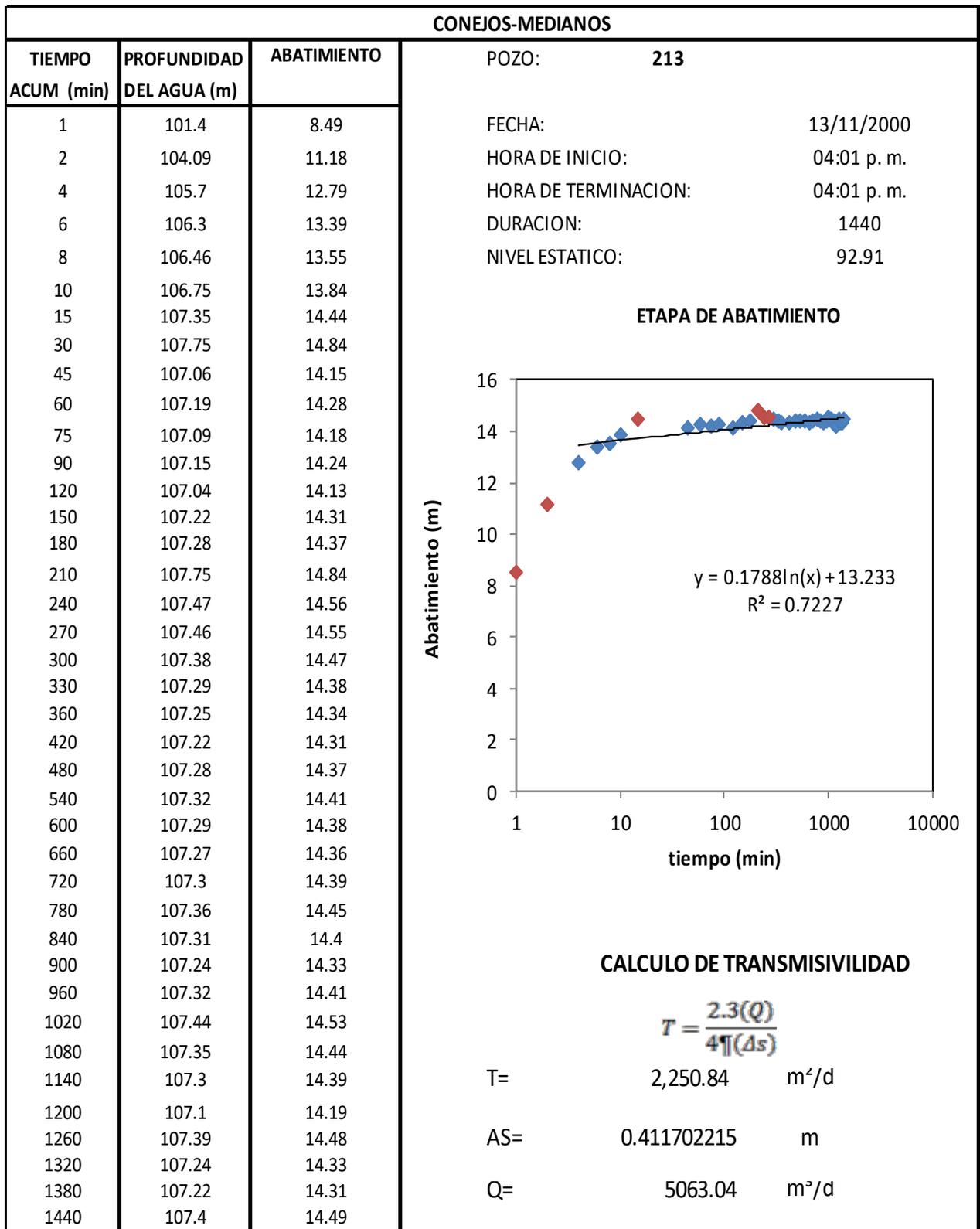
Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis aplicado a los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 24 horas a un caudal constante de 58.6 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 12 horas.

De la interpretación de las pruebas se obtuvo un valor de transmisividad de 2,250.14 m<sup>2</sup>/día para el abatimiento (Figura 7) y de 911.76 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 8). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento y la prueba de recuperación es de 59.47%.

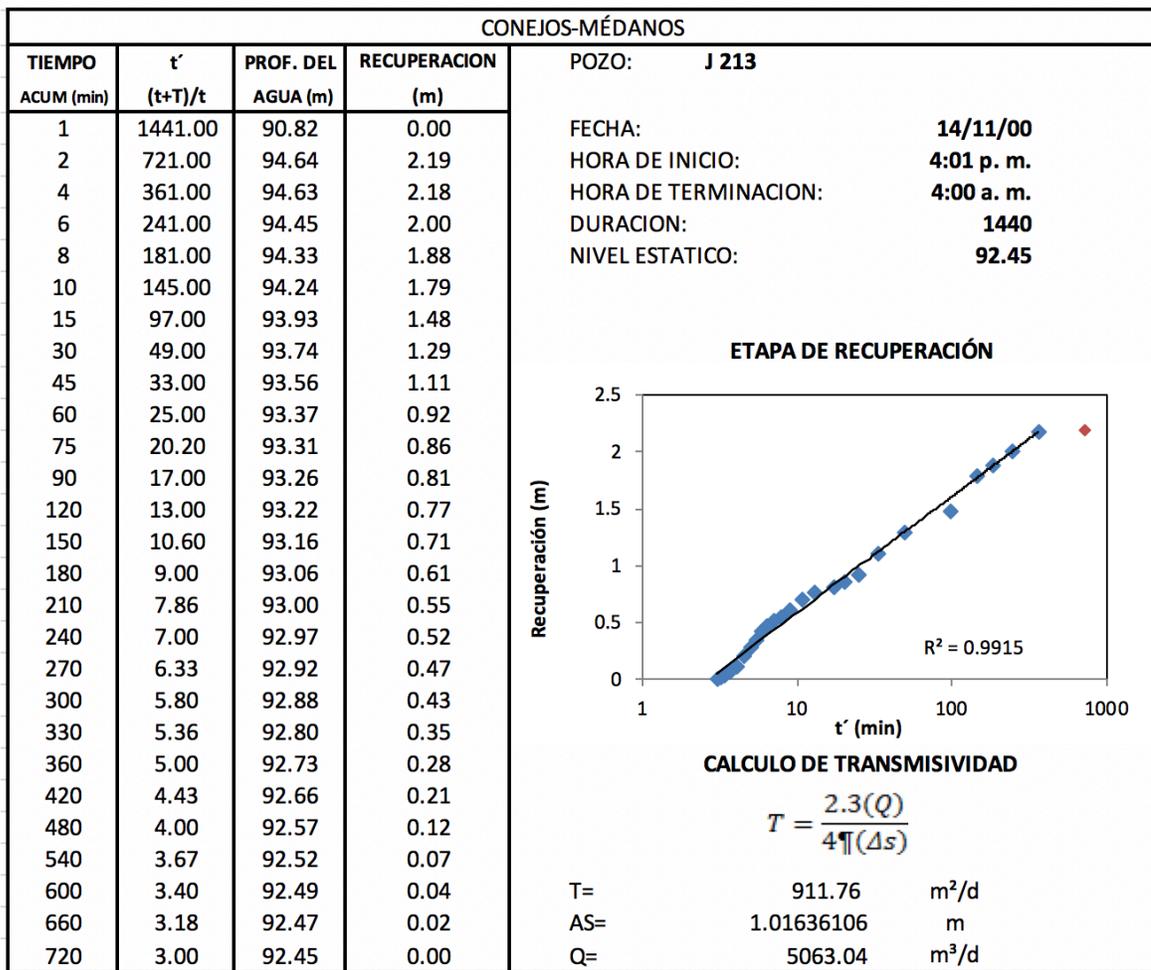
### **3.2.4 Interpretación prueba de bombeo pozo Juárez 216.**

Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis aplicado a los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 24 horas a un caudal constante de 51.6 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 4 horas.

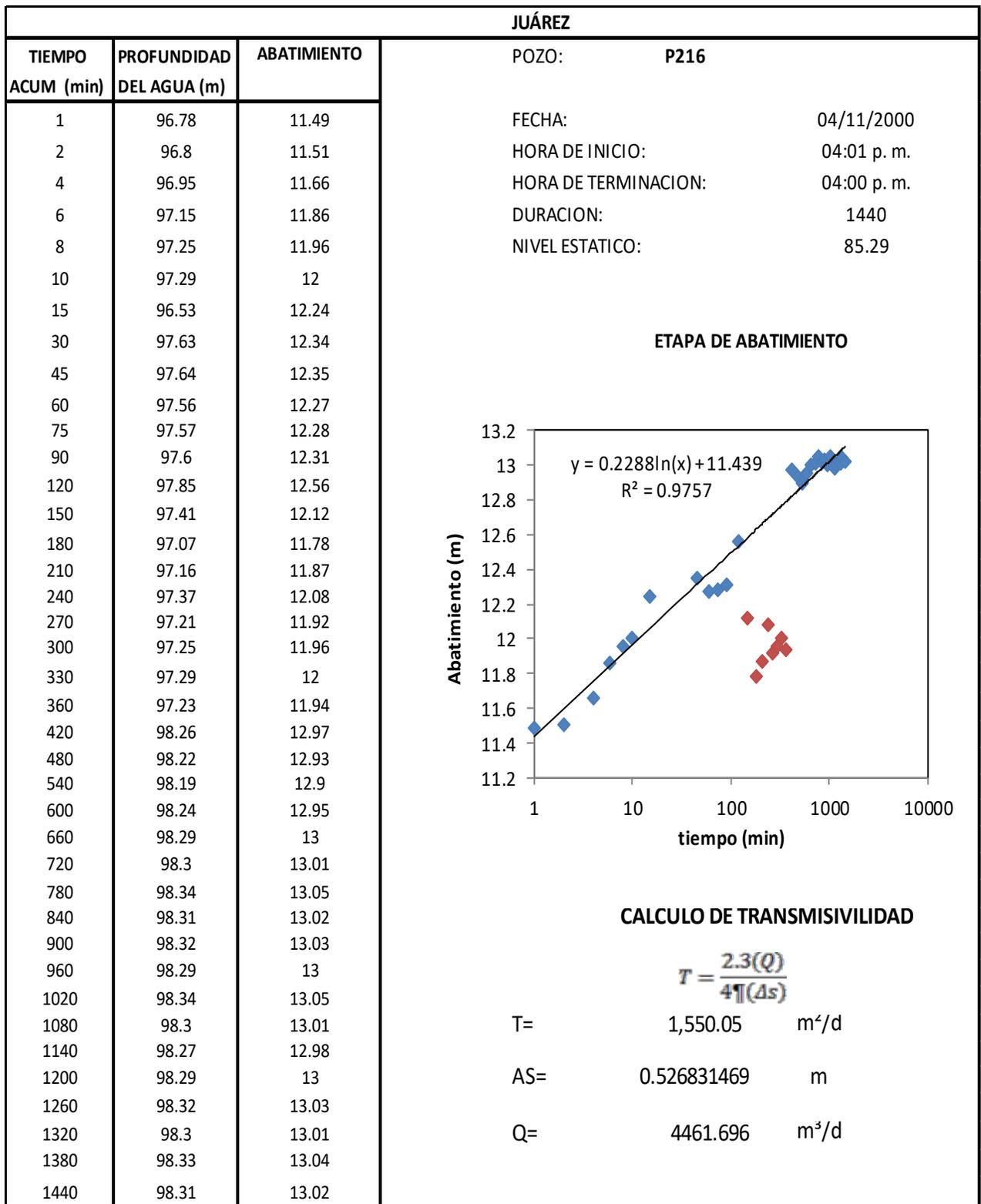
De la interpretación de las pruebas se obtuvo un valor de transmisividad de 1,550.05 m<sup>2</sup>/día para el abatimiento (Figura 9) y de 726.30 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 10). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento y la prueba de recuperación es de 53.14%.



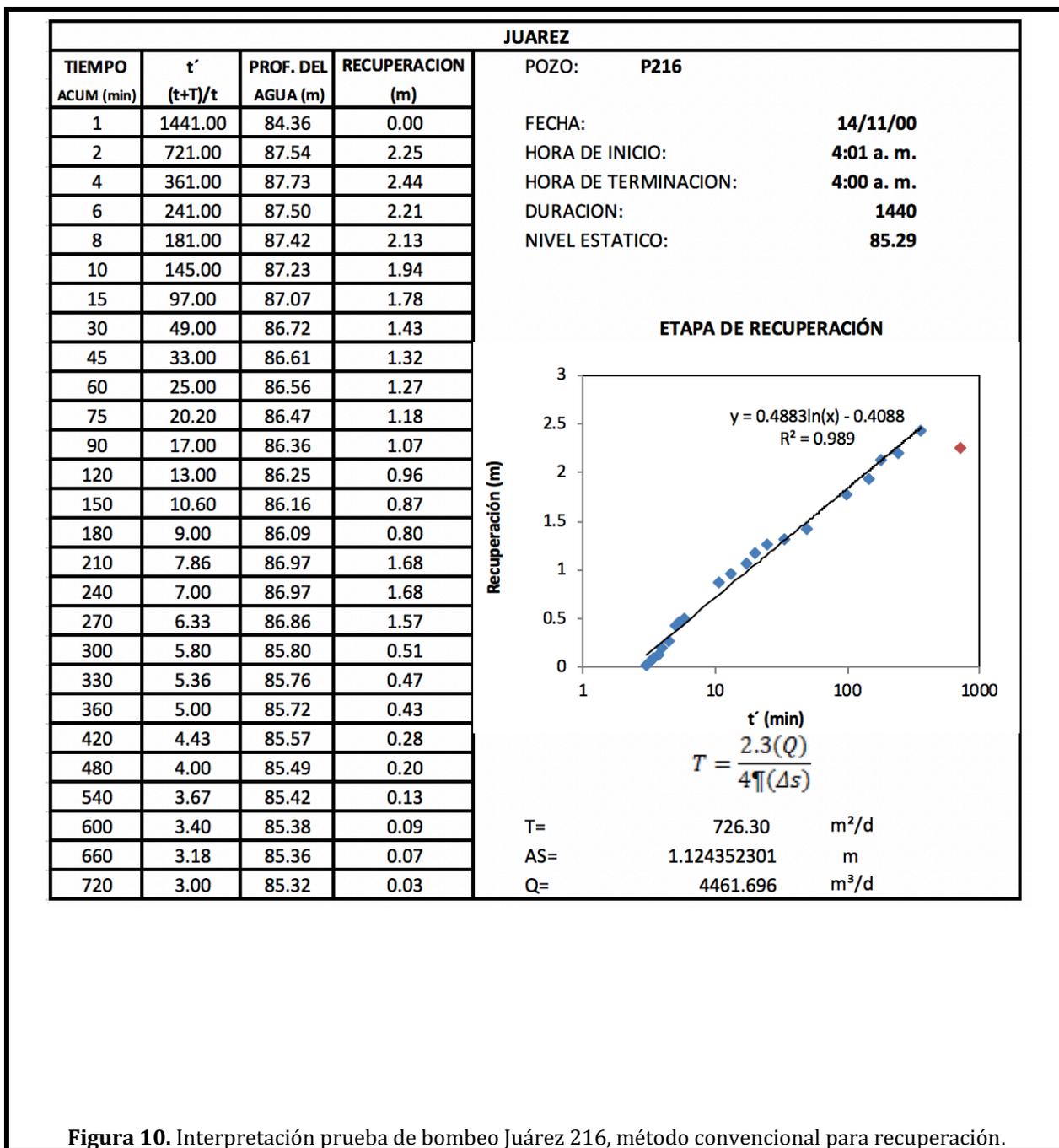
**Figura 7.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos 213, método convencional para abatimiento.



**Figura 8.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos 213, método convencional para recuperación.



**Figura 9.** Interpretación prueba de bombeo Juárez 216, método convencional para abatimiento.



### **3.2.5 Interpretación prueba de bombeo pozo Conejos Médanos 220.**

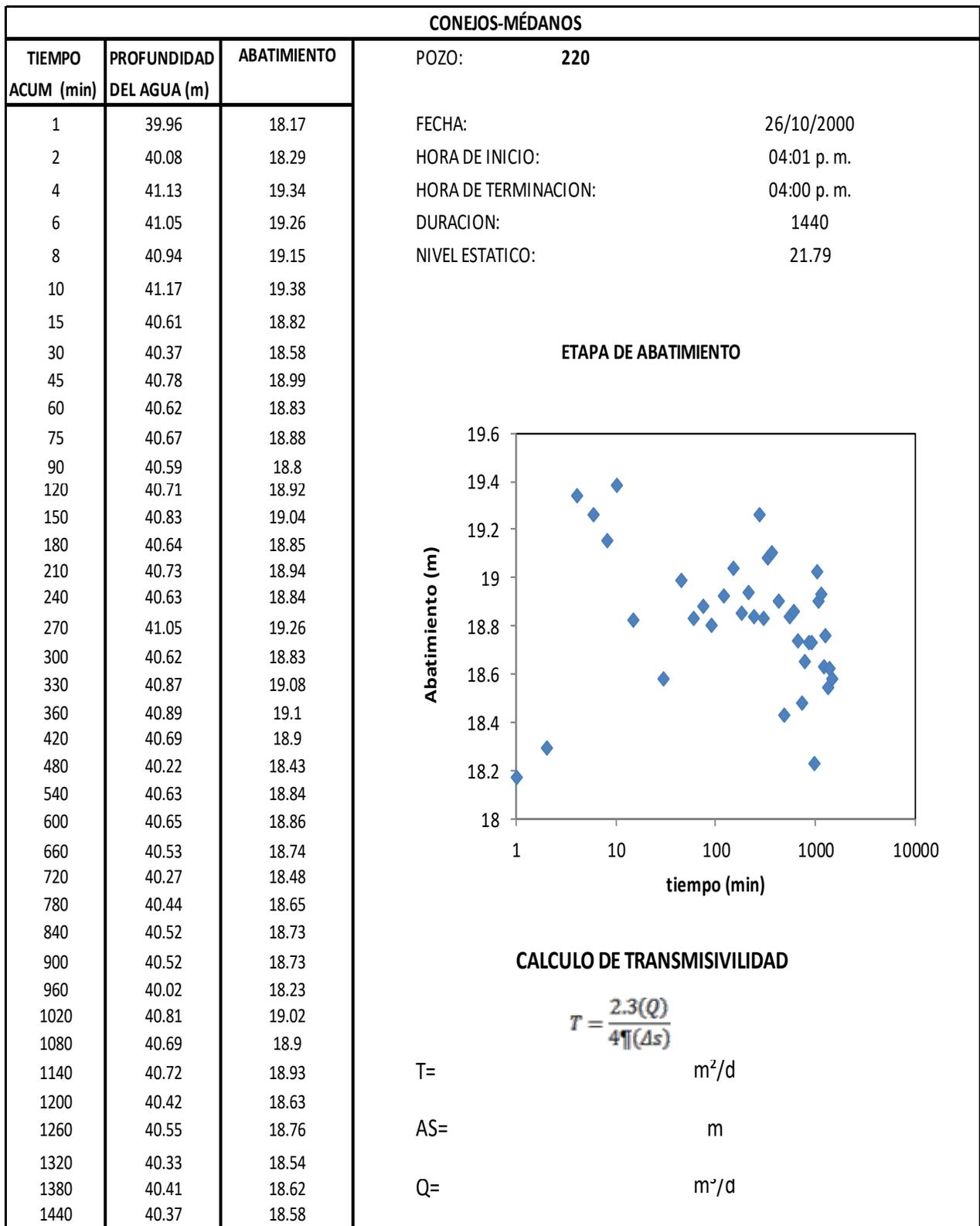
Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis aplicado a los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 24 horas a un caudal constante de 60 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 12 horas.

De la interpretación de las pruebas no se pudo obtener un valor de transmisividad para el abatimiento (Figura 11) y de 1,101.48 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 12). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento no se puede calcular.

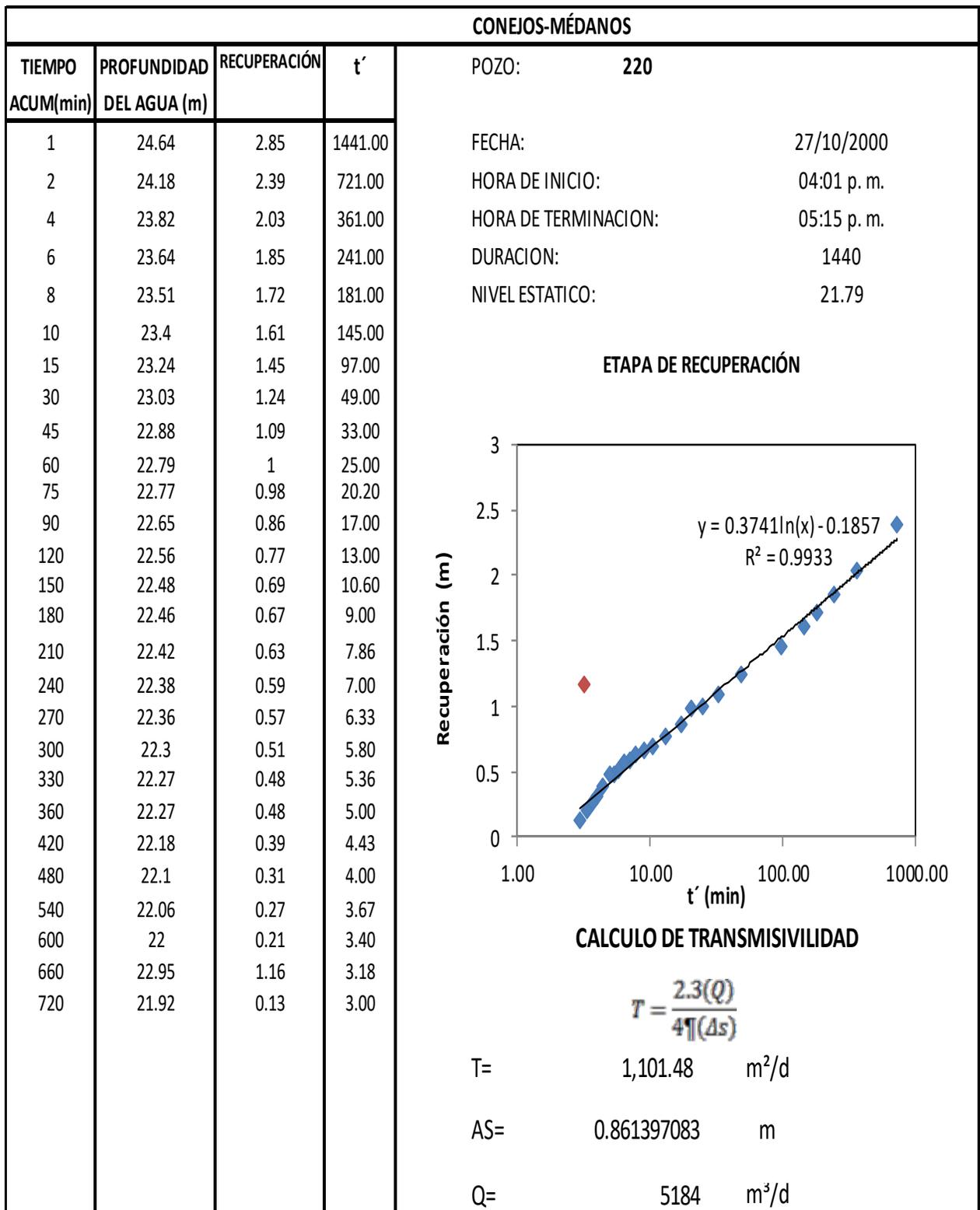
### **3.2.6 Interpretación prueba de bombeo pozo Juárez SN8.**

Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis aplicado a los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 24 horas a un caudal constante de 42.4 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 12 horas.

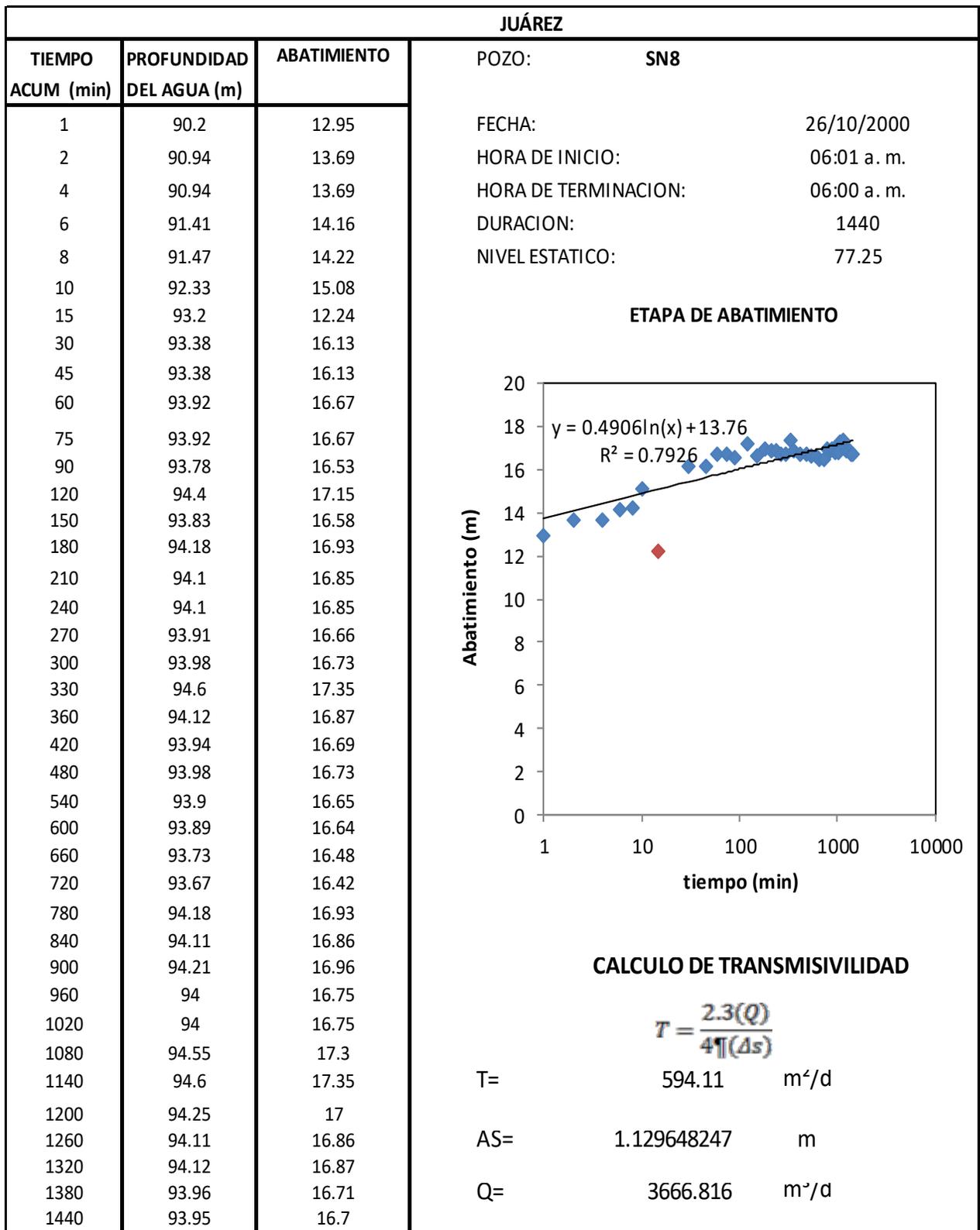
De la interpretación de las pruebas se obtuvo un valor de transmisividad de 594.11 m<sup>2</sup>/día para el abatimiento (Figura 13) y de 720.92 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 14). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento y la prueba de recuperación es de 21.34%.



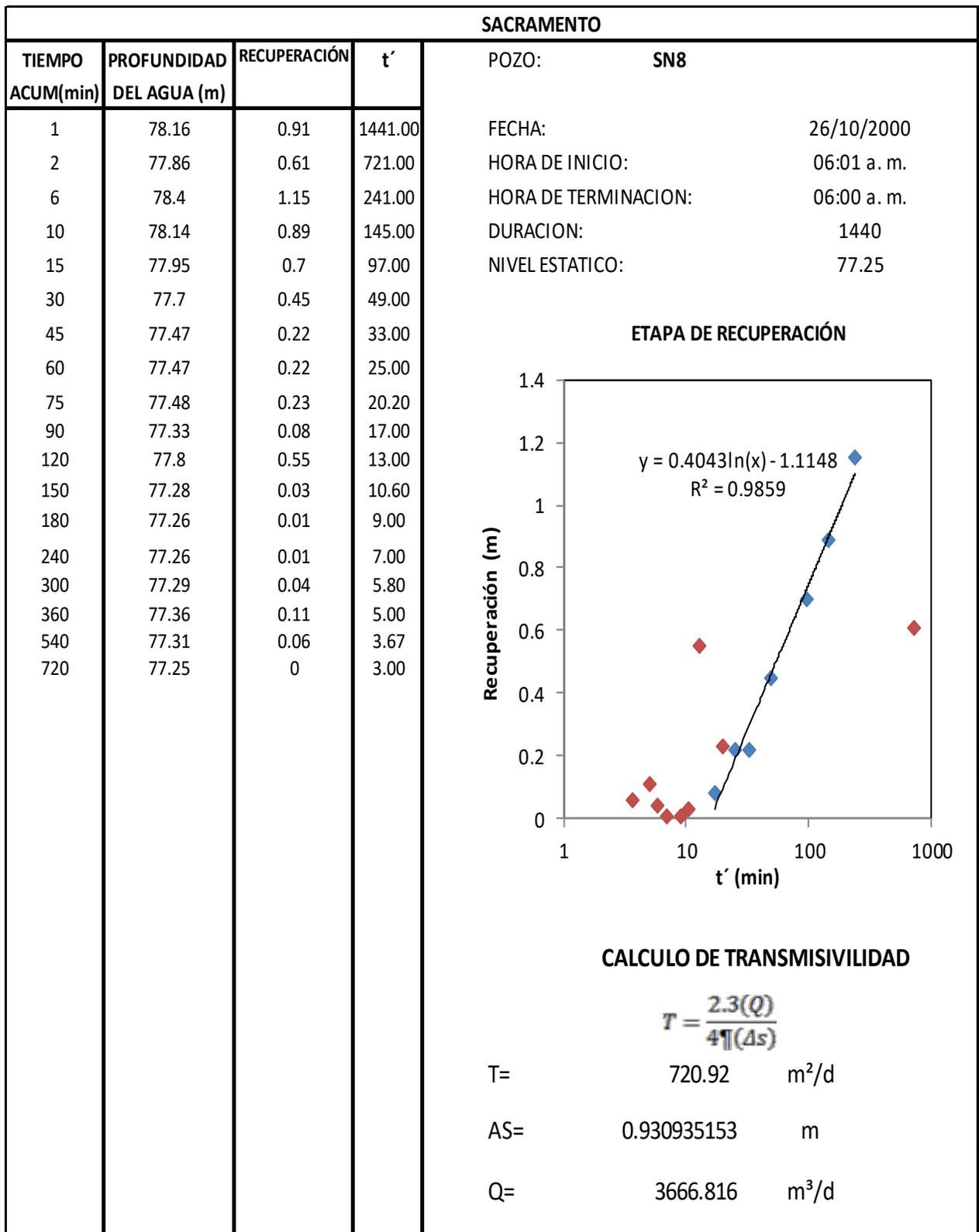
**Figura 11.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos 220, método convencional para abatimiento.



**Figura 12.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos 220, método convencional para recuperación.



**Figura 13.** Interpretación prueba de bombeo Juárez , método convencional para abatimiento.



**Figura 14.** Interpretación prueba de bombeo Sacramento, método convencional para recuperación.

### **3.2.7 Interpretación prueba de bombeo pozo Tabalaopa-Aldama TA9.**

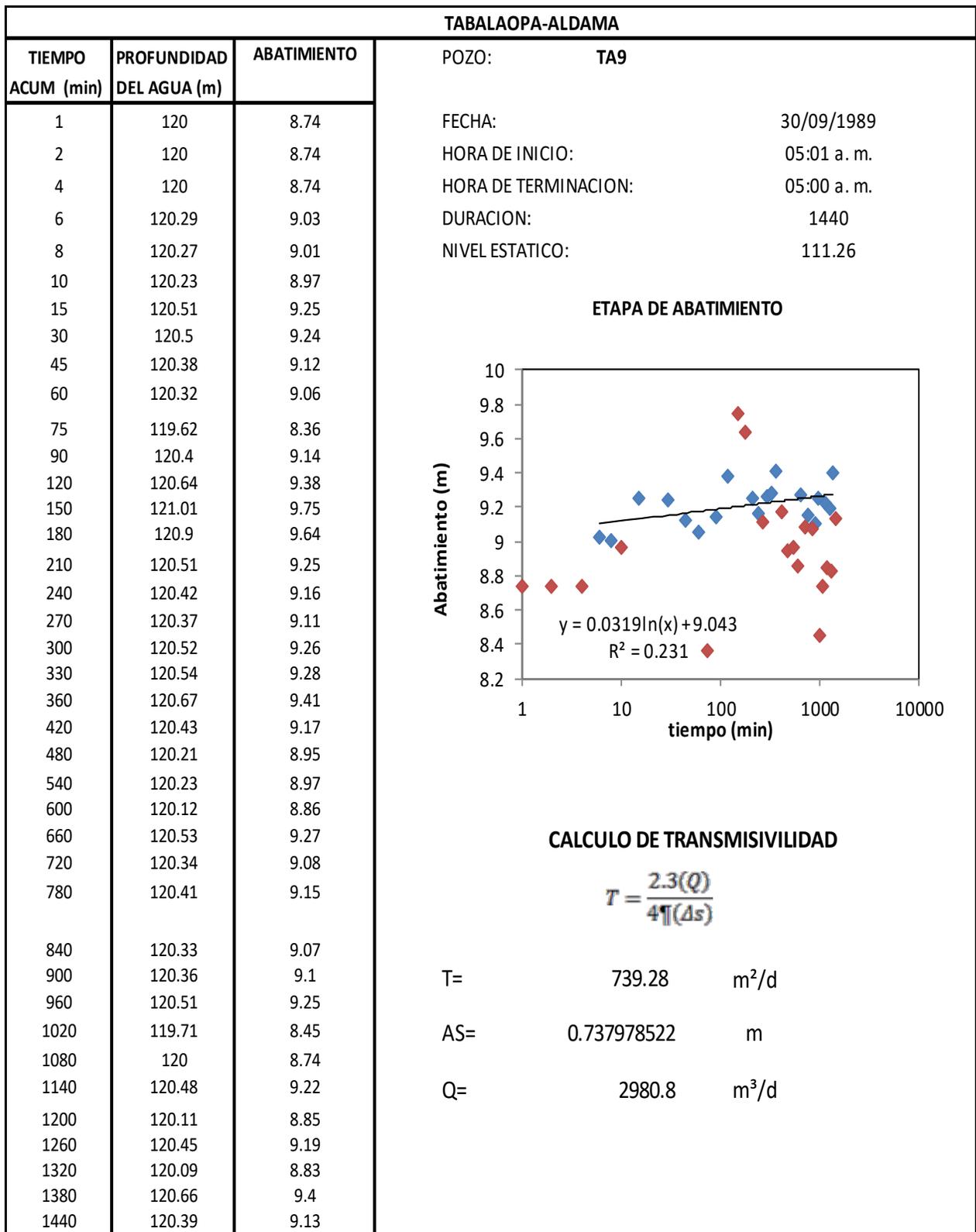
Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis aplicado a los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 24 horas a un caudal constante de 34.5 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 4 horas.

De la interpretación de las pruebas se obtuvo un valor de transmisividad de 739.28 m<sup>2</sup>/día para el abatimiento (Figura 15) y de 211.61 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 16). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento y la prueba de recuperación es de 71.37%.

### **3.2.8 Interpretación prueba de bombeo pozo Chihuahua UNI.**

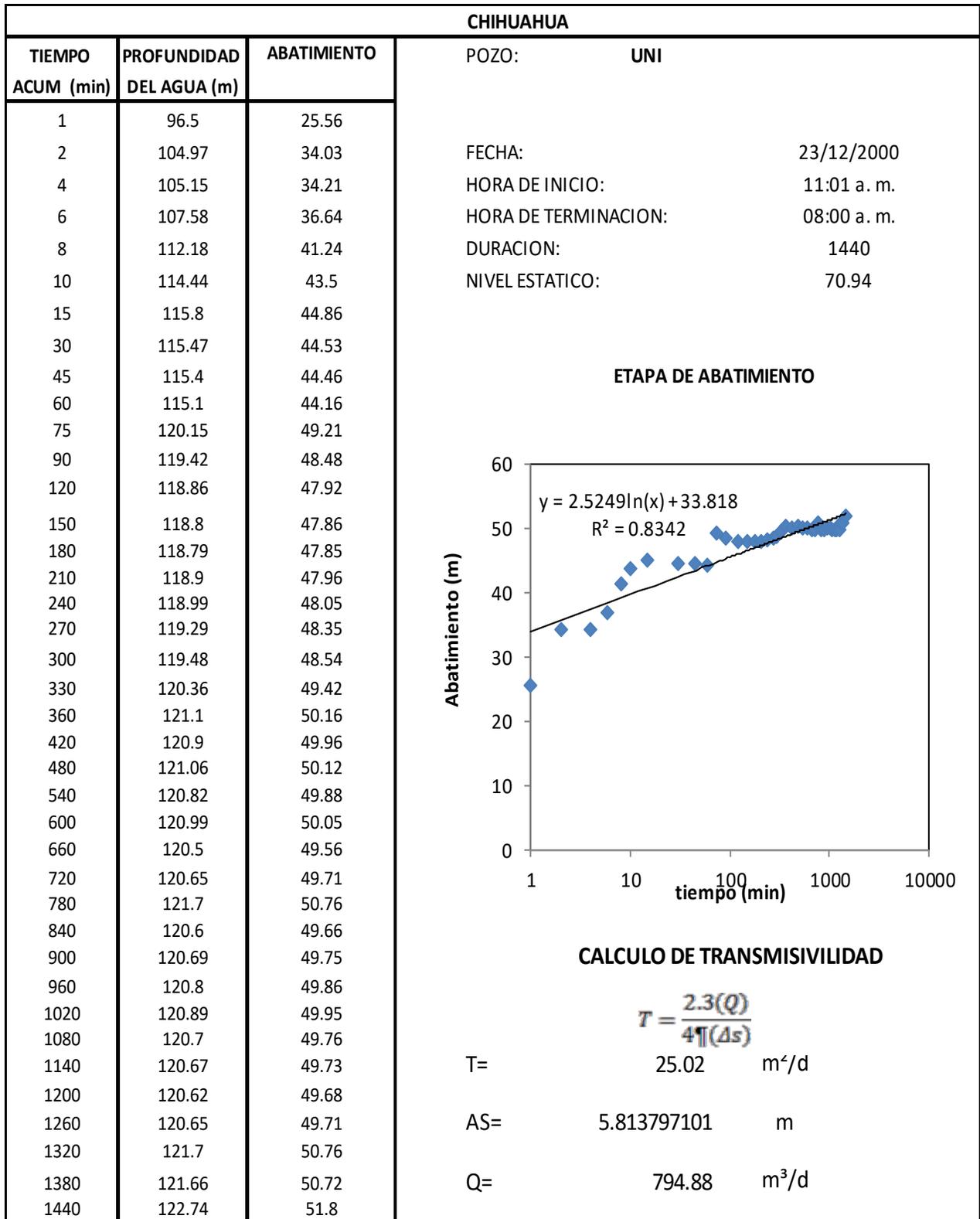
Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis aplicado a los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 24 horas a un caudal constante de 9.2 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 3.5 horas.

De la interpretación de las pruebas se obtuvo un valor de transmisividad de 25.02 m<sup>2</sup>/día para el abatimiento (Figura 17) y de 35.73 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 18). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento y la prueba de recuperación es de 42.80%.



**Figura 15.** Interpretación prueba de bombeo Tabalaopa-Aldama, método convencional para abatimiento.





**Figura 17.** Interpretación prueba de bombeo Chihuahua, método convencional para abatimiento.

CHIHUAHUA			POZO:	UNI
PROFUNDIDAD DEL AGUA (m)	RECUPERACIÓN	t'	FECHA:	23/12/2000
78.42	7.48	1441.00	HORA DE INICIO:	11:01 a. m.
77.6	6.66	721.00	HORA DE TERMINACION:	08:00 a. m.
76.12	5.18	361.00	DURACION:	1440
74.9	3.96	241.00	NIVEL ESTATICO:	70.94
74.07	3.13	181.00		
73.55	2.61	145.00		
72.93	1.99	97.00		
72.53	1.59	49.00		
71.34	0.4	33.00		
71.23	0.29	25.00		
71.16	0.22	20.20		
71.14	0.2	17.00		
71.1	0.16	13.00		
71.06	0.12	10.60		
71.03	0.09	9.00		
70.94	0	7.86		

### ETAPA DE RECUPERACIÓN

### CALCULO DE TRANSMISIVILIDAD

$$T = \frac{2.3(Q)}{4\pi(\Delta s)}$$

T= 35.73 m<sup>2</sup>/d

AS= 4.071430961 m

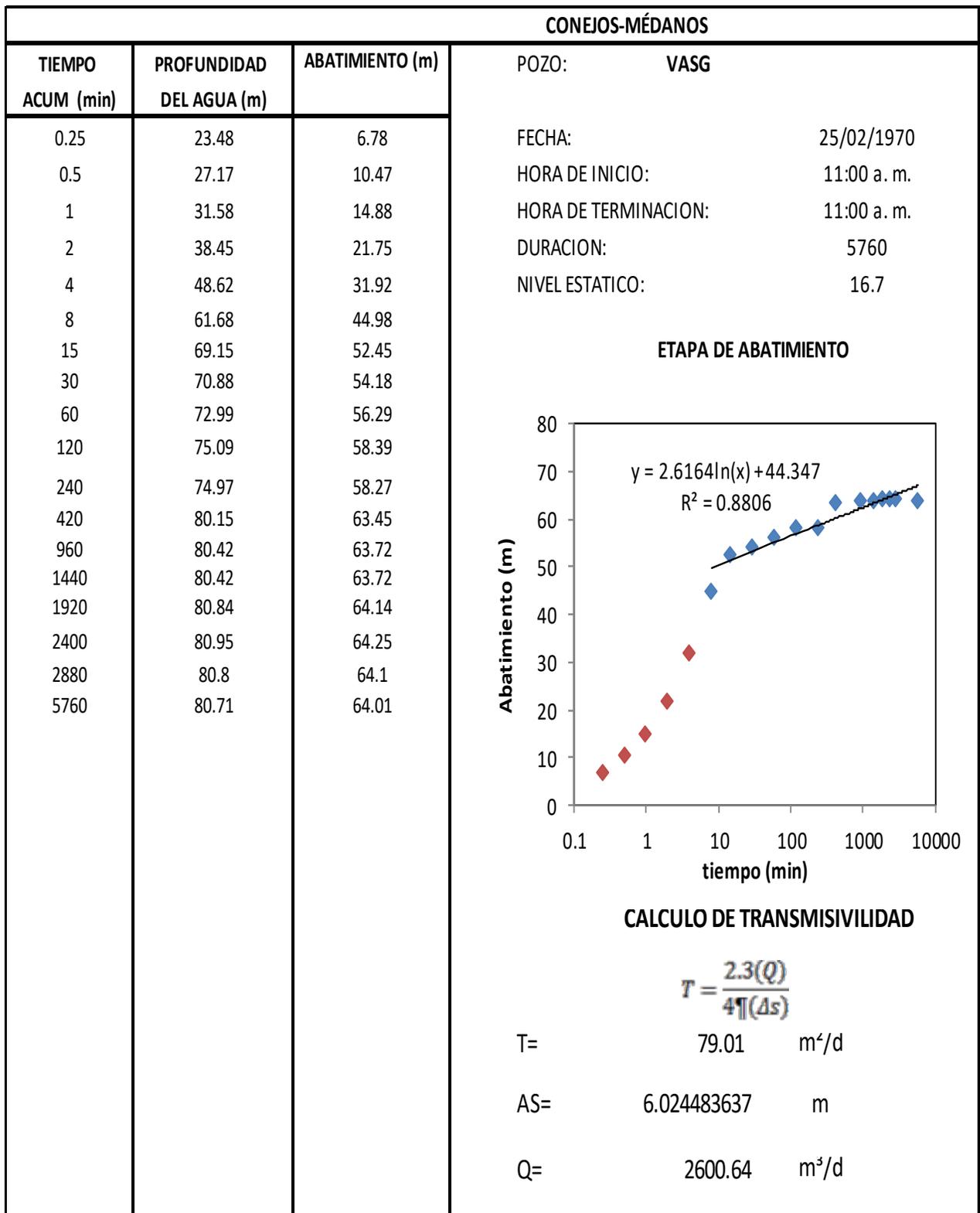
Q= 794.88 m<sup>3</sup>/d

**Figura 18.** Interpretación prueba de bombeo Chihuahua, método convencional para recuperación.

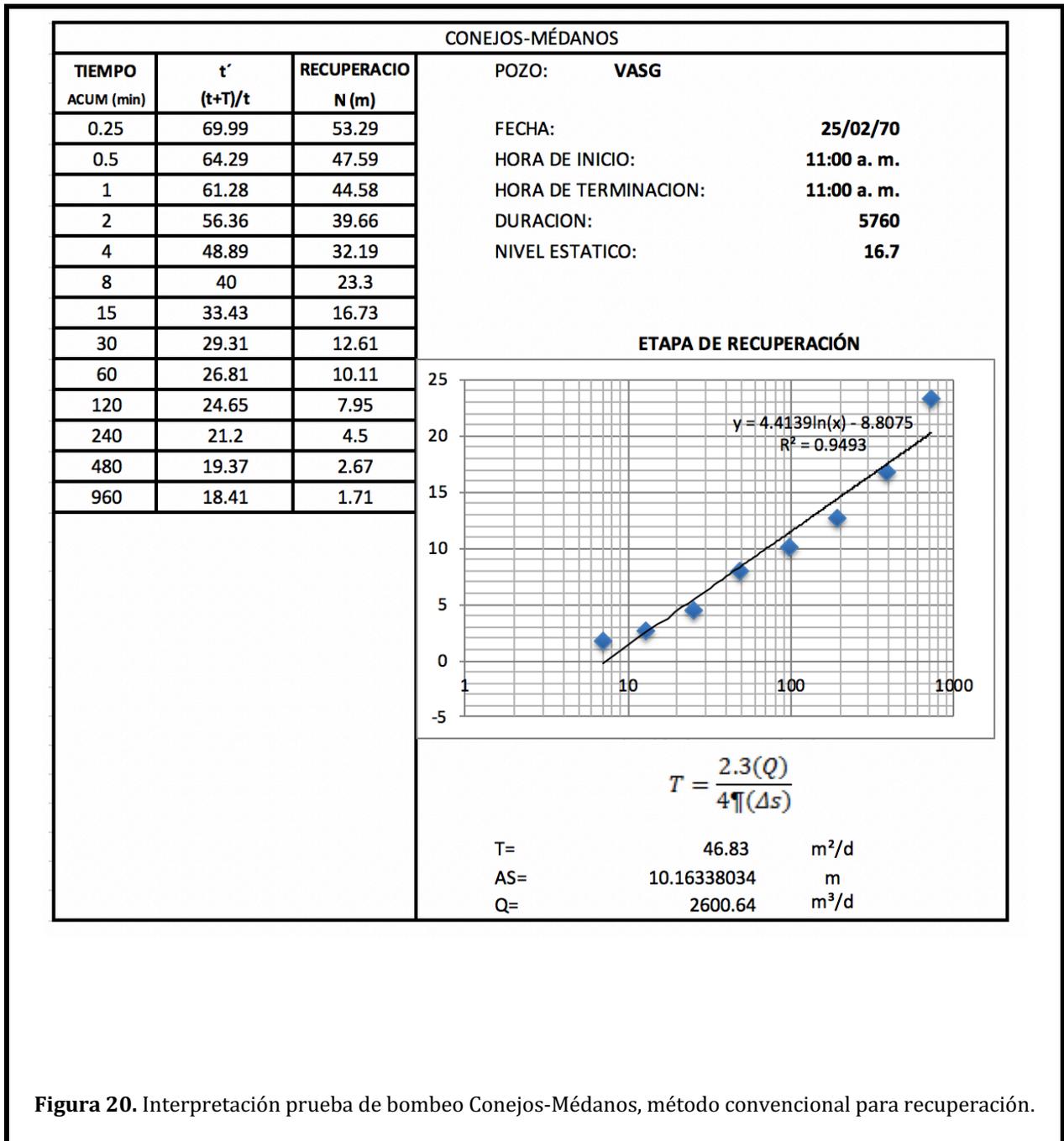
### **3.2.9 Interpretación prueba de bombeo pozo Conejos Médanos VASG.**

Inicialmente se interpretó la prueba de bombeo por el método convencional de Cooper – Jacob, aplicado a los registros de abatimiento y el método de Theis aplicado a los registros de recuperación. La prueba de bombeo duro 96 horas a un caudal constante de 30.1 litros por segundo (lps). La prueba de recuperación tuvo una duración de 16 horas.

De la interpretación de las pruebas se obtuvo un valor de transmisividad de 79.01 m<sup>2</sup>/día para el abatimiento (Figura 19) y de 46.43 m<sup>2</sup>/día para la prueba de recuperación (Figura 20). La diferencia obtenida entre la interpretación de la prueba de abatimiento y la prueba de recuperación es de 41.23%.



**Figura 19.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para abatimiento.



**Figura 20.** Interpretación prueba de bombeo Conejos-Médanos, método convencional para recuperación.

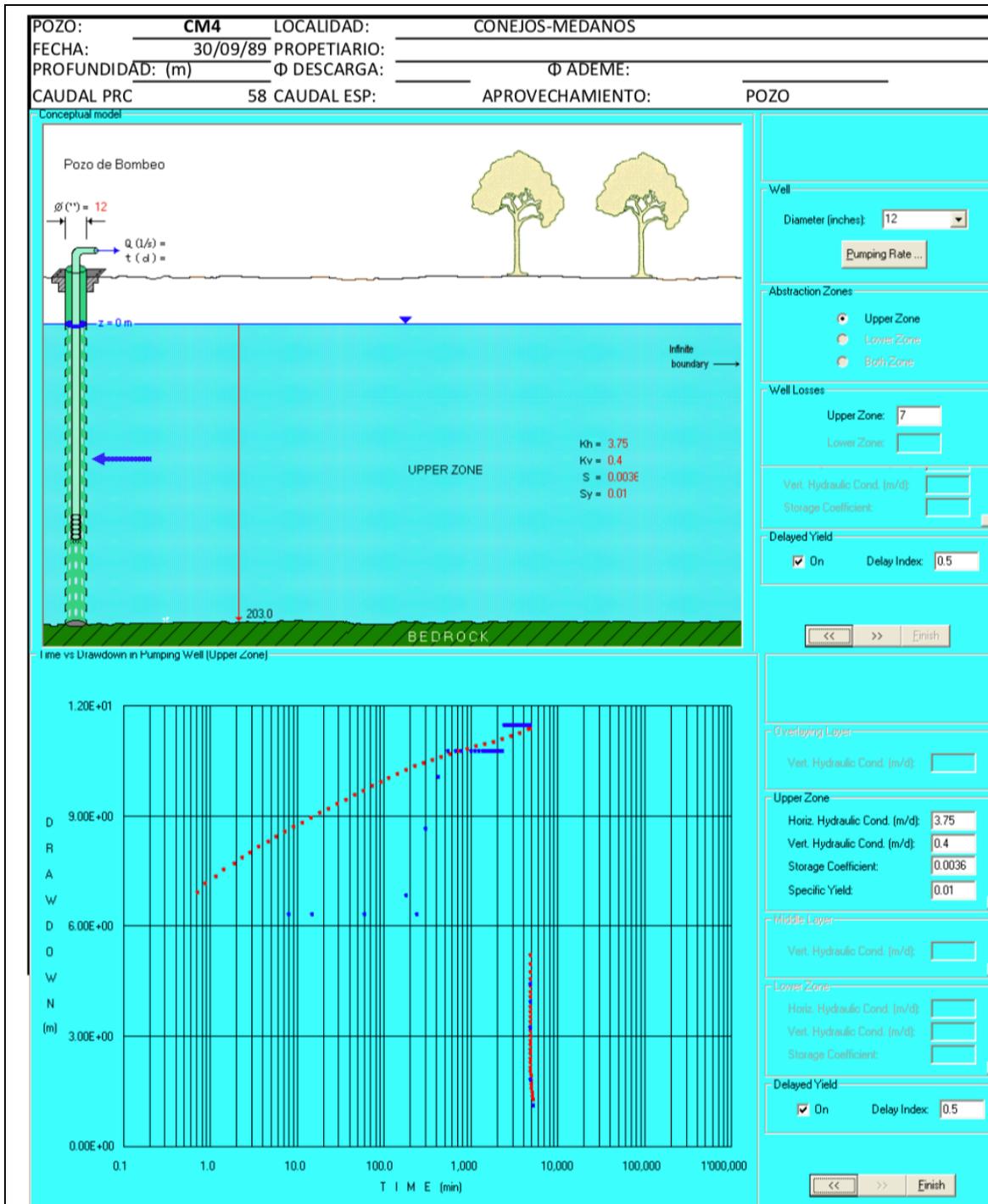
### **3.3 Interpretación por el método de Rathod y Rushton**

Para la comparación de los resultados que se obtienen al interpretar pruebas de bombeo por métodos convencional y por el modelo de Rathod y Rushton, se logró obtener nueve pruebas de bombeo en los archivos de la dirección local de la CNA y de la Junta Central de Agua y Saneamiento, que fueron realizadas en acuíferos del estado de Chihuahua. De las nueve pruebas, una se realizó en acuífero semiconfinado y el resto en acuífero tipo libre.

#### ***3.3.1 Interpretación prueba de bombeo pozo CM4***

La prueba de bombeo realizada en el pozo CM4 empleó una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 21, empleando para ello una sola capa de 203 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 12 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 7. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de 3.75 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 0.4 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.0036 y un rendimiento específico de 0.01. Finalmente se consideró un flujo diferido con un índice de retardo de 0.5.

La conductividad hidráulica horizontal de 3.75 m/día es equivalente a una transmisividad de 761.25 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.



**Figura 21:** Interpretación prueba CM4, Pozo No.4, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez.

### **3.3.2 Interpretación prueba de bombeo pozo CM8**

La prueba de bombeo realizada en el pozo CM8 empleó una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 22, empleando para ello una sola capa de 192.6 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 10 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 1. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de 20 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 2 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.0001 y un rendimiento específico de 0.0001. Finalmente, por la duración de la prueba no fue posible observar flujo diferido.

La conductividad hidráulica horizontal de 20 m/día es equivalente a una transmisividad de 3852 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.

### **3.3.3 Interpretación prueba de bombeo pozo 213**

La prueba de bombeo realizada en el pozo 213 empleo una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 23, empleando para ello una sola capa de 130 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 22 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 22. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de 6.68 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 0.7 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.0002 y un rendimiento específico de 0.01. Finalmente se consideró un flujo diferido con un índice de retardo de 1.5.

La conductividad hidráulica horizontal de 6.68 m/día es equivalente a una transmisividad de 868.4 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.

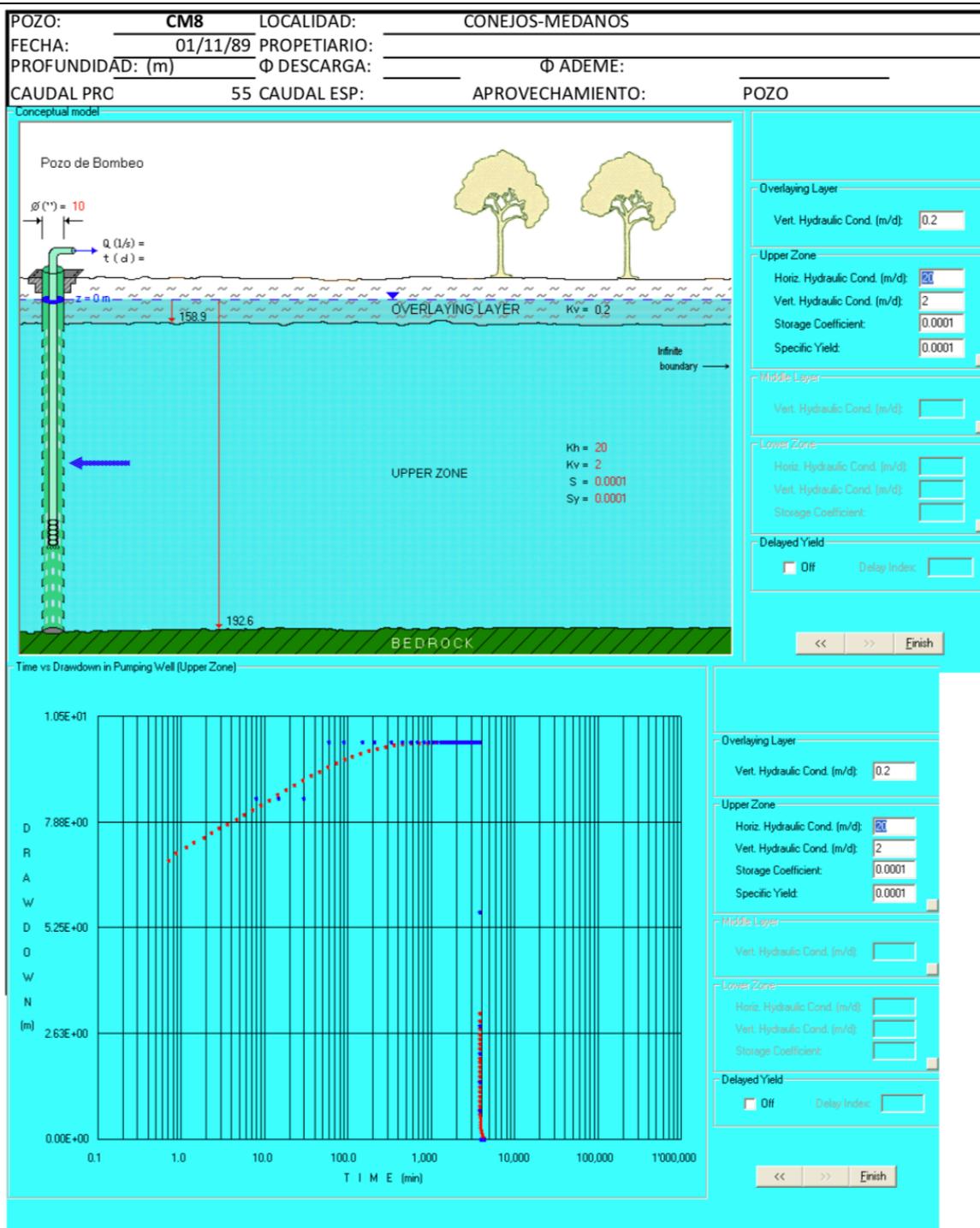


Figura 22: Interpretación prueba CM8, Pozo no.8, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez.



### **3.3.4 Interpretación prueba de bombeo pozo P216**

La prueba de bombeo realizada en el pozo P216 empleó una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 24, empleando para ello una sola capa de 100 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 10 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 16. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de 7.4 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 0.7 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.001 y un rendimiento específico de 0.04. Finalmente se consideró un flujo diferido con un índice de retardo de 2.

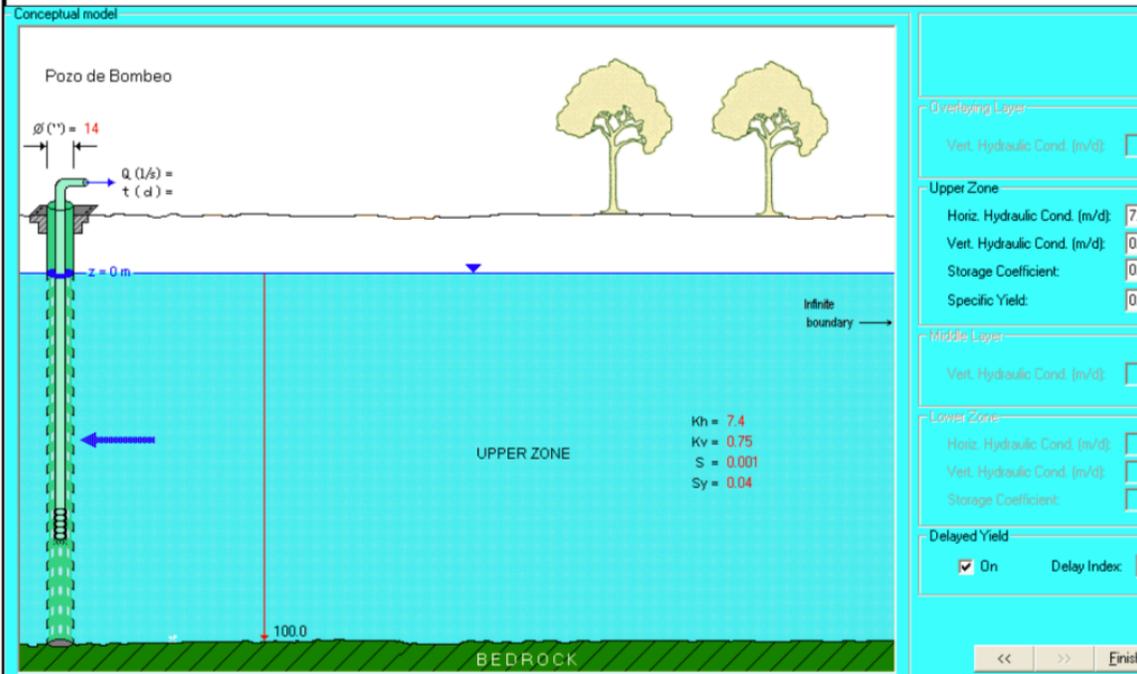
La conductividad hidráulica horizontal de 7.4 m/día es equivalente a una transmisividad de 740 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.

### **3.3.5 Interpretación prueba de bombeo pozo 220**

La prueba de bombeo realizada en el pozo 220 empleó una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 25, empleando para ello una sola capa de 188 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 14 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 34. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de 4.9 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 0.5 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.0002 y un rendimiento específico de 0.01. Finalmente se consideró un flujo diferido con un índice de retardo de 1.

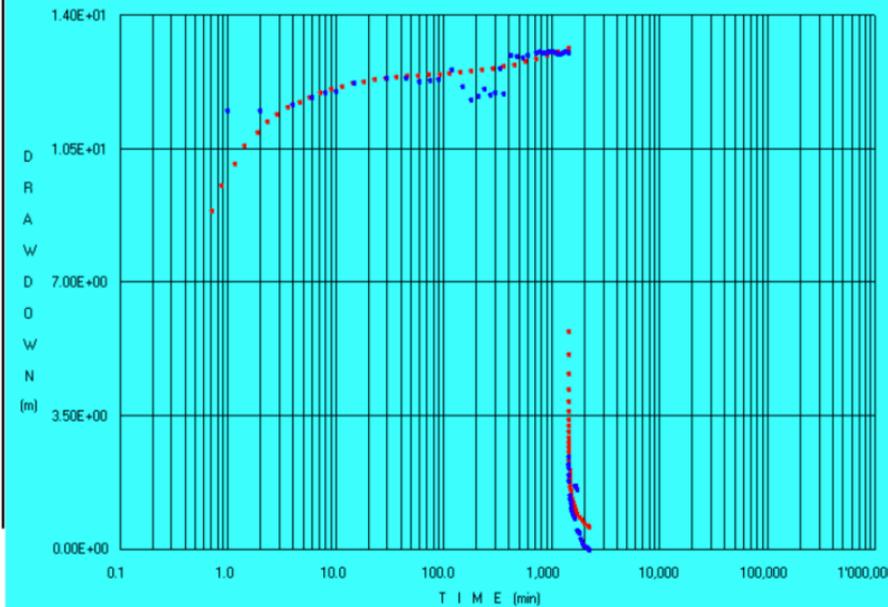
La conductividad hidráulica horizontal de 4.9 m/día es equivalente a una transmisividad de 921.2 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.

POZO:	<b>P216</b>	LOCALIDAD:	<b>JUAREZ</b>
FECHA:	<b>15/10/00</b>	PROPIETARIO:	<b>JMAS</b>
PROFUNDIDAD:	<b>250 (m)</b>	Φ DESCARGA:	<b>Φ ADEME:</b>
CAUDAL PR:	<b>51.64</b>	CAUDAL ESP:	<b>APROVECHAMIENTO: POZO</b>



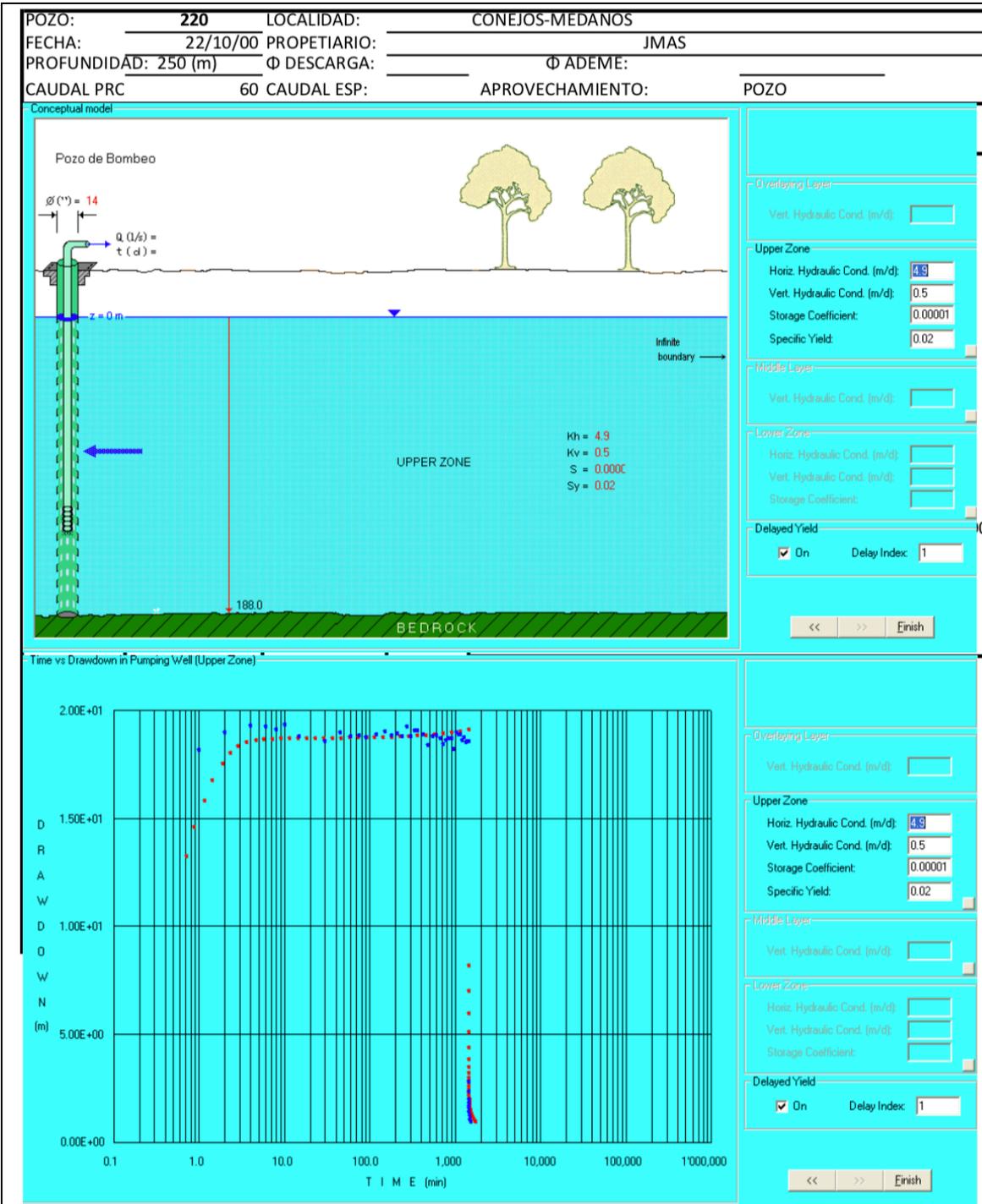
Overlying Layer	Vert. Hydraulic Cond. (m/d)	
Upper Zone	Horiz. Hydraulic Cond. (m/d)	7.4
	Vert. Hydraulic Cond. (m/d)	0.75
	Storage Coefficient	0.001
	Specific Yield	0.04
Middle Layer	Vert. Hydraulic Cond. (m/d)	
Lower Zone	Horiz. Hydraulic Cond. (m/d)	
	Vert. Hydraulic Cond. (m/d)	
	Storage Coefficient	
Delayed Yield	<input checked="" type="checkbox"/> On	Delay Index: 2

Time vs Drawdown in Pumping Well (Upper Zone)



Overlying Layer	Vert. Hydraulic Cond. (m/d)	
Upper Zone	Horiz. Hydraulic Cond. (m/d)	7.4
	Vert. Hydraulic Cond. (m/d)	0.75
	Storage Coefficient	0.001
	Specific Yield	0.04
Middle Layer	Vert. Hydraulic Cond. (m/d)	
Lower Zone	Horiz. Hydraulic Cond. (m/d)	
	Vert. Hydraulic Cond. (m/d)	
	Storage Coefficient	
Delayed Yield	<input checked="" type="checkbox"/> On	Delay Index: 2

**Figura 24:** Interpretación prueba P216, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez.



**Figura 25:** Interpretación prueba 220, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez.

### **3.3.6 Interpretación prueba de bombeo pozo SN8**

La prueba de bombeo realizada en el pozo SN8 empleó una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 26, empleando para ello una sola capa de 172.8 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 12 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 28. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de 3.68 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 0.3 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.004 y un rendimiento específico de 0.01. Finalmente se consideró un flujo diferido con un índice de retardo de 1.6.

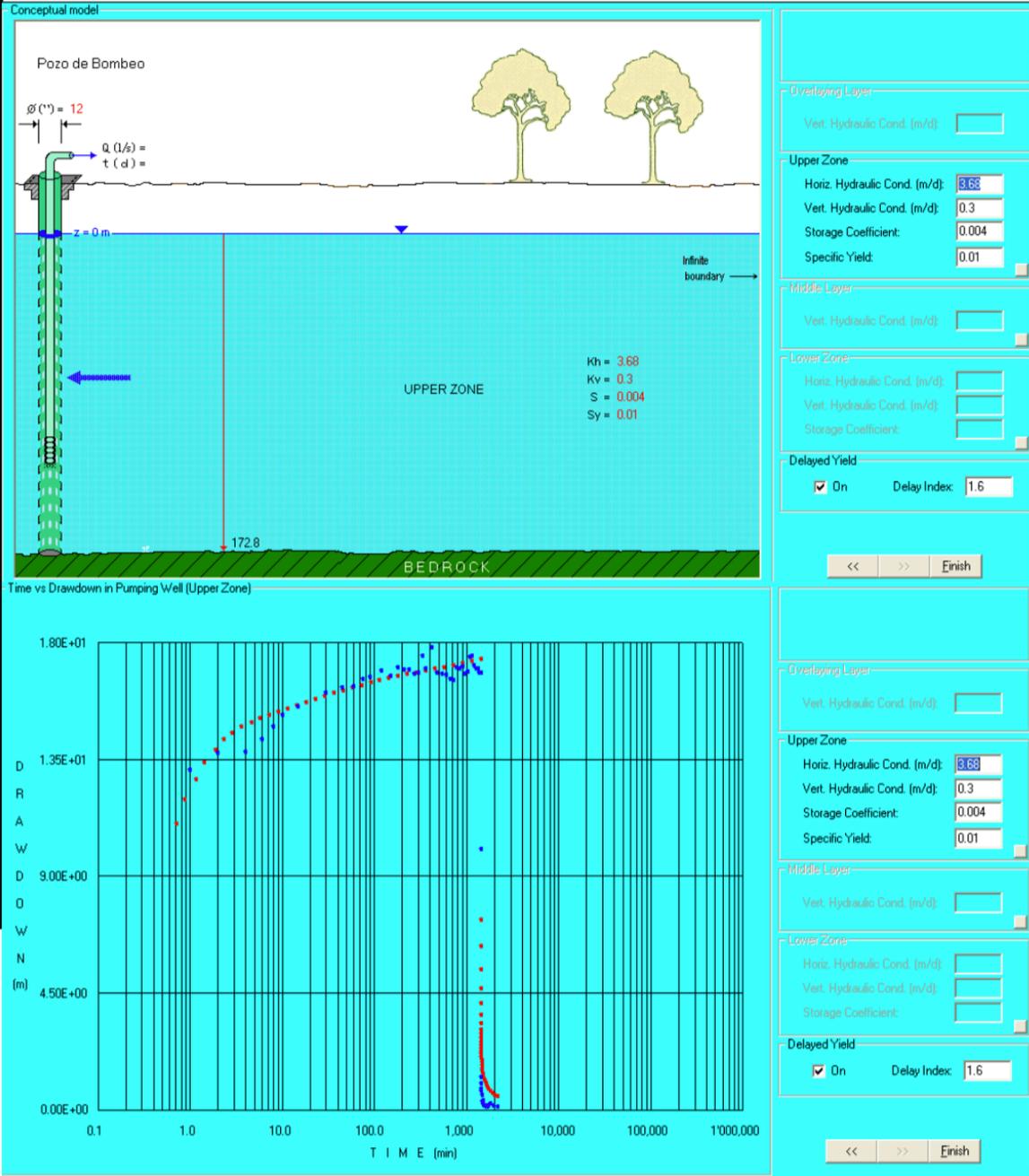
La conductividad hidráulica horizontal de 3.68 m/día es equivalente a una transmisividad de 635.9 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.

### **3.3.7 Interpretación prueba de bombeo pozo TA9**

La prueba de bombeo realizada en el pozo TA9 empleó una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 27, empleando para ello una sola capa de 100 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 12 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 12. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de 6.25 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 0.62 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.0001 y un rendimiento específico de 0.01. Finalmente se consideró un flujo diferido con un índice de retardo de 1.5.

La conductividad hidráulica horizontal de 6.25 m/día es equivalente a una transmisividad de 625 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.

POZO: **SN8** LOCALIDAD: **SACRAMENTO**  
 FECHA: **26/10/00** PROPIETARIO: **JCAS**  
 PROFUNDIDAD: **250 (m)**  $\Phi$  DESCARGA:  **$\Phi$  ADEME:**  
 CAUDAL PRC **42.44** CAUDAL ESP: **APROVECHAMIENTO:** **POZO**



**Figura 26:** Interpretación prueba SN8, Sacramento, Municipio de Chihuahua.

POZO: TA9 LOCALIDAD: TABALAOPA-ALDAMA  
 FECHA: 14/02/00 PROPIETARIO: \_\_\_\_\_  
 PROFUNDIDAD: (m) \_\_\_\_\_  $\Phi$  DESCARGA: \_\_\_\_\_  $\Phi$  ADEME: \_\_\_\_\_  
 CAUDAL PR: 34.5 CAUDAL ESP: \_\_\_\_\_ APROVECHAMIENTO: \_\_\_\_\_ POZO

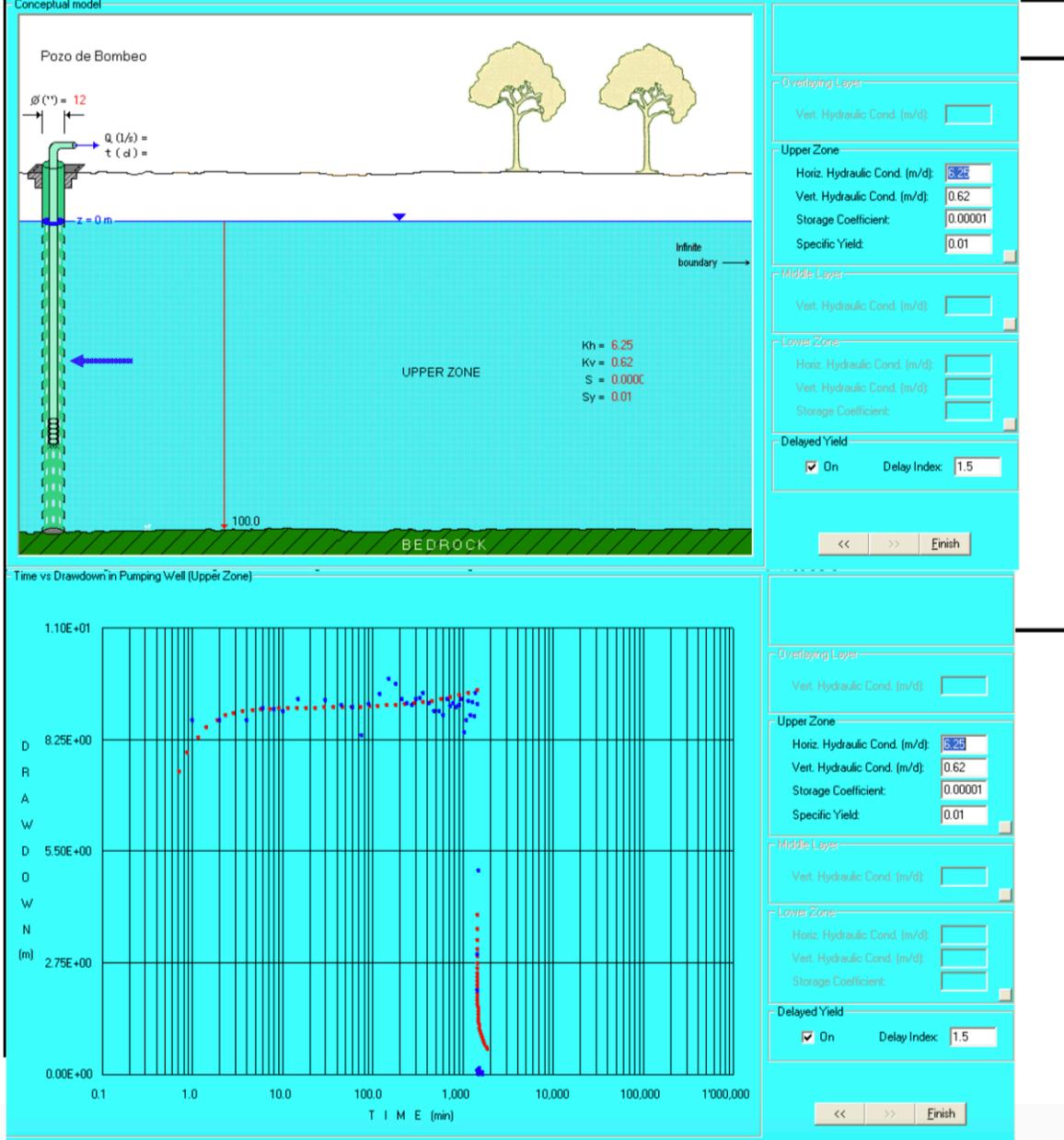


Figura 27: Interpretación prueba TA9, Tabalaopa, Municipio de Aldama.

### **3.3.8 Interpretación prueba de bombeo pozo UNI**

La prueba de bombeo realizada en el pozo UNI empleo una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 28, empleando para ello una sola capa de 278.9 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 14 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 15. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de 0.11 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 0.013 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.0003 y un rendimiento específico de 0.03. Finalmente se consideró un flujo diferido con un índice de retardo de 2.

La conductividad hidráulica horizontal de 0.11 m/día es equivalente a una transmisividad de 30.67 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.

### **3.3.9 Interpretación prueba de bombeo pozo VASG**

La prueba de bombeo realizada en el pozo VASG empleo una discretización para acuífero de tipo libre (conforme a la Tabla 5), tal y como se muestra en la Figura 29, empleando para ello una sola capa de 383.3 m de espesor. El diámetro efectivo de el pozo fue de 12 pulgadas y la pérdida de pozo estimada fue de 1. Se logró un buen ajuste entre los datos de abatimiento observados y los simulados por el modelo de Rathod y Rushton para una conductividad hidráulica horizontal de .135 m/día, una conductividad hidráulica vertical de 0.0135 m/día, un coeficiente de almacenamiento de 0.0005 y un rendimiento específico de 0.01. Finalmente se consideró un flujo diferido con un índice de retardo de 0.1.

La conductividad hidráulica horizontal de 0.135 m/día es equivalente a una transmisividad de 51.74 m<sup>2</sup>/día, que es cercano al que se obtuvo de la interpretación de la prueba de abatimiento por el método convencional de Jacob – Cooper.

POZO: UNI LOCALIDAD: CHIHUAHUA  
 FECHA: 23/12/00 PROPIETARIO: \_\_\_\_\_  
 PROFUNDIDAD: (m) \_\_\_\_\_  $\Phi$  DESCARGA: \_\_\_\_\_  $\Phi$  ADEME: \_\_\_\_\_  
 CAUDAL PRC 9.2 CAUDAL ESP: \_\_\_\_\_ APROVECHAMIENTO: POZO

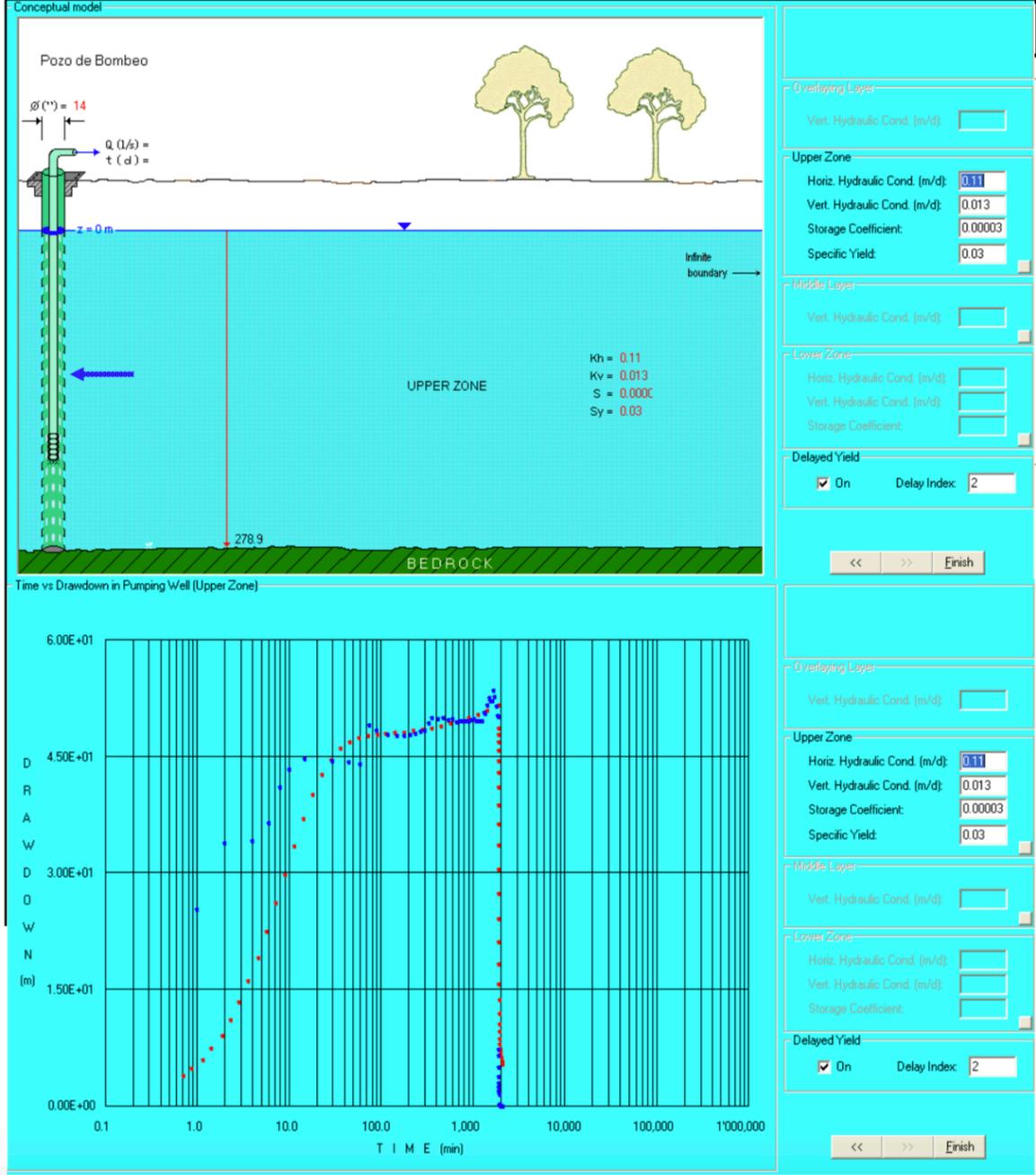


Figura 28: Interpretación prueba UNI, Chihuahua, Municipio de Chihuahua.

POZO: VASG LOCALIDAD: CONEJOS-MEDANOS  
 FECHA: 25/02/70 PROPIETARIO: \_\_\_\_\_  
 PROFUNDIDAD: (m) \_\_\_\_\_  $\Phi$  DESCARGA: \_\_\_\_\_  $\Phi$  ADEME: \_\_\_\_\_  
 CAUDAL PRC 30.1 CAUDAL ESP: \_\_\_\_\_ APROVECHAMIENTO: \_\_\_\_\_ POZO \_\_\_\_\_

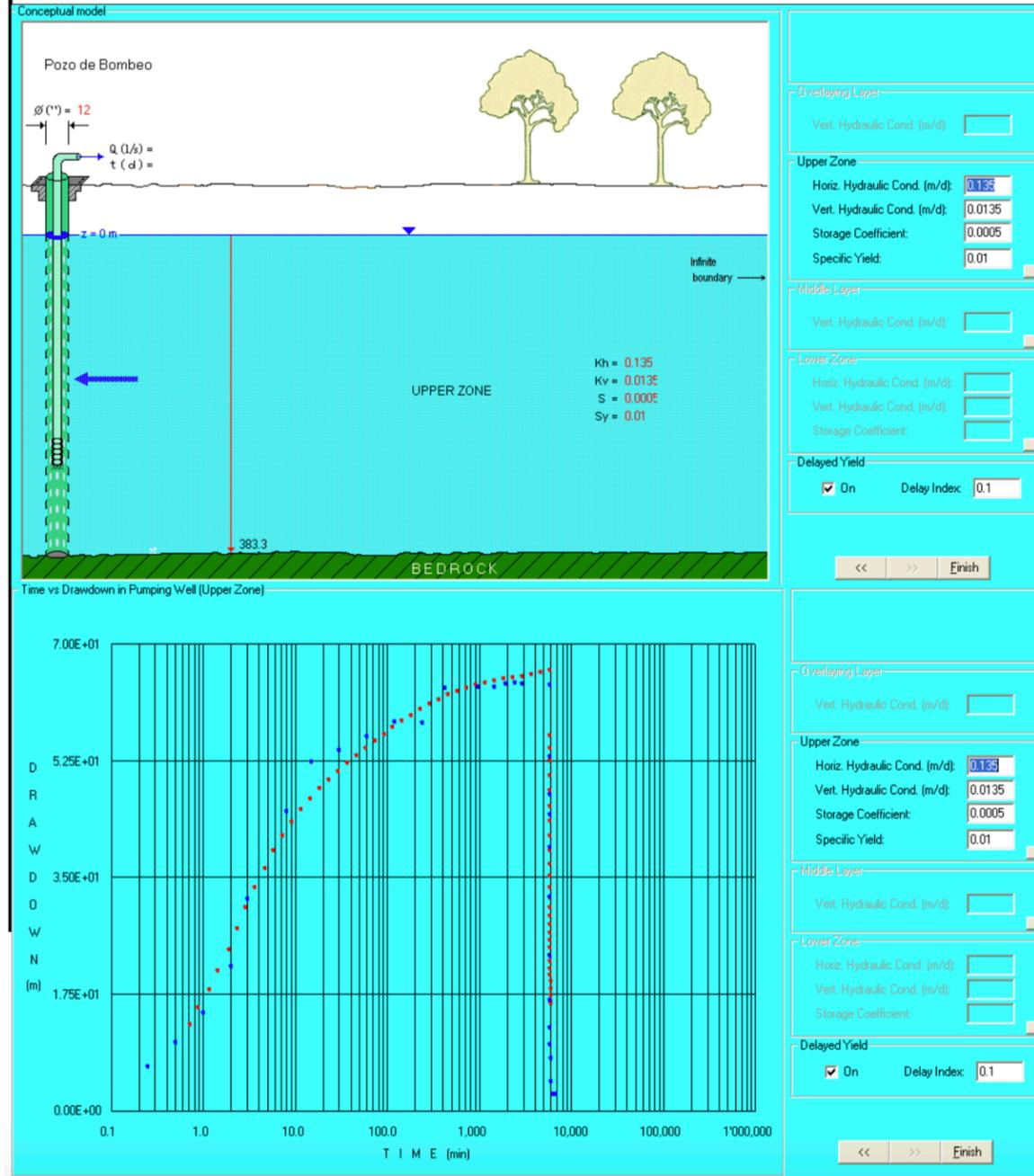


Figura 29: Interpretación prueba VASG, Conejos – Médanos, Municipio de Juárez.

## 4. Análisis y comparación de resultados

### 4.1 Prueba de bombeo pozo Camargo CM4.

El resultado obtenido por métodos convencionales para la transmisividad resulta ser de  $765.43 \frac{m^2}{dia}$  para el abatimiento y de  $606.38 \frac{m^2}{dia}$  para la recuperación. En el caso del modelo, se obtiene un rango que oscila de  $609 \frac{m^2}{dia}$  a  $1,421 \frac{m^2}{dia}$  considerando el abatimiento, cuando se incluye la recuperación, el espacio de soluciones factible se acota a un rango de  $730 \frac{m^2}{dia}$  a  $994.70 \frac{m^2}{dia}$ .

En este caso la Interpretación inicial con el modelo de Rathod y Rushton es de  $761.25 \frac{m^2}{dia}$ , la cual está muy cerca de los valores comentados anteriormente de los métodos convencionales y estos a su vez (abatimiento y recuperación), están prácticamente dentro del espacio de soluciones factible obtenido por medio del modelo.

Los límites de soluciones factibles presentadas por el modelo se acotan considerablemente al incluir la recuperación, este espacio de soluciones factible para los valores de la transmisividad se reduce en una tercera parte.

Hablando de porcentajes, el límite inferior tiene una diferencia de 23.92% con respecto a la interpretación original de Rathod y Rushton, esta diferencia disminuye a 9.33% al considerar la recuperación. Para los límites superiores es de 86.67% interpretando sólo el abatimiento y de 30.67% considerando adicionalmente la recuperación. Los métodos convencionales están dentro del rango, ya que el abatimiento tiene una diferencia porcentual de 0.55% con respecto a la interpretación original de Rathod y Ruhton y la de recuperación tiene una diferencia de 20.34%.

### 4.2 Prueba de bombeo pozo Camargo CM8.

Éste pozo es el único de los nueve analizados que dentro de su geometría se consideró un acuífero del tipo semiconfinado, los valores de transmisividad obtenidos por el método de Rathod y Rushton varían de  $606.60 \frac{m^2}{dia}$  para el límite inferior sin recuperación, hasta  $943.60 \frac{m^2}{dia}$  para el límite superior sin recuperación, al considerar la recuperación el rango de soluciones factible se acota a  $606.6 \frac{m^2}{dia}$  (véase que no se acota el valor para el límite inferior)

y hasta un valor de  $744.77 \frac{m^2}{dia}$ , el valor dado para la interpretación inicial de este método es de  $674 \frac{m^2}{dia}$ . Al comparar los valores mencionados anteriormente con los obtenidos por métodos convencionales, vemos que el obtenido por el abatimiento de  $2,068.61 \frac{m^2}{dia}$  queda muy por encima de los límites superiores del método numérico, en cambio el valor obtenido por métodos convencionales en función de la recuperación queda muy cerca del límite inferior del método numérico, este con un valor de  $601.96 \frac{m^2}{dia}$ . De lo anterior, se puede deducir que obtener los datos de recuperación al término de la prueba de bombeo es de gran importancia para estimar los parámetros hidráulicos del acuífero en estudio.

Al comparar la interpretación original del método numérico con el límite inferior con y sin abatimiento, se tiene una diferencia porcentual del 10%, una diferencia del 10.50 % para el límite superior cuando se considera la recuperación y del 40% cuando solo se considera el abatimiento. Al comparar con los métodos convencionales, se tiene una diferencia de 10.69% para la recuperación y una diferencia del 206.92% para el abatimiento.

### **4.3 Prueba de bombeo pozo J213.**

Los rangos obtenidos de transmisividad para este pozo, la cual resulta de multiplicar la conductividad hidráulica horizontal por el estrato saturado son de  $390 \frac{m^2}{dia}$  en el límite inferior sin considerar el abatimiento,  $689 \frac{m^2}{dia}$  para el límite inferior considerando el abatimiento y la recuperación,  $868.40 \frac{m^2}{dia}$  para la interpretación calibrada original,  $1,430 \frac{m^2}{dia}$  para el límite superior considerando la recuperación y el abatimiento y de  $1625.00 \frac{m^2}{dia}$  considerando el puro abatimiento. Los valores obtenidos por el método convencional son de  $2,250.84 \frac{m^2}{dia}$  para el abatimiento y de  $911.76$  para la recuperación.

Las diferencias porcentuales son de 55.09% si se compara el límite inferior sin recuperación con la interpretación original del método numérico, de 20.66% si se compara el límite inferior con recuperación y abatimiento contra la original, de 64.67% si se compara con el límite superior considerando la recuperación y de 87.13% cuando se compara la original con el límite superior sin recuperación. Al comparar la original del método numérico con los valores obtenidos con métodos convencionales, se tiene que en el caso del

abatimiento se tiene una diferencia porcentual de 159.19% y de 4.99% para el caso de la recuperación.

#### **4.4 Prueba de bombeo pozo P216.**

La interpretación del modelo numérico Rathod y Ruhton dio un valor de  $740 \frac{m^2}{dia}$ , al comparar este valor con el límite inferior sin considerar la recuperación se tiene una diferencia porcentual de 40.54% ya que esta tiene un valor de  $440 \frac{m^2}{dia}$ , al considerar la recuperación se disminuye la diferencia a 8.11% con un valor de  $680 \frac{m^2}{dia}$ . Hacia los límites superiores se tiene una diferencia porcentual de 100% al duplicarse el valor a  $1,480 \frac{m^2}{dia}$ , esto considerando la recuperación, cuando ésta no se considera, el valor se aumenta a  $1,600 \frac{m^2}{dia}$ , aumentando así a 116.22%. Al comparar el modelo convencional con el método numérico, se tiene que el abatimiento en el método convencional tiene un valor de  $1,550.05 \frac{m^2}{dia}$  y se da una diferencia porcentual de 109.47 con respecto a la interpretación original del método numérico, en el caso de la recuperación, se tiene un valor muy similar, este es de 726.30, representando una diferencia de 1.85%.

#### **4.5 Prueba de bombeo pozo P220.**

Para este pozo contenido en un acuífero libre, se tiene que el valor de la transmisividad en el límite inferior solo considerando el abatimiento es de  $306.44 \frac{m^2}{dia}$ , al considerar el abatimiento y la recuperación el valor resulta ser de  $695.60 \frac{m^2}{dia}$ , en su interpretación original calibrada resulta ser de  $921.20 \frac{m^2}{dia}$ , en el límite superior al considerar la recuperación y el abatimiento se tiene un valor de  $1,184.40 \frac{m^2}{dia}$  y en el límite superior sin considerar la recuperación, se tiene un valor de  $5,640 \frac{m^2}{dia}$ . Para el caso de los modelos convencionales, se tiene que el valor es de 1,101.48 para el caso de la recuperación y no se tiene un valor para el caso del abatimiento ya que no se presenta una línea de tendencia principal en la gráfica logarítmica.

Las diferencias porcentuales oscilan de 66.73% y 24.49%, si se compara la interpretación original del método numérico contra el límite inferior sin recuperación y el límite inferior con recuperación respectivamente. Asimismo, oscilan de 28.57% a 512.24% si se compara con los límites superior con recuperación y sin recuperación respectivamente. Al comparar el resultado del método numérico con el del método convencional, se tiene una diferencia porcentual de 19.57 puntos.

#### **4.6 Prueba de bombeo pozo SN8.**

La transmisividad obtenida en este caso para el método numérico resulta ser de 635.90  $\frac{m^2}{dia}$ , en los límites inferiores, se tiene un valor de 432  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 32.07% para el caso en el que no se considera la recuperación, se tiene un valor de 466.56  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 26.63% para el caso en el que se considera la recuperación. Para el caso de los límites superiores, se tiene un valor de 639.36  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 0.54% para el caso en donde se considera la recuperación, así mismo, se tiene un valor de 673.92  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 5.98% para el caso que considera la recuperación.

Cuando se compara el modelo numérico con el método convencional, se tiene un valor para este último de 594.11  $\frac{m^2}{dia}$  para el caso de el abatimiento y una diferencia de 6.57% y un valor de 720.92  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 13.37% para el caso de la recuperación.

#### **4.7 Prueba de bombeo pozo TA9.**

La transmisividad obtenida en este caso para el método numérico resulta ser de 625.00  $\frac{m^2}{dia}$ , en los límites inferiores, se tiene un valor de 400.00  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 36.00% para el caso en el que no se considera la recuperación, se tiene un valor de 560.00  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 10.40% para el caso en el que se considera la recuperación. Para el caso de los límites superiores, se tiene un valor de 660  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 5.60% para el caso en donde se considera la recuperación, así mismo, se tiene un valor de 1,130.00  $\frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 80.80% para el caso que considera la recuperación.

Cuando se compara el modelo numérico con el método convencional, se tiene un valor para este último de  $739.28 \frac{m^2}{dia}$  para el caso de el abatimiento y una diferencia de 18.28% y un valor de  $211.61 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 66.14% para el caso de la recuperación.

#### **4.8 Prueba de bombeo pozo UNI.**

La transmisividad obtenida en este caso para el método numérico resulta ser de  $30.68 \frac{m^2}{dia}$ , en los límites inferiores, se tiene un valor de  $19.52 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 36.36% para el caso en el que no se considera la recuperación, se tiene un valor de  $29.28 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 4.55% para el caso en el que se considera la recuperación. Para el caso de los límites superiores, se tiene un valor de  $36.26 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 18.18% para el caso en donde se considera la recuperación, así mismo, se tiene un valor de  $58.57 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 90.91% para el caso que considera la recuperación.

Cuando se compara el modelo numérico con el método convencional, se tiene un valor para este último de  $25.02 \frac{m^2}{dia}$  para el caso de el abatimiento y una diferencia de 18.45% y un valor de  $35.73 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 16.46% para el caso de la recuperación.

#### **4.9 Prueba de bombeo pozo VASG.**

La transmisividad obtenida en este caso para el método numérico resulta ser de  $51.75 \frac{m^2}{dia}$ , en los límites inferiores, se tiene un valor de  $39.48 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 23.70% para el caso en el que no se considera la recuperación, se tiene un valor de  $49.06 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 5.19% para el caso en el que se considera la recuperación. Para el caso de los límites superiores, se tiene un valor de  $61.33 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 18.52% para el caso en donde se considera la recuperación, así mismo, se tiene un valor de  $99.66 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 92.59% para el caso que considera la recuperación.

Cuando se compara el modelo numérico con el método convencional, se tiene un valor para este último de  $79.01 \frac{m^2}{dia}$  para el caso de el abatimiento y una diferencia de 52.69% y un valor de  $46.83 \frac{m^2}{dia}$  y una diferencia de 9.50% para el caso de la recuperación.

#### **4.10 Tablas resumen de resultados**

En la Tabla 6 se muestra el espacio de soluciones factible de acuerdo el modelo de Rathod y Rushton, asimismo se muestran los resultados obtenidos por el método convencional. En la Tabla 7 se muestran los resultados presentados en la Tabla 6 en diferencias porcentuales con respecto a la interpretación inicial de Rathod y Rushton.

Tabla 6: Espacio de soluciones factibles obtenidas por el método de Rathod y Rushton

Pozo	Tipo de Acuífero	Espesor Saturado b (m)	Espacio de soluciones factible obtenidas por el método de Rathod y Rushton para transmisibilidad (m <sup>2</sup> /día)					Método Convencional Transmisibilidad (m <sup>2</sup> /día)	
			Límite Inferior (abatimiento)	Límite Inferior (abatimiento y recuperación)	Interpretación inicial Rathod y Rushton	Límite Superior (abatimiento y recuperación)	Límite Superior (abatimiento)	Abatimiento	Recuperación
CM4	libre	203.00	579.16	690.20	761.25	994.70	1,421.00	765.43	606.38
CM8	Semi confinado	33.70	606.60	606.60	674.00	744.77	943.60	2,068.61	601.96
J213	libre	130.00	390.00	689.00	868.40	1,430.00	1,625.00	2,250.84	911.76
P216	libre	100.00	440.00	680.00	740.00	1,480.00	1,600.00	1,550.05	726.30
P220	libre	188.00	306.44	695.60	921.20	1,184.40	5,640.00	NO	1,101.48
SN8	libre	172.80	432.00	466.56	635.90	639.36	673.92	594.11	720.92
TA9	libre	100.00	400.00	560.00	625.00	660.00	1,130.00	739.28	211.61
UNI	libre	278.90	19.52	29.28	30.68	36.26	58.57	25.02	35.73
VASG	libre	383.30	39.48	49.06	51.75	61.33	99.66	79.01	46.83

Tabla 7: Comparación de interpretación inicial vs el método de Rathod y Rushton en porcentaje.

Pozo	Tipo de Acuífero	Espesor Saturado b (m)	Comparación del espacio de soluciones factibles obtenidas por el método de Rathod y Rushton para transmisibilidad (m <sup>2</sup> /día) con respecto a la interpretación inicial					Método Conventional Transmisibilidad (m <sup>2</sup> /día)	
			Límite Inferior (abatimiento)	Límite Inferior (abatimiento y recuperación)	Interpretación inicial Rathod y Rushton	Límite Superior (abatimiento y recuperación)	Límite Superior (abatimiento)	Abatimiento	Recuperación
CM4	libre	203.00	23.92%	9.33%	0.00%	30.67%	86.67%	0.55%	20.34%
CM8	Semi confinado	33.70	10.00%	10.00%	0.00%	10.50%	40.00%	206.92%	10.69%
J213	libre	130.00	55.09%	20.66%	0.00%	64.67%	87.13%	159.19%	4.99%
P216	libre	100.00	40.54%	8.11%	0.00%	100.00%	116.22%	109.47%	1.85%
P220	libre	188.00	66.73%	24.49%	0.00%	28.57%	512.24%	N/A	19.57%
SN8	libre	172.80	32.07%	26.63%	0.00%	0.54%	5.98%	6.57%	13.37%
TA9	libre	100.00	36.00%	10.40%	0.00%	5.60%	80.80%	18.28%	66.14%
UNI	libre	278.90	36.36%	4.55%	0.00%	18.18%	90.91%	18.45%	16.46%
VASG	libre	383.30	23.70%	5.19%	0.00%	18.52%	92.59%	52.69%	9.50%

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

Las variables que influyen en los resultados que se pueden tener al interpretar pruebas de bombeo mediante el modelo de Rathod y Rushton son muy amplias, desde las observadas en campo, como son la elevación del nivel estático antes del inicio del bombeo, el caudal aforado, el corte litológico, el diámetro del pozo, el diseño de la tubería del mismo, así como las hipótesis supuestas en el modelo, como son la pérdida de pozo, la conductividad hidráulica horizontal, la conductividad hidráulica vertical, el coeficiente de almacenamiento, el rendimiento específico y el flujo diferido.

Si bien es cierto que la posible combinación de las variables mencionadas anteriormente para poder llegar a una solución también es cierto que se pueden obtener varios conjuntos de soluciones factibles, sin embargo, cuando se interpreta una prueba de bombeo el principal objetivo es el de obtener un valor de conductividad hidráulica representativo. Para llegar a esto y considerando que los valores obtenidos en campo son confiables, se tiene que la principal variable que funciona como contrapeso de las variaciones de la conductividad hidráulica horizontal, es la pérdida de pozo, es decir, a una mayor conductividad hidráulica, se necesitara una mayor pérdida de pozo para tener una solución que quede dentro del espacio de soluciones factibles de la prueba que se está interpretando mediante el modelo de flujo radial de dos capas. Las otras variables mencionadas anteriormente, quizá contrarresten el valor de la conductividad hidráulica horizontal, pero el efecto de estas variables sobre la de interés será mínimo, haciendo así que el espacio de soluciones factible no oscile significativamente (en ordenes de magnitud) con respecto a la magnitud de la variable de interés.

Del análisis comparativo de los métodos convencionales y el modelo numérico se obtuvo que es posible encontrar valores comparables entre ambos, sin embargo, el modelo puede presentar un problema de no unicidad, es decir, es posible obtener un espacio relativamente amplio de soluciones factibles, por lo que su uso *a priori*, requiere de experiencia por parte de quien interpreta las pruebas. El espacio de soluciones factibles de entre -66.7% y +512.1% con respecto al valor obtenido por método convencional obtenido al interpretar sólo la prueba de abatimiento, que se ve sensiblemente reducido de entre -26.6% y +100%, por lo que se confirma la importancia de tener lecturas fiables en la etapa de

recuperación de la prueba, con lo que se puede reducir el espacio de soluciones factibles y consecuentemente el problema de no unicidad.

Se observó que la duración de la prueba de bombeo es importante en la calidad de los resultados que se obtienen, ya que debido a lo rápido del descenso de los niveles al inicio del bombeo el ajuste con el modelo se dificulta y dado que la obtención en campo de dichos valores pudo verse comprometida al satisfacer los tiempos de medición, el problema se elimina conforme se extienden los tiempos de medición entre lecturas.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda ampliamente que cuando se efectúen pruebas de bombeo en un pozo en el que no se dispone de piezómetros, se realice adicionalmente la toma de lecturas de recuperación una vez que cese el bombeo, aún y cuando ello implique no poder desmontar el equipo de bombeo (lo que ocurre comúnmente en pozos recién perforados), ya que en esta etapa de la prueba se recaba información muy valiosa para la estimación de parámetros hidráulicos del acuífero.

Se recomienda probar el modelo de Rathod y Rushton en pruebas de larga duración, con bomba operando por más de 24 h y preferentemente 72 h, con la finalidad de poder observar su estabilidad y consistencia en el espacio de soluciones factibles, tanto para abatimiento como para recuperación, siendo que esta última dura hasta obtener un nivel cercano al inicial, previo al bombeo.

También se recomienda probar el modelo en casos en los cuales se disponga de datos de abatimiento y recuperación tanto en el pozo de bombeo, como en uno o más piezómetros o pozos de observación, con lo que se espera que el problema de no unicidad se minimice e incluso deje de presentarse.

## Referencias

- Abdulazis, S. A., Saleh, A. A. and Abdulazis A. A., (1993) Determination of Unconfined Aquifer Parameters Using Boulton, Neuman and Streltsova Methods, L. King Saud Univ., Vol. 5, No. 2, pp. 155-170
- Bäumle, R. (2011). Development of Groundwater Information & Management program for Lusaka Groundwater Systems. Technical Note No. 4. Results of Pumping Test Evaluation and Statistical Analysis of Aquifer Hydraulic Properties. Lusaka, 33 p.
- Boulton, N.S., (1963). Analysis of data from non-equilibrium pumping test allowing for delayed yield from storage. Proc.Inst.Civil Engrs., 26, pp. 469-482.
- Cherry, J.A & P.E. Johnson. (1982). A multilevel device for monitoring in fractured rock. Ground Water Monitoring Review 2.
- Chow, V.T., (1952). On the determination of transmissivity and storage coefficients from pumping test data. Am. Geophys. Union. Trans. 33, pp. 397-404.
- Copper, H.H. and C.E. Jacob, (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well- field history. Am. Geophys. Union Trans. Vol. 27. pp. 526-534.
- De Glee, G.J., (1930). Over grondwaterstromingen bij wateronttrekking door middel van putten. Thesis. J. Waltman, Deift (The Netherlands), 175 pp.
- De Glee, G.J., (1951). Barekeningsmethoden voor de winning van groundwater. In: Drinkwatervoorziening, 3e Vacantiecursus: 38-80 Moorman's periodieke pers, The Hague.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
- Hantush, M.S. and C.E. Jacob, (1955). Non-steady radialflow in an infinite leaky aquifer. Trans. Amer. Geophys. Union Vol. 36, pp. 95-100.
- Hantush M.S., (1956). Analysis of data from pumping test in leaky aquifer. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 37, pp. 702-714.
- Hantush M.S., (1960). Modification of the theory of leaky aquifers. J. Geophys. Res. Vol. 65, pp. 3713-3725.
- Jacob, C.E., (1944). Notes on determining permeability by pumping test under water table condition. U. S. Geol. Surv. open. file rept.

- Kruseman, G.P. and N.A. De Ridder, (2000), Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, Second Edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Kruseman G.P. & Ridder N.A. (1979). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Netherlands: International Institute for Land reclamations and Improvement.
- Nueman, S.P. and P.A. Witherspoon, (1972). Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer system. Water Resources Res., Vol. 8, pp. 1284-1298.
- Neuman, S.P., (1975). Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. Water Resources Res., Vol. 11, pp. 329-342.
- Rushton, K. R., and S. C. Redshaw. (1979). Seepage and Groundwater Flow. Numerical Analysis by Analog and Digital Methods. John Wiley & Sons Inc. Chichester. 332 p.
- Rathod, K.S. and Rushton, K.R.. (1991). Interpretation of Pumping Numerical Method of Pumping Test Analysis Using Microcomputers rom Two-Zone Layered Aquifers Using a Numerical Model. Ground Water, Julio-Agosto, 611-623.
- Rathod, K.S. and Rushton, K.R., (1984). Numerical method of pumping test analysis using microcomputers, Groundwater Field Reports, Vol. 22, No. 5, pp. 601-608.
- Rushton, K.R.. (2003) "Groundwater Hydrology, Conceptual and Computational Models", John Wiley and Sons, Chichester
- Silva-Hidalgo, H. (2004). Análisis Comparativo del Modelo de Flujo Radial de Dos Capas Desarrollado por Rathod y Rushton y los Métodos Convencionales para Interpretación de Pruebas de Bombeo. Tesis de Maestría en Ingeniería. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.
- Theis, C.V., (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 16, pp. 519-524.
- Thiem, G., (1906). Hydrologische methoden. Gebhardt, Leipzig, 56 pp.c
- Walton, William Clarence. (1970). Groundwater Resources Evaluation.
- Walton, W.C., (1962). Select analytical methods for well and aquifer evaluation. Illinois State Water Survey Bufi., No. 49; 81 pp.

## **Anexos**

## Anexo A

En este anexo se consigna los cortes litológicos escaneados de los originales que se encuentran en poder de las dependencias que facilitaron la información de las pruebas de bombeo empleadas en esta tesis

Tabla A1. Corte litológico del pozo Campus Universitario

CORTE LITOLÓGICO	
LOC. CAMPUS UNIVERSITARIO	
MPIO. CHIHUAHUA	
PROFUNDIDAD DE OBRA: 350 M.	
PROFUNDIDAD	DESCRIPCION DE CORTE
0-10	CONGLOMERADO ARCILLO-ARENOSO CON ESCASOS CANTOS RODADOS
10-204	CANTOS RODADOS DE ROCA ÍGNEA HETEROGENEA
204-232	ARENISCA DE GRANO GRUESO
232-350	SIN MUESTRAS POR PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

Tabla A2. Corte litológico del pozo Villa Ahumada

FVAB - 10 VILLA AHUMADA.

PROFUNDIDAD DE	A	CLASIFICACION
3	4	Arcilla
4	7	Arcilla
7	8	Arena gruesa 70 %, arcilla 30 %
8	11	Caliche y arcilla
11	32	Arcilla
32	38	Caliche y arena
38	45	Pedernal - fragmentos
45	111	Arcilla color rojizo
111	145	Arena mediana 50 %, Arcilla 50 %
145	152	Arena 50%, Arcilla 50 %
152	195	Gravilla 70 %
195	210	Arena mediana 70 %, Arcilla 30 %
210	243	Arena fina 70 %, Arcilla 30 %
243	270	Arena fina 70 %, Arcilla 30 %
270	358	Arena 80 %, Arena fina 20 %
358	371	Arena 80 %, Arena fina 20 %
371	381	Arena mediana 80 %, Arcilla 20 %
381	400	Arena fina 90 %, Arcilla 10 %

Tabla A3. Corte litológico del pozo Camargo 4

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
 Direc. de Geohidrología y de Zonas Áridas.  
 Gerencia General en el Estado.  
RESIDENCIA DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
 Chihuahua, Chih.  
REPORTE LITOLOGICO DE MUESTRAS DE CANAL.

Pozo PCHCA - 4 EJIDO SAN LEONARDO, MPIO. Fecha ENERO DE 1974  
CAMARGO, CHIH.

INTERVALO DE	EN MTS. A	DESCRIPCION LITOLOGICA	OBSERVACIONES.
2	18	Grava y gravilla con escasas intercalaciones de arcilla.	
18	20	Grava gruesa con poca gravilla	
20	22	Gravilla	
22	24	Arcillas plásticas	
24	26	Arcilla compacta	
26	28	Grava gruesa con gravilla y escasa arcilla.	
28	30	Gravas y gravillas	
30	36	Gravilla y arena gruesa	
36	52	Basalto vesicular, presenta cristales de labradorita.	
52	70	Basalto vesicular, en ocasiones las vesículas rellenas de caolín.	

Tabla A4. Corte litológico del pozo Conejos-Médanos 4

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS,  
 DELEGACION EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA,  
 SUBDELEGACION DE INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA,  
 RESIDENCIA GRAL. DE ADMON. Y CONTROL DE SISTEMAS HIDROLOGICOS,  
 UNIDAD DE AGUAS SUBTERRANEAS.

CORTE LITOLOGICO DE MUESTRAS DE CANAL.

POZO No. 4 CONEJOS-MEDANOS, RANCHO LA JOYA, MPID. DE JUAREZ. (POR CONTRATO).      FECHA: 25 DE JULIO DE 1988.

DE (m.)	A (m.)	DESCRIPCION.
0.00	10.00	ARENA CEMENTADA CON CALICHE.
10.00	28.00	ARCILLA Y ARENA CON CALICHE.
28.00	98.00	ARENA Y LIMO.
98.00	132.00	ARENA MUY FINA CON LIMO Y Poca ARCILLA.
132.00	168.00	LIMO Y ARENA FINA CON ARCILLA.
168.00	228.00	ARENA FINA Y LIMO CON Poca ARCILLA.
228.00	248.00	ARENA FINA Y LIMO CON ESCASA ARCILLA.
248.00	300.00	ARENA FINA Y LIMO CON Poca ARCILLA.

Tabla A5. Corte litológico del pozo Conejos-Médanos 6

CORTE LITOLÓGICO DE MUESTRAS DE CANAL.

POZO: No. 8, ZONA CONEJOS - MEDANOS.

FECHA: 29 DE SEPTIEMBRE DE 1988.

POR CONTRATO.

DE: (M)	A: (M)	DESCRIPCION.	OBSERVACIONES.
0.00	12.00	ARENAS FINAS Y LIMOS.	
12.00	18.00	ARENAS DE GRANO MEDIO O FINO CON LIMOS.	
18.00	48.00	ARENAS FINAS Y LIMOS.	
48.00	100.00	ARCILLA Y LIMOS CON Poca GRAVA FINA.	
100.00	130.00	LIMO Y ARCILLA CON Poca ARENA FINA.	
130.00	252.00	LIMO CON ARCILLA.	
252.00	260.00	LIMO Y ARCILLA CON ARENA.	
260.00	276.00	LIMO Y ARCILLA CON Poca GRAVILLA.	
276.00	286.00	GRAVA EMPACADA CON ARENA Y ARCILLA.	

Tabla A6. Corte litológico del pozo Juárez 216

**CORTE LITOLOGICO.**

<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>DESCRIPCION DE CORTE</b>
0-18	ARCILLA.
18-22	ARCILLAS Y ESCASAS ARENAS.
22-40	ARENA Y ESCASA ARCILLA.
40-48	ARENA Y ARCILLA.
48-54	ARCILLA Y ARENA.
54-220	ARENA, ARCILLA A ESCASA ARENA.
220-250	ARCILLA Y ARENA.

Tabla A7. Corte litológico del pozo Juárez 219

**CORTE LITOLOGICO.**

<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>DESCRIPCION DE CORTE</b>
0-12	GRAVILLAS CON ARCILLA Y MATERIAL "CALICHOSO".
12-14	ARENAS MEDIANAS.
14-42	ARENAS MEDIANAS A FINAS CON ARCILLA.
42-112	ARENAS MEDIANAS A FINAS.
112-118	ARENAS MEDIANAS CON ARCILLA.
118-122	ARENAS MEDIANAS A FINAS.
122-250	ARCILLA CON ARENA FINA (INTERCALACIONES DE ARENAS FINAS Y ARCILLA.)

Tabla A8. Corte litológico del pozo Juárez 220

**CORTE LITOLOGICO.**

<b>PROFUNDIDAD</b>	<b>DESCRIPCION DE CORTE</b>
0-16	GRAVILLAS CON ARENAS.
16-36	ARCILLA CON GRAVILLAS.
36-48	ARENAS FINAS A MEDIANAS.
48-50	ARENAS FINAS CON ESCASA ARCILLA.
50-88	ARENAS FINAS A MEDIANAS.
88-134	ARCILLA CON ARENAS GRUESAS A MEDIANAS.
134-250	ARENAS FINAS A MEDIANAS.



## **Curriculum Vitae**

<Este CV es un breve esbozo bibliográfico del autor escrito en forma de texto, que presenta información para futuros lectores del trabajo. Debe incluir los grados obtenidos, publicaciones y experiencia docente y laboral, así como información de contacto. El CV deberá de tener una extensión no mayor a una página. La dirección permanente del autor y su nombre deberán aparecer al final de la página.>

Domicilio Permanente:      <Calle y numero, colonia>  
   <Ciudad, Estado, Código Postal>

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por José Luis Huerta García