

Informe de TNO

“Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA”

Estudio del Acuífero Patiño – Informe técnico 2.6:

Condiciones geohidráulicas en la Zona Piloto

Fecha

Marzo del 2001

Autor

Carlos E. Molano C.

Netherlands Institute of
Applied Geoscience TNO
P.O.Box 6012
2600 JA Delft
The Netherlands
www.nitg.tno.nl

Código del proyecto

005.50363

Código del contrato

Contrato No 28/2000

Contratante

Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental (SENASA)

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm of any other means without the previous written consent of TNO.

In case this report was drafted on instructions, the rights and obligations of contracting parties are subject to either the Standard Conditions for Research Instructions given to TNO, or the relevant agreement concluded between the contracting parties. Submitting the report for inspection to parties who have a direct interest is permitted.

© 1998 TNO

Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO has main offices in Delft and Utrecht and branch locations in Heerlen, Nuenen and Zwolle.

The Institute is the central geoscience institute in the Netherlands for information and research on the sustainable management and use of the subsurface and its natural resources.

Netherlands Organization for
Applied Scientific Research TNO

The standard Conditions for Research Instructions given to TNO, as filed at the Registry of the District Court and the Chamber of Commerce in The Hague shall apply to all instructions given to TNO.

Resumen

Dentro del proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA” se ha llevado a cabo el Estudio del Acuífero Patiño a través de una “Zona Piloto”. En dicha zona, una parte importante es la evaluación de la geohidráulica del sistema acuífero, incluyendo las pruebas hidráulicas realizadas.

En la zona piloto se ejecutaron cuatro pruebas de bombeo, tres de ellas utilizando pozos cercanos como pozos de observación. Los resultados de las pruebas dan como resultado la determinación de un acuífero con algunas condiciones acuíferas similares, pero también con algunas diferencias. En varios sitios se puede considerar como un acuífero multicapa entre 2 y 4 capas. Las capas superiores se comportan como libres a semilibres con transmisividades entre 10 a 30 m²/d, conductividades hidráulicas horizontales entre 0.3 a 0.6 m/d, las verticales de 2 a 5 veces menores; la porosidad eficaz estimada entre el 10% al 20% y un coeficiente de almacenamiento para condiciones elásticas de 10⁻³ a 10⁻⁵. La capa inferior fundamentalmente de tipo semiconfinado (localmente se puede comportar como confinado), con transmisividades entre 30 a 200 m²/d, conductividades hidráulicas horizontales entre 1 a 4 m/d, y el coeficiente de almacenamiento elástico de 10⁻⁴ a 10⁻⁷. En una de las pruebas se registraron además una capa entre el acuífero superficial y el profundo con resistencias hidráulicas altas del orden de los 2500 días.

En general se presenta variabilidad en los parámetros geohidráulicos dependiendo de la zona y de la profundidad, ya que es frecuente el cambio de areniscas masivas a areniscas friables; también varía el contenido de material fino, variando su conductividad hidráulica y almacenamiento. Por otra parte, se presentan alteraciones metamórficas en las areniscas cambiando sus propiedades geohidráulicas y en ocasiones intrusiones de rocas ígneas.

El aporte del flujo subsuperficial a la escorrentía de la cuenca como flujo base esta entre 0.2 a 0.6 m³/s. El coeficiente de agotamiento o recesión está entre 0.023 a 0.065 día⁻¹. Es posible que los valores altos aún sea respuesta de interflujo.

La infiltración en la cuenca tiene como límite inferior un valor aproximado de 250 mm/año; un estimativo del límite superior es de aproximadamente 500 mm/año.

Contenido

Resumen	i	
Lista de figuras	iv	
1	Introducción	1
2	Métodos utilizados para pruebas de bombeo	3
2.1	Método de Jacob	3
2.2	Método de Theis	4
2.3	Método de Hantush.....	5
2.4	Método de Neuman.....	6
2.5	Método de convolución discreta (kerneles).....	7
2.6	Simulación numérica	7
3	Pruebas hidráulicas realizadas	8
3.1	Localización.....	8
3.2	Relevancia y limitaciones de las pruebas de bombeo.....	9
3.3	Prueba de bombeo en Solares de Ñemby.....	9
3.4	Prueba de bombeo en el pozo 2 de la Junta de Saneamiento de Ñemby.....	17
3.5	Prueba de bombeo en el pozo de la Junta de Mbocayaty (Ñemby).....	22
3.6	Prueba de bombeo en el pozo 2 de la Junta de Caaguazú (Ñemby).....	25
4	Modelo general de flujo	34
4.1	Red de diferencias finitas y Modelo Conceptual	34
4.2	Resultados obtenidos con el modelo de flujo	36
5	Flujo base y caudales mínimos	39
6	Infiltración en la Zona Piloto	41
7	Conclusiones	42
8	Recomendaciones	43
8.1	Cuenca experimental	43
8.2	Ejecución y análisis de pruebas de bombeo adicionales.....	43

8.3	Medición de caudales a la salida de la cuenca.....	44
8.4	Medición de la lluvia en la Zona Piloto.....	44
8.5	Registro de niveles en la red pozos de observación.....	44
8.6	Manejo del acuífero y modelos de flujo	45
8.7	Pozos de observación.....	45
9	Referencias.....	46

APÉNDICES

Apéndice A.	Datos de la prueba en Solares de Ñemby
Apéndice B.	Datos de la prueba en Ñemby
Apéndice C.	Datos de la prueba en Mbocayaty
Apéndice D.	Datos de la prueba en Caaguazú
Apéndice E.	Bases conceptuales del modelo tridimensional de Diferencias Finitas

Lista de figuras

Figura 3-1:	Localización de las pruebas de acuífero realizadas	8
Figura 3-2:	Niveles de agua en el pozo de observación P1 durante las pruebas realizadas en Solares de Ñemby	10
Figura 3-3:	Niveles de agua en el pozo de observación P2 durante las pruebas realizadas en Solares de Ñemby	11
Figura 3-4:	Tendencia de los descensos antes de iniciar las pruebas en el pozo P1.Solares de Ñemby.	12
Figura 3-5:	Ajuste lineal de Jacob en la recuperación del pozo de observación P1. Solares de Ñemby.	12
Figura 3-6:	Ajuste a la curva de Theis, Pozo de observación P1. Solares de Ñemby.	13
Figura 3-7:	Ajuste lineal de Jacob para la segunda fase de la prueba en el pozo de observación P1.Solares de Ñemby	13
Figura 3-8:	Ajuste del modelo analítico de Theis a caudal variable. Pozo de observación P1. Solares de Ñemby	14
Figura 3-9:	Ajuste a las curvas de Neuman. Pozo de observación P1.Solares de Ñemby.....	15
Figura 3-10:	Método lineal de Jacob distancia-abatimiento. Solares de Ñemby.	16
Figura 3-11:	Niveles de agua en el pozo de observación durante las pruebas realizadas en el pozo 2 de Ñemby.	17
Figura 3-12:	Ajuste de la primera fase de la prueba (recuperación) a la ecuación de Jacob. Ñemby.	18
Figura 3-13:	Modelo analítico de Theis a caudal variable y método del punto de inflexión de Hantush. Ñemby	19
Figura 3-14:	Datos de la recuperación ajustados a las curvas de Hantush. Ñemby.	20
Figura 3-15:	Método de Jacob y método del punto de inflexión de Hantush. Ñemby	21
Figura 3-16:	Datos del bombeo ajustados a las curvas de Hantush. Ñemby.	21
Figura 3-17:	Niveles de agua durante las pruebas en el pozo de bombeo de Mbocayaty.	23
Figura 3-18:	Ajuste lineal de Jacob durante la recuperación. Mbocayaty.....	24
Figura 3-19:	Ajuste de Theis durante toda la prueba. Mbocayaty.....	24
Figura 3-20:	Ajuste de Jacob durante el bombeo. Mbocayaty.	25
Figura 3-21:	Niveles de agua medidos durante las pruebas en el pozo de bombeo P3 de Caaguazú.	26
Figura 3-22:	Niveles de agua (ya corregidos por presión y temperatura) en el pozo de observación. Caaguazú.....	27

Figura 3–23:	Variación de presión y temperatura durante la prueba de bombeo en Caaguazú.....	27
Figura 3–24:	Abatimientos registrados en el pozo de observación. Caaguazú. ...	28
Figura 3–25:	Ajuste del modelo analítico de Theis a caudal variable en el pozo de bombeo No.3 de Caaguazú	29
Figura 3–26:	Método de recuperación de Jacob. Pozo de bombeo No.3 de Caaguazú	30
Figura 3–27:	Ajuste de Theis a los abatimientos del pozo de observación por influencia del pozo vecino. Caaguazú.	30
Figura 3–28:	Ajuste de Theis a los abatimientos del pozo de observación por influencia del pozo vecino. Caaguazú.	31
Figura 3–29:	Red de diferencias finitas variables para la modelación de la prueba de bombeo en Caaguazú.	32
Figura 3–30:	Modelo vertical de las capas con los parámetros geohidráulicos. Caaguazú.	32
Figura 3–31:	Niveles de agua simulados durante la prueba en Caaguazú	33
Figura 4–1:	Red de diferencias finitas, límites y cauces superficiales modelados.	35
Figura 4–2:	Discretización vertical y parámetros geohidráulicos.	35
Figura 4–3:	Distribución de recarga simulada.	36
Figura 4–4:	Niveles de agua simulados para la capa 2.....	37
Figura 4–5:	Niveles de agua simulados para la capa 3.....	37
Figura 4–6:	Niveles estáticos de agua observado (en metros sobre el nivel del mar, msnm)	38
Figura 5–1:	Ajuste de recesión a los caudales mínimos medidos a la salida de la cuenca	39

1 Introducción

Este informe hace parte del Volumen 2 “Estudio del Acuífero Patiño”, informe técnico final del proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA” (FEHS). Los otros volúmenes tratan el banco de datos hidrogeológicos y las metodologías y capacitación del Departamento de Recursos Hídricos.

Se da énfasis en las pruebas hidráulicas de bombeo ó ensayos de acuífero, ya que es una de las formas usuales para determinar los parámetros geohidráulicos de un medio poroso saturado con agua, y además es uno de los ítems contemplados dentro de los términos de referencia y propuesta del proyecto. Sin embargo, aunque no está contemplado dentro del alcance del estudio, se da más amplitud, haciendo un análisis un poco más completo y profundo, considerando no solamente las pruebas hidráulicas, sino otros aspectos conexos con la geohidráulica del Acuífero Patiño en la Zona Piloto, como son los aspectos de infiltración, flujo base (subsuperficial), modelo conceptual y modelo matemático preliminares.

La importancia de la determinación de los parámetros geohidráulicos radica fundamentalmente en el siguiente aspecto: el Acuífero Patiño es la fuente principal de abastecimiento de agua potable e industrial en la Zona Piloto. Actualmente en esta zona de 45 km² se usa intensivamente el acuífero, extrayendo aproximadamente 13.5 millones de m³ de agua al año, lo que equivale a un caudal de extracción media de 1541 m³/hr (428 l/s). Por lo tanto para manejar, optimizar y desarrollar esta fuente de agua, es importante conocer la hidrodinámica del sistema acuífero, la forma como se ha comportado en el pasado, con su sistema de flujo, sus variaciones espaciales y temporales, y la forma como se espera se comporte en el futuro. Para poder cuantificar esta dinámica del acuífero es necesario previamente conocer sus parámetros geohidráulicos.

También es importante tener por lo menos a nivel preliminar una estimación de la infiltración y de las salidas naturales de la cuenca, fundamentalmente las correspondientes a agua subterránea como aporte de flujo base hacia los cauces superficiales.

Finalmente para poder entender y cuantificar el sistema de flujo subsuperficial es importante tener un modelo conceptual del sistema acuífero. A partir de este modelo conceptual se construye un modelo de simulación matemática de carácter preliminar (ya que uno definitivo se sale del alcance del presente estudio), pero que en un futuro puede llegar a ser operacional para simulaciones en tiempo real.

Agradecimientos

Se agradece al grupo del Departamento de Recursos Hídricos del SENASA, en particular al supervisor del área: Armindo Brites, por su gran apoyo en campo. También al apoyo del personal de las Juntas de Saneamiento de Ñemby, Mbocayaty y Caaguazú, y de la aguatería comunitaria Solares de Ñemby, quienes apoyaron y permitieron ejecutar las pruebas. Finalmente se reconoce el apoyo y colaboración de Jac van der Gun de TNO.

2 Métodos utilizados para pruebas de bombeo

Básicamente se utilizaron los métodos analíticos tradicionales de análisis de ensayos de acuífero en estado transitorio y estacionario, y un análisis numérico.

Los métodos se tratan ampliamente en la literatura hidrogeológica (véase por ejemplo, Walton 1970, Kruseman y De Ridder, 1975, ó Kresic, 1997), y solamente se dan algunas bases conceptuales. Fundamentalmente se utilizaron los métodos de Theis y Jacob para comportamientos confinados y de tabla de agua (este últimos en forma aproximada). Comportamientos típicos de tabla de agua con el método de Neuman y de tipo semiconfinado con el método de Hantush. También se utilizó el método de kernels discretos para interpretación de las pruebas en su totalidad con las fases de bombeo y recuperación. Finalmente en uno de los casos se utilizó modelación numérica para simular la prueba de bombeo como sistema multicapa.

2.1 Método de Jacob

El método lineal de Jacob (siendo una aproximación a la ecuación de Theis) se utilizó para acuíferos confinados y en algunos casos para libres. Siempre se tuvo en cuenta el tiempo para el cual la linealidad se cumple para determinar gráficamente y numéricamente la validez de este método.

La metodología consiste en el ajuste matemático, ó gráfico (visual) de los datos de campo a la ecuación básica de Jacob, la cual es:

$$s = \frac{2.3 Q}{4 \pi T} \log \left(\frac{2.25 T t}{r^2 S} \right) \quad (2.1)$$

En donde,

s	es el abatimiento en metros
Q	es el caudal de bombeo en m ³ /d
T	es la transmisividad del acuífero en m ² /d
S	es el coeficiente de almacenamiento en m ³ /m ³
t	es el tiempo desde que comenzó el bombeo Q
r	es la distancia al pozo de bombeo en m

Esta ecuación también se puede aplicar en forma aproximada en acuíferos libres cuando el abatimiento es pequeño comparado con espesor saturado, obteniendo los

mismos parámetros anteriores, solo que en lugar de S se tienen la porosidad eficaz ó producción específica S_y .

Es importante anotar que esta ecuación es solamente válida para valores de u menores a 0.01:

$$u < 0.01$$

En donde,

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.2)$$

En una de las pruebas fue posible hacer análisis de distancia abatimiento, utilizando la ecuación (2.1) ligeramente diferente:

$$s = \frac{2.3 Q}{4 \pi T} \log\left(\frac{2.25 T t}{S}\right) - \frac{2.3 Q}{2 \pi T} \log(r) \quad (2.3)$$

2.2 Método de Theis

El método de Theis se utilizó para acuíferos confinados y también algunos casos para acuíferos libres con las mismas consideraciones expuestas en el método de Jacob. La ventaja del método es la aplicación en todo el rango no lineal de la prueba. Sirve también en forma aproximada para comportamientos semiconfinados durante tiempos cortos ó cuando el goteo no es significativo.

La metodología consiste en el ajuste matemático, ó gráfico (visual) de los datos de campo a la ecuación básica de Theis, la cual es:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2.4)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.2)$$

En donde,

s es el abatimiento en metros

Q	es el caudal de bombeo en m ³ /d
T	es la transmisividad del acuífero en m ² /d
S	es el coeficiente de almacenamiento en m ³ /m ³
t	es el tiempo desde que comenzó el bombeo Q
r	es la distancia al pozo de bombeo en m
u	es el argumento de la función de pozo (ecuación 2.2)
W(u)	es una exponencial integral llamada también función de pozo

Esta ecuación también se puede aplicar en forma aproximada en acuíferos libres cuando el abatimiento es pequeño comparado con espesor saturado, obteniendo los mismos parámetros anteriores, solo que en lugar de S se tienen la porosidad eficaz ó producción específica S_y .

2.3 Método de Hantush

El método de Hantush se utilizó para acuíferos semiconfinados (de goteo) ó semi libres (libres con recarga vertical superior ó inferior).

La metodología consiste en el ajuste matemático, ó gráfico (visual) de los datos de campo a la ecuación básica de Theis, la cual es:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \quad (2.5)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.2)$$

En donde,

s	es el abatimiento en metros
r	es la distancia al pozo de bombeo en m
Q	es el caudal de bombeo en m ³ /d
T	es la transmisividad del acuífero en m ² /d
S	es el coeficiente de almacenamiento en m ³ /m ³
t	es el tiempo desde que comenzó el bombeo Q.
u	es el argumento de la función de pozo (ecuación 2.2)
W(u,r/B)	es la función de pozo para acuíferos semiconfinados
B	es el factor de goteo definido por:

$$B = \sqrt{\frac{T \cdot b'}{K'}} = \sqrt{Tc} \quad (2.5)$$

En donde

- b' es el espesor de la capa semiconfinante en m
 K' es la conductividad hidráulica vertical de la capa semiconfinante en m/d
 c es la resistencia hidráulica vertical de la capa semiconfinante en días

2.4 Método de Neuman

El método de Neuman se utilizó para acuíferos no confinados, cuando hay presencia de drenaje diferido.

La metodología como en los métodos anteriores, consiste en el ajuste matemático, ó gráfico (visual) de los datos de campo a la ecuación básica de Neuman, la cual en forma resumida se puede expresar por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(1/u_a, 1/u_b, \eta) \quad (2.6)$$

$$1/u_b = t_s = \frac{Tt}{Sr^2} \quad (2.7)$$

$$1/u_a = t_y = \frac{Tt}{S_y r^2} \quad (2.8)$$

En donde,

$W(1/u_a, 1/u_b, \eta)$ es la función de pozo para acuíferos de tabla de agua

- s es el abatimiento en metros
 r es la distancia al pozo de bombeo en m
 Q es el caudal de bombeo en m³/d
 T es la transmisividad del acuífero en m²/d
 S es el coeficiente de almacenamiento en m³/m³
 S_y es la porosidad eficaz en m³/m³
 t es el tiempo desde que comenzó el bombeo Q
 t_y es el tiempo adimensional para tiempos cortos (tipo a)
 t_s es el tiempo adimensional para tiempos largos (tipo b)

η	parámetro adimensional: $\eta = (Kz/Kr)*(r^2/b^2)$
b	es el espesor saturado inicial del acuífero en m
Kr	conductividad hidráulica horizontal en m/d
Kz	conductividad hidráulica vertical en m/d

2.5 Método de convolución discreta (kerneles)

Básicamente este método consiste en aplicar la ecuación de Theis pero a caudales variables aplicando el principio de superposición.

La solución definitiva se obtiene ajustando por mínimos cuadrados, también con comprobación y ajuste gráfico, los datos de campo a la ecuación de convolución discreta; de manera que se puede utilizar toda la prueba con sus caudales variables ó constantes, ó parte de ella (por ejemplo la recuperación).

2.6 Simulación numérica

La simulación numérica utilizada es por diferencias finitas tridimensionales modelando las condiciones heterogéneas en campo, con sus condiciones iniciales y de frontera, y con sus factores externos. En el anexo E se incluye en forma resumida esta metodología.

3 Pruebas hidráulicas realizadas

3.1 Localización

Se realizaron cuatro (4) pruebas de bombeo, cuya localización se presenta en la Figura 3-1. Inicialmente se tenía previsto efectuar pruebas adicionales en otros pozos particulares, en donde se disponía además de pozos cercanos fuera de servicio para utilizarlos como pozos de observación. Sin embargo, no fue posible que los dueños dieran la autorización para su ejecución.

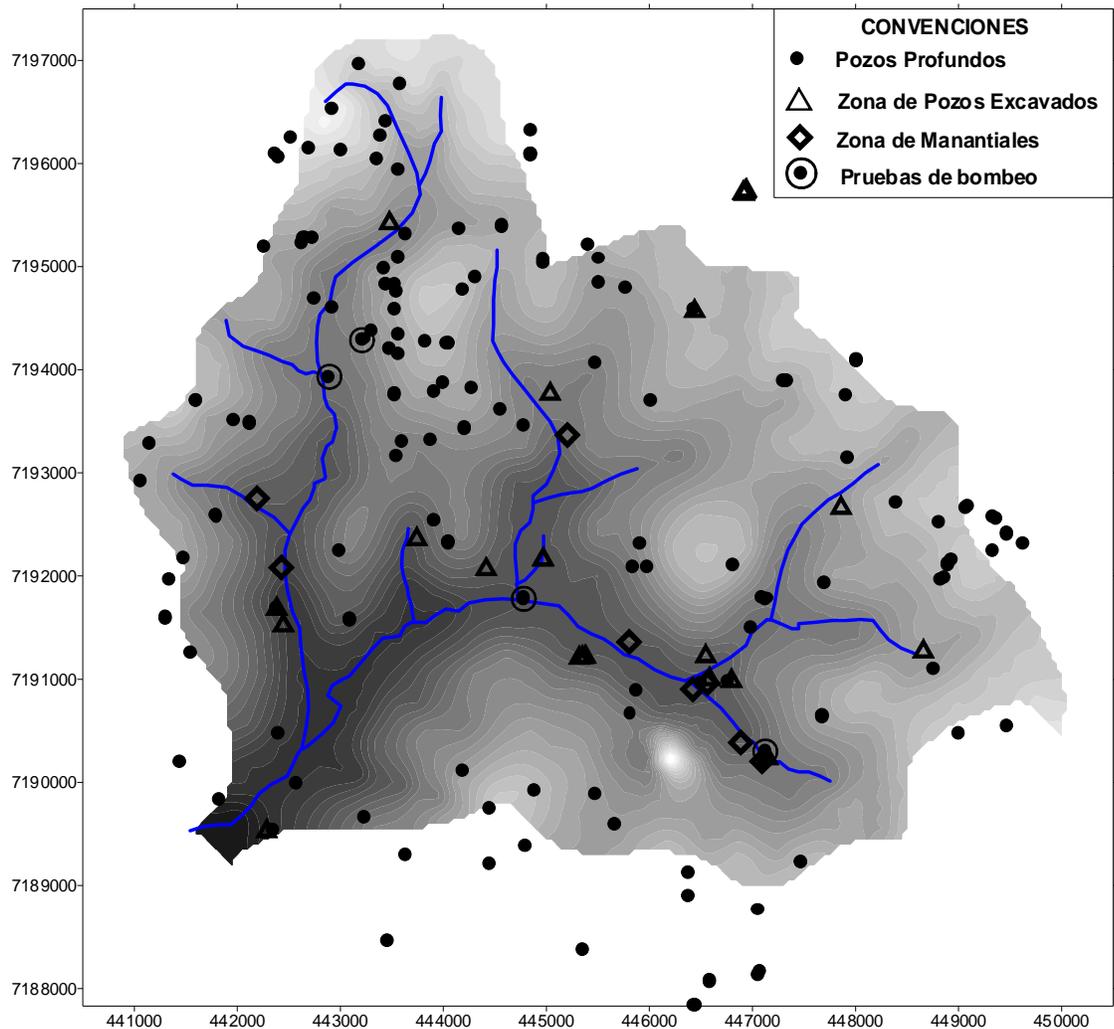


Figura 3-1: Localización de las pruebas de acuífero realizadas

3.2 Relevancia y limitaciones de las pruebas de bombeo

Como se mencionó anteriormente las pruebas de bombeo tienen la ventaja de poder determinar parámetros geohidráulicos característicos del sistema acuífero en la zona de influencia del pozo bombeado; parámetros que con la geología e hidrología del área definen el comportamiento hidrodinámico del flujo subsuperficial.

Sin embargo, los métodos analíticos de pruebas de bombeo requieren de condiciones que no siempre se cumplen ó se cumplen en forma aproximada, como son: acuíferos horizontales, homogéneos, niveles estáticos horizontales antes del bombeo, pozos de observación cercanos, penetrando preferiblemente todo el acuífero y caudal constante de bombeo.

Las condiciones anteriores se cumplieron en forma aproximada, ya que no en todas las pruebas se contó con pozos de observación, tampoco se podía contar con suficiente tiempo para la recuperación ó el bombeo antes de la prueba por la necesidad de mantener los sistemas operando. De manera que se ajustó a los horarios de los proveedores de agua, con alguna colaboración de ellos, sin que implicara alterar sustancialmente el servicio de suministro.

En algunas pruebas el caudal se estimó en forma aproximada por la imposibilidad de medirlo. Durante la recuperación en ocasiones las válvulas de pie no operaron correctamente, teniendo contraflujo y recargando a través del pozo de bombeo. El registro de niveles se efectuó con sonda eléctrica, en algunos casos midiendo fracciones de centímetro lo cual también es otra aproximación. Solamente en un pozo de observación se instaló un registrador automático de niveles ó transductor de presión.

A pesar de estas aproximaciones se estima que se tienen resultados confiables, desechando la información no confiable, dando un rango de resultados que por la naturaleza de las pruebas, la transmisividad determinada puede estar dentro de un 90% de aproximación, y los coeficientes de almacenamiento obtenidos dentro de los órdenes de magnitud presentados.

3.3 Prueba de bombeo en Solares de Ñemby

Esta prueba se realizó en la aguatería privada comunitaria Solares de Ñemby, mediante registro de niveles en dos pozos cercanos al de bombeo.

Los datos de campo para los dos pozos de observación se presentan en el apéndice A. Desafortunadamente se desconoce la información precisa del diseño de los tres pozos (del de bombeo y de los dos de observación). Se tiene información de la profundidad del de bombeo (173 m), pero se desconoce la de los otros dos pozos. La información

aproximada suministrada por los encargados, estiman que los otros pozos deben tener una profundidad aproximada de 100 m.

Por otra parte se programó la prueba para registrar inicialmente recuperación durante las horas nocturnas de bajo consumo de agua, sin embargo la bomba se les apagó (automáticamente) un par de horas antes del inicio, requiriendo por parte de ellos una hora adicional de bombeo para sus necesidades. De manera que hubo necesidad de ajustarse a esta situación midiendo y efectuando las correcciones por el bombeo corto que se requería para los usuarios.

Los datos de la prueba se presentan en el apéndice A, y la gráfica de niveles registrados en las Figura 3-2 y Figura 3-3 para los pozos de observación P1 y P2 respectivamente.

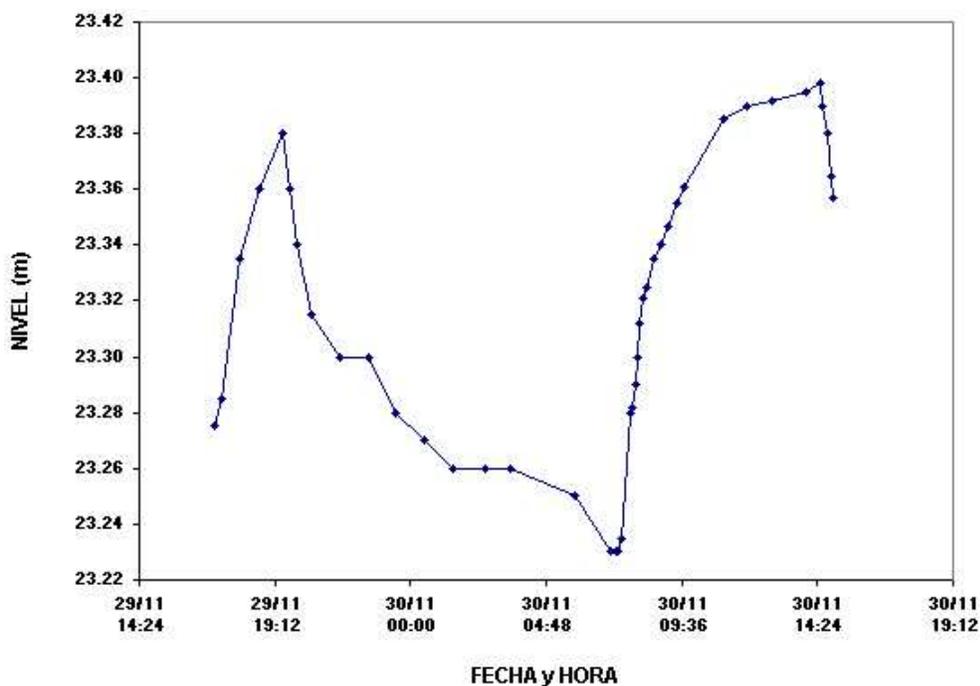


Figura 3-2: Niveles de agua en el pozo de observación P1 durante las pruebas realizadas en Solares de Ñemby

En el pozo de bombeo no fue posible medir niveles, y el caudal se utilizó el valor dado por los proveedores, el cual se estima en forma aproximada por el tiempo de llenado del tanque de distribución. El día de la prueba no fue posible medirlo ya que se requirió abrir la válvula de salida del tanque para distribución a los usuarios.

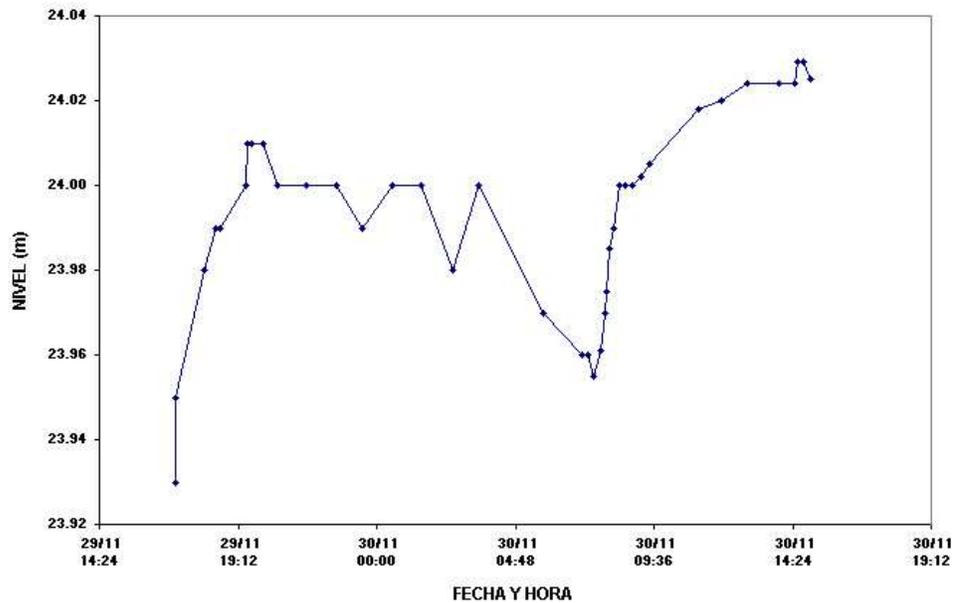


Figura 3–3: Niveles de agua en el pozo de observación P2 durante las pruebas realizadas en Solares de Ñemby

Ya que se desconoce la profundidad de cada pozo de observación, pero es de esperarse que sus filtros estén ubicados en los primeros 100 metros de profundidad y el de bombeo por debajo de los 100 m., es posible que la respuesta observada sea con alguna resistencia hidráulica vertical; por otro lado, el rango de descensos observados fué de solo algunos centímetros, lo cual indica también resistencias hidráulicas verticales, capas diferentes y/ó penetración parcial.

Los descensos observados en el pozo P2 (Figura 3–3), fueron menores, sujetos a la aproximación de la sonda de medición y del observador, por lo tanto se tuvieron en cuenta solo en forma parcial.

Para analizar la recuperación seguida del bombeo, en el pozo P1, se corrigieron los descensos observados por la tendencia medida antes de iniciar la recuperación (Figura 3–4).

Los análisis de Jacob y Theis se presentan en las Figura 3–5 y Figura 3–6 respectivamente, con valores sobre estimados de la transmisividad, por las razones expuestas anteriormente de tener los pozos de observación sus filtros en zonas diferentes a las del bombeo.

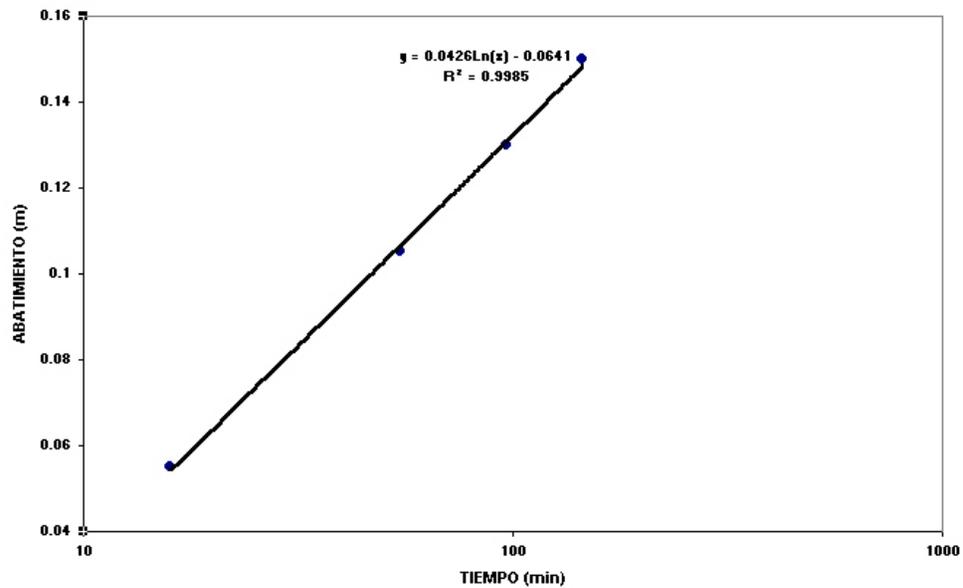


Figura 3-4: Tendencia de los descensos antes de iniciar las pruebas en el pozo P1. Solares de Ñemby.

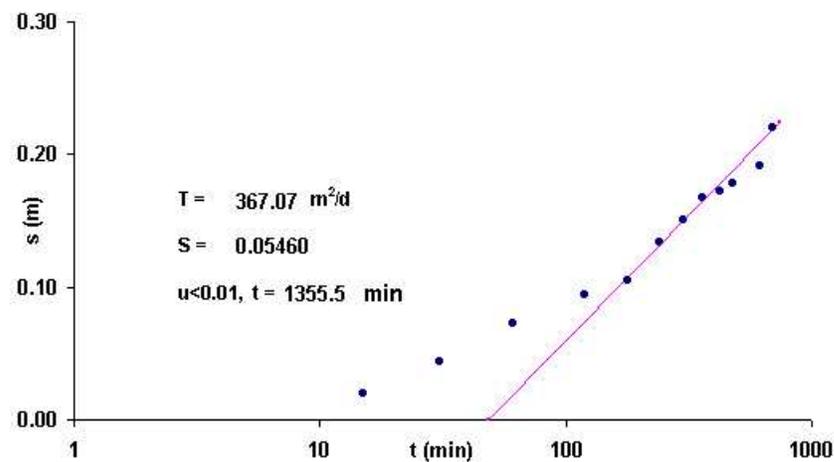


Figura 3-5: Ajuste lineal de Jacob en la recuperación del pozo de observación P1. Solares de Ñemby.

El ajuste de Jacob, no es muy exacto y solo se cumple para valores de t superiores a 1355 min.; Theis se ajusta un poco mejor que Jacob, pero los resultados son similares. Resultados análogos se obtienen con el tiempo adimensional (t/t') para la segunda fase de la prueba (Figura 3-7) y con el modelo analítico de Theis a caudal variable (Figura 3.8) en donde hay un poco más de concordancia entre lo observado y lo calculado, pero aún con valores demasiado altos de la transmisividad.

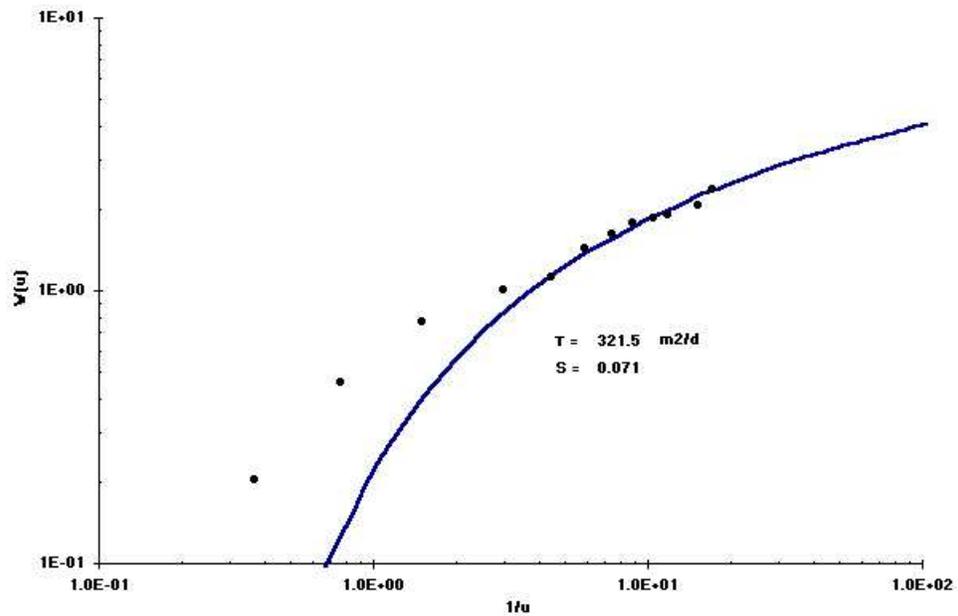


Figura 3-6: Ajuste a la curva de Theis, Pozo de observación P1. Solares de Ñemby.

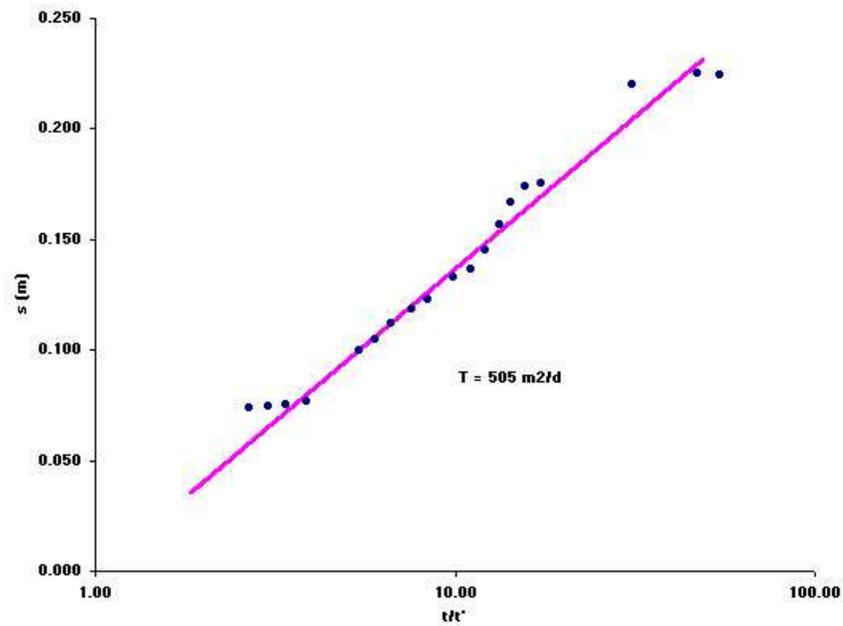


Figura 3-7: Ajuste lineal de Jacob para la segunda fase de la prueba en el pozo de observación P1. Solares de Ñemby

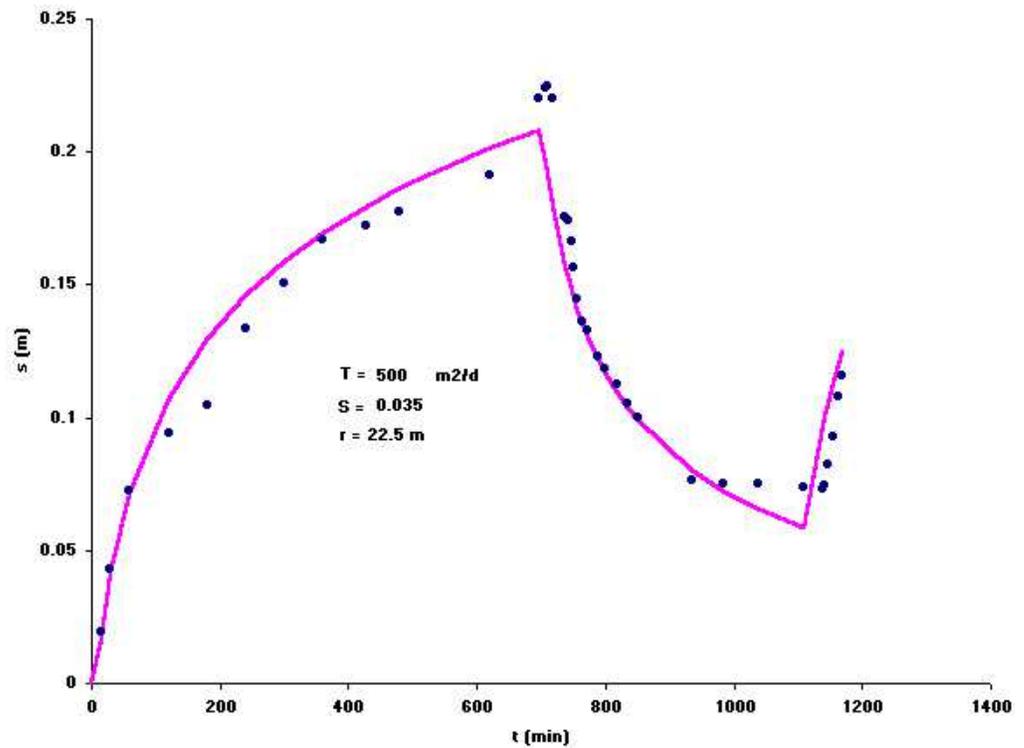


Figura 3-8: Ajuste del modelo analítico de Theis a caudal variable. Pozo de observación P1. Solares de Ñemby

Dado que el comportamiento de la prueba insinúa un drenaje diferido (véase Figura 3-5 y Figura 3-6), y si hay una conexión importante de la zona del pozo de observación a la de bombeo, es de esperarse comportamiento de acuífero libre. Ajustando a las curvas de Neuman tanto par tiempos cortos como par largos se tienen los resultados de la Figura 3-9, en donde ambos grupos de puntos son los mismos solo que desplazados, según se trate de tiempos cortos ó tiempos largos. El ajuste no es tan perfecto, ya que se puede aproximar a otras curvas cercanas, pero si esta dentro de este rango, dando valores mas acordes de la transmisividad. El resultado de porosidad eficaz parece estar un poco sobre estimado.

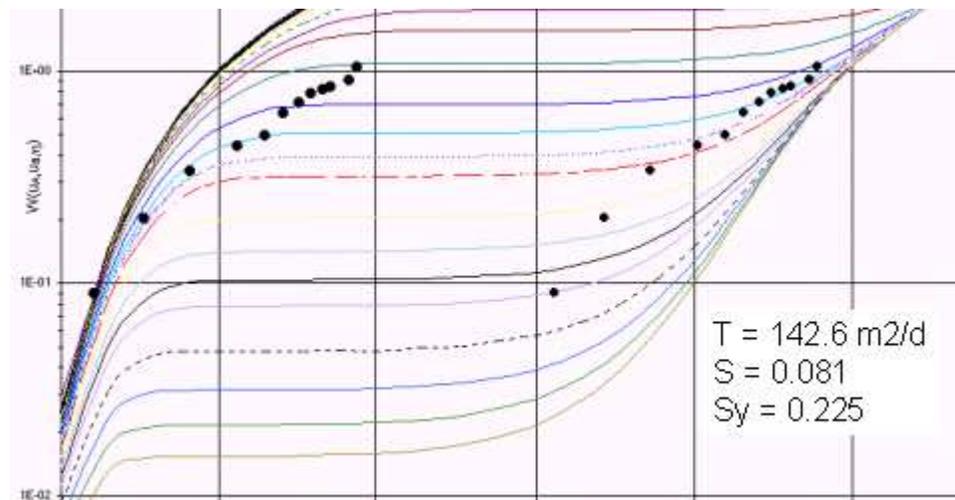


Figura 3-9: Ajuste a las curvas de Neuman. Pozo de observación P1. Solares de Ñemby.

Finalmente se utilizó la información de descensos de ambos pozos de observación para efectuar un análisis de la ecuación de Jacob distancia-abatimiento, aunque una vez más se insiste en la aproximación de los métodos para las condiciones de la prueba y de la poca magnitud de descensos observados en el pozo de observación P2. Para tener datos más relevantes (con la aproximación de Jacob), se cogieron datos hacia el final de cada una de las etapas de bombeo. Los resultados se presentan en la figura 3-9. para varios tiempos de bombeo. En teoría todas las rectas deben ser paralelas para valores de $u < 0.01$ y en forma aproximada se cumple este comportamiento. El rango de transmisividades obtenidas se ajustan un poco más con los valores esperados.

A continuación se da una tabla resumen de los resultados obtenidos con este método de distancia-abatimiento:

t (min)	T (m2/d)	S	u
97	299	0.02	0.22
146	270	0.03	0.22
1083	309	0.04	0.03
1131	299	0.05	0.04
1184	305	0.05	0.04
1286	286	0.07	0.06
1289	302	0.07	0.05

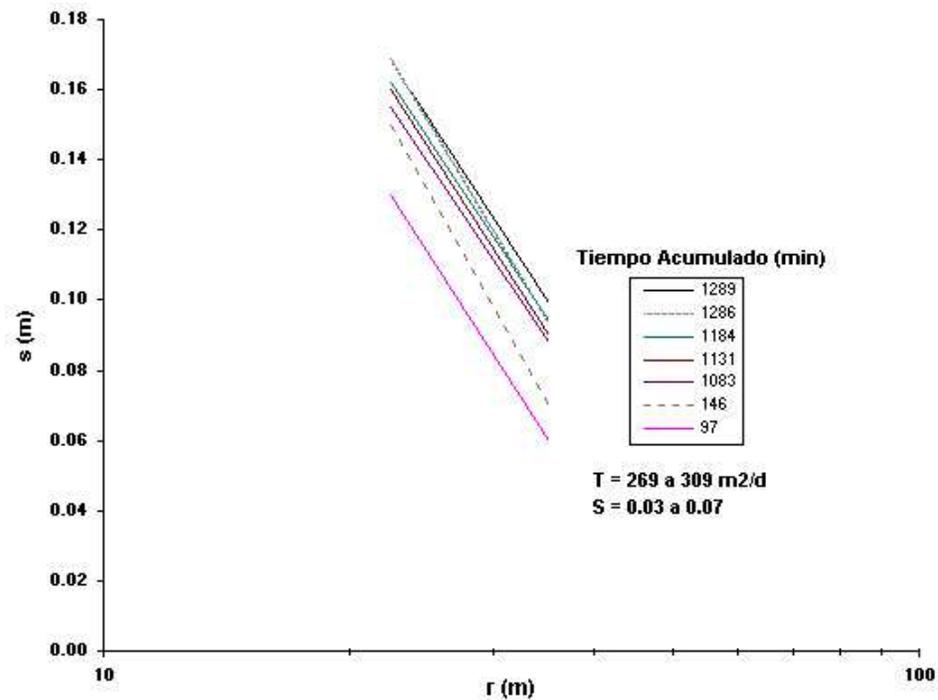


Figura 3–10: Método lineal de Jacob distancia-abatimiento. Solares de Ñemby.

Puede observarse en la tabla anterior que no se cumple la aproximación de Jacob, ya que se tienen valores de $u > 0.01$, sin embargo para tiempos largos (a partir de 1083 min), son valores que aunque no en forma rigurosa sí se aproximan a la linealidad de Jacob. También se observa que el coeficiente de almacenamiento tiende a aumentar con el tiempo, de manera que posiblemente aún se está en tiempos cortos para tener un drenaje diferido bien desarrollado, en donde aumentaría con el tiempo el valor obtenido del coeficiente de almacenamiento hacia valores característicos de la porosidad eficaz.

Utilizando los métodos que se consideran más relevantes para esta prueba: el de Neuman y de Jacob distancia abatimiento, se concluye que la transmisividad para esta zona está entre 140 a 300 m²/d. Para un espesor promedio de 150 metros se obtiene una conductividad hidráulica entre 0.9 a 2 m/d. El valor de porosidad eficaz debe ser menor que el obtenido con el método de Neuman, y mayor al obtenido con el método de distancia abatimiento, se sugiere un valor entre 0.1 y 0.2

Resumen de resultados en la prueba de bombeo en Solares de Ñemby:

Transmisividad T:	140 a 150 m ² /d
Porosidad Eficaz (Sy):	0.1 a 0.2
Conductividad Hidráulica (K)	0.9 a 2 m/d.

3.4 Prueba de bombeo en el pozo 2 de la Junta de Saneamiento de Ñemby

Esta prueba se realizó en el pozo 2 de la Junta de Saneamiento de Ñemby, aprovechando el hecho de tener un pozo abandonado a 10.02 m del de bombeo. La zona corresponde a una zona de agua surgente. Se instaló un medidor de caudales a la salida del pozo de bombeo, desafortunadamente tampoco se pudieron registrar los niveles en el mismo; en el pozo de observación se instaló un suplemento de tubería adicional para lograr registrar mas número de niveles durante la recuperación (debido a la surgencia).

Ambos pozos tanto el de bombeo como de observación están en la misma zona acuífera, que de acuerdo a los datos litológicos corresponden a un acuífero fundamentalmente de areniscas finas a gruesas friables. El pozo de observación se perforó hasta 80 m, pero se entubó hasta 50 m (por problemas de estabilidad de las paredes del pozo), el de bombeo se perforó hasta 100 m, pero se entubó hasta 70 m.

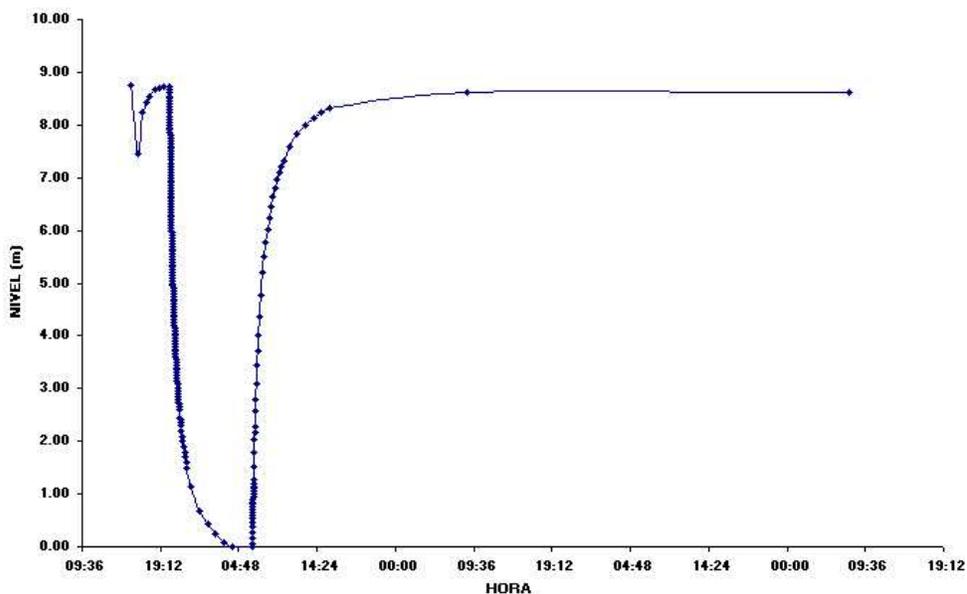


Figura 3-11: Niveles de agua en el pozo de observación durante las pruebas realizadas en el pozo 2 de Ñemby.

El objetivo de campo, nuevamente medir la recuperación después de una operación prolongada de bombeo, y registrar la fase posterior de bombeo. El día de la prueba, durante los primeros minutos se llevó a cabo la soldadura del suplemento de tubería en el pozo de observación, en donde por razones de energía hubo necesidad de apagar la bomba del pozo. Los datos de la prueba se presentan en el apéndice B, y la gráfica de niveles registrados en la Figura 3–11.

Como puede observarse aún con el suplemento de tubería adicional, el pozo de observación sigue teniendo surgencia.

En las figuras 3-12 y 3-13 se presenta el comportamiento de los descensos graficados en escala semilogarítmica. La gráfica sugiere semiconfinamiento, la zona de inflexión es bastante amplia por lo que el método de Jacob puede dar estimativos de transmisividad (T) y almacenamiento (S), para factores de goteo bajos, teniendo los siguientes resultados:

Método de Jacob:

$$T = 38.06 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$S = 0.0024.$$

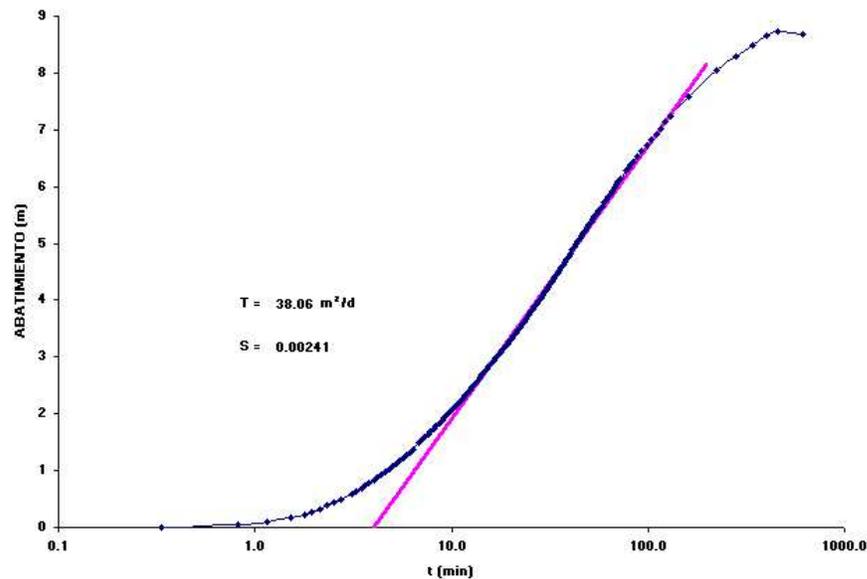


Figura 3–12: Ajuste de la primera fase de la prueba (recuperación) a la ecuación de Jacob. Ñemby.

En la Figura 3-13 se incluye toda la prueba con sus dos fases, ajustada con la simulación analítica de toda la prueba (kerneles discretos). Se puede observar que el ajuste es mejor que el de Jacob, pero aún con algunas diferencias por los efectos del goteo. Con este método se obtienen los siguientes resultados (similares a los de Jacob):

Método de simulación analítica con Q variable:

$$T = 34 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$S = 0.0027.$$

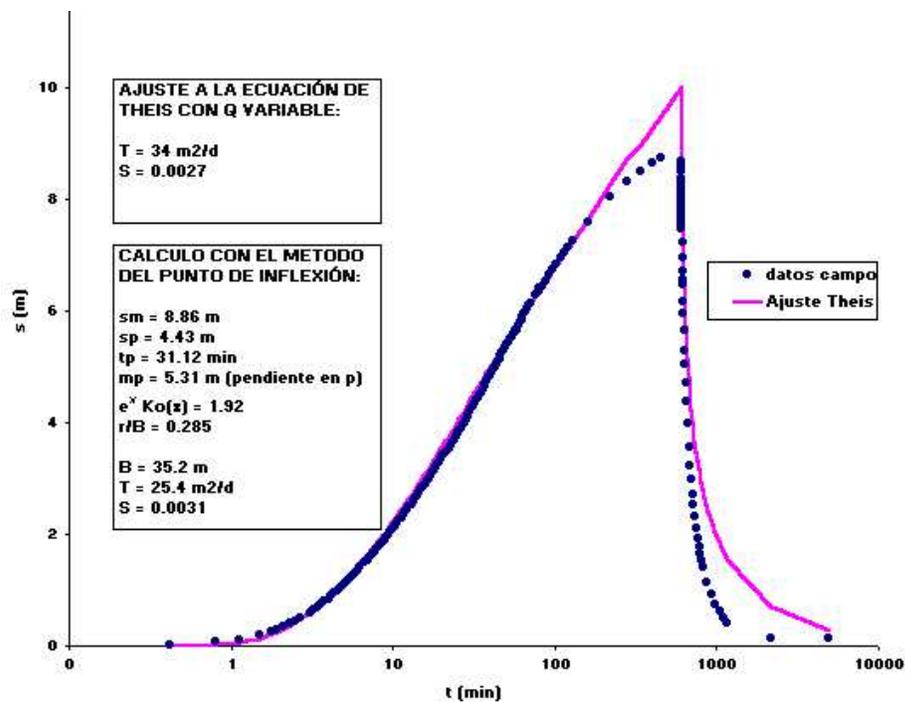


Figura 3-13: Modelo analítico de Theis a caudal variable y método del punto de inflexión de Hantush. Ñemby

Utilizando el método del punto de inflexión de Hantush, se obtienen los siguientes resultados:

Método del punto de Inflexión de Hantush:

$$T = 25.4 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$S = 0.0031$$

$$B = 35.2 \text{ m (factor de goteo)}$$

$$c = 48.8 \text{ días (resistencia hidráulica)}$$

Se utilizó el método del ajuste de los datos a las curvas de Hantush (véase Figura 3–14); se nota un cambio de pendiente o tendencia de la curva en esta fase (de recuperación) de la prueba, el cual puede sugerir algún drenaje diferido ya que de acuerdo a la litología de los pozos el comportamiento es libre. Sin embargo este cambio sucede en los primeros 5 minutos de la prueba (véase figuras 3-12 ó 3-13), razón por la cual no se tomaron en cuenta, y por otra parte se intentó ajustar comportamientos de drenaje diferido sin éxito.

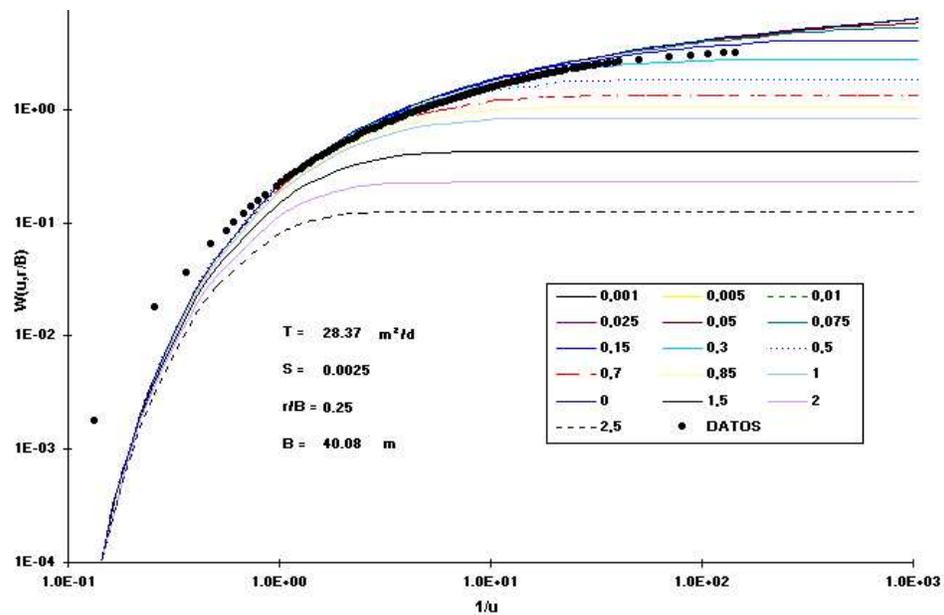


Figura 3–14 Datos de la recuperación ajustados a las curvas de Hantush. Ñemby.

Los resultados obtenidos con este método son:

Método gráfico de Hantush

$$T = 28.4 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$S = 0.0025$$

$$B = 40.1 \text{ m (factor de goteo)}$$

$$c = 56.6 \text{ días (resistencia hidráulica)}$$

Los resultados de la segunda fase de la prueba (bombeo) son similares a la primera, en forma gráfica se presentan en las figuras 3-15 y 3-16 ajustando los datos a la ecuación de Jacob, utilizando el método del punto de inflexión y el ajuste a las curvas patrón de Hantush.

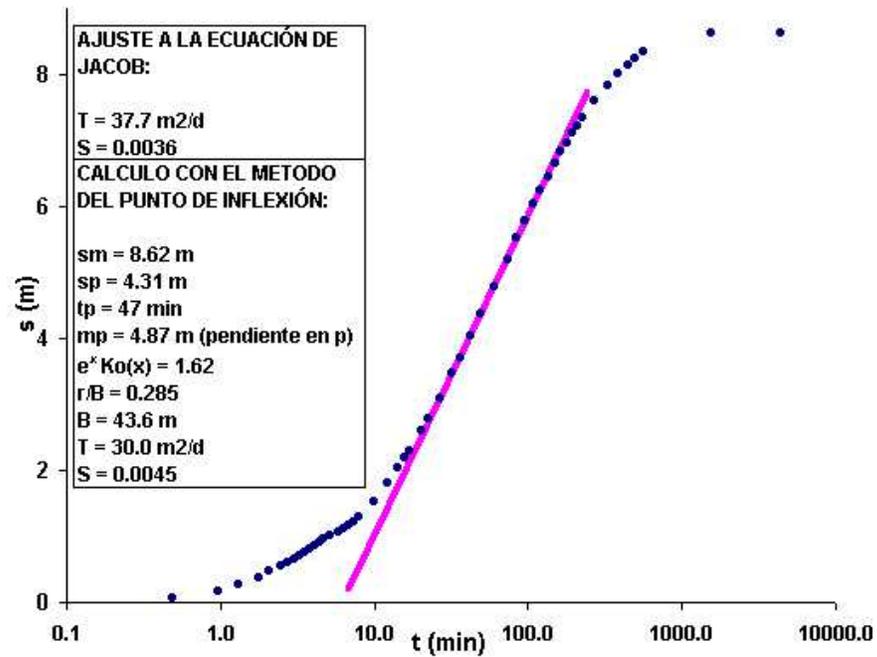


Figura 3-15: Método de Jacob y método del punto de inflexión de Hantush. Ñemby

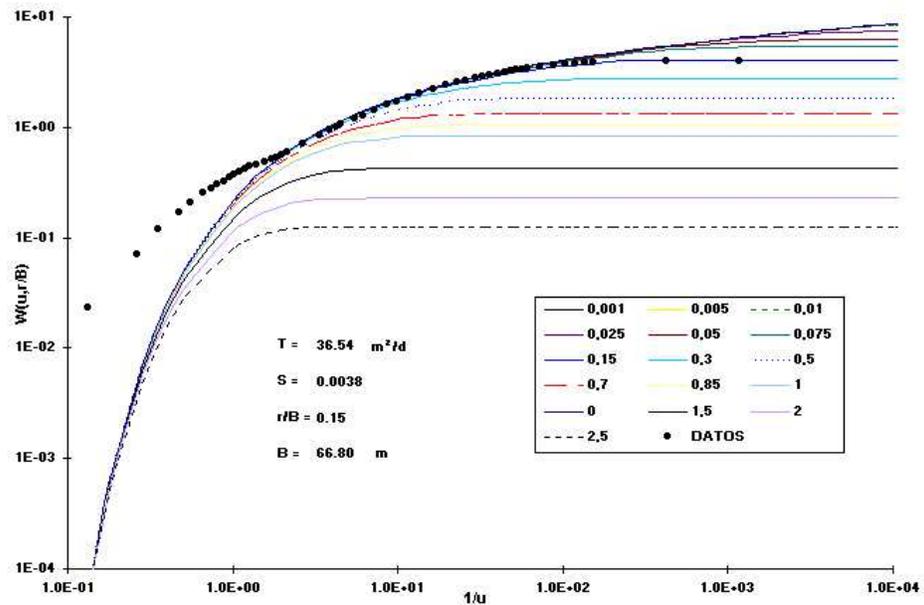


Figura 3-16 Datos del bombeo ajustados a las curvas de Hantush. Ñemby.

Resultados del método del punto de Inflexión de Hantush:

$$\begin{aligned}T &= 30.0 \text{ m}^2/\text{d} \\S &= 0.0045 \\B &= 43.6 \text{ m (factor de goteo)} \\c &= 63.4 \text{ días (resistencia hidráulica)}\end{aligned}$$

Resultados del método gráfico de ajuste a curvas patrón de Hantush:

$$\begin{aligned}T &= 36.54 \text{ m}^2/\text{d} \\S &= 0.0038 \\B &= 66.8 \text{ m (factor de goteo)} \\c &= 122.1 \text{ días (resistencia hidráulica)}\end{aligned}$$

En general el comportamiento de esta prueba tanto durante su primera fase de recuperación como en su fase posterior de bombeo fue bastante homogénea, teniendo una transmisividad para esta zona está entre 26 a 35 m²/d. Para un espesor promedio de 60 metros se obtiene una conductividad hidráulica entre 0.4 a 0.6 m/d. El coeficiente de almacenamiento está entre 0.003 a 0.005. Las resistencias hidráulicas obtenidas están entre 50 a 120 días; considerando los primeros 40 metros como espesor de goteo se obtiene una conductividad hidráulica vertical entre 0.2 a 0.6 m/d.

Es importante notar que la conductividad hidráulica vertical registrada en el análisis de las pruebas es aproximadamente del mismo valor que la horizontal, teniendo por lo tanto en este sitio un acuífero aproximadamente isótropo hasta la superficie.

Resumen de resultados:

Transmisividad T:	26 a 35 m ² /d
Coefficiente de almacenamiento (S):	0.003 a 0.005
Conductividad hidráulica horizontal (K)	0.4 a 0.6 m/d.
Conductividad hidráulica vertical (K')	0.2 a 0.6 m/d.

3.5 Prueba de bombeo en el pozo de la Junta de Mbocayaty (Ñemby)

Esta prueba se realizó únicamente con observaciones en el pozo de bombeo de la Junta de Saneamiento de Mbocayaty, ya que aunque no se disponía de pozo de observación, mostraron interés en colaborar y colocar en su pozo una tubería para registrar los niveles de agua. Desafortunadamente no fue posible medir el caudal, dado que durante el bombeo, por razones de suministro de agua abrieron la válvula del tanque de almacenamiento, de manera que se tiene un caudal aproximado de acuerdo a las medidas existentes.

El pozo tiene una profundidad de 128 metros con su zona de filtros por debajo de los 90 m. de profundidad.

El objetivo de campo, una vez más medir la recuperación después de una operación prolongada de bombeo, y registrar la fase posterior de bombeo. Los datos de campo se presentan en el apéndice C y la gráfica de niveles registrados en la Figura 3-17.

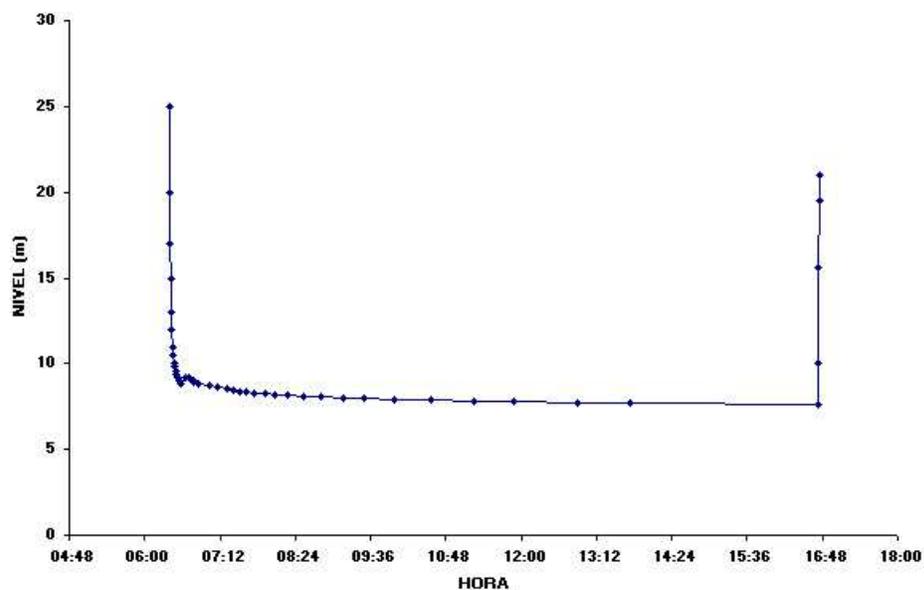


Figura 3-17: Niveles de agua durante las pruebas en el pozo de bombeo de Mbocayaty.

Los primeros minutos de la prueba (10 min) se vieron afectados por la válvula de retención (ó de cheque) en mal estado pasando agua de regreso hacia el pozo.

Dado que es un pozo de bombeo y se desconoce las pérdidas en el mismo pozo y su radio efectivo solamente tiene relevancia los valores de transmisividad obtenidos.

El ajuste lineal de Jacob se presenta por la primera fase (recuperación) en la Figura 3-18 obteniendo un valor de transmisividad de $168 \text{ m}^2/\text{d}$; puede observarse los efectos del almacenamiento en el pozo mismo de bombeo.

El ajuste a la ecuación de Theis se presentan en la Figura 3-19, obteniendo un valor de transmisividad de $171 \text{ m}^2/\text{d}$.

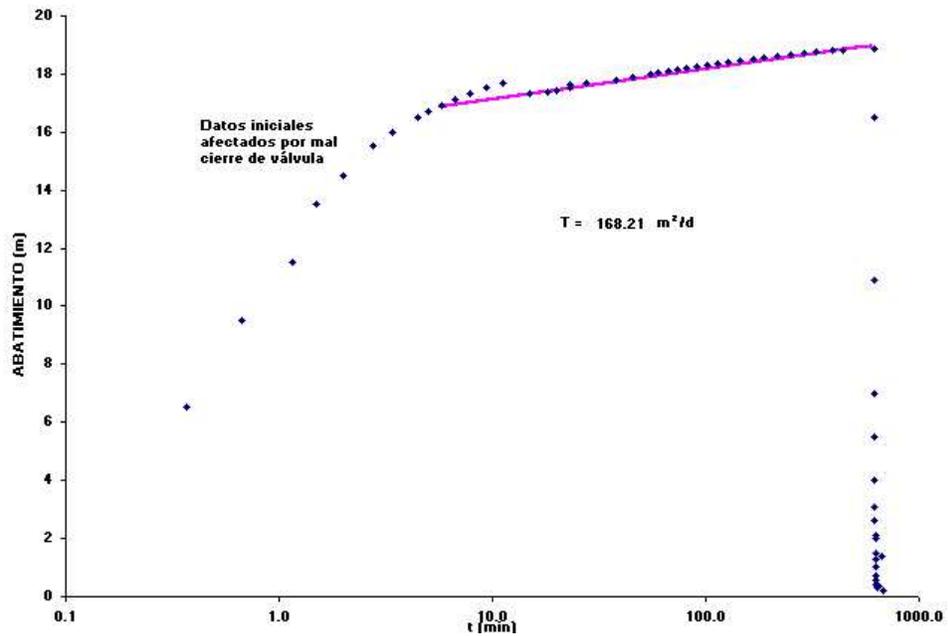


Figura 3-18: Ajuste lineal de Jacob durante la recuperación. Mbocayaty

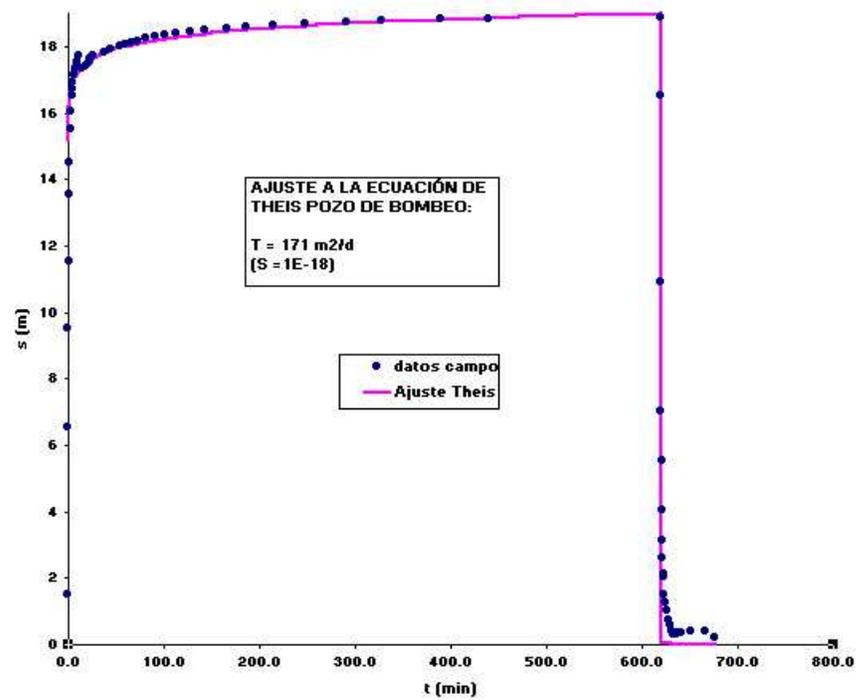


Figura 3-19: Ajuste de Theis durante toda la prueba. Mbocayaty

Considerando el bombeo después de la recuperación, ajustando los tiempos como tiempos adimensionales (véase Figura 3-20), se obtiene una transmisividad de $170 \text{ m}^2/\text{d}$. En esta misma gráfica se incluye también los datos obtenidos durante la primera fase de la prueba. Para un espesor promedio efectivo de flujo superior a la longitud de filtros (32 m), pero inferior al espesor saturado (120 m), estimado en 70 m se obtiene una conductividad hidráulica del orden de los 2.5 m/d .

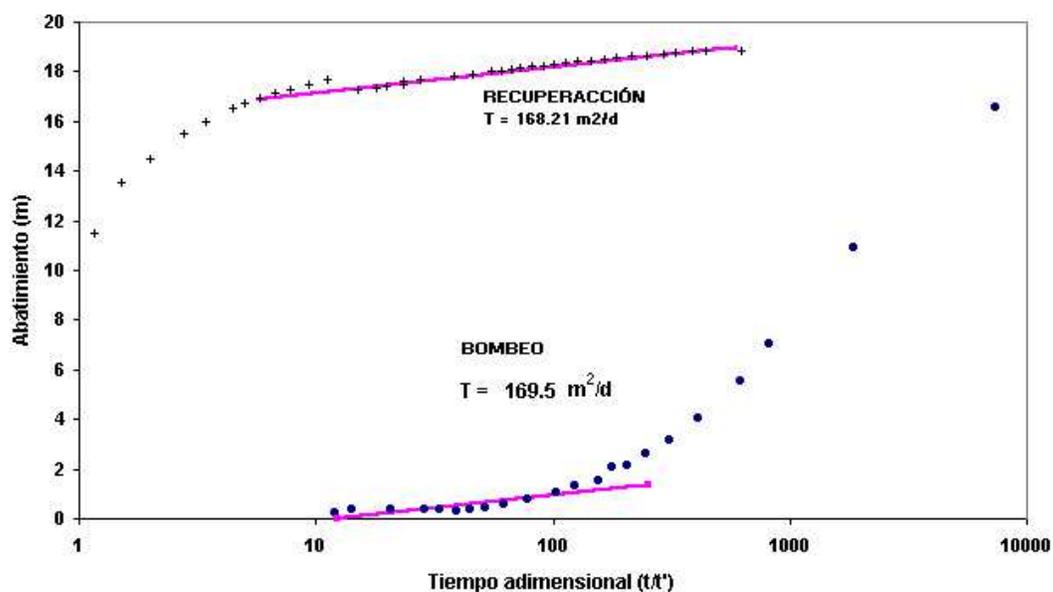


Figura 3–20: Ajuste de Jacob durante el bombeo. Mbocayaty.

Resumen de resultados

Método de Jacob (recuperación):	T=	$168 \text{ m}^2/\text{d}$
Método de Theis (recuperación y bombeo)	T=	$171 \text{ m}^2/\text{d}$
Método de Jacob (bombeo)	T=	$169 \text{ m}^2/\text{d}$.
Conductividad hidráulica	K=	2.5 m/d

3.6 Prueba de bombeo en el pozo 2 de la Junta de Caaguazú (Ñemby)

Esta prueba se realizó registrando los niveles en el pozo de bombeo, el cual tiene filtros entre los 110 y 145 metro de profundidad, en un pozo cercano construido a menor

profundidad, con filtros entre los 26 y 32 metros. Se pudo registrar también el caudal de bombeo.

A diferencia de las pruebas anteriores en esta prueba se pudo bombear en la primera fase seguida por una segunda fase de recuperación. También se instaló en el pozo de observación un registrador automático de niveles (trasductor de presión), y por encima de la tabla de agua otro medidor de presión barométrica y temperatura. Los datos de campo se presentan en el apéndice D y la gráfica de niveles registrados en el pozo de bombeo en la Figura 3-21 y en el pozo de observación en la Figura 3-22; estos niveles ya están corregidos por presión y temperatura cuyo comportamiento se presenta en la Figura 3-23.

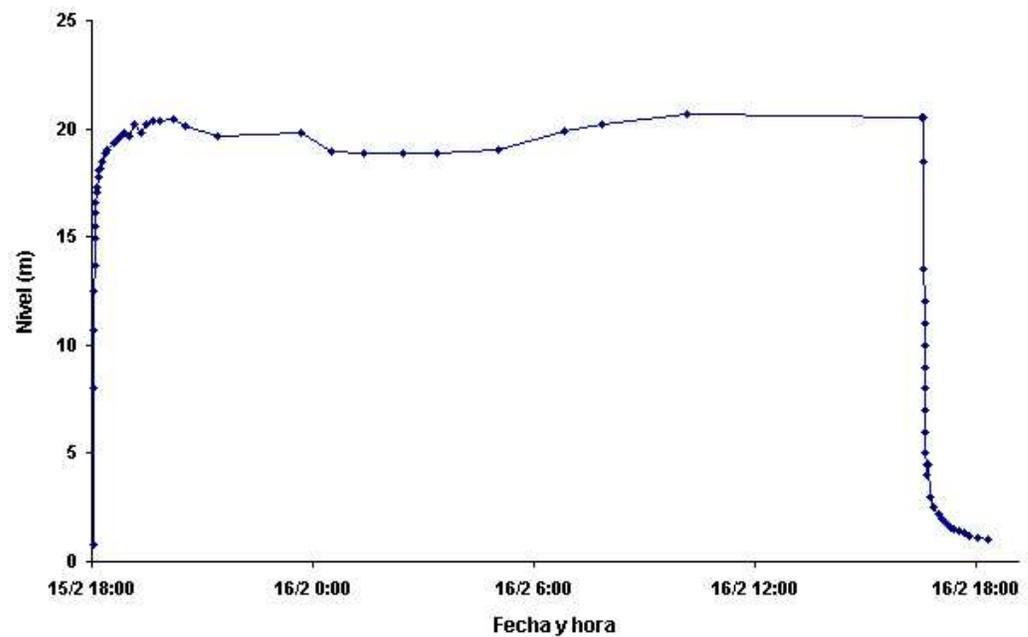


Figura 3-21: Niveles de agua medidos durante las pruebas en el pozo de bombeo P3 de Caaguazú.

Como se observa en el figura 3-22, comenzó a descender los niveles en el pozo de observación por efecto del pozo de bombeo pero un día después de iniciar (como a las 14:30) se observa claramente el abatimiento adicional por efectos de otro pozo que seguramente capte los mismos niveles que los del pozo de observación. Este hecho se comprobó días después, logrando determinar en forma aproximada el caudal de bombeo para efectos de cálculos.

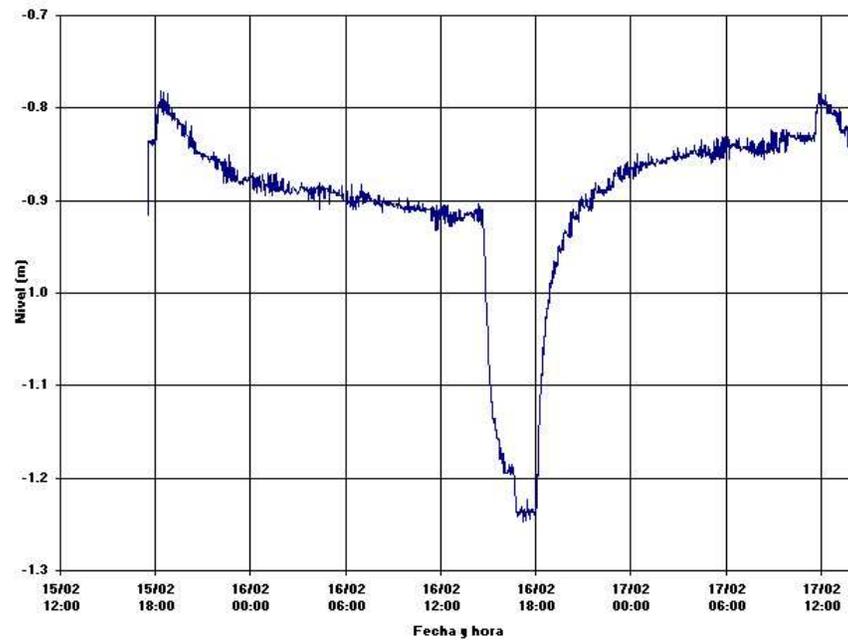


Figura 3–22: Niveles de agua (ya corregidos por presión y temperatura) en el pozo de observación. Caaguazú.

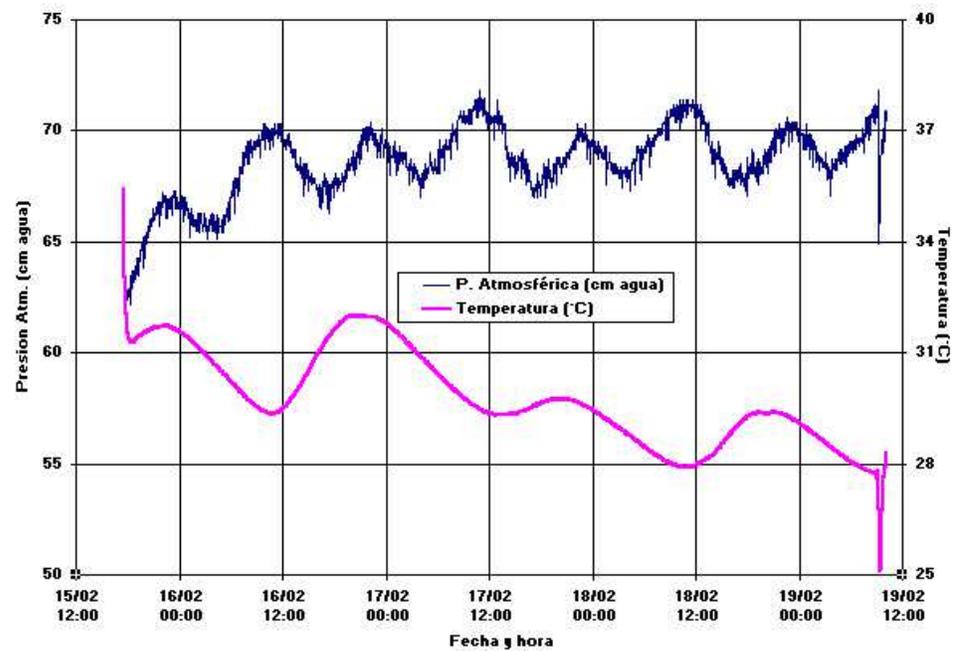


Figura 3–23: Variación de presión y temperatura durante la prueba de bombeo en Caaguazú.

Los descensos observados en el pozo de observación, antes de la influencia del otro pozo están graficados en escala semilogarítmica en la figura 3-24

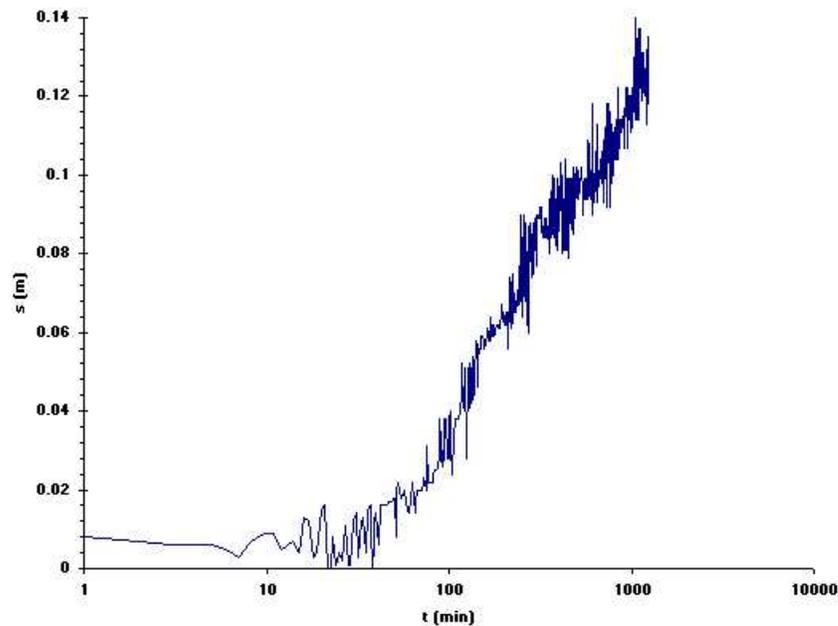


Figura 3-24: Abatimientos registrados en el pozo de observación. Caaguazú.

El pozo de observación está ubicado en una zona acuífera superior y los descensos medidos no corresponden a los descensos de la zona acuífera bombeada, por lo tanto esta información no se puede utilizar para cálculos con los métodos analíticos (sin embargo mas adelante se utilizan para cálculos con simulación numérica).

En el pozo de bombeo si se pudo ajustar toda la prueba, la simulación analítica de Theis a caudal variable se presenta en la Figura 3-25 dando los siguientes resultados:

Método de simulación analítica a caudal variable:

$$T = 70.8 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$S = 1.94 \times 10^{-6} \text{ (aproximado)}$$

$$C = 3 \times 10^{-7} \text{ (coeficiente de pérdidas de cabeza del pozo, aproximado)}$$

$$n=2 \text{ (Exponente del caudal en el término de pérdidas del pozo, aproximado)}$$

El valor del coeficiente de almacenamiento debe tomarse con precaución por que se desconoce el radio efectivo del pozo, para cálculos se ha utilizado el de perforación.

A caudal variable se puede estimar también el coeficiente de pérdidas siendo relativamente alto.

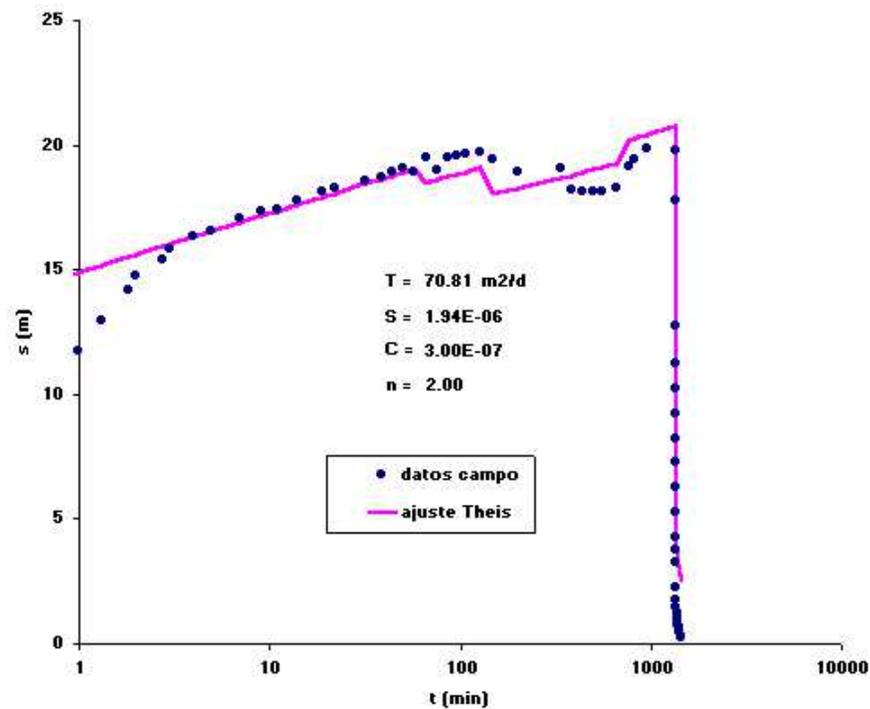


Figura 3–25: Ajuste del modelo analítico de Theis a caudal variable en el pozo de bombeo No.3 de Caaguazú

Con el método de recuperación de Jacob, se obtiene un coeficiente de transmisividad de $77.2 \text{ m}^2/\text{d}$, muy similar al obtenido durante el bombeo.

Método de Jacob para la recuperación:

$$T = 77.2 \text{ m}^2/\text{d}.$$

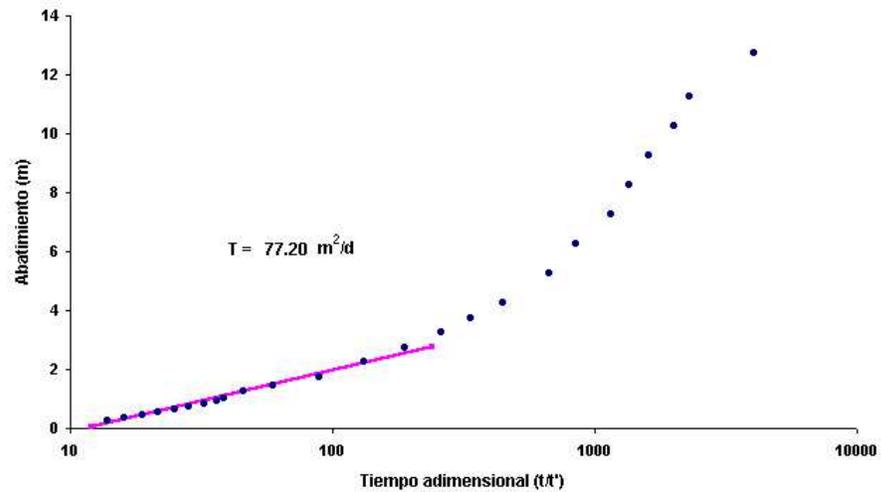


Figura 3-26: Método de recuperación de Jacob. Pozo de bombeo No.3 de Caaguazú.

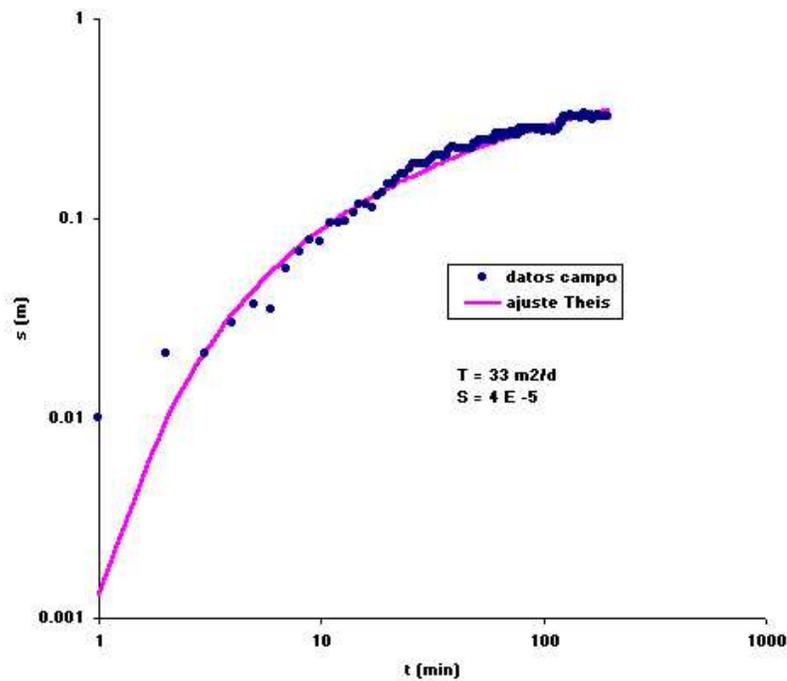


Figura 3-27: Ajuste de Theis a los abatimientos del pozo de observación por influencia del pozo vecino. Caaguazú.

Con la información obtenida del pozo vecino, se pudo ajustar los descensos medidos, tanto para la etapa de solo bombeo, como para parte de la recuperación, ya que también

esta influenciada por la recuperación del otro pozo (del principal). Los resultados aproximados (por desconocer el caudal exacto de bombeo), para la zona acuífera superficial se presentan en las figuras 3-27 y 3-28, obteniendo una transmisividad de $33 \text{ m}^2/\text{d}$ y un coeficiente de almacenamiento S de 4×10^{-5} .

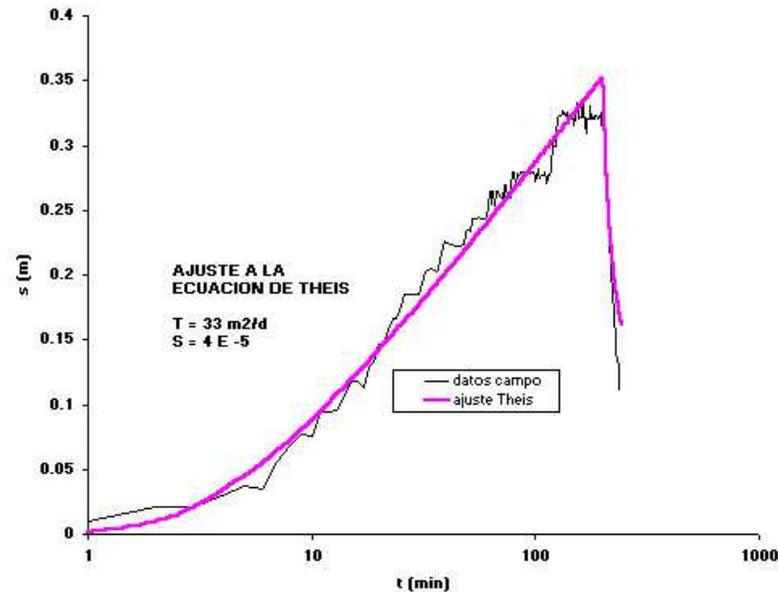


Figura 3–28: Ajuste de Theis a los abatimientos del pozo de observación por influencia del pozo vecino. Caaguazú.

Método de simulación numérica

Para poder utilizar un poco más la información obtenida, y fundamentalmente analizar el tipo de condiciones geohidráulicas entre la zona acuífera profunda y la zona acuífera superficial, se utilizó el modelo numérico de diferencias finitas tridimensionales MODFLOW para simular la prueba, con la interferencia producida por el bombeo alto en la zona profunda y el bombeo bajo en la superficial,.

La malla horizontal de diferencias finitas del modelo se presenta en la Figura 3-29, en donde se ubicaron los dos pozos de bombeo y el pozo de observación. A partir de la información litológica y de los resultados analíticos anteriores, se simuló cuatro capas en la vertical, cuyos parámetros geohidráulicos ajustados por calibración se presentan en la figura 3-30. Estos son los valores finales obtenidos después de correr en estado transitorio varias veces el modelo, utilizando como calibración los niveles medidos en el pozo de observación (Figura 3-22).

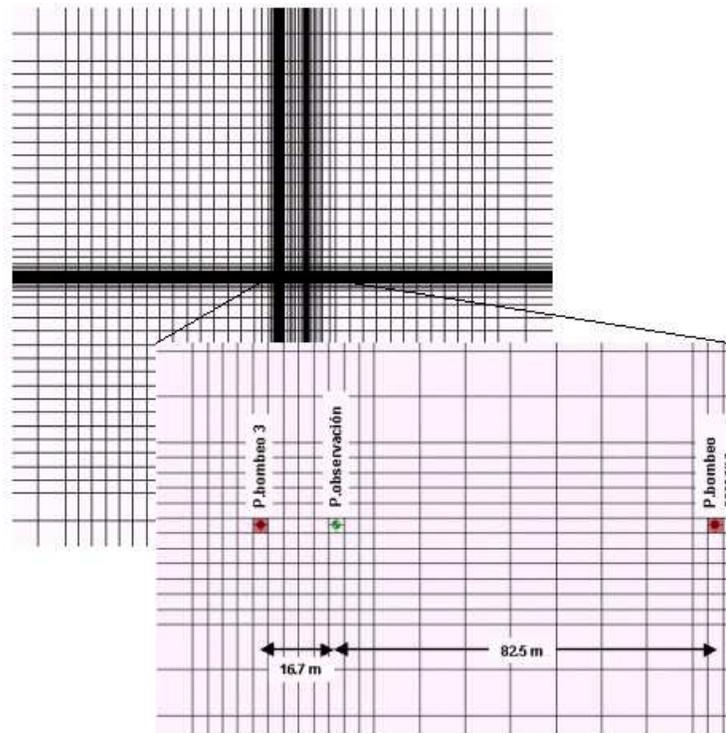


Figura 3–29: Red de diferencias finitas variables para la modelación de la prueba de bombeo en Caaguazú.

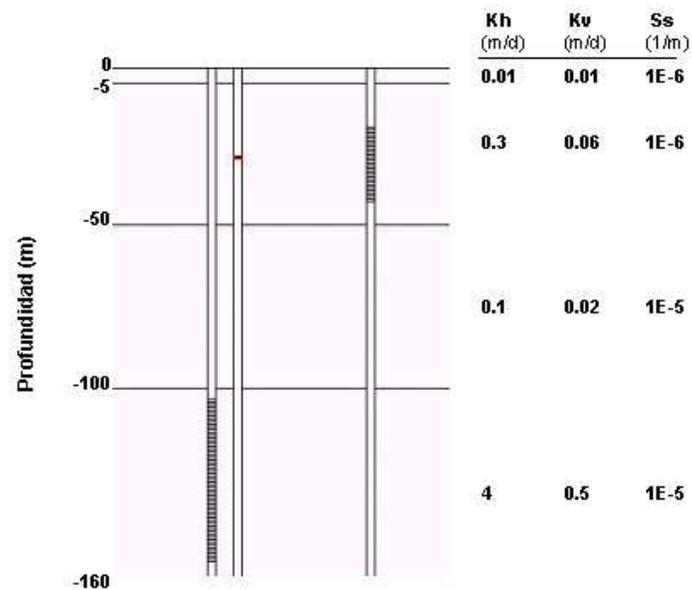


Figura 3–30: Modelo vertical de las capas con los parámetros geohidráulicos. Caaguazú.

Los niveles de agua obtenidos con la simulación del modelo obteniendo los niveles simulados graficados en la figura 3-31.

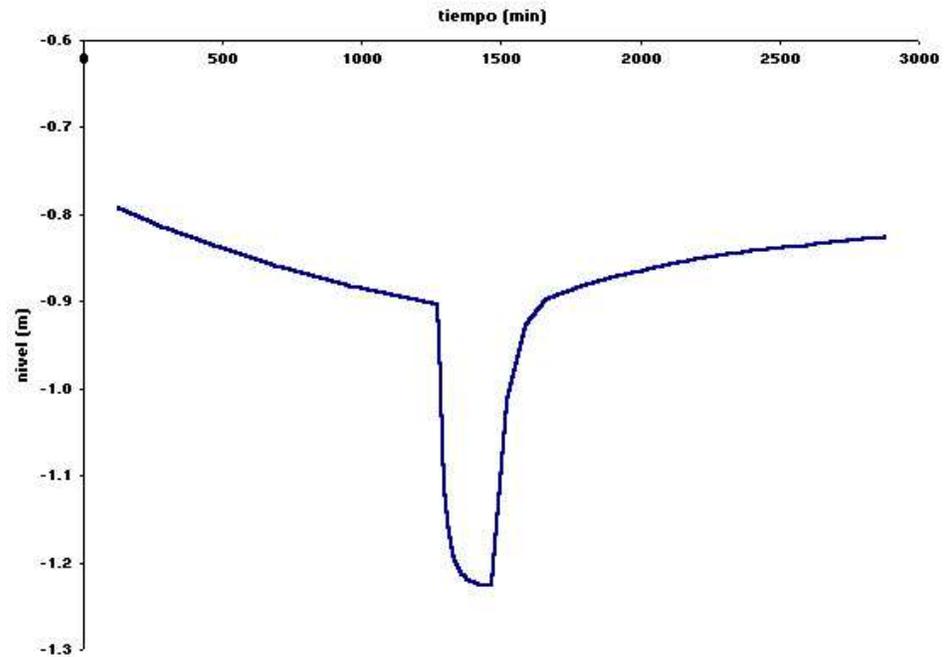


Figura 3–31: Niveles de agua simulados durante la prueba en Caaguazú

Como resultado también se confirma cuantitativamente que en esta zona el sistema acuífero se comporta como multicapa, teniendo una resistencia hidráulica del orden de los 2500 días ($[50\text{m}]/[0.02\text{ m/d}]$) entre la zona acuífera superior e inferior.

Resumen de resultados en Caaguazú

Transmisividad del acuífero superior:	15 a 30 m^2/d
Conductividad hidráulica del acuífero superior:	0.3 a 0.6 m/d
Coefficiente de almacenamiento del acuífero superior:	10^{-5} a 10^{-4}
Transmisividad del acuífero profundo:	70 a 200 m^2/d
Conductividad hidráulica del acuífero profundo:	1 a 4 m/d
Coefficiente de Almacenamiento del acuífero profundo:	10^{-6} a 10^{-4}
Resistencia hidráulica entre los acuíferos superior y profundo:	2500 días

4 Modelo general de flujo

Se presenta en esta sección un modelo general de flujo del Acuífero Patiño en la Zona Piloto, en donde se utiliza el modelo MODFLOW, que simula en 3 dimensiones por diferencias finitas la ecuación tridimensional flujo subsuperficial. En el apéndice E se incluye una descripción resumida de la metodología.

4.1 Red de diferencias finitas y Modelo Conceptual

El modelo conceptual fue bastante simple considerando como tope del sistema acuífero la superficie del terreno y como basamento la interpolación del programa Surfer de las bajas resistividades obtenidas durante el estudio geofísico, con el apoyo de algunos datos de pozos existentes.

En la Figura 4-1 se presenta la red de diferencias finitas utilizadas, mediante una malla uniforme.

Como condición de frontera se consideró la divisoria de aguas superficiales, considerando que coincide aproximadamente con la divisoria de aguas subterráneas en donde el gradiente es aproximadamente horizontal. Puede observarse que también se incluyó el Cerro Ñemby como frontera inactiva.

En la misma figura 4-1 está la ubicación de los ríos considerados como factores externos asignándoles cabezas constantes hacia la parte media y baja de la cuenca, con calores del nivel de agua de acuerdo a la topografía existente.

En la figura 4-2 se presentan un corte a lo largo de la cuenca (en un columna del modelo). Se puede observar la geomorfología del acuífero con sus espesores, las conductividades hidráulicas asignadas y los arroyos simulados.

También se consideró la infiltración sobre la cuenca, teniendo la distribución que se presenta en la figura 4-3. En promedio se modelaron 250 mm/año, siendo un valor que ajusto bastante a las condiciones observadas en campo, hacia los límites de la cuenca y en las zonas altas se simuló una infiltración de 600 mm/año, en la parte media de la cuenca 200 mm/año, y en la parte baja 40 mm/año.

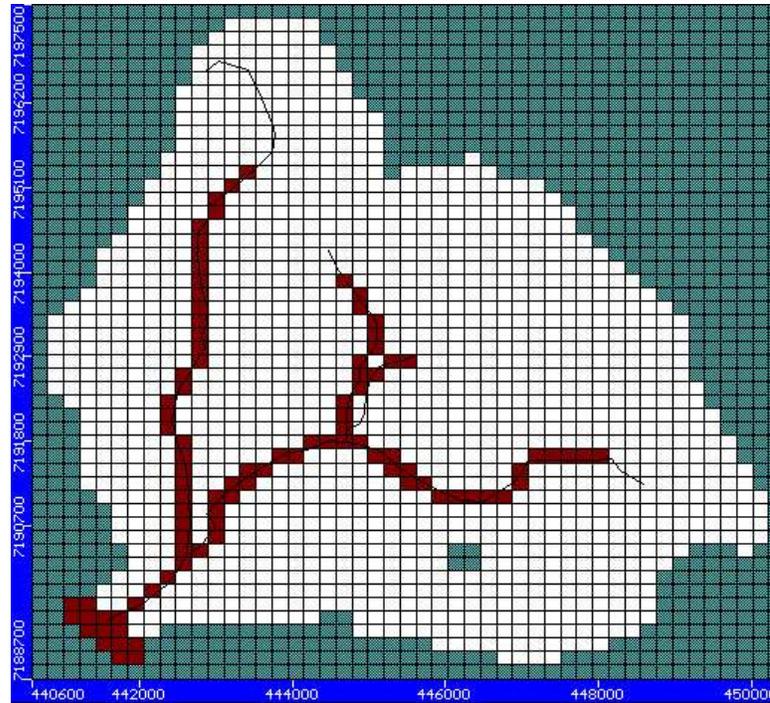


Figura 4-1: Red de diferencias finitas, límites y cauces superficiales modelados.

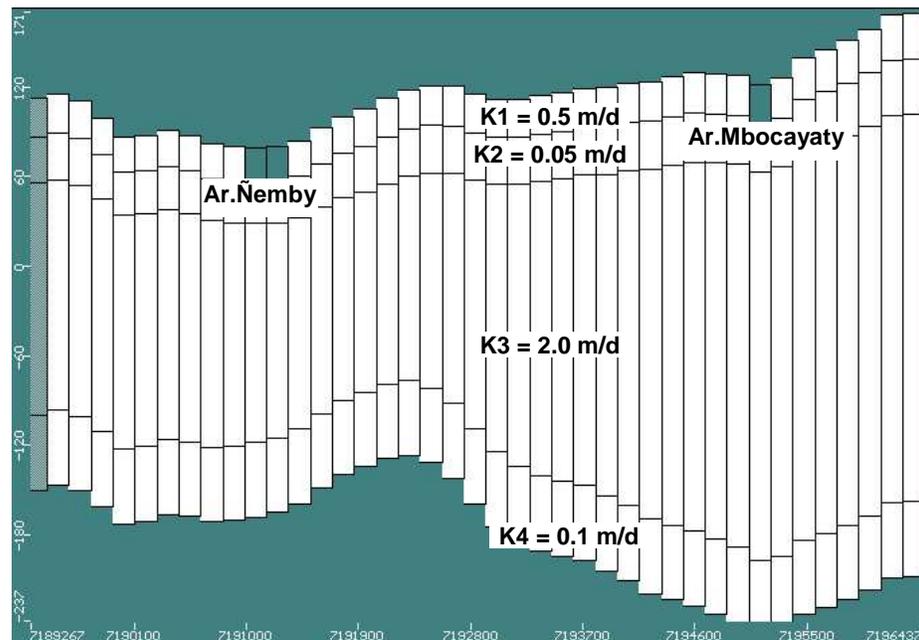


Figura 4-2: Discretización vertical y parámetros geohidráulicos.

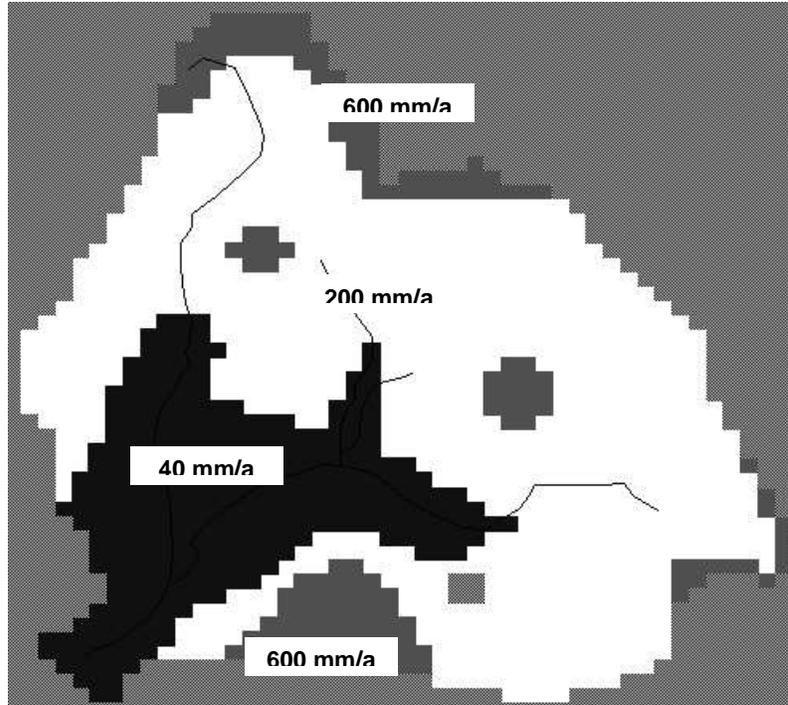


Figura 4-3: Distribución de recarga simulada.

4.2 Resultados obtenidos con el modelo de flujo

La simulación se efectuó en estado estacionario para modelar la superficie piezométrica inicial, antes de ser bombeado el acuífero.

Los resultados parciales se presentan en las figuras 4-3 y 4-4, para las capas 2 y 3 respectivamente. La capa 1 tiene cabezas solamente cerca de los ríos ya que las zonas morfológicamente altas quedan secas, tal como sucede en la realidad. La capa superficial tiene una interacción alta con los cauces superficiales, la capa siguiente (capa 3) que es el acuífero en su zona más permeable, ya no se nota tanto la influencia con los cauces superficiales.

A manera de comparación se incluye también en la figura 4-5 la superficie piezométrica obtenida con los inventarios realizados. Al compararla con la figura 4-4, se nota que existen algunas diferencias, pero en forma generalizada se tienen aproximadamente los mismos niveles de agua.

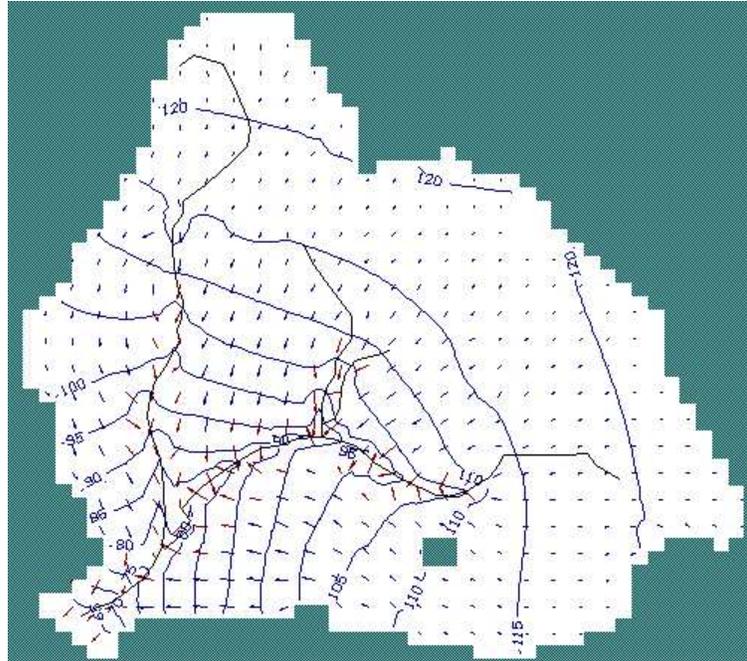


Figura 4-4: Niveles de agua simulados para la capa 2

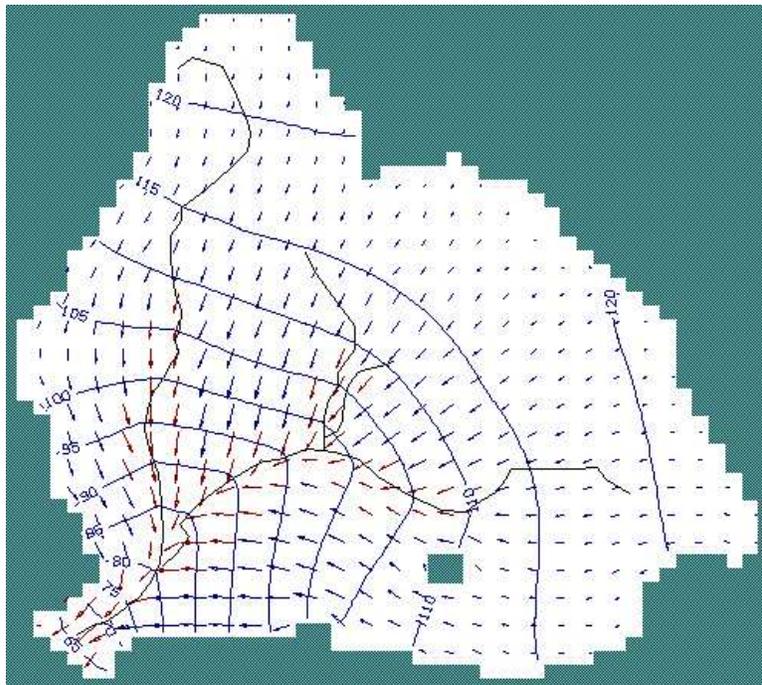


Figura 4-5: Niveles de agua simulados para la capa 3.

En este modelo estacionario antes de iniciar el bombeo del acuífero, toda la infiltración sale como flujo base por la cuenca. Esos 250 mm/año de infiltración se convierten en escorrentía por flujo base con un valor de 370 l/seg.

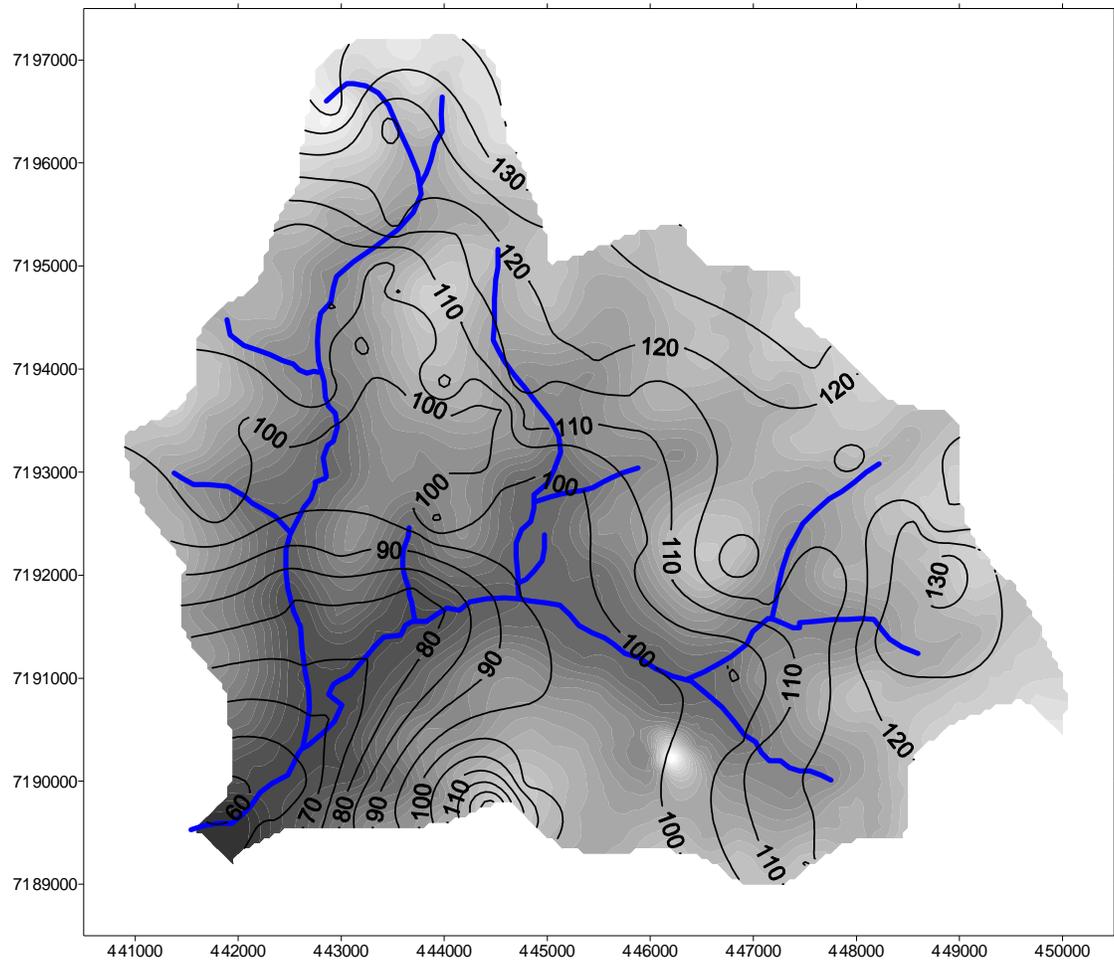


Figura 4-6: Niveles estáticos de agua observado (en metros sobre le nivel del mar, msnm)

5 Flujo base y caudales mínimos

Para tener una apreciación del flujo base generado en la Zona Piloto, se midieron los caudales en el Arroyo Guazú a la salida de la cuenca en días sin lluvias. Se estableció una estación de aforos midiendo la velocidad y el área correspondiente.

En la Figura 5-1 se presentan dos ajustes a tres caudales mínimos medidos en días sin lluvia. Puede observarse que los caudales mínimos entre uno y 15 días sin lluvia fluctúan entre $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ a valores de 0.25 a $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

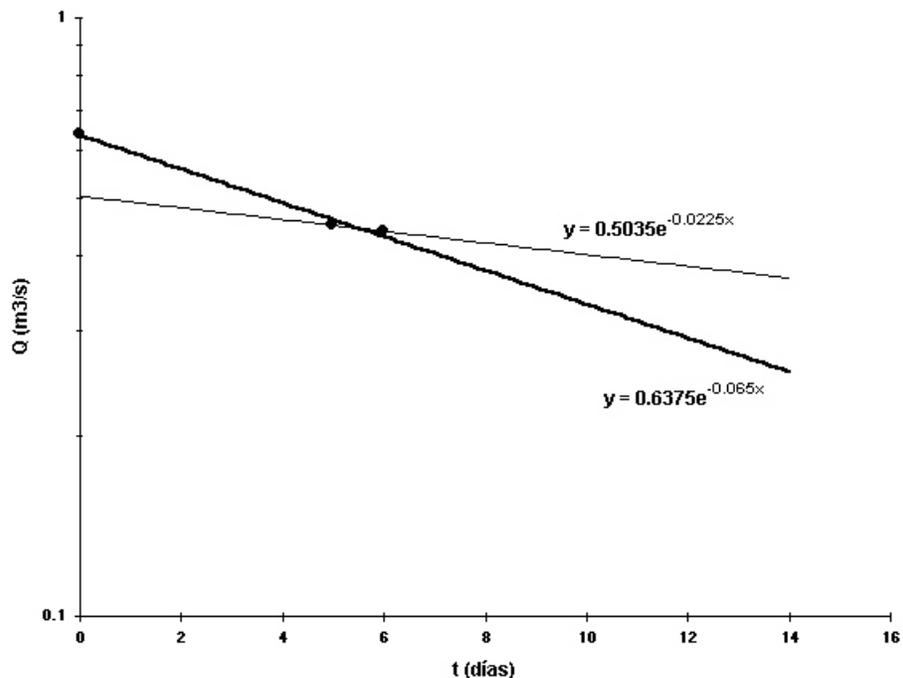


Figura 5-1: Ajuste de recesión a los caudales mínimos medidos a la salida de la cuenca

Se puede ajustar un modelo de tipo lineal ampliamente utilizado, en donde el caudal generado por flujo subsuperficial es proporcional al volumen en almacenamiento. La constante de agotamiento característica de esta curva (ó recta en escala semilogarítmica), llamado también coeficiente de recesión ó decaimiento resultó estar entre 0.023 a 0.065 día^{-1} ; es posible que los primeros puntos con coeficientes altos corresponda a interflujo.

Coeficiente de agotamiento:

$$\alpha = 0.023 \text{ a } 0.065 \text{ día}^{-1}.$$

Con este valor de la constante de agotamiento se puede hacer un estimativo inicial (aproximado) del volumen de agua almacenado por encima del nivel base de drenaje por gravedad, es decir por encima de los ríos y manantiales:

$$\text{Vol} = Q/\alpha$$

Con los caudales medidos, y con un coeficiente medio de agotamiento de 0.0044 se tendría en almacenamiento entre 1.2 y 0.8 millones de metros cúbicos almacenados entre 1 a 6 días después de haber cesado la lluvia.

Es importante también anotar que el flujo base medido corresponde aproximadamente al flujo base simulado en estado estacionario (véase capítulo 4).

6 Infiltración en la Zona Piloto

Aún con la información obtenida durante el estudio es difícil dar un valor único de infiltración media anual. Sin embargo se puede dar en forma preliminar un rango con base en los datos obtenidos y la información generada.

En la Zona Piloto se extraen hoy en día aproximadamente 13.5 millones de m³/año, lo que da un caudal de extracción efectiva media de 1541 m³/hr (428 l/s). Este caudal de extracción corresponde para el área de la Zona Piloto a 278 mm/año.

En la zona no hay descensos pronunciados de niveles a nivel regional, obviamente solo nivel puntual en los alrededores de los pozos de bombeo. Existen ciertas zonas locales en donde ha habido disminución de niveles (como en la zona de Cañadita), en donde localmente pueda existir una sobreexplotación, pero no a nivel regional. Por lo tanto como límite inferior de la recarga se puede dar un valor similar al caudal extraído, es decir entre 250 a 300 mm/año. Hay que anotar que posiblemente la divisoria de aguas subterráneas no corresponda exactamente con las superficiales, existiendo flujos desde zonas vecinas.

El modelo estacionario de simulación convergió bastante bien para una recarga de 250 mm/año, pero sin ninguna extracción, de manera que es de esperarse que la recarga ó infiltración efectiva sea superior a este valor.

Por otra parte los caudales de flujo base medidos a la salida de la cuenca son del orden de 300 l/s, aún con la extracción de 428 l/s; por lo tanto, es de esperarse que la infiltración hoy en día sea aproximadamente igual a la suma de estos dos valores, ó sea del orden de los 700 l/s, que expresado en lámina de agua corresponde a 520 mm/año.

De manera que como una primera aproximación se puede estimar que la recarga en la Zona Piloto está entre 250 a 500 mm/año.

7 Conclusiones

- Con los análisis de pruebas de bombeo y con la modelación numérica se logro determinar los parámetros geohidráulicos en varios sectores de la Zona Piloto. El acuífero no es homogéneo, y en varias zonas se comporta más como un sistema multicapa.
- En la zona de Mbocayaty Ñemby, la transmisividad es del orden de $170 \text{ m}^2/\text{d}$ y la conductividad hidráulica de $2.5 \text{ m}^2/\text{d}$.
- Hacia zona de Ñemby disminuye la permeabilidad, en donde se obtuvieron valores de transmisividad de $30 \text{ m}^2/\text{d}$, conductividades hidráulicas de $0.5 \text{ m}/\text{d}$, con coeficientes de almacenamiento de 0.004.
- En la zona de Caaguazú el acuífero superficial hasta aproximadamente 40 m tiene una transmisividad de 15 a $30 \text{ m}^2/\text{d}$, una conductividad hidráulica entre 0.3 a $0.6 \text{ m}/\text{d}$ y un coeficiente de almacenamiento entre 10^{-5} a 10^{-4} . El acuífero profundo (a partir de los 90 m de profundidad) tiene una transmisividad de 70 a $200 \text{ m}^2/\text{d}$, una conductividad hidráulica entre 1 a $4 \text{ m}/\text{d}$ y un coeficiente de almacenamiento de 10^{-6} a 10^{-4} . La resistencia hidráulica entre la zona acuífera superficial y la profunda es del orden de los 2500 días.
- El flujo base a la salida de la cuenca se estima que está entre 0.2 a $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$. El coeficiente de recesión determinado está entre 0.023 a 0.065 día^{-1} .
- Los datos aproximados de la infiltración están entre los 250 a los 500 mm/año.
- Con los resultados de pruebas de bombeo, el modelo preliminar de flujo, el flujo base que produce la cuenca, los inventarios y los demás estudios que se llevaron a cabo se tiene un mejor conocimiento del sistema hidrogeológico del Acuífero Patiño en la Zona Piloto.
- Se tiene una apreciación más aproximada de la ocurrencia y distribución del agua subterránea, con sus condiciones de recarga y descarga.

8 Recomendaciones

8.1 Cuenca experimental

Se recomienda mantener la Zona Piloto como una cuenca experimental.

Los estudios realizados durante este proyecto, han utilizado la Zona Piloto como una cuenca experimental, ya que además de los resultados de este estudio sobre la geohidráulica del sistema acuífero, se han realizado inventarios detallados, estudios de vulnerabilidad y calidad de agua, estudios geofísicos, construcción de pozos de observación. Por otra parte gran parte del Acuífero Patiño esta siendo utilizado intensivamente (incluyendo la Zona Piloto), y un gran número de personas e industrias requieren de él como fuente de abastecimiento de agua; por lo tanto se requiere tener un mejor conocimiento para manejarlo adecuadamente y no llegar a condiciones de sobreexplotación y agotamiento del agua.

Además de la justificación anterior, se tiene el hecho de contar con una cuenca no muy grande, cerca de la ciudad y de las instalaciones de SENASA, en donde hay varias Juntas de Saneamiento, inspectores también de SENASA, por lo tanto el mantenimiento y recolección de información de la cuenca no es muy difícil.

También se puede utilizar la cuenca mediante convenios con universidades para elaboración de proyectos e investigaciones que ayudarían a mantener la cuenca experimental propuesta.

8.2 Ejecución y análisis de pruebas de bombeo adicionales

Se recomienda ejecutar y analizar mas pruebas de bombeo

Se recomienda en primer lugar analizar las pruebas de bombeo que SENASA tiene en sus archivos; son pruebas en pozos de bombeo en donde se puede determinar por lo menos con alguna aproximación la transmisividad.

Por otra parte se recomienda ejecutar pruebas de bombeo en los pozos de las juntas de saneamiento. El único requerimiento es la colocación de un tubo de plástico o PVC de 0.5 pulgadas de diámetro para registrar los niveles durante la prueba. También en lo posible la instalación de un medidor de caudal (hidrómetro) a la salida del pozo. En el proyecto solamente se pudo habilitar dos de los pozos para mediciones en los mismo, pero hacia el final otras juntas mostraron su interés en colocar la tubería para mediciones (particularmente la de Pai Ñu).

8.3 Medición de caudales a la salida de la cuenca

Se recomienda hacer campañas de medición de caudales a la salida de la cuenca.

Durante el estudio se midieron indirectamente los caudales en el Arroyo Guazú para tener una estimación del flujo base generado por la cuenca. Es importante medirlos especialmente durante días consecutivos en épocas secas sin lluvia. Los caudales mínimos medidos también son un medio indirecto para conocer cambios en el grado de explotación e infiltración en el acuífero, ya que estos dos parámetros afectan el flujo base; de manera que también esta información sirve para el control del acuífero.

Con la medición de caudales se pueden hacer estudios mas detallados y precisos del proceso lluvia-infiltración-flujo base.

La medición de caudales se puede desarrollar conjuntamente con el Servicio Meteorológico para establecer una estación de aforos a la salida de esta cuenca.

8.4 Medición de la lluvia en la Zona Piloto

Se recomienda instalar por lo menos tres pluviómetros en la Zona Piloto

Es importante registrar la lluvia a nivel diario en la Zona Piloto. El pluviómetro mas cercano están en San Lorenzo y hay variaciones espaciales de la lluvia tal como se observó durante el proyecto. Mediante la red de pozos de observación instalados en la Zona Piloto, se puede estimar la recarga por las variaciones que se observen después de las lluvias.

La información de la lluvia, conjuntamente con la variación de niveles en el acuífero y con la medición de caudales mínimo, se logra conocer en forma precisa el comportamiento lluvia-infiltración-flujo base de la cuenca.

Una vez más la instalación de pluviómetros y sus registros se puede desarrollar conjuntamente con el Servicio Meteorológico.

8.5 Registro de niveles en la red pozos de observación

En la red de pozos de observación se deben registrar los niveles de agua dos veces al mes.

Además del registro mensual de niveles, también se recomienda instalar el registrador automático de niveles (“Diver”) inicialmente en forma alterna entre los pozos para tener periodos cortos (de un mes) de registro continuo de niveles. Después analizar las

series y donde se vea una mayor incidencia de la lluvia colocar en forma permanente el registrador. EL registro de niveles es la forma directa de conocer el estado del agua subterránea, y sirven como medio de control del acuífero: si está siendo recargado, explotado ó sobre explotado.

Una forma de mantener la información de niveles es a través de los supervisores de SENASA de la zona y/o mediante la colaboración con las juntas de saneamiento.

8.6 Manejo del acuífero y modelos de flujo

Se debe adquirir un código de computador para modelación numérica de flujo subterráneo

Los modelos de simulación numérica del flujo subterráneo se han convertido hoy en día como métodos ó herramientas de control y desarrollo de acuíferos. Por ejemplo ayudan a determinar el comportamiento del acuífero con nuevos pozos con los existentes, su comportamiento futuro, si va a ver sobreexplotación ó no, si se pueden ubicar nuevos pozos y en donde se pueden ubicar.

Por lo tanto es recomendable que en un futuro cercano SENASA adquiera un código de modelación de flujo para simular el acuífero. Existen varios códigos en el mercado, sin embargo el modelo MODFLOW con sus diversos módulos y sus versiones VMODFLOW ó GMS son alternativas bastante completas con capacidades gráficas e interacción con sistemas de información geográfica.

8.7 Pozos de observación

Se debe complementar la red de pozos de observación existentes.

Se cuenta ya con una red inicial de 10 pozos de observación, 9 de ellos localizados en las zonas de recarga. Se debe complementar la red localizándolos también en zonas intermedias de flujo y algunos en zonas de descarga. También localizar algunos pozos de observación en cercanías a los pozos de mayor bombeo, para utilizarlos en lo posible como pozos de observación para pruebas de bombeo.

9 Referencias

- Anderson, M.P. y W.W. Woessner, 1992. Applied Groundwater Modeling: simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, San Diego.
- ASTM, 1996. ASTM Standards on Analysis of Hydrologic Parameters and Ground Water Modeling. ASTM PA.
- Bachmat, Y. y otros. 1980. Groundwater Management: the use of numerical models. AGU, Washington.
- Bear, J. Y A. Verruijt, 1987. Modeling Groundwater Flow and Pollution. Reidel Publ. Dordrecht.
- Kresic, Neven, 1997. Hydrogeology and Groundwater Modeling. Lewis Publ., Boca Raton, 461pp.
- Kruseman, G.P. y N.A. de Ridder, 1975. Análisis y Evaluación de los Datos de Ensayos por Bombeo. ILRI, Wageningen.
- Molano, C., 2001a. Estudio del Acuífero Patiño, Informe técnico 2.5: Inventario de pozos y manantiales en la Zona Piloto.
- Molano, C., 2001b. Estudio del Acuífero Patiño, Informe técnico 2.7: Monitoreo piezométrico en la Zona Piloto.
- SENASA, 1999. Banco de datos de pozos perforados por SENASA, Publicación Técnica No. 2, Asunción, Paraguay.
- Surfer, 1996. Surface Mapping System, ver 6.04. Golden.
- Van Overmeeren, R.A., 2000. Estudio del Acuífero Patiño, Informe técnico 2.4: Investigación geoelectrica en una zona piloto.
- Walton, W.C., 1970. Groundwater resource Evaluati6n. McGraw Hill.

Apéndice A

Apéndice A. Datos de la prueba en Solares de Ñemby

Apéndice B

Apéndice B Datos de la prueba en el pozo 2 de la Junta de Saneamiento de Ñemby

Apéndice C

Apéndice C Datos de la prueba en el pozo 1 de la Junta de Saneamiento de Mbocayaty

Apéndice D

Apéndice D Datos de la prueba en el pozo 3 de la Junta de Saneamiento de Caaguazú

Apéndice E

Apéndice E Bases conceptuales del modelo tridimensional de Diferencias Finitas