CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO MORROA UTILIZANDO PRUEBAS DE BOMBEO

DALMIRO ANTONIO PACHECO RUIZ

PEDRO PABLO VILLEGAS YÉPEZ

UNIVERSIDAD DE SUCRE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

SINCELEJO

2003

CARACTERIZACION HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO MORROA UTILIZANDO PRUEBAS DE BOMBEO

DALMIRO ANTONIO PACHECO RUIZ

PEDRO PABLO VILLEGAS YÉPEZ

Trabajo de grado para optar el titulo de Ingeniero Civil

Director

HECTOR MARIO HERRERA PARRA

Ingeniero geólogo

UNIVERSIDAD DE SUCRE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

SINCELEJO

2003

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____
Presidente del jurado

_____
Jurado

_____
Jurado

Sincelejo, _____

Cuando pones la proa visionaria hacia una estrella
y tiendes el ala hacia tal excelsitud inasible,
afanoso de perfección y rebelde a la mediocridad,
llevas en ti el resorte misterioso de un ideal.

Camus, *El Hombre Mediocre.*

“Únicamente los autores son responsables de las ideas expuestas en el presente trabajo”

A Dios y a todas aquellas
personas que confiaron en
nosotros apoyándonos
hasta el final.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Héctor Mario Herrera, Ingeniero Geólogo y director de la investigación, por su valiosa motivación y orientaciones.

Frank Rodríguez, Ingeniero civil, por proporcionar la información de pruebas de bombeo realizadas en años anteriores en el acuífero Morroa.

Gonzalo Pulido, Ingeniero Civil, por su colaboración y asesorías impartidas desinteresadamente.

Alcides Huguet, Ingeniero Civil, asesor del área de hidrogeología de Ingeominas, por la documentación y consejos dados.

Régulo Puentes, Ingeniero agrícola, por la información de pruebas de bombeo realizadas en algunos pozos del acuífero Morroa.

Eder Gutiérrez y Omar Pérez, técnicos de CARSUCRE, por el apoyo en la realización de cada una de las pruebas de bombeo.

La empresa **EMPAS**, hoy día **AGUAS DE LA SABANA E.S.P.** por su apoyo y colaboración en el desarrollo del presente proyecto..

Las Comunidades: Las Palmas, Chochó, El Mamón, Las Tinas, Segovia, que prestaron asistencia y colaboración en la realización de las pruebas de bombeo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
1.1 NIVELES ACUÍFEROS DE LA FORMACIÓN MORROA	22
1.1.1 Nivel acuífero A	23
1.1.2 Nivel acuífero B	24
1.1.3 Nivel acuífero C	25
1.1.4 Niveles acuíferos D y E	25
2. ESTADO DEL ARTE	26
2.1 UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE INTERPOLACIÓN LINEAL DE KRIGING PARA VARIABLES ESPACIO TEMPORALES.	33
3. METODOLOGÍA	35
3.1 SELECCIÓN DE LOS POZOS DE ESTUDIO	35
3.2 TRABAJO DE CAMPO	35
3.2.1 Equipo de medida del caudal	36
3.2.2 Medida del nivel del agua en los pozos de observación y/o bombeo	37
3.3 CÁLCULOS DE OFICINA	39
3.3.1 Consideraciones acerca de la penetración parcial y el gradiente Natural	39
3.3.2 Consideraciones acerca de la presentación y análisis de resultados.	39
4. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
4.1 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	40
4.1.1 Pruebas de bombeo realizadas antes del año 2001	43
4.2 INTERFERENCIA DE POZOS	46
4.3 CURVAS DE ABATIMIENTO CONTRA LOGARITMO DE TIEMPO	50

4.4 CAPACIDAD ESPECÍFICA 51
4.5 CÁLCULO DE LAS RESERVAS DEL ACUÍFERO MORROA EN EL SECTOR SINCELEJO, COROZAL Y MORROA 53
4.6 OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN 57
5. CONCLUSIONES 60
6. RECOMENDACIONES 63
6.1 EFECTO DE LA INTERERENCIA DE POZOS 63
6.2 EXPLOTACIÓN SOSTENIBLE 65
6.3 OTRAS RECOMENDACIONES 67
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 68
ANEXOS 71
MATERIAL ACOMPAÑANTE

LISTA DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1. Valores del factor K para calcular el radio teórico del pozo. 29

Cuadro 2. Métodos para la medición del caudal. 36

Cuadro 3. Formato para toma de datos de campo. 37

Cuadro 4. Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo analizadas con el software Aquifer-Test. 43

Cuadro 5. Algunos valores de transmisividad del acuífero Morroa según CARSUCRE - FINAGUAS (2001). 44

Cuadro 6. Variación del nivel estático en algunos pozos del acuífero Morroa. 45

Cuadro 7. Variación del radio de influencia de los pozos donde se realizaron pruebas de bombeo durante el presente estudio. 48

Cuadro 8. Capacidad específica y conductividad hidráulica de los pozos donde se realizaron pruebas de bombeo entre 2001 y 2003. 52

Cuadro 9. Cálculo de las reservas del acuífero Morroa, sector Sincelejo, Corozal y Morroa. 56

Cuadro 10. Cálculo de las reservas explotables del acuífero Morroa, sector Sincelejo, Corozal y Morroa. 56

Cuadro 11. Caudal óptimo de explotación para los pozos del estudio. 59

Cuadro 12. Período de recuperación recomendado para un tiempo determinado de bombeo. 64

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Localización del área de estudio. 21

Figura 2. Modelo hidrogeológico de la Formación Morroa. Insfopal 1980 23

Figura 3. Curva patrón de Theis. Función W(u) de pozo para acuífero Confinado 27

Figura 4. Perifoneo durante el plan de contingencia en el corregimiento El Mamón 36

Figura 5. Medición del caudal en el pozo 44-IV-D-PP-26. 37

Figura 6. Sonda eléctrica para la medición de niveles de agua dentro del pozo. 38

Figura 7. Toma de datos durante el bombeo en el pozo 52-II-A-PP-19 . 38

Figura 8. Mapa de Iso – Conductividad Hidráulica del área de estudio. 41

Figura 9. Mapa de Iso – Transmisividad Hidráulica del área de estudio. 42

Figura 10. Variación de niveles del pozo 44-IV-D-PP-36. 46

Figura 11. Interferencia de pozos. 47

Figura 12. Radio de influencia de algunos pozos del acuífero Morroa sector Sincelejo, Corozal y Morroa. 49

Figura 13. Esquema de disposición de las capas del acuífero Morroa para el cálculo de las reservas. 54

Figura 14. Esquema para el cálculo de las reservas explotables por capa del Acuífero Morroa. 55

Figura 15. Abatimiento contra tiempo en una prueba de bombeo cíclico. 64

Figura 16. Avance del nivel dinámico en el ensayo cíclico realizado en el pozo 44-IV-D-PP-26. 65

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1. Datos generales de los pozos donde se realizaron pruebas pruebas de bombeo. 71

Anexo 2. Datos de las pruebas de bombeo que se realizaron durante el proyecto. 72

Anexo 3. Cálculo del radio equivalente para los pozos donde se realizó pruebas entre los años 2001-2003. 73

Anexo 4. Resumen de los parámetros hidráulicos del acuífero Morroa calculados manualmente y con el software Aquifer– Test. 74

Anexo 5. Parámetros hidráulicos del acuífero Morroa calculados con el software Hytest. 75

Anexo 6. Datos generales de los pozos donde se realizaron pruebas anteriores al año 2000. 76

Anexo 7. Datos de pruebas de bombeo realizadas antes del año 2000 77

Anexo 8. Cálculo del radio equivalente para los pozos donde se realizaron pruebas de bombeo antes del año 2000. 78

Anexo 9. Resultados de la reinterpretación de las pruebas de bombeo realizadas antes del año 2001. 79

Anexo 10. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-C-PP-08. 80

Anexo 11. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-C-PP-11. 81

Anexo 12. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-16. 82

Anexo 13. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-19. 83

Anexo 14. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-24. 84

Anexo 15. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-26. 85

Anexo16. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-30. 86

Anexo 17. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-34 y del pozo de observación 44-IV-D-PP-18. 87

Anexo 18. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-36 89

Anexo 19. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-39. 90

Anexo 20. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-01. 91

Anexo 21. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-08. 92

Anexo 22. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-09. 93

Anexo 23. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-13. 94

Anexo 24. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-15 (2001). 95

Anexo 25. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-15 (2003) 96

Anexo 26. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-19. 97

Anexo 27. Gráficas del análisis con el software Aquifer-Test de la prueba de bombeo del pozo 52-II-A-PP-15 (2003) 98

Anexo 28. Variación del abatimiento en la producción para acuíferos libres y confinados. 100

GLOSARIO

ABATIMIENTO (S): es la diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico durante el bombeo.

ACUÍFEROS: son formaciones geológicas que ocupan la zona de saturación, son permeables y permiten el movimiento del agua en condiciones tales que hacen adecuada su explotación.

ACUIFUGOS: Son formaciones geológicas impermeables que no contienen agua.

ACUICIERRES: Son formaciones geológicas impermeables saturadas, pero no la transmiten, haciendo de este modo imposible su explotación.

ACUITARDOS: son formaciones geológicas semipermeables que, conteniendo agua en gran cantidad, la transmiten muy lentamente, por lo que estas formaciones no resultan adecuadas para emplazar captaciones.

ACUÍFEROS CONFINADOS: son formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua a presión, confinadas entre capas o estratos impermeables o prácticamente impermeables (una inferior y otra superior).

ÁREA DE INFLUENCIA: es el área que abarca el pozo para suministrar el caudal extraído.

BUZAMIENTO: inclinación que presenta las capas que conforman una formación.

CAPACIDAD ESPECIFICA: relación entre el caudal de explotación y el abatimiento de un pozo.

CAUDAL ESPECIFICO: es el caudal aportado por unidad de abatimiento (Q/S_w).

CAUDAL ÓPTIMO: es el caudal que se debe extraer de un campo de pozos sin que se afecten las reservas del acuífero.

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S): puede definirse como la cantidad de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime la unidad. Consecuentemente, no tiene dimensiones.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K): la conductividad es el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero bajo la influencia de un gradiente unitario, a temperatura de campo. Representa la facilidad con que el medio deja pasar agua a través de él por unidad de área.

EFICIENCIA DEL POZO: es la relación existente entre el abatimiento que se produce en la cara del pozo, S_p, y el que se produce dentro de la camisa del pozo. S_w, a causa de la resistencia adicional que introduce ésta ultima.

ESPESOR DEL ACUÍFERO: Es una medida de longitud que está limitada por el techo de acuífero y la base del mismo, que permite el paso del agua desde y a través del medio poroso hacia el pozo.

GRADIENTE HIDRÁULICO: Es la medida de la variación de presión con respecto a una unidad de medida de longitud.

FILTROS DEL POZO: Es la parte ranurada de la camisa del pozo que cumple la función de evitar el paso de partículas sólidas hacia el interior del pozo, garantizando sólo la entrada del agua.

NIVEL DINÁMICO (N. D): Es el nivel alcanzado por el agua dentro del pozo medido desde superficie bajo condiciones de bombeo.

NIVEL ESTÁTICO (N. E): es el nivel del agua dentro del pozo medido desde superficie bajo condiciones estáticas.

NIVELES ACUÍFEROS: Son las capas o estratos de roca porosa, permeable y saturada de una formación acuífera.

PIEZÓMETRO O POZO DE OBSERVACIÓN: es cada uno de los pozos en los cuales se toman las medidas de niveles estáticos y/o dinámicos durante una prueba de bombeo con el fin de determinar la curva de abatimiento del acuífero. Además sirven para la toma de muestras de agua para mantener el control de la calidad de la misma.

PRUEBAS DE BOMBEO A CAUDAL CONSTANTE: son aquellas pruebas de bombeo en las que el caudal se mantiene constante durante su ejecución..

PRUEBAS DE BOMBEO CÍCLICAS: Consisten en bombear el pozo a una descarga constante durante un tiempo determinado seguido de un periodo de recuperación durante otro tiempo, completándose así un ciclo que se repite cierto número de veces.

PRUEBAS DE BOMBEO ESCALONADAS: son aquellas en que el caudal extraído del pozo se mantiene constante durante un tiempo, para cambiar súbitamente a otro caudal que se mantendrá constante en el transcurso de otro tiempo, para volver a cambiar a un tercer caudal en un tercer tiempo, y así sucesivamente.

RADIO DE INFLUENCIA: es la distancia del centro del pozo hasta los limite del área de influencia, donde el abatimiento es cero.

RECURSOS DISPONIBLES: representan el volumen total de agua expresada en forma de caudal que se podría extraer permanentemente a largo plazo del acuífero sin que se experimente una reducción en las reservas permanentes.

RECURSOS EXPLOTABLES: es la cantidad de agua subterránea que puede obtener racionalmente desde el punto de vista técnico – económico en las obras de captación con la calidad que satisfaga los requisitos establecidos durante todo el tiempo calculado de utilización del agua

RÉGIMEN DE BOMBEO: es el periodo de bombeo de un pozo durante el día.

RESERVAS: es la cantidad de agua almacenada en el acuífero que se puede drenar por la acción de la gravedad, o sea, la parte del volumen de saturación que no queda adherida de una u otra forma a las partículas en el proceso de extracción del agua.

TRANSMISIVIDAD HIDRÁULICA (T): la transmisividad es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua.

RESUMEN

El presente trabajo denominado "Caracterización Hidráulica del Acuífero Morroa Utilizando Pruebas de Bombeo" fue realizado en la zona de Sincelejo, Corozal y Morroa. Está circunscrito en la Línea de Investigación de Aguas Subterráneas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Sucre, Colombia; que en convenio con la Corporación Autónoma Regional de Sucre, CARSUCRE, siguiendo su Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas, PPIAS, apoyado técnicamente por el Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, el Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero – Ambiental y Nuclear, INGEOMINAS; y busca dar las bases para lograr un manejo sostenible de la explotación del recurso hídrico subterráneo en el Departamento de Sucre.

Este trabajo presenta el cálculo de las propiedades hidráulicas del Acuífero Morroa, como Conductividad Hidráulica (K), Transmisividad (T) y Coeficiente de almacenamiento (S) en la zona de estudio, mediante la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en campo, analizadas con los softwares Aquifer-Test (Waterloo Hidrogeologic, Inc.) y Hytest (diseñado por Pulido). El trabajo está basado en un estudio, análisis y revisión de esta área del acuífero Morroa. Además recomienda los adecuados regímenes de bombeo y caudales óptimos en los pozos en explotación para garantizar un buen servicio residencial, comercial, institucional e industrial. La información se obtuvo de la ejecución de pruebas de bombeo en los años 2001 a 2003, así como la recopilación de datos de pruebas de años anteriores realizadas por los perforadores de los pozos.

Palabras claves: Acuífero Morroa. Propiedades hidráulicas. Sostenibilidad. Pruebas de bombeo.

ABSTRACT

The present work called "Hydraulic Characterization of Aquifer's Morroa Using Pumping Tests" was carried out in Sincelejo, Corozal and Morroa area. This work is circumscribed in the Research Line of Underground Water at University of Sucre Engineering Faculty, Colombia. This university, signed an agreement with Corporación Autónoma Regional de Sucre, **CARSUCRE**, following with Integrate Protection Project of Groundwater, **PPIAS**, technically supported by **AIEA** (Atomic International Energy Agency), with Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero – Ambiental y Nuclear, **INGEOMINAS**; looking for give the bases to achieve a hydric resource sustainable exploitation in Department of Sucre, Caribbean Coast, Colombia.

This work presents the calculation hydraulic properties of Aquifer's Morroa, such as Hydraulic Conductivity (K), Transmissivity (T) and Storativity (E) in the study area, by the interpretation of pumping tests carried out totally in field, supported with the software's Aquifer-Test (commercialized by Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Canada) and Hytest (designed by Pulido). The work is based in an exhaustive study, analysis and revision of the total area where Aquifer's Morroa has influence. Also recommends the adequate pump regime and the optimal rate of water wells in exploitation to guarantee a high quality of residential, commercial, institutional and industrial water service. The information was obtained by the execution of pumping tests on years 2001 to 2003, as well as the previous years tests.

Key words: Morroa Aquifer. Hydraulic properties, Sustainability. Pumping tests.

INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental en la vida del ser humano, es un motor generador de desarrollo. Sin duda una parte importante de los recursos hídricos globales está representado por el agua subterránea (Pérez, 1995), que se ha convertido en la principal fuente de abastecimiento en las zonas que carecen de corrientes superficiales explotables (como la parte central y norte del Departamento de Sucre). La alteración del ciclo hidrológico degrada la renovación del recurso hídrico, siendo ésta la problemática que toca a países como Colombia con grandes reservas, atribuyéndose esta dificultad esencialmente al crecimiento de la población y al uso irracional que se hace del mismo.

Cada día se necesita mayor cantidad de agua para cubrir las necesidades de nuestras comunidades, factor que unido al desconocimiento de hacer un uso racional y al no aprovechamiento total de los recursos hídricos potenciales, ha provocado la explotación intensiva del Acuífero Morroa con consecuencias negativas para la producción adecuada, originando agotamiento del mismo. Dada esta situación ha crecido la necesidad de estudiar las fuentes de este recurso vital haciendo énfasis especialmente en el agua subterránea con el fin de establecer recomendaciones aplicables que hagan realidad una apropiada explotación que garantice su sostenibilidad. No obstante para alcanzar este punto se necesita conocer la hidrodinámica del acuífero Morroa; donde los ensayos de bombeo han probado a nivel mundial ser el medio más eficaz para obtener valores confiables y representativos (Pérez, 1995), que permitan estimar los parámetros hidráulicos del acuífero, predecir su comportamiento bajo situaciones diversas y evaluar la disponibilidad de recursos de agua

subterránea, así como la cantidad de agua que se puede extraer de los pozos bajo condiciones previamente establecidas.

OBJETIVO MACRO

Contribuir al Plan de Manejo Integral de Aguas Subterránea del Acuífero Morroa.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento hidráulico del Acuífero Morroa, bajo las condiciones actuales de explotación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar las pruebas de bombeo anteriores y reinterpretarlas.
- Ejecutar e interpretar las pruebas de bombeo y obtener las propiedades hidráulicas del acuífero Morroa.
- Determinar caudales óptimos de explotación para hacer sostenible el recurso.

1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

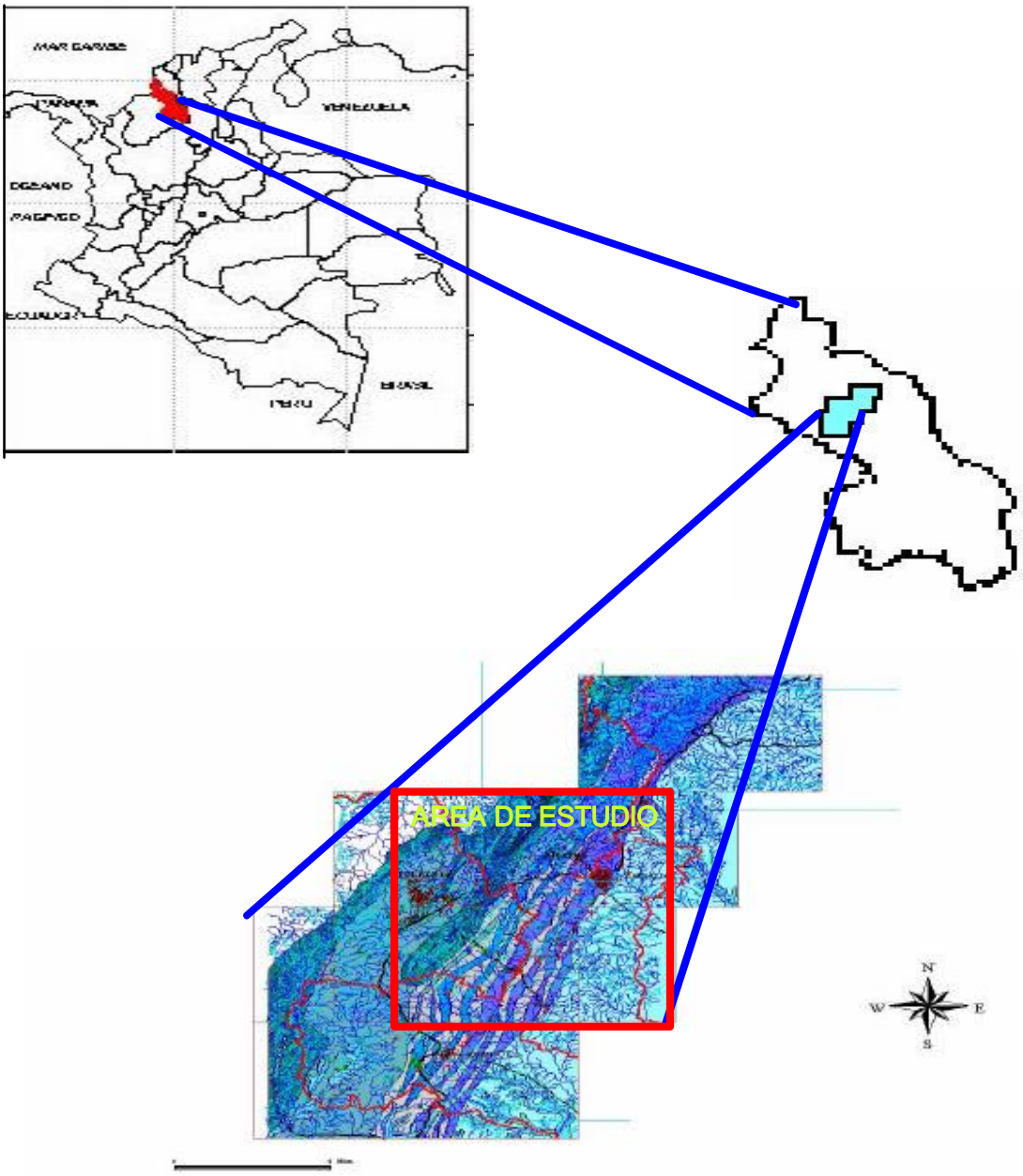


Figura 1. Localización del área de estudio

Fuente: CARSUCRE.

El área de estudio está localizada en la parte central del Departamento de Sucre en las subregiones Montes de María y Sabanas, comprende los municipios de Sincelejo, Corozal y Morroa. El clima es tropical con una precipitación media anual de 1126 mm, dividida en dos épocas: una seca de diciembre a marzo y otra lluviosa de mayo a octubre. La hidrografía está representada por el Arroyo Grande de Corozal, que nace en Sincelejo con el arroyo Caimán, recibe aguas de varios arroyos afluentes como: El Pintao, San Miguel, El Cauca, encontrándose con el arroyo Morroa, que baña la zona de recarga del acuífero (CARSUCRE – FINAGUAS, 2001). Geológicamente el acuífero Morroa es un acuífero complejo constituido por capas de areniscas y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcilla, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales (Herrera, 1997).

De acuerdo con el inventario de pozos en el estudio realizado por CARSURE – FINAGUAS (2001), existen en el Acuífero Morroa 63 pozos profundos, de los cuales 30 están activos, 9 inactivos y 24 abandonados con profundidades entre 35 y 403.5 metros. Además recientemente fueron perforados tres pozos profundos, uno para abastecer al municipio de Morroa, el segundo en la localidad de Castañeda y el tercero para el Frigorífico de la Sabana; así como seis piezómetros para monitorear el comportamiento y la calidad del agua del acuífero.

1.1 NIVELES ACUIFEROS DE LA FORMACION MORROA

La figura 2 muestra una representación del modelo hidrogeológico realizado en 1980 por el ya desaparecido Instituto Nacional de Fomento Municipal (INSFOPAL) en su Estudio Hidrogeológico del Flanco Oriental de la Serranía de San Jacinto y de la Zona Litoral del Golfo del Morrosquillo. Además según CARSUCRE – FINAGUAS (2001) cada capa presenta características particulares descritas a continuación:

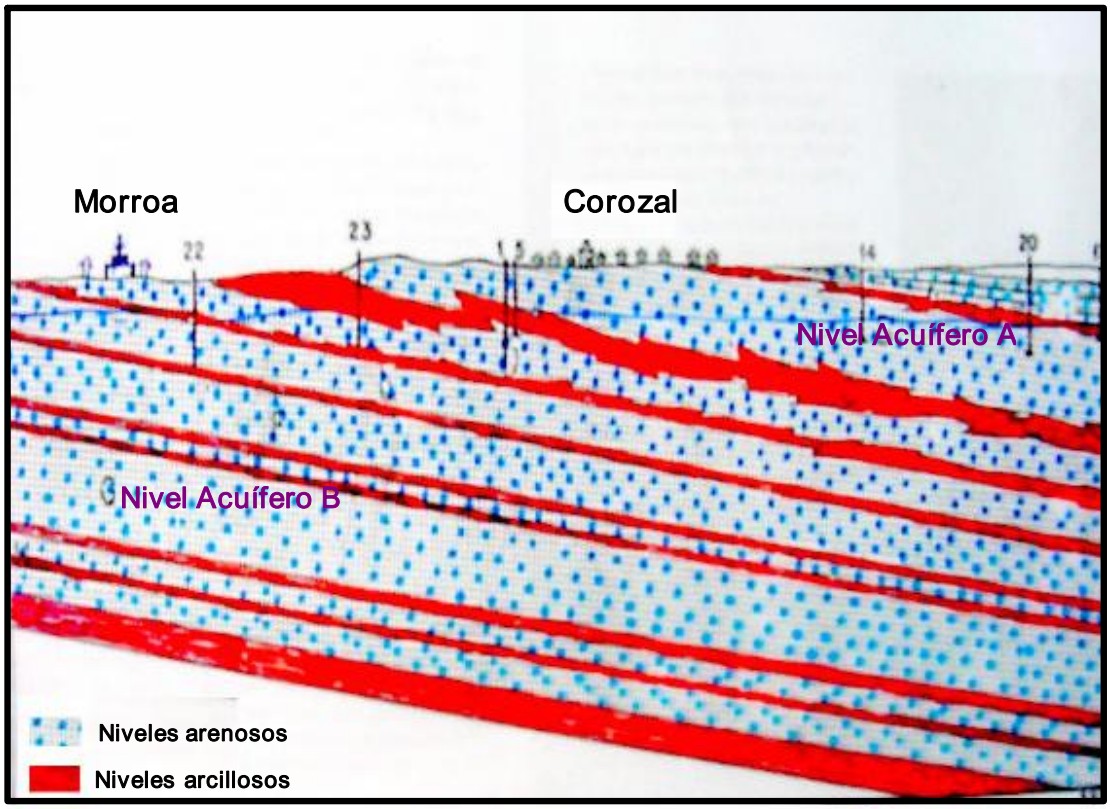


Figura 2. Modelo hidrogeológico de la Formación Morroa. Insfopal 1980. Fuente: CARSUCRE.

1.1.1 Nivel acuífero A: este nivel se encuentra hacia el techo de la Formación Morroa, en contacto con la Formación Betulia y se correlacionan con los niveles A y B definidos en el estudio del Insfopal. El casco urbano de los municipios de Corozal y Los Palmitos se encuentra sobre este nivel acuífero.

Litológicamente está compuesto por areniscas líticas de grano fino hasta grueso, de color claro y pardo, con lentes conglomeráticos y algunas capas de lentes de arcillas. El espesor de las capas permeables varía entre 30 a 226 m, con buzamientos hacia el oriente entre 5º y 10º. Presenta una permeabilidad primaria alta a muy alta y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.

Desde el sector de Pileta hasta Don Alonso se subdivide en tres niveles acuíferos A1, A2 y A3, que luego se unen para formar un solo nivel en el área de Sampués y subdividiéndose hacia el sur en dos niveles (en el municipio de Chinú, Córdoba).

Actualmente los pozos No. 14, 16, 18, 20, 24, 32, 43 y el pozo de la escuela de carabineros captan este nivel acuífero con caudales de 40, 34, 34, 45 y 6.7 lt/seg. Sin embargo también esta siendo explotado parcialmente por los pozos No. 2, 25, 29 y 36.

1.1.2 Nivel acuífero B: este nivel se encuentra debajo del nivel A, separado de esta por un lente de arcilla y se correlaciona con los niveles C y D definidos en el estudio del Insfopal. El casco urbano del municipio de Morroa se encuentra sobre este nivel acuífero.

Litológicamente está compuesto por areniscas muy friables de grano fino a medio de color amarillo a ocre, con lentes y capas de gravas sueltas hacia el techo y delgadas capas de arcillas finamente estratificadas. El espesor de las capas permeables varía entre 38 a 164 m, con buzamientos hacia el oriente entre 10º y 15º.

Presenta una permeabilidad primaria moderada a alta y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea. Hacia el sur, en el área de Sampués se subdivide en dos niveles acuíferos B1 y B2.

Los niveles acuíferos A y B de la Formación Morroa son los que presentan una intensa explotación en el área de estudio. Los pozos No. 9, 11 y 22 captan solamente este nivel acuífero, el pozo 22 con un caudal de 5lt/seg. El pozo No. 2 capta este nivel totalmente y está siendo explotado parcialmente por los pozos No. 25, 28 29, 30, 34 y 36.

1.1.3 Nivel acuífero C: este nivel se encuentra debajo del nivel B, separado de este por una capa de arcilla y se correlaciona con los niveles E y F definidos en el estudio del Insfopal.

Litológicamente está constituido por areniscas líticas finas de color gris areniscas líticas medias ferruginosa, lentes y capas de gravas de color amarillento, areniscas arcillosas muy friables y algunos lentes de arcillolitas. El espesor de las capas permeables varia entre 40 y 60 m, con buzamiento hacia el oriente de 15º. Presenta una permeabilidad primaria alta y tiene una disposición favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea. Este nivel también es sobre-explotado, sobre todo en la zona norte, por medio de canteras para la extracción de materiales para construcción.

1.1.4 Niveles acuíferos D y E: se encuentran en la base de la formación Morroa, sobre la formación Sincelejo superior, están separados del nivel C por una capa de arcilla y entre sí por un lente arcilloso. Se correlaciona con el nivel G definido en el estudio del Insfopal.

Litológicamente está constituido por areniscas líticas medias de color amarillo grisáceo algo consolidadas areniscas finas arcillosas, algunos lentes conglomeráticos y lentes arcillosos. El espesor de las capas permeables varía entre 40 y 50 m, para el nivel D y de 40 a 60 m, para el nivel E, con buzamiento hacia el oriente de 15º. Presenta una permeabilidad primaria baja a moderada (nivel D) y moderada a alta (nivel E) y tiene una disposición estructural favorable a la recarga y al almacenamiento de agua subterránea.

El pozo No. 31 capta la parte media superior del nivel D; el pozo de Morroa capta casi totalmente este nivel; el nivel E no está siendo explotado por ningún pozo.

2. ESTADO DEL ARTE

Según Kruseman y De Ridder, citado por Pérez (1995), al abordar la solución de problemas de hidrogeología se presenta continuamente la situación de poder obtener valores confiables y representativos de las características hidráulicas de los acuíferos. Los ensayos de bombeo han probado ser el medio eficaz para alcanzar ese objetivo, para realizarlos además del contar con el pozo de bombeo es preferible contar con uno o más pozos de observación para facilitar el cálculo de los parámetros hidráulicos.

Existen muchos métodos para interpretar las pruebas de bombeo, la mayoría de ellos para pruebas a caudal constante, recuperación, pruebas escalonadas, las cuales están ampliamente tratadas en la literatura (Villanueva e Iglesias, 1984). Entre otros han sido implementados los métodos de Jacob y Theis con ajuste manual a la curva patrón (ver figura 3) y automático bajo el criterio de mínimos cuadrados en el caso de acuíferos confinados.

El método de Jacob permite calcular los parámetros transmisividad (T), conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) mediante regresión lineal entre el abatimiento y el logaritmo de tiempo para tiempos largos o si la prueba no fue muy larga con las últimas observaciones. El método de Theis con ajuste automático brinda la posibilidad de analizar pruebas con observación en el pozo de bombeo y de caudal variable (metodología utilizada por el software Aquifer-Test) .estos métodos están basados en el flujo darciano o lineal hacia un acuífero, quedando inmersos dentro del análisis no lineal introducido por Pérez (1995) que describe el flujo del agua hacia un pozo de explotación, considerando un flujo darciano

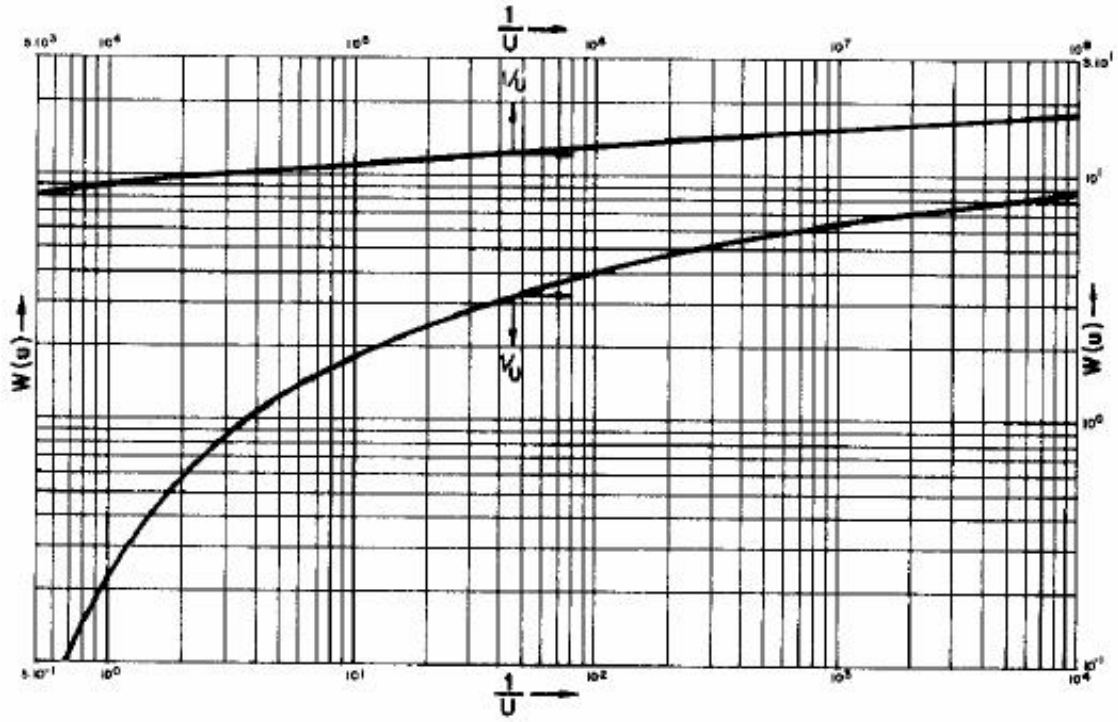


Figura 3. Curva patrón de Theis. Función W(u) de pozo para acuífero confinado

más un flujo turbulento y por ende generando parámetros como: transmisividad turbulenta (T_t), transmisividad darciana (T_D), conductividad hidráulica turbulenta (K_t) y conductividad hidráulica darciana (K_D).

Además existen otros métodos para la interpretación de pruebas de bombeo como: de valvuleo o valdeo (prueba de Slug), pruebas escalonadas, cíclicas y a caudal variable, para situaciones con o sin pozos de observación, pozos de gran diámetro, pozos con penetración parcial (Bonilla et al,1993).

Por otra parte cuando no se cuenta con pozo(s) de observación lo que dificulta el cálculo del coeficiente de almacenamiento (S), por lo cual, según Pérez (1995) se pueden interpretar los resultados por el método aproximado de análisis de pruebas a caudal constante con información de un solo punto,

siendo un método que consiste en extrapolar la curva de tendencia de la gráfica de abatimiento vs. Log. de tiempo hasta el valor de 10000 min. para luego aplicar las fórmulas que caracterizan el flujo no lineal y obtener los parámetros hidráulicos. Este procedimiento depende mucho de la experiencia del ingeniero y de la calidad de los datos de la prueba de bombeo haciéndolo parecer inexacto algunas veces. Existen otros métodos aproximados que permiten la obtención de dicho parámetro, uno de ellos es suponer que el pozo de observación se encuentra a una distancia (r) igual al radio del pozo de bombeo, esta aproximación es utilizada en la interpretación de pruebas de bombeo cuando no se cuenta con pozo(s) de observación, dando resultados poco confiables porque se está caracterizando sólo el empaque de grava del pozo.

Para obtener resultados con una mejor aproximación del coeficiente de almacenamiento los rusos han ideado un método que supone un radio ficticio al cual se supone está localizado el pozo de observación cuyos datos de niveles serán los tomados en el pozo de bombeo, la distancia r es función del radio del pozo, la longitud de filtros y un factor k que depende de la transmisividad hidráulica media del acuífero y el diámetro del pozo (Huguet, 2003). La ecuación para el cálculo del radio teórico es:

$R_t = R_p * L_f * k$; donde:

R_t = Radio teórico del pozo (m)
R_p = Radio del pozo (m)
L_f = Longitud de filtros (m)
k = Factor de corrección.

En el cuadro 1 se presentan los datos para determinar el factor de corrección (k) para calcular el radio teórico de un pozo de bombeo.

Cuadro 1. Valores del factor k para calcular el radio teórico del pozo.

Tipo de Transmisividad	T (m^2 / día)	Diámetro del pozo (pulg.)	Radio del pozo (m)	Factor k	Q (lt/s) para S = 10m
Muy baja	<10	4	0.05	0.7	<1
Muy baja	<10	6	0.076	0.7	<1
Baja	10 –100	4	0.05	0.8	1 – 10
Baja	10 –100	6	0.076	0.8	1 – 10
Baja	10 –100	8	0.1	0.8	1 – 10
Media	100 – 500	6	0.076	0.9	10 – 50
Media	100 – 500	8	0.1	0.9	10 – 50
Media	100 – 500	10	0.12	0.9	10 – 50
Media	100 – 500	12	0.15	0.9	10 – 50
Alta	500 – 1000	6	0.076	1.0	50 – 100
Alta	500 – 1000	8	0.10	1.0	50 – 100
Alta	500 – 1000	10	0.12	1.0	50 – 100
Alta	500 – 1000	12	0..15	1.0	50 – 100
Alta	500 – 1000	14	0.17	1.0	50 – 100
Alta	500 – 1000	16	0.20	1.0	50 – 100
Muy alta	>1000	6	0.076	1.2	>100
Muy alta	>1000	8	0.10	1.2	>100
Muy alta	>1000	10	0.12	1.2	>100
Muy alta	>1000	12	0.15	1.2	>100
Muy alta	>1000	14	0.17	1.2	>100
Muy alta	>1000	16	0.20	1.2	>100
Muy alta	>1000	18	0.22	1.2	>100
Muy alta	>1000	24	0.29	1.2	>100

Fuente: Ingeniero Alcides Huguet. Ingeominas.

La metodología de ejecución de pruebas de bombeo para la caracterización hidráulica de acuíferos ha sido implementada en muchos lugares del mundo, por ser un medio eficaz. Encontramos por ejemplo, el trabajo de "Evaluación de los recursos de agua subterránea en el Valle del Quibor; Estado Lara, Venezuela" expuesto en el IV Simposio Colombiano de Hidrogeología y III Conferencia Latinoamericana por Jégat y Torres (1993), que describe la explotación intensiva de los acuíferos durante los últimos 30 años provocando un descenso acelerado y alarmante de los niveles estáticos, del orden de 0.5 m/año, así como el deterioro de la calidad del agua subterránea, que obligó a una campaña de recolección de datos, donde se incluyo la ejecución de pruebas de bombeo para caracterizar hidráulicamente el acuífero, y así poder establecer una simulación matemática, que arrojó resultados que permitieron hacer recomendaciones para hacer una explotación más racional de este recurso.

Los valores de transmisividad arrojados por la interpretación de las pruebas de bombeo son característico de acuíferos libres; aunque cabe anotar que para los años 60 este acuífero era confinado en gran parte de su extensión, siendo la extracción sostenida durante los últimos décadas la que ha provocó este cambio.

Otro caso importante de utilización de pruebas de bombeo para caracterizar acuíferos se dio en la realización de la hidrogeología del ámbito de influencia del proyecto hidroeléctrico Corpus Christi (Argentina – Uruguay), donde fue necesaria la realización de 21 ensayos de bombeo en territorio argentino y 13 en territorio paraguayo. Con los parámetros calculados se establecieron características y propiedades hidrogeológicas en el ámbito de influencia del embalse, para predecir la incidencia que tendría el agua embalsada sobre el agua subterránea (Auge, 1993).

También en Argentina; para la determinación de parámetros hidráulicos formacionales del acuífero Puelche en un sector del sur de la provincia de Santa Fe y evaluar las características actuales y bajo un régimen prolongado de bombeo del sistema, se ejecutaron ensayos de bombeo a caudal variable y constante de diferente duración, de acuerdo al tiempo de estabilización del nivel dinámico. Una vez producido el cese del bombeo se registraron, en todos los casos, los niveles de recuperación (Tomás et al, 2003).

Los datos fueron procesados mediante el programa "Aquifer Test", (Waterloo Hydrogeologic, 1996). De acuerdo a la columna hidrogeológica en cada uno de los sitios ensayados, se toman como representativos, los parámetros determinados por uno de los métodos de interpretación en particular, adoptándose esta metodología para la caracterización del acuífero Morroa.

Inicialmente se instaló una electrobomba sumergible y se ejecutó un ensayo a caudal variable, con al menos tres escalones, para estimar el caudal específico y seleccionar aquel a utilizar en el ensayo de bombeo a caudal constante. Seguidamente se ejecutó un ensayo de bombeo a caudal constante, midiendo los descensos en el pozo de explotación, en el piezómetro y el freatímetro durante el período de bombeo a lo largo de 72 horas, a excepción de uno que fue de 30 horas. Asimismo se registró luego del cese del bombeo en el propio pozo de explotación y en los pozos de observación la medida de niveles en un período no menor de 12 horas, o hasta alcanzar el 95 % de la recuperación total.

Las mediciones de niveles piezométricos se realizaron mediante la utilización de sondas eléctricas. El caudal de bombeo fue controlado, por el método volumétrico, periódicamente para garantizar un caudal de extracción lo más constante posible. Los ensayos de bombeo fueron interpretados mediante los Métodos de Neumann, Hantush y Cooper-Jacob, y los ensayos de recuperación mediante el Método de Recuperación de Theis, arrojando la

conclusión, desde el punto de vista de la hidráulica subterránea, que el área investigada resultó ser heterogénea, de acuerdo a la dispersión observada en los parámetros de: espesor, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y la conductividad hidráulica, caso similar a lo que se obtuvo en el cálculo de los parámetros hidráulicos en el acuífero Morroa.

En el ámbito nacional, según el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, DAMA (2002), para la caracterización de los acuíferos de Bogotá se hizo un análisis de los caudales de bombeo de los pozos inventariados determinándose que existen dos centros de bombeo principales donde se han presentado los mayores abatimientos, situación parecida a la que presenta el acuífero Morroa con algunos pozos como el 52-II-A-PP-15 de gran profundidad y con un caudal mayor de 15 L/s, que atrae el agua subterránea hacia él formando un cono de abatimiento que cambia el flujo natural del acuífero (De Vivero et al, 2003).

Por otra parte, el inventario de pruebas de bombeo realizados en la Sabana de Bogotá determinó que de los 1075 pozos inventariados sólo 60 cuentan con pruebas de bombeo y datos geohidráulicos confiables. La definición de los parámetros como: Conductividad Hidráulica, Coeficiente de Almacenamiento y Transmisividad, se hizo con base en la información compilada la cual en algunos casos fue reevaluada mediante la reinterpretación de pruebas de bombeo. Estos parámetros hidrogeológicos se ubicaron arealmente y se proyectaron en el subsuelo sobre las secciones geológicas elaboradas previamente, con el fin de calcular valores equivalentes (de acuerdo a los espesores de cada formación) que sirvieran como variables de entrada al modelo matemático de simulación desarrollado.

En este estudio se analiza que dado que el agua subterránea está oculta debajo de la superficie del terreno, solamente se puede conocer en forma

directa su estado (cabeza piezométrica), mediante la observación y medición directa a través de pozos

Entre los años 1998 y 2000 la Corporación Autónoma Regional Del Valle del Cauca, CVC y la Corporación para el Desarrollo Sostenible de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, CORALINA, realizaron la caracterización de sus respectivos acuíferos mediante pruebas de bombeo para determinar la conductividad hidráulica, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento de sus acuíferos, para así poder modelar y predecir el comportamiento del acuífero bajo diversas condiciones de explotación. La modelación de un acuífero es la meta a la que se quiere llegar, pero en el caso del Acuífero Morroa por ser tan particular y complejo se tiene que evaluar y predecir su comportamiento con la mayor información posible producto de la interpretación de pruebas de bombeo.

En el acuífero Morroa la mayoría de los pozos de bombeo no cuentan con pozo(s) de observación lo que dificulta el cálculo del coeficiente de almacenamiento (S), aunque se han realizado pruebas de bombeo a caudal constante y se han calculado transmisividad entre 21 m^2/día y 470m^2/día y coeficientes de almacenamiento del orden $1.9*10^{-3}$ y $2.2*10^{-4}$ (CARSUCRE-FINAGUAS, 2001). Pero son datos puntuales obtenidos de las pruebas cuando se construyeron los pozos, que no son suficientes para caracterizar hidráulicamente el acuífero, bajo las condiciones actuales de explotación.

2.1 UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE INTERPOLACIÓN LINEAL DE KRIGING PARA VARIABLES ESPACIO TEMPORALES.

La técnica de Kriging, desarrollada por Materon (1970) es un modelo de interpolación puntual y zonal que minimiza el error en la estimación y se basa en la calidad de las mediciones. Fue empleado inicialmente en la minería

para interpolar observaciones de la profundidad de estratos minerales, extendiéndose su uso a otros campos posteriormente, especialmente en el análisis espacial de variables geofísicas que pueden ser tratadas a la luz de la teoría de campos aleatorios (Izquierdo y Poveda, 1993), variables como: conductividad eléctrica, transmisividad hidráulica, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento. El Kriging se puede aplicar para:

- Evaluar la variabilidad espacial de un fenómeno que se extiende en el espacio y/o en el tiempo y que muestra una cierta estructura, es decir, permite evaluar la variabilidad de una variable regionalizada.
- Interpolar dicha variable en forma óptima.
- Estimar la confiabilidad de las interpolaciones.
- Obtener una representación gráfica de la variable regionalizada mediante la construcción de isolíneas.
- Optimizar redes de estaciones de medición de variables geofísicas.

Esta técnica se utilizó para estimar los variogramas de los parámetros hidráulicos conductividad hidráulica y dureza total en el acuífero coprendido entre los ríos Párraga y Amaire en el Valle del Cauca (Colombia), donde se encuentran localizados múltiples pozos para el aprovechamiento de agua subterránea. La aplicación se hizo con el software geoestadístico "GEOPACK" creado por S. R. Yates del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y M. V. Yates de la Universidad de California. Para nuestro estudio utilizamos el software "SURFER" (Surface Mapping System, by Golden Software, Inc. Versión 5.01) que permite la aplicación de esta técnica para crear variogramas, modelos de variación espacial de autocorrelación espacial siendo uno de los mejores a la hora de interpolar variables geofísicas (Manual de Software Surfer, 1994).

3. METODOLOGÍA

3.1 SELECCIÓN DE LOS POZOS DE ESTUDIO

Para la caracterización hidráulica de un acuífero se debe tener datos del mayor número de pruebas de bombeo posible, sin embargo como no resulta viable desde el punto de vista económico realizar pruebas de bombeo en cada uno de los pozos actualmente activos en el acuífero Morroa y teniendo en cuenta que en años anteriores se han realizado pruebas de bombeo cuya reinterpretación aporta información útil para los objetivos del proyecto, se seleccionó una muestra representativa de 16 pozos de acuerdo con su profundidad y su localización en el área de estudio.

3.2 TRABAJO DE CAMPO

Para este proyecto se realizaron pruebas de bombeo en su mayoría a caudal constante, que permitieron comodidad en el manejo del caudal y mayor confiabilidad en los resultados. Consisten en dejar en reposo 24 horas el pozo de bombeo para que alcance su nivel estático, bombear 24 horas continuas el pozo a un mismo caudal, durante el cual se miden los niveles del agua y el caudal en el pozo de bombeo, a su vez se miden los niveles del agua en el(los) pozo(s) de observación si existe(n) y por último se registran durante las 24 horas siguientes al cese del bombeo los datos de nivel de agua tanto en el pozo principal como en el(los) pozo(s) de observación si existe(n). En la investigación se realizaron trece pruebas a caudal constante, dos escalonadas y una cíclica.

La realización de una prueba de bombeo tiene implicaciones sociales relevantes, dado que el abastecimiento de agua es suspendido durante 72

horas, por lo cual se realiza un plan de contingencia para informar a la población 3 días antes de la realización de la prueba para que puedan almacenar agua (Ver figura 4).

Figura 4. Perifoneo durante el plan de contingencia en el corregimiento El Mamón

3.2.1 Equipo de medida del caudal. Para realizar el bombeo, se utiliza el equipo instalado en el pozo y para la medición del caudal en el pozo de bombeo se utiliza uno de los métodos del cuadro 2. La figura 5 ilustra el método volumétrico.

Cuadro 2. Métodos para la medición del caudal

Método de medida	Caudal de bombeo	Ecuación de caudal
Volumétrico **	Menor que 30 lt/s	*Q = V / t
Orificio de Weir	Mayor que 30 lt/s	*Q = $(2*h / g)^{1/2}$

* Quintero Sagra, Hidráulica de pozos.

** Método utilizado en las pruebas de bombeo de este proyecto.

Figura 5. Medición del caudal en el pozo 44-IV-D-PP-26.

3.2.2 Medida del nivel del agua en los pozos de observación y/o bombeo. Para medir el nivel del agua en el pozo se utiliza una sonda eléctrica marca SEBA que es de fácil manejo y permite datos confiables, consiste en un electrodo suspendido por una cinta métrica de cables acerados que transmiten la corriente eléctrica cuando el electrodo toca la superficie del agua activándose una señal luminosa. (Ver figura 6).

Los datos de niveles y tiempo tomados tanto en la etapa de bombeo como en la etapa de recuperación (Ver figura 7) son anotados en el formato que se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Formato para la toma de datos de campo.

ETAPA DE BOMBEO					ETAPA DE RECUPERACIÓN					Observación
Tiempo (min)	Hora	Nivel agua (m)	S (m)	Caudal (lps)	Tiempo (min)	Hora	(t +t')/t'	Nivel agua (m)	S' (m)	

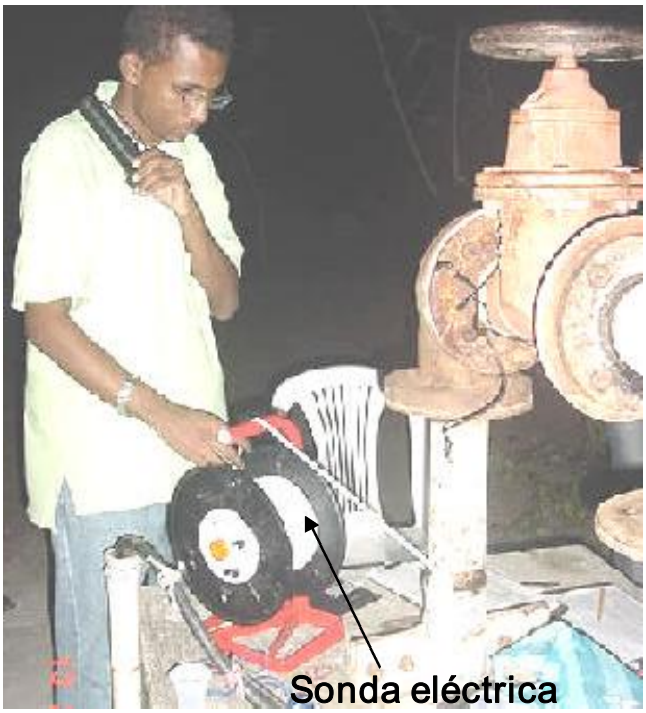


Figura 6. Sonda eléctrica para la medición de niveles de agua dentro del pozo.

Figura 7. Toma de datos durante el bombeo en el pozo 52-II-A-PP-19.

3.3 CÁLCULOS DE OFICINA

Con los datos de niveles del agua tanto en el pozo de bombeo y en los pozos de observación (si existen) se calcula el abatimiento (s) así: s = nivel estático (N.E) – nivel dinámico (N.D). De igual forma se calcula el abatimiento residual durante el proceso de recuperación.

La interpretación de los datos obtenidos se realizó con los softwares Aquifer-Test y Hytest, complementado con métodos de interpretación manual como los métodos de Theis y de Jacob. Para el caso del acuífero Morroa donde en la mayoría de las pruebas no se contó con pozo de observación, fue necesario utilizar el procedimiento aproximado de asumir un radio teórico para calcular el coeficiente de almacenamiento (Hugget, 2002).

3.3.1 Consideraciones acerca de la penetración parcial y el gradiente natural. Debido a que los pozos penetran parcialmente el acuífero y éste a su vez está conformado por capas con buzamiento entre 10º a 15º fue necesario hacer la corrección con el software Aquifer-Test que presenta esta opción.

Con respecto al gradiente natural, la variación en los resultados inducidos por éste es despreciable debido a que el gradiente provocado por efecto del bombeo es mucho mayor (Pulido, 2002).

3.3.2 Consideraciones acerca de la presentación y análisis de resultados. Después de analizados los resultados de los parámetros hidráulicos son extrapolados a toda la extensión del acuífero en la zona de estudio con la ayuda del software Surfer, que permite realizar los mapas de variación espacial de la transmisividad y la conductividad hidráulica, interpolando mediante la técnica de Kriging.

4. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

El Acuífero Morroa esta formado por 6 capas, cada una con características propias que las diferencian de las demás; debido a que los pozos de explotación captan en su mayoría más de una capa, no se puede hablar de T, K, y S pertenecen absolutamente a una de ellas sino que se habla de características hidráulicas promedio que son extrapoladas para toda el área de estudio.

La descripción hidrogeológica que se tiene del acuífero, señala que las capas con mejores características hidráulicas para almacenar y ceder agua son los niveles A y B, en un menor grado las capas C, D y E y casi nula para la capa F que presenta una alta compactación, hecho que coincide con los resultados obtenidos, pues los mayores valores para los parámetros hidráulicos: transmisividad (T), conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) son obtenidos en los pozos que captan fundamentalmente los niveles A y B.

De esta forma se establece que la parte con mayor potencial hídrico en términos de conductividad hidráulica la constituye la parte nor–oriental de la zona de estudio, correspondiente al municipio de Corozal, debido a que este sector está localizado prácticamente sobre el nivel acuífero A conformado en gran parte por gravas gruesas con buena capacidad para el almacenamiento de agua; además se tiene que estas características geológicas (materiales de la formación, porosidad) disminuyen a medida que se avanza hacia el centro en la franja formada por los corregimientos de Las Tinas, Las Palmas y El Mamón; observándose además que la conductividad hidráulica tiende a

aumentar nuevamente hacia el sur– occidente hacia los corregimientos de Chochó y Segovia (ver figura 8).

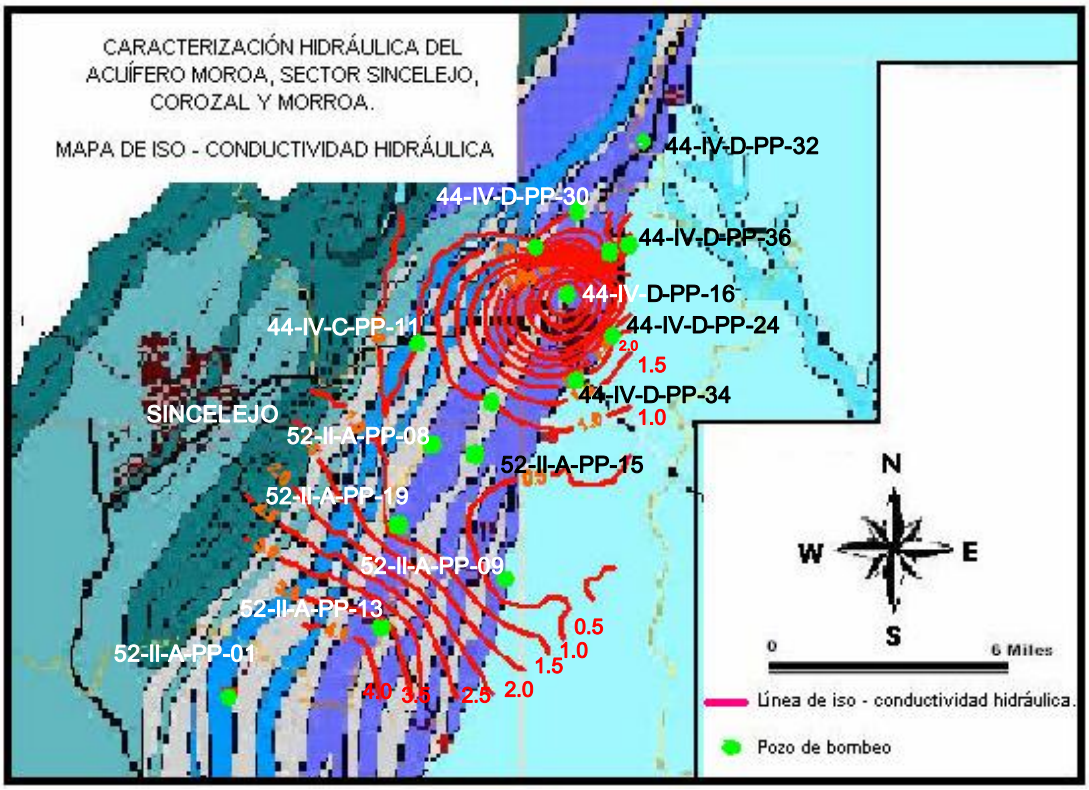


Figura 8. Mapa de Iso – Conductividad Hidráulica del área de estudio.
Fuente mapa base: CARSUCRE.

Por otra parte, en cuanto a la transmisividad tenemos que este parámetro hidráulico disminuye desde el nor – oriente en el campo de pozos de Corozal hacia el sur – oriente en el corregimiento de Segovia como se puede ver en el mapa de iso – transmisividad de la figura 9, concordando con las características geológicas de la zona en estudio.

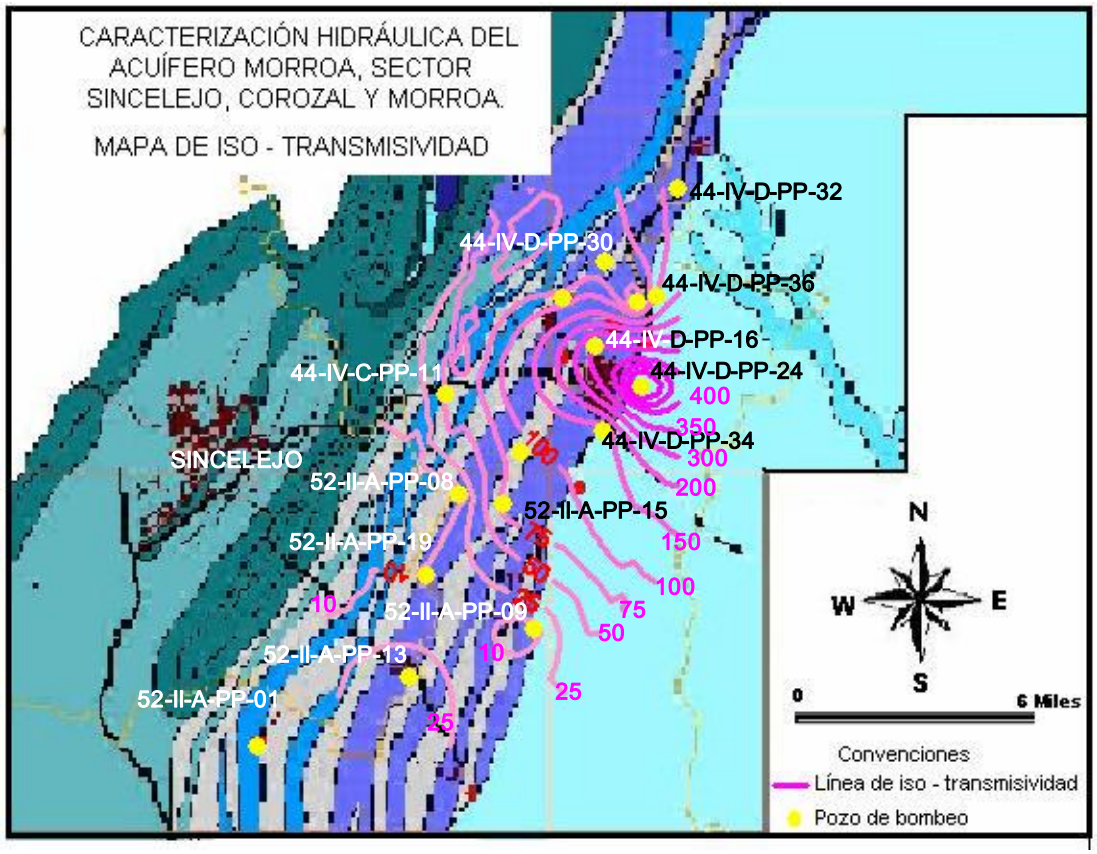


Figura 9. Mapa de Iso – Transmisividad Hidráulica del área de estudio.
Fuente mapa base: CARSUCRE.

En el cuadro 4 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos: transmisividad (T), conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) obtenidos con el software Acuifer–Test y en los anexos 4 y 5 se presentan los resultados obtenidos por todos los métodos y programas utilizados (método manual gráfico, softwares Aquifer-Test y Hytest). Además en el anexo 27 se muestran gráficas del análisis con el software Aquifer-Test de la prueba de bombeo del pozo 52-II-A-PP-15 realizada en el año 2003 donde se aprecia el buen ajuste que se obtuvo tanto en las gráficas de bombeo por los métodos de Theis y Cooper & Jacob, así como en la recuperación por Theis & Jacob.

Cuadro 4. Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo analizadas con el software Aquifer–Test.

Pozo	Theis			Jacob			Recuperación	
	T	K	S	T	K	S	T	K
44-IV-C-PP-08	70.4	0,88	1,4E-06	139	1,74	3,98E-04	114	1,43
44-IV-C-PP-11	7,70	0,51	3,5E-02	6,7	0,45	2,07E-02	8,095	0,54
44-IV-D-PP-16	125,0	2,9	3,13E-06	319,0	7,3	-	542	12,3
44-IV-D-PP-19	19,2	0,4	2,15E-03	23,1	0,5	1,68E-04	14,7	0,3
44-IV-D-PP-24	140,0	0,9	1,40E-05	462,0	3,0	-	247,0	1,6
44-IV-D-PP-30	74,6	0,6	7,07E-04	77,8	0,7	4,50E-04	58,7	0,524
44-IV-D-PP-26	114,0	-	-	111,0	-	-	114	-
44-IV-D-PP-34	89,3	1,3	-	186,0	2,8	-	114	1,69
44-IV-D-PP-18	215,0	7,7	1,01E-03	269	10,1	1,81E-04	1,69	6,03
44-IV-D-PP-36	82,0	2,1	6,83E-03	113,0	2,9	3,72E-05	109,0	2,8
44-IV-D-PP-39	70,3	0,8	2,21E-03	79,9	0,9	6,73E-04	68	0,732
52-II-A-PP-01	10,5	1,8	4,37E-04	27,4	4,6	-	28,7	4,79
52-II-A-PP-08	8,2	0,4	5,29E-07	2,0	0,1	4,78E-04	-	-
52-II-A-PP-09	3,9	0,1	4,19E-05	4,3	0,1	2,04E-05	23,6	0,7
52-II-A-PP-13	33,9	1,1	2,35E-06	-	-	-	128	4
52-II-A-PP-15	88,5	1,1	1,38E-06	77,0	0,9	6,74E-06	62,0	0,7
52-II-A-PP-19	2,4	0,1	4,05E-06	10,5	0,5	-	12,6	0,634

4.1.1 Pruebas de bombeo realizadas antes del año 2001. En el cuadro 5 se tiene la relación de estas pruebas; algunas fueron suministradas a CARSUCRE por el ingeniero Frank Rodríguez, las cuales se realizaron en los años 1983 y 1984 y otro grupo corresponde a pruebas realizadas en los años 1994 a 1997 que fueron recopilados por CARSUCRE - FINAGUAS (2001) .

Cuadro 5. Algunos valores de transmisividad del acuífero Morroa según CARSUCRE – FINAGUAS (2001).

Código		T (m^2/d)	S	Método	Observaciones
Anterior	Actual				
14	44-IV-D-PP-14	142		Jacob	F. Rodríguez
16	44-IV-D-PP-16	243		Jacob	F. Rodríguez
24	44-IV-D-PP-24	401		Jacob	Insfopal
		495	1.34E-03	Theis	Insfopal
		384	1.90E-03	Theis	Insfopal
25	44-IV-D-PP-25	364		Jacob	F. Rodríguez
		470	3.80E-03	Jacob	Obs. Pozo 5
		232	3.70E-03	Jacob	Obs. Pozo 6
		977	5.40E-03	Jacob	Obs. Pozo 16
		211		Jacob	Insfopal
29	44-IV-D-PP-29	206		Sensibilidad	F. Rodríguez
26	44-IV-C-PP-01	88		Jacob	F. Rodríguez
		154		Jacob	Insfopal
		122	7.40E-04	Recuperación	Insfopal
31	44-IV-D-PP-31	87		Jacob	Tony Jarma
		92		Recuperación	Tony Jarma
		100		Jacob	Tony Jarma
		92		Recuperación	Tony Jarma
Tinas		18		Jacob	Indesbrun
18	44-IV-D-PP-18	137		Jacob	F. Rodríguez
22	44-IV-D-PP-22	100		Jacob	F. Rodríguez
		304		Jacob	Insfopal

Los valores de transmisividad obtenidos en los ensayos realizados en los pozos 44-IV-D-PP-16 y 44-IV-D-PP-24 (ver cuadros 4 y 5) se convierten en parámetro de comparación con los resultados arrojados por este estudio,

debido a que se hicieron nuevas pruebas en estos pozos y los valores de K y T obtenidos son parecidos; esto indica que a pesar de los grandes descensos en los niveles de agua que presenta el acuífero las características hidráulicas se han mantenido constantes.

En el cuadro 6 se muestra la variación de los niveles dinámicos de algunos pozos estudiados, señalando que estos niveles se ven afectados por variables como el tiempo de bombeo, la interferencia de las áreas de influencia y el caudal de extracción de los pozos.

Cuadro 6. Variación del nivel dinámico en algunos pozos del acuífero Morroa

Pozo	Variación de nivel dinámico (m/año)	Tipo de variación
44-IV-C-PP-08	4,3	Descenso
44-IV-D-PP-16	11,2	Descenso
44-IV-D-PP-19	0,32	*Ascenso
44-IV-D-PP-24	4	Descenso
44-IV-D-PP-34	1,24	*Ascenso
44-IV-D-PP-36	0,37	*Descenso
44-IV-D-PP-39	0,4	*Ascenso
52-II-A-PP-15	7	Descenso

Fuente: CARSUCRE

*Pozos con régimen de bombeo cíclico.

Del cuadro anterior se puede inferir que la rata de descenso de los pozos 44-IV-D-PP-16 y 52-II-A-PP-15 es alta en comparación con los demás pozos, siendo más crítica la del primero pues genera un deterioro ambiental de esta zona del acuífero, este pozo además fue construido en 1968 habiendo cumplido ya su período de vida útil, mientras que el segundo fue construido en 1996 y en los seis últimos años ha bajado su nivel estático 33 metros.

Algunos pozos con régimen de bombeo cíclico presentan variación en el nivel dinámico tendiente al ascenso tal como se muestra en cuadro anterior,

esto significa que el bombeo seguido de un periodo de recuperación produce mínimas variaciones del nivel dinámico comparado con regímenes de bombeo permanentes. Como ejemplo de correcta explotación tenemos el pozo 44-IV-D PP-36 el cual es explotado con períodos de bombeo seguidos de períodos de recuperación (ver figura 10).

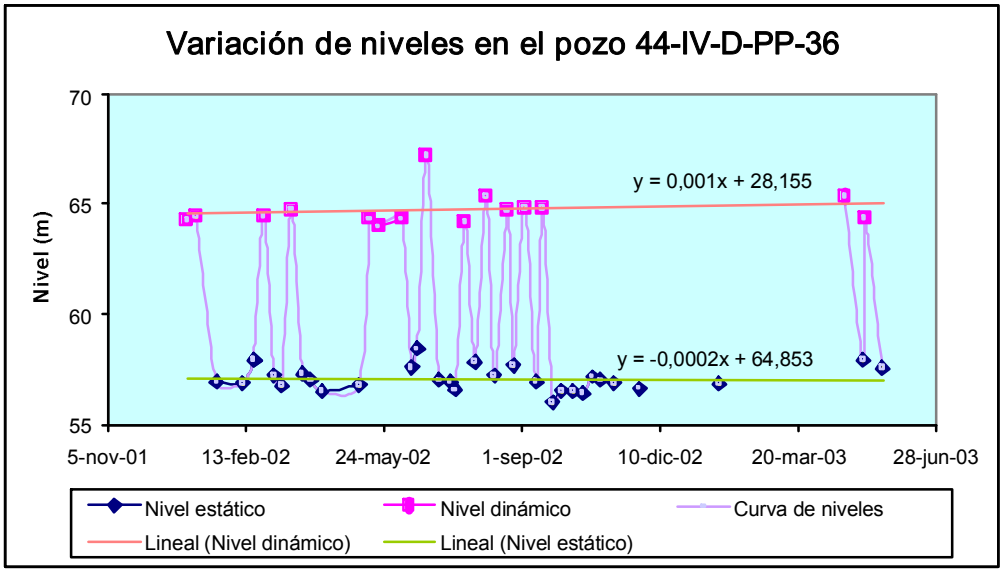


Figura 10. Variación de niveles en el pozo 44-IV-D-PP-36.

4.2 INTERFERENCIA DE POZOS

De la ecuación que define el radio de influencia de un pozo se deduce que este aumenta con el tiempo de bombeo y es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del coeficiente de almacenamiento (S). De los cálculos obtenidos se observa que para el coeficiente de almacenamiento de orden de 10^{-4} se alcanzan radios de influencia bastante elevados (del orden de kilómetros), esto implica que halla superposición de las áreas de influencia de cada uno de los pozos, originando lo que se denomina interferencia de pozos, este fenómeno provoca mayor abatimiento para la explotación de un caudal determinado disminuyendo la eficiencia del pozo, haciéndose más crítico en tanto más cerca se encuentren los mismos. La figura 11 ilustra lo que sucede cuando se superponen los radios de influencia de los pozos.

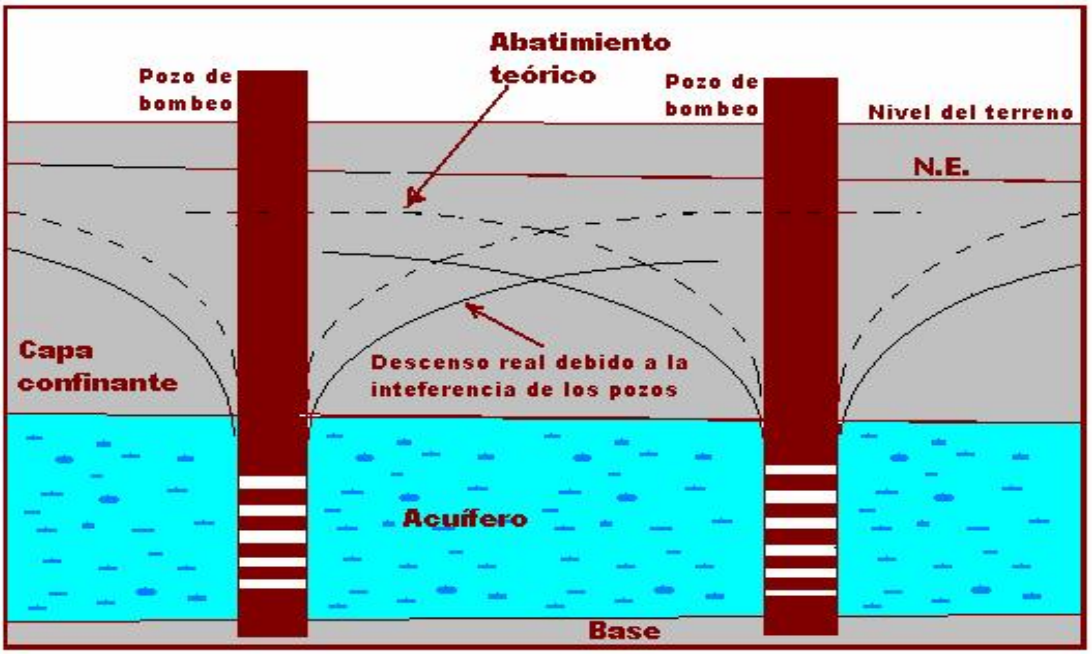


Figura 11. Interferencia de pozos.

La acumulación de descensos debido a la no racionalización del régimen de bombeo es una de las causas de la variación drástica que ha experimentado el nivel estático del acuífero Morroa en los últimos 20 años, un ejemplo de ello lo constituye el pozo 44-IV-D-PP-16 donde se observa que el nivel piezométrico está 33 metros más profundo en la actualidad, esto constituye un aumento progresivo de los costos de operación del pozo por la necesidad de bajar los equipos de bombeo a una mayor profundidad, que implica el cambio de éstos por otros de mayor cabeza hidráulica y de menor diámetro por las reducciones comunes en el diámetro de los pozos; siendo errada ésta práctica de bajar los equipos porque así bajan los niveles piezométricos cada vez más, contribuyendo a la sobreexplotación del acuífero.

Teniendo en cuenta que la mayor interferencia se da en tanto mayor sea el radio de influencia y que éste depende del coeficiente de almacenamiento (S), la transmisividad (T) y el tiempo de bombeo (t), se puede mostrar la interferencia que se presenta entre los pozos del Acuífero Morroa estudiados

y las áreas donde ésta es más critica, para lo cual se muestra en el cuadro 7 su variación para diferentes tiempos de bombeo, tomando el coeficiente de almacenamiento de cada pozo, los valores de transmisividad del cuadro 4 y utilizando la fórmula:

$$R = 1{,}5 * \sqrt{\frac{T * t}{S}} \; ;$$

Cuadro 7. Variación del radio de influencia de los pozos donde se realizaron pruebas de bombeo durante el presente estudio.

POZO	T (m^2/día)	S	RADIO DE INFLUENCIA (m)				
			0,75 días	1 día	5 días	10 días	100 días
44-IV-C-PP-08	117	1,05E-04	1371	1583	3541	5007	15834
44-IV-C-PP-11	11	1,10E-04	411	474	1061	1500	4743
44-IV-D-PP-16	319	1,10E-04	2212	2554	5712	8078	25544
44-IV-D-PP-19	23,1	1,68E-04	482	556	1244	1759	5562
44-IV-D-PP-24	462	1,40E-04	2360	2725	6093	8617	27249
44-IV-D-PP-30	77,8	1,50E-04	936	1080	2416	3416	10803
44-IV-D-PP-26	111	1,60E-04	1082	1249	2794	3951	12494
44-IV-D-PP-34	269	1,81E-04	1584	1829	4089	5783	18286
44-IV-D-PP-18	215	1,81E-04	1416	1635	3656	5170	16348
44-IV-D-PP-36	113	1,35E-04	1188	1372	3069	4340	13723
44-IV-D-PP-39	79,9	6,73E-04	448	517	1156	1634	5168
52-II-A-PP-01	10,5	1,50E-04	344	397	887	1255	3969
52-II-A-PP-08	2	4,78E-04	84	97	217	307	970
52-II-A-PP-09	4,3	1,50E-04	220	254	568	803	2540
52-II-A-PP-13	33,9	1,50E-04	618	713	1595	2255	7131
52-II-A-PP-15	77	1,10E-04	1087	1255	2806	3969	12550
52-II-A-PP-19	10,5	1,50E-04	344	397	887	1255	3969

Con los datos del cuadro anterior en la figura 12 se tiene el mapa de radios de influencia teórica de cada pozo, donde los círculos verde, rojo y amarillo representan estas áreas a los 0.75, 1 y 5 días de bombeo respectivamente, apreciándose la gran mancha sobre la zona de Corozal donde la interferencia de los pozos es crítica y se ha generado una interferencia que hace que aumente el descenso de los niveles piezométricos, evidenciándose

la mala distribución del campo de pozos de Corozal y haciendo imposible la proyección de nuevas perforaciones en esta zona.

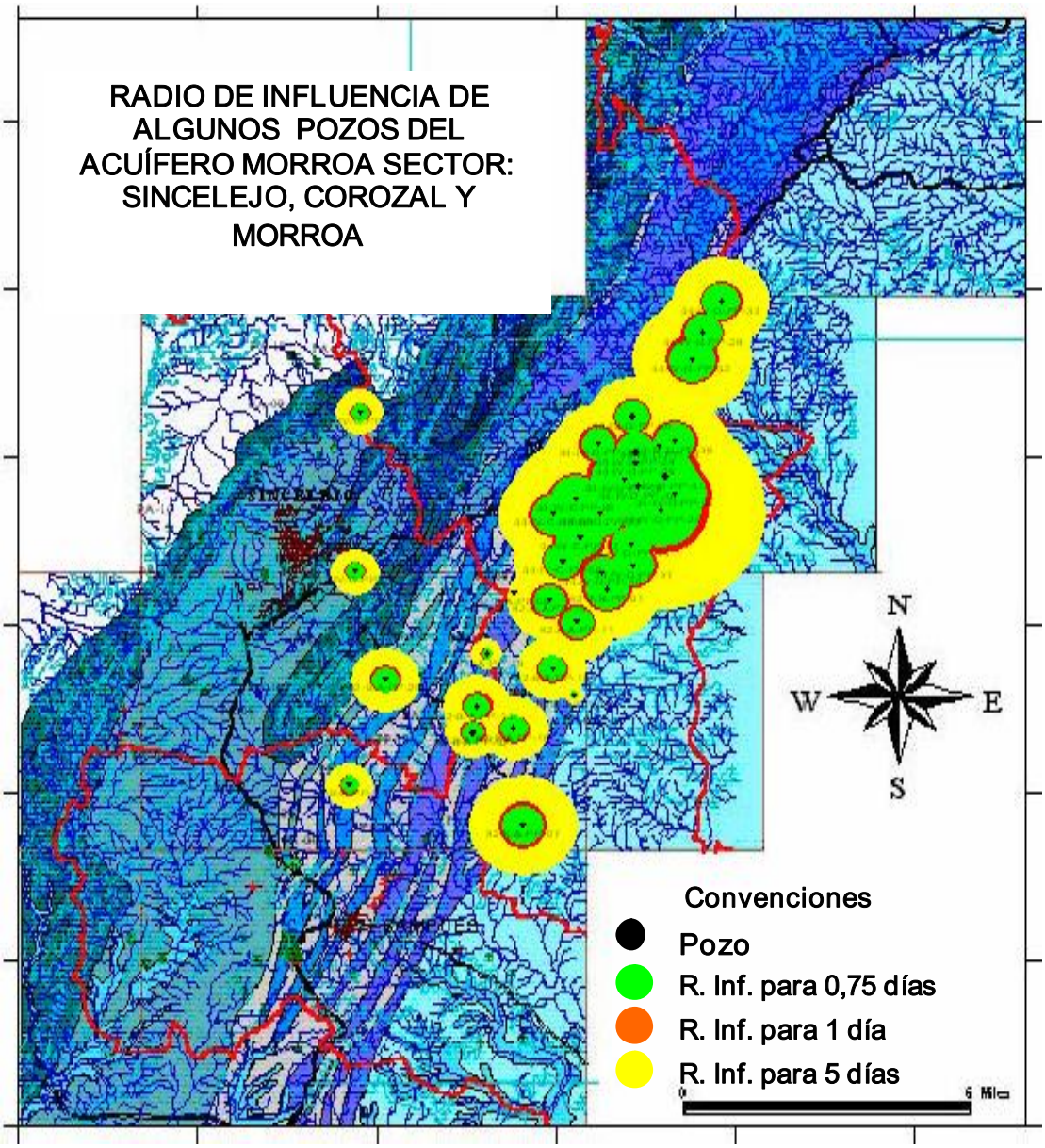


Figura 12. Radio de influencia de algunos pozos del acuífero Morroa sector Sincelejo, Corozal y Morroa.

Fuente mapa base: CARSUCRE.

4.3 CURVAS DE ABATIMIENTO CONTRA LOGARITMO DE TIEMPO

La representación gráfica de los datos tomados durante el bombeo y la recuperación de cada pozo, muestra ciertas particularidades que es necesario tener en cuenta con el fin de darle una mejor aplicación a los valores calculados de los parámetros hidráulicos, pues éstos gráficos muestran características del acuífero que no se aprecian en los valores numéricos obtenidos, con ellos se evalúa la validez de la interpretación de los datos así como el comportamiento del pozo y del acuífero.

Las principales anomalías que se deducen en los gráficos de descenso contra logaritmo de tiempo en la interpretación de los datos de bombeo y recuperación son: algunas gráficas no se ajustan a una línea recta como el bombeo del pozo 44-IV-C-PP-11 (ver anexo11); otras presentan varias pendientes como la del pozo 44-IV-D-PP-19 (ver anexo 13), que origina la obtención de más de un valor para T, K y S, poniendo de manifiesto que la Formación Morroa es multicapas con particularidades hidrogeológicas que las diferencian unas de otras; y por último curvas de recuperación que presentan la anomalía de no pasar por el origen de coordenadas y cortan el eje de las abcisas, por ejemplo la curva de recuperación del pozo 44-IV-D-PP-30 (ver anexo 16), implicando que el pozo ha recuperado su nivel en un tiempo menor al teórico necesario, lo cual es solamente posible cuando ha existido una recarga de agua exterior al sistema pozo-acuífero. Estas recargas pueden tener, como se sabe, diversos orígenes: recargas por goteo vertical, laterales e incluso, y como más significativa, el reciclado del agua bombeada.

Además, en algunos pozos del sur del área de estudio específicamente los pozos 52-II-A-PP-08, 52-II-A-PP-09, 52-II-A-PP-13 y 52-II-A-PP-19; se presentaron abatimientos excesivos durante los primeros minutos del bombeo, originando oscilaciones del nivel dinámico, aunque el caudal de

explotación de estos pozos sea inferior a 10 lt/s (Ver anexos 21,22, 23 y 26), particularidad que se presenta en acuíferos colgados, es decir, que quedan secos porque el nivel piezométrico ha descendido tanto que está por debajo de ellos debido a la explotación.

Este fenómeno se relaciona con el hecho producido por la superposición de los radios de influencia y por la barrera hidráulica que provocan los pozos localizados en la parte norte del área de estudio, pozos que tiene mayor profundidad y extraen caudales entre los 10 y 50 lt/s que inducen un gradiente hidráulico mayor que el natural producto del excesivo abatimiento, modificando el patrón de flujo en el acuífero y ocasionando forzosamente que un flujo considerable de agua se dirija hacia los mismos.

Un hecho que puede explicar el comportamiento de los pozos citados arriba es la posible falta de un buen desarrollo, el pobre mantenimiento de los mismos y posible mal diseño, que se evidencia por ejemplo en el color turbio del agua con presencia de finos que se presentó durante el bombeo del pozo 52-II-A-PP-19, perteneciente al corregimiento Las Palmas; así como la dureza del agua que se extrae en el pozo 52-II-A-PP-01 del corregimiento de Segovia, posiblemente consecuencia de las incrustaciones en los filtros de los pozos de la zona en mención.

4.4 CAPACIDAD ESPECÍFICA

Los resultados obtenidos para la capacidad especifica (C.E.) sustentan los valores de los parámetros hidráulicos y el comportamiento de los pozos durante la realización del ensayo, aunque se presenta una notable anomalía en el pozo 44-IV-D-PP-19, donde se obtuvo un valor bajo de conductividad hidráulica coincidente con la capacidad especifica obtenida, magnitud que no corresponde a los valores medios de la parte norte de la zona de estudio,

donde los valores de K y C.E. son altos (Ver cuadro 8). Este fenómeno se debe posiblemente a la falta de mantenimiento del pozo, descartándose la posible interferencia debido a que el pozo más cercano es el 44-IV-D-PP-36 y este solo se explota pocas horas al día.

En el siguiente cuadro se observa que para valores altos de capacidad corresponden propiamente valores altos de conductividad hidráulica.

Cuadro 8. Capacidad especifica y conductividad hidráulica de los pozos donde se realizaron pruebas de bombeo entre 2001 y 2003.

POZO	C.E. (lt/s*m)	K (m/d)
44-IV-C-PP-08	0.7299	1.5
44-IV-C-PP-11	0.2284	0.7
44-IV-D-PP-16	1,2754	7.3
44-IV-D-PP-19	0,0295	0.5
44-IV-D-PP-24	1,4498	3.0
44-IV-D-PP-30	0,759	0.7
44-IV-D-PP-26	1.173	-
44-IV-D-PP-34	1,1019	2.8
44-IV-D-PP-36	0,8502	2.9
44-IV-D-PP-39	0,745	0.9
52-II-A-PP-01	0.112	4.6
52-II-A-PP-08	0,212	2,0
52-II-A-PP-09	0,0701	4,3
52-II-A-PP-13	0,3668	1.1
52-II-A-PP-15	0,9427	0.9
52-II-A-PP-19	0,0281	0.5

4.5 CALCULO DE LAS RESERVAS DEL ACUIFERO MORROA EN EL SECTOR SINCELEJO, COROZAL Y MORROA

Las reservas de los acuíferos confinados están compuestas por las reservas elásticas, que son el volumen de agua almacenado por el efecto de confinamiento de las capas y las reservas de almacenamiento, que como su nombre lo indica es el agua almacenada en los poros de la formación.

Las reservas elásticas es el producto del volumen que existe entre el techo de la formación y el nivel piezométrico por el coeficiente de almacenamiento de la misma, mientras que las reservas de almacenamiento es el producto del volumen de la formación por su porosidad efectiva.

De esta forma para calcular el almacenamiento del acuífero Morroa en el sector de Sincelejo, Corozal y Morroa se tienen las siguientes consideraciones:

- El área de estudio es de 131 km^2, que se extiende desde el sur de del municipio Los Palmitos hasta el Corregimiento Don Alonso, con una longitud promedio de 19 km.
- Se asume que la recarga es nula.
- El buzamiento de las capas acuíferas es continuo y constante.
- El coeficiente de almacenamiento es representativo para cada capa, tomado de la interpretación de las pruebas de bombeo.
- El espesor de cada una de las capas se mantiene constante

- La porosidad efectiva varia de 10% al 15%, la cual fue medida en laboratorio y por ensayos de campo con trazadores.

- Se toma una franja lateral de 3,5 Km hacia el este desde el afloramiento del nivel A, como se puede ver en la figura 13 y se calculan en el cuadro 9 las reservas del acuífero Morroa del sector Sincelejo, Corozal y Morroa.

- No obstante por obvias razones el total del agua almacenada de la reserva no se puede extraer, por lo que se estima que el máximo nivel dinámico que se pueda alcanzar no debe sobrepasar los 200 metros para que la explotación del acuífero sea técnica, económica y ambientalmente posible (ver figura 14).

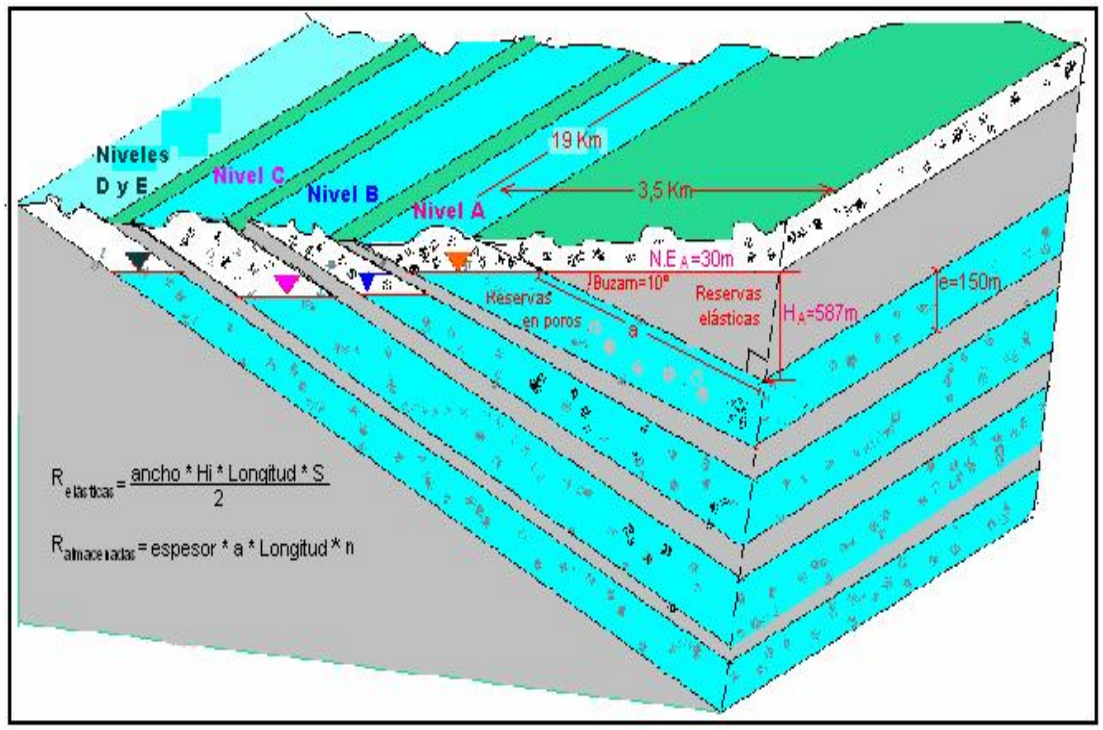


Figura 13. Esquema de disposición de las capas del acuífero Morroa para el cálculo de las reservas.

Con una dotación de 200 lt/hab_día y proyectando la demanda con base al crecimiento de la población tenemos que las reservas explotables calculadas en el cuadro 10 alcanzan para cerca de veinte años. Pero con los descensos que se observan en algunos pozos debido al régimen de explotación intensiva que se les viene dando, la infraestructura actual del campo de pozos saldría fuera de servicio aproximadamente en 7 años, pues los niveles de bombeo quedarían por debajo del límite máximo de ubicación del equipo de bombeo.

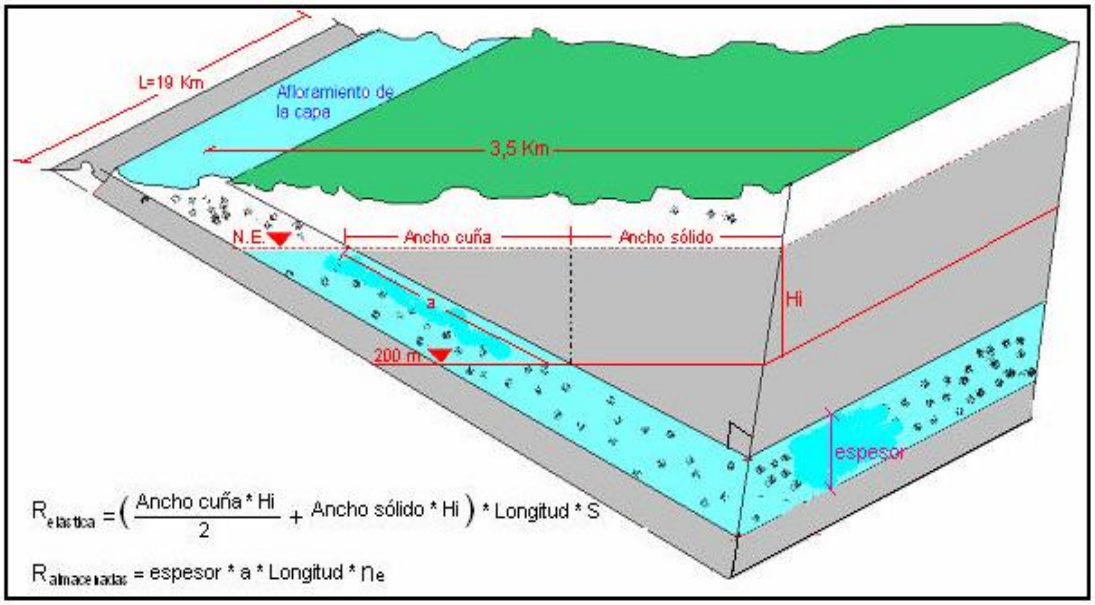


Figura 14. Esquema para el cálculo de las reservas explotables por capa del Acuífero Morroa.

Cuadro 9. Cálculo de las reservas del acuífero Morroa, sector Sincelejo, Corozal y Morroa.

Nivel	Longitud (m)	Ancho a (m)	Ancho (m)	H_i Altura piezométrica (m)	Espesor (m)	n_e %	S	Reservas elásticas (m^3)	Reservas almacenadas (m^3)	Reservas totales (m^3)
A	19000	3380	3330	587	150	15	3,98E-04	7.390.759	1.444.950.000	1.452.340.759
B	19000	3361	3257	870	100	15	1,50E-04	4.037.866	957.885.000	961.922.866
C	19000	3361	3257	870	50	10	8,90E-04	23.958.003	319.295.000	343.253.003
D y E	19000	3458	3344	895	80	10	1,10E-04	3.127.560	525.616.000	528.743.560
Total Reservas (m^3)								38.514.187	3.247.746.000	3.286.260.187

Cuadro 10. Cálculo de las reservas explotables del acuífero Morroa, sector Sincelejo, Corozal y Morroa.

Nivel	Longitud (m)	Ancho a (m)	Ancho cuña (m)	Ancho sólido (m)	H_i Altura piezométrica (m)	Espesor (m)	n_e %	S	Reservas elásticas (m^3)	Reservas almacenadas (m^3)	Reservas totales (m^3)
A	19000	980	964	2366	170	150	15	3,98,E-04	3.661.218	418.950.000	422.611.218
B	19000	522	503	2754	135	100	15	1,50,E-04	1.156.366	148.770.000	149.926.366
C	19000	522	503	2754	135	50	10	8,90,E-04	6.861.106	49.590.000	56.451.106
D y E	19000	610	590	2754	158	80	10	1,10,E-04	1.006.841	92.720.000	93.726.841
Total Reservas (m^3)									12.685.531	710.030.000	722.715.531

4.6 OBTENCIÓN DEL CAUDAL OPTIMO DE EXPLOTACIÓN

El caudal de explotación posible de un pozo depende tanto de las características hidráulicas del acuífero como del grado de eficiencia de las obras de captación. En ocasiones la capacidad específica de un pozo es tan alta que con un descenso mínimo se alcanza a cubrir la demanda de agua y resulta sencillo fijar el caudal que satisfaga las necesidades de una comunidad (Villanueva e Iglesias, 1984), pero no se debe olvidar la importancia de evaluar la disponibilidad de recursos, cuantificar las reservas y realizar las respectivas proyecciones de la población objetivo.

En el acuífero Morroa los pozos más profundos, especialmente los localizados al norte del área de estudio presentan un rendimiento específico bastante alto. La mayoría de estos pozos con pequeños descensos producen caudales entre 20 y 50 lt/s, poniendo de manifiesto la facilidad del acuífero para ceder agua, así como las buenas condiciones de su construcción. Sin embargo, a pesar de esta cualidad del acuífero se presentan inconvenientes que limitan la obtención de grandes caudales:

De acuerdo a estudios realizados por CARSUCRE el agua que se extrae del acuífero es mayor que la demanda de la población, hecho que se viene presentando desde hace varios años. El aumento de la profundidad de los niveles estáticos y dinámicos en el área de estudio del acuífero, aumenta los gastos de operación del sistema y puede llegar a ser no rentable la explotación del agua subterránea.

En acuíferos multicapas como el acuífero Morroa debe procurarse no dejar capas colgadas, debido a que las condiciones exigidas para el cálculo de caudales a partir de la ecuación general de descensos no se cumple:

$$d = 0.183 * \frac{Q}{T} * \log \frac{2.25 * T * t}{r^2 * S} + B * Q^n$$

Es decir, el caudal obtenido por unidad de descenso será tanto menor cuanto mayor sea el número de acuíferos que queden colgados, esto indica que se está extrayendo mayor caudal que el que se puede sacar del acuífero.

La consideración más importante a tener en cuenta es la explotación intensiva a la que está sometido el acuífero que viene provocando el progresivo decremento de las reservas del acuífero, que se evidencia en el aumento de la profundidad del nivel estático. Esto indica además que los recursos disponibles explotables que presenta la zona son menores que el caudal que se está extrayendo, esto resulta preocupante ya que la tendencia es al agotamiento.

Una alternativa razonable para contrarrestar este fenómeno es la disminución del caudal de explotación para los pozos del área de estudio de modo que se intente igualar el caudal extraído con el caudal de escurrimiento subterráneo, regulando además la separación de las nuevas perforaciones para no aumentar la densidad de pozos por área como sucede en Corozal.

Con base en el cálculo de las reservas que se pueden explotar se estima necesario reducir el régimen de bombeo y el caudal de explotación para que se produzca un régimen permanente en el pozo antes de 24 horas de bombeo, buscando equilibrar el caudal que aporta el estrato acuífero con el que se extrae del pozo y garantizar la conservación de las reservas. Esta disminución de caudales y regímenes de bombeo obliga a que las empresas y juntas prestadoras del servicio controlen sus pérdidas y organicen sus bombeos de tal forma que distribuyan bien el agua extraída del acuífero.

Como primera aproximación disminuyendo el abatimiento presentado en la actualidad en un 30 %, siguiendo la metodología expuesta por Quintero Sagre (1993) y utilizando el nomograma del anexo 28 se obtienen los caudales óptimos de explotación (ver cuadro 11).

Cuadro 11. Caudal óptimo de explotación para los pozos del estudio.

Durante la prueba de bombeo									Cálculo deseado			
Pozo	N.E (m)	N.D (m)	S (m)	Caudal prueba (lt/s)	C.E. (m)	Espesor acuífero (m)	S %	Porcentaje rendimiento	S deseado (m)	S %	Rendimiento %	Caudal óptimo (lt/s)
44-IV-C-PP-08	64.80	91.83	27.03	19.73	0.729	80,00	33.79	37.5	18.9	23.63	28.5	15.00
44-IV-C-PP-11	42.30	86.05	43.75	9.99	0.228	15,00	31.2	32.76	30.6	19.3	25.2	10.5
44-IV-D-PP-16	79,31	91,40	12,09	15,42	1,28	67,92	17,80	21,5	8,5	12,51	15	10,8
44-IV-D-PP-19	39,72	98,97	59,25	1,75	0,03	100,78	58,79	64	30	29,77	34	0,9
44-IV-D-PP-24	39,10	64,72	25,62	37,143	1,45	194,35	13,18	16,5	18	9,26	11	24,8
44-IV-D-PP-30	63,29	89,22	25,93	19,68	0,76	327,71	7,91	10	18	5,49	7	13,8
44-IV-D-PP-26	51,38	57,35	5,97	6,963	1,17	-	-	-	-	-	-	5.0
44-IV-D-PP-34	44,68	66,37	21,69	20,68	0,95	160,32	13,53	16,5	15	9,36	11	13,8
44-IV-D-PP-36	55,62	67,1	11,48	9,76	0,85	179,38	6,40	8,5	8	4,46	5	5,7
44-IV-D-PP-39	52,4	79,5	27,1	20,19	0,75	259,6	10,44	13,4	19	7,32	8	12,1
52-II-A-PP-01	7	24,26	17,26	1,94	0,11	35	49,31	53	12	34,29	38	1,4
52-II-A-PP-08	58,8	76,16	17,36	2,07	0,12	82,3	21,09	25,5	12	14,58	17	1,4
52-II-A-PP-09	26,8	63,73	36,93	2,59	0,07	84,2	43,86	48	26	30,88	35	1,9
52-II-A-PP-13	57,77	81,9	24,13	8,85	0,37	63,23	38,16	44,4	17	26,89	31,5	6,3
52-II-A-PP-15	94,13	108,1	13,95	13,15	0,94	283,69	4,92	5	9	3,17	4	10,5
52-II-A-PP-19	59,38	104,5	45,12	1,27	0,03	60,02	75,17	77,5	30	49,98	50	0,8

5. CONCLUSIONES

Este trabajo es importante porque permite conocer el comportamiento del Acuífero Morroa bajo las condiciones actuales de explotación, convirtiéndose en un aporte científico para mejorar la calidad de vida de las poblaciones asentadas en la zona de estudio. Compara la situación presentada en el acuífero en años anteriores basados en la reinterpretación de pruebas de bombeo de las décadas 80 y 90 con las que se realizaron durante este proyecto, encontrándose que las propiedades del acuífero son similares a pesar de los regímenes de explotación que se han venido ejecutando.

La falta de planeación en la explotación del acuífero Morroa a traído como consecuencia la disminución de las reservas del acuífero, situación que se agudiza cada día debido a la poca proyección que se evidencia en el mal trazado del campo de pozos, especialmente en la zona del municipio de Corozal (sector con mayor potencial hídrico de la zona de estudio) donde se presenta una gran densidad de perforaciones; sumándosele además la improvisación en el establecimiento del caudal de explotación y los extendidos regímenes de bombeo a los que son sometidos los pozos.

Los pozos localizados en el municipio de Corozal presentan gran interferencia por superposición de las áreas de influencia, demostrando la explotación intensiva a la que ha sido sometida esta zona, provocando que bajen cada vez más los niveles de bombeo generando una barrera hidráulica que obstruye el flujo normal del agua hacia el sur.

Los pozos de la franja central formada por los corregimientos de Las Tinas, Las Palmas y El Mamón presentan unos pobres parámetros hidráulicos, con radios de influencia bajos, siendo explotados con pequeños caudales donde durante las pruebas de bombeo se produjeron abatimientos excesivos en poco tiempo posiblemente por la falta de un buen desarrollo, un pobre mantenimiento, un mal diseño o la barrera hidráulica generada por los pozos de la parte norte del área de estudio.

El aumento de las profundidades de los niveles de bombeo de los pozos de la zona de estudio aumenta los gastos de operación del sistema y puede llegar a ser no rentable la explotación del agua subterránea, además de tener otro condicionante que es evitar dejar colgadas algunas capas del acuífero que es multicapas.

Los abatimientos excesivos y por ende la explotación intensiva del Acuífero Morroa se debe a los prolongados regímenes de bombeo y altos caudales que se están extrayendo, dado que no podemos sacar un caudal más alto que el aportan los estratos acuíferos.

Dados los problemas de abastecimiento de agua en la ciudad de Sincelejo se hicieron pruebas invirtiendo el proceso bombeo-recuperación concluyendo que no arrojan resultados confiables para la interpretación de los datos de recuperación porque no se conoce exactamente el tiempo de bombeo y el asumir un caudal constante genera errores puesto que éste último decrece conforme avanza el bombeo de un pozo (cuando este periodo es extenso), hecho que se pudo comprobar comparando resultados de la interpretación de los datos de bombeo y de recuperación de los pozos 44-IV-D-PP-16, 44-IV-D-PP-24 y 44-IV-C-PP-08 (ver anexo 4).

En la interpretación de las pruebas de bombeo se pudieron corroborar los valores obtenidos durante las etapas de bombeo y recuperación analizando el comportamiento de las curvas, permitiendo así alcanzar mayor confiabilidad al momento de asignar un valor numérico a los parámetros calculados.

De acuerdo al resultado obtenido las reservas de agua del Acuífero Morroa en la zona de estudio se estiman en **3.286'260.188** m^3, siendo la reservas explotables de **722'715.531** m^3 con un abatimiento hasta 200 metros de profundidad. Esta aproximación es de suma importancia porque sirve de punto de partida para un estudio que determine y cuantifique la cantidad de agua almacenada en toda la extensión del Acuífero Morroa.

Con una dotación de 200 lt/hab_día se estima que las reservas explotables alcanzan para cerca de veinte años, pero con los regímenes de explotación actuales se generan grandes descensos del nivel dinámico y se prevé que el campo de pozos de la zona estudio saldría de funcionamiento aproximadamente en 7 años .

Dada la variabilidad de los resultados obtenidos en el área de estudio se hace necesario investigar detalladamente las características hidráulicas del resto del Acuífero Morroa para hacer la correlación de la información a escala regional, para lograr una completa y más confiable caracterización de todo el acuífero por sectores, que necesariamente han de tener comportamientos diferentes no extrapolables a otras áreas del mismo.

La experiencia de interpretar las pruebas de bombeo por métodos manuales y con programas de computador pone de manifiesto la necesidad de aplicar tecnología para agilizar la interpretación, con la condición de analizar los resultados basados en las condiciones bajo las cuales fue ideado el modelo del programa de computador.

6. RECOMENDACIONES

6.1 EFECTO DE LA INTERFERENCIA DE POZOS.

La sobreexplotación en el Acuífero Morroa presenta una realidad preocupante, la evidencia de esta situación se manifiesta con los prolongados descensos que se han registrado en los últimos años. Para contrarrestar los efectos de superposición de los radios de influencia de cada pozo y por ende la presentación de abatimientos excesivos en el acuífero es necesario disminuir el tiempo de bombeo con el que actualmente se explotan los pozos y determinar un régimen de bombeo-recuperación apropiado que permita la recuperación de niveles con el mínimo efecto de los abatimientos residuales acumulados que son perjudiciales para el acuífero tanto ambiental como económicamente.

Para la explotación del acuífero Morroa se pueden adoptar tiempos de operación de 0.75 a 5 días, siendo mayor el tiempo de recuperación cuanto mayor sea el tiempo de bombeo como se muestra en el cuadro 12. Estos valores son recomendables para hacer sostenible la explotación del acuífero, siendo el régimen más conveniente el de 18 horas de bombeo seguido de 6 horas de recuperación, de esta forma se producirá una mayor eficiencia del pozo y se evitará el fenómeno de interferencia, haciendo considerable la conservación del agua de la formación por el período de recuperación del nivel piezométrico. Este régimen también permite chequear continuamente la variación de las propiedades hidráulicas, convirtiéndose en un ensayo cíclico de bombeo muy útil para seguir estudiando el acuífero, además el

avance del nivel dinámico es menos critico que el que se tiene si el bombeo fuera continuo (Ver figura 15).

Cuadro 12. Periodo de recuperación recomendado para un tiempo determinado de bombeo.

Tiempo de bombeo (días)	Tiempo de recuperación (días)	Bombeo (horas)	Recuperación (horas)
0,75	0,25	18	6
1	0,33	24	8
2	0,50	48	12
5	1,00	120	24

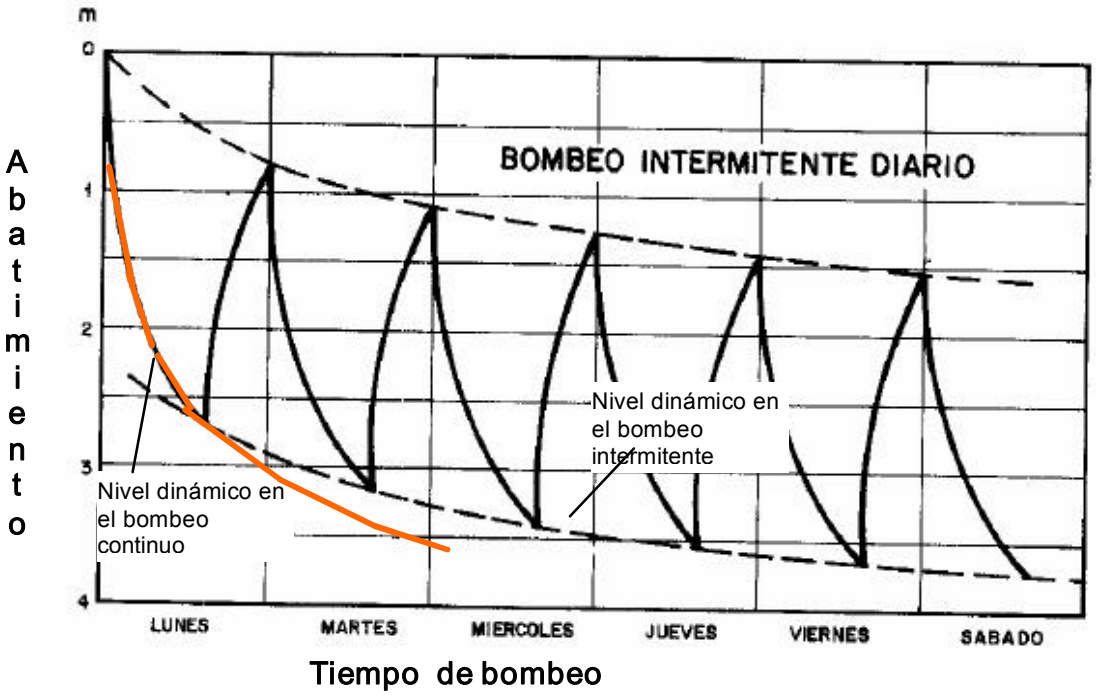


Figura 15. Abatimiento contra tiempo en una prueba de bombeo cíclico.

Un ejemplo de régimen de bombeo cíclico lo constituye el ensayo realizado en pozo 44-IV-D-PP-26, cuyo tiempo de bombeo fue de 540 minutos seguido

de un período de recuperación de 180 minutos, tal como se observa en la figura 16, si el bombeo fuese continuo los descensos del nivel aumentarían considerablemente, con la consecuencia de provocar un aumento en el radio de influencia del pozo como ya se ha anotado.

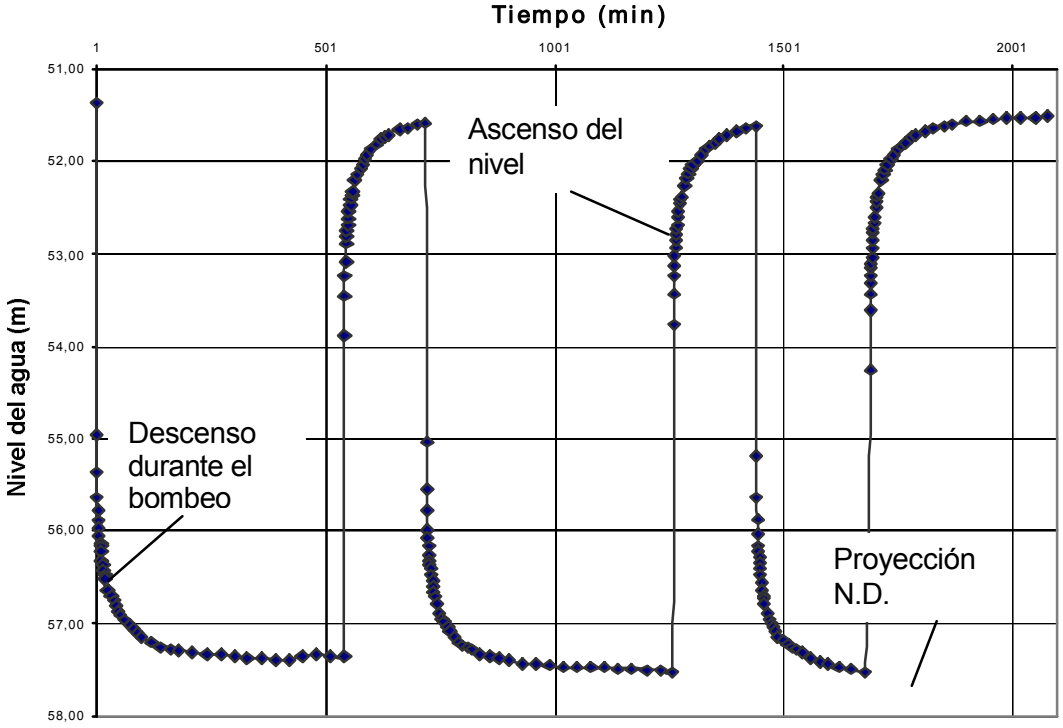


Figura 16. Avance del nivel dinámico en el ensayo cíclico realizado en el pozo 44-IV-D-PP-26.

6.2 EXPLOTACIÓN SOSTENIBLE

La definición de acuífero sugiere que el agua almacenada por estas formaciones sea económicamente explotable, esto no representa una camisa de fuerza pero si es una recomendación importante que se debe tener en

cuenta cuando se extrae agua subterránea y más cuando los costos de explotación aumentan cada día y existen problemas de abastecimiento.

En el Acuífero Morroa el nivel estático registrado en algunos pozos está alrededor de 30 metros más profundo con relación al presentado hace 20 años, esto no indica una escasez crítica de agua en la zona a pesar de la cantidad de agua extraída, porque el acuífero aún almacena gran cantidad del preciado líquido, pero este descenso puede constituirse en un indicador critico si no se controla, pues llegará el momento en el que la explotación del acuífero implicará grandes inversiones de capital para reemplazar estructuras de bombeo y pagar gastos de energía, y en el peor de los casos abandono y construcción de nuevos pozos. Atendiendo a esta situación se hace necesario: fijar un caudal de explotación que no produzca descensos excesivos del nivel dinámico, pues se recomienda que el máximo abatimiento producido no deje colgadas algunas capas acuíferas, y que se modifique el régimen de bombeo para que la cantidad de agua que se mantiene de las reservas sea considerable gracias a los periodos de bombeo - recuperación establecidos.

La metodología para mitigar los problemas por los que atraviesa la explotación del agua en el acuífero, involucra la concientización de la población sobre la importancia que representa el agua en el desarrollo y el sostenimiento de la sociedad, para que ésta aprenda a ahorrarla y es aquí donde las entidades prestadoras del servicio y el sector oficial deben trabajar mancomunadamente con programas de educación y cultura del agua.

Por otra parte, encontramos casos particulares como el de los pozos 52-II-A-PP-08 y 52-II-A-PP-09 donde es recomendable remplazar las estructuras pues no se justifica el gasto económico para producir caudales

menores a 2 lt/s sin satisfacer la demanda de las comunidades que se abastecen de estas captaciones.

6.3 OTRAS RECOMENDACIONES

En la perforación de nuevos pozos se recomienda que se perfore además por lo menos un piezómetro cercano al pozo de bombeo teniendo en cuenta que se localice perpendicularmente al flujo natural presente en la formación, con el fin de realizar pruebas de bombeo que faciliten la investigación del acuífero.

Realizar pruebas de bombeo cíclicas acomodadas a los tiempos de bombeo -recuperación adoptados por las empresas prestadoras del servicio, para obtener información del acuífero sin hacer tan traumática la realización de una prueba, pues solo es necesario tomar niveles al final de cada intervalo de bombeo y recuperación, además de conocer el nivel estático en el pozo.

En la interpretación de pruebas de bombeo con abatimientos pequeños, una interpretación en régimen variable puede arrojar resultados altos de transmisividad y conductividad hidráulica que no es sano tomar por no ser representativos de las propiedades del acuífero, recomendándose analizar los datos de recuperación por resultar más confiables.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AUGE, Miguel. Hidrogeología del Ámbito de Influencia del Proyecto Hidroeléctrico Corpus Christy (Argentina – Uruguay). IV Simposio Colombiano de Hidrogeología y III Conferencia Latinoamericana de Hidrogeología Urbana. Cartagena. 1993.

BONILLA, Flavio; Díaz, Martha; Molano, Carlos. Optimización Analítica de Pruebas de Bombeo. IV Simposio Colombiano de Hidrogeología y III Conferencia Latinoamericana de Hidrogeología Urbana. Cartagena. 1993.

CARSUCRE - FINAGUAS. Sistema para la información para la gestión del recurso hídrico en el acuífero Morroa, SIGAS. Sincelejo. 2001.

CARSUCRE. Informes técnicos del diseño de los pozos del acuífero Morroa.

CARSUCRE. Registro del monitoreo de pozos del Acuífero Morroa.

CARSUCRE. Resolución 0279 de 6 de abril de 2001. Por la cual se fijan los parámetros para la Legalización de los Pozos en el área de su jurisdicción.

Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, DAMA. Modelo Hidrogeológico para los Acuíferos de Bogotá. Publicaciones Interactivas. www.dama.gov.co. INTERNET. 2002.

DECRETO 1541 de 1978. Artículo 178.

DE VIVERO, Jorge; Góngora, Jehomara; Montoya, Carlos. Informe de avance proyecto de grado: “Elaboración de las Redes de Flujo del Acuífero Morroa, Sector Sincelejo, Corozal y Morroa”. Universidad de Sucre. 2003.

HERRERA, Héctor M. Estudio Hidrogeológico para la localización de un pozo profundo del acueducto de Morroa. 1997.

HUGGUET, Alcides. Ingeniero Civil. Especialista en aguas subterráneas. Ingeominas. Comunicación oral. 2002.

IZQUIERDO, Julio; Poveda, Germán. Estimación de Parámetros Hidrogeológicos de Acuíferos en Colombia mediante Kriging. IV Simposio Colombiano de Hidrogeología y III Conferencia Latinoamericana de Hidrogeología Urbana. Cartagena. 1993.

JÉGAT, Hervé; Torres, Guillermo. Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas en el Valle del Quibor, Estado Lara. IV Simposio Colombiano de Hidrogeología y III Conferencia Latinoamericana de Hidrogeología Urbana. Cartagena. 1993.

Manual de Software “AQUIFER-TEST” for windows. Versión 2.1. by Waterloo Hidrogeologic, Inc. 1996.

Manual de Software “SURFER” (Surface Mapping Sistem). Versión 5.01 by Golden Software, Inc. 1994.

PEREZ F, Diosdado. La Explotación del Agua Subterránea. Un Nuevo Enfoque. La Habana. 1995.

PUENTES, Régulo. Ingeniero Agrícola. Datos de pruebas de bombeo después de la construcción de los pozos 01 y 02 de Corozal.

PULIDO, Gonzalo. Ingeniero civil. Especialista en aguas subterráneas. Consultas por correo electrónico. 2002.

QUINTERO S, Jorge. Análisis de pruebas de bombeo. Publicaciones Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. 1989.

QUINTERO S, Jorge. Hidráulica de pozos. Publicaciones Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. 1993.

RODRÏDUEZ, Frank. Ingeniero Civil. Datos de pruebas de bombeo realizadas en el acuífero Morroa en los años 1983 y 1984.

TOMÁS, Jorge; DALLA COSTA, Oscar; FILÍ, Mario. Determinacion de Parámetros Hidráulicos Formacionales del Acuifero Puelche en un Sector del Sur de la Provincia de Santa Fe. Argentina. PROINSA - Proyectos de Ingeniería S.A. proinsa@satlink.com. INTERNET. 2003.

VILLANUEVA MARTÍNEZ, Manuel; IGLESIAS LÓPEZ, Alfredo. “Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo". Publicaciones IGME.1984.

Anexo 1. Datos generales de los pozos donde se realizaron pruebas de bombeo.

Pozo	Coordenadas		H. (m)	Filtros (m)	Φ (pulg.)	N.E. (m)
	X	Y				
44-IV-C-PP-08	864330	1520560	385.2	80	8	64.8
44-IV-C-PP-11	862270	1522180	194	15	8	42.30
44-IV-D-PP-16	866410	1523510	147	43,79	4	79,31
44-IV-D-PP-19	867600	1524700	141	45,5	6	39,72
44-IV-D-PP-24	867670	1522400	233	153,2	8	39,10
44-IV-D-PP-26	868710	1527840	90	-	8	51,38
44-IV-D-PP-30	866690	1525800	391	112	8	63,29
44-IV-D-PP-34	866640	1521160	205	67,35	10	44,68
44-IV-D-PP-36	868120	1524880	235	39	6	55,62
44-IV-D-PP-39	865525	1524800	312	93	8	52,40
52-II-A-PP-01	857060	1512470	42	6	6	7,00
52-II-A-PP-08	862660	1519400	141	18,54	8	58,70
52-II-A-PP-09	864700	1515720	111	35	8	26,80
52-II-A-PP-13	861270	1514390	121	32	3	57,77
52-II-A-PP-15	863880	1519150	378	83	8	(2001) 94,31
52-II-A-PP-15	863880	1519150	378	83	8	(2003) 100.46
52-II-A-PP-19	861740	1517210	120	20	6	59,38

Anexo 2. Datos de las pruebas de bombeo que se realizaron durante el proyecto.

Pozo	Fecha de la prueba	Caudal (lt/s)				Duración bombeo (min.)
44-IV-C-PP-08	1-Marzo-2003	19.73				1800
44-IV-C-PP-11	22-Enero-2003	9.99				180, 720
44-IV-D-PP-16	17-May-2002	15,42				1440
44-IV-D-PP-19	5-Dic-2001	1,75				1440
44-IV-D-PP-24	30-Jun-2002	37,143				1440
44-IV-D-PP-26	13-Dic-2002	6.99	Cíclica			540,540,240
44-IV-D-PP-30	23-Jul-2002	19,68				720; 600
44-IV-D-PP-34	5-Dic-2001	16,05	22,1	23,9	Esc	480, 960, 1440
44-IV-D-PP-36	3-Oct-2001	9,76				1200
44-IV-D-PP-39	16-Nov-2001	20,19				1440
52-II-A-PP-01	12-Jul-2002	1,59	2,08	2,25	Esc	140, 510 1320
52-II-A-PP-08	19-Abr-2002	3,68	2,07	3,33	3,11	7; 460; 15; 27
52-II-A-PP-09	11-May-2002	2,59				600
52-II-A-PP-13	1-Jun-2002	8,85				720
52-II-A-PP-15	Nov -2001	13,15	15,91			390; 840
52-II-A-PP-15	6-Marzo-2003	18.9				1440
52-II-A-PP-19	17-May-2002	1,27				700

Anexo 3. Cálculo del radio equivalente para los pozos donde se realizó pruebas entre los años 2001-2003.

Pozo	T (m^2/día)	Q (lt/s)	Φ (pulg)	Radio (m)	Filtros (m)	k	Rt (m)
44-IV-C-PP-08	100 - 500	10 - 50	8	0.10	80	0.9	7.2
44-IV-C-PP-11	<10	1 - 10	8	0.10	15	0.8	1.2
44-IV-D-PP-16	100 - 500	10 - 50.	8	0,10	43,79	0,9	4,0
44-IV-D-PP-19	10 - 100	1- 10.	6	0,08	45,5	0,7	2,4
44-IV-D-PP-24	100 - 500	10 - 50.	8	0,10	153,2	0,9	14,0
44-IV-D-PP-26	100 - 500	1 - 10	8	-	-	-	-
44-IV-D-PP-30	100 - 500	10 - 50.	8	0,10	112	0,9	10,2
44-IV-D-PP-34	100 - 500	10 - 50.	10	0,13	67,35	0,9	7,7
44-IV-D-PP-36	100 - 500	1 - 10.	6	0,08	39	0,8	2,4
44-IV-D-PP-39	10 - 100	10 - 50.	8	0,10	93	0,8	7,6
52-II-A-PP-01	10 - 100	1 - 10.	6	0,08	6	0,8	0,4
52-II-A-PP-08	10 - 100	1 - 10.	8	0,10	18,54	0,8	1,5
52-II-A-PP-09	<10	1 - 10.	8	0,10	35	0,8	2,8
52-II-A-PP-13	100 - 500	1 - 10.	6	0,08	32	0,7	1,7
52-II-A-PP-15	100 - 500	10 - 50.	8	0,10	83	0,8	6,7
52-II-A-PP-19	100 - 500	1 - 10.	6	0,08	20	0,7	1,1

Anexo 4. Resumen de los parámetros hidráulicos del acuífero Morroa calculados manualmente y con el software Aquifer– Test.

Pozo	Método manual gráfico				Aquifer Test							
	Bombeo		Recuperación		Theis			Jacob			Recuperación	
	T	K	T	K	T	K	E	T	K	E	T	K
44-IV-C-PP-08	120.69	0.66	107.57	0.74	70.4	0.88	1.40E-06	139	1.74	3.98E-04	114	1.43
44-IV-C-PP-11	10.26	0.684	9.01	0.60	7.7	0.51	3.50E-02	6.7	0.45	2.07E-02	8,095	0,54
44-IV-D-PP-16	361,7	8,3	420,4	9,6	125,0	2,9	3,13E-06	319,0	7,3	-	542	12,3
44-IV-D-PP-19	24,3	0,5	17,6	0,4	19,2	0,4	2,15E-03	23,1	0,5	1,68E-04	14,7	0,3
44-IV-D-PP-24	458,2	3,0	298,6	1,9	140,0	0,9	1,40E-05	462,0	3,0		247,0	1,6
44-IV-D-PP-26	119.92	-	103.97	-	114,0	-	-	111,0	-	-	-	-
44-IV-D-PP-30	166,0	1,5	57,8	0,5	74,6	0,6	7,07E-04	77,8	0,7	4,50E-04	58,7	0,524
44-IV-D-PP-34	115,0	1,7	122,6	1,8	89,3	1,3	-	186,0	2,8	-	114	1,69
44-IV-D-PP-18	-	-	-	-	215,0	7,7	1,01E-03	269,0	10,1	1,81E-04	169	6,03
44-IV-D-PP-36	112,3	2,9	107,3	2,8	82,0	2,1	6,83E-03	113,0	2,9	3,72E-05	109,0	2,8
44-IV-D-PP-39	82,1	0,9	63,5	0,7	70,3	0,8	2,21E-03	79,9	0,9	6,73E-04	68	0,732
52-II-A-PP-01	84,7	14,1	32,1	5,5	10,5	1,8	4,37E-04	27,4	4,6	-	28,7	4,79
52-II-A-PP-08	40,9	2,2	18,2	1,0	8,2	0,4	5,29E-07	2,0	0,1	4,78E-04		
52-II-A-PP-09	8,2	0,2	4,4	0,1	3,9	0,1	4,19E-05	4,3	0,1	2,04E-05	23,6	0,7
52-II-A-PP-13	-	-	121,7	3,8	33,9	1,1	2,35E-06	33,9	1,1	2,35E-06	128	4
52-II-A-PP-15 (2001)	98,1	1,2	60,3	0,7	88,5	1,1	1,38E-06	77,0	0,9	6,74E-06	62,0	0,7
52-II-A-PP-15 (2003)	72.5	0.874	59.8	0.720	70.7	0.852	1.27E-05	70.2	0.846	1.36E-05	57.3	0.691
52-II-A-PP-19	11,7	0,6	13,6	0,7	2,4	0,1	4,05E-06	10,5	0,5	-	12,6	0,634

Anexo 5. Parámetros hidráulicos del acuífero Morroa calculados con el software Hytest.

Pozo	K (m/d)	E	Profundidad formación (m)	Techo formación (m)	N.E (m)	Nivel Dinámico Inicial (m)	Radio influencia (m)
44-IV-C-PP-08	0.59	1.05E-04	390	280	64.8	64.8	2000
44-IV-C-PP-11	0.79	1.10E-04	210	179	42.3	43.9	1000
44-IV-D-PP-16	2,8	1,10E-04	175	120	79,3	79,3	3500
44-IV-D-PP-19	0,41	1,02E-04	150	100	39,5	39,7	1500
44-IV-D-PP-24	2,2	1,40E-04	233	150	39,1	39,1	2500
44-IV-D-PP-26	2,7	1,60E-04	115	70	51,4	51,4	700
44-IV-D-PP-30	0,59	1,50E-04	400	250	63,3	63,3	1000
44-IV-D-PP-36	1,95	1,35E-04	236	190	55,6	55,6	1500
44-IV-D-PP-39	0,7	8,90E-04	312	200	52,4	52,4	1200
52-II-A-PP-09	0,49	1,50E-04	140	100	39,7	39,7	1000
52-II-A-PP-15	0,57	1,10E-04	383	200	91,13	94,13	1100

Anexo 6. Datos generales de los pozos donde se realizaron pruebas anteriores al año 2000.

Código nuevo	Coordenadas		H (m)	Filtros (m)	Φ (pulg.)	N.E. (m)
	X	Y				
44-IV-D-PP-02	866300	1523100	98,2	24,2	6	41,84
44-IV-D-PP-14	866990	1523160	112	75,59	12	25,76
44-IV-D-PP-16	866410	1523510	147	55,65	10	45,60
44-IV-D-PP-17	867450	1522700	113,5	39	10	23,11
44-IV-D-PP-18	866580	1521120	98	28,1	8	21,07
44-IV-D-PP-22	865440	1523180	132,5	28,91	12	37,2
44-IV-C-PP-01	864800	1523140	236,25	92	10	28,87
44-IV-D-PP-29	866800	1524500	275	116,72	8	39,28
44-IV-D-PP-37	866725	1520400	398,6	127	10	35,14
	866725	1520400	398,6	127	10	38,42
44-IV-D-PP-38	866800	1523280	403,5	122	10	48,14
	866800	1523280	403,5	122	10	49,00
44-IV-C-PP-09	864000	1522250	367	105	8	49,38
52-II-A-PP-14	861400	1515320	385	87	8	44,19
52-II-A-PP-15	863880	1519150	378	83	8	67

Anexo 7. Datos de las pruebas de bombeo realizadas antes del año 2000.

Código del pozo	Fecha de la prueba	Caudal (lt/s)			Tipo Prueba	Duración bombeo (min.)
44-IV-D-PP-02	9-Jun-1983	3,33	4	5	Esc.	60, 120, 2545
44-IV-D-PP-14	13-Jul-1983	6	8	10		60, 120, 1490
44-IV-D-PP-16	10-May-1984	10	12,5	15		60, 120, 1425
44-IV-D-PP-17	8-Ago-1983	6	8	10		60, 120, 1470
44-IV-D-PP-18	9-Sep-1983	10	12	14		60, 120, 965
44-IV-D-PP-22	18-Dic-1983	15	20	30		60, 120, 935
44-IV-C-PP-01	11-Nov-1983	20	25	30		60, 120, 1350
44-IV-D-PP-29	23-Abr-1984	35	40	45		60, 120, 1440
44-IV-D-PP-37	28-Nov-1996	20	30	40		360, 721, 1440
	30-Nov-1996	49,64			Const.	4320
44-IV-D-PP-38	23-Ene-1997	20	30	40	Esc.	360, 721, 1035
	27-Ene-1997	50,15			Const.	4320
44-IV-C-PP-09	14-Oct-1996	7,74	15,5	21,4	Esc.	60, 120, 1560
52-II-A-PP-14	Feb-1997	9,98	10,1	10		70, 120, 1320
52-II-A-PP-15	17-Feb-1997	7,13	10,5	10,2		60, 120, 1260

Anexo 8. Cálculo del radio equivalente para los pozos donde se realizaron pruebas de bombeo antes del año 2000.

Pozo	T (m2/día)	Q (lt/seg)	Φ (pulg.)	Radio (m)	Filtros (m)	k	Rt (m)
44-IV-D-PP-02	100 - 500	1- 10.	6	0,08	24,2	0,8	1,5
44-IV-D-PP-14	10 - 100	1- 10.	12	0,15	75,59	0,8	9,2
44-IV-D-PP-16	100 - 500	10 - 50.	10	0,13	55,65	0,9	6,4
44-IV-D-PP-17	10 - 100	10 - 50.	10	0,13	39	0,8	4,0
44-IV-D-PP-18	10 - 100	10 - 50.	8	0,10	28,1	0,8	2,3
44-IV-D-PP-22	10 - 100	10 - 50.	12	0,15	28,91	0,8	3,5
44-IV-D-PP-37	100 - 500	10 - 50.	10	0,127	127	0,9	14,5
44-IV-D-PP-38	100 - 500	10 - 50.	10	0,127	122	0,9	13,9
44-IV-C-PP-09	10 - 100	10 - 50.	8	0,1016	105	0,8	8,5
52-II-A-PP-14	10 - 100	1 - 10.	8	0,1016	87	0,8	7,1
52-II-A-PP-15	10 - 100	1 - 10.	8	0,1016	83	0,8	6,7

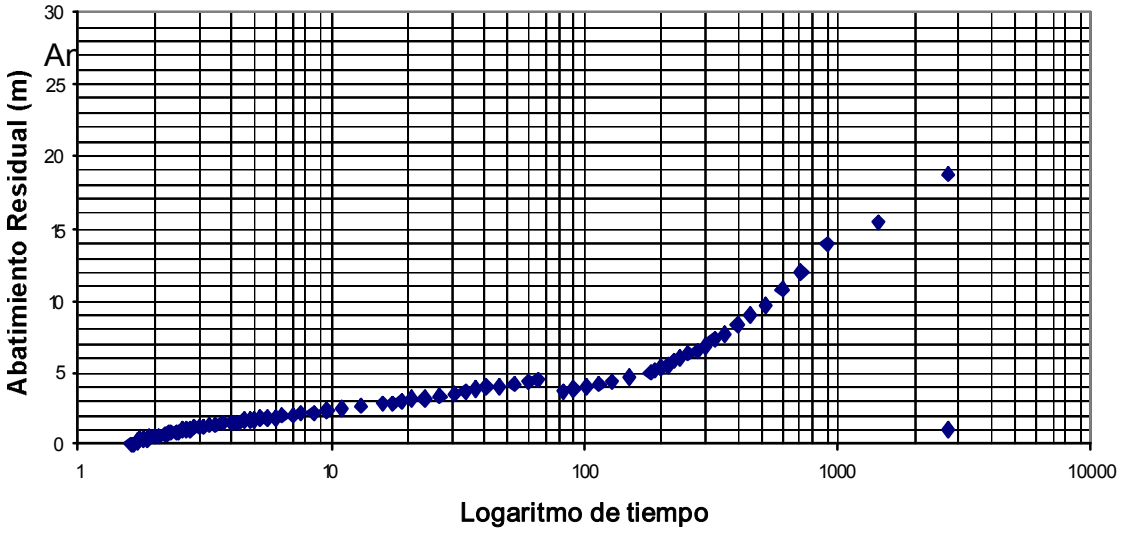
Anexo 9. Resultados de la reinterpretación de las pruebas de bombeo realizadas antes del año 2001.

Pozo	Método manual gráfico				Aquifer Test					
	Bombeo		Recuperación		Theis		Jacob		Recuperación	
	T	K	T	K	T	K	T	K	T	K
44-IV-C-PP-01	108,5	1,18	91,9	1,00	105,0	1,14	118,0	1,28	110	1,19
44-IV-C-PP-09	-	-	-		76,2	0,73	89,7	0,85	80	0,76
44-IV-D-PP-02	112,1	4,62	70,0	2,89	61,1	2,52	104,0	4,33	79	3,27
44-IV-D-PP-14	82,9	1,10	78,3	1,04	31,6	0,42	139,0	1,84	84	1,11
44-IV-D-PP-16	184,8	3,32	-	-	109,0	2,40	260,0	5,70	-	-
	-	-	-	-	-	-	247,0	4,44	-	-
44-IV-D-PP-17	99,1	2,54	123,4	3,17	63,1	1,61	126,0	3,24	144	3,71
44-IV-D-PP-18	53,7	1,91	-	-	40,1	1,43	59,0	2,10	-	-
44-IV-D-PP-22	94,8	3,28	-	-	89,1	3,08	114,0	3,97	-	-
44-IV-D-PP-29	218,1	1,87	186,2	1,60	150,0	1,29	211,0	1,81	195	1,67
44-IV-D-PP-37	679,0	5,39	248,9	1,975	97,0	0,76	815,0	6,41	306	2,40
	743,9	5,82	389,4	3,055	268,0	2,11	782,0	6,16	265	2,09
44-IV-D-PP-38	886,4	7,26	372,9	3,05	257,0	2,11	302,0	2,48	323	2,65
	243,3	1,99	472,3	3,88	254,0	2,08	368,0	3,01	289	2,37
52-II-A-PP-14	-	-	-	-	54,0	0,62	195,0	2,24	94	1,08
52-II-A-PP-15	-	-	-	-	39,5	0,48	76,0	0,92	37	0,44

Anexo 10. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-C-PP-08.

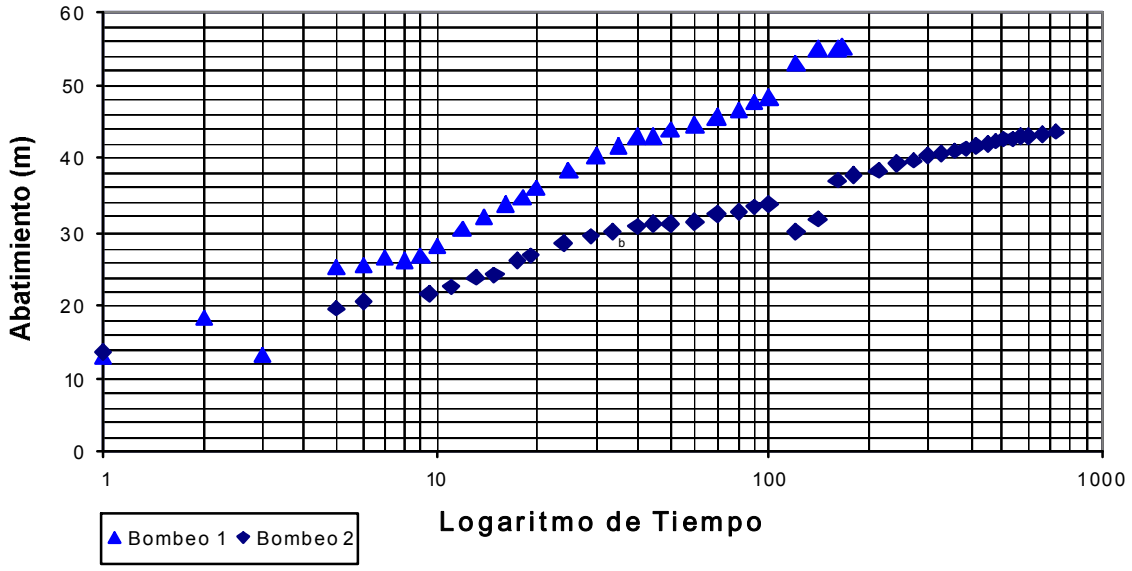
Gráfica de Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 44-IV-C-PP-08

Gráfica de Abatimiento Residual vs. Log. de Tiempo. Pozo 44-IV-C-PP-08

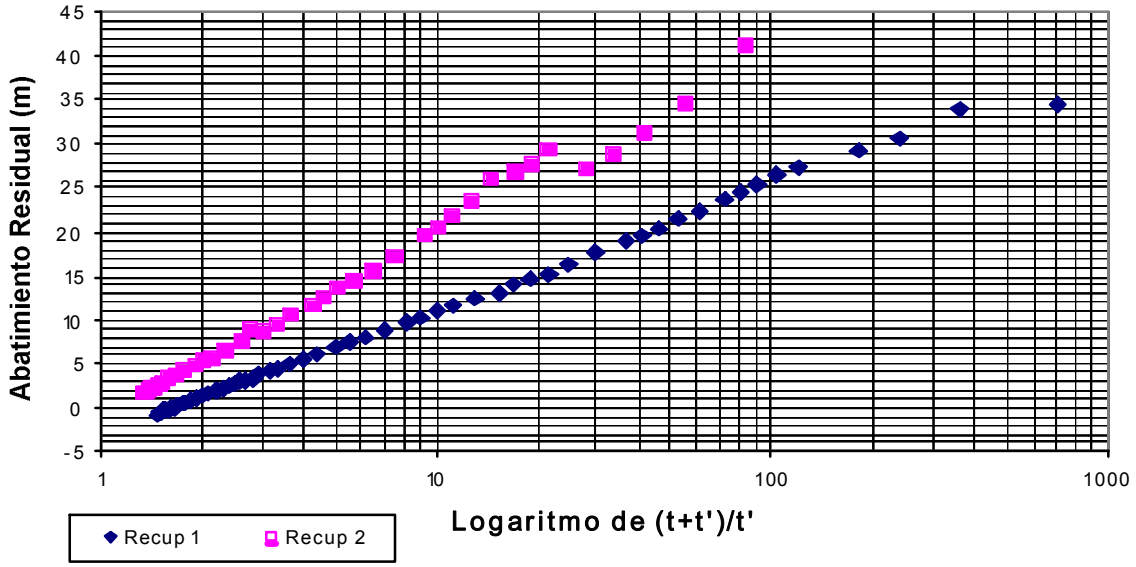


Anexo 11. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-C-PP-11.

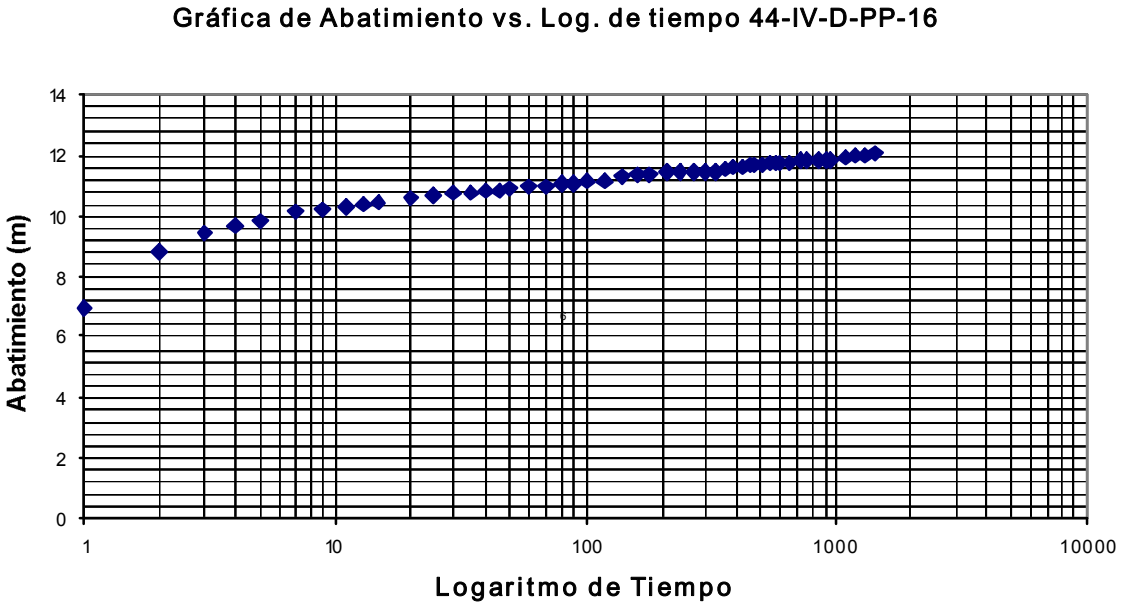
Gráfica del Abatimiento vs. Log de tiempo. Pozo 44-IV-C-PP-11

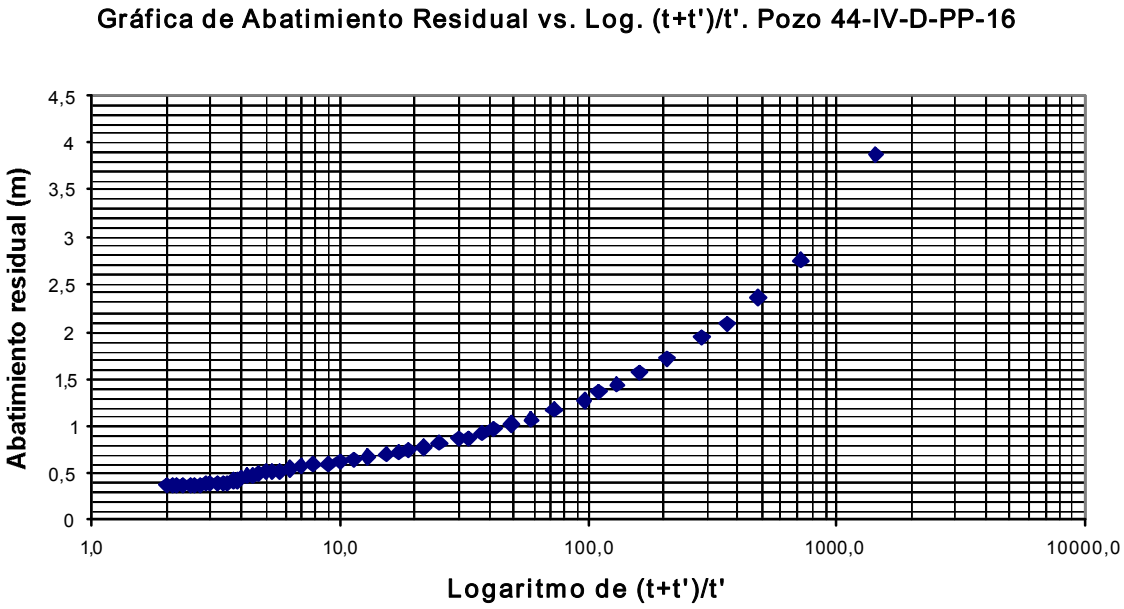


Gráfica del Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 44-IV-D-PP-11

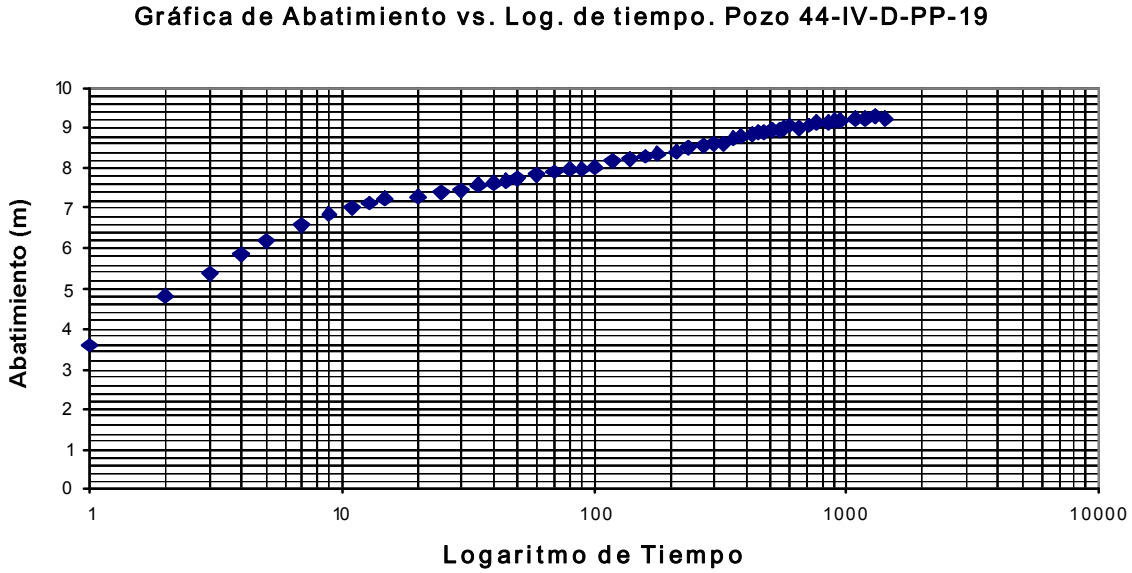


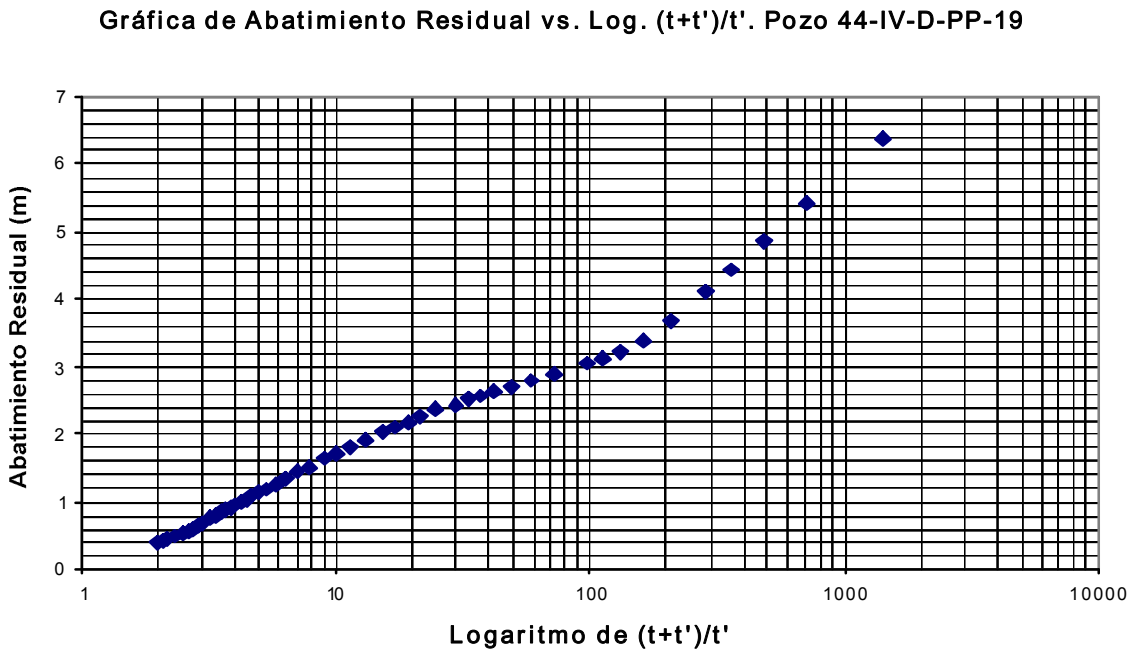
Anexo 12. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-16.



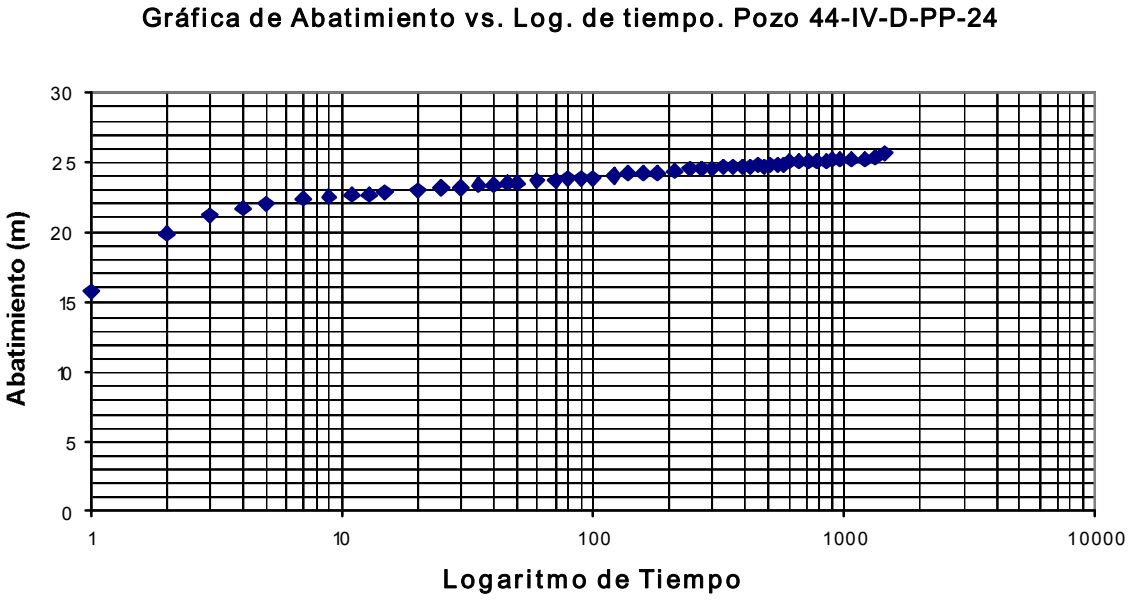


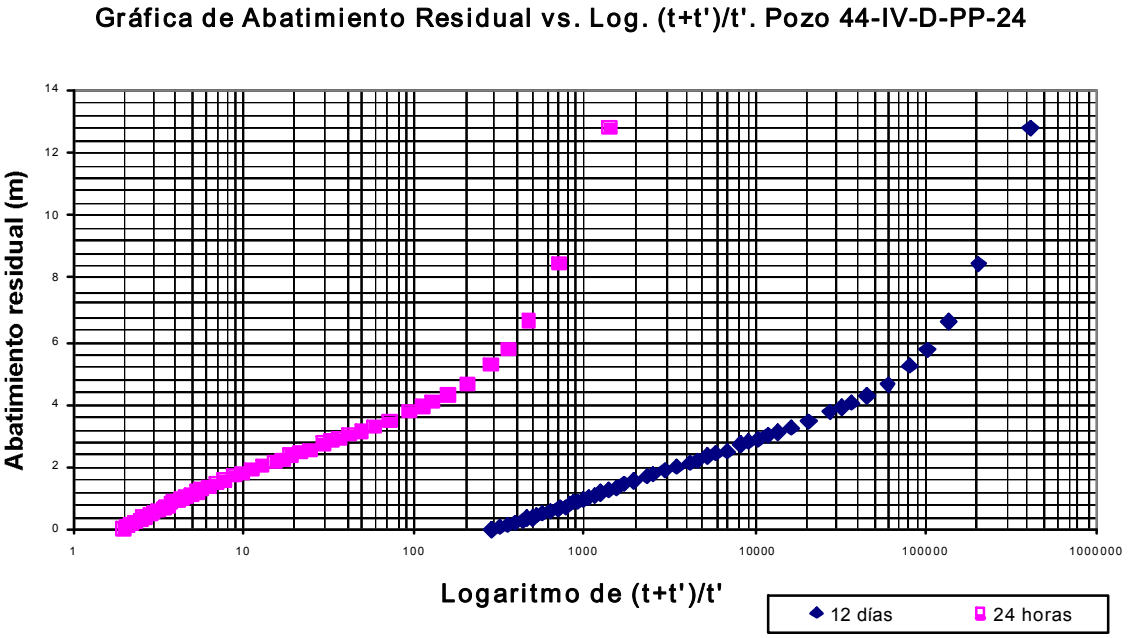
Anexo 13. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-19.





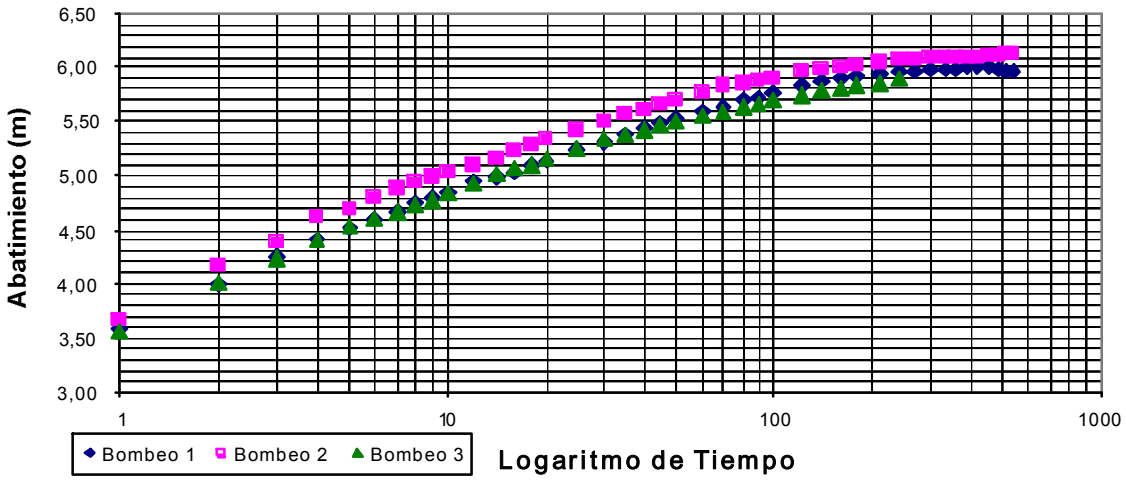
Anexo 14. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-24



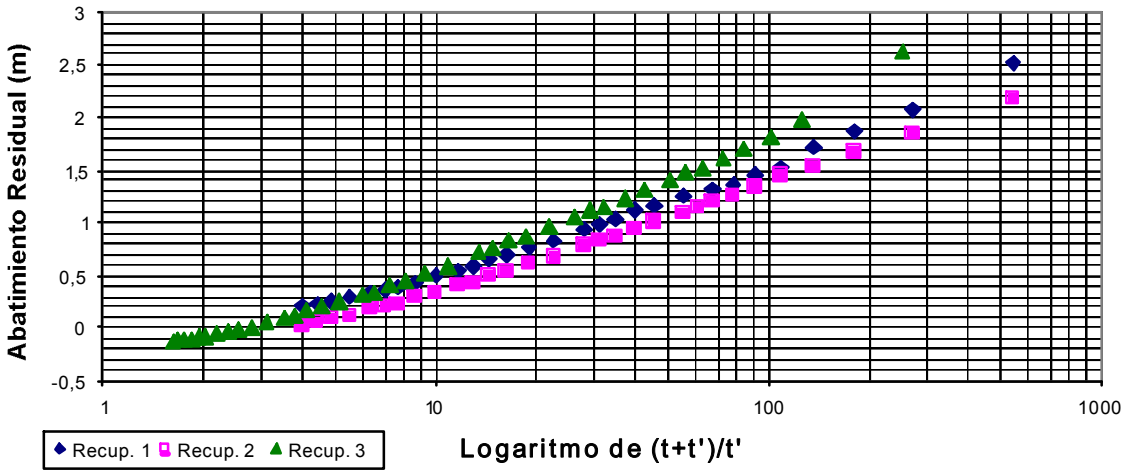


Anexo 15. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-26.

Gráfica de Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 44-IV-D-PP-26.

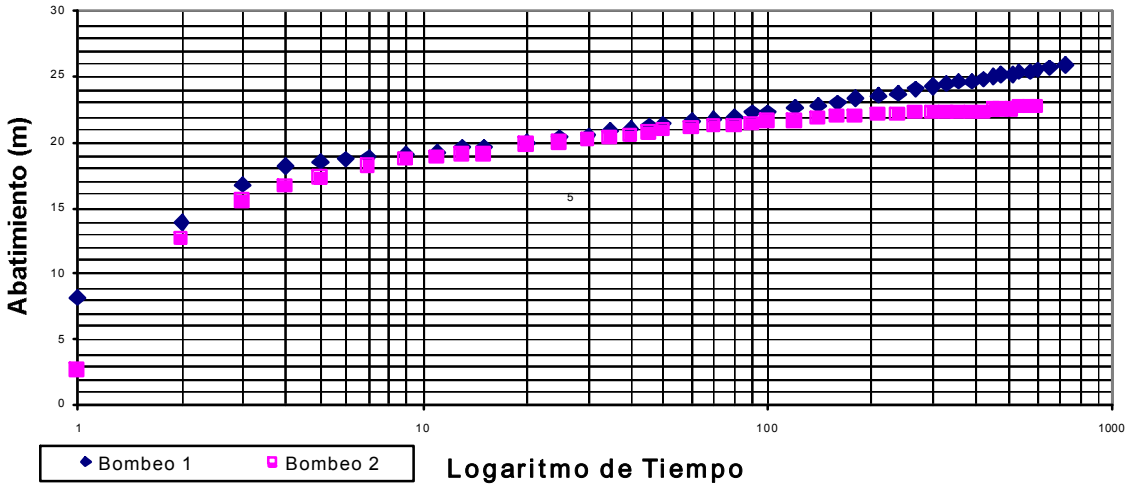


Gráfica de Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 44-IV-D-PP-26.

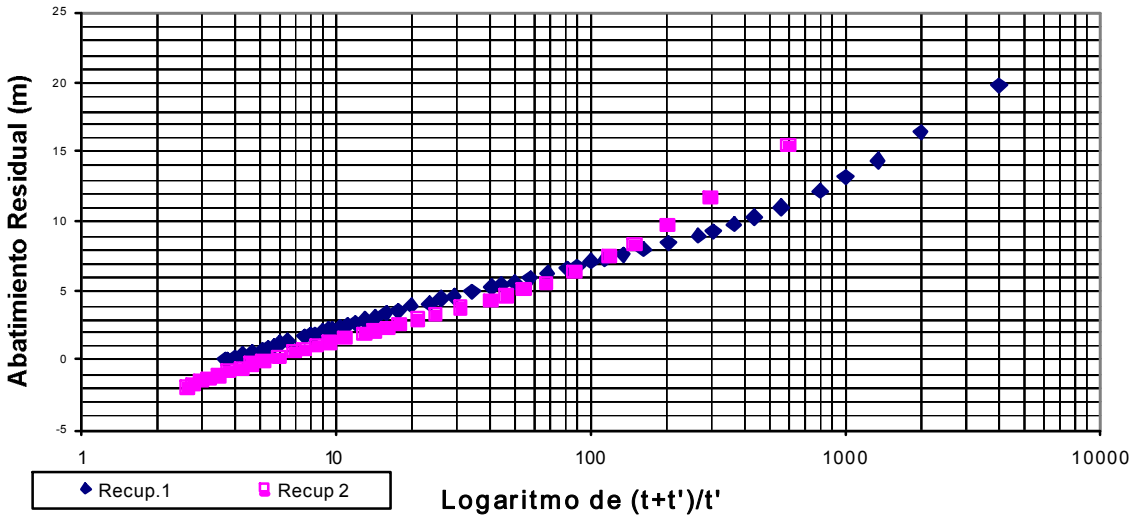


Anexo 16. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-30.

Gráfica de Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 44-IV-D-PP-30.

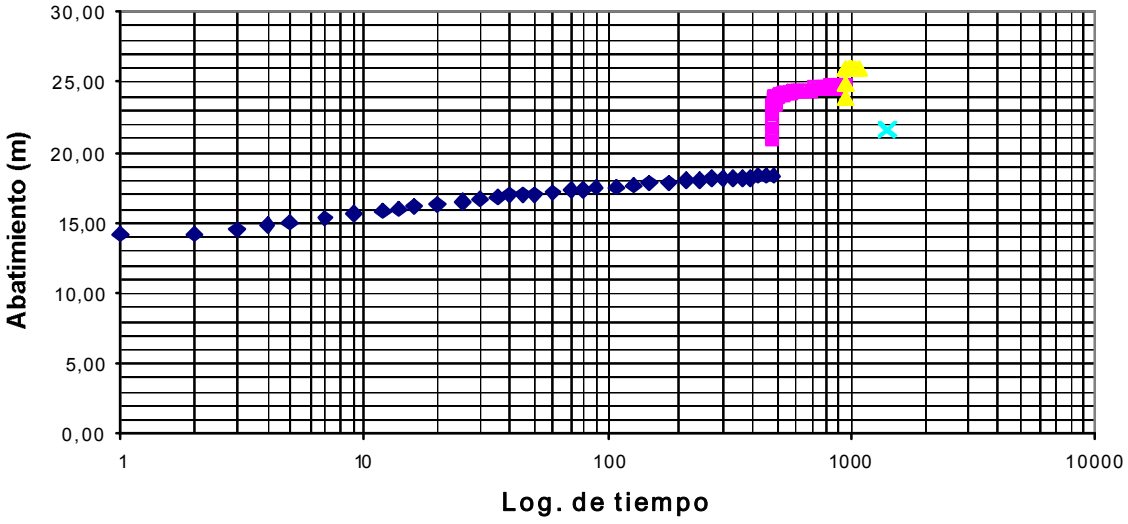


Gráfica de Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 44-IV-D-PP-30.



Anexo 17. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-34 y del pozo de observación 44-IV-D-PP-18.

Gráfica de Abatimiento vs. Log. Teimpo. Pozo 44-IV-D-PP-34



Gráfica de Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t. Pozo 44-IV-D-PP-34

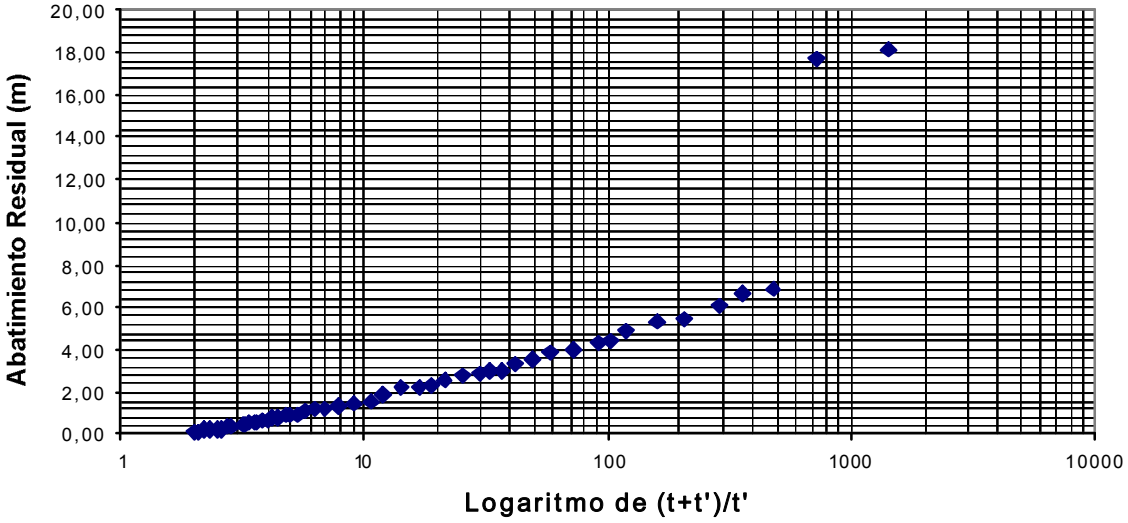


Gráfico de Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 44-IV-D-PP-18
Observación

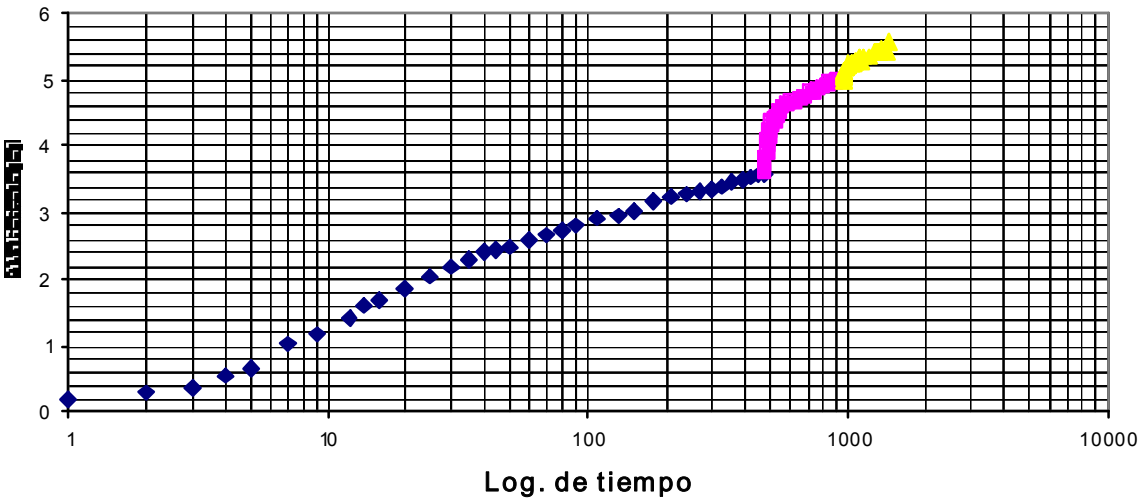
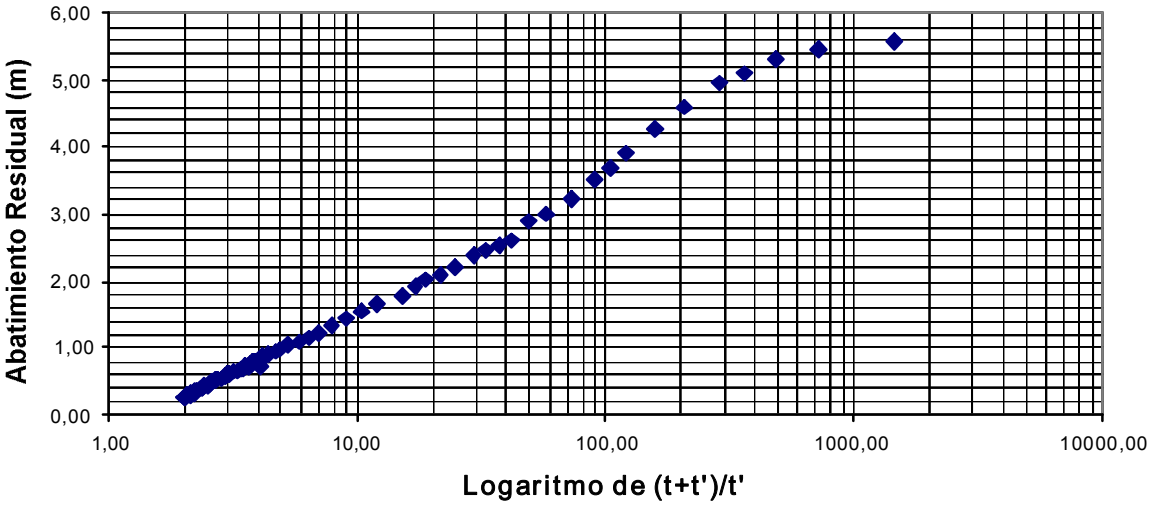
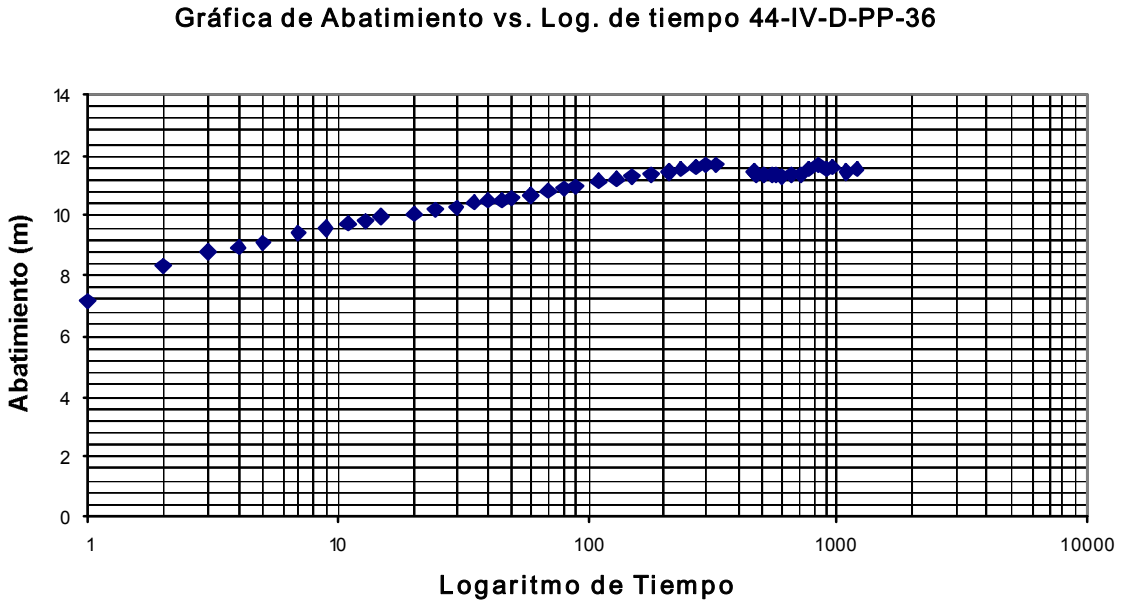
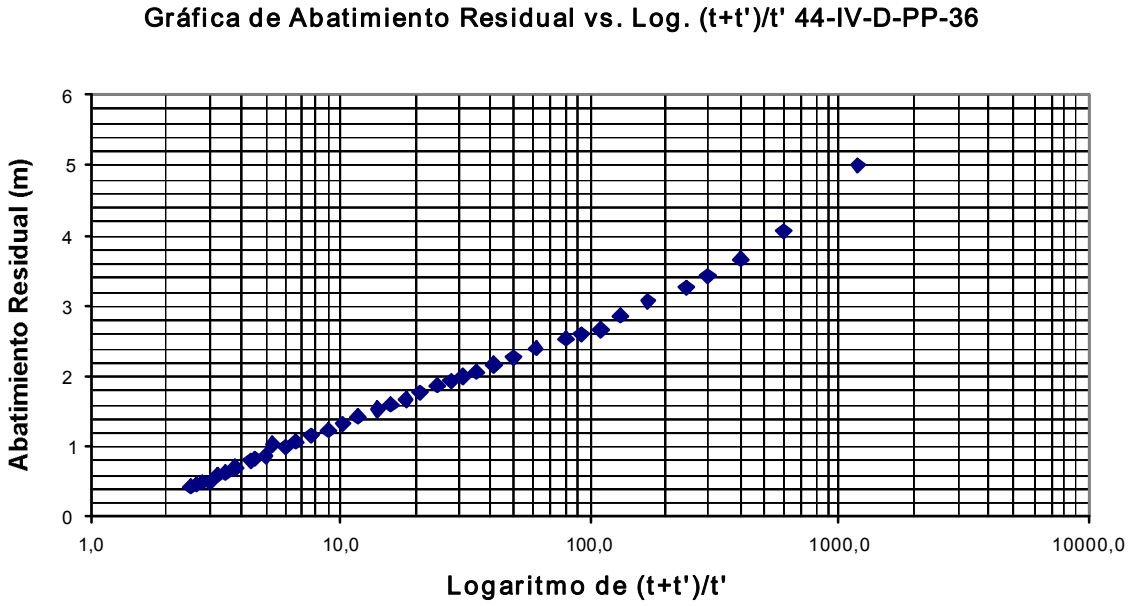


Gráfico de Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t. Pozo 44-IV-D-PP-18
Observación.

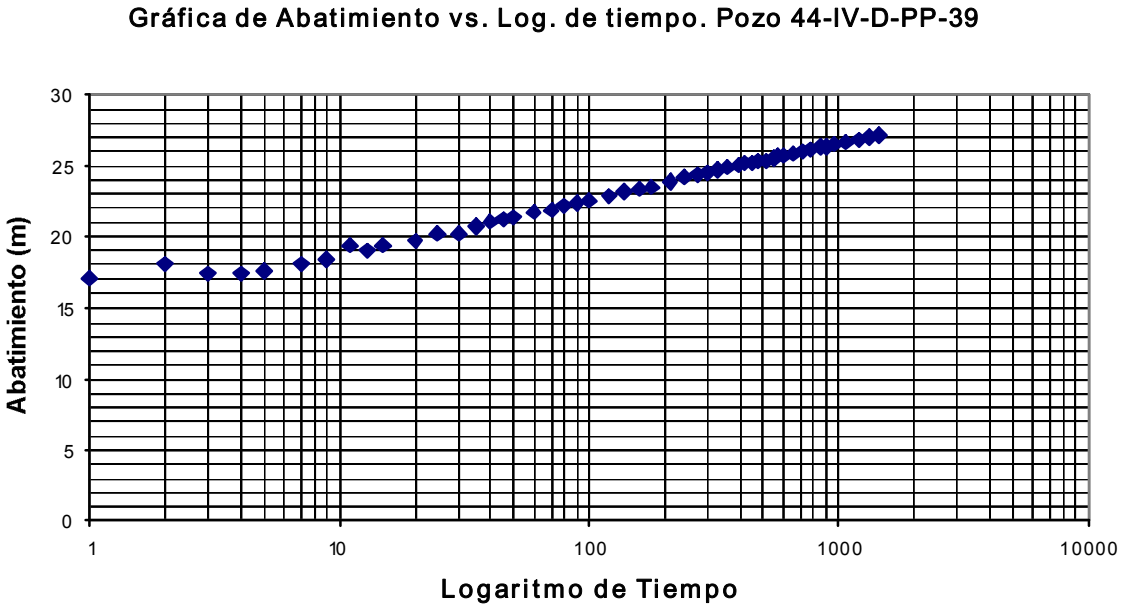


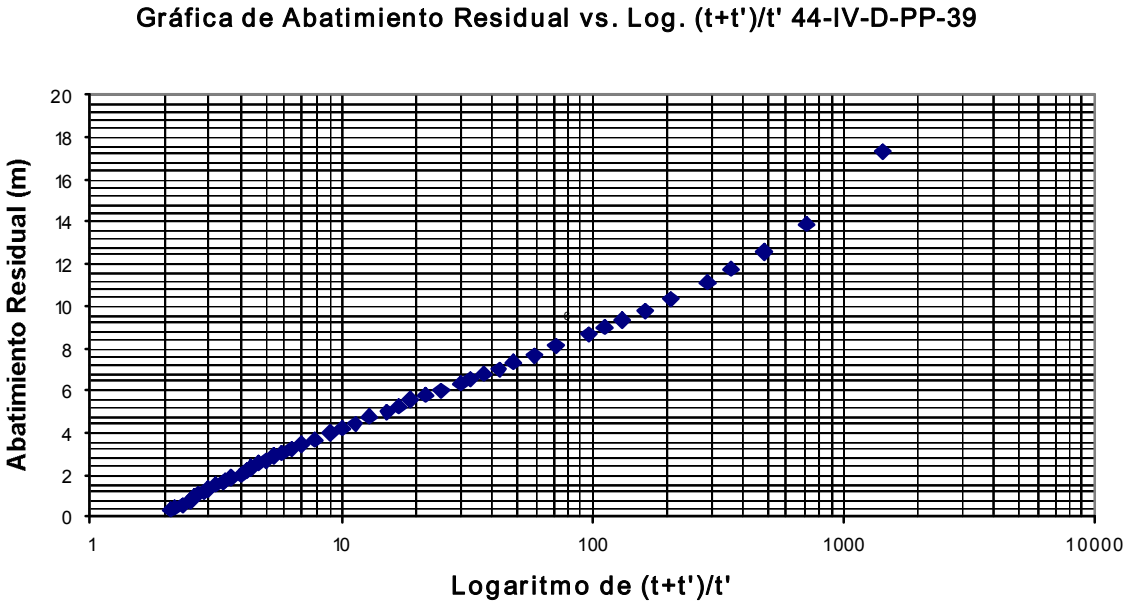
Anexo 18. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-36.





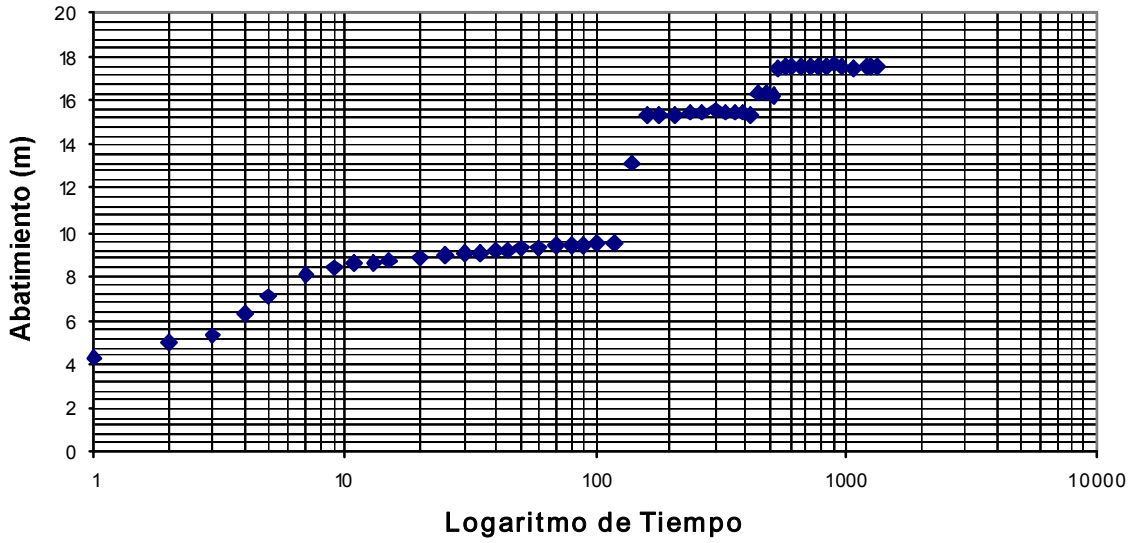
Anexo 19. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 44-IV-D-PP-39.



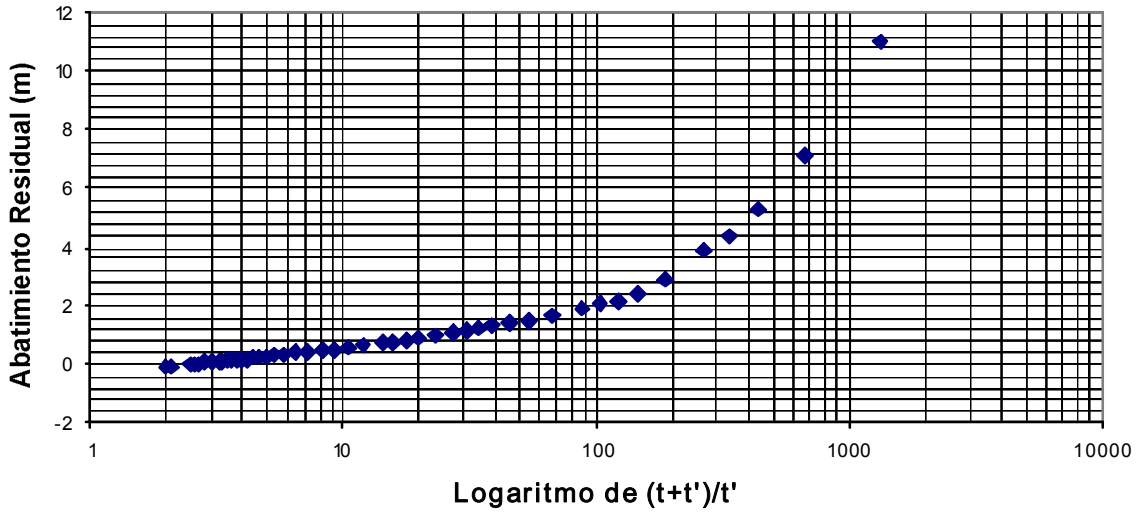


Anexo 20. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-01.

Gráfico de Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 52-II-A-PP-01

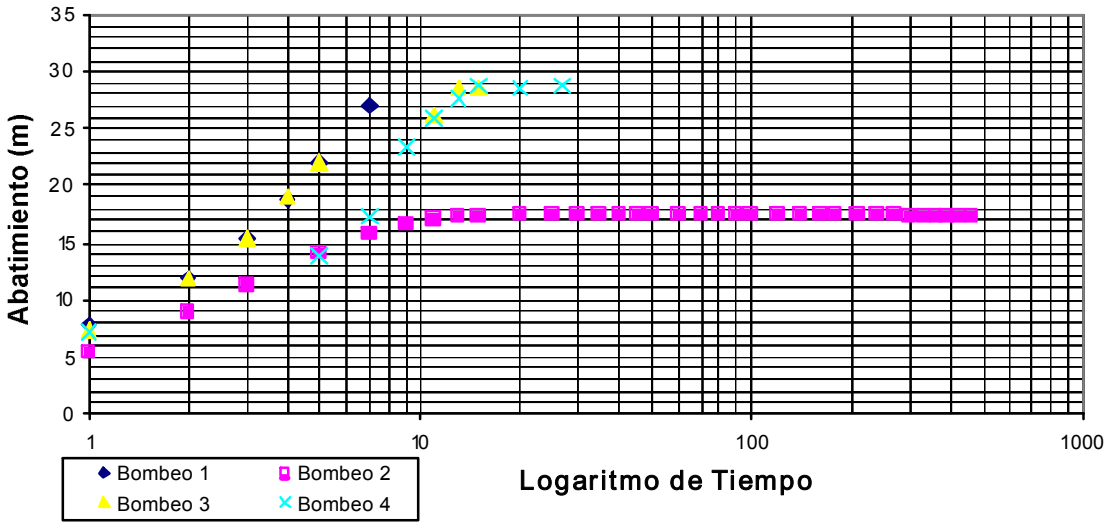


Gráfica de Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 52-II-A-PP-01

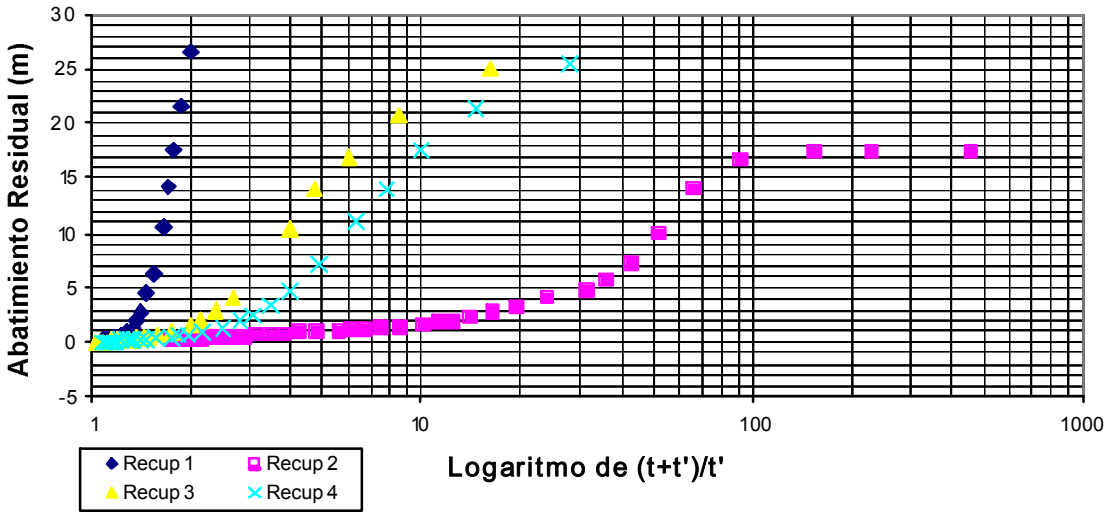


Anexo 21. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-08.

Gráfica del Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 52-II-A-PP-08

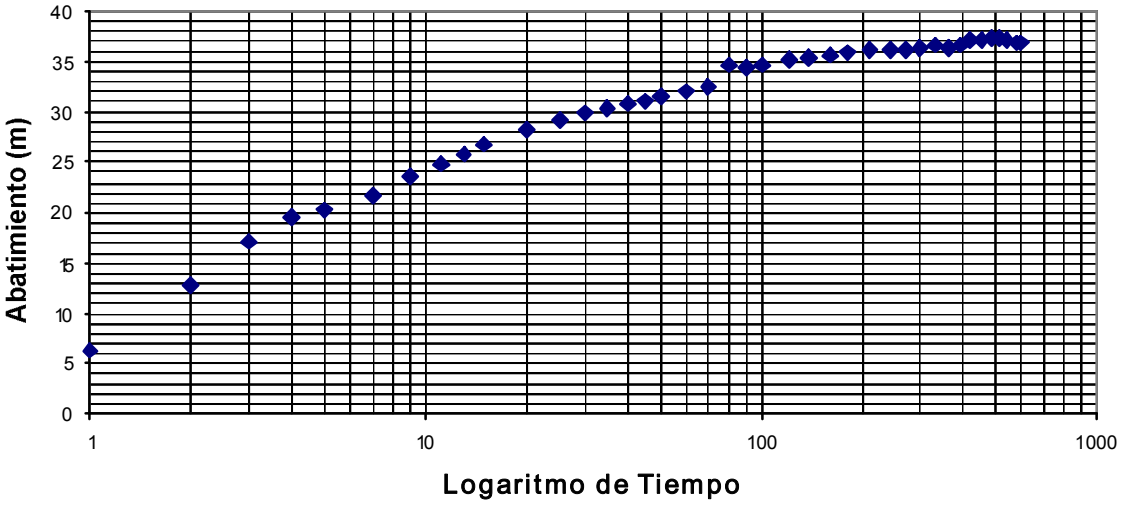


Gráfica del Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 52-II-A-PP-08

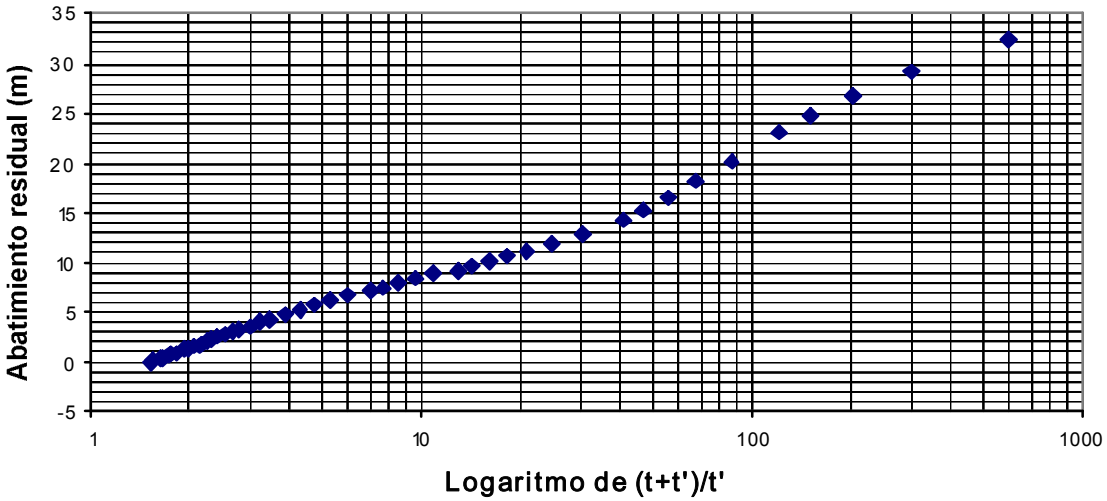


Anexo 22. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-09.

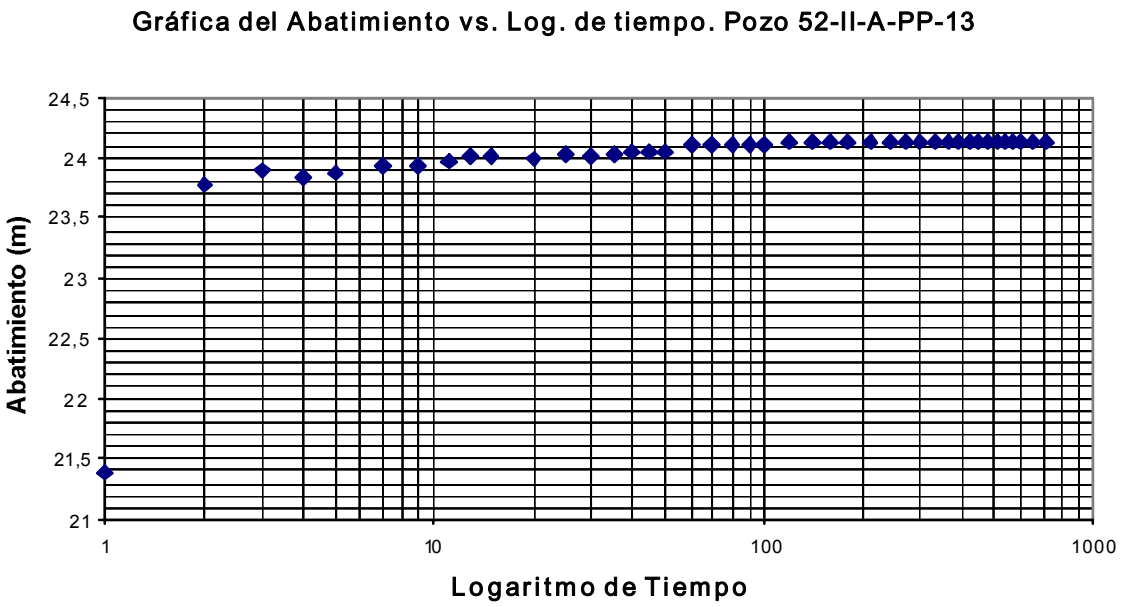
Gráfica del Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 52-II-A-PP-09

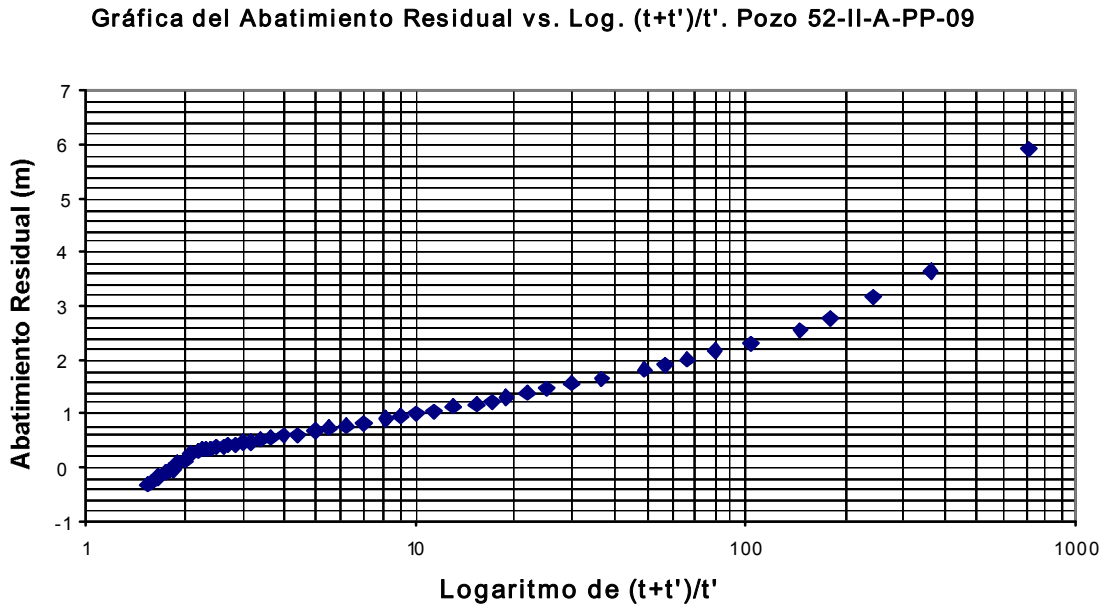


Gráfica del Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 52-II-A-PP-09



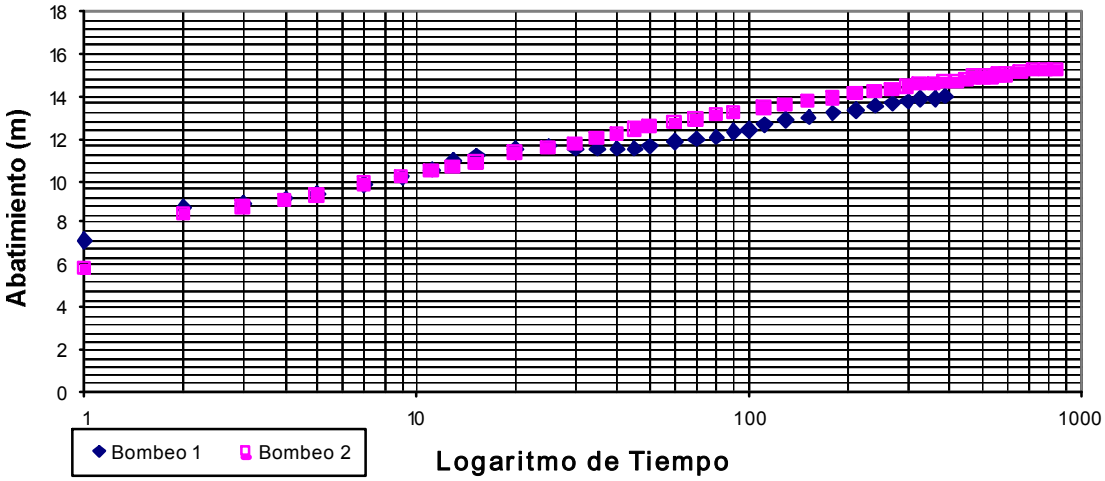
Anexo 23. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-13.



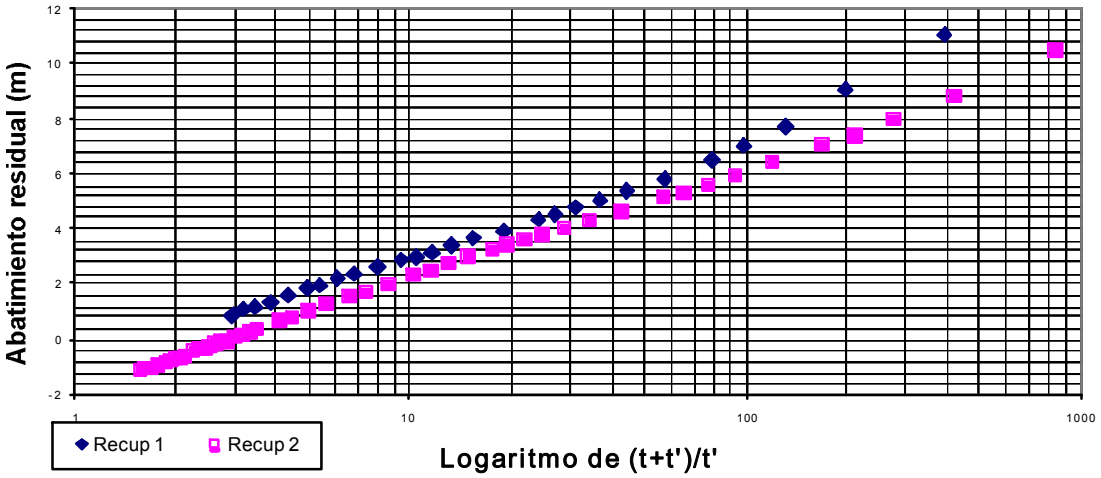


Anexo 24. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-15 (2001).

Gráfica de Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 44-IV-D-PP-15 (Nov. 2001)

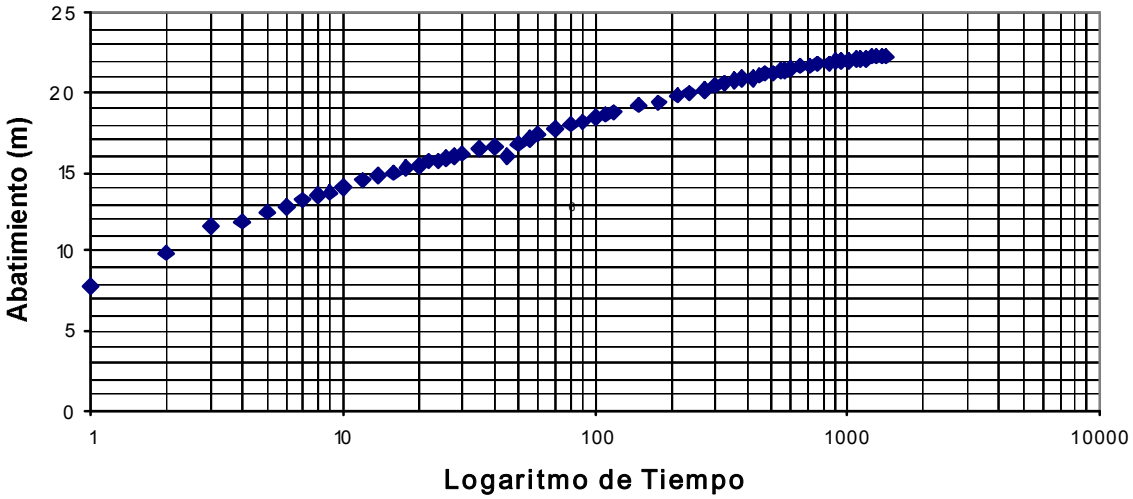


Gráfica del Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 44-IV-D-PP-15 (Nov. 2001)

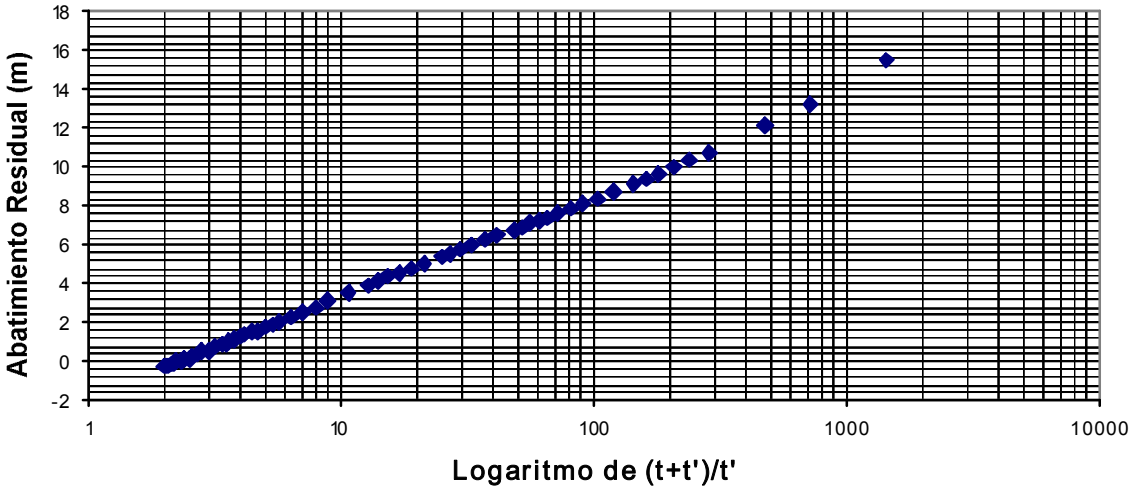


Anexo 25. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-15 (2003).

Gráfica de Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 44-IV-D-PP-15 (Marzo 2003)

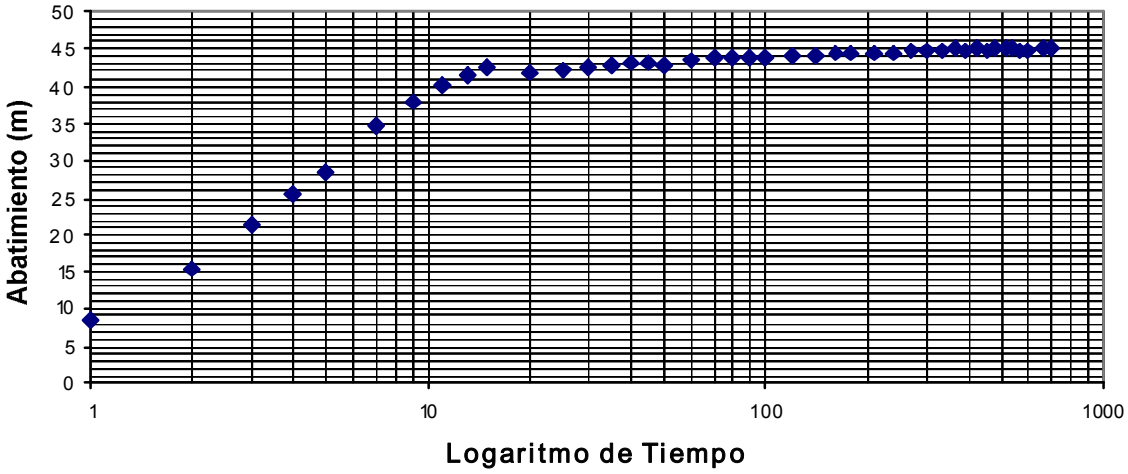


Gráfica de Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 44-IV-D-PP-15 (Marzo 2003)

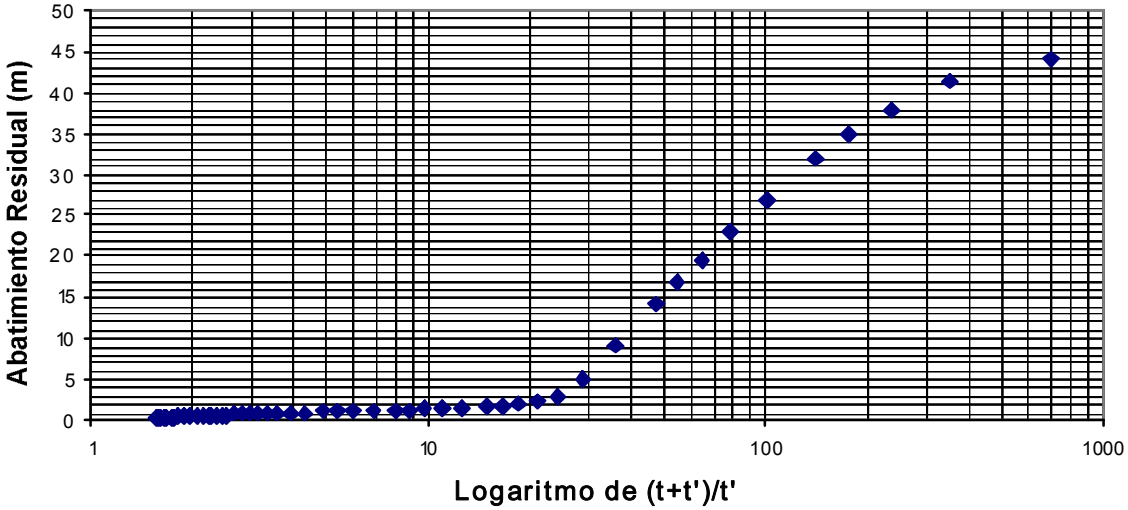


Anexo 26. Gráficas de bombeo y recuperación del pozo 52-II-A-PP-19.

Gráfica del Abatimiento vs. Log. de tiempo. Pozo 52-II-A-PP-19

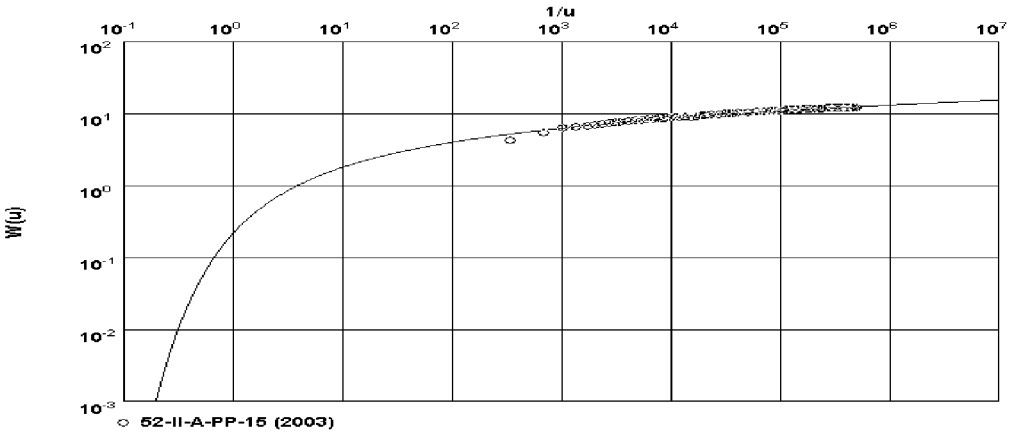


Gráfica del Abatimiento Residual vs. Log. (t+t')/t'. Pozo 52-II-A-PP-19



Anexo 27. Gráficas del análisis con el software Aquifer-Test de la prueba de bombeo del pozo 52-II-A-PP-15 (2003)

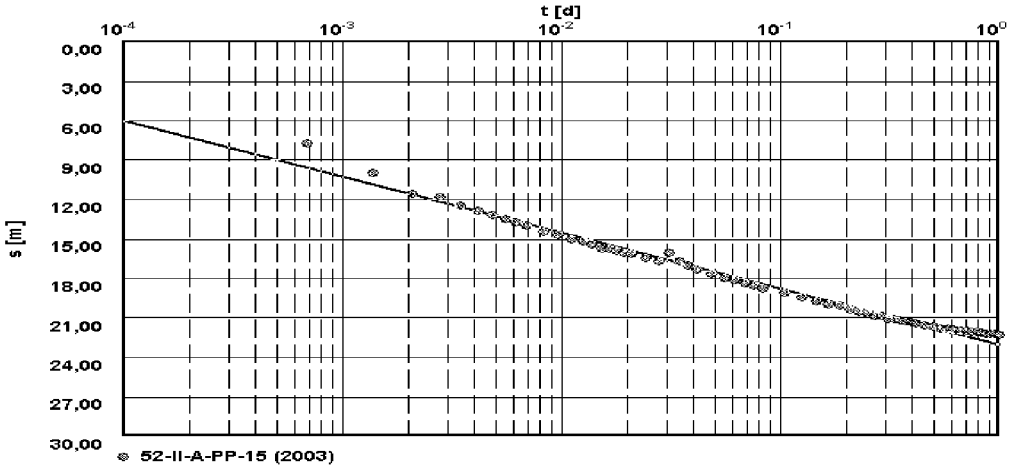
Gráfica del análisis con el software Aquifer- Test de la prueba de bombeo del pozo 52-II-A-PP-15 (2003). Método Theis .



Transmissivity (m^2/día) = 7,07E01 Aquifer thickness (m) = 83,00

Hidraulic conductivity (m/día) = 8,52E-01 Storavity = 1,27E-05

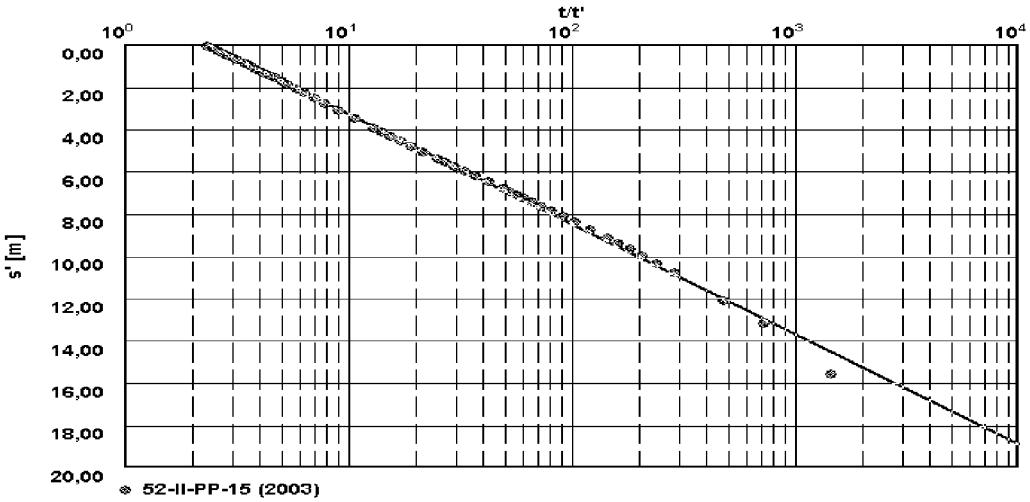
Gráfica del análisis con el software Aquifer- Test de la prueba de bombeo del pozo 52-II-A-PP-15 (2003). Método Cooper y Jacob.



Transmissivity (m^2/día) = 7,02E01 Aquifer thickness (m) = 83,00

Hidraulic conductivity (m/día) = 8,46E-01 Storavity = 1,36E-05

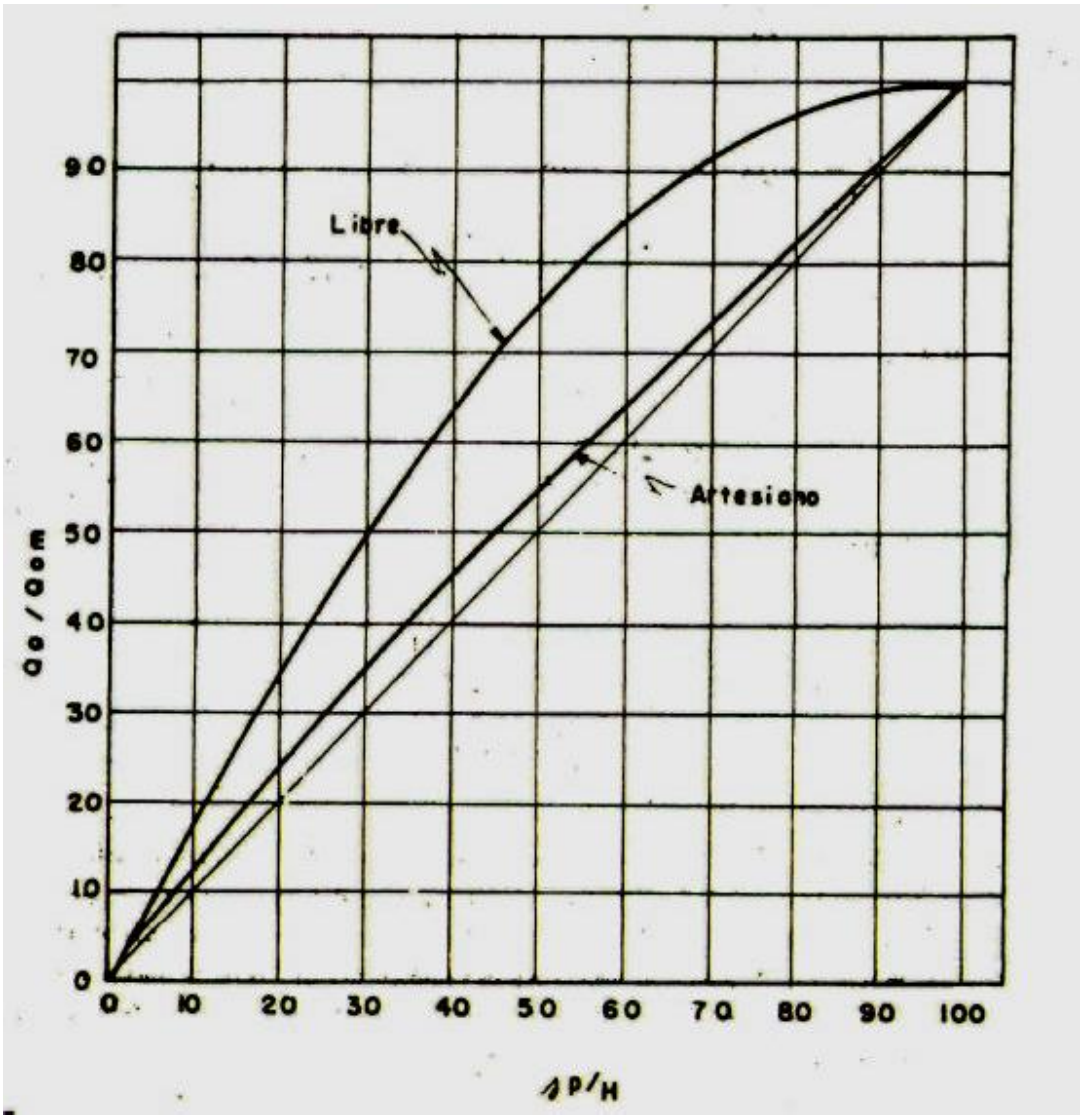
Gráfica del análisis con el software Aquifer- Test de la recuperación del pozo 52-II-A-PP-15 (2003). Método de Recuperación de Theis y Jacob.



Transmissivity (m^2/día) = 5,73E01 Aquifer thickness (m) = 83,00

Hidraulic conductivity (m/día) = 6,91E-01

Anexo 28. Variación del abatimiento en la producción para acuíferos libres y confinados.



Tomado de: Quintero Sagre. Hidráulica de pozos.