



GB.1199.8

U92

e2

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE UNA RECARGA ARTIFICIAL SOBRE
EL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUIBOR.**

Por
Marisela Uzcátegui Salazar

Trabajo de grado para optar al título de Magíster Scientiae en
Obras Hidráulicas.

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y TERRITORIAL.
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Mérida, Venezuela.
2004



SERBIULA - BIACI



GB1199.8 U92 e2

C.C. Reconocimiento

AGRADECIMIENTO

A la ilustre Universidad de los Andes, por recibirme y permitirme alcanzar una meta más dentro de sus aulas, haciéndome crecer cada día como profesional.

A mi asesor Dr. Hervé Jegat, quien siempre me oriento con buenos propósitos en el desarrollo de éste trabajo.

Al personal docente del CIDIAT y de la Universidad de los Andes, por haberme brindado sus conocimientos para mi formación técnica y profesional.

Al Profesor Luis Mora y al Ing. Miguel Linares, por su desinteresada ayuda en la elaboración de esta tesis.

A todos mis compañeros de la Escuela de Ingeniería Geológica, por su apoyo y buenos deseos durante la realización de éste trabajo.

A mi familia, por su colaboración y solidaridad constante durante mis estudios de postgrado.

Al amor que siempre está presente en todos mis proyectos y logros y que hoy se ve reflejado en un compañero incomparable. Gracias por tu comprensión y apoyo incondicional que hoy hace posible la culminación de un sueño.

INDICE

	Página
AGRADECIMIENTO.....	iii
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SIMBOLOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
Capítulos	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	2
General.....	2
Específicos.....	2
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	3
2.1 Ubicación geográfica.....	3
2.2 Delimitación del área de estudio.....	4
2.3 Hidrografía.....	4
2.4 Fisiografía y relieve.....	5
2.5 Climatología.....	6
2.6 Características hidrogeológicas.....	7
2.6.1 Geología.....	7
2.6.1.1 Formación Mamey.....	9
2.6.1.2 Formación Barquisimeto.....	10
2.6.1.3 Formación Villanueva.....	10
2.6.1.4 Formación Matatere.....	10
2.6.1.5 Formación Morán.....	10
2.6.1.6 Formación Pegón.....	10
2.6.1.7 Cuaternario.....	11
2.6.2 Condiciones litológicas de los acuíferos.....	11
2.6.2.1 Unidad litológica con porosidad intergranular.....	11
2.6.2.1 Unidad litológica con porosidad por fracturamiento, disolución o efecto mixto.....	11
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Estudios previos.....	13
3.2 Proyecto Yacambú-Quibor.....	13
3.3 Conceptos sobre modelos de aguas subterráneas.....	16
	iv

3.3.1	Tipos de modelos de aguas subterráneas.....	16
3.3.2	Procesos de la modelación.....	17
3.3.3	Método de solución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.....	19
3.3.4	Ecuación de flujo en Diferencias finitas.....	21
3.4	Uso de software VISUAL MODFLOW 3.0.....	24
3.4.1	Convención de la discretización.....	25
3.4.2	Ecuación de diferencias finitas.....	26
4.	MODELO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUIBOR.....	31
4.1	Discretización del sistema acuífero.....	31
4.1.1	Configuración de la malla.....	31
4.1.2	Modelo digital del terreno y del basamento rocoso.....	31
4.2	Correlación del material acuífero.....	34
4.3	Asignación de las propiedades del acuífero en el modelo.....	40
4.3.1	Conductividad Hidráulica (K_x , K_y y K_z).....	40
4.3.2	Almacenamiento (S_s , S_y , P_{eff} , P_{tot}).....	45
4.4	Condiciones de frontera.....	46
4.4.1	Celdas inactivas o de flujo nulo.....	46
4.4.2	Zonas de recarga.....	47
4.5	Estado inicial del acuífero.....	51
4.5.1	Flujo impuesto.....	52
4.5.2	Niveles piezométricos iniciales.....	53
5.	RECARGA ARTIFICIAL.....	55
5.1	Métodos de recarga.....	55
5.1.1	Recarga inducida.....	55
5.1.2	Recarga artificial propiamente dicha.....	55
5.2	Recarga artificial en el acuífero del Valle de Quibor.....	56
6.	COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO.....	60
6.1	Calibración en condiciones de recarga natural.....	60
6.1.1	Régimen de flujo utilizado.....	61
6.1.2	Periodos de tiempo.....	61
6.1.3	Niveles iniciales.....	62
6.1.4	Método de resolución.....	64
6.1.5	Evaluación del comportamiento del acuífero en condiciones de recarga natural.....	67
6.2	Simulación con condiciones de recarga artificial.....	73
6.2.1	Recarga en el portal de salida.....	73
6.2.2	Recarga en el portal de salida y quebrada Las Guardias.....	73

6.2.3 Régimen de flujo utilizado.....	74
6.2.4 Períodos de tiempo.....	74
6.2.5 Niveles iniciales.....	75
6.2.6 Método de resolución.....	75
6.2.7 Recarga artificial en el portal de salida.....	75
6.2.8 Recarga artificial en el portal de salida y quebrada Las Guardias.....	76
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
7.1 Conclusiones.....	77
7.2 Recomendaciones.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	80
APENDICE A.....	81
APENDICE B.....	84
APÉNDICE C.....	90
APENDICE D.....	95
APENDICE E.....	103
APENDICE F.....	106
APENDICE G.....	115
APENDICE H.....	118
APENDICE I.....	123

Bdigital.ula.ve

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
2.1 Estación meteorológica de Quibor.....	6
4.1 Distribución de la conductividad por zonas.....	43
4.2 Recarga natural propuesta en el modelo del acuífero.....	50
6.2 Periodos de tiempo estimados.....	61
C.1 Espesores en metros de las capas en cada pozo.....	91
C.2 Cotas en metros de las bases de las capas en cada pozo.....	93
E.1 Espesores saturados promedios.....	104
F.1 Monitoreo de niveles estáticos May – 01, Oct - 01.....	107
F.2 Monitoreo de niveles estáticos Oct – 02.....	108
F.3 Monitoreo de niveles estáticos May – 01, Oct – 01 y Oct – 02.....	110
F.4 Monitoreo de caudales. May – 01.....	110
F.5 Monitoreo de caudales. Oct – 01.....	112
F.6 Monitoreo de caudales. Oct – 02.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Ubicación geográfica del Valle de Quibor.....	3
2.2 Red hidrográfica del Valle de Quibor.....	5
2.3 Vista panorámica de “Los Cerritos”.....	6
2.4 Mapa geológico del Valle de Quibor.....	9
3.1 Esquema del proyecto Yacambú.....	16
3.2 Malla centrada en las esquinas.....	19
3.3 Malla centrada en los bloques.....	19
3.4 Aproximaciones en diferencias finitas.....	20
3.5 Mallado y ubicación de nudos en celdas.....	21
3.6 Discretización de modelo en 3-D.....	25
3.7 Malla centrada en el nudo y malla centrada en bloques.....	25
3.8 Celdas indiferencias finitas.....	26
3.9 Mallado sobre el área de estudio.....	27
4.1 Discretización del sistema acuífero.....	32
4.2 Modelo digital del terreno.....	32
4.3 Tope y base del modelo del acuífero.....	33
4.4 Secciones para las correlaciones en el mapa base.....	35
4.5 Variogramas para la obtención de las bases de las capas del modelo del acuífero.....	36
4.6 Capas del modelo del acuífero.....	39
4.7 Capas permeables y no permeables del modelo del acuífero.....	39
4.8 Mapa de transmisividad para la zona central del Valle de Quibor.....	40
4.9 Espesor saturado promedio año 2001.....	41
4.10 Espesor saturado promedio año 2002.....	41
4.11 Distribución de la conductividad hidráulica por zonas (m/d).....	41
4.12 Mapa de conductividad hidráulica.....	42
4.13 Conductividad asignada a las capas permeables del modelo.....	43
4.14 Sección con conductividades hidráulicas distribuidas encapas alternas.....	44
4.15 Sección con conductividades hidráulicas distribuidas en todas las capas.....	44

4.16 Pozos de bombeo. Alternancia de capas con la conductividad asignada.....	45
4.17 Base capa 1.....	47
4.18 Discretización de la cuenca del acuífero del Valle de Quibor.....	48
4.19 Ubicación de las zonas de recarga natural.....	51
4.20 Pozos de observación de los niveles de agua.....	52
4.21 Ubicación de pozos de bombeo.....	53
4.22 Variograma de los datos de niveles iniciales.....	54
4.23 Niveles iniciales.....	54
5.1 Caudal inyectado por pozos en función de sus características.....	57
5.2 Ubicación del portal de salida.....	58
5.3 Pozo de inyección.....	59
6.1 Intervalos de tiempo en el modelo.....	62
6.2 Variograma de los niveles iniciales.....	63
6.3 Niveles iniciales.....	63
6.4 Método de resolución empleado.....	65
6.5 Pasos de tiempo y factores multiplicadores.....	66
6.6 Calibración del modelo en condiciones de recarga natural (0 días).....	67
6.7 Calibración del modelo en condiciones de recarga natural (549 días).....	68
6.8 Celdas secas Capa 1, curvas isopiezas.....	69
6.9 Celdas secas Capa 6, curvas isopiezas.....	69
6.10 Celdas secas Capa 12, curvas isopiezas.....	70
6.11 Curvas isopiezas.....	71
6.12 Volumen de almacenamiento versus tiempo.....	72
6.13 Niveles versus tiempo.....	72
6.14 Vista 3-D del nivel de agua final.....	73
6.15 Intervalos de tiempo en el modelo de simulación.....	74
B.1 Ubicación de secciones de correlación en planta.....	85
B.2 Sección estratigráfica S-1.....	86
B.3 Sección estratigráfica S-2.....	87
B.4 Sección estratigráfica S-3.....	88
B.5 Sección estratigráfica S-4.....	89
D.1 Base de la capa 1 (blanqueada).....	96

D.2 Base de la capa 2 (blanqueada).....	96
D.3 Base de la capa 3 (blanqueada).....	97
D.4 Base de la capa 4 (blanqueada).....	97
D.5 Base de la capa 5 (blanqueada).....	98
D.6 Base de la capa 6 (blanqueada).....	98
D.7 Base de la capa 7 (blanqueada).....	99
D.8 Base de la capa 8 (blanqueada).....	99
D.9 Base de la capa 9 (blanqueada).....	100
D.10 Base de la capa 10 (blanqueada).....	100
D.11 Base de la capa 11 (blanqueada).....	101
D.12 Base de la capa 12 (blanqueada).....	101
D.13 Base de la capa 13 (blanqueada).....	102
G.1 Ubicación de las rejillas para la inyección de caudal en capas someras.....	116
G.2 Ubicación de las rejillas para la inyección de caudal en capas profundas.....	116
G.3 Ubicación de las rejillas para la inyección de caudal en la quebrada Las Guardias...	117
H.1 Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas someras para 549 días, con bombeo.....	119
H.2 Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas someras para 10 años, con bombeo.....	119
H.3 Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas someras para 10 años, sin bombeo.....	120
H.4 Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas profundas para 549 días, con bombeo.....	120
H.5 Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas profundas para 10 años, con bombeo.....	121
H.6 Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas profundas para 10 años, sin bombeo.....	121
H.7 Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en Quebrada las Guardias y portal de salida. Para 10 años con bombeo.....	122
I.1 Celdas secas, capa 1. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 549 días.....	124
I.2 Celdas secas, capa 6. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 549 días.....	124
I.3 Celdas secas, capa 12. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 549 días.....	125

I.4 Celdas secas, capa 1. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 10 años, con bombeo.....	125
I.5 Celdas secas, capa 6. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 10 años, con bombeo.....	126
I.6 Celdas secas, capa 12. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 10 años, con bombeo.....	126
I.7 Celdas secas, capa 1. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 10 años, sin bombeo.....	127
I.8 Celdas secas, capa 6. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 10 años, sin bombeo.....	127
I.9 Celdas secas, capa 12. Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 10 años, sin bombeo.....	128
I.10 Celdas secas, capa 1. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas, 549 días.....	128
I.11 Celdas secas, capa 6. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas, 549 días.....	129
I.12 Celdas secas, capa 12. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas, 549 días...	129
I.13 Celdas secas, capa 1. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas 10 años, con bombeo.....	130
I.14 Celdas secas, capa 6. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas 10 años, con bombeo.....	130
I.15 Celdas secas, capa 12. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas 10 años, con bombeo.....	131
I.16 Celdas secas, capa 1. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas 10 años, sin bombeo.....	131
I.17 Celdas secas, capa 6. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas 10 años, sin bombeo.....	132
I.18 Celdas secas, capa 12. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas 10 años, sin bombeo.....	132
I.19 Celdas secas, capa 1. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas. Quebrada Las guardias y portal de salida 10 años, con bombeo.....	133
I.20 Celdas secas, capa 6. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas. Quebrada Las guardias y portal de salida 10 años, con bombeo.....	133
I.21 Celdas secas, capa 12. Curvas isopiezas. Recarga por capas profundas. Quebrada Las	

Bdigital.ula.ve

LISTA DE SIMBOLOS

Δy	:	Distancia diferencial de la celda en el eje y
Δx	:	Distancia diferencial de la celda en el eje x
T	:	Transmisividad
S	:	Coefficiente de almacenamiento
θ	:	Coefficiente de ponderación temporal
K	:	Conductividad hidráulica
Kx	:	Conductividad hidráulica en el eje x
Ky	:	Conductividad hidráulica en el eje y
Kz	:	Conductividad hidráulica en el eje z
h	:	Niveles
C	:	Conductancia
Δt	:	Diferencial de tiempo
Ss	:	Almacenamiento específico
Sy	:	Rendimiento específico
Peff	:	Porosidad efectiva
Ptot	:	Porosidad total
MM3	:	Millones de metros cúbicos
Pa	:	Precipitación anual
m/s	:	Metro sobre segundo
M	:	Metro
L/s	:	Litro por segundo
mm	:	Milimetro
F.S.E.	:	Flujo subterráneo efluente
m3/d	:	Metro cúbico por día
D	:	Diámetro
P	:	Profundidad
RSM	:	Promedio cuadrático relativo

RESUMEN

Una de las fuentes hídricas más importantes del Valle de Quibor proviene de la explotación del agua subterránea mediante la construcción de pozos. Debido a la sobreexplotación de este recurso, se ha producido un abatimiento progresivo del nivel del acuífero, lo que hace pensar que continuará produciéndose un descenso en el uso del agua subterránea en los próximos años. Es por ésta razón que se propone un sistema de recarga artificial para aumentar los niveles del agua haciendo uso de las obras de trasvase que se construyen para conducir agua del río Yacambú al Valle de Quibor, mediante la infiltración a profundidad, a través de pozos. En la presente investigación se pretende hacer uso de los recursos numérico-computacionales a través de la modelación y simulación del acuífero con diferentes políticas y condiciones de recarga, para establecer el comportamiento del flujo subterráneo en la zona, permitiendo predecir la capacidad de explotación futura del acuífero.

Bdigital.ula.ve

Palabras claves: Hidrogeología, modelado, simulación, recarga artificial.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Como se sabe, el agua dulce que se tiene en el planeta está constituida por el agua almacenada en los glaciares, las aguas subterráneas y las aguas superficiales, constituyendo éstas dos últimas las principales fuentes de explotación.

Las aguas subterráneas constituyen cerca del 95 % del agua dulce, sin tomar en cuenta aquella que se encuentra en las capas de hielo polar, y en contraste, el agua superficial sólo constituye un 5%. Esto nos confirma la importancia del agua subterránea para el desarrollo de la vida humana y las actividades económicas.

Dado que el agua subterránea conforma la mayor cantidad de agua dulce disponible, se han comenzado a realizar explotaciones de este recurso en las zonas que presentan carencia de aguas superficiales. Sin embargo, se ha observado una sobreexplotación de este recurso, que excede la recarga de los acuíferos, y por tanto se ha producido un descenso de la cantidad y de la calidad de las aguas extraídas.

El Valle de Quíbor se caracteriza por ser una zona semiárida, en donde se observa una marcada diferencia entre la precipitación y la evaporación, originando escasez de agua la mayor parte del año creando la necesidad de riego para la obtención de los cultivos, ya que ésta constituye la principal fuente de actividad económica.

En la actualidad, una de las fuentes hídricas más importantes en el valle de Quíbor, proviene de la explotación del agua subterránea mediante la construcción de pozos, los cuales son utilizados directamente para la obtención de agua para riego.

A causa de la explotación intensiva del agua subterránea, a partir de 1959, el Valle ha experimentado un deterioro apreciable de los niveles de agua en los acuíferos, así como la salinización del agua por el deterioro de los suelos debido al uso no controlado de las aguas de riego con relativo contenido salino y la facilidad del lavado de las sales del material acuífero, trayendo como consecuencia una disminución del rendimiento de los pozos y de la calidad del agua.

Como solución al problema que actualmente presenta el acuífero del Valle de Quíbor, se propone trabajar en escenarios para su manejo, que puedan producir una recuperación de los niveles mediante una recarga artificial proporcionada por el Sistema de Riego Yacambú – Quíbor, mediante las obras físicas (presa y túnel trasvase), que facilitarán dicha dotación.

A través de modelos de simulación, que han sido una herramienta de importante aplicación para la conceptualización de los acuíferos, se podrá evaluar y predecir los impactos de una explotación prolongada de las aguas subterráneas así como las recargas que se pueden producir en el acuífero (artificiales y naturales), que ayudarán a obtener alternativas para el manejo de éste recurso hídrico.

En la presente investigación se evaluará el impacto que producirá en el sistema acuífero del Valle de Quíbor la incorporación de una recarga artificial, mediante la simulación del acuífero en diferentes escenarios, a fin de evaluar el comportamiento del sistema y generar una solución a la problemática planteada en el sector.

OBJETIVOS

1. GENERAL

Evaluar la influencia de una recarga artificial sobre el comportamiento del acuífero del Valle de Quíbor.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Actualizar y analizar la información hidrogeológica del acuífero del Valle de Quíbor.
- 2.- Evaluar la información litológica, geológica e hidrológica del sitio.
- 3.- Adaptar un modelo de simulación al acuífero del Valle de Quíbor.
- 4.- Modelar el acuífero en régimen no permanente con las condiciones iniciales y con la incorporación de una recarga artificial.
- 5.- Analizar el comportamiento del acuífero con la incorporación de la recarga artificial.

Bdigital.ula.ve

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Según Alvarado (1989), tal como se muestra en la figura 1, el Valle de Quibor se encuentra ubicado en la parte central del estado Lara, hacia el sur de la ciudad de Barquisimeto, Capital del estado. La superficie total del Valle de Quibor se estima en 970 Km².

El Valle se encuentra en el Municipio Juan Bautista Rodríguez, del Edo. Lara.

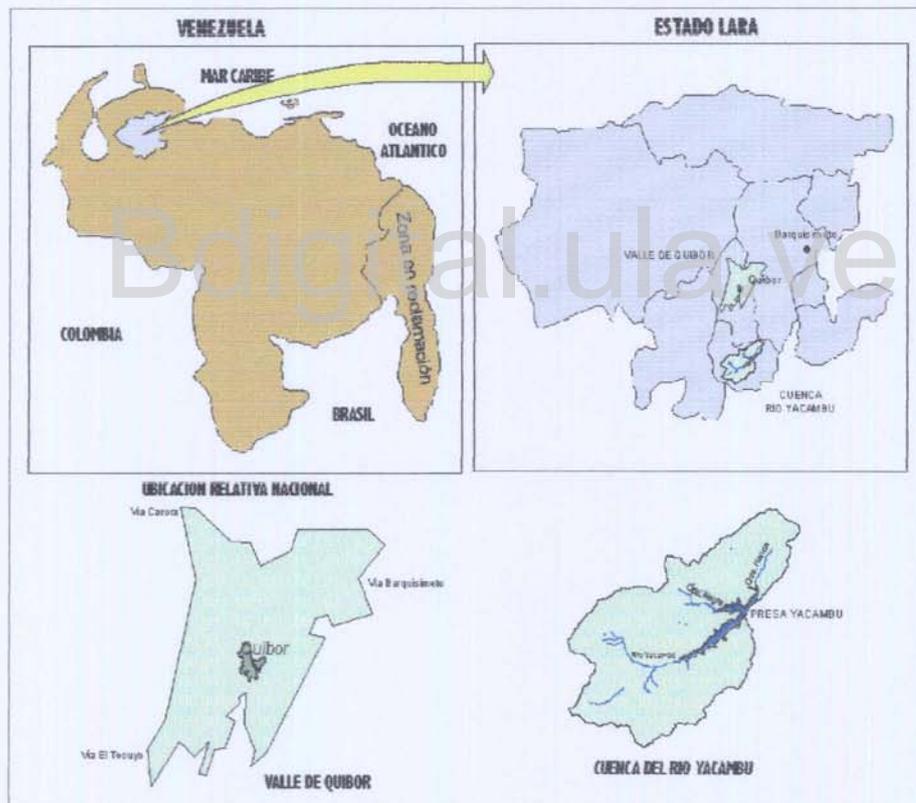


Figura 2.1. Ubicación Geográfica del Valle de Quibor

2.2 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca todo el Valle de Quíbor se encuentra delimitada por las siguientes coordenadas:

ESTE mínima: 418.000,00 ESTE máxima: 441.000,00
NORTE mínima: 1.085.000,00 NORTE máxima: 1.115.000,00

Sin embargo, se debe destacar que existe un sector central que representa un área de 120 km², en él se encuentran los mayores espesores de aluvión y encierra límites actuales del acuífero, se han perforado la mayor parte de los pozos, se han efectuado históricamente campañas de recolección de información en cuanto a niveles y calidad del agua, presenta un comportamiento homogéneo en la calidad del agua (Mora, 1995), presenta un comportamiento homogéneo en los parámetros hidrogeológicos. Este sector central se utilizará como zona de referencia para definir niveles y los parámetros para el aprovechamiento del agua subterránea en el valle de Quíbor.

2.3 HIDROGRAFÍA

Su red hidrográfica, está constituida principalmente por tres grandes quebradas:

- La quebrada de Las Guardias.
- La quebrada Atarigua.
- La quebrada Palo Negro.

Todas estas quebradas son paralelas entre sí y drenan de Sur a Norte y desembocan en la quebrada Las Raíces, la cual a su vez es afluente del río El Tocuyo. (Alvarado, 1989)

De todas las quebradas, solamente por la de las Guardias y Atarigua circula agua permanente durante todo el año, que al llegar a las planicies del valle desaparecen por infiltración en el subsuelo y parte por derivaciones para riego y para abastecimiento de Quíbor (Aguilera y Padilla, 1963).

parte central del valle emergen pequeñas colinas aisladas de aproximadamente 30m de alto, conocidas con el nombre de “Los Cerritos” (Alvarado, 1989).



Figura 2.3. Vista panorámica de “Los Cerritos”

2.5 CLIMATOLOGÍA

En la región de estudio existen varias estaciones meteorológicas, pero la estación de Quíbor es la más representativa de la zona

Tabla 2.1. Estación meteorológica de Quíbor

Nº Estación	Fecha instalación	Altitud (m)	Latitud	Longitud
2204	1945	682	09° 55' 11''	69° 37' 39''

El clima es heterogéneo con precipitaciones promedio anuales que varían entre 400-500 mm. La temperatura media anual oscila entre 21 y 28°C y la evaporación media anual

entre 1700 y 3200 mm. Las escasas lluvias tienen una distribución bimodal generalmente entre los meses de mayo y junio, igualmente en octubre y noviembre. Los días de lluvia al año varían entre 55 y 106.

La precipitación anual promedio en la cuenca del acuífero del valle de Quíbor es de 532.2 mm/año que para la cuenca del acuífero representa un total de 518 millones de metros cúbicos al año.

La evaporación media anual para el período 1979-1985 es de 3318 mm en la estación Quíbor y la evapotranspiración real (ETR) media anual para el mismo período se encuentra entre 933 y 324 mm, y el volumen total evapotranspirado es de $500,5 \times 10^6 \text{ m}^3$.

2.6 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

2.6.1 Geología

Geológicamente la mayor parte del territorio larense se encuentra limitado por el llamado surco de Barquisimeto, el cual constituye el área de convergencia de la cordillera Oriental de los Andes venezolanos y el sistema montañoso del Caribe demarcado por Renz, La Keman y Van Der Meulen.

El material aflorante en el surco de Barquisimeto está compuesta por rocas sedimentarias, metasedimentarias, metamórficas e ígneas con relaciones crono-estratigráficas que están fuera de lugar y según parece, en desafío a todo intento de reconstrucción estructural.

Las mayores extensiones de suelos aluviales se encuentran en la llamada Sabana de Carora y en la planicie entre Quíbor y Barquisimeto, el territorio norte y al oeste de Barquisimeto muestra mayor cantidad de arcillas terciarias, bloques alóctonos.

Desde el punto de vista geológico, en el área están presentes numerosas Formaciones geológicas, encontrándose rocas de la edad cretácea, terciaria y cuaternaria cuyas características litológicas varían marcadamente en las diferentes zonas geográficas. Entre las Formaciones que constituyen la zona se pueden mencionar: la Formación Mamey, Barquisimeto, Villanueva, Matatere, Morán, El Pegón y Cuaternario. Además, la zona es afectada por la falla conocida como Falla de Boconó, la cual atraviesa los Andes venezolanos y continúa hasta el Mar Caribe.

La parte plana o Valle de Quíbor está cubierta por sedimentos fluvio-lacustre de edad cuaternaria. La zona montañosa que rodea al valle y el basamento del relleno fluvio-lacustre están constituidos por rocas de edad cretácea y terciaria.

Son muchas las teorías sobre el origen del Valle, una de las más aceptadas es que durante el pleistoceno la depresión o cuenca de Quíbor constituía un lago. El fondo de la cuenca era de forma muy irregular con sus mayores profundidades en la zona en donde hoy

existen los caseríos Campo Lindo, Playa Bonita, El Hato. En el centro de la cuenca permaneció un afloramiento de rocas cretáceas que constituyó un alto geológico en esa zona y que hoy se conoce con el nombre de “Los Cerritos” Figura 2.3. El relleno fluvio-lacustre, constituido por lentes de arena y grava con intercalaciones de capas de arcilla y predominancia de material fino, tiene un espesor de 0 a 120 m en la parte norte, con un espesor saturado entre 0 y 90 m. En la parte sur, el espesor de esos sedimentos varía entre 0 y 230 m, oscilando el espesor saturado entre 0 y 110 m.

Los levantamientos de campo fueron realizados por el Ing. Geólogo Pedro Dufflart por parte del CIDIAT-ULA, el mismo se encargó del estudio Geológico de dicha localidad, efectuando recorridos de campo que fueron asesorados por el Geólogo Edgar Iglesias.

Los principales sitios de estudios fueron los siguientes:

- Qda. Atarigua
- Qda. Botucal
- Qda. La Ceibita
- Qda. La Guardia
- Qda. La Sentella
- Los Cerritos
- La Guadalupana
- Sector Mocundo
- Sector Rincón del Guardia
- Sector Los Jebes
- Vía Carora
- Vía Sanare
- Planta de Tratamiento en Quíbor

Se delimitaron las Formaciones Geológicas dentro del área de estudio con el asesoramiento del Geólogo Edgar Iglesias y el grupo de investigadores del CIDIAT-ULA, coordinado por el Ing. Hidrólogo Hervé Jegat, Ing. Geólogo José Tomas Castrillo, Ing. Luis Mora, Ing. Marisela Uzcátegui y el Ing. Pedro Dufflart.

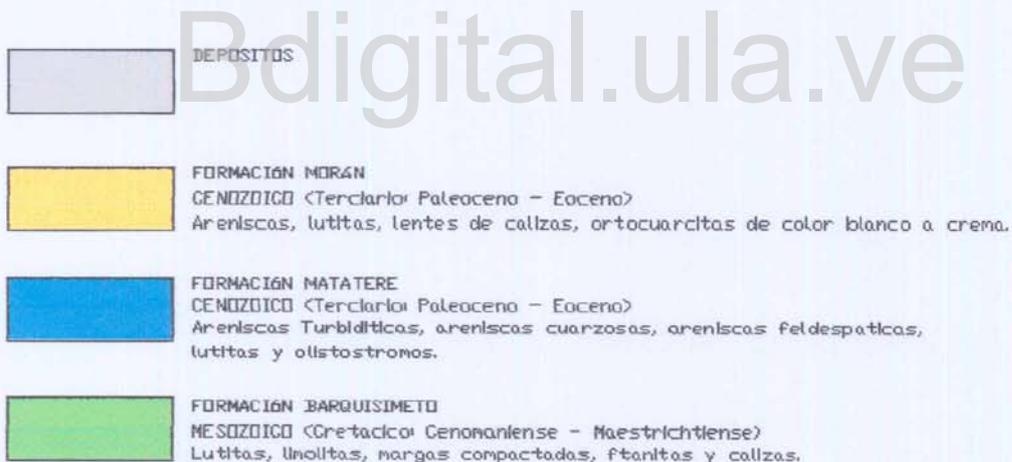
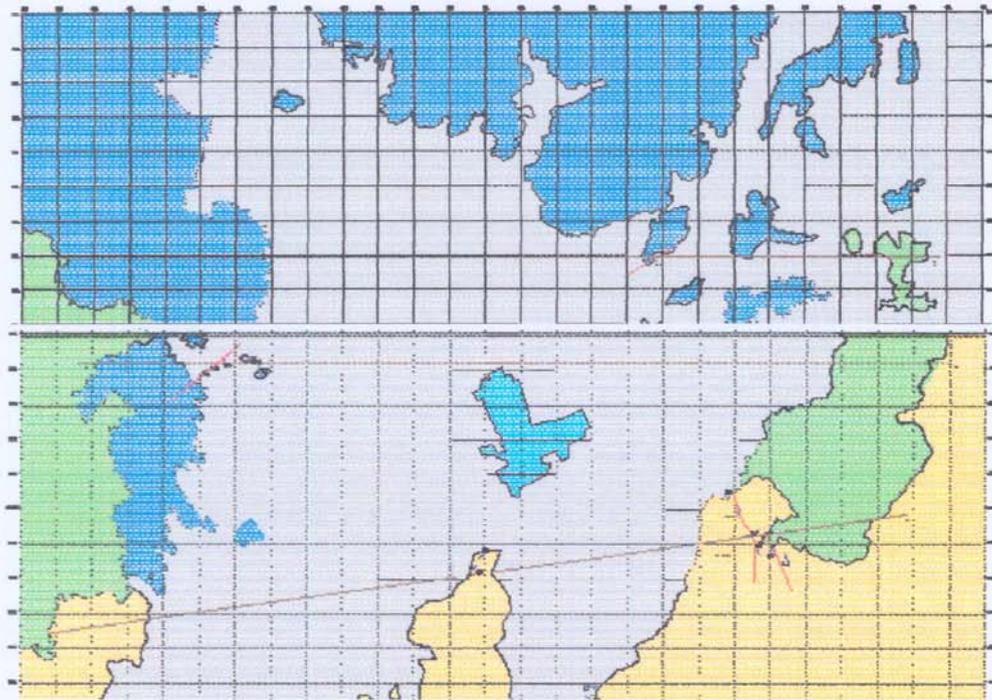


Figura 2.4 Mapa Geológico del Valle de Quibor

- **Formación Mamey**

La Formación Mamey de edad cretácico inferior, se compone especialmente de esquistos cuarzo-micaceo-sericiticos, metaconglomerados, metacalizas, calizas laminadas y filitas. Se pueden encontrar afloramientos de estas rocas en el extremo norte.

- ***Formación Barquisimeto***

Conocida también como Formación Cazadero, de edad cretácica superior, está compuesta esencialmente por lutitas, lodos compactados, calizas, margas y filitas. Los afloramientos de ésta formación se encuentran en la zona montañosa Noreste y Este y el sector Oeste y Suroeste. Las pequeñas colinas que emergen en la parte central del valle, también están constituidas por rocas de esta formación. Torres (1993).

- ***Formación Villanueva***

Es una secuencia de gran espesor de rocas sedimentarias, constituidas por lutitas silíceas finamente laminadas con areniscas y calizas intercaladas. Por el contenido fosilífero en las calizas se asume que la edad de la formación es cretácico superior-Paleoceno (Bellezzia y Rodríguez, 1980, citado por Alvarado (1989)). La Formación Villanueva aflora en la zona montañosa en el extremo Sur oriental.

- ***Formación Matatere***

Consiste en una gruesa secuencia de turbiditas, está compuesta de una monótona alternancia de areniscas y lutitas, caracterizándose por la presencia de capas de peña, peñones y grandes bloques alóctonos. La edad de esta formación es Paleoceno-Eoceno, con un espesor estimado de 3000 m. Alvarado (1989). Los afloramientos de esta formación se encuentran en los cerros que bordean la parte occidental del valle, también se encuentran en el extremo Nororiental.

- ***Formación Morán***

El tipo predominante de roca es el de areniscas con estratificación media, muchas de las cuales son duras y cuarcíticas interestratificadas con lutitas negras. El espesor total de esta unidad es aproximadamente de 500 m y sus afloramientos se encuentran en las montañas que bordean el valle en la parte Sur.

- ***Formación El Pegón***

Consiste de gravas pobremente consolidadas con cantos hasta de 25 cm de diámetro, toscamente estratificadas y escogidas, asociadas con lentes de arena. La edad de la Formación es mioceno- Plioceno y se pueden observar afloramientos en el extremo sur.

- ***Cuaternario***

Los sedimentos cuaternarios que forman el relleno del valle son predominantemente finos (arcillas y limos) con intercalaciones de arenas, gravas, y peñones que forman los acuíferos potenciales de la zona.

Estos sedimentos cuaternarios descansan en contacto discordante sobre las rocas de las Formaciones Barquisimeto, Morán y Matatere, constituyendo el relleno fluvio-lacustre del valle de Quíbor. Estos sedimentos son producto de la erosión de las rocas de la zona montañosa que la circundan inmediatamente ya que se trata de un valle cerrado. (Alvarado 1989).

El relleno fluvio-lacustre del Valle de Quíbor tiene un espesor máximo de 200-300m aproximadamente. Estos espesores se encuentran en la parte central del valle formando una zona angosta de 1000 m de ancho y alargada en dirección Noreste-Suroeste. Los espesores del relleno disminuyen paulatinamente hacia la zona montañosa hasta desaparecer. (Alvarado 1989).

2.6.2 Condiciones litológicas de los acuíferos

Dependiendo de su comportamiento hidrogeológico, en la región de Quíbor pueden diferenciarse dos unidades litológicas:

- Unidad litológica con porosidad intergranular
- Unidad litológica con porosidad por fracturamiento, disolución o efecto mixto.

- ***Unidad litológica con porosidad intergranular***

Esta unidad litológica está compuesta por sedimentos poco o no consolidados con gravas y arenas del relleno fluvio-lacustre, son acuíferos discontinuos y locales de rendimiento alto y bajo. Otra parte de esta unidad litológica está compuesta por sedimentos consolidados, que comprende a capas de areniscas y gravas del borde y la base del sector Sur del valle, con frecuencia este tipo de acuífero es local y de bajo rendimiento; también dentro de esta unidad se encuentran alternancias rítmicas de capas de lutitas y areniscas consolidadas con espesores máximos de tres metros, este tipo de acuífero también es local y de bajo rendimiento.

- ***Unidad litológica con porosidad por fracturamiento, disolución o efecto mixto***

Comprende rocas metamórficas del borde y la base del relleno fluvio-lacustre. Las calizas que se encuentran en las formaciones Mamey y Barquisimeto son las unidades más importantes de esta categoría, ya que existe la posibilidad de que estas rocas presenten estructuras karstificadas, que pueden favorecer la constitución de acuíferos cavernosos.

Probablemente estos acuíferos tienen mayor importancia en profundidad al comunicarse y servir de fuente de recarga de los acuíferos intergranulares del relleno fluvio-lacustre.

Bdigital.ula.ve

CAPITULO 3

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESTUDIOS PREVIOS

Durante los años 1961 al 1963, la división de geotécnia del Ministerio de Obras Públicas (MOP) por primera vez realiza un estudio integral de los acuíferos de Quíbor. Las conclusiones más relevantes de este estudio indican que el acuífero posee un comportamiento libre hacia el norte y uno confinado hacia el centro y sur, la profundidad de la mesa de agua varía entre 10 y 120 m. La extracción anual de agua a través de 69 pozos es de 18.4×10^6 m³.

En 1974, se elaboró un informe para APROSELA y Pro-Venezuela titulado “Medidas de Emergencia en el uso de los Acuíferos de Quíbor”, lo resaltante de este trabajo es que se plantean diferentes alternativas de recarga artificial del acuífero y algunas medidas complementarias que se deben aplicar para de esta manera evitar su agotamiento.

En 1978 el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales Renovables (MARNR) elabora un informe en el cual analiza la situación de los acuíferos en base a los niveles de la mesa de agua y llegan a la conclusión de que las zonas central y norte de este Valle experimentan una sobreexplotación donde en los últimos 15 años (1963-1978) los niveles han descendido entre 15 y 50 m. Se delimita un área en donde se debe suspender la concesión de permisos para la perforación de pozos.

En 1982 la empresa Aguasuelos Ingeniería realiza un estudio donde se analizó la fluctuación de niveles y el grado de deterioro del acuífero. Se observa una disminución apreciable de los valores de transmisividad, del orden de 50% menos con relación a estudios anteriores, lo cual indica una reducción de los espesores saturados de acuífero. El objetivo fundamental de este estudio fue la zonificación del acuífero con fines de identificación de áreas críticas, concluyendo que todo el Valle representa un área hidrogeológicamente crítica para su aprovechamiento, lo cual no permite un incremento de su extracción.

De acuerdo a un estudio realizado por Torres en 1993, la diferencia de las fluctuaciones de los niveles según análisis realizados con datos de 1986, 1987 y 1992, indican un descenso de los niveles del Valle de Quíbor de 0.5 a 5 m por año

3.2 PROYECTO YACAMBÚ-QUÍBOR

El proyecto Yacambú consiste en el transvase del agua desde el río del mismo nombre hacia el valle de Quíbor en donde hay escasez de agua, tanto para abastecimiento de población como para riego.

La ejecución del proyecto permitirá llevar agua al área bajo riego unas 18.500 hectáreas e igualmente contempla llevar agua a Barquisimeto con 3000 L/s.

Las características ecológicas y la tradición de riego, han permitido a los agricultores del Valle producir diversos rubros agrícolas para consumo fresco durante todo el año, con alta productividad, utilizando los recursos hídricos disponibles. El valle de Quíbor, en el pasado, fue un soporte importante del desarrollo agrícola del estado Lara; sin embargo, debido al agotamiento progresivo de los acuíferos, las áreas bajo riego han decrecido drásticamente, ocasionando el éxodo de muchos productores a otras zonas del país, lo que afecta la economía estatal.

El 20 de septiembre de 1989 se creó la empresa Sistema Hidráulico Yacambú-Quíbor C.A. cuyos accionistas son el MARNR (91,6%) y la Gobernación del Estado Lara (8,4%), con el fin de terminar la construcción de las obras civiles de regulación y trasvase y aprovechar posteriormente el gran complejo hidráulico (Figura 3.1).

La acción de la empresa se circunscribe a cuatro componentes o sub-proyectos:

- Terminación de las obras de regulación y trasvase
- Desarrollo agrícola
- Abastecimiento urbano y
- Conservación de la cuenca del río Yacambú.

Las tierras de alto potencial agrícola son la base para el desarrollo del sistema de riego de Quíbor, razón por la cual la preservación de estas tierras debe ser política fundamental del Estado. En este sentido el *Plan de Ordenación del Territorio del Estado Lara* incluye las tierras de la depresión de Quíbor, 43.395 hectáreas, en la categoría de máxima preservación (la más restrictiva en cuanto a posibilidades de usos diferentes al agrícola, y que puedan plantear conflictos de competencia por dichas tierras).

Igualmente el decreto de la Zona de Aprovechamiento Agrícola de la Depresión de Quíbor, antes reseñado, fundamenta la defensa de los suelos en condiciones de alto potencial.

Es necesario hacer un análisis más detallado de la situación de las tierras agrícolas de la depresión del Valle de Quíbor, que sirva de base para la definición de la ubicación de los usos y actividades complementarias susceptibles a instalar en el área.

Para ello tiene que partirse de la ubicación de las 26.120 hectáreas regables detectadas en el estudio de suelos del año 1992, cifra que está en proceso de revisión en función de las alteraciones topográficas, de salinización de suelos, ocupación irreversible, etc., con el fin de determinar la superficie regable disponible.

Partiendo de la nueva determinación del área regable, la categoría de máxima preservación agrícola debe aplicarse con prioridad a estos suelos.

Asimismo, y dependiendo de los análisis agroeconómicos, el resto de las tierras de la depresión de Quíbor debe seguir teniendo como prioridad la localización de usos agrícolas y forestales que, aún cuando no vayan a ser beneficiarios directos del sistema de riego, puedan desarrollar dichas actividades optimizando el uso de las escasas fuentes de humedad natural susceptibles a ser utilizadas. Se deben estimular las actividades de producción tradicionales

con perspectivas de ser mejoradas, tal es el caso de la cría de ovinos y caprinos, plantaciones de sisal, piña, hortalizas, etc., asimismo la introducción, previa investigación, de nuevos rubros agrícolas y de plantaciones forestales. La incorporación de estas tierras al proyecto Yacambú-Quíbor debe ser objeto de atención especial, ya que pueden contribuir a incrementar los beneficios económicos y sociales del proyecto.

En consecuencia, el desarrollo de planes novedosos de aprovechamiento de los recursos hídricos y de las tierras, hasta ahora marginales, existentes en la depresión de Quíbor, deben incluir la optimización de los recursos tradicionalmente usados (aguas superficiales y subterráneas), así como la investigación de nuevas tecnologías de aprovechamiento y uso de los recursos hídricos de la zona.

Estas áreas fuera del sistema de riego pueden ser asiento de otros usos complementarios, pero a la vez compatibles con la actividad agrícola para, de esta manera aliviar las presiones por utilización de las tierras del sistema de riego.

El desarrollo agrícola del valle de Quíbor se fortalecerá con la puesta en marcha del sistema de riego Yacambú-Quíbor, mediante el uso del agua trasvasada desde la cuenca del río Yacambú y la utilización de las fuentes hídricas locales, representada por el agua superficial y subterránea de la cuenca de la quebrada Las Raíces.

Las tierras regables se localizan en la planicie mayor del Valle de Quíbor, correspondiente a una superficie aproximada de 19.500 hectáreas netas, limitadas por el sur, este y oeste con el polígono del Área de Aprovechamiento Agrícola y por el norte con parte de la carretera que conduce a Carora y con la quebrada Las Raíces.

Las características físicas y químicas de los suelos del Valle determinan un manejo particular que conduzca hacia el desarrollo sustentable en el tiempo, para lo cual se involucrará a los usuarios del área.

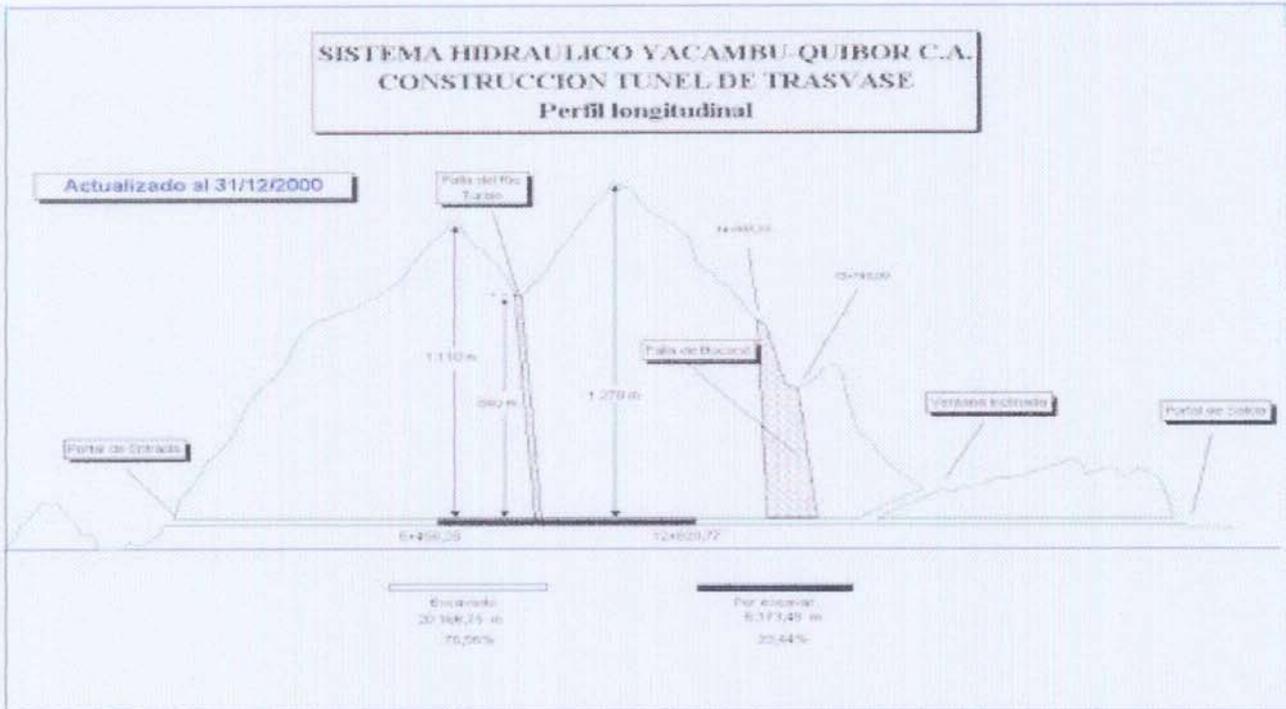


Figura 3.1. Esquema del proyecto Yacambú

3.3 CONCEPTOS SOBRE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Un modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad. Es evidente que usamos modelos diariamente, como un plano de una casa (es una representación de la realidad en forma simplificada). Del mismo modo los modelos de aguas subterráneas son también representaciones de la realidad y, si están bien hechos, pueden ser herramientas predictivas valiosas para el manejo de los recursos hídricos subterráneos.

3.3.1 Tipos de modelos de agua subterráneas

En general, se pueden dividir en tres:

- *Modelos a escala*
- *Modelos analógicos*
- *Modelos matemáticos.*

- ***Modelos a escala***

Consisten en un tanque lleno con medio poroso no consolidado, a través del cual, se hace fluir agua. El problema mayor de estos modelos es el de la escala, para transferir la situación real a las dimensiones del modelo en el laboratorio.

- ***Modelos analógicos***

El flujo de aguas subterráneas puede describirse mediante ecuaciones diferenciales que son de la misma forma que las ecuaciones que gobiernan otros procesos físicos, tales como el flujo de corriente eléctrica, el flujo de calor a través de un sólido o el flujo de un fluido viscoso.

Los modelos analógicos son técnicas mediante las cuales se reemplazan las ecuaciones diferenciales por un sistema mixto de ecuaciones continuas con respecto a una variable pero discreta con respecto a las demás. La solución del sistema de ecuaciones se lleva a cabo en una computadora analógica que permite la integración continua con respecto a la variable no discretizada. (Carrasco, 1982).

Los modelos analógicos más usados frecuentemente, hoy casi en descenso, son los de flujo de un fluido viscoso y los modelos analógicos eléctricos.

- ***Modelos matemáticos***

Consisten en un conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo del agua subterránea. Las predicciones que pueden hacerse a través de un modelo matemático dependen del grado de acercamiento que exista entre el modelo y la realidad. Para construir el modelo deben hacerse simplificaciones de la realidad, que es muy compleja como para ser simulada exactamente.

Generalmente, las simplificaciones necesarias para resolver analíticamente un modelo matemático son frecuentemente restrictivas. Por ejemplo, casi todas las soluciones analíticas requieren que el medio sea homogéneo e isótropo. Para simular situaciones más realistas, en general es necesario resolver el modelo matemático usando métodos numéricos. Dado el alto desarrollo de las computadoras éste último es el método más usado actualmente.

3.3.2 Proceso de la modelación.

El proceso de modelación se puede enfocar desde dos puntos de vista: matemático y físico.

- ***Proceso de modelación matemático***

Consta de tres pasos básicos:

Conceptualización: se deben identificar los procesos físicos dominantes y hacer ciertas hipótesis sobre los no dominantes (se desprecian).

Formulación: plantear las ecuaciones diferenciales que gobiernan el proceso.

Solución de las ecuaciones diferenciales: pueden ser analíticas o numéricas.

- ***Proceso de la modelación físico***

Conceptualización: analizar el medio, identificar los contornos, acciones exteriores, geometría del medio, etc. A veces se le llama formación del modelo conceptual y es un paso muy importante, ya que en los pasos siguientes se pueden cuantificar los errores, mientras que aquí no. Distintas conceptualizaciones pueden representar el medio real, pero darán predicciones diferentes.

Discretización del medio: se divide el medio en una serie de subregiones que lo cubran y no se solapen. La forma de las subregiones depende del método numérico que se emplee e influye en los errores numéricos que se cometerán.

Estimación de los parámetros: la conceptualización realizada depende de una serie de parámetros que deben obtenerse, pero es difícil porque el medio en la realidad es heterogéneo y desconocido. La forma de obtenerlos es midiendo o calibrando el modelo.

- **Medición:** es importante y hay que hacerlo, pero no es suficiente, porque una medida es sólo un valor puntual o quizá de un pequeño entorno.

- **Calibración:** dadas medidas de la respuesta del sistema y de los parámetros medidos, se intentan estimar parámetros representativos del medio, que reproduzcan la respuesta observada. La calibración puede ser de dos tipos: automática y manual.

La calibración manual consiste en jugar con los valores de los parámetros para ajustar los valores calculados con los medidos.

La calibración automática busca por medio de la computadora los parámetros que reproduzcan mejor la respuesta del sistema.

- **Evaluación de los errores de los parámetros del sistema:** se hace poco, pero es importante. Luego que se obtienen unos parámetros que se consideran óptimos, se hacen variar observando la respuesta del sistema y de esta manera ver si es razonable. Así se tiene una idea del rango en que se pueden mover las variables del sistema.

Verificación o validación: en hidrología subterránea no es muy usado, pero si en otros procesos naturales. Consiste en correr el modelo para condiciones distintas a las que se han utilizado en la calibración. Si se tienen dos series de datos, una se utiliza para la calibración y la otra para la validación, el problema principal es que no siempre se cuenta con suficientes datos.

Predicción: es utilizada una vez que se ha construido el modelo.

3.3.3 Método de solución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales

Las soluciones analíticas sirven para casos muy particulares: medio homogéneo, acciones puntuales, contornos en el infinito, etc., sirven para dar órdenes de magnitud y comprobar la validez de la solución numérica.

Los métodos de solución numérica son cuatro:

- *Diferencias finitas*

Se divide el medio en una malla regular, generalmente rectangular. Las ecuaciones se plantean en función de los valores de la variable en los nudos. Existen dos maneras de presentar la malla, tal como se muestra en las figuras 3.2 y 3.3:

- Malla centrada en las esquinas.
- Malla centrada en los bloques.

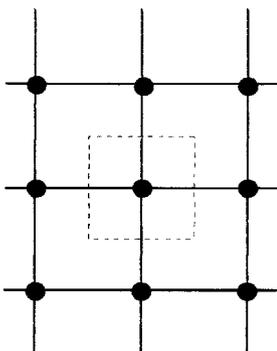


Figura 3.2 Malla centrada en las esquinas

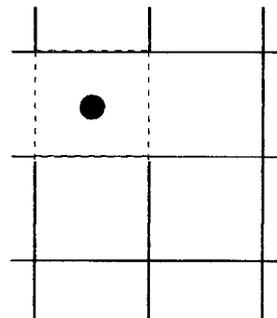


Figura 3.3 Malla centrada en los bloques

La zona punteada es el área asociada a los nudos en ambos casos.

La formulación de las operaciones se hace sustituyendo los operadores diferenciales por sus aproximaciones en diferencias finitas (Figura 3.4)

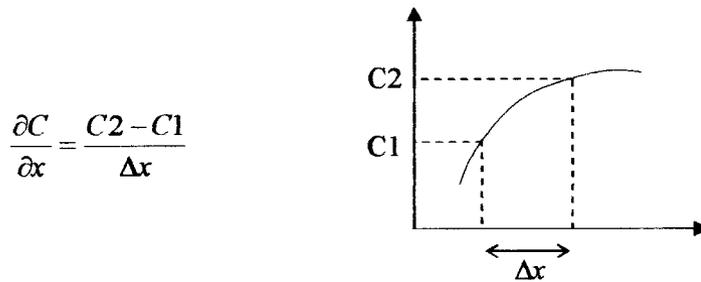


Figura 3.4 Aproximaciones en diferencias finitas.

Se pasa de la ecuación diferencial a un sistema de ecuaciones lineales.

El método es cómodo de programar, suele requerir menos datos de entrada y en algunos casos son más rápidos de ejecutar.

- ***Diferencias finitas integradas***

Es, básicamente, el predecesor de los elementos finitos. Consiste en sustituir el medio por una serie de regiones de forma arbitraria (no regulares). La formulación de las ecuaciones se hace en base a la expresión integral de la ecuación diferencial en derivadas parciales. Cuando se formulan las ecuaciones se parte de una forma integral (el balance de masas). Con éste método se hace a partir de la ecuación sobre los volúmenes asociados a cada nodo.

La ventaja que representa este método con respecto a las diferencias finitas es que puede ser más exacto porque se logra concentrar nudos en las zonas más complicadas y permite ajustar mejor los contornos.

La desventaja o inconveniente con respecto a diferencias finitas, es que su formulación y entrada de datos es más complicada y ocupa mayor tiempo.

- ***Elementos finitos***

Bastante similar al anterior en cuanto a la discretización. La formulación de ecuaciones es diferente, porque minimiza los errores de aproximación. No se hará una explicación exhaustiva de éste método, ya que no se utiliza para el modelado del presente trabajo.

- **Elementos de contorno**

No se discretiza el medio, sino el contorno. La formulación está basada en métodos integrales y es casi exacta.

3.3.4 Ecuación de flujo en Diferencias finitas

Partiendo de la expresión general de la ecuación de flujo en régimen no permanente, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

Se define una malla rectangular sobre el dominio (Figura 3.5)

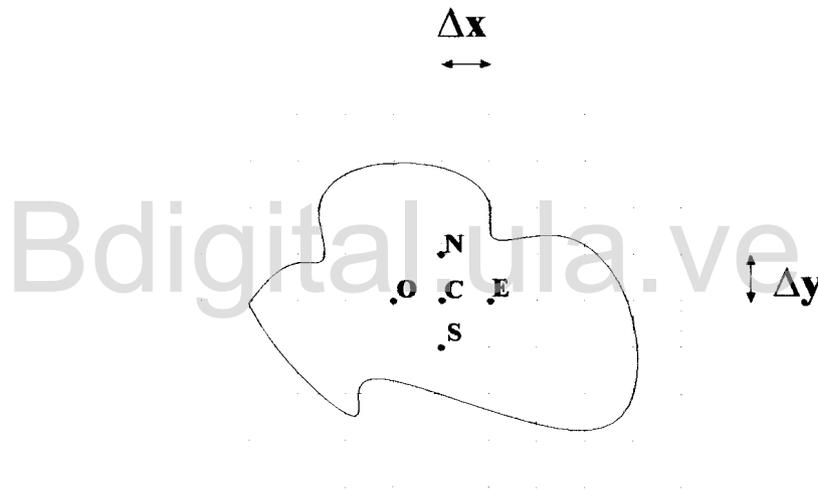


Figura 3.5 Mallado y ubicación de nudos en celdas

Todas las filas y columnas no tienen que ser del mismo tamaño. Si $\Delta y = 1$, el Δy contiguo debe estar entre $\frac{2}{3} < \Delta y < 1.5$. Si la variación es brusca los errores vienen influenciados por los Δy más grandes.

Si se considera Δx y Δy constantes, se escribe la ecuación de C a partir de los puntos contiguos y suponiendo a la transmisividad T constante, se tiene:

En x:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{CE} = \frac{h_E - h_C}{\Delta x} \quad (3.2)$$

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{OC} = \frac{h_C - h_O}{\Delta x} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Tx \frac{\partial h}{\partial x} \right) = Tx \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \right) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Tx \frac{\partial h}{\partial x} \right) = Tx \frac{\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{CE} - \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{OC}}{\Delta x} = Tx \frac{h_E - 2h_C + h_O}{\Delta x^2} \quad (3.5)$$

En y:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(Ty \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Ty \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(Ty \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Ty \frac{h_N - 2h_C + h_S}{\Delta y^2} \quad (3.7)$$

En t:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = S \frac{h_C^{k+1} - h_C^k}{\Delta t} \quad (3.8)$$

Donde $h_C^k = h$ en el punto C en el tiempo k .

Sustituyendo todo en la ecuación y operando,

$$\lambda x = (h_E - 2h_C + h_O) + \lambda y (h_N - 2h_C + h_S) = h_C^{k+1} - h_C^k \quad (3.9)$$

Donde:

$$\lambda_x = \frac{T_x \Delta t}{S \Delta x^2}; \quad \lambda_y = \frac{T_y \Delta t}{S \Delta y^2} \quad (3.10)$$

$\frac{T}{S}$ = Coeficiente de difusión

$\frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ Es representativo de la malla.

Los h del término izquierdo no tienen superíndice, pero se pueden tomar en k , $k+1$, o un tiempo intermedio.

- **Integración en el tiempo**

Existen tres métodos para integrar la ecuación de flujo en diferencias finitas:

Método Explícito. También llamado diferencias hacia delante, las h del primer miembro de (1) se evalúan en el tiempo k .

$$h_C^{k+1} = h_C^k + \lambda_x(h_C^k - 2h_C^k + h_C^k) + \lambda_y(h_N^k - 2h_C^k + h_S^k) \quad (3.11)$$

Es un método que funciona bien. Para resolver el problema, se comienza en $k=0$ (condiciones iniciales), y se va calculando h , para los diferentes momentos. Es muy variable porque la variable es explícita (no hay que resolver ningún sistema de ecuaciones).

El problema que presenta este método es que es inestable (los valores de h varían de forma no acotada si $\lambda > \frac{1}{2}$).

Método Implícito. También llamado diferencias hacia atrás, los valores de h se evalúan en $k+1$

$$h_C^k = h_C^{k+1} + \lambda_x(h_C^{k+1} - 2h_C^{k+1} + h_C^{k+1}) + \lambda_y(h_N^{k+1} - 2h_C^{k+1} + h_S^{k+1}) \quad (3.12)$$

Queda un sistema lineal de N ecuaciones con N incógnitas. Se suele resolver por métodos iterativos. Es incondicionalmente estable.

Esquema de Crank – Nicholson. Los h se evalúan en un tiempo intermedio entre k y $k+1$:

$$t = \theta t^{k+1} + (1 - \theta)t^k \quad (3.13)$$

Siendo θ un coeficiente de ponderación temporal. $0 < \theta < 1$

Para $\theta = 0$, el esquema es explícito

Para $\theta = 1$, el esquema es implícito.

Es común tomar $\theta = \frac{1}{2}$ (centrado en el tiempo).

El esquema es:

$$h_c = \theta h^{k+1} + (1 - \theta)h^k \quad (3.14)$$

Es el método más preciso e incondicionalmente estable si $\theta \geq \frac{1}{2}$.

Tomar $\theta = \frac{1}{2}$ puede dar lugar a pequeñas oscilaciones, que no deben confundirse con inestabilidad, pues están acotadas. Son oscilaciones tanto en el tiempo como en el espacio.

3.4 USO DE SOFTWARE VISUAL MODFLOW 3.0

Los objetivos primarios en el diseño de *Modflow* fueron: crear un programa que pudiese ser modificado, simple de usar y mantener, que pueda ejecutarse en una gran variedad de computadoras con cambios mínimos y que fuera relativamente eficiente en memoria de cálculo y tiempo de ejecución.

El programa tiene una estructura modular en la cual las funciones similares del programa están agrupadas juntas, y las opciones de cálculo e hidrológicas esten construidas de tal manera que cada opción es independiente de las demás. A causa de esta estructura pueden agregarse nuevas opciones sin necesidad de cambiar las subrutinas existentes, además, las subrutinas que integran opciones que no están siendo usadas pueden borrarse, disminuyendo entonces el tamaño del programa. El modelo puede usarse para aplicaciones bi o tridimensionales.

El programa básico incluye procedimientos para simular el efecto de pozos, recarga, ríos, drenes, evapotranspiración, etc., incluye diferentes opciones para algoritmos de solución.

3.4.1 Convención de la discretización.

En la figura 3.6, se puede observar la discretización de un modelo en 3-D.

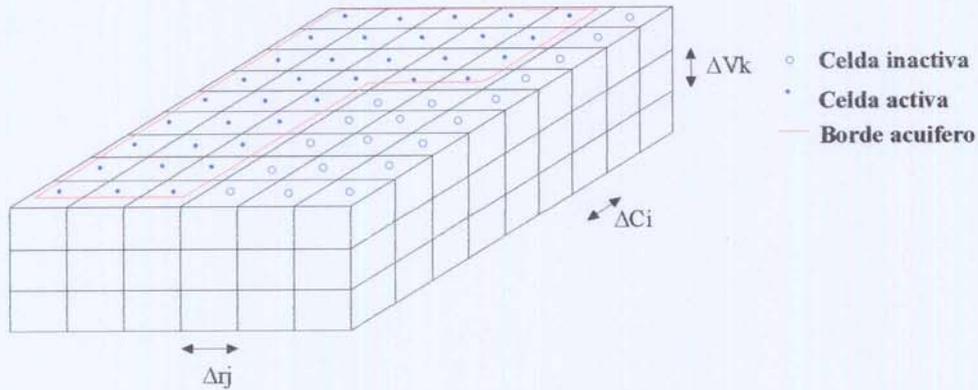


Figura 3.6 Discretización de modelo en 3-D

i es el índice para las filas, j para las columnas y k para los estratos. Los estratos se numeran de arriba hacia abajo.

Dentro de cada celda hay un punto llamado *nudo* donde se calcula el nivel piezométrico h . Existen dos convenciones para definir las celdas respecto de los nudos: centradas en el bloque y centrada en el nudo (Figura 3.7).

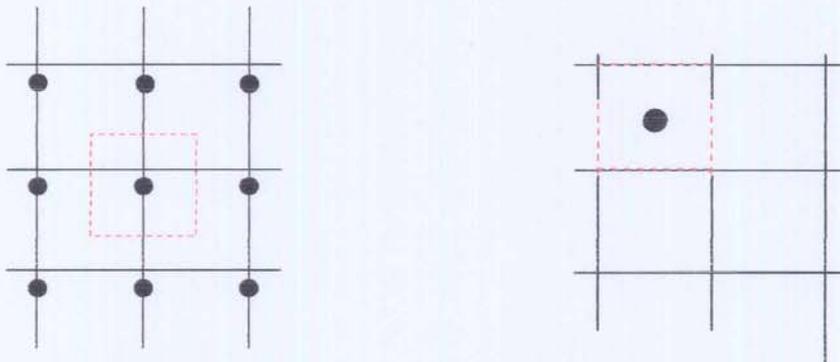


Figura 3.7 Malla centrada en el nudo y malla centrada en bloques

El *Modflow* trabaja con la formulación centrada en el bloque.

3.4.2 Ecuación de diferencias finitas

Se obtiene de la aplicación de la ecuación de continuidad: la suma de todos los flujos entrantes y salientes de la celda debe ser igual a la tasa de cambio en el almacenamiento de la celda.

Considérese una celda (i, j, k) y sus seis adyacentes: $(i-1, j, k)$; $(i+1, j, k)$; $(i, j-1, k)$; $(i, j+1, k)$; $(i, j, k-1)$; $(i, j, k+1)$. Los flujos se consideran positivos si entran, entonces, el flujo entrante en la celda (i, j, k) desde la celda $(i, j-1, k)$ (Figura 3.8), está dado por la ley de Darcy como:

$$q_{(i,j-1/2,k)} = K_{(i,j-1/2,k)} * \Delta Ci * \Delta V k * \frac{(h_{(i,j-1/2,k)}) - h_{(i,j,k)}}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (3.15)$$

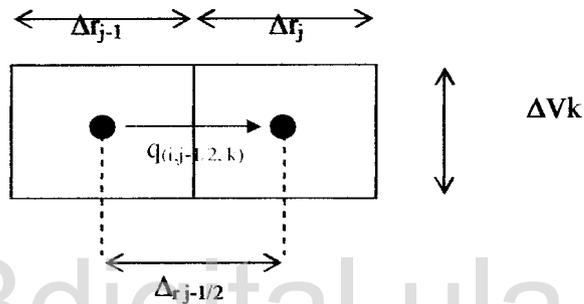


Figura 3.8. Celdas en diferencias finitas

Donde:

$h(i,j,k)$ es el nivel piezométrico en (i,j,k)

$q(i,j-1/2,k)$ es el caudal a través de la cara de las dos celdas

$k(i,j-1/2,k)$ es la conductividad hidráulica o permeabilidad entre los nudos (i,j,k) y $(i,j-1,k)$.

$\Delta r_{j-1/2}$ es la distancia entre los nudos (i,j,k) y $(i,j-1,k)$.



Figura. 3.9 Mallado sobre el área de estudio

No debe asociarse el sub-índice $(i,j-1/2,k)$ con un punto específico entre dos nudos, sino que K representa la conductividad hidráulica o permeabilidad efectiva de toda la región entre los dos nudos. Similares expresiones se obtienen para el flujo a través de las otras caras.

$$q_{(i,j+1/2,k)} = K_{(i,j+1/2,k)} * \Delta C_i * \Delta V_k * \frac{(h_{(i,j+1,k)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (3.16)$$

$$q_{(i+1/2,j,k)} = K_{(i+1/2,j,k)} * \Delta r_j * \Delta V_k * \frac{(h_{(i+1/2,j,k)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta C_{i+1/2}} \quad (3.17)$$

$$q_{(i-1/2,j,k)} = K_{(i-1/2,j,k)} * \Delta r_j * \Delta V_k * \frac{(h_{(i-1/2,j,k)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta C_{i-1/2}} \quad (3.18)$$

$$q_{(i,j,k+1/2)} = K_{(i,j,k+1/2)} * \Delta C_i * \Delta r_j * \frac{(h_{(i,j,k+1/2)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta V_{k+1/2}} \quad (3.19)$$

$$q_{(i,j,k-1/2)} = K_{(i,j,k-1/2)} * \Delta Ci * \Delta rj * \frac{(h_{(i,j,k-1/2)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta V_{k-1/2}} \quad (3.20)$$

Las ecuaciones anteriores expresan el flujo a través de las caras de la celda (i,j,k) en función de los niveles h , dimensiones de la grilla y conductividad hidráulica. La notación puede simplificarse combinando las dimensiones de la grilla y la conductividad hidráulica en una constante única, la **conductancia hidráulica**:

$$C_{(i,j-1/2,k)} = K_{(i,j-1/2,k)} * \frac{\Delta Ci * \Delta V k}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (3.21)$$

Donde

$C_{(i,j-1/2,k)}$ Es la conductancia en la fila i y el estrato k entre los nudos (i,j,k) y $(i,j-1,k)$.

Conductancia es, entonces, el producto de la conductividad hidráulica por el área de flujo dividido por la longitud del camino de flujo.

Estas ecuaciones toman en cuenta el flujo entrante / saliente de cada celda con sus seis celdas contiguas. Para tener en cuenta el flujo hacia o desde elementos externos al acuífero tales como ríos, drenes, recarga, evapotranspiración y pozos, se requieren términos adicionales. Estos flujos pueden depender del nivel en la celda en cuestión o ser totalmente independientes de él. El flujo desde fuera del acuífero puede representarse mediante la ecuación:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} * h_{i,j,k,n} + q_{i,j,k,n} \quad (3.22)$$

Donde:

a Es el flujo desde la fuente externa n en la celda (i,j,k)

p y q son constantes.

En general si hay N fuentes o sumideros externos que afecten una celda, el flujo combinado se expresa:

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} * h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (3.23)$$

Se llama

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \quad (3.24)$$

$$Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (3.25)$$

El término general para el flujo externo a la celda (i,j,k) es:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k,n} * h_{i,j,k,n} + Q_{i,j,k,n} \quad (3.26)$$

Considerando que la suma de los flujos a la celda (i,j,k) es igual a la variación del almacenamiento en ella:

$$\begin{aligned} q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} = \\ = SS_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} * \Delta rj * \Delta Ci * \Delta Vk \end{aligned} \quad (3.27)$$

Donde:

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ Es la aproximación en diferencias finitas de la derivada del nivel respecto del tiempo.

$SS_{i,j,k}$ es el almacenamiento específico en la celda (i,j,k)

$\Delta rj * \Delta Ci * \Delta Vk$ Es el volumen en la celda (i,j,k)

Si se sustituye el caudal en función de la conductancia hidráulica y los niveles aclarando a qué tiempo corresponden dichos niveles, se tiene:

$$\begin{aligned} Cr_{i,j-1/2,k} * (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + Cr_{i,j+1/2,k} * (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,j,k} * (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+1/2,j,k} * \\ * (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} * (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} * (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + P_{i,j,k} * h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = \\ = SS_{i,j,k} \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} * \Delta rj * \Delta Ci * \Delta Vk \end{aligned} \quad (3.28)$$

En esta expresión se desconocen los h^m , es decir, se tiene una ecuación con siete incógnitas y si se plantea una ecuación como esta para cada nudo, se obtiene un sistema de n ecuaciones con n incógnitas que deben resolverse simultáneamente.

El valor de $h_{i,j,k}^{m-1}$ es, al inicio, los niveles iniciales (dato)

El **MODFLOW** usa métodos iterativos para obtener la solución del sistema de ecuaciones en cada paso de tiempo; se parte de un valor arbitrario o estimado para el nivel en cada nudo al fin de cada paso. Estos valores se varían obteniéndose un mejor ajuste del sistema de ecuaciones y así sucesivamente. Se debe especificar el criterio de convergencia, que especifica la máxima variación de nivel que puede producirse en una iteración, puede

usarse un valor del criterio de convergencia de un orden de magnitud menor que el error deseado.

En cuanto a los niveles iniciales de niveles estimados al inicio de la iteración, el *MODFLOW* utiliza los niveles calculados en el paso anterior como valor inicial.

Debe tenerse en cuenta que los métodos iterativos dan una solución sólo aproximada al sistema de ecuaciones de diferencias finitas para cada paso de tiempo, sin embargo, si se obtuviese una solución exacta del sistema de ecuaciones en cada paso, esto sólo sería una aproximación a la solución de la ecuación de flujo. La discrepancia entre el valor obtenido en diferencias finitas y de solución exacta de la ecuación diferencial se llama error de truncación. En general, este error será mayor, cuanto mayor sea el espaciado de la malla y el paso de tiempo.

Finalmente, debe reconocerse que aunque se obtenga una solución formal de la ecuación diferencial, será sólo una aproximación a las condiciones reales en el campo.

• ***Tipos de celdas del modelo y condiciones de borde***

Las celdas se agrupan en tres tipos:

Celdas de nivel variable: aquellas en que se calcula el nivel para cada paso de tiempo (Δt)

Celdas de nivel constante: aquellas en las que el nivel se especifica previamente y se mantiene constante a lo largo de toda la simulación.

Celdas inactivas: son aquellas que presentan flujo nulo.

Todas las ecuaciones anteriormente presentadas se plantean sólo para las celdas de nivel variable.

CAPITULO 4

MODELO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUÍBOR

El modelo del acuífero se ha efectuado haciendo uso del programa VISUAL MODFLOW 3.0, el cual está diseñado para modelar acuíferos monocapas y multicapas, a través del método de diferencias finitas para la solución de las ecuaciones diferenciales de flujo del agua subterránea. Este software permite aumentar el número de celdas o refinar la malla en las zonas críticas, de mayor explotación, o en donde existe dificultad en definir el problema en forma detallada. Además ofrece facilidades en la construcción del modelo, flexibilidad de involucrar condiciones complejas de frontera y un adecuado manejo de la información disponible de las variables.

4.1 DISCRETIZACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO

El sistema acuífero ha sido discretizado mediante un sistema de 93 filas y 121 columnas con un número de 11253 nodos. Así mismo, el espesor del acuífero se ha dividido en 12 capas que representan la litología de la zona.

Para el estudio de la litología de las capas se recurrió a una minuciosa revisión de la data existente, contándose con un total de 42 pozos que aportaron información importante para la correlación de las capas de igual litología.

4.1.1 Configuración de la malla

Las dimensiones de las mallas han sido seleccionadas de acuerdo a la utilizada en la simulación condicional, es decir, un distanciamiento entre nodos de aproximadamente 250 x 250 m. El sistema acuífero es discretizado mediante una zona de mallado regular. La Figura 4.1 muestra la discretización del sistema acuífero.

4.1.2 Modelo digital del terreno y del basamento rocoso

El modelo del terreno se tomó, al igual que el basamento rocoso, de un estudio realizado con anterioridad por el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) en el año 2001, por medio de un proyecto de investigación denominado APROSELA, con una extensa base de datos sobre levantamientos topográficos de la zona. Este modelo abarca toda la zona de estudio, por lo cual no fue necesaria la modificación del mismo. El modelo del basamento rocoso se obtuvo a través del Software Surfer 8.0. (Figura 4.2)

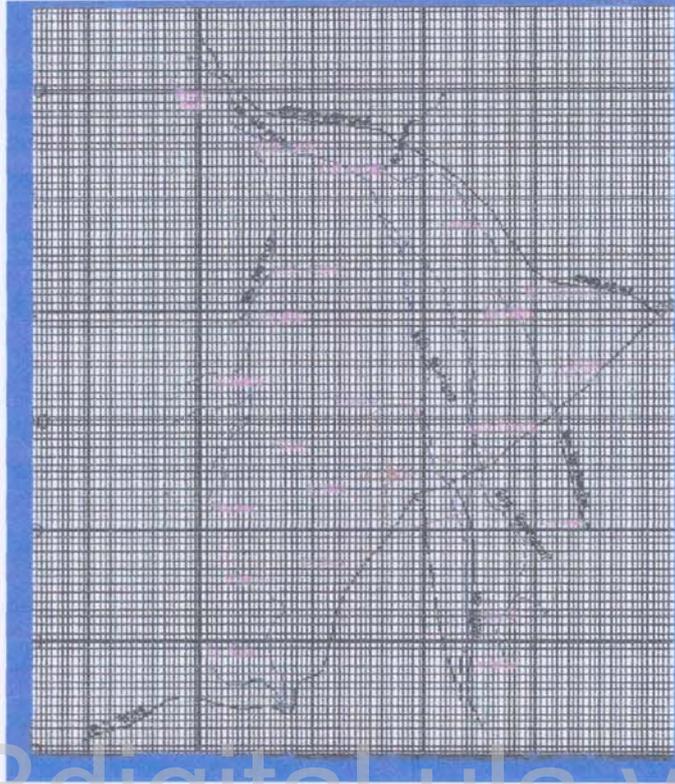


Figura 4.1 Discretización del sistema acuífero.

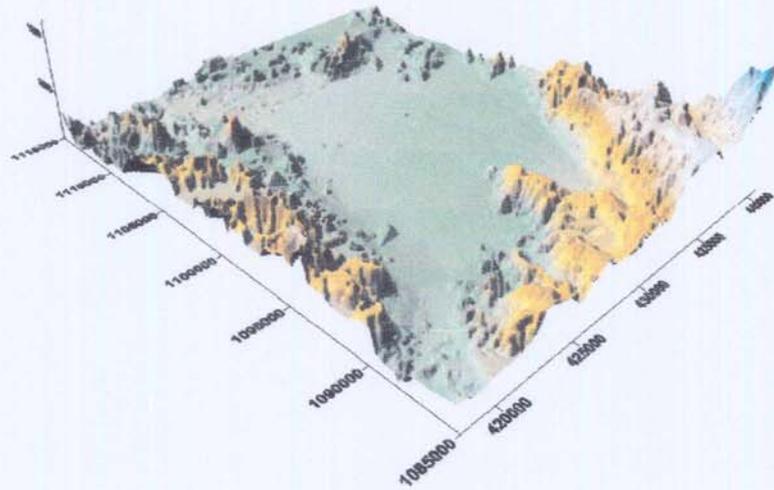


Figura 4.2. Modelo digital del terreno

El modelo del basamento rocoso se tomó de un estudio realizado previamente por el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) en el año 2000. Este modelo sólo describía la zona central del valle; para adaptarlo a las necesidades de ésta investigación, se procedió a extrapolar los valores de dicho modelo utilizando el método de Kriging, hasta los límites anteriormente mencionados, para tener reflejado en la base de la roca todo el valle como primera aproximación, más adelante se modificó el basamento de la roca con los estudios geológicos. El modelo del basamento rocoso se obtuvo a través del Software Surfer 8.0.

A partir de los resultados de la extrapolación, se procedió a solapar los mapas correspondientes a terreno y roca restringiendo la cota superior a la cota del terreno y la cota inferior a la cota del tope rocoso. Para ello se hizo uso del programa LROCA.bas elaborado por el profesor Luis Mora del CIDIAT, el cual permite realizar esta operación automáticamente (ver Apéndice A)

Se debe destacar que mediante éste programa se logró restringir la cota máxima de la base rocosa a 700 m ó la cota de terreno, lo que ocurriese primero (ver Apéndice D, Figura D.11)

Estos dos modelos fueron introducidos en MODFLOW 3.0, para comenzar a generar el modelo del acuífero.



Figura 4.3 Tope y base del modelo del acuífero

4.2 CORRELACIÓN DEL MATERIAL ACUÍFERO

El modelo se discretizó en doce capas, obtenidas mediante un minucioso estudio litológico de los pozos existentes. Para el estudio de la litología de las capas se recurrió a una minuciosa revisión de un total de 42 pozos que aportaron información importante para la correlación de las capas de igual litología.

De acuerdo con la información tomada de estos pozos, se pudieron dividir capas permeables y no permeables, de acuerdo con la descripción presentada en cada pozo, para simplificar un poco el proceso de correlación, ya que la descripción de la litología de los pozos en muchos casos era muy vaga.

Para realizar la correlación, se tomaron cuatro secciones en planta del mapa base (Figura 4.4) y a partir de éstas, se correlacionaron los pozos presentes en dichas secciones, obteniendo posteriormente para cada pozo la cota correspondiente a cada una de las bases de las capas, haciendo la diferencia entre la cota de terreno menos el espesor de material.

Obviamente, el tope de la primera capa corresponde al modelo digital del terreno y la base de la última capa corresponde al modelo del basamento rocoso del acuífero.

De acuerdo a la información litológica suministrada por cada pozo, se establecieron un total de doce capas, alternándose como no permeables (arcillas, arcillas arenosas, limos) y permeables (arenas y gravas), haciendo esta simplificación debido a la escasa descripción litológica que presentaban estos pozos. Sin embargo, es importante resaltar que sí se tomó en cuenta la variabilidad del material para el modelo, ya que al asignar la propiedad de la permeabilidad ésta se asignó por regiones de acuerdo a un mapa de permeabilidades que se construyó.

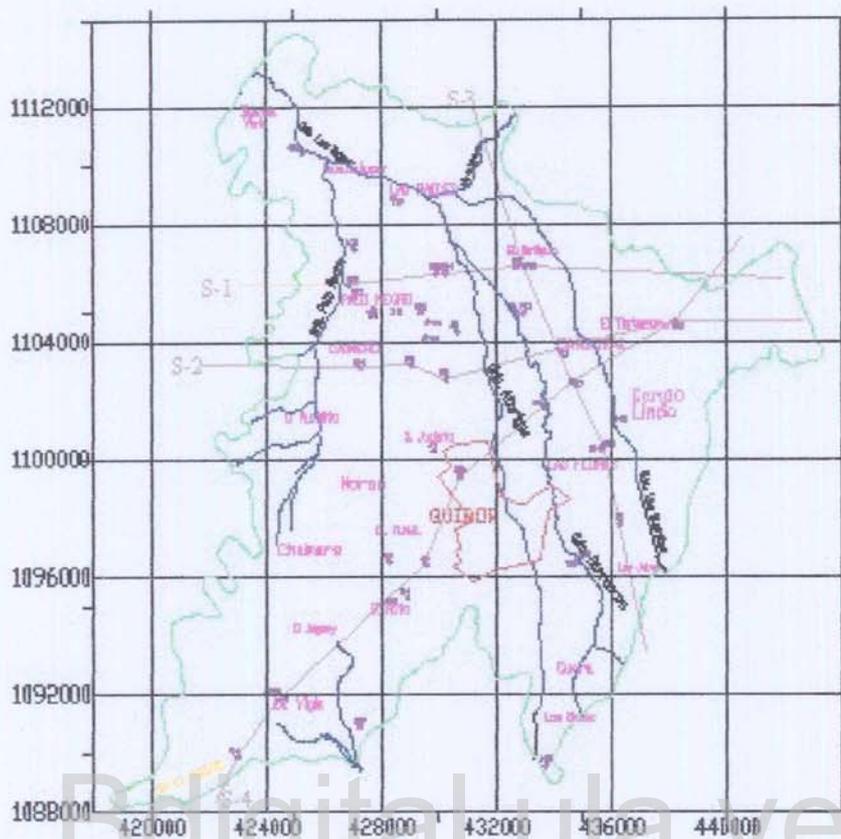


Figura 4.4. Secciones para las correlaciones: S-1, S-2, S-3 y S-4 en el mapa base.

Las capas impermeables fueron consideradas arcillas con valores de conductividad hidráulica de 1×10^{-6} m/s.

Las capas permeables, en cambio, fueron consideradas con diferentes valores de la permeabilidad de acuerdo a la zona y obtenidas mediante el mapa de conductividad hidráulica, que más adelante se explicará detalladamente.

Las secciones estratigráficas, pueden observarse en el Apéndice B.

Luego de realizar la correlación, se establecieron espesores entre capas en cada uno de los pozos con litología, con esta información se crearon las bases de cada una de las capas, haciendo diferencia entre el tope y la base de cada una de las capas. En algunas zonas, la litología indica la presencia de lentes gruesos de material tanto permeable como no permeable, existiendo discontinuidades en las capas. Modflow 3.0, no permite estas discontinuidades, por lo que se debe colocar un espesor mínimo de 1 m en aquellos lugares en los cuales dichas capas desaparezcan. (Ver Apéndice C)

Para introducir estas capas en el modelo, fue necesario generar un mapa con la

información aportada por los pozos. Para ello se hizo uso del software SURFER 8.0, y el método de interpolación de kriging, para los cuales se generaron los variogramas correspondientes a cada una de las capas, las cuales fueron importadas posteriormente como las bases de cada una de las capas en el programa VISUAL MODFLOW 3.0.

En la Figura 4.5, se presentan los variogramas obtenidos para cada una de las capas, utilizados para la elaboración de dichas superficies por el método de Kriging.

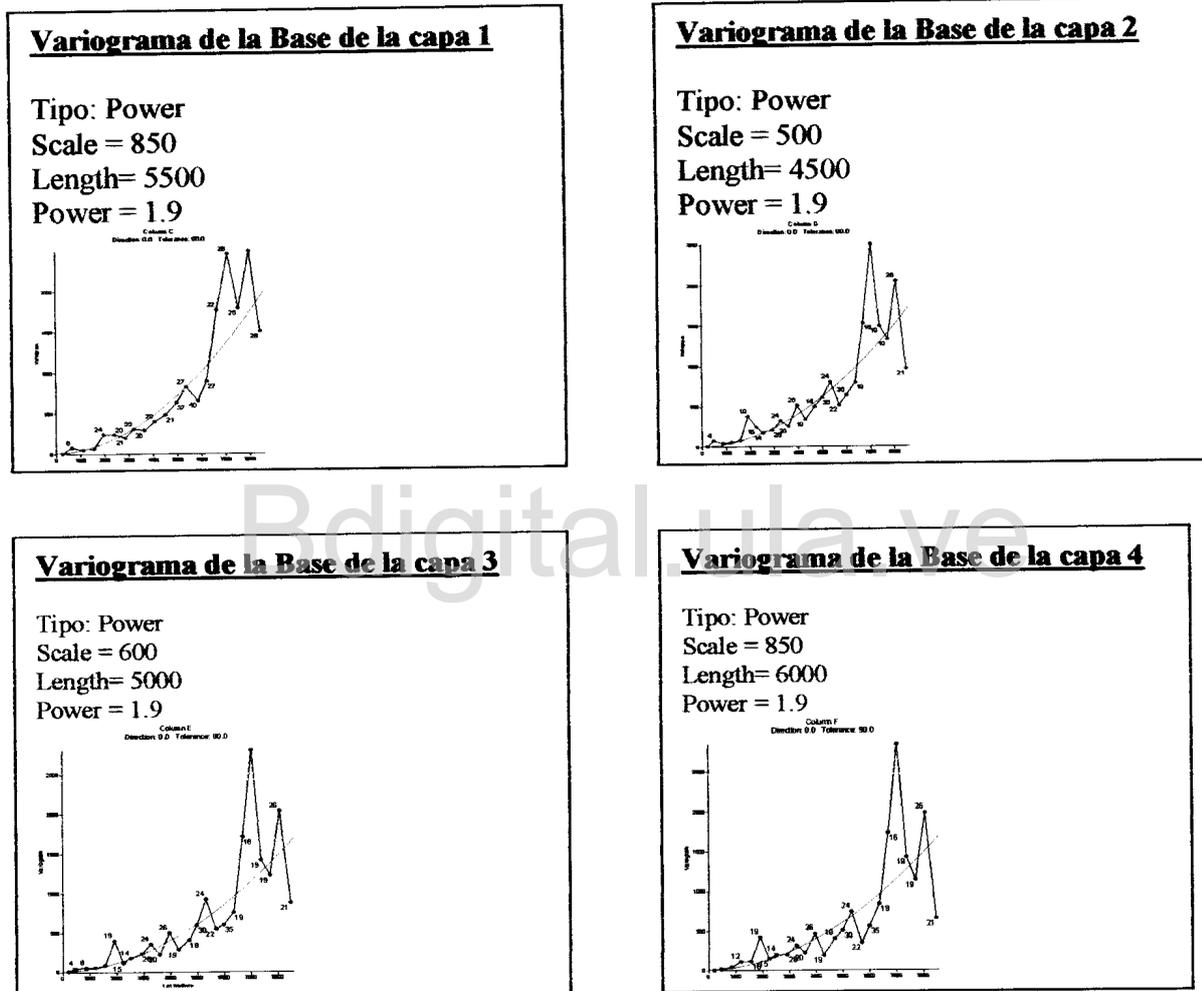
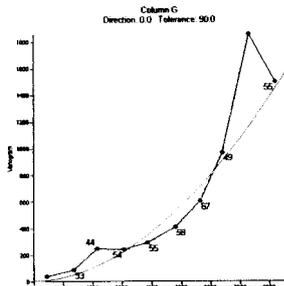


Figura 4.5 Variogramas para la obtención de las bases de las capas del modelo del acuífero

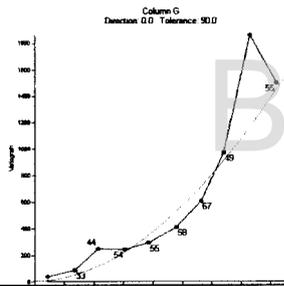
Variograma de la Base de la capa 5

Tipo: Power
Scale = 800
Length= 6000
Power = 1.9



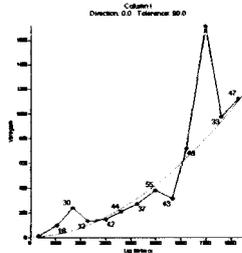
Variograma de la Base de la capa 5

Tipo: Power
Scale = 800
Length= 6000
Power = 1.9



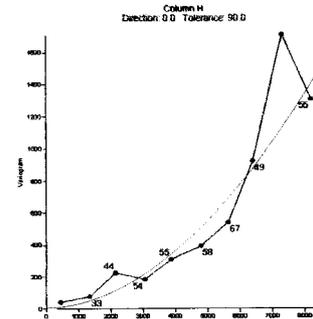
Variograma de la Base de la capa 7

Tipo: Power
Scale = 800
Length= 7000
Power = 1.9



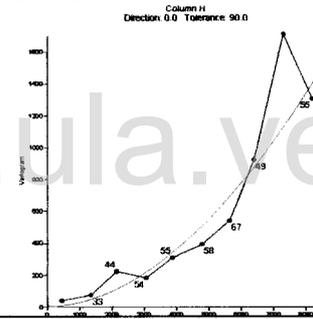
Variograma de la Base de la capa 6

Tipo: Power
Scale = 900
Length= 6500
Power = 1.9



Variograma de la Base de la capa 6

Tipo: Power
Scale = 900
Length= 6500
Power = 1.9



Variograma de la Base de la capa 8

Tipo: Power
Scale = 500
Length= 5000
Power = 1.8
Efecto pepita
Error varianza =160

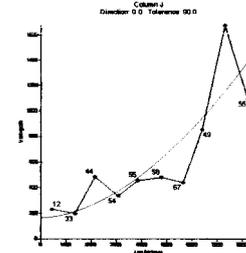


Figura 4.5 Continuación.

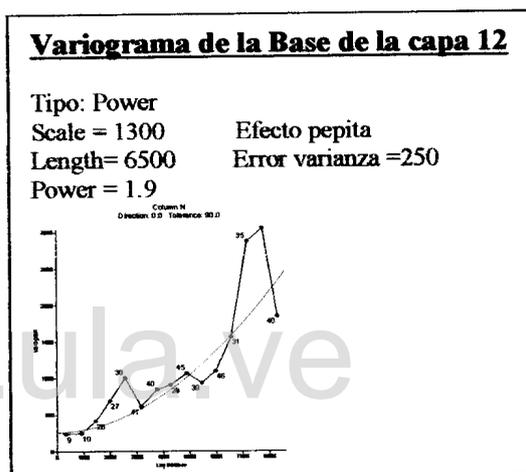
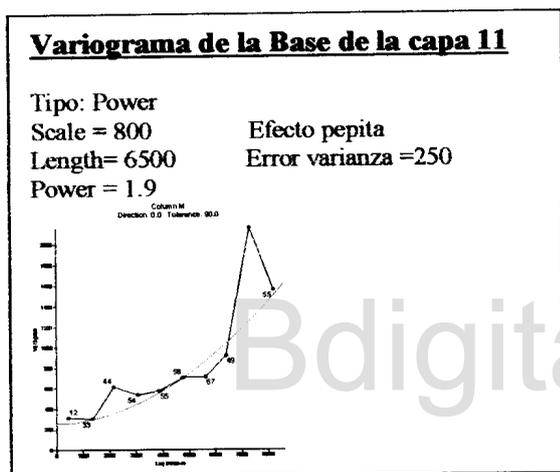
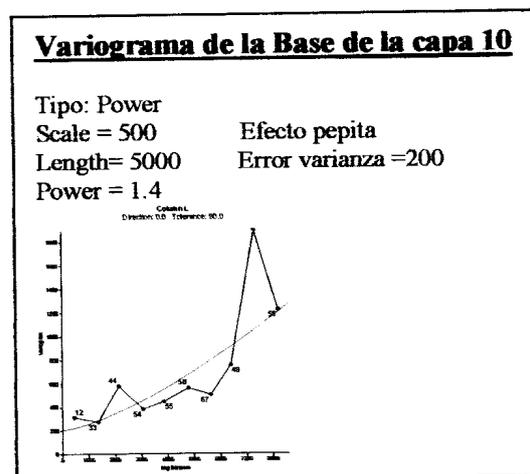
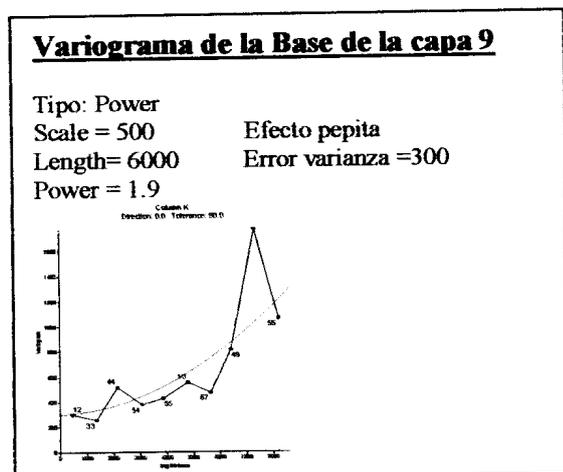


Figura 4.5 Continuación.

Posterior a la elaboración de los mapas en formato *.grd de cada una de las capas, se introdujeron en el programa VISUAL MODFLOW, quedando así establecidas las doce capas que componen transversalmente el modelo del acuífero. (ver Apéndice D).

Las figuras 4.6 y 4.7, muestran la discretización transversal del acuífero y la intercalación entre capas permeables (oscuras) y no permeables (claras)

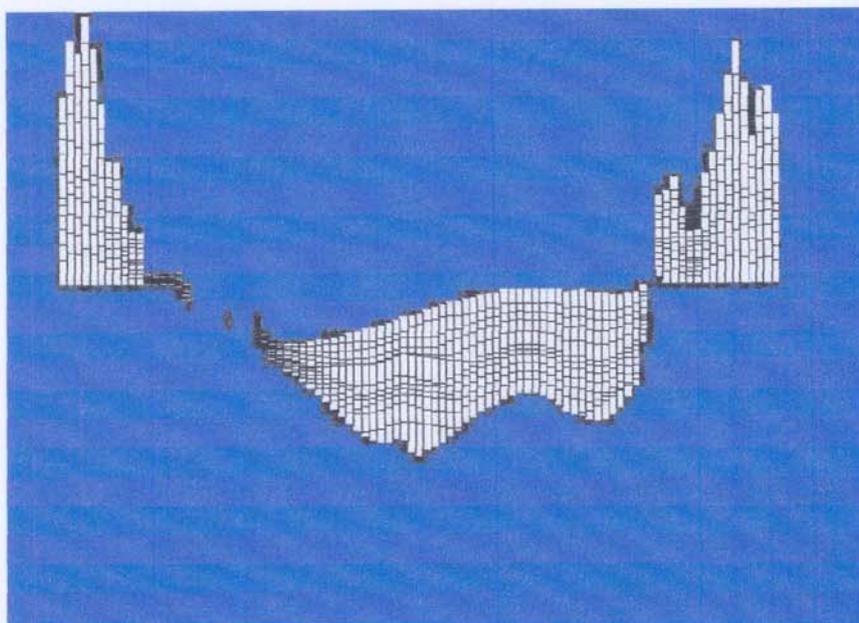


Figura 4.6 Capas del modelo del acuífero



Figura 4.7 Capas permeables y no permeables del modelo del acuífero

4.3 ASIGNACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ACUÍFERO EN EL MODELO

4.3.1 Conductividad Hidráulica (K_x , K_y y K_z)

Para asignar la permeabilidad del acuífero, se ha realizado un mapa de transmisividades, obtenido de las diferentes pruebas de bombeo realizadas en los pozos ubicados dentro de la zona de estudio. Este mapa de transmisividades se realizó en el CIDIAT con la colaboración del profesor Luis Mora, para un estudio preliminar de este proyecto. El mapa presentado sólo representaba la zona central del acuífero, ya que las pruebas de bombeo sólo han sido realizadas en los pozos ubicados en este sector, por esta razón se hace necesario extrapolar la información a toda la extensión de la zona de estudio.

La permeabilidad se consiguió de dividir este mapa de transmisividad (Figura 4.8) entre el espesor permeable saturado promedio para la zona, obtenido a través de las campañas de medición realizadas para los años 2001 y 2002, mostrado en la figura 4.9 y 4.10 (ver Apéndice E).

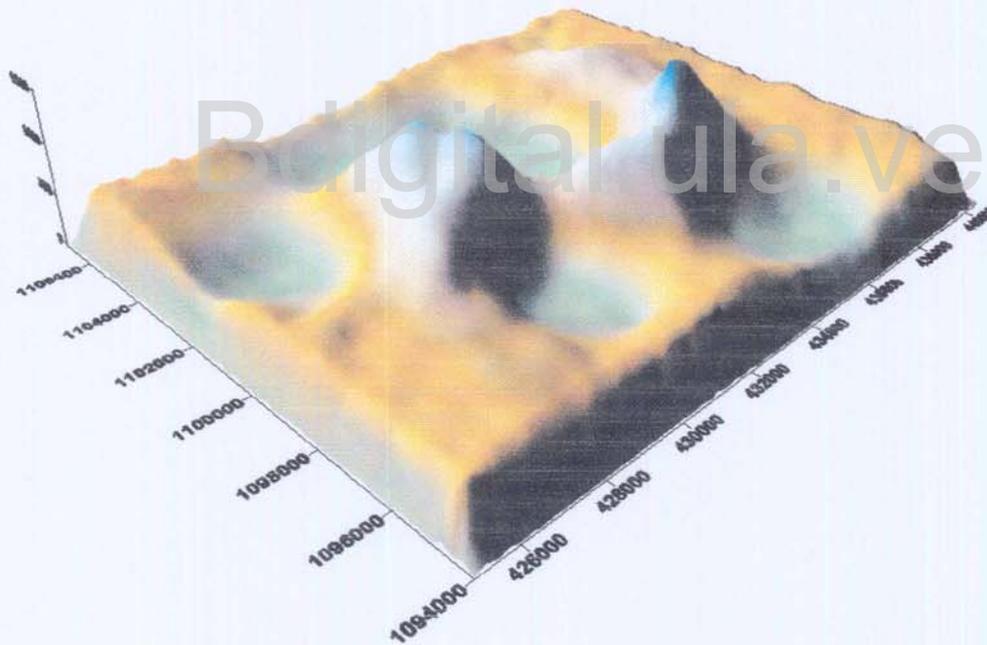


Figura 4.8 Mapa de transmisividad para la zona central del Valle de Quibor

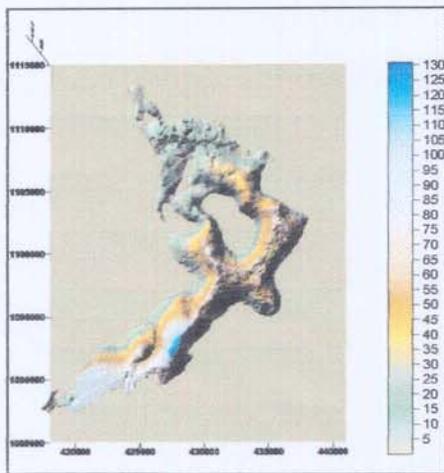


Figura 4.9 Espesor saturado promedio 2001

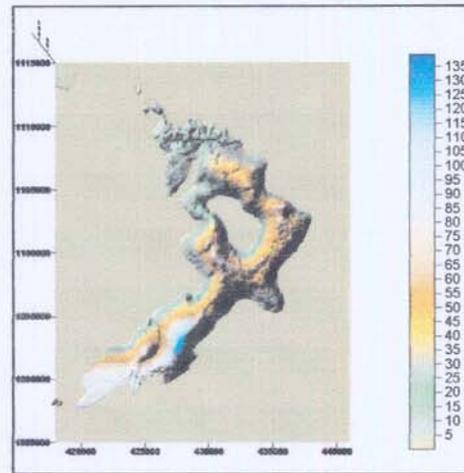


Figura 4.10 Espesor saturado promedio Año 2002

Al completar esta información y procesarla, para los niveles estáticos, se obtuvo el mapa de permeabilidades correspondiente a aquellas capas consideradas como permeables (Figura 4.12). El método de interpolación utilizado para la obtención de este mapa fue el del Vecino Natural (*Natural neighbor*)

Este procedimiento lo realiza automáticamente VISUAL MODFLOW 3.0 en el módulo de propiedades de asignación de datos de entrada al modelo. Las permeabilidades se presentaron de manera discreta para toda la zona, dividida en clases de la siguiente manera:

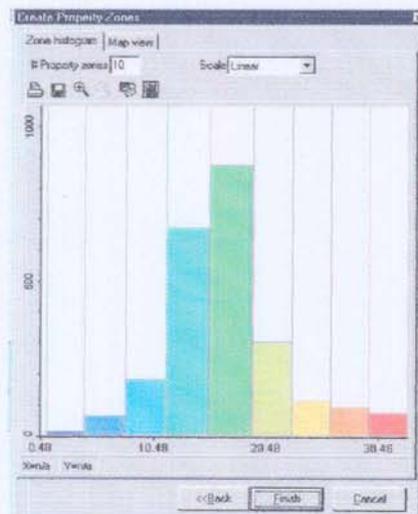


Figura 4.11 Distribución de la conductividad por zonas en (m/d)

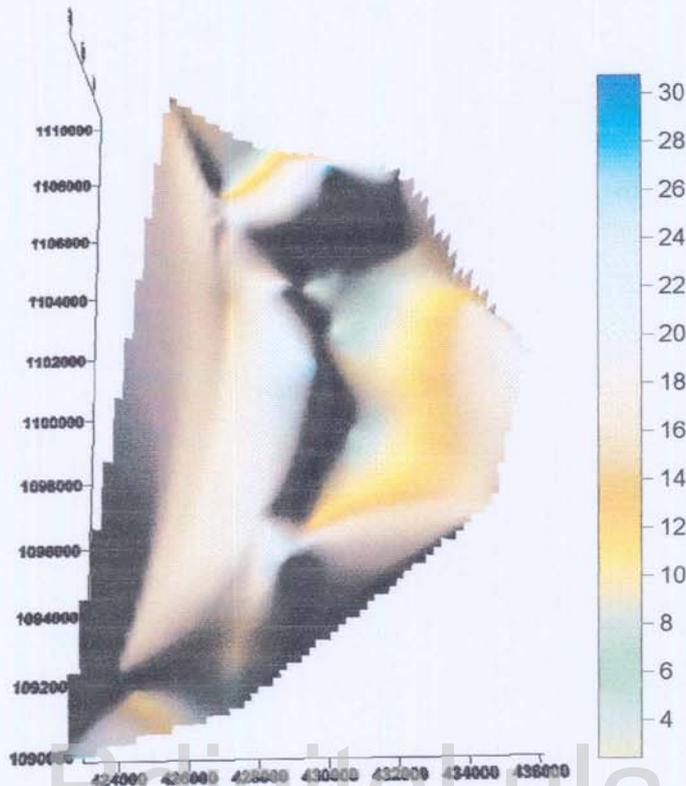


Figura 4.12 Mapa de conductividad hidráulica

Los valores μ_e de permeabilidad mostrados anteriormente, se encuentran en m/d. Sin embargo, es necesario cambiar esta unidad a m/s, ya que son las unidades en que se está trabajando el modelo. De esta manera quedan discretizadas las zonas con diferentes valores de permeabilidad. Se debe resaltar que la zona 1 corresponde a aquellas capas que se consideraron no permeables.

La permeabilidad se consideró igual en x y y (horizontalmente), y menor en sentido vertical, a razón de $K_x/K_z = 10$; esto es debido a que la depositación del material se hace en sentido vertical, y este material se va consolidando a medida que transcurre el tiempo, por lo que los espacios vacíos presentes entre los granos van disminuyendo y por ende, disminuye la permeabilidad, mientras en las direcciones horizontales ésta permanece igual.

Tabla 4.1 Distribución de la conductividad por zonas

	Zona	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
	1	1E-10	1E-10	1E-11
	2	3.2E-5	3.2E-5	3.2E-6
	3	7.3E-5	7.3E-5	7.3E-6
	4	0.00011	0.00011	0.000011
	5	0.00015	0.00015	0.000015
	6	0.00019	0.00019	0.000019
	7	0.00024	0.00024	0.000024
	8	0.00028	0.00028	0.000028
	9	0.00032	0.00032	0.000032
	10	0.00036	0.00036	0.000036

Estas permeabilidades fueron asignadas al modelo en las capas permeables (Figura 4.13), ya que en las capas no permeables, esta propiedad correspondía directamente con la zona 1.

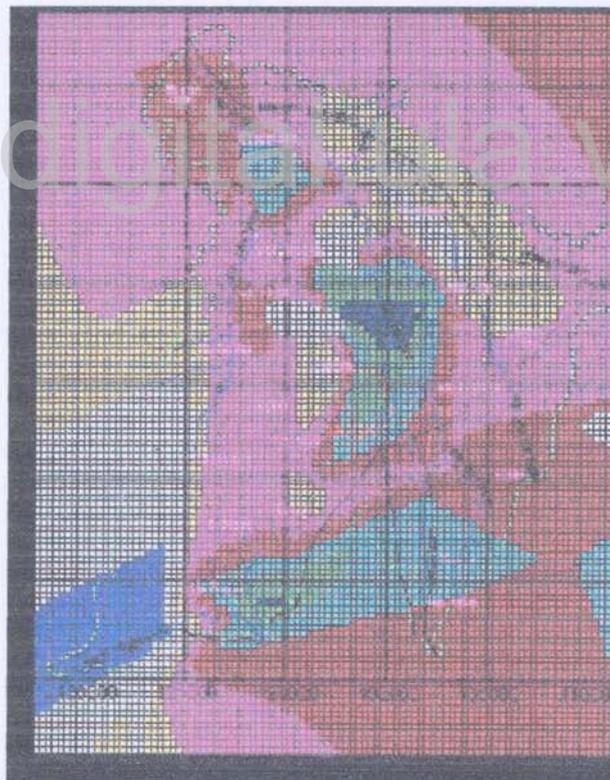


Figura 4.13 Conductividad asignada a las capas permeables del modelo.

VISUAL MODFLOW 3.0, no permite discontinuidades entre las capas, por lo que los lentes de material presentes en el acuífero no podían ser presentadas tal y como se propone en el modelo, por ésta razón, se debió proceder a asignar manualmente a cada una de las filas y columnas de todas las capas aquella propiedad de conductividad que mejor representara el modelo del acuífero (Figuras 4.14 y 4.15).

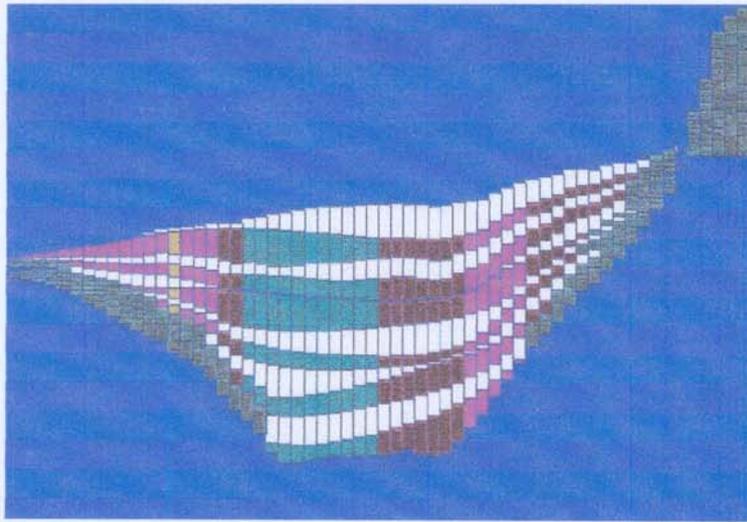


Figura 4.14 Sección con conductividades hidráulicas distribuidas en capas alternas

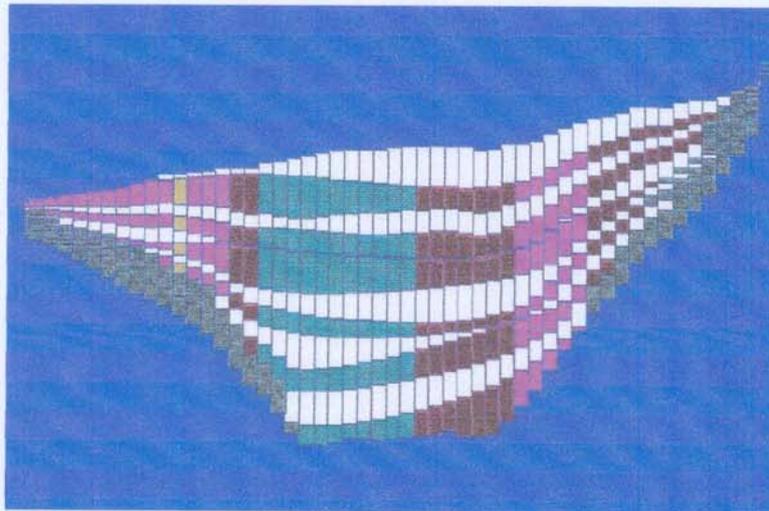


Figura 4.15 Sección con conductividades hidráulicas distribuidas en todas las capas.

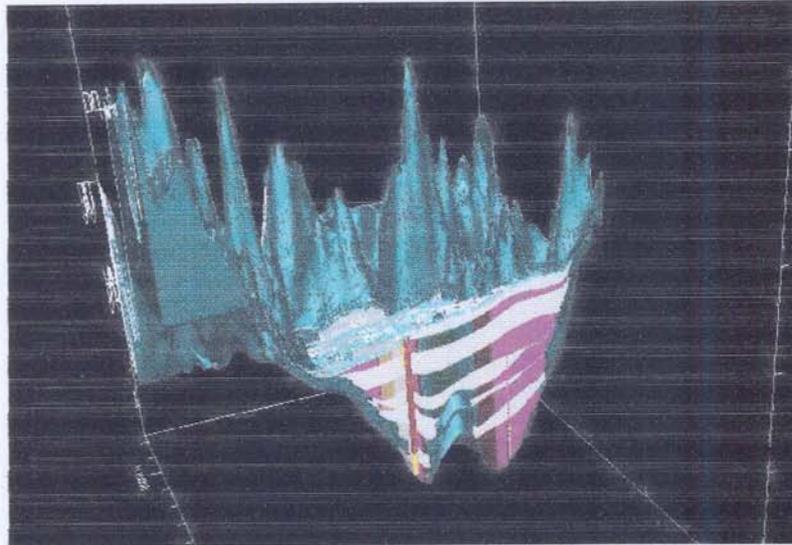


Figura 4.16 Pozos de bombeo. Alternancia de capas con la conductividad asignada.

4.3.2 Almacenamiento (Ss, Sy, Peff, Ptot)

Los valores de almacenamiento corresponden al almacenamiento específico (Ss), Rendimiento específico (Sy), Porosidad efectiva (Peff) y Porosidad total (Ptot). Estos valores se asignaron constantes en toda el área de estudio, ya que no se contaba con data suficiente como para asignarlos de manera distribuida.

Los diferentes coeficientes de almacenamiento se obtienen a partir de pruebas de bombeo a caudal constante realizadas en un acuífero. De los diferentes estudios presentados por Carrasco (1982), Alvarado (1989), Torres(1993) para el acuífero del valle de Quíbor se estima que el coeficiente de almacenamiento se encuentra entre 0,01 y 0,09 con un promedio de 0,06; valores que son característicos de un acuífero libre (Aprosel, 2000)

La producción específica o rendimiento específico (Sy) es análoga a la porosidad efectiva o drenable del acuífero (Peff), cuyo valor se estimó como constante para toda el área e igual a 0.06, similar al coeficiente de almacenamiento, ya que el material que conforma el acuífero está compuesto de arenas y gravas arenosas principalmente.

De acuerdo a los estudios realizados por Aguilera y Padilla, 1963, citado por Alvarado (1989), los valores de coeficiente de almacenamiento del acuífero en la parte central son del orden de 6×10^{-4} , tomados de algunas pruebas de bombeo consideradas. Es importante remarcar que los acuíferos bajo presión (confinados), pueden cambiar a libres por efecto del descenso de niveles ocasionado por el bombeo prolongado e intensivo. Para la presente investigación se estimó un valor promedio del coeficiente de almacenamiento de 1×10^{-4} para aquellas zonas de comportamiento confinado, ya que no se cuentan con pruebas de bombeo actualizadas que permitan una mejor aproximación de este valor.

Para obtener el almacenamiento específico, basta dividir el coeficiente de almacenamiento tomado de los estudios anteriores y dividirlo entre el espesor saturado de acuífero. El espesor saturado promedio de acuífero se estimó en 24 m, que es el valor más común en toda la extensión de acuífero. Para estos valores el almacenamiento específico promedio para toda el área se estimó en 0.00001 1/m. (Ver Apéndice E)

La porosidad total (P_{tot}), se estimó al igual que los demás parámetros, constante para *toda el volumen acuífero, con un valor promedio de 0.20*, correspondiente a arenas gruesas y gravas.

4.4 CONDICIONES DE FRONTERA

Una vez sustituido el acuífero por la malla y acorde con la información disponible, se establecen las condiciones de frontera que se presentan a continuación:

4.4.1 Celdas inactivas o de flujo nulo

Son aquellas capas en las cuales el material que conforma la litología corresponde a roca. En este caso se procedió, mediante el programa Surfer 8.0, a sobreponer cada una de las capas con el tope de roca, blanqueando aquellas zonas en las que el tope de roca estuviese por encima, para luego proceder a inactivar dichas zonas en el Modflow 3.0 (Ver Apéndice D).

Se debe destacar que, posteriormente, se inactivaron también aquellas zonas que presentaban discontinuidades en el acuífero, ya que eran causantes de error.

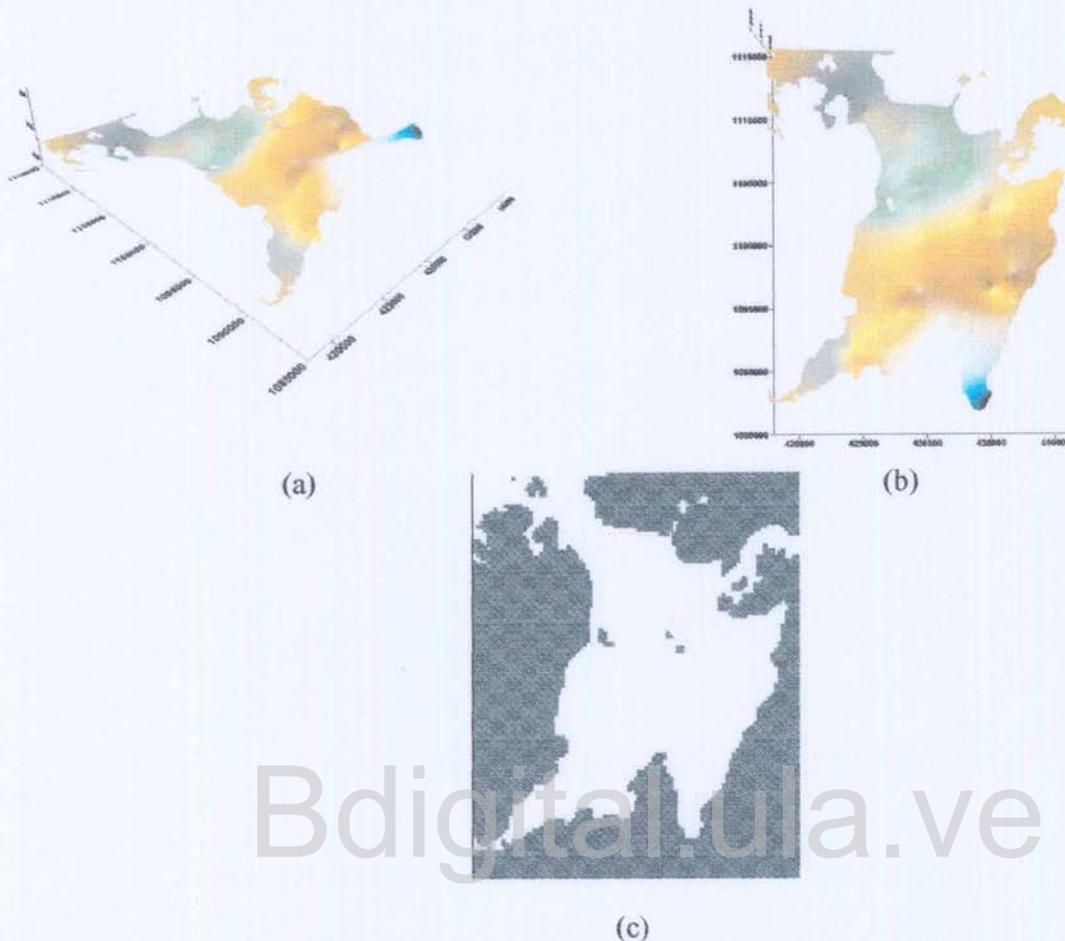


Figura 4.17 Base Capa 1. (a) y (b) Base de la capa 1, blanqueada en los sectores de cota superior a los niveles del terreno. (c) Celdas activas (claras) e inactivadas (oscuras) en el modelo.

4.4.2 Zonas de recarga

La recarga del acuífero se dividió en dos:

- **Recarga Natural**

En el acuífero del Valle de Quíbor, la recarga por infiltración directa o percolación es muy escasa, por lo que en la zona de estudio no se consideró esta recarga, sin embargo la recarga debida a flujo subterráneo afluente es considerable, por lo que se establecieron dos zonas de posible recarga a través de los ríos: Las Guardias y Atarigua, hacia la parte sureste de la zona de estudio, ya que presenta cotas de mayor elevación, lo que contribuye a la recarga por gravedad; esta zona representa la correspondiente a la subcuenca I, sin embargo, éste modelo de simulación representa una disposición continua de la recarga, por lo que la

subcuenca II, se acumula con la proveniente de la subcuenca I. Dada esta situación se consideró la recarga de la subcuenca II como la total en el sistema acuífero. Esta recarga se consideró sólo para los meses de estudio, es decir, los meses desde mayo 01 hasta octubre 02, asumiendo como válidas las mismas recargas consideradas en el año 2001 para el año 2002, ya que no se contaba con esta información; así mismo sólo se tomó en cuenta la recarga proveniente del flujo subterráneo afluente, ya que las aportaciones por percolación son muy pocas.

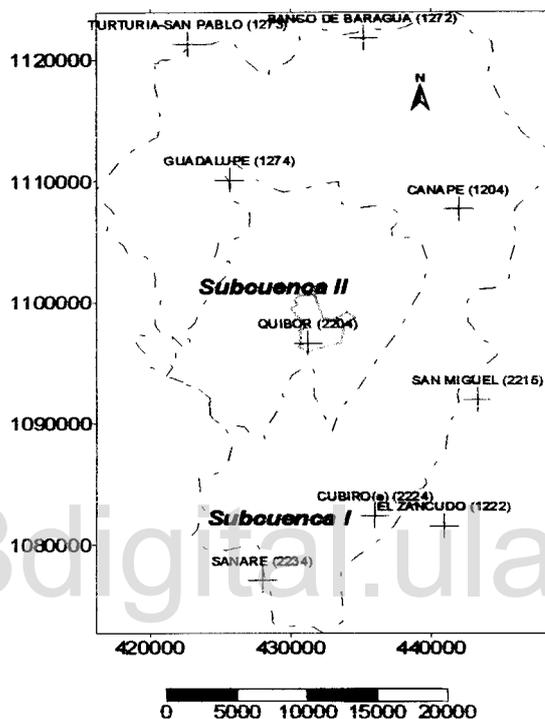


Figura 4.18 Discretización de la cuenca del acuífero valle de Quibor (Aprosela, 2000)

La subcuenca #1 (I) conforma la zona exterior del valle de Quibor; va de la Zona montañosa situada al Sur (Cuenca de las Quebradas Botucal, Atarigua y Las Guardias) hasta la zona Norte (en la cuenca de la quebrada Baragua) y en el Oeste del valle con la Quebrada Palo Negro; esta subcuenca tiene una extensión de 730 Km². La subcuenca Nro 2 (II) conforma la zona del Valle de Quibor, en cuyo centro se desarrolla el acuífero, posee una extensión de 243 km². La extensión total del sistema considerado es de 973 Km². (Aprosela, 2000)

La recarga en las subcuencas se obtuvo gracias a un modelo de simulación lineal de correlación lluvia-recarga, a través de la utilización del modelo Lluvia-Escorrentía (SIHIM-CARORAM). El modelo a obtener se expresará como se indica en la Ecuación 5.1 o 5.2; lo que implica buscar una correlación lineal entre la lluvia media anual y la recarga para un año determinado. (Aprosela, 2000).

$$\text{Recarga(MM3)} = P_a \text{ Estación (1)} * X1 + P_a \text{ Estación (2)} * X2 + \dots + P_a \text{ Estación (i)} * Xi + Ctte \quad (4.1)$$

Ó

$$\text{Recarga(l/s)} = P_a \text{ Estación(1)} * X1 + P_a \text{ Estación(2)} * X2 + \dots + P_a \text{ Estación(i)} * Xi + Ctte \quad (4.2)$$

Donde:

Recarga (MM3): Es la recarga anual expresada en millones de metros cúbicos

Recarga (l/s) : es la recarga expresada en litros por segundo

Pa Estación(i): es la precipitación anual en mm para la estación (i)

X1, X2, X3, ... Xi: Son los respectivos coeficientes para las estaciones(i) provenientes del análisis de correlación lineal

Ctte. : Es la constante proveniente del análisis de correlación lineal

Para simular esta recarga, se colocaron pozos de recarga ubicados en estas zonas, que aportan un caudal (positivo) igual al flujo subterráneo afluente correspondiente al año 2001-2002, para los meses de Mayo a Octubre, tomados del resultado de la simulación lluvia-escorrentía divididos de la siguiente manera:

La recarga se dividió, tal como se muestra en la Tabla 4.2, en un porcentaje de ella (30%) para la Quebrada Atarigua, con un total de cuatro pozos que aportan la misma cantidad de caudal y otro 70 %, con un total de tres pozos que aportan la misma cantidad de caudal para la Quebrada Las Guardias. Se debe señalar que la recarga introducida en la Quebrada Acarigua se produjo en las capas superficiales, mientras que la producida en la Quebrada Las Guardias fue en las capas un poco más profundas, todo ello de acuerdo con los resultados obtenidos de un estudio isotópico realizado en la zona, que evidencia el comportamiento de la recarga natural en el acuífero.

Tabla 4.2 Recarga natural propuesta en el modelo del acuífero

SUBCUENCA NO 2

FLUJO SUBTERRÁNEO
AFLUENTE

AÑO	MES	F.S.E TOTAL (MM3)	F.S.E TOTAL (M3)/d	30%	70% Las	RECARGA QDA LAS GUARDIAS (M3/d)	RECARGA QDA LAS GUARDIAS C/P (M3/d)
				Atarigua	Guardia		
				RECARGA QDA ATARIGUA (M3/d)	RECARGA QDA ATARIGUA C/P (M3/d)		
AÑO 2001	MAYO	0.28	9032.26	2709.68	677.42	6322.58	2107.53
	JUNIO	0.19	6333.33	1900.00	475.00	4433.33	1477.78
	JULIO	0.13	4193.55	1258.06	314.52	2935.48	978.49
	AGOSTO	0.09	2903.23	870.97	217.74	2032.26	677.42
	SEPTIEMBRE	0.07	2333.33	700.00	175.00	1633.33	544.44
	OCTUBRE	0.53	17096.77	5129.03	1282.26	11967.74	3989.25
	NOVIEMBRE	1.38	44516.13	13354.84	3338.71	31161.29	10387.10
	DICIEMBRE	4.17	134516.13	40354.84	10088.71	94161.29	31387.10
AÑO 2001	ENERO	1.22	39354.84	11806.45	2951.61	27548.39	9182.80
	FEBRERO	0.87	28064.52	8419.35	2104.84	19645.16	6548.39
	MARZO	0.61	19677.42	5903.23	1475.81	13774.19	4591.40
	ABRIL	0.42	13548.39	4064.52	1016.13	9483.87	3161.29
	MAYO	0.28	9032.26	2709.68	677.42	6322.58	2107.53
	JUNIO	0.19	6129.03	1838.71	459.68	4290.32	1430.11
	JULIO	0.13	4193.55	1258.06	314.52	2935.48	978.49
	AGOSTO	0.09	2903.23	870.97	217.74	2032.26	677.42
	SEPTIEMBRE	0.07	2258.06	677.42	169.35	1580.65	526.88
	OCTUBRE	0.53	17096.77	5129.03	1282.26	11967.74	3989.25
	TOTAL	11.25	363182.80	108954.84	27238.71	254227.96	84742.65

• **Recarga Artificial**

La recarga artificial provendría del túnel de trasvase de la presa Yacambú, que comunicará esta zona con el Valle de Quibor, de esta manera se espera recibir por el portal de salida este flujo de agua que será recargada al acuífero a través de pozos que permitan una recarga a profundidad (Figura 4.19). Los valores del caudal de salida por el portal se estiman en 27.5 MM3, que se recargarán a través de 30 pozos de inyección con un caudal de 30L/s, cada uno, a fin de garantizar la inyección total del volumen de agua, simulando luego esta entrada de agua a diferentes profundidades, diferentes ubicaciones y con diferentes condiciones de bombeo.

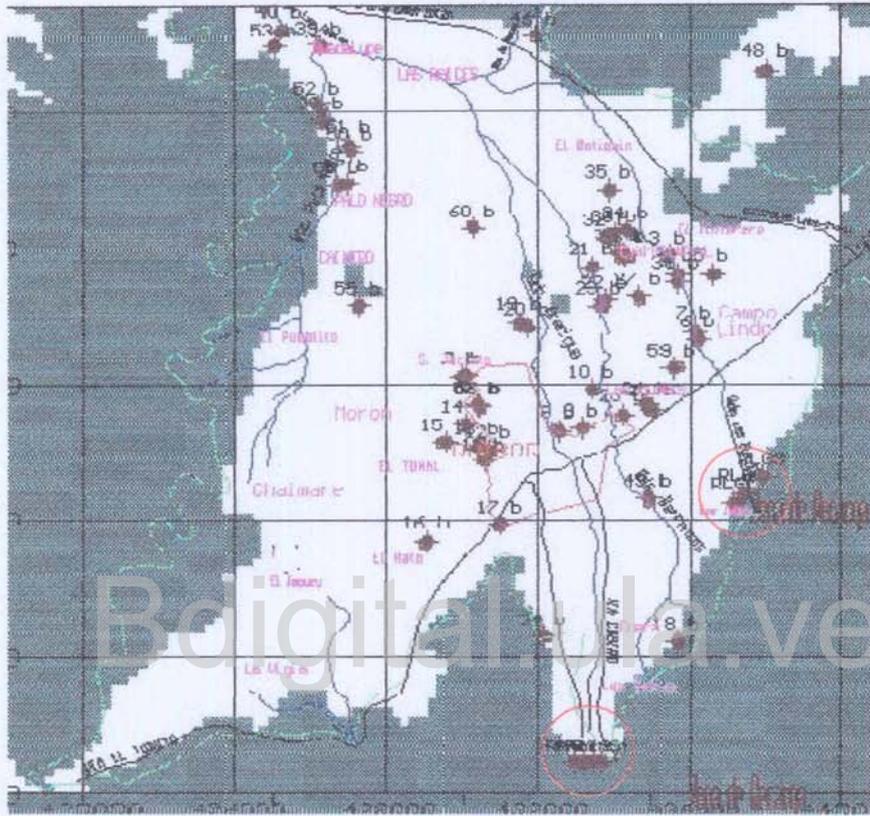


Figura 4.19. Ubicación de las zonas de Recarga natural

4.5 ESTADO INICIAL DEL ACUÍFERO

Los niveles observados para todos los nodos corresponden a los registros históricos observados para la fecha del inventario, efectuado para el año 2001- 2002, más específicamente para los meses de Mayo a Octubre, estos niveles, tal como se muestra en la Figura 4.20, se introdujeron en el modelo en las coordenadas correspondientes a la ubicación de los pozos comunes para los tres monitoreos (Ver Apéndice F)

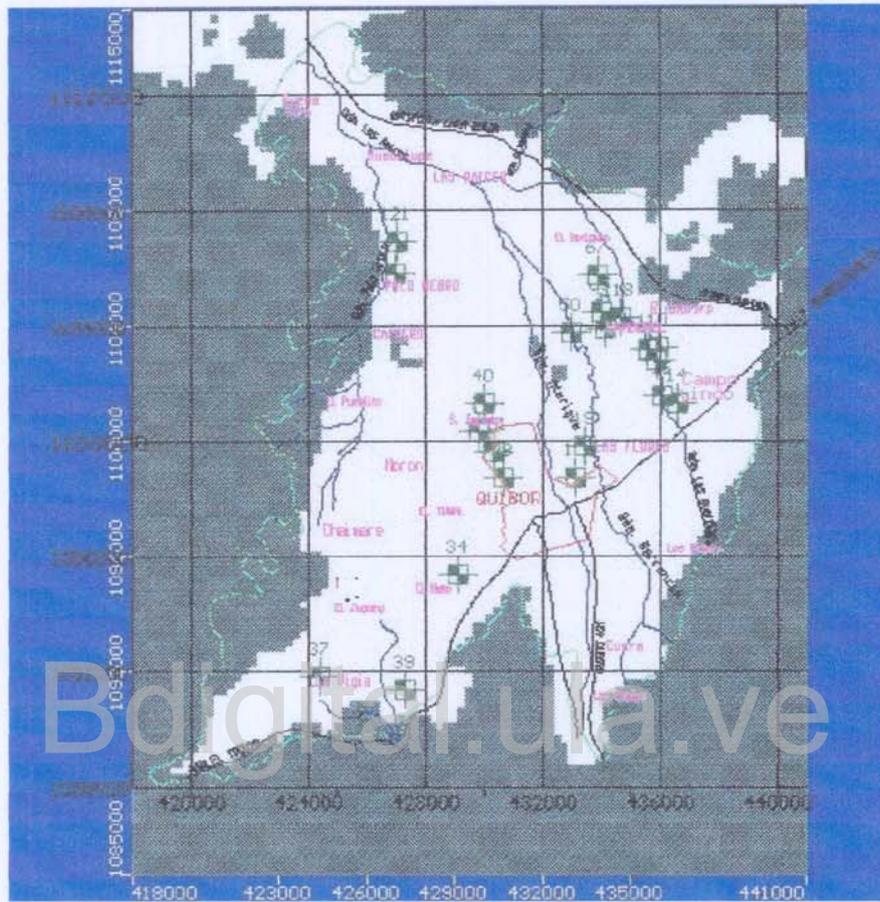


Figura 4.20. Pozos de Observación de los niveles de agua

4.5.1 Flujo impuesto

Se ha considerado un flujo de descarga que se produce como efecto de la explotación del acuífero mediante los pozos ubicados en la zona central del valle (Figura 4.21), cuyo caudal total asciende a 71877.02 m³/d para Mayo del año 2001, 65128.32 m³/d para octubre del mismo año y 73105.63 m³/d para Octubre del 2002. (Ver Apéndice F)

variograma:

Tipo: Power
Scale = 300
Length= 5000
Power = 1.7

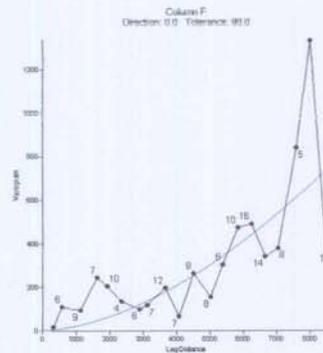


Figura 4.22 Variograma de los datos de niveles iniciales

Con éste variograma resultó la superficie siguiente:

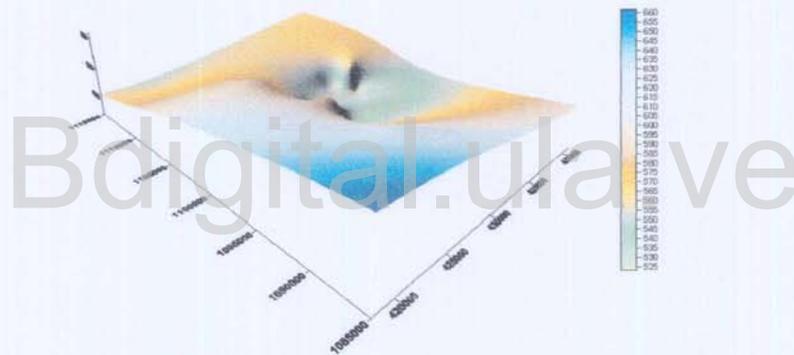


Figura 4.23 Niveles estáticos iniciales

Este archivo se introduce en el software VISUAL MODFLOW 3.0, como archivos *.grd.

CAPITULO 5

RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO

La recarga artificial de un acuífero se refiere a todas aquellas intervenciones directas o indirectas en el ciclo natural del agua, que incrementan sus reservas para mejorar la explotación del recurso.

Los métodos de recarga artificial, así como la procedencia del agua a utilizar, son muy variados y dependen de las condiciones de la zona a recargar.

5.1. MÉTODOS DE RECARGA

Existen dos tipos de recarga artificial: recarga inducida y recarga artificial propiamente dicha.

5.1.1 Recarga inducida

La recarga inducida consiste en manipular las condiciones para favorecer una infiltración natural. Puede consistir en preparar las superficies de una forma adecuada, como la creación de terrazas y plantaciones apropiadas; o bien el sobrebombeo en regiones en donde es más favorable la infiltración, para lograr una mayor penetración de agua en el acuífero, así como sobre explotar aquellos pozos cercanos a ríos o lagos que pudieran penetrar fácilmente en el acuífero (Custodio y Llamas, 2001).

5.1.2 Recarga artificial propiamente dicha

Consiste en recargar mediante dispositivos colocados para tal fin. Dentro de estos dispositivos, se pueden distinguir:

- *Sistemas de recarga en superficie*

Consisten en extender el agua buscando una gran superficie de contacto agua – terreno. Es útil en caso de acuíferos libres, sin niveles poco permeables próximos a la superficie. Dentro de los sistemas de recarga en superficie más usuales están los surcos o zanjas, balsas (balsas excavadas en el terreno que almacenan agua), acondicionamiento de cauces y ríos, fosas, etc.

- *Sistemas de recarga en profundidad*

Son esencialmente pozos verticales, aunque también se emplean pozos de drenes radiales y en algunos casos galerías de filtración. A través de un pozo vertical se pueden recargar todas las capas que se desee. Esta recarga exige que el agua pueda pasar con cierta facilidad de un nivel a otro y que los niveles de inyección tengan una transmisividad y nivel piezométrico apropiados al agua a recargar y a los caudales previstos.

- **Sistemas mixtos**

Compuestos por elementos de los dos sistemas.

La elección de los métodos también influye en la calidad de las aguas, por lo que son preferibles los métodos de superficie siempre que sea posible, para evitar la contaminación de los acuíferos por el uso de aguas no apropiadas para la recarga.

5.2 RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUÍBOR

Como se sabe, el acuífero del Valle de Quíbor ha sufrido en los últimos 40 años una explotación intensiva del agua subterránea, experimentado un deterioro apreciable de los niveles de agua en los acuíferos, así como la salinización del agua por el deterioro de los suelos debido al uso no controlado de las aguas de riego con relativo contenido de salino y con dificultad para facilitar el lavado de las sales, trayendo como consecuencia una disminución del rendimiento de los pozos y de la calidad del agua.

El Valle de Quíbor tiene la peculiaridad de poseer poca recarga natural por infiltración directa, lo cual es lógico al observar la litología de la zona, en la que se detallan grandes extensiones de terreno que presentan materiales de baja permeabilidad como arcillas (Ver Apéndice B). Así mismo se puede validar esta información en los resultados obtenidos del modelo de simulación lluvia-escorrentía, en el cual los valores de percolación son muy bajos comparados con los de flujo subterráneo efluente. Dada esta situación, se establece como sistema de recarga más conveniente para el Valle de Quíbor un sistema de recarga profundo.

Los sistemas de recarga en profundidad son esencialmente los pozos verticales, aunque presentan algunos inconvenientes como el alto costo de construcción y la necesidad de utilizar agua de mejor calidad para la recarga, a fin de evitar, además de la contaminación del acuífero, la colmatación de la zona filtrante, ya que esta superficie es muy pequeña. El rendimiento de los pozos de recarga es función de la permeabilidad de acuífero y de la colmatación del propio pozo. Bourguet (1971), citado por Custodio y Llamas (2001) muestra en la Figura 5.1 la relación estadística entre una función de la permeabilidad y las dimensiones del pozo y el caudal infiltrado.

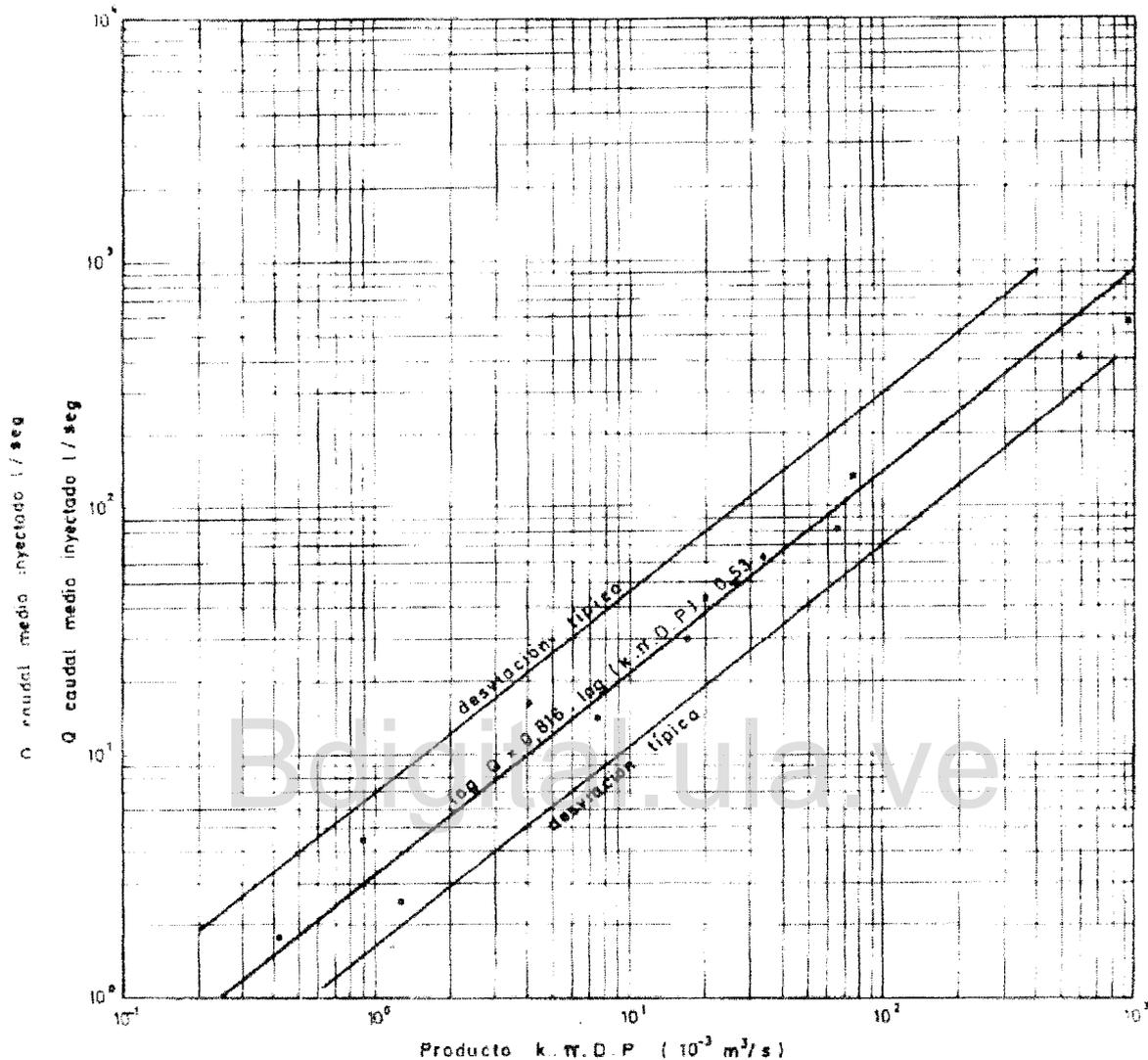


Figura 5.1 Caudal inyectado por pozos en función de las características del pozo. (Según Bourguet, 1971). k = permeabilidad (m/s), D = Diámetro (m), P = Profundidad (m).

El origen del agua destinada para la recarga será proporcionada por el Sistema de Riego Yacambú – Quíbor, mediante las obras físicas (presa y túnel trasvase), que facilitarán dicha dotación; aprovechando así esta gran obra hidráulica que almacenará en un embalse las aguas provenientes de río Yacambú y las conducirá hasta el Valle de Quíbor mediante el túnel de trasvase que comunicará ambas regiones. Por esta razón, la batería de pozos que se establecerá en el valle de Quíbor destinada a la recarga del acuífero debe estar instalada en las proximidades del portal de salida, ubicado es la zona sur-oeste del valle (Figura 5.2).

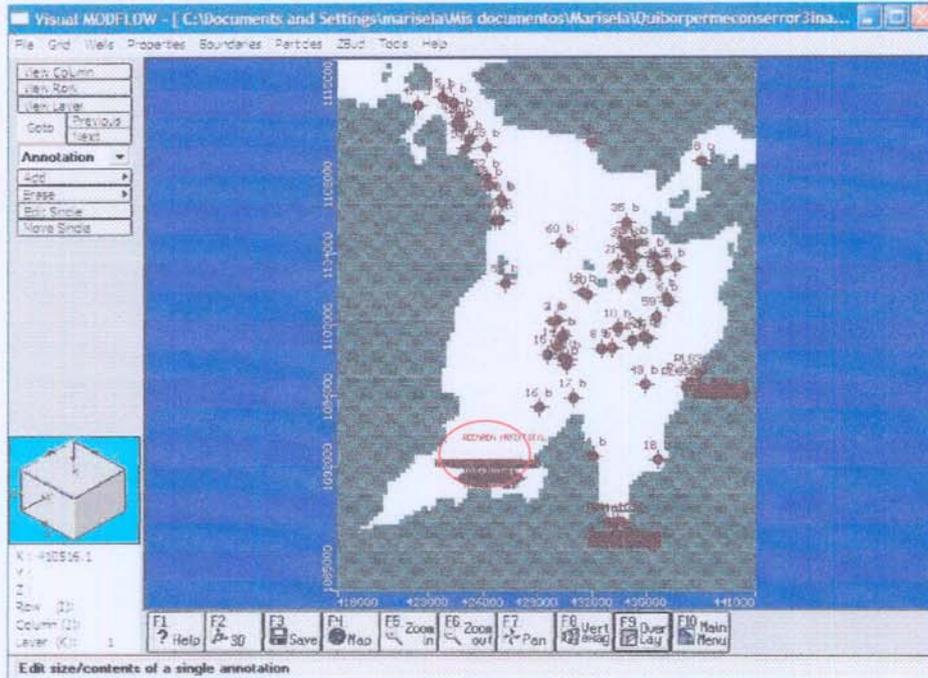


Figura 5.2 Ubicación del portal de salida.

El Caudal disponible en el portal de salida, se estima en 27.5 MM³/año.

Para representar la recarga artificial se consideraron un total de 30 pozos de inyección con diferentes alternativas:

- Ubicados a lo largo de una franja localizada en las adyacencias del portal de salida
 - Pozos de inyección en capas someras (capa 2)
 - Pozos de inyección en capas profundas (capa 6)
- Ubicados a lo largo de una franja localizada en las adyacencias del portal de salida y en las cercanías de la quebrada Las Guardias
 - Pozos de inyección en capas someras (capa 2)
 - Pozos de inyección en capas profundas (capa 6)

En ambos casos se estudió el comportamiento del acuífero con todos los pozos encendidos y otro escenario con todos los pozos apagados.

Los caudales estimados en cada uno de los pozos se aproxima a 30 L/s (2592 m³/d). Este valor se considera así debido a que los pozos del acuífero, en general, no bombean un

caudal mayor que éste, por lo que no son capaces de inyectar uno superior, evidenciándose esto en las corridas de las simulaciones.

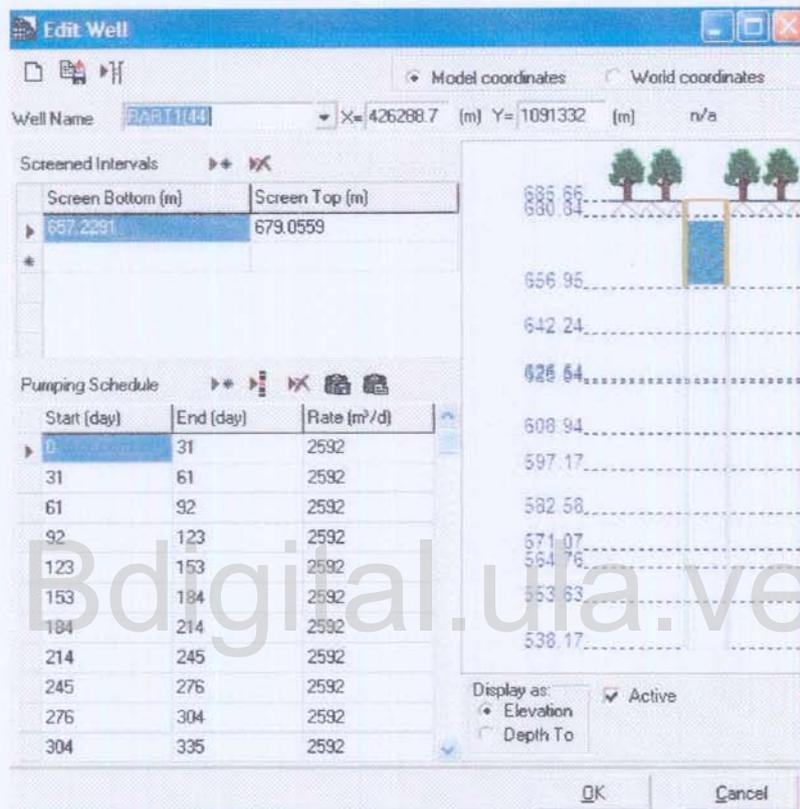


Figura 5.3 Pozo de inyección (Capas someras)

El total inyectado, para un valor de 30 pozos con caudales de 30 L/s (75168 m³/d), correspondiente a un volumen anual de 27,6 millones de m³ (MM3), que se corresponde exactamente con los valores aportados por el túnel de trasvase que conducirá el agua proveniente del río Yacambú hasta el Valle de Quíbor, en otras palabras, un 100 % del caudal disponible en el portal de salida.

CAPITULO 6

COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO

En el comportamiento del acuífero se manejaron dos escenarios a saber:

- Calibración con condiciones de recarga natural
- Simulaciones con condiciones de recarga artificial

La calibración consiste en reproducir las condiciones bajo las cuales se encuentra el acuífero y observar su comportamiento para un período de tiempo.

En el caso estudiado, como se contaban con datos para campañas de monitoreo de Mayo, 2001; Octubre 2001; Octubre 2002; los tiempos para la calibración se estimaron en 0, 184, 549 días respectivamente, para así poder comparar los valores resultantes de la calibración y los observados en las campañas de medición.

6.1 CALIBRACIÓN EN CONDICIONES DE RECARGA NATURAL

La recarga natural se estimó sólo por flujo subterráneo efluente, ya que estudios anteriores, como modelos de simulación lluvia – escorrentía, han demostrado que la percolación en la zona es casi nula (Aprosel, 2001).

Dada esta situación, se estimó la recarga a través del aporte de las subcuencas ubicadas dentro del área de estudio para los años 2001- 2002, ya que esos años corresponden al primer tiempo establecido para la calibración (0 -184 días).

El modelo de simulación de recarga representa una disposición continua de este parámetro, por lo que en la subcuenca II se acumula su recarga con la proveniente de la subcuenca I. Dada esta situación se consideró la recarga de la subcuenca II como la total en el sistema acuífero. Esta recarga se consideró sólo para los meses de estudio del año 2001, es decir, los meses desde mayo hasta octubre; así mismo sólo se tomó en cuenta la recarga proveniente del flujo subterráneo efluente, ya que las aportaciones por percolación son muy pocas.

Para calibrar la recarga natural en el modelo del acuífero, se estimó que proviene del flujo subterráneo efluente de los ríos Acarigua y las Guardias, ya que se ha determinado que estas dos fuentes son las que proporcionan mayor recarga al acuífero, a pesar de que otras quebradas como Palo Negro y Barrancas también aportan una recarga, pero es insignificante comparada con la aportada por las anteriores.

La recarga fue introducida dentro del modelo como pozos de inyección, con un caudal positivo, que indica una recarga que fue dividida tal como se muestra en la Tabla 6.1 en un porcentaje de ella (30%) para la Quebrada Atarigua, con un total de cuatro pozos aportando la misma cantidad de caudal y otro (70 %), con un total de tres pozos aportando la misma cantidad de caudal para la Quebrada Las Guardias. Se debe señalar que la recarga introducida en la Quebrada Acarigua se produjo en las capas superficiales, mientras que la producida en la

Quebrada Las Guardias fue en las capas un poco más profundas, ya que las condiciones de buzamiento de los estratos condicionan este tipo de recarga. Los pozos de recarga se establecieron en los puntos de contacto del acuífero con la base rocosa o impermeable y están ubicados en estos sectores ya que son los que presentan mayor cota topográfica, lo que contribuye al flujo del agua por gravedad. Los volúmenes considerados se representan en la Tabla 4.2.

6.1.1 Régimen de flujo utilizado

El movimiento de las aguas subterráneas hacia las obras de captación no alcanza teóricamente un régimen de equilibrio, ejemplificado en el concepto de radio de acción, el cual aumenta en función de un tiempo de extracción.

El régimen de flujo considerado para el estudio del acuífero corresponde a un flujo en régimen de transición, donde el tiempo juega un papel importante, ya que hay constantes modificaciones de los niveles de agua a lo largo de los períodos de tiempo considerados.

En el régimen de flujo transitorio o no permanente, el balance de masas establece que hay una variación de ella con respecto del tiempo

6.1.2 Períodos de Tiempo

Los períodos de tiempo considerados en la calibración varían desde 0 hasta 549 días, con pasos de tiempo de un día para la calibración y períodos de "stress" de un mes (Figura 6.1).

Tabla 6.2 Períodos de tiempo estimados

Mes	Período de "stres"	No de día
MAYO	1	0 -31
JUNIO	2	31 – 61
JULIO	3	61 – 92
AGOSTO	4	92 – 123
SEPTIEMBRE	5	123 – 153
OCTUBRE	6	153 – 184
NOVIEMBRE	7	184 -214
DICIEMBRE	8	214 – 245
ENERO(02)	9	245 – 276
FEBRERO (02)	10	276 – 304
MARZO (02)	11	304 – 335
ABRIL (02)	12	335 – 365
MAYO (02)	13	365 – 396
JUNIO	14	396 – 426
JULIO	15	426 – 457

AGOSTO	16	457 – 488
SEPTIEMBRE	17	488 – 518
OCTUBRE	18	518 – 549

Period #	Start [day]	Stop [day]	Time steps	Multiplier	Steady state
1	0	31	1	1.2	<input type="checkbox"/>
2	31	61	1	1.2	<input type="checkbox"/>
3	61	75	1	1.2	<input type="checkbox"/>
4	75	92	1	1.2	<input type="checkbox"/>
5	92	123	1	1.2	<input type="checkbox"/>
6	123	150	1	1.2	<input type="checkbox"/>
7	150	153	1	1.2	<input type="checkbox"/>
8	153	184	1	1.2	<input type="checkbox"/>

Figura 6.1 Intervalos de tiempo en el modelo

El factor multiplicador (Multiplier), es un factor utilizado para incrementar el tamaño del paso de tiempo en cada período de stress.

6.1.3 Niveles Iniciales

Los niveles iniciales se consideraron como los correspondientes a la campaña de medición del mes inicial, es decir, del mes de Mayo de 2001 (Figuras 6.2 y 6.3). Estos niveles fueron obtenidos de la campaña de medición de ese mes, arrojando una superficie que se obtuvo mediante el software SURFER 8.0., a través del método de interpolación de krigado. (Ver Apéndice F)

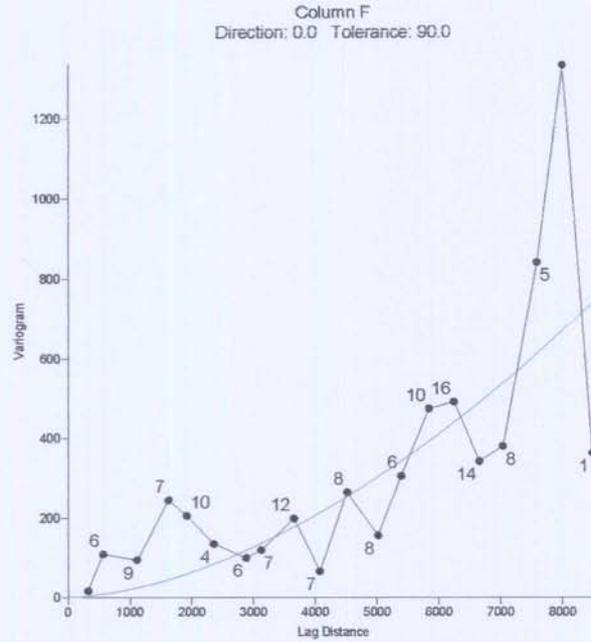


Figura 6.2 Variograma de los niveles iniciales (Mayo 2001)
 Tipo: Power, Scale = 300, Length = 5000, Power = 1.7

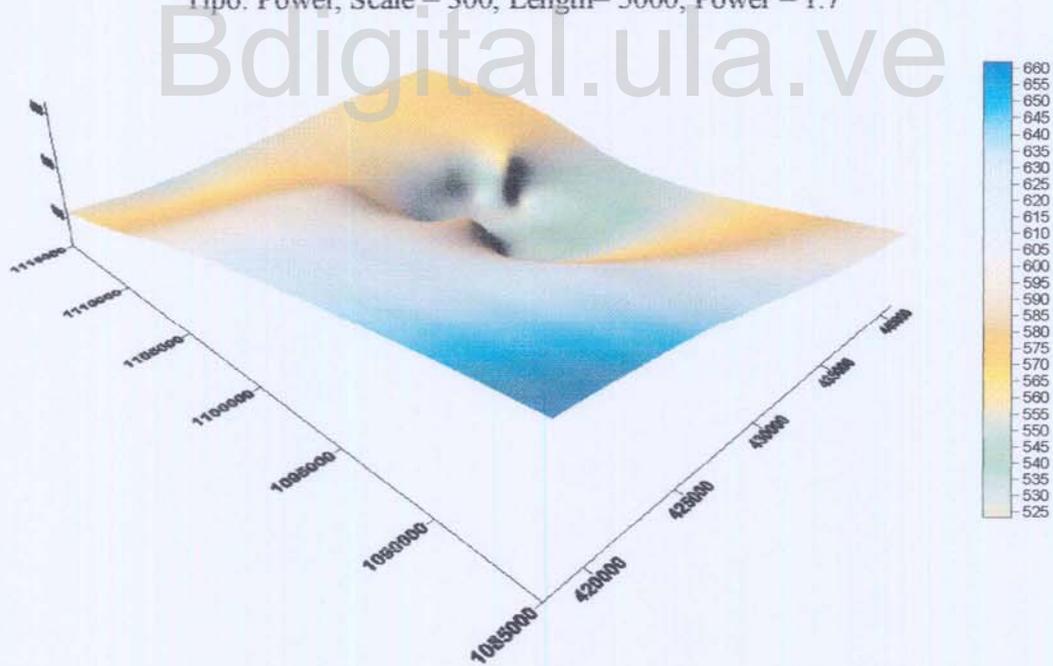


Figura 6.3 Niveles iniciales (Mayo 2001)

6.1.4 Método de Resolución

El método empleado para correr el modelo fue el **WHS Solver for Visual Modflow** (Figura 6.4); este método utiliza las ecuaciones diferenciales parciales de flujo de agua subterránea. Como todos los métodos iterativos acerca la solución de las ecuaciones diferenciales parciales iterativamente a una solución aproximada. Debido a que la matriz de las ecuaciones para flujo subterráneo es inicialmente incondicionada, es necesario precondicionar esas matrices para una solución eficiente. Existen dos niveles de factorización disponibles en el método:

- Cuando la convergencia a la solución requiere menos iteraciones el nivel es 1, pero el requerimiento de memoria de maquina aumenta con este nivel.

- Cuando el número de iteraciones incrementa se debe utilizar el nivel de factorización 0

El WHS trabaja con dos métodos de convergencia o aproximadores disponibles para cada periodo de tiempo:

- ***Iteraciones externas***

Son usadas para variar el parámetro de la matriz factorizada disponible hacia la solución. En las iteraciones externas es donde los parámetros hidrogeológicos del sistema de flujo (Transmisividad, espesor saturado, almacenamiento) son actualizados en los periodos de factorización de las matrices.

- ***Iteraciones internas***

Son usadas para solucionar iterativamente las matrices generadas en las iteraciones externas.

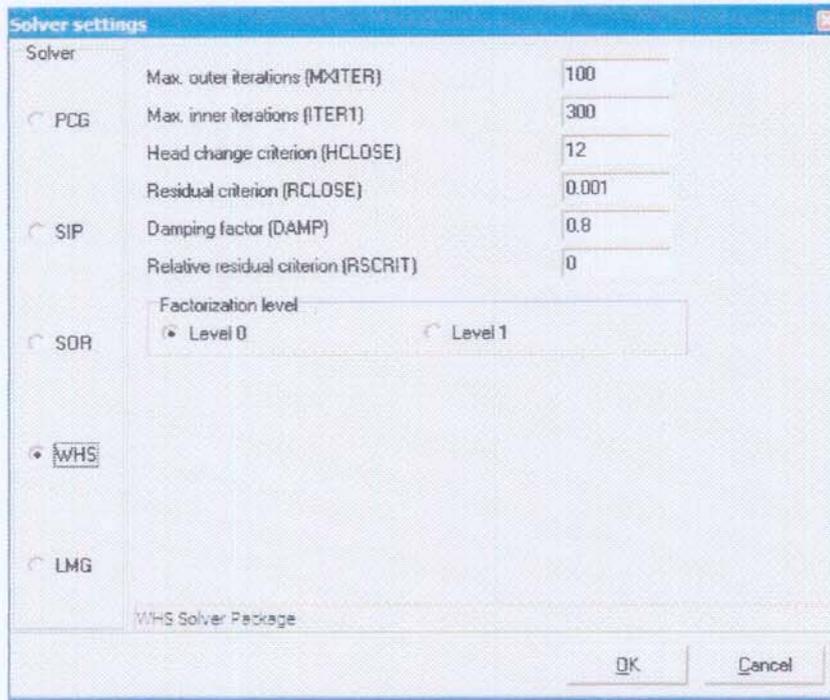


Figura 6.4 Método de resolución empleado

Para la calibración, se procedió a realizar diversas corridas del modelo, bajo diferentes condiciones.

- **Conductividad Hidráulica**

Una de las condiciones a considerar fue modificar la permeabilidad o conductividad hidráulica, de valores variables a lo largo de las capas, a valores constantes, ya que se puede notar que la condición de heterogeneidad del material no solo ocurre horizontalmente, sino también verticalmente, cosa que no es posible modelar en Visual Modflow, por ésta razón se decidió modificar la permeabilidad y mantenerla como un valor constante para todas las capas permeables.

Para asignar el nuevo valor de permeabilidad constante, se estimó un valor promedio de acuerdo a los datos para toda el área de estudio, tomando en cuenta, por supuesto, la superficie alcanzada por cada uno de los valores. De esta manera se consideró un valor promedio de permeabilidad de 0.0002 m/s para las capas permeables, manteniendo los valores iniciales para las impermeables. Es de hacer notar que esta consideración no se aleja notoriamente de la realidad, ya que los valores de conductividad hidráulica inicialmente estimados eran poco diferentes en las distintas zonas, por lo que al asumirla constante no se comete un gran error.

- **Intervalos de Tiempo y factor multiplicador**

Otra de las condiciones fue iterar con diferentes valores en los intervalos de tiempo, así como el factor multiplicador, ya que a medida que estos valores eran mayores, mejor se ajustaba la calibración; sin embargo, es importante destacar que esta situación era válida solo hasta cierto valor, a partir del cual la resultante era anormal. El multiplicador indica el factor de multiplicación aplicado al valor del paso de tiempo después de cada uno de ellos dentro de un periodo de estrés (Figura 6.5).

The screenshot shows a window titled "Stress Period Window" with a table containing 20 rows of data. The columns are: Period #, Start, Stop, Time Steps, Multiplier, and Steady State. The Steady State column contains checkboxes. The Multiplier for Period 1 is 3.5, and for all other periods it is 1.2. The Time Steps for Period 1 is 50, and for all other periods it is 1. The Start and Stop values increase by 30 for each period, with the final period (20) ending at 549.

Period #	Start	Stop	Time Steps	Multiplier	Steady State
1	0	31	50	3.5	<input type="checkbox"/>
2	31	61	10	1.2	<input type="checkbox"/>
3	61	75	5	1.2	<input type="checkbox"/>
4	75	92	5	1.2	<input type="checkbox"/>
5	92	123	5	1.2	<input type="checkbox"/>
6	123	150	5	1.2	<input type="checkbox"/>
7	150	153	5	1.2	<input type="checkbox"/>
8	153	184	5	1.2	<input type="checkbox"/>
9	184	214	1	1.2	<input type="checkbox"/>
10	214	245	1	1.2	<input type="checkbox"/>
11	245	276	1	1.2	<input type="checkbox"/>
12	276	304	1	1.2	<input type="checkbox"/>
13	304	335	1	1.2	<input type="checkbox"/>
14	335	365	1	1.2	<input type="checkbox"/>
15	365	396	1	1.2	<input type="checkbox"/>
16	396	426	1	1.2	<input type="checkbox"/>
17	426	457	1	1.2	<input type="checkbox"/>
18	457	488	1	1.2	<input type="checkbox"/>
19	488	518	1	1.2	<input type="checkbox"/>
20	518	549	50	1.2	<input type="checkbox"/>

Figura 6.5 Pasos de Tiempo y factores multiplicadores definitivos

- **Factor de Amortiguamiento (Damping factor)**

Otra condición también fue ajustar el factor de amortiguamiento (*damping factor*). Un factor de amortiguamiento menor que uno (1) aumenta el número de iteraciones externas necesarias para la convergencia. En la simulación se observó que el valor que mejor convenía para converger las corridas era un valor de 0.8, con el cual se trabajó para las diferentes condiciones.

- **Máximo cambio del nivel**

El máximo cambio de nivel de agua se determinó en 6.5 m, ya que fue prácticamente imposible calibrar para un valor más bajo.

6.1.5 Evaluación del comportamiento del acuífero en condiciones de recarga natural

Bajo las condiciones de recarga natural, el acuífero presenta luego de su simulación, la siguiente calibración:

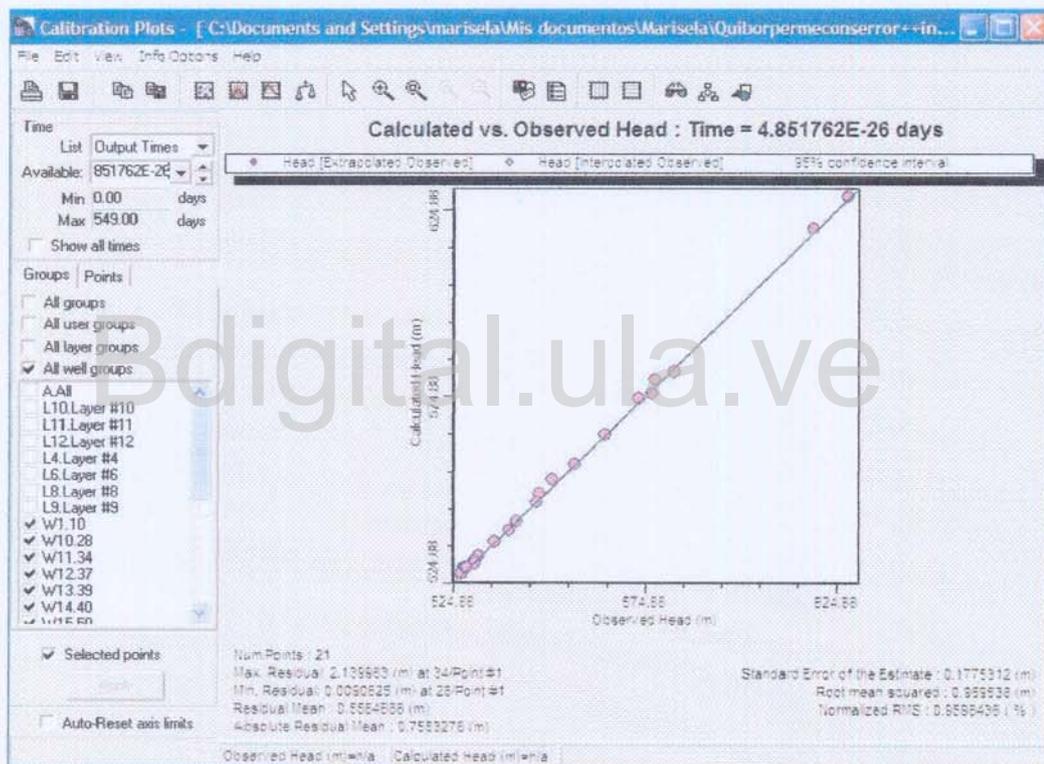


Figura 6.6 Calibración del modelo en condiciones de recarga natural (0 días)

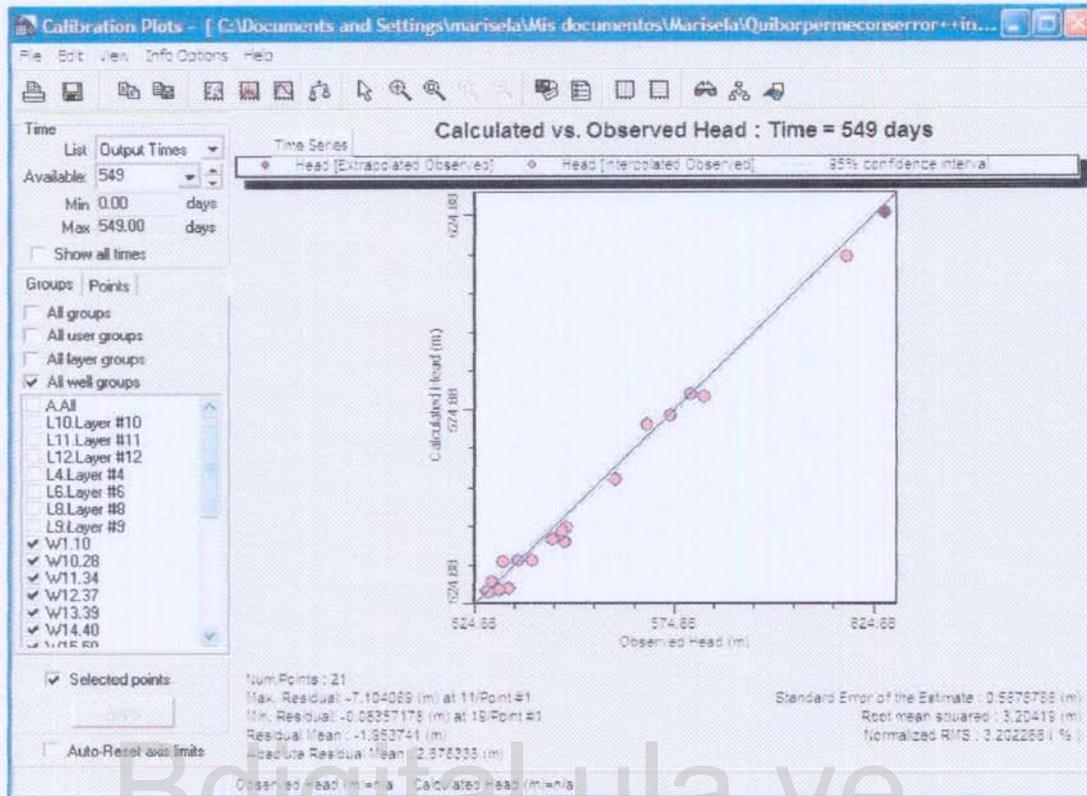


Figura 6.7 Calibración del modelo en condiciones de recarga natural (549 días)

En las figuras presentadas anteriormente se puede observar que la calibración es muy buena, con los valores de niveles calculados muy aproximados a los observados. Es de hacer notar que para un tiempo de 549 días hay una diferencia de los niveles observados con los calculados, que se puede deber a los abatimientos que se producen de los niveles estáticos por efecto del bombeo prolongado.

Los niveles medidos versus los niveles calculados cumplen con el criterio de calibración de menos del 10 % de error promedio cuadrático relativo (normalizado) RSM.

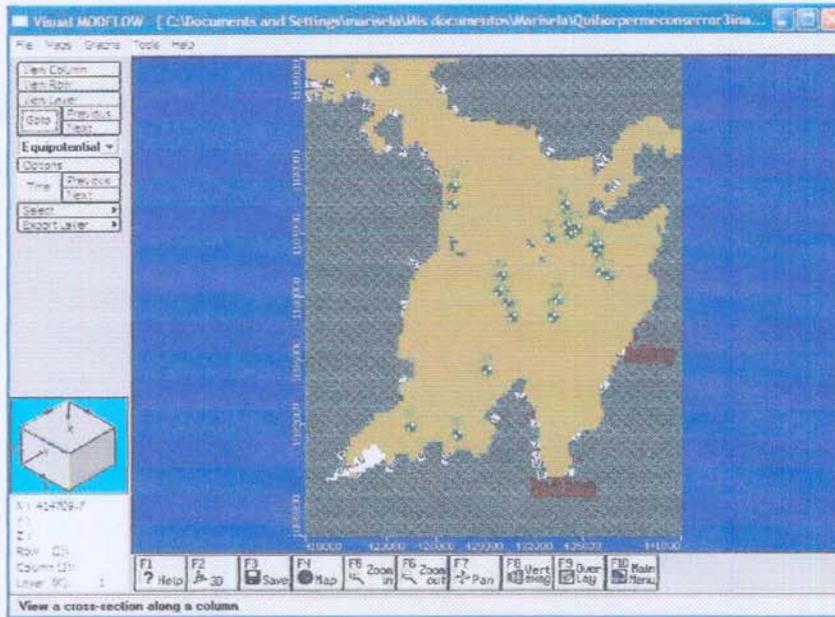


Figura 6.8 ■ Celdas secas Capa 1, Curvas isopiezas

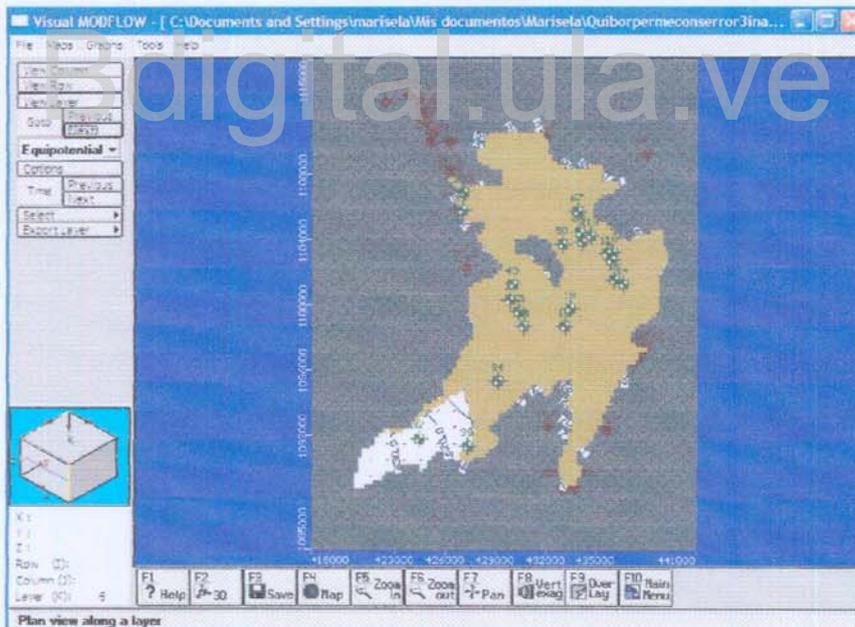


Figura 6.9 ■ Celdas secas Capa 6, Curvas isopiezas

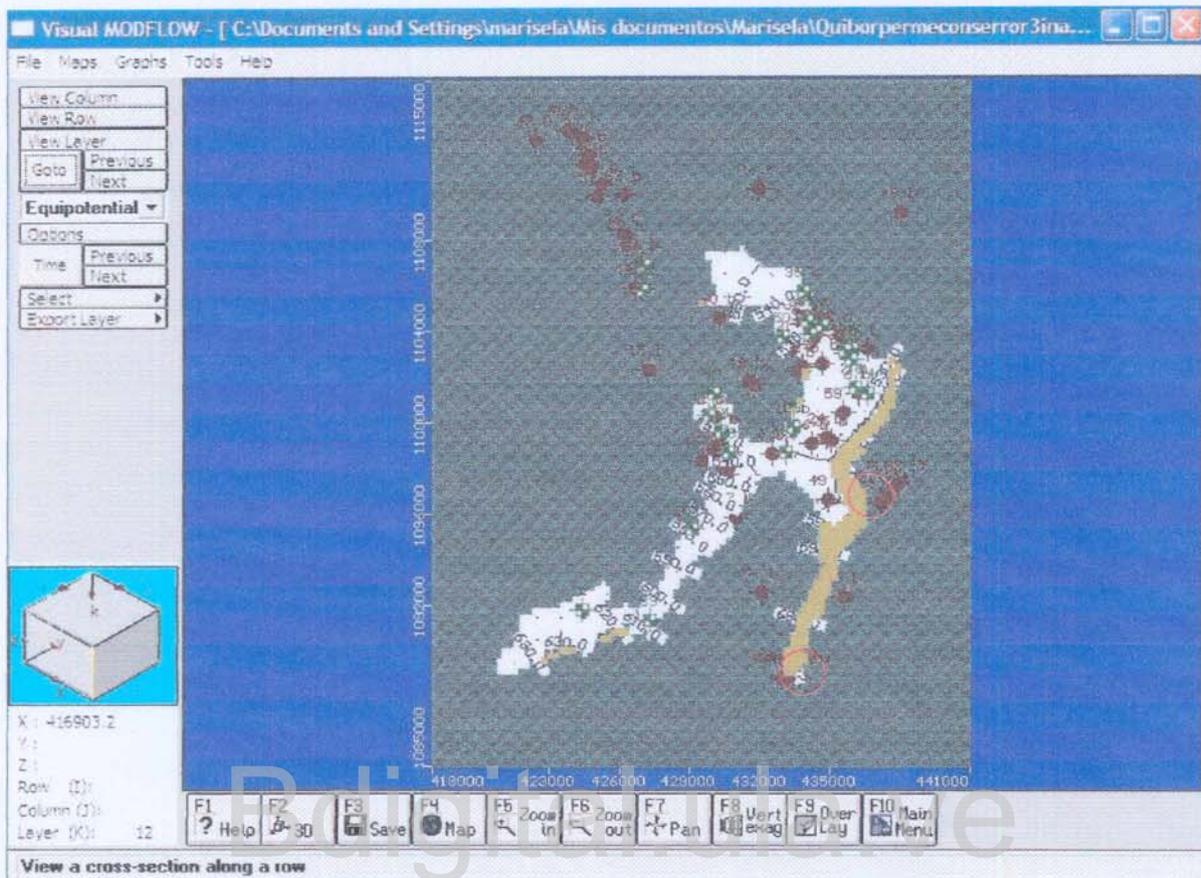


Figura 6.10 ■ Celdas secas Capa 12, Curvas isopièzas

Se puede observar claramente cómo parte del acuífero se seca debido al bombeo intensivo en la zona. Se debe destacar que en las zonas de recarga natural los niveles piezométricos aumentan y se acercan, debido al incremento de gradiente hidráulico en esa zona.

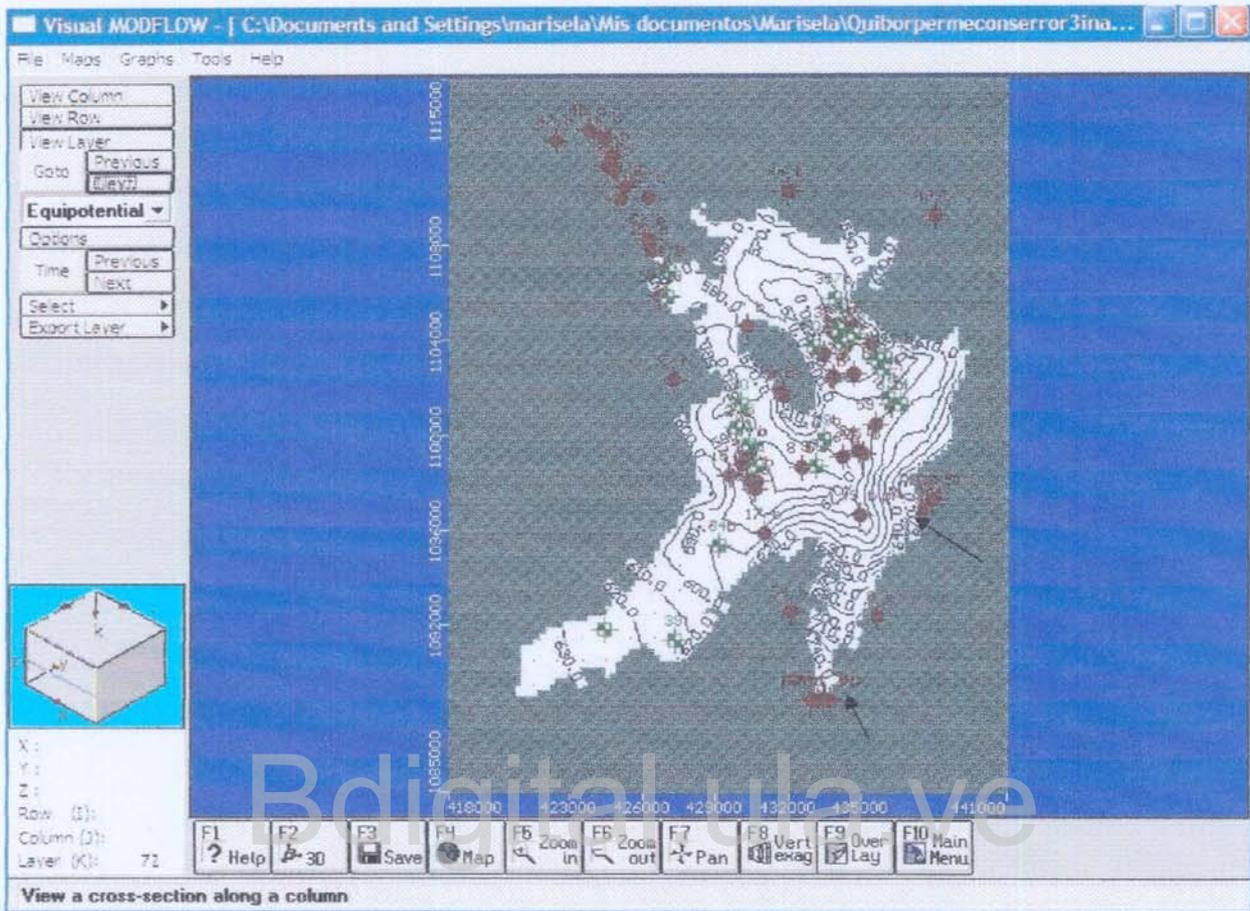


Figura 6.11 Curvas isopiezas. Mayor gradiente hidráulico en las zonas de recarga.

De acuerdo al balance de masas establecido en el modelo, se observa como el volumen de almacenamiento disminuye con el tiempo, a pesar de tener una recarga natural, ya que los bombeos son superiores a ésta recarga.

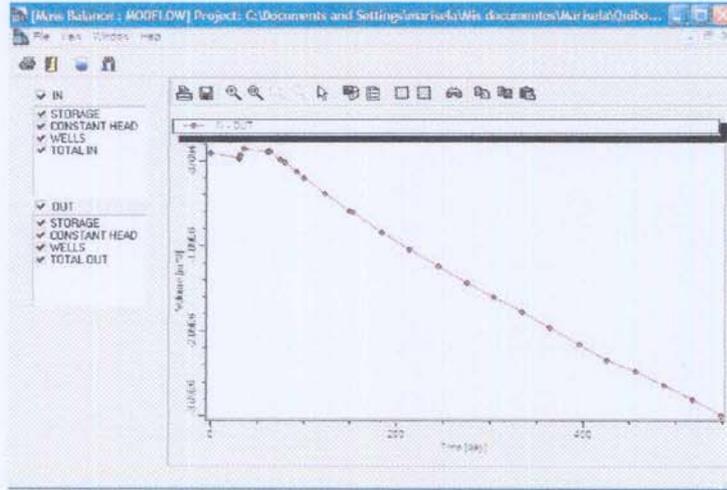


Figura 6.12 Volumen de almacenamiento Versus tiempo.

En el gráfico de niveles versus tiempo, se observa como éstos disminuyen a lo largo del tiempo, como es de esperar.

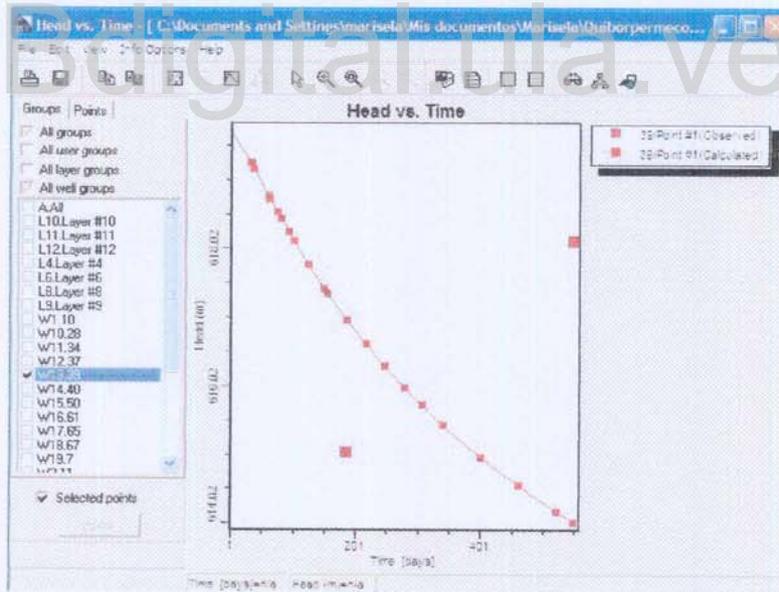


Figura 6.13 Niveles versus tiempo (pozo39).

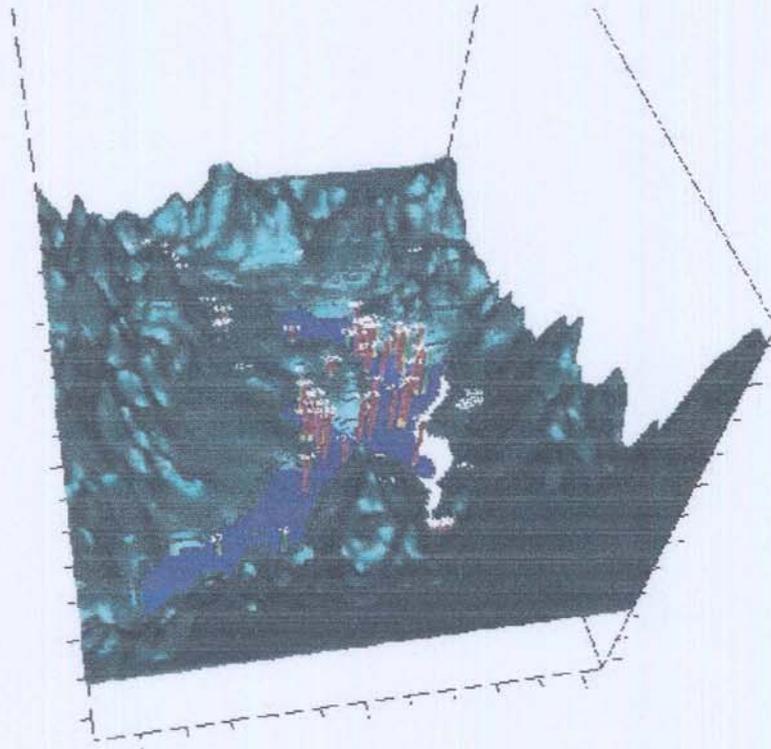


Figura 6.14 Vista 3D del nivel de agua final

6.2 SIMULACIÓN PARA CONDICIONES DE RECARGA ARTIFICIAL

La recarga artificial del acuífero se estudió bajo diferentes escenarios:

6.2.1 Recarga en el portal de salida:

- Recarga artificial en capas someras (capa 2) con pozos bombeando
- Recarga artificial en capas someras (capa 2) con pozos apagados
- Recarga artificial en capas profundas (capa 6) con pozos bombeando
- Recarga artificial en capas profundas (capa 6) con pozos apagados

6.2.2 Recarga en el portal de salida y quebrada Las Guardias:

- Recarga artificial en capas profundas con pozos bombeando

6.2.3 Régimen de flujo utilizado

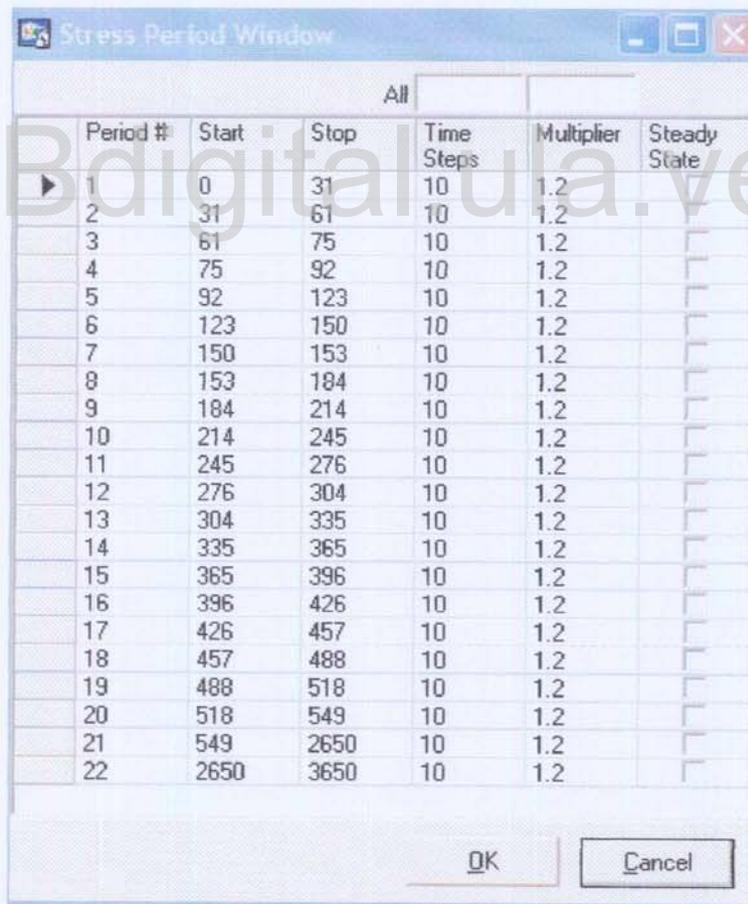
El régimen de flujo considerado para la simulación del acuífero corresponde, al igual que en la calibración, a un flujo en régimen de transición, donde el tiempo juega un papel importante, ya que hay constantes modificaciones de los niveles de agua a lo largo de los periodos de tiempo considerados.

En el régimen de flujo transitorio o no permanente, el balance de masas establece que hay una variación de ella con respecto del tiempo.

6.2.4 Períodos de tiempo

Los periodos de tiempo considerados en la simulación varían desde 0 hasta 3650 días (10 años), con pasos de tiempo y periodos de "stress" variables.

Para todos los casos las simulaciones se hicieron a 549 días (un año y medio) y para 10 años.



The screenshot shows a window titled "Stress Period Window" with a table of simulation intervals. The table has columns for Period #, Start, Stop, Time Steps, Multiplier, and Steady State. The data is as follows:

Period #	Start	Stop	Time Steps	Multiplier	Steady State
1	0	31	10	1.2	
2	31	61	10	1.2	
3	61	75	10	1.2	
4	75	92	10	1.2	
5	92	123	10	1.2	
6	123	150	10	1.2	
7	150	153	10	1.2	
8	153	184	10	1.2	
9	184	214	10	1.2	
10	214	245	10	1.2	
11	245	276	10	1.2	
12	276	304	10	1.2	
13	304	335	10	1.2	
14	335	365	10	1.2	
15	365	396	10	1.2	
16	396	426	10	1.2	
17	426	457	10	1.2	
18	457	488	10	1.2	
19	488	518	10	1.2	
20	518	549	10	1.2	
21	549	2650	10	1.2	
22	2650	3650	10	1.2	

Figura 6.15. Intervalos de tiempo en el modelo se simulación.

6.2.5 Niveles iniciales

Los niveles iniciales, al igual que en la calibración, se consideraron iguales a los correspondientes a la campaña de medición del mes inicial, es decir, el mes de mayo del año 2001. Figuras 6.2 y 6.3.

6.2.6 Método de Resolución.

El método empleado para correr el modelo, fue el **WHS Solver for Visual Modflow**, al igual que en la calibración.

6.2.7 Recarga artificial en el portal de salida.

- **Simulación con inyección en capas someras**

Este tipo de recarga se realizó en la segunda capa del acuífero, ya que ella corresponde a un material permeable, que permite un mayor y mejor paso del agua (Ver apéndice G).

Al realizar la simulación de esta condición para 549 días, se puede observar claramente como parte del acuífero se seca debido al bombeo intensivo en la zona; sin embargo, no hay entradas de agua a través de la inyección en los pozos, por lo que no presenta casi ninguna variación con respecto a la condición de recarga natural, por lo que se puede presumir como una primera aproximación, que la recarga a través de las primeras capas del terreno no es viable (Ver Apéndice H). Sin embargo, al observar el comportamiento del acuífero transcurridos 10 años, se detalla que los caudales aumentan un poco, debido a la inyección de los pozos (en los datos de entrada), aunque también el bombeo, ya que posiblemente algunas zonas que estaban secas pueden haberse saturado. Si el bombeo se elimina, se detalla como no nuevamente desaparecen los aportes de los caudales de inyección, por lo que se comprueba que la recarga a través capas someras no genera modificaciones importantes a la condición inicial (ver Apéndice H). Esto también se puede observar en las representaciones gráficas de las capas del acuífero, con la condición de recarga en capas someras (Ver Apéndice I).

- **Simulación con inyección en capas profundas.**

Este tipo de recarga, se realizó en la octava capa del acuífero, ya que ella corresponde a un material permeable, que permite un mayor y mejor paso del agua (Ver apéndice G).

Al realizar la simulación de esta condición para 549 días, se puede observar claramente cómo parte del acuífero se seca debido al bombeo intensivo en la zona; sin embargo, hay un aumento considerable del caudal de entrada debido a la inyección de los pozos, que se traduce en aumento de los niveles del acuífero, por lo que la recarga presenta mejoría a una mayor profundidad (Ver Apéndice H). Este mismo comportamiento se observa transcurridos 10 años, debido a la inyección de los pozos (en los datos de entrada). Si el bombeo se elimina, se observa un gran aporte de los caudales de inyección, por lo que se comprueba que la recarga a través capas profundas es lo más conveniente. (Ver Apéndice H).

Esto también se puede observar en las representaciones gráficas de las capas del acuífero, con la condición de recarga en capas someras (Ver Apéndice I).

6.2.8 Recarga artificial en el portal de salida y quebrada Las Guardias:

La recarga artificial en dos ubicaciones distintas puede suponer una mejor distribución del flujo y por ende un resultado más favorable. En la presente investigación se decidió inyectar la recarga a través de 15 pozos ubicados en el portal de salida y 15 pozos ubicados en las adyacencias de la quebrada Las Guardias, que puede suponer una buena zona de recarga dadas sus condiciones de permeabilidad y buzamiento de los estratos.

La profundidad de inyección en la quebrada Las Guardias se encuentra limitada por la aparición de estratos rocosos e impermeables que conforman la base rocosa; lo que hace restringir la inyección de agua a través de la cuarta y sexta capa (ver Apéndice G), por ser éstas permeables, lo que permite un mayor y mejor paso del agua.

Este sistema de recarga artificial deja claro que la nueva zona considerada (quebrada las Guardias), no aporta grandes volúmenes de caudal hacia el acuífero, ya que casi todo proviene de las adyacencias del portal de salida (ver Apéndice I)

Bdigital.ula.ve

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Es de suma importancia el uso de la modelación y simulación en la resolución de los problemas reales, no sólo en la hidrogeología, sino también en otras áreas de la ciencia, ya que permiten observar y predecir el comportamiento de un determinado fenómeno con un costo económico muy bajo.

- La cantidad de datos es importante en el empleo de técnicas de simulación, un número muy pequeño de datos se puede traducir en interpretaciones erróneas de la realidad del fenómeno

- El acuífero del Valle de Quíbor cuenta con una litología muy variable, constituida principalmente de arenas, gravas, arcillas y rocas como base impermeable, tales como los esquistos y las lutitas, que permiten una estimación de la base impermeable del acuífero.

- Para el presente estudio se realizó una simplificación de la realidad considerando sólo dos tipos de estratos: permeables e impermeables, tomando en consideración, por supuesto, los tipos de material que conforman cada uno de los estratos. Para establecer las capas que conforman el acuífero se realizó una revisión exhaustiva de los datos litológicos, estableciendo doce capas para las cuales se determinaron sus espesores y profundidades, mediante el uso de técnicas geoestadísticas. De esta manera se interpolaron los valores conseguidos y se obtuvo una distribución espacial de la profundidad de cada capa, estimando de esta forma el espesor de todo el sistema acuífero.

- Para asignar las propiedades hidrogeológicas del acuífero se hizo uso de datos existentes obtenidos mediante pruebas de bombeo que arrojaron algunos valores puntuales de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, así como se pudo estimar los valores de porosidad total y efectiva de acuerdo al tipo de material.

- Los valores de coeficiente de almacenamiento obtenidos mediante las pruebas de bombeo con que se contaban para el momento de la investigación, son muy pocos, por lo que se estimó un valor promedio de los obtenidos en la parte central del valle, haciéndolo constante a toda la superficie del Valle, si bien ésta consideración no es cierta, es muy aproximada a la realidad, dada la escasez de datos con que se cuenta.

- Los datos utilizados para modelar los niveles piezométricos del acuífero, se tomaron en un periodo de tiempo de dieciocho meses, en los cuales se tenían suficientes datos de campañas de monitoreo realizadas desde mayo del año dos mil uno hasta octubre del año 2002. Estos mismos datos se utilizaron para asignar los valores iniciales en el modelo y para la posterior calibración.

- En el proceso de calibración se obtuvo un error entre los valores observados y los calculados de 3.2%, para un periodo de tiempo de dieciocho meses, lo que constituye un buen valor, ya que debe ser siempre menor a 10 %, es decir, los valores reales y simulados se aproximan.

- La solución que se plantea en la investigación para mitigar el efecto de la sobreexplotación y garantizar el uso del recurso, es válida siempre y cuando esta recarga se realice a profundidad. Se debe destacar que la recarga superficial o a niveles muy poco profundos no incrementa los niveles del acuífero.

7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda generar mayor información sobre los datos hidrogeológicos concernientes a datos de calidad de aguas y pruebas de bombeo actualizadas del Valle de Quíbor, en especial en aquellas zonas en donde se dispone de poca información, como es el caso de la zona sur, suroeste, sureste y noroeste.

- La descripción litológica de los pozos de la zona es muy pobre, por lo que se recomienda que en futuras perforaciones se debe hacer una descripción más detallada de los estratos perforados.

- Es necesaria la actualización de las campañas de medición, para tener datos más recientes del comportamiento de los niveles del acuífero, ya que estos datos son los utilizados en la calibración. También es de suma importancia conocer los volúmenes de extracción, para lo cual es necesaria una estricta fiscalización del uso del recurso.

- Los resultados que se esperan obtener son a largo plazo, sin embargo con una política de explotación adecuada y controlada, se podrían tener resultados en menor tiempo.

- Se recomienda aplicar la metodología a un modelo de transporte de solutos, ya que la manipulación del recurso implica modificaciones no solo en la cantidad sino también en la calidad del agua del acuífero, para esto es necesario mantener un control de la calidad química del agua.

- Es importante tener en cuenta la calidad del agua a ser recargada en el acuífero y establecer, si es necesario, un tratamiento de dicha agua antes de ser recargada.

- Realizar mantenimiento constante en los pozos de recarga para evitar, en lo posible, la pronta colmatación del pozo.

- De continuar la explotación intensiva del recurso hídrico subterráneo en el Valle de Quíbor bajo las condiciones en las que se encuentra el acuífero actualmente, se podrían producir sequías más importantes. En la simulación se observa como se han secado sectores

que incluso afectan a algunos pozos que han dejado de producir, por el abatimiento tan alto de los niveles.

Bdigital.ula.ve

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, J. 1989. **Estudio del sistema hidrogeológico del Valle de Quíbor** . Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas.
- Carrasco, J.R. 1982. **Estrategia de explotación del agua subterránea en el Valle de Quíbor, Estado Lara**. Tesis M. Sc. Mérida. CIDIAT.
- Carrera, J. 2002. **Modelación de Acuíferos**. II Curso Hispanoamericano de Hidrología Subterránea. Montevideo – Uruguay.
- Castany, G. 1971. **Tratado práctico de las Aguas Subterráneas**. 1971. Barcelona, Editorial Omega
- CIDIAT. 2001. **Informe de Aprozella**. Mérida, Centro interamericano de Desarrollo e Investigación de Aguas y Tierras.
- Corpoccidente- FUDECO, 1978. **Bases para el diseño del sistema Yacmbú-Quíbor**, Barquisimeto – Venezuela.
- Custodio, E. y M. Llamas, 2001 a. **Hidrología Subterránea**. Barcelona, Editorial Omega
- Custodio, E. y M. Llamas, 2001 b. **Hidrología Subterránea**. Barcelona, Editorial Omega
- FUDECO. 1972. **Proyecto Yacambú Estudio de Factibilidad**. Barquisimeto – Venezuela.
- Golden Software, Inc. **Surfer. User's Guide**. Colorado – USA.
- Jegat, H. 1978. **Simulación de flujos permanentes en medio poroso por el método de los elementos finitos**. Serie Hidrología, Trabajo de investigación, proyecto banco de programas, No H – 16 , CIDIAT. Mérida – Venezuela.
- Johnson, E. 1975. **El Agua Subterránea y los Pozos**. Saint Paul. Minnessota 55165.
- Miyashiro, V.R. 1996. **Evaluación Estocástica de políticas de explotación del agua subterránea Aplicación al acuífero del Valle de Quíbor**. Tesis M. Sc. Mérida: CIDIAT.
- Mora, L.E.; 1996. **Aplicación de métodos geoestadísticos para el análisis de parámetros de agua en acuíferos**. Tesis M. Sc. Mérida: CIDIAT.
- Torres. G.A. 1993. **Evaluación de los recursos de agua subterránea en el Valle de Quíbor, Estado Lara**. Tesis M. Sc. Mérida: CIDIAT.
- Waterloo Hydrogeologic Inc. 2002. **Visual Modflow V. 3.0 User's Manual**. Ontario, Canadá.

APENDICE A

Programa LROCA.bas

```
'Este programa COMPARA dos superficies para crear un archivo MODIFICADO
'QUE TOMA EN CUENTA HASTA DONDE SE DEFINE EL ACUIFERO
'programa Surfer.
CLS
DEFDBL A-B
DIM a(10), b(10)
INPUT "Archivo tipo (.GRD) con MAPA original (sin ext)"; ORIS
ORIS = ORIS + ".grd"
INPUT "Archivo tipo (.GRD) con TOPE DE ROCA (sin ext) (srocama)"; MODIS
MODIS = "SROCAMA"
MODIS = MODIS + ".grd"
INPUT "Archivo de salida sin extensión "; sale$: sale$ = sale$ + ".grd"
'SE ABRE EL ARCHIVO CON LA TOPOGRAFIA ORIGINAL"
OPEN "I", #1, ORIS
OPEN "I", #3, MODIS
LINE INPUT #1, titu$
INPUT #1, COLU1, FILA1
INPUT #1, XMIN1, XMAX1
INPUT #1, YMIN1, YMAX1
INPUT #1, zmin1, zmax1
'SE LEEN LOS DATOS DE LA TOPOGRAFIA MODIFICADA
LINE INPUT #3, titu$
INPUT #3, colu2, fila2
INPUT #3, xmin2, xmax2
INPUT #3, ymin2, ymax2
INPUT #3, zmin2, zmax2
'SE REALIZA CHEQUEO DE COMPATIBILIDAD DE MALLAS
IF FILA1 = fila2 AND COLU1 = colu2 AND XMIN1 = xmin2 AND YMIN1 = ymin2 THEN
PRINT "MALLAS COMPATIBLES" ELSE PRINT "MALLAS INCOMPATIBLES": END
'Se calcula cual es el Zmin
zmin = zmin1
IF zmin1 > zmin2 THEN zmin = zmin2
zmax = zmax1
IF zmax2 > zmax1 THEN zmax = zmax2
'Se escribe la MALLA con la topografía modificada
OPEN "o", #2, sale$
PRINT #2, titu$
PRINT #2, colu2, fila2
PRINT #2, xmin2, xmax2
PRINT #2, ymin2, ymax2
PRINT #2, zmin, zmax
'SE CONTINUAN LEYENDO DATOS y se modifica la malla ORIGINAL
conta = 0
pone = 0
FOR i = 1 TO fila2
```

```

LOCATE 10, 39
PRINT i;

FOR j = 1 TO colu2
  INPUT #1, a
  INPUT #3, b
  IF b < (1E+10) AND b > 0 THEN
    a = b
    conta = conta + 1
    LOCATE 23, 50: PRINT conta
    LOCATE 22, 10: PRINT "a="; a: LOCATE 22, 40: PRINT "b="; b
    'a$ = INPUT$(1)
  END IF
  IF a > 0 THEN
    pone = pone + 1
    IF a > 1E+10 OR a-b<0 THEN
      PRINT #2, " 1.70141e+038";
    ELSE
      PRINT #2, USING "#####.###"; a;
    END IF
  END IF
  IF pone = 10 OR j = colu2 THEN
    PRINT #2, " "
    pone = 0
  END IF
NEXT j
PRINT #2, " "
IF i < fila2 THEN
  LINE INPUT #1, a$
  LINE INPUT #3, a$
END IF
NEXT i
CLOSE #1
CLOSE #2
CLOSE #3
END

```

Bdigital.ula.ve

APENDICE B

SECCIÓN S - 1

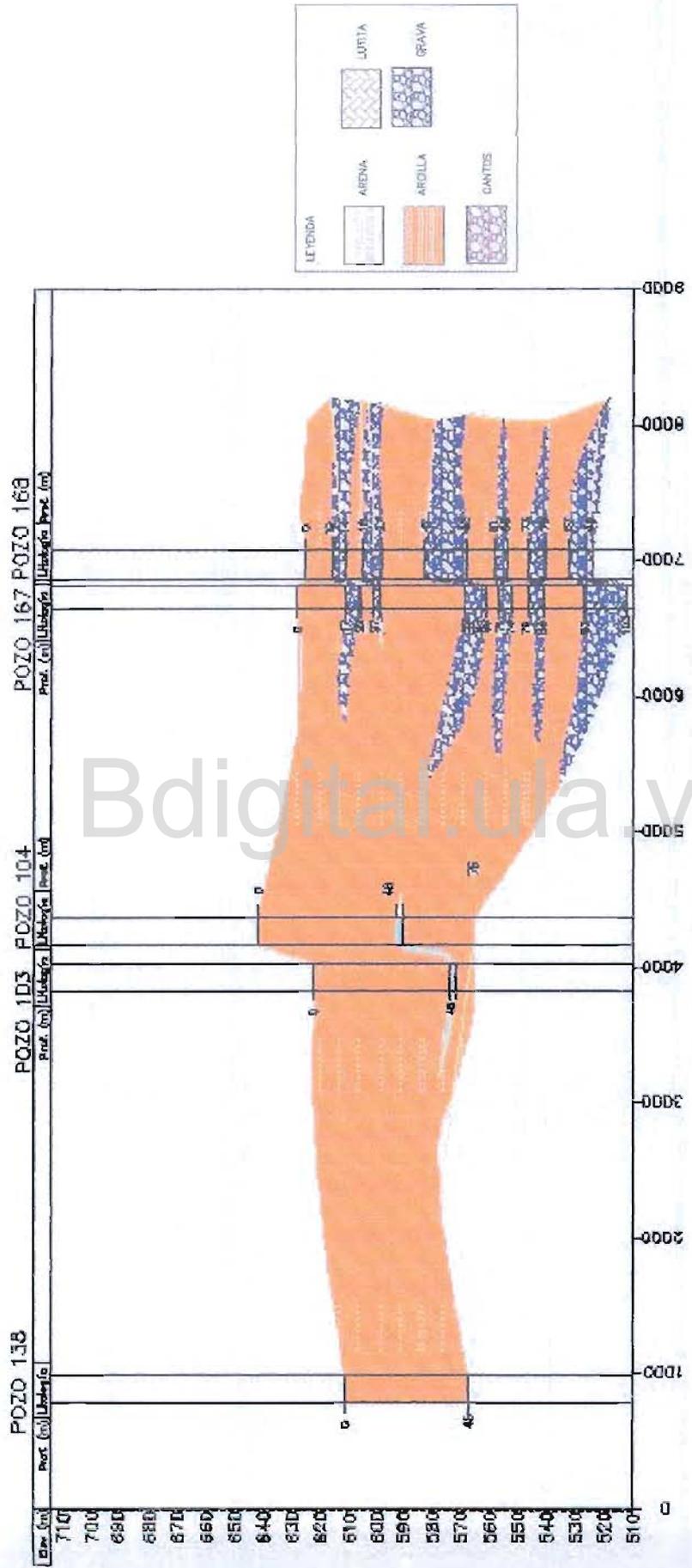


Figura B.2. Sección estratigráfica S-1

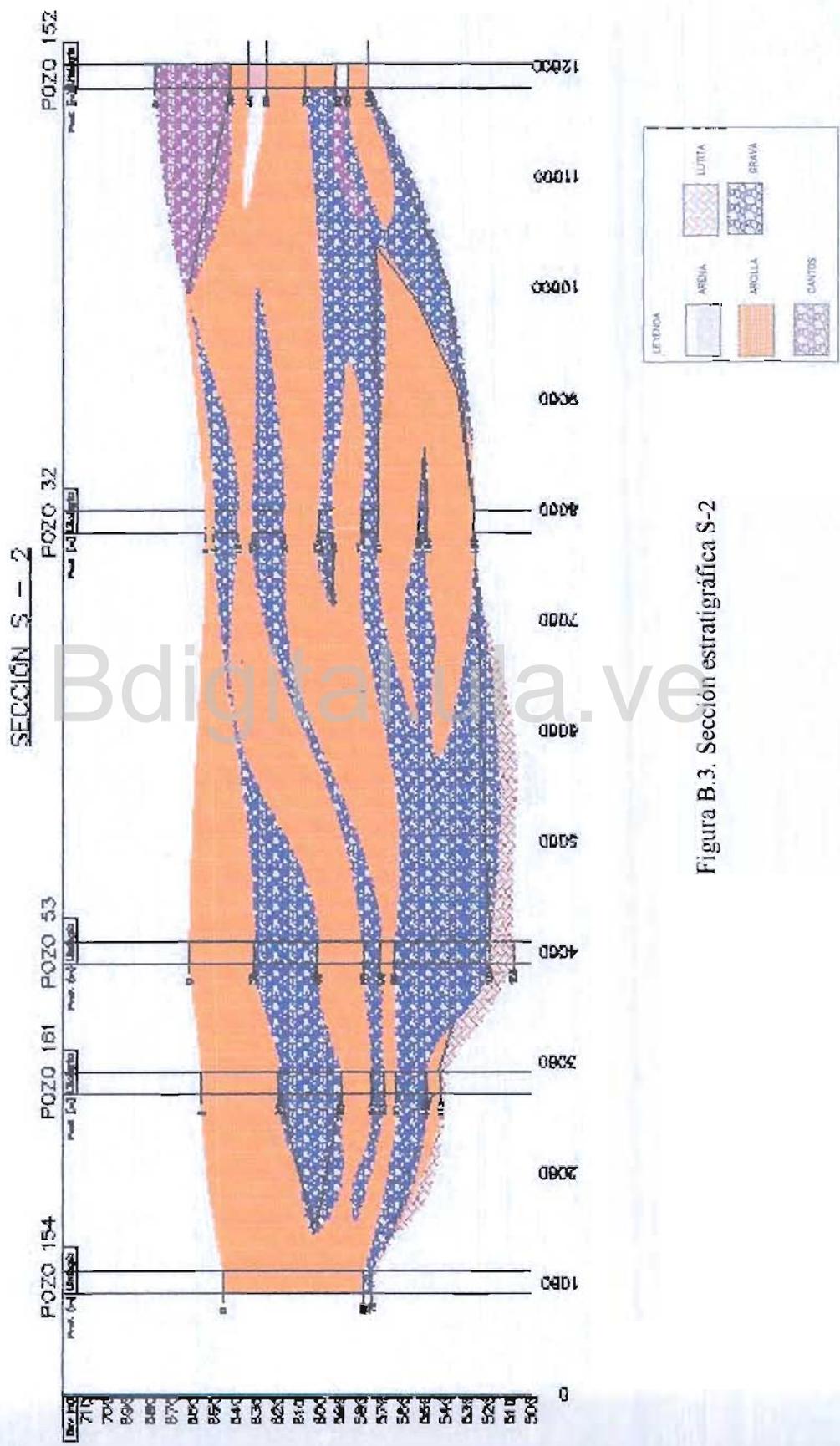


Figura B.3. Sección estratigráfica S-2

SECCIÓN S - 3

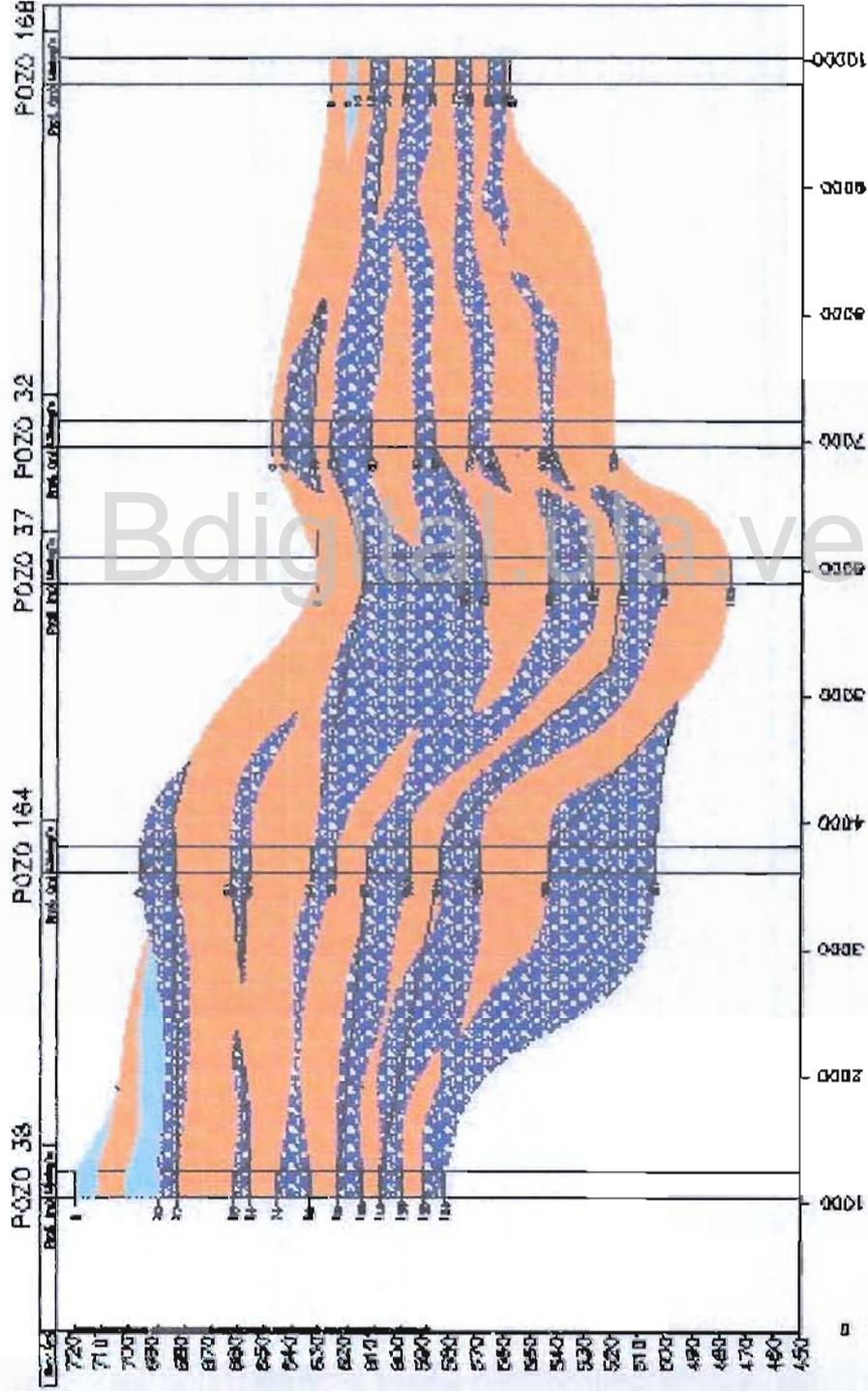


Figura B.4. Sección estratigráfica S-3

SECCIÓN S - 4

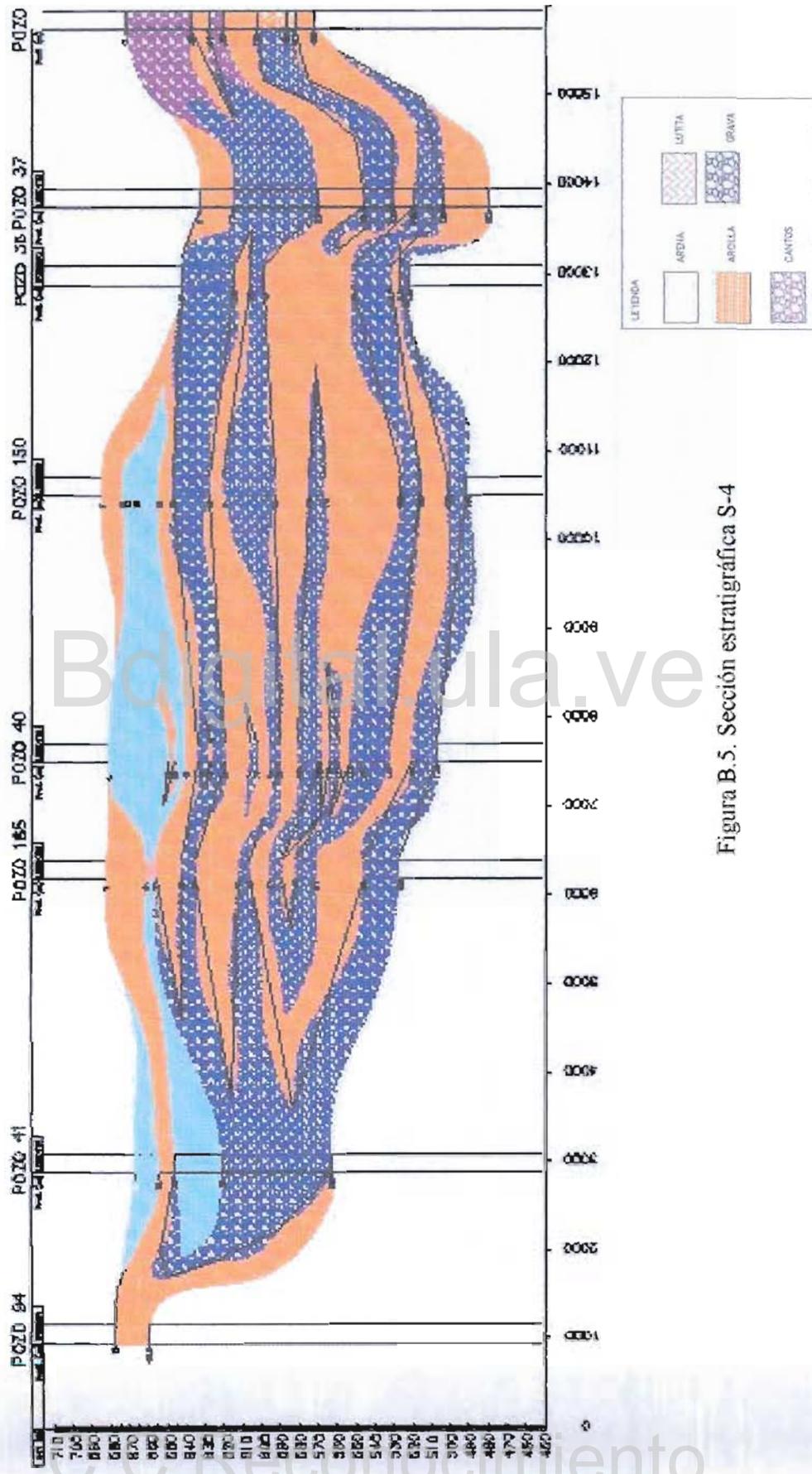


Figura B.5. Sección estratigráfica S-4

Bdigitalula.ve

APÉNDICE C

Tabla C1, Espesores en metro de las capas en cada pozo

Nro Pozo	X	Y	Z	Esesor C1 (Arcilla)	Esesor C2 (Arena)	Esesor C3 (Arcilla)	Esesor C4 (Arena)	Esesor C5 (Arcilla)	Esesor C6 (Arena)	Esesor C7 (Arcilla)	Esesor C8 (Arena)	Esesor C9 (Arcilla)	Esesor C10 (Arena)	Esesor C11 (Arcilla)	Esesor C12 (Arena)
103	429917	1106322	614.99	14.00	1.00	8.00	1.00	24.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
104	430252	1106322	615.81	14.00	1.00	8.00	1.00	24.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
105	427057	1107157	600.00	10.00	17.00	6.00	7.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
119	428431	1108936	588.68	9.00	15.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
131	425268	1110447	599.96	20.00	15.00	1.00	21.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
138	426872	1105929	605.76	16.00	1.00	15.00	1.00	7.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
149	433753	1089576	835.26	3.00	23.00	4.00	6.00	4.00	16.00	5.00	14.00	5.00	1.00	1.00	1.00
150	430757	1099410	672.36	10.00	20.00	7.00	19.00	8.00	27.00	18.00	9.00	40.00	10.00	15.00	10.00
151	427753	1105129	613.82	15.00	1.00	14.00	8.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
152	438196	1104649	655.00	1.00	11.00	1.00	22.00	9.00	8.00	18.00	20.00	10.00	1.00	1.00	1.00
153	427268	1090878	699.67	1.00	30.00	25.00	10.00	15.00	7.00	13.00	30.00	7.00	1.00	1.00	1.00
154	427292	1103102	625.50	20.00	1.00	20.00	1.00	18.00	4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
157	427023	1105468	608.66	14.00	16.00	10.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
158	429397	1104972	622.33	10.00	1.00	14.00	1.00	20.00	16.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
159	429517	1104142	628.77	5.00	15.00	1.00	9.00	9.00	11.00	9.00	62.00	9.00	1.00	1.00	1.00
161	429089	1103191	635.00	15.00	1.00	20.00	29.00	15.00	5.00	6.00	14.00	7.00	1.00	1.00	1.00
162	432990	1104965	630.00	16.00	14.00	15.00	6.00	19.00	1.00	9.00	14.00	7.00	6.00	15.00	15.00
163	429610	1104634	625.01	14.00	6.00	8.00	5.00	21.00	6.00	6.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
164	435722	1100537	685.10	1.00	13.00	20.00	7.00	23.00	8.00	12.00	16.00	11.00	15.00	25.00	40.00
165	428068	1095084	676.74	21.00	6.00	13.00	7.00	23.00	6.00	11.00	6.00	7.00	11.00	25.00	19.00
166	434802	1096607	705.16	60.00	27.00	22.00	8.00	6.00	15.00	9.00	6.00	9.00	8.00	5.00	5.00
167	432719	1106532	624.42	17.00	5.00	5.00	4.00	28.00	7.00	5.00	4.00	5.00	4.00	10.00	10.00
168	432962	1106562	624.59	10.00	4.00	5.00	8.00	15.00	10.00	9.00	5.00	7.00	6.00	8.00	8.00
3	428666	1105004	619.72	7.00	6.00	8.00	6.00	13.00	7.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

32	434175	1103704	646.32	4.00	11.00	7.00	15.00	16.00	7.00	13.00	8.00	19.00	4.00	28.00	28.00
48	436119	1101366	677.18	1.00	13.00	20.00	7.00	23.00	8.00	12.00	16.00	11.00	15.00	25.00	40.00
53	430276	1102728	642.90	14.00	1.00	15.00	30.00	22.00	8.00	6.00	22.00	1.00	22.00	11.00	1.00
54	428921	1095298	689.12	21.00	6.00	13.00	7.00	23.00	6.00	11.00	6.00	7.00	11.00	25.00	19.00
58	435783	1100506	685.36	1.00	13.00	20.00	7.00	23.00	8.00	12.00	16.00	11.00	15.00	25.00	40.00
60	428254	1096528	676.85	1.00	33.00	5.00	16.00	11.00	10.00	11.00	9.00	10.00	20.00	13.00	17.00
93	424072	1092082	660.52	26.00	9.00	1.00	7.00	1.00	7.00	1.00	7.00	1.00	7.00	1.00	7.00
94	423002	1089843	645.83	18.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
33	429847	1100291	659.00	1.00	13.00	12.00	9.00	8.00	7.00	13.00	3.00	21.00	26.00	20.00	22.00
34	430641	1104349	630.30	15.00	1.00	15.00	14.00	10.00	14.00	16.00	4.00	1.00	1.00	1.00	1.00
35	433667	1101775	662.93	1.00	11.00	1.00	16.00	8.00	8.00	26.00	1.00	20.00	20.00	4.00	5.00
36	434669	1102639	658.55	17.00	16.00	1.00	21.00	1.00	6.00	24.00	16.00	11.00	15.00	25.00	30.00
37	436310	1097800	720.30	30.00	7.00	21.00	6.00	10.00	12.00	10.00	9.00	7.00	8.00	8.00	8.00
38	434926	1096654	702.73	60.00	27.00	22.00	8.00	6.00	15.00	9.00	6.00	9.00	8.00	5.00	5.00
39	429569	1096395	690.64	1.00	40.00	7.00	14.00	23.00	6.00	10.00	11.00	5.00	32.00	12.00	13.00
40	424409	1091769	660.29	1.00	12.00	8.00	16.00	1.00	16.00	1.00	16.00	1.00	16.00	1.00	15.00
41	432696	1104921	630.00	16.00	14.00	15.00	6.00	19.00	1.00	9.00	14.00	7.00	6.00	15.00	15.00

Digital.ula.ve

Tabla C2, Cotas en metros de las bases de las capas en cada pozo

Nº	Pozo	X	Y	Z	BC1	BC2	BC3	BC4	BC5	BC6	BC7	BC8	BC9	BC10	BC11	BC12
103	429917	1106322	614.99	599.99	591.99	590.99	590.99	566.99	564.99	563.99	562.99	561.99	561.99	560.99	559.99	558.99
104	430252	1106322	615.81	600.81	592.81	591.81	591.81	567.81	565.81	564.81	563.81	562.81	562.81	561.81	560.81	559.81
105	427057	1107157	600.00	573.00	567.00	560.00	560.00	559.00	558.00	557.00	556.00	555.00	555.00	554.00	553.00	552.00
119	428431	1108936	588.68	564.68	563.68	562.68	562.68	561.68	560.68	559.68	558.68	557.68	557.68	556.68	555.68	554.68
131	425268	1110447	599.96	564.96	563.96	542.96	542.96	541.96	540.96	539.96	538.96	537.96	537.96	536.96	535.96	534.96
138	426872	1105929	605.76	588.76	573.76	572.76	572.76	565.76	564.76	563.76	562.76	561.76	561.76	560.76	559.76	558.76
149	433753	1089576	835.26	809.26	805.26	799.26	799.26	795.26	779.26	779.26	774.26	755.26	755.26	754.26	753.26	752.26
150	430757	1099410	672.36	642.36	635.36	616.36	616.36	608.36	581.36	563.36	563.36	554.36	514.36	504.36	489.36	479.36
151	427753	1105129	613.82	598.82	583.82	575.82	575.82	574.82	573.82	572.82	572.82	571.82	570.82	569.82	568.82	567.82
152	438196	1104649	655.00	643.00	642.00	620.00	620.00	611.00	603.00	585.00	585.00	565.00	555.00	554.00	553.00	552.00
153	427268	1090878	699.67	668.67	643.67	633.67	633.67	618.67	611.67	598.67	598.67	568.67	561.67	560.67	559.67	558.67
154	427292	1103102	625.50	604.50	584.50	583.50	583.50	565.50	561.50	560.50	559.50	558.50	558.50	557.50	556.50	555.50
157	427023	1105468	608.66	594.66	578.66	568.66	567.66	566.66	565.66	564.66	563.66	562.66	562.66	561.66	560.66	559.66
158	429397	1104972	622.33	612.33	611.33	597.33	596.33	576.33	560.33	559.33	558.33	557.33	557.33	556.33	555.33	554.33
159	429517	1104142	628.77	608.77	607.77	598.77	598.77	589.77	578.77	569.77	569.77	507.77	498.77	497.77	496.77	495.77
161	429089	1103191	635.00	620.00	619.00	599.00	570.00	555.00	550.00	544.00	530.00	523.00	523.00	522.00	521.00	520.00
162	432990	1104965	630.00	614.00	600.00	585.00	579.00	560.00	559.00	550.00	536.00	529.00	529.00	523.00	508.00	493.00
163	429610	1104634	625.01	611.01	605.01	597.01	592.01	571.01	565.01	559.01	558.01	557.01	557.01	556.01	555.01	554.01
164	435722	1100537	685.10	684.10	671.10	651.10	644.10	621.10	613.10	601.10	585.10	574.10	574.10	559.10	534.10	494.10
165	428068	1095084	676.74	655.74	649.74	636.74	629.74	606.74	600.74	589.74	583.74	576.74	576.74	565.74	540.74	521.74
166	434802	1096607	705.16	645.16	618.16	596.16	588.16	582.16	567.16	558.16	552.16	543.16	543.16	535.16	530.16	525.16
167	432719	1106532	624.42	607.42	602.42	597.42	593.42	565.42	558.42	553.42	549.42	544.42	544.42	540.42	530.42	520.42
168	432962	1106562	624.59	614.59	610.59	605.59	597.59	582.59	572.59	563.59	558.59	551.59	551.59	545.59	537.59	529.59
3	428666	1105004	619.72	612.72	606.72	598.72	592.72	579.72	572.72	571.72	570.72	569.72	569.72	568.72	567.72	566.72
32	434175	1103704	646.32	642.32	631.32	624.32	609.32	593.32	586.32	573.32	565.32	546.32	546.32	542.32	514.32	486.32
48	436119	1101366	677.18	676.18	663.18	643.18	636.18	613.18	605.18	593.18	577.18	566.18	566.18	551.18	526.18	486.18
53	430276	1102728	642.90	628.90	627.90	612.90	582.90	560.90	552.90	546.90	524.90	523.90	523.90	501.90	490.90	489.90

54	428921	1095298	689.12	668.12	642.12	619.12	613.12	602.12	596.12	589.12	578.12	553.12	534.12
58	435783	1100506	685.36	684.36	644.36	621.36	613.36	601.36	585.36	574.36	559.36	534.36	494.36
60	428254	1096528	676.85	675.85	621.85	610.85	600.85	589.85	580.85	570.85	550.85	537.85	520.85
93	424072	1092082	660.52	634.52	617.52	616.52	609.52	608.52	601.52	600.52	593.52	592.52	585.52
94	423002	1089843	645.83	627.83	624.83	623.83	622.83	621.83	620.83	619.83	618.83	617.83	616.83
34	429847	1100291	659.00	658.00	624.00	616.00	609.00	596.00	593.00	572.00	546.00	526.00	504.00
35	430641	1104349	630.30	615.30	585.30	575.30	561.30	545.30	541.30	540.30	539.30	538.30	537.30
36	433667	1101775	662.93	661.93	633.93	625.93	617.93	591.93	590.93	570.93	550.93	546.93	541.93
37	434669	1102639	658.55	641.55	603.55	602.55	596.55	572.55	556.55	545.55	530.55	505.55	475.55
38	436310	1097800	720.30	690.30	662.30	646.30	634.30	624.30	615.30	608.30	600.30	592.30	584.30
39	434926	1096654	702.73	642.73	585.73	579.73	564.73	555.73	549.73	540.73	532.73	527.73	522.73
40	429569	1096395	690.64	689.64	628.64	605.64	599.64	589.64	578.64	573.64	541.64	529.64	516.64
41	424409	1091769	660.29	659.29	623.29	622.29	606.29	605.29	589.29	588.29	572.29	571.29	556.29
42	432696	1104921	630.00	614.00	600.00	579.00	559.00	550.00	536.00	529.00	523.00	508.00	493.00

hospital.ula.ve

Bdigital.ula.ve

APÉNDICE D

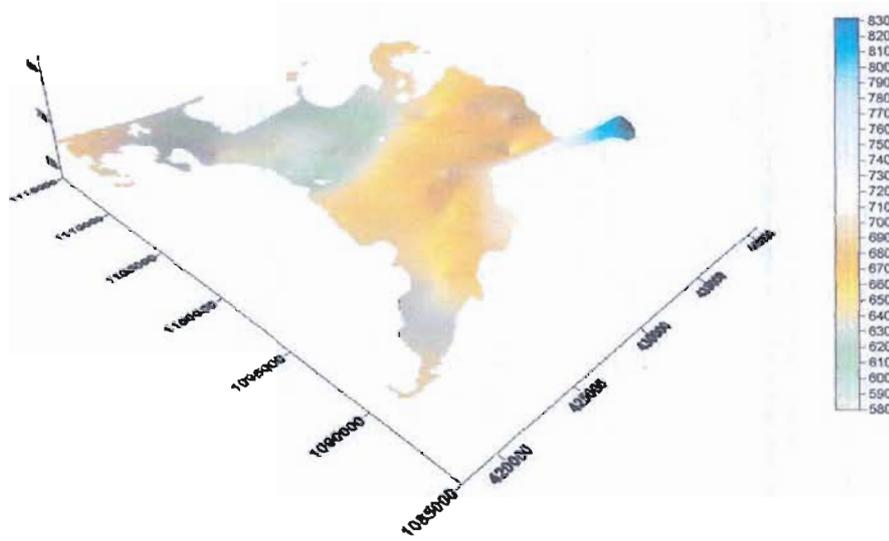


Figura D1, Base de la capa 1 (blanqueada)



Figura D2, Base de la capa 2 (blanqueada)

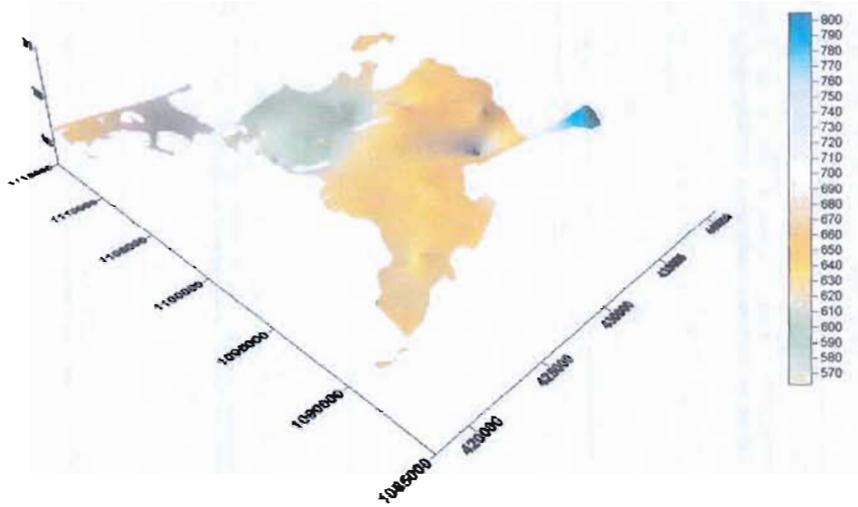


Figura D3, Base de la capa 3 (blanqueada)

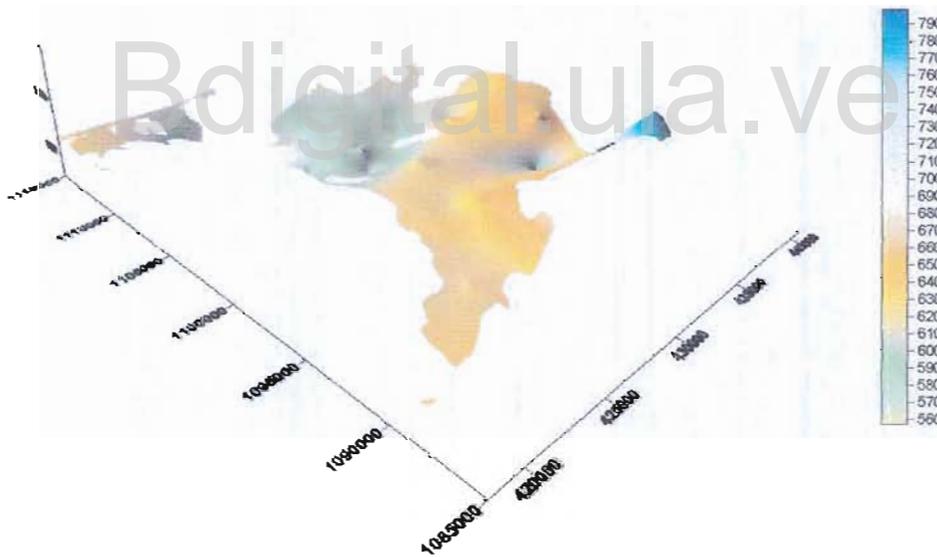


Figura D4, Base de la capa 4 (blanqueada)

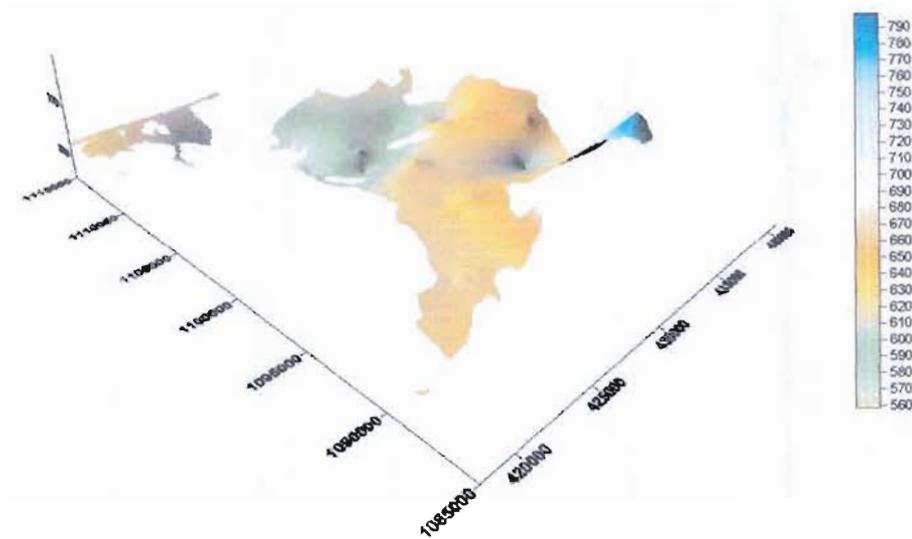


Figura D5, Base de la capa 5 (blanqueada)

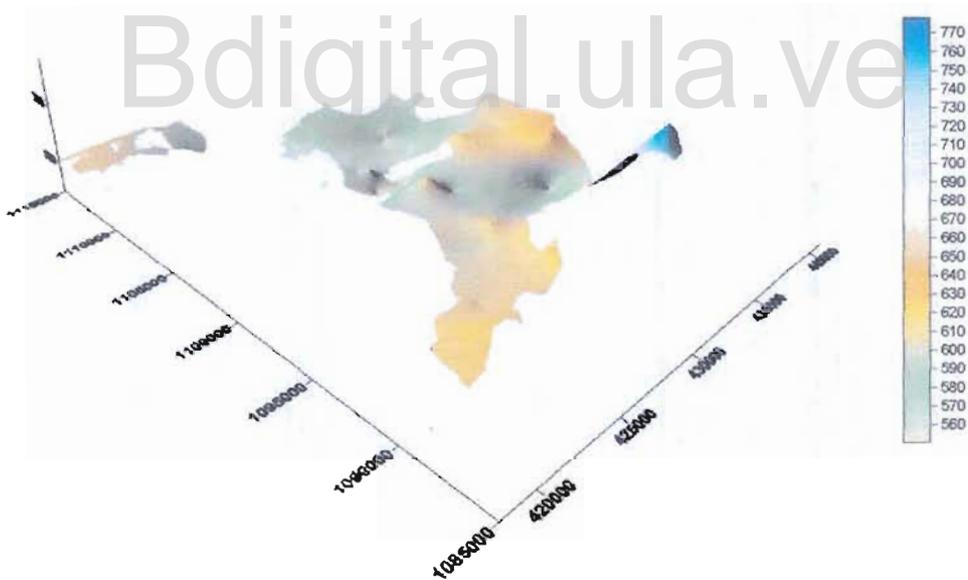


Figura D6, Base de la capa 6 (blanqueada)

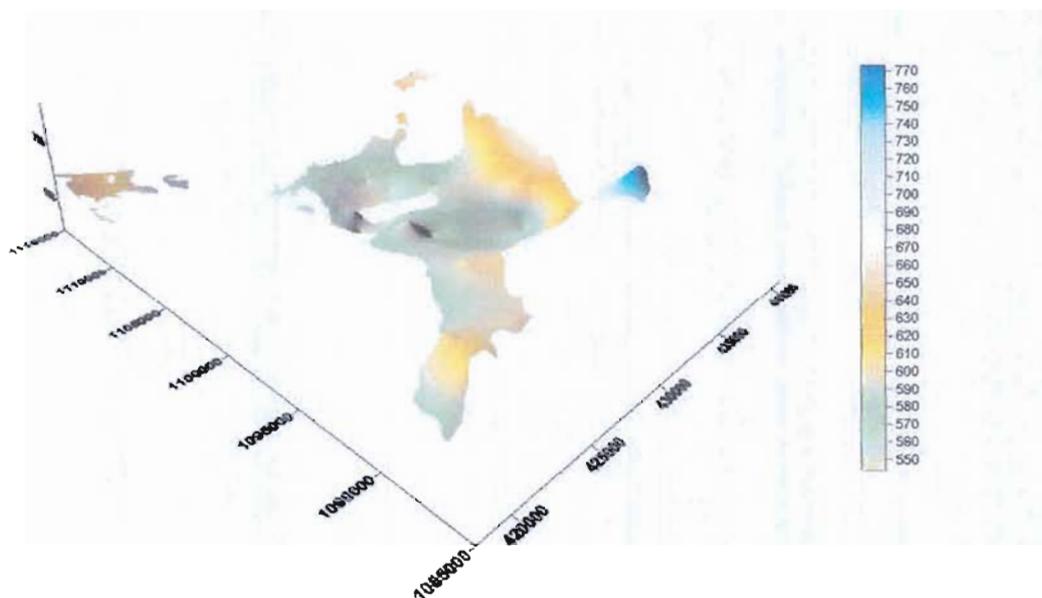


Figura D7, Base de la capa 7 (blanqueada)

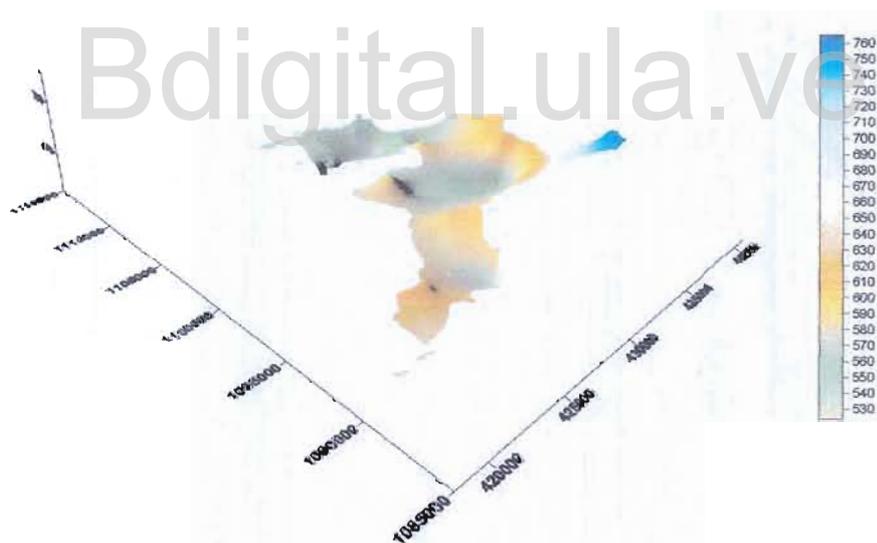


Figura D8, Base de la capa 8 (blanqueada)

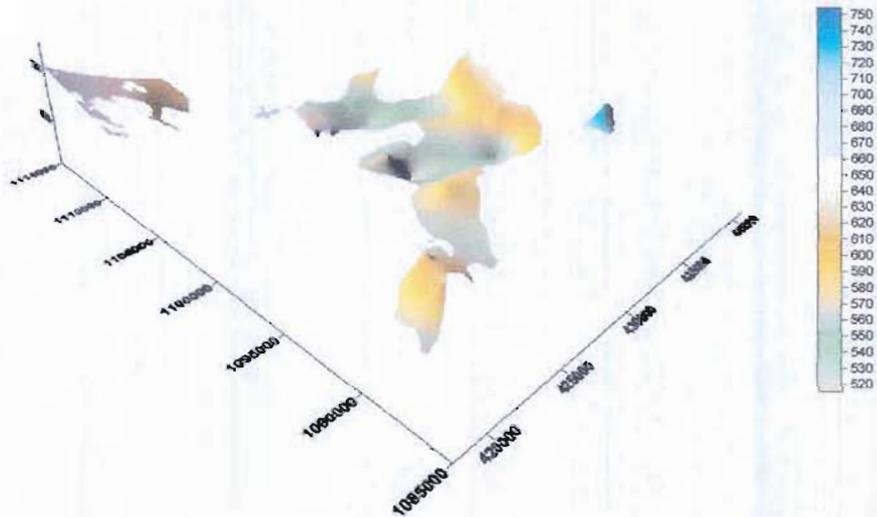


Figura D9, Base de la capa 9 (blanqueada)



Figura D10, Base de la capa 10 (blanqueada)

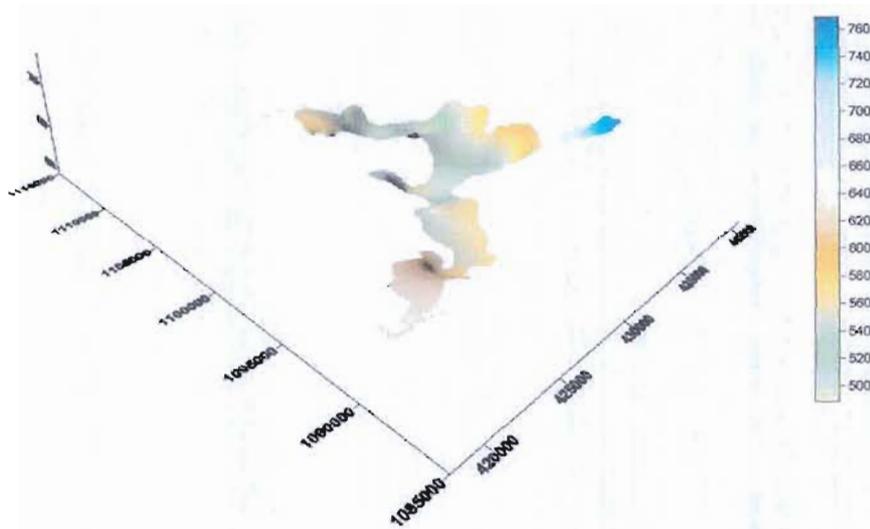


Figura D11, Base de la capa 11 (blanqueada)

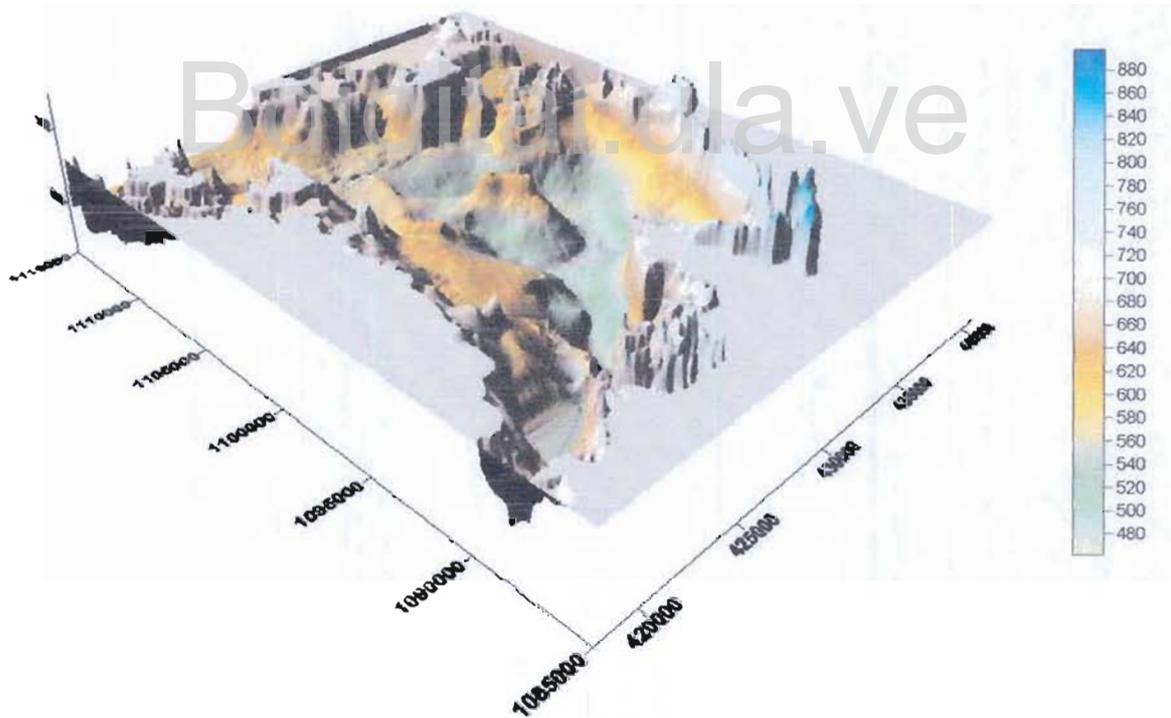


Figura D12, Base de la capa 12 (Tope de Roca)

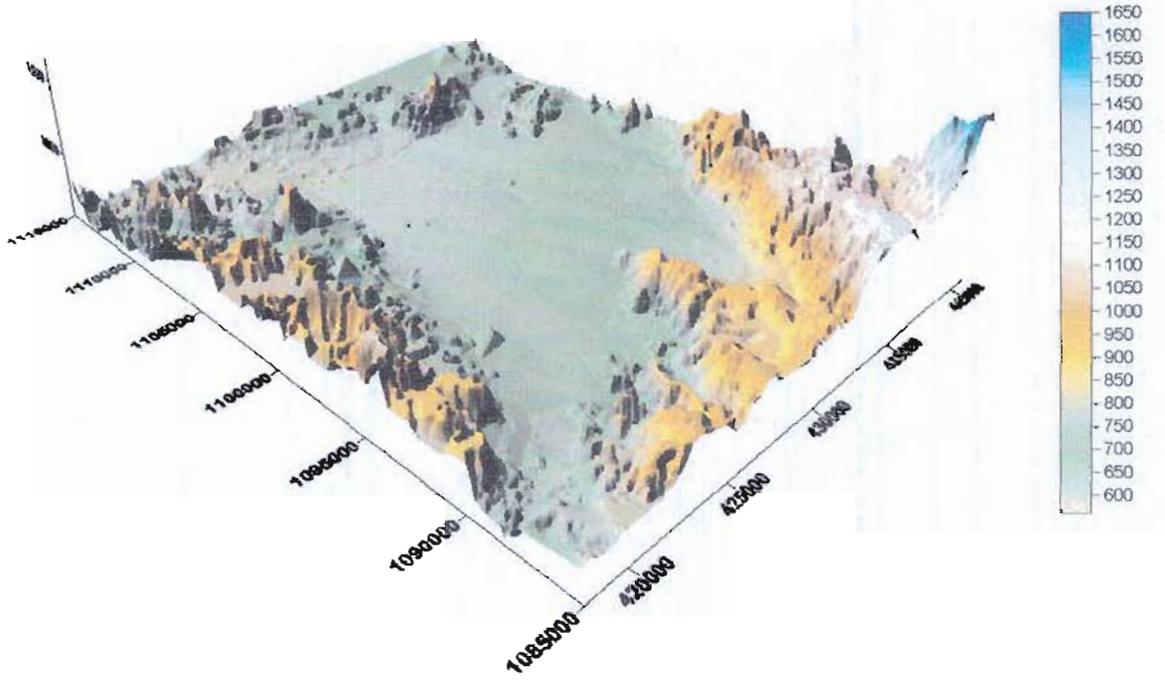


Figura D13, Terreno

Bdigital.ula.ve

Bdigital.ula.ve

APÉNDICE E

Tabla E1, Espesores saturados promedios, Almacenamientos específicos, Conductividades Hidráulicas

Pozo	Nº	X	Y	Z	BC12	Aluivon	Total	Prom EA Sat	% Arena Sat	E Sat Arena	Trasmisividad	K	S	Ss
103	429917	1106322	614.99	558.99	56.00	56.00	4.32	7.72	4.32	363.52	84.14	1.00E-04	2.31E-05	
104	430252	1106322	615.81	559.81	56.00	56.00	3.51	6.27	3.51	349.87	99.65	1.00E-04	2.85E-05	
105	427057	1107157	600.00	552.00	48.00	48.00	13.23	27.56	13.23	500.00	37.80	1.00E-04	7.56E-06	
119	428431	1108936	588.68	554.68	34.00	34.00	15.93	46.84	15.93	500.00	31.39	1.00E-04	6.28E-06	
131	425268	1110447	599.96	534.96	65.00	65.00	36.70	56.47	36.70	500.00	13.62	1.00E-04	2.72E-06	
138	426872	1105929	605.76	558.76	47.00	47.00	5.00	10.64	5.00	525.11	105.02	1.00E-04	2.00E-05	
150	430757	1099410	672.36	479.36	193.00	193.00	20.41	10.58	20.41	1096.93	53.73	1.00E-04	4.90E-06	
151	427753	1105129	613.82	567.82	46.00	46.00	4.78	10.39	4.78	428.77	89.68	1.00E-04	2.09E-05	
153	427268	1090878	699.67	558.67	141.00	141.00	38.94	27.62	38.94	400.00	10.27	1.00E-04	2.57E-06	
154	427292	1103102	625.50	555.50	70.00	70.00	7.41	10.58	7.41	204.19	27.56	1.00E-04	1.35E-05	
157	427023	1105468	608.66	559.66	49.00	49.00	6.86	14.00	6.86	529.06	77.10	1.00E-04	1.46E-05	
158	429397	1104972	622.33	554.33	68.00	68.00	6.78	9.96	6.78	245.12	36.18	1.00E-04	1.48E-05	
159	429517	1104142	628.77	495.77	133.00	133.00	53.40	40.15	53.40	288.12	5.40	1.00E-04	1.87E-06	
161	429089	1103191	635.00	520.00	115.00	115.00	21.00	18.26	21.00	485.82	23.13	1.00E-04	4.76E-06	
162	432990	1104965	630.00	493.00	137.00	137.00	27.10	19.78	27.10	252.83	9.33	1.00E-04	3.69E-06	
163	429610	1104634	625.01	554.01	71.00	71.00	2.67	3.76	2.67	214.62	80.48	1.00E-04	3.75E-05	
164	435722	1100537	685.10	494.10	191.00	191.00	35.94	18.82	35.94	733.15	20.40	1.00E-04	2.78E-06	
165	428068	1095084	676.74	521.74	155.00	155.00	31.04	20.03	31.04	557.27	17.95	1.00E-04	3.22E-06	
166	434802	1096607	705.16	525.16	180.00	180.00	15.00	8.33	15.00	254.78	16.99	1.00E-04	6.67E-06	
167	432719	1106532	624.42	520.42	104.00	104.00	18.76	18.03	18.76	362.79	19.34	1.00E-04	5.33E-06	
168	432962	1106562	624.59	529.59	95.00	95.00	14.28	15.03	14.28	368.51	25.81	1.00E-04	7.00E-06	
32	434175	1103704	646.32	486.32	160.00	160.00	28.00	17.50	28.00	255.47	9.12	1.00E-04	3.57E-06	
48	436119	1101366	677.18	486.18	191.00	191.00	40.00	20.94	40.00	745.10	18.63	1.00E-04	2.50E-06	
53	430276	1102728	642.90	489.90	153.00	153.00	42.81	27.98	42.81	731.00	17.07	1.00E-04	2.34E-06	
54	428921	1095298	689.12	534.12	155.00	155.00	20.92	13.50	20.92	524.26	25.06	1.00E-04	4.78E-06	
58	435783	1100506	685.36	494.36	191.00	191.00	35.80	18.74	35.80	763.61	21.33	1.00E-04	2.79E-06	
60	428254	1096528	676.85	520.85	156.00	156.00	30.33	19.44	30.33	588.72	19.41	1.00E-04	3.30E-06	

93	424072	1092082	660.52	585.52	75.00	36.68	48.90	36.68	570.00	15.54	1.00E-04	2.73E-06
94	423002	1089843	645.83	616.83	29.00	6.00	20.69	6.00	200.00	33.33	1.00E-04	1.67E-05
34	429847	1100291	659.00	504.00	155.00	38.45	24.81	38.45	1066.62	27.74	1.00E-04	2.60E-06
35	430641	1104349	630.30	537.30	93.00	6.00	6.45	6.00	214.97	35.83	1.00E-04	1.67E-05
37	434869	1102639	658.55	475.55	183.00	5.63	3.08	5.63	243.73	43.26	1.00E-04	1.77E-05
39	434926	1096654	702.73	522.73	180.00	19.00	10.56	19.00	262.62	13.82	1.00E-04	5.26E-06
40	429569	1096395	690.64	516.64	174.00	30.77	17.69	30.77	355.16	11.54	1.00E-04	3.25E-06
41	424409	1091769	660.29	556.29	104.00	66.76	64.20	66.76	700.00	10.48	1.00E-04	1.50E-06
42	432696	1104921	630.00	493.00	137.00	27.88	20.35	27.88	255.91	9.18	1.00E-04	3.59E-06

Digital.ula.ve

Reconocimiento

Bdigitalula.ve

APÉNDICE F

F.1, Monitoreo de niveles estáticos May – 01, Oct - 01

Nº	Código MARN	Coordenadas UTM		May-01		Oct-01	
		Norte	Este	N. E. (mts)	Cota N.E (mts)	N. E. (mts)	Cota N.E (mts)
1	LA6070049A	433419	1089824	10.08	799.32	6.07	803.33
3	LA6070103A	433416	1089890	9.3	798.71	6.08	801.93
4	LA6070050A	433542	1090040	15.1	792.32	11.5	795.92
7	LA6070026A	429844	1100291	85.54	573.42	81.5	577.46
9	LA6070100A	435921	1102793	131.3	528.17	131.76	527.71
10	LA6070056A	435986	1103239	98.76	556.57	96.74	558.59
11	LA6070057A	435675	1103165	104.24	550.75	104.74	550.25
14	LA6070132A	436607	1101321	149.4	531.46	149.56	531.30
16	LA6070113A	436127	1101563	144.24	530.39	144.5	530.13
18	LA6070139A	433153	1098712	145.8	539.25	145.76	539.29
19	LA6070130A	433428	1099838	139.54	535.47	139.56	535.45
20	LA6070115A	438045	1095903	9.26	766.87	10.03	766.10
22	LA6070123A	439479	1094597	6.12	843.88	7.51	842.49
25	LA6070034A	430700	1098065	141.74	543.02	141.1	543.66
28	LA6070146A	430704	1098710	134.5	541.28	133.4	542.38
31	LA6070087A	429240	1098441	112.18	558.91	111.3	559.79
34	LA6070122A	429103	1095368	113.08	577.28	113.64	576.72
36	LA6071007A	435656	1092392	68.36	716.17	63.88	720.65
37	LA6071004A	424411	1091775	32.34	627.93	32.48	627.79
39	LA6071 S/N	427337	1091366	68.66	619.02	72.64	615.04
40	LA6070024A	430008	1101304	105.76	547.09	104.52	548.33
43	LA6070121A	430330	1102974	96.52	543.48	96.23	543.77
49	LA6070065A	431982	1101382	119.08	536.81	117.56	538.33
50	LA6070110A	432972	1103751	109.8	530.20	110.62	529.38
53	LA6070149A	433663	1102289	127.8	527.28	128.12	526.96
61	LA6070073A	434177	1103840	118.46	526.92	66.95	578.43
65	LA6070036A	434039	1104442	111.84	528.10	112.03	527.91
67	LA6170010A	433898	1105710	83.34	546.65	83.77	546.22
71	LA6170011A	427004	1105838	24.3	582.44	26.4	580.34
74	LA6171029A	426096	1110077	16.74	574.35	17.43	573.66
77	LA6171004A	425025	1110952	17.02	576.94	17.42	576.54
79	LA6171003B	425258	1110459	19.24	580.76	19.6	580.40
87	LA6171010A	423437	1112996	2.27	562.39	2.45	562.21
88	LA6171037A	422339	1112924	4.48	555.52	5.1	554.90
91	LA6170037A	430395	1109337	25.94	579.40	25.67	579.67

96	LA6170047A	431947	1110268	25.26	591.94	26.02	591.18
118	LA6070158A	434686	1104259	112.58	527.48	113.12	526.94
121	LA6170021A	427060	1106882	25.24	576.64	26.22	575.66
128	LA6070134A	436145	1095808	170.22	549.68	169.84	550.06
129	LA6070118A	427268	1102214	44.1	586.92	41.46	589.56
131	LA6070032A	430358	1099601	103.83	564.17	103.8	564.20

Tabla F2, Monitoreo de Niveles estáticos Oct 02

#	Código	X	Y	Z	N.E.	Prof.N.E.
1	LA6070014A	432701	1104923	630.00	73.82	556.18
3	LA6070024A	430008	1101304	652.85	105.06	547.79
4	LA6070026A	429844	1100291	658.96	85.40	573.56
6	LA6070030A	429957	1100218	660.67	112.06	548.61
7	LA6070032A	430358	1099601	668.00	101.02	566.98
8	LA6070034A	430700	1098065	684.76	141.48	543.28
9	LA6070035A	430102	1098513	674.98	122.20	552.78
10	LA6070036A	434039	1104442	639.94	111.34	528.60
17	LA6070056A	435986	1103239	655.33	93.20	562.13
18	LA6070057A	435675	1103165	654.99	106.20	548.79
21	LA6070065A	431982	1101382	655.89	116.82	539.07
22	LA6070073A	434177	1103840	645.38	123.80	521.58
27	LA6070092A	434828	1104126	640.65	114.22	526.43
30	LA6070100A	435921	1102793	659.47	130.14	529.33
32	LA6070110A	432972	1103751	640.00	108.26	531.74
34	LA6070112A	429553	1097319	684.98	130.80	554.18
38	LA6070121A	430330	1102974	640.00	95.70	544.30
39	LA6070122A	429103	1095368	690.36	107.20	583.16
42	LA6070125A	428293	1095142	679.57	90.30	589.27
43	LA6070128A	428250	1095181	679.00	97.72	581.28
45	LA6070130A	433428	1099838	675.01	139.10	535.91
46	LA6070131A	428785	1096400	682.87	147.10	535.77
47	LA6070132A	436607	1101321	680.86	147.60	533.26
48	LA6070134A	436145	1095808	719.90	169.80	550.10
49	LA6070135A	434930	1096654	702.70	154.62	548.08
51	LA6070137A	429087	1098231	672.17	116.68	555.49
53	LA6070139A	433153	1098712	685.05	145.74	539.31
54	LA6070140A	432551	1098637	686.55	146.50	540.05
55	LA6070143A	430608	1097722	686.74	143.80	542.94
56	LA6070144A	430435	1097492	687.17	144.80	542.37

57	LA6070145A	430405	1098157	680.65	142.00	538.65
58	LA6070146A	430704	1098710	675.78	131.98	543.80
60	LA6070148A	433663	1102289	655.08	127.88	527.20
62	LA6070150A	433839	1104301	639.70	111.56	528.14
70	LA6070166A	428959	1094125	688.12	89.04	599.08
71	LA6070169A	429965	1101281	652.69	104.38	548.31
72	LA6070170A	430254	1101293	654.75	108.16	546.59
73	LA6070171A	434155	1103837	645.15	117.26	527.89
79	LA6070178A	436232	1101041	680.54	148.72	531.82
80	LA6070179A	429570	1097317	684.99	136.76	548.23
81	LA6070180A	434183	1103845	645.42	117.74	527.68
82	LA6070181A	433474	1103306	645.00	117.00	528.00
83	LA6070182A	427337	1091366	687.68	69.46	618.22
84	LA6070183A	427774	1092376	677.55	68.24	609.31
96	LA6071004A	424411	1091775	660.27	32.28	627.99
97	LA6071005A	424995	1091414	672.53	47.48	625.05
98	LA6071006A	424827	1091129	672.12	46.30	625.82
99	LA6071007A	425656	1092392	671.05	58.14	612.91
100	LA6071037A	426825	1092563	672.03	62.20	609.83
101	LA6071039A	425497	1094852	659.17	43.24	615.93
102	LA6170004A	430414	1109078	600.69	21.54	579.15
103	LA6170010A	433898	1105710	629.99	83.26	546.73
104	LA6170011A	427004	1105838	606.74	27.28	579.46
105	LA6170021A	427060	1106882	601.88	28.00	573.88
111	LA6170063A	427011	1107059	600.09	26.74	573.35
112	LA6170069A	430743	1109156	601.32	22.46	578.86
114	LA6170073C	426845	1105679	606.37	27.18	579.19
116	LA6170080C	427350	1109469	585.00	20.76	564.24
117	LA6170081C	427431	1109352	585.00	12.30	572.70
119	LA6171004A	425025	1110952	593.96	18.12	575.84
120	LA6171006A	426459	1108027	588.53	20.82	567.71
121	LA6171009A	424628	1112373	585.00	19.18	565.82
122	LA6171010A	423437	1112996	564.66	2.66	562.00
124	LA6171014A	426958	1105902	606.25	27.44	578.81
126	LA6171024A	426176	1108601	588.52	14.10	574.42
127	LA6171025A	424828	1111188	591.03	23.52	567.51
129	LA6171029A	426096	1110077	591.09	17.72	573.37
131	LA6171035A	424283	1112473	585.00	14.50	570.50
132	LA6171037A	422339	1112924	560.00	4.56	555.44
133	LA6171039A	424560	1111343	585.83	24.28	561.55
134	LA6171040A	424415	1112501	585.00	12.22	572.78
138	LA6171044A	424922	1111204	592.01	12.80	579.21
139	LA6171045A	426614	1108241	592.27	16.04	576.23
142	LA6171049C	425463	1109962	594.28	23.80	570.48
143	LA6171050C	425948	1109915	591.67	17.60	574.07

Tabla F3, Monitoreo de Niveles estáticos May 01, Oct 01 y Oct 02 (Pozos de observación comunes para las tres campañas)

Nº Pozo	Código MARN	Coordenadas UTM		May-01		Oct-01		Oct-02
		Norte	Este	N. E.	Cota N.E	N. E.	Cota N.E	Cota N.E
				(mts)	(mts)	(mts)	(mts)	(mts)
7	LA6070026A	429844	1100291	85.54	573.42	81.5	577.46	568.07
9	LA6070100A	435921	1102793	131.3	528.17	131.76	527.71	531.12
10	LA6070056A	435986	1103239	98.76	556.57	96.74	558.59	560.17
11	LA6070057A	435675	1103165	104.24	550.75	104.74	550.25	547.70
14	LA6070132A	436607	1101321	149.4	531.46	149.56	531.30	533.29
16	LA6070113A	436127	1101563	144.24	530.39	144.5	530.13	527.80
18	LA6070139A	433153	1098712	145.8	539.25	145.76	539.29	539.30
19	LA6070130A	433428	1099838	139.54	535.47	139.56	535.45	535.86
28	LA6070146A	430704	1098710	134.5	541.28	133.4	542.38	544.53
34	LA6070122A	429103	1095368	113.08	577.28	113.64	576.72	582.48
37	LA6071004A	424411	1091775	32.34	627.93	32.48	627.79	627.86
39	LA6071 S/N	427337	1091366	68.66	619.02	72.64	615.04	618.12
40	LA6070024A	430008	1101304	105.76	547.09	104.52	548.33	548.03
50	LA6070110A	432972	1103751	109.8	530.20	110.62	529.38	532.13
61	LA6070073A	434177	1103840	118.46	526.92	66.95	578.43	528.48
65	LA6070036A	434039	1104442	111.84	528.10	112.03	527.91	529.17
67	LA6170010A	433898	1105710	83.34	546.65	83.77	546.22	546.83
71	LA6170011A	427004	1105838	24.3	582.44	26.4	580.34	579.06
88	LA6171037A	422339	1112924	4.48	555.52	5.1	554.90	555.46
118	LA6070158A	434686	1104259	112.58	527.48	113.12	526.94	528.15
121	LA6170021A	427060	1106882	25.24	576.64	26.22	575.66	574.00
131	LA6070032A	430358	1099601	103.83	564.17	103.8	564.20	564.32

Tabla F4, Monitoreo de Caudales May 01

#	Código	X	Y	Q(m3/d)
5	LA6070029A	430065	1100264	786.24
6	LA6070030A	429957	1100218	846.72
12	LA6070093A	435471	1103775	570.24
13	LA6070162A	435658	1103237	483.84
14	LA6070132A	436607	1101321	509.76
15	LA6070113B	436232	1101041	501.12
16	LA6070113A	436127	1101563	708.48
17	LA6070140A	432551	1098637	2712.96
18	LA6070139A	433153	1098712	2013.12
19	LA6070130A	433428	1099838	1874.88
23	LA6070143A	430608	1097722	2064.96
25	LA6070034A	430700	1098065	1831.68
26	LA6070145A	430405	1098157	1416.96
27	LA6070085A	430080	1098801	1209.6
33	LA6070138A	429584	1098292	4364.064

34	LA6070122A	429103	1095368	1045.44
35	LA6070136A	431023	1095872	2289.6
36	LA6071007A	435656	1092392	3404.16
46	LA6070063A	431541	1101825	2108.16
47	LA6070097A	431753	1101690	1883.52
51	LA6070090A	433446	1103423	1572.48
52	LA6070148A	433810	1102479	302.4
53	LA6070149A	433663	1102289	1330.56
54	LA6070043A	434892	1099376	1546.56
55	LA6070 S/N	435034	1099237	2013.12
56	LA6070156A	434258	1099101	1486.08
57	LA6070039A	434675	1102582	2064.96
59	LA6070074A	434326	1103784	596.16
60	LA6070075A	434283	1103849	259.2
61	LA6070073A	434177	1103840	1088.64
63	LA6070 S/N	434155	1103837	570.24
64	LA6070150A	433839	1104301	267.84
65	LA6070036A	434039	1104442	319.68
66	LA6070037A	434345	1104544	440.64
67	LA6170010A	433898	1105710	475.2
68	LA6070154A	435678	1103029	941.76
70	LA6171014A	426958	1105902	924.48
72	LA6171021A	426325	1107805	164.16
76	LA6171028A	426235	1109996	172.8
78	LA6171003A	425242	1110469	380.16
81	LA6171025A	424828	1111188	276.48
82	LA6171 S/N	424560	1111343	190.08
83	LA6171034A	424732	1111717	984.96
85	LA6171 S/N	424415	1112501	198.72
89	LA6171011A	423764	1112853	673.92
96	LA6170047A	431947	1110268	155.52
99	LA6170 S/N	422432	1112394	345.6
103	LA6170059A	438023	1109220	146.88
119	LA6070135A	434936	1096636	1926.72
121	LA6170021A	427060	1106882	1278.72
122	LA6170063A	427011	1107059	768.96
123	LA6170 S/N	426205	1108265	224.64
125	LA6171 S/N	425075	1109933	717.12
126	LA6070 S/N	432123	1092560	518.4
130	LA6070152A	427286	1102334	120.96
132	LA6070147A	430426	1099352	4354.56
	LA6070 S/N			
133	2	430374	1099375	5495.04
136	LA6171 S/N	426699	1105856	1391.04
142	LA6070129A	435567	1100470	1581.12
146	LA6070021A	430274	1104602	984.96
			Total	71877.024

Tabla F5, Monitoreo de Caudales Oct 01

#	Código	X	Y	Q(m3/d)
5	LA6070029A	430065	1100264	820.8
6	LA6070030A	429957	1100218	907.2
12	LA6070093A	435471	1103775	648
13	LA6070162A	435658	1103237	691.2
14	LA6070132A	436607	1101321	570.24
15	LA6070113B	436232	1101041	518.4
16	LA6070113A	436127	1101563	760.32
17	LA6070140A	432551	1098637	2522.88
18	LA6070139A	433153	1098712	2013.12
19	LA6070130A	433428	1099838	1892.16
23	LA6070143A	430608	1097722	1080
25	LA6070034A	430700	1098065	2108.16
26	LA6070145A	430405	1098157	1486.08
27	LA6070085A	430080	1098801	1589.76
33	LA6070138A	429584	1098292	3939.84
34	LA6070122A	429103	1095368	725.76
35	LA6070136A	431023	1095872	1071.36
36	LA6071007A	435656	1092392	2669.76
46	LA6070063A	431541	1101825	1926.72
47	LA6070097A	431753	1101690	1926.72
51	LA6070090B	433446	1103423	1356.48
52	LA6070149A	433810	1102479	1157.76
53	LA6070148A	433663	1102289	259.2
54	LA6070043A	434892	1099376	1460.16
55	LA6070 S/N	435034	1099237	1399.68
56	LA6070156A	434258	1099101	1373.76
57	LA6070039A	434675	1102582	1926.72
59	LA6070074A	434326	1103784	535.68
60	LA6070075A	434283	1103849	285.12
61	LA6070073B	434177	1103840	941.76
63	LA6070 S/N	434155	1103837	587.52
64	LA6070150A	433839	1104301	259.2
65	LA6070036A	434039	1104442	622.08
66	LA6070037A	434345	1104544	285.12
67	LA6170010A	433898	1105710	423.36
68	LA6070154A	435678	1103029	1010.88
70	LA6171014A	426958	1105902	734.4
72	LA6171021A	426325	1107805	328.32
76	LA6171028A	426235	1109996	129.6
78	LA6171003A	425242	1110469	95.04
81	LA6171025A	424828	1111188	302.4
82	LA6171 S/N	424560	1111343	77.76
83	LA6171034A	424732	1111717	224.64
85	LA6171 S/N	424415	1112501	302.4
89	LA6171011A	423764	1112853	302.4

96	LA6170047A	431947	1110268	34.56
99	LA6170 S/N	422432	1112394	233.28
103	LA6170059A	438023	1109220	86.4
119	LA6070135A	434936	1096636	2013.12
121	LA6170021A	427060	1106882	1131.84
122	LA6170063A	427011	1107059	691.2
123	LA6170 S/N	426205	1108265	259.2
125	LA6171 S/N	425075	1109933	302.4
126	LA6070 S/N	432123	1092560	501.12
130	LA6070152A	427286	1102334	138.24
132	LA6070147A	430426	1099352	5037.12
	LA6070 S/N			
133	2	430374	1099375	4777.92
136	LA6171 S/N	426699	1105856	1512
142	LA6070129A	435567	1100470	1373.76
146	LA6070021A	430274	1104602	786.24
			Total	65128.32

Tabla F6, Monitoreo de Caudales Oct 02

#	Código MARN	Coordenadas UTM		Caudal Q(l/s)	Caudal Q(m3/d)
		Este	Norte		
2	LA6070021A	430274	1104602	13.60	1175.04
5	LA6070029A	430065	1100264	17.06	1473.98
10	LA6070036A	434039	1104442	3.49	301.54
11	LA6070037A	434345	1104544	2.36	203.90
12	LA6070039A	434675	1102582	26.31	2273.18
13	LA6070043A	434892	1099376	16.31	1409.18
15	LA6070049A	433419	1089824	15.55	1343.52
16	LA6070050A	433542	1090040	8.01	692.06
19	LA6070059A	430635	1104363	2.57	222.05
20	LA6070063A	431541	1101825	32.11	2774.30
23	LA6070074A	434326	1103784	17.71	1530.14
24	LA6070075A	434283	1103849	5.12	442.37
25	LA6070085A	430080	1098801	31.41	2713.82
28	LA6070093A	435471	1103775	7.73	667.87
29	LA6070097A	431753	1101690	15.32	1323.65
33	LA6070111A	435388	1099556	5.18	447.55
35	LA6070113A	436127	1101563	7.36	635.90
39	LA6070122A	429103	1095368	9.81	847.58
45	LA6070130A	433428	1099838	15.79	1364.26
49	LA6070135A	434930	1096654	11.79	1018.66
50	LA6070136A	431023	1095872	9.87	852.77
52	LA6070138A	429584	1098292	50.00	4320.00
53	LA6070139A	433153	1098712	29.23	2525.47
55	LA6070143A	430608	1097722	17.87	1543.97
56	LA6070144A	430435	1097492	20.62	1781.57
57	LA6070145A	430405	1098157	18.32	1582.85
59	LA6070147A	430426	1099352	57.69	4984.42
60	LA6070148A	433663	1102289	2.66	229.82

61	LA6070149A	433810	1102479	13.97	1207.01
62	LA6070150A	433839	1104301	1.05	90.72
63	LA6070154A	435678	1103029	11.43	987.55
64	LA6070156A	434258	1099101	19.31	1668.38
67	LA6070161A	434141	1103490	10.87	939.17
68	LA6070162A	435658	1103237	6.23	538.27
69	LA6070163A	427578	1094479	3.06	264.38
72	LA6070170A	430254	1101293	7.14	616.90
73	LA6070171A	434155	1103837	7.78	672.19
75	LA6070173A	432123	1092560	8.48	732.67
76	LA6070174A	430822	1099485	22.40	1935.36
77	LA6070175A	430374	1099375	39.42	3405.89
78	LA6070177A	435034	1099237	23.79	2055.46
79	LA6070178A	436232	1101041	6.68	577.15
81	LA6070180A	434183	1103845	9.01	778.46
82	LA6070181A	433474	1103306	16.05	1386.72
85	LA6070184C	438748	1094675	19.61	1694.30
94	LA6070194C	438296	1095111	10.13	875.23
95	LA6070195A	428841	1095373	4.22	364.61
99	LA6071007A	425656	1092392	25.53	2205.79
100	LA6071037A	426825	1092563	29.82	2576.45
103	LA6170010A	433898	1105710	5.48	473.47
105	LA6170021A	427060	1106882	12.70	1097.28
106	LA6170037A	430395	1109337	1.77	152.93
107	LA6170047C	431947	1110268	1.77	152.93
111	LA6170063A	427011	1107059	6.77	584.93
113	LA6170071C	432655	1111725	1.92	165.89
114	LA6170073C	426845	1105679	7.69	664.42
118	LA6171003C	425242	1110469	1.13	97.63
123	LA6171011A	423764	1112853	2.66	229.82
125	LA6171021A	426325	1107805	1.73	149.47
128	LA6171028A	426235	1109996	1.84	158.98
130	LA6171034A	424732	1111717	1.50	129.60
132	LA6171037A	422339	1112924	3.58	309.31
135	LA6171041C	423710	1112856	3.91	337.82
136	LA6171042A	425075	1109933	2.72	235.01
137	LA6171043A	426699	1105856	12.55	1084.32
144	LA6171051C	424925	1110817	0.64	55.30
145	LA6171052C	425622	1111354	0.42	36.29
146	LA6171054C	424717	1112249	1.17	101.09
147	LA6171055C	424818	1112285	0.73	63.07
148	LA6171057C	426178	1107683	5.49	474.34
149	LA6171058C	426209	1108259	1.13	97.63
				Total	73105.63

Bdigital.ula.ve

APÉNDICE G

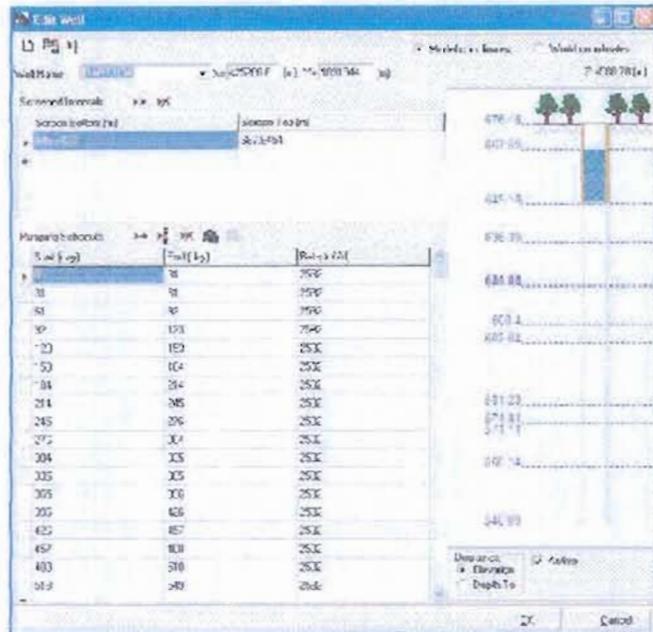


Figura G1, Ubicación de las rejillas para la inyección de caudal en capas someras.

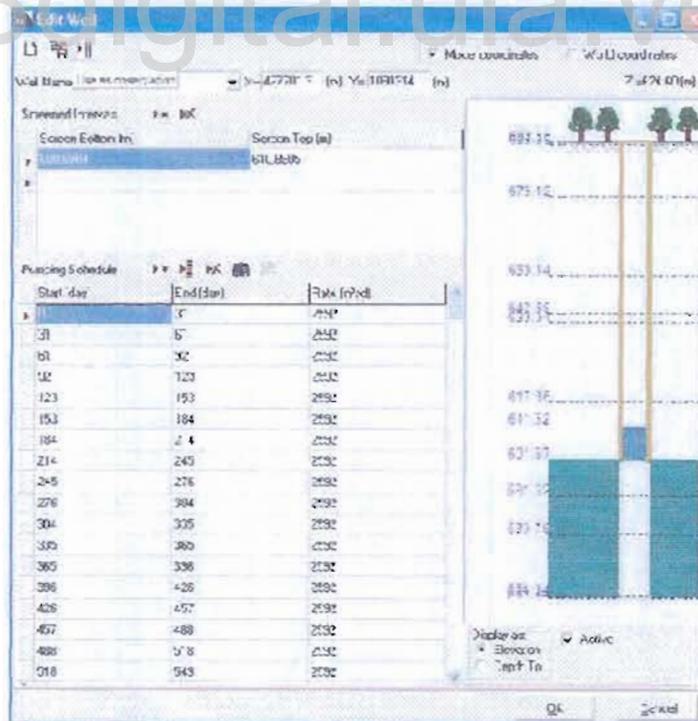


Figura G2, Ubicación de las rejillas para la inyección de caudal en capas profundas.

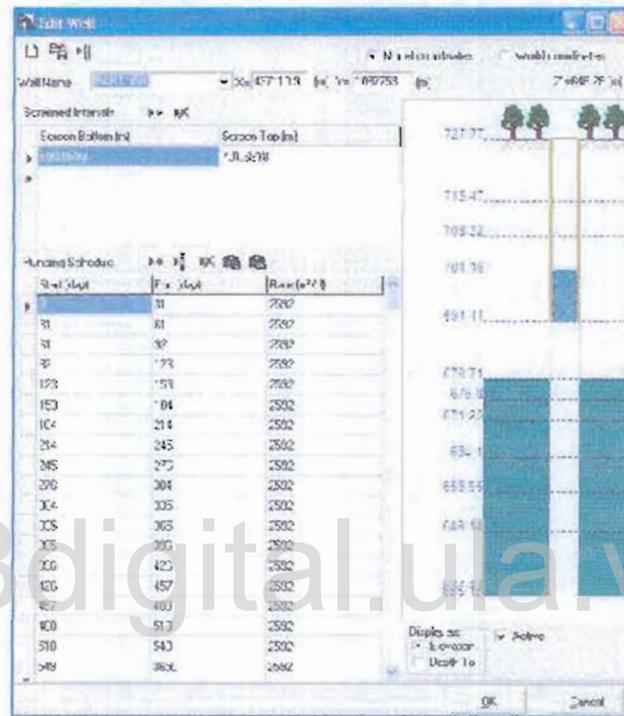


Figura C3. Ubicación de las rejillas para la inyección de caudal en la quebrada Las Guardias.

Bdigital.ula.ve

APÉNDICE H

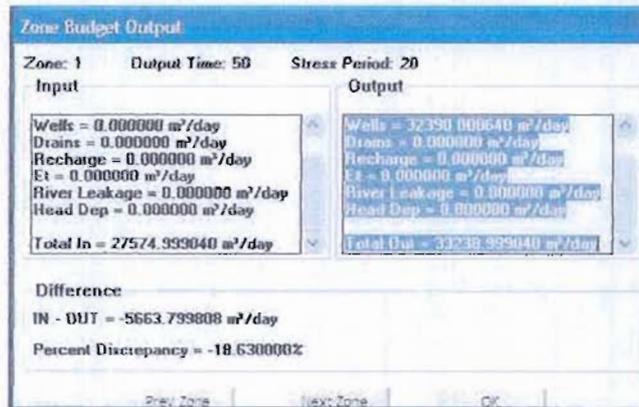


Figura H1. Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas someras para 549 días, con bombeo.

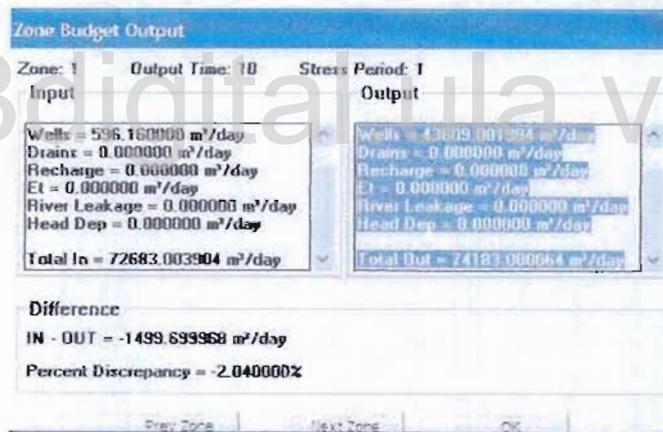


Figura H2. Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas someras para 10 años, con bombeo.

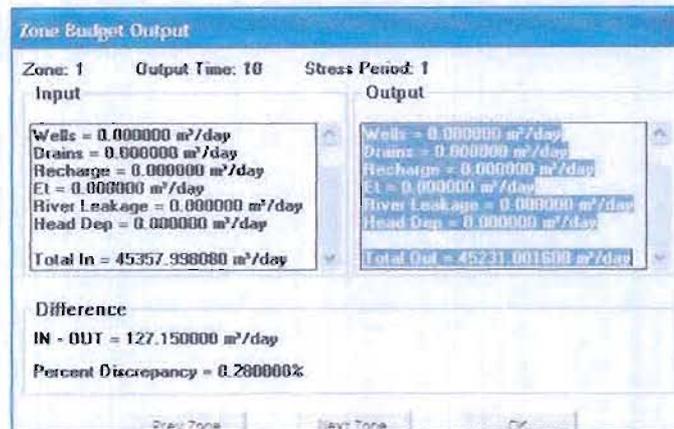


Figura H3 Entradas y salidas de agua del acuífero.
Recarga en capas someras para 10 años, sin bombeo.

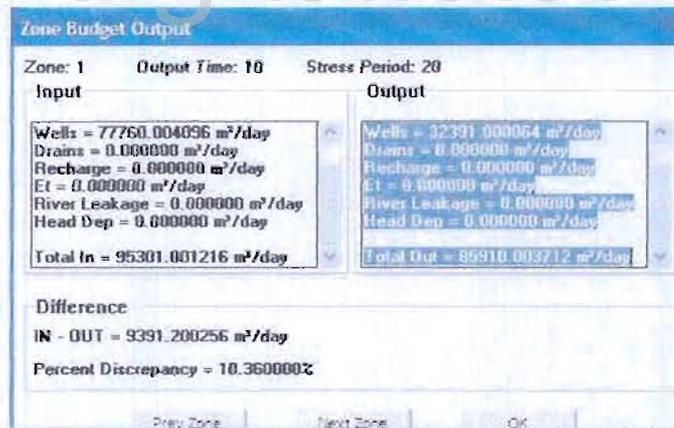


Figura H4 Entradas y salidas de agua del acuífero.
Recarga en capas profundas 549 días, con bombeo.

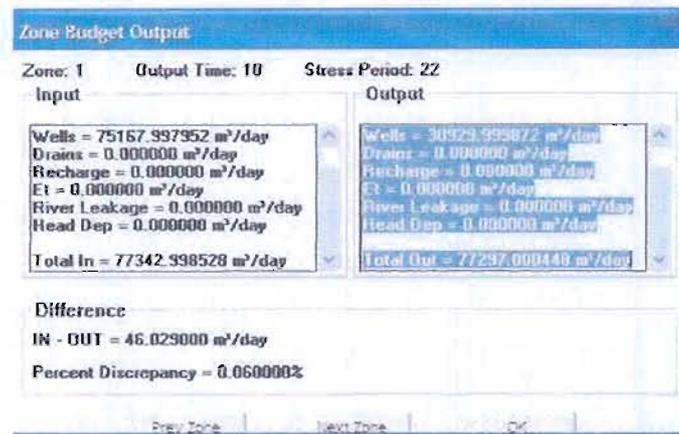


Figura H5 Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas profundas 10 años, con bombeo.

Bdigital.ula.ve

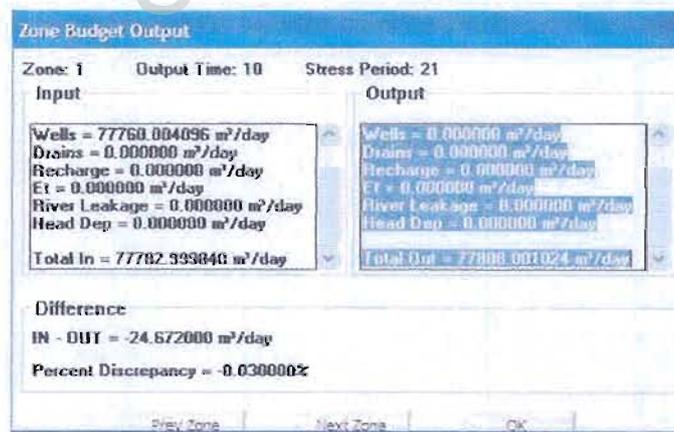


Figura H6. Entradas y salidas de agua del acuífero. Recarga en capas profundas 10 años, sin bombeo.

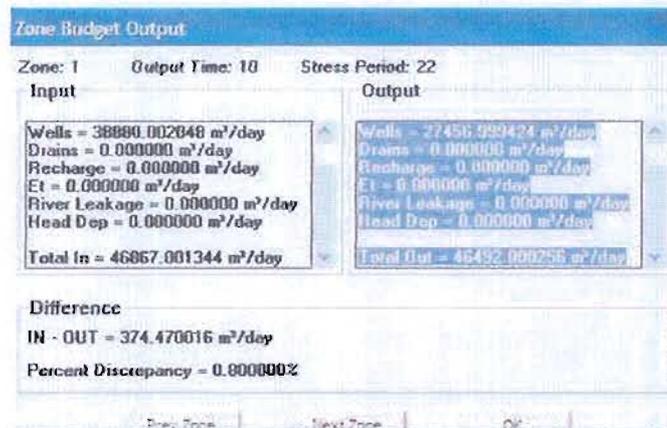


Figura H7 Entradas y salidas de agua del acuífero.
 Recarga en Quebrada Las Guardias y portal de salida, 10 años con bombeo.

Bdigital.ula.ve

APÉNDICE I

Bdigital.ula.ve

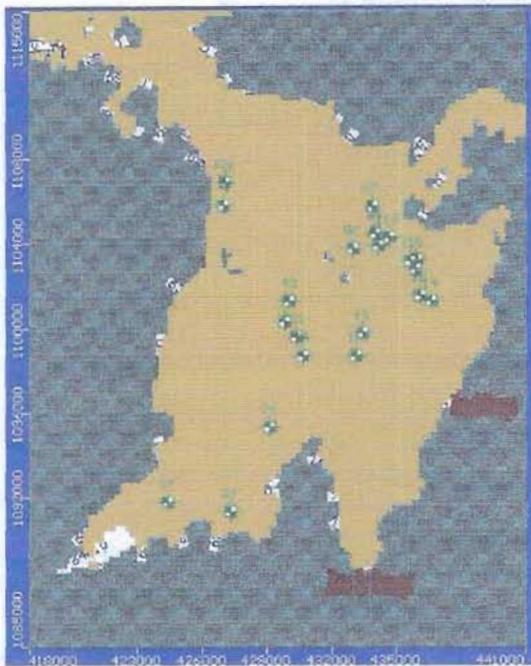
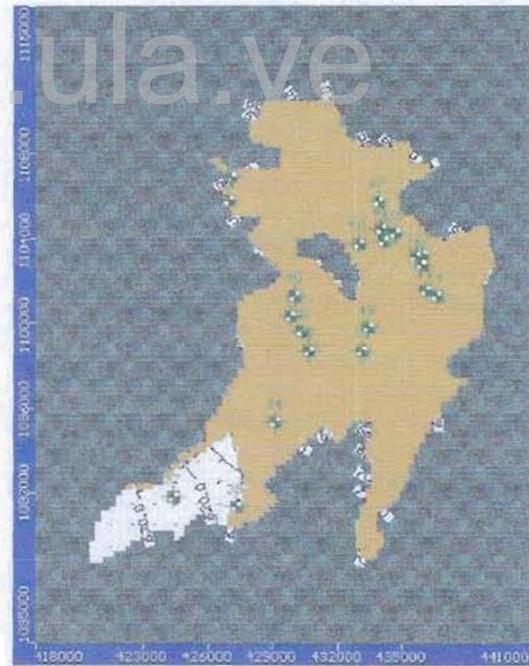


Figura I.1 ■ Celdas secas Capa 1, Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 549 días

Bdigital.ula.ve

Figura I.2 ■ Celdas secas Capa 6, Curvas isopiezas. Recarga por capas someras 549 días



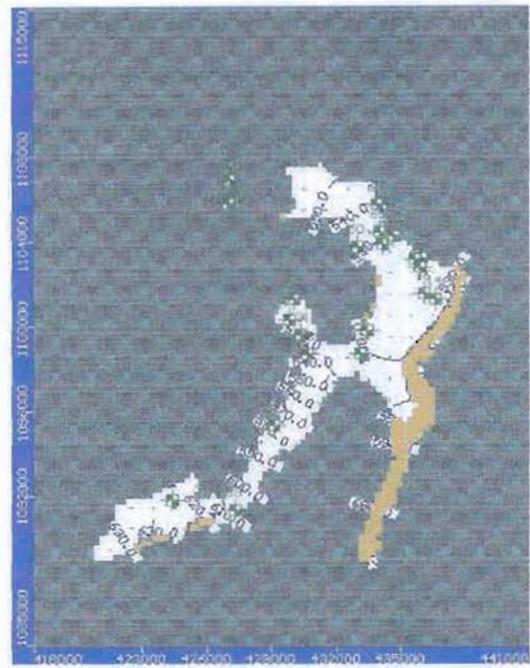
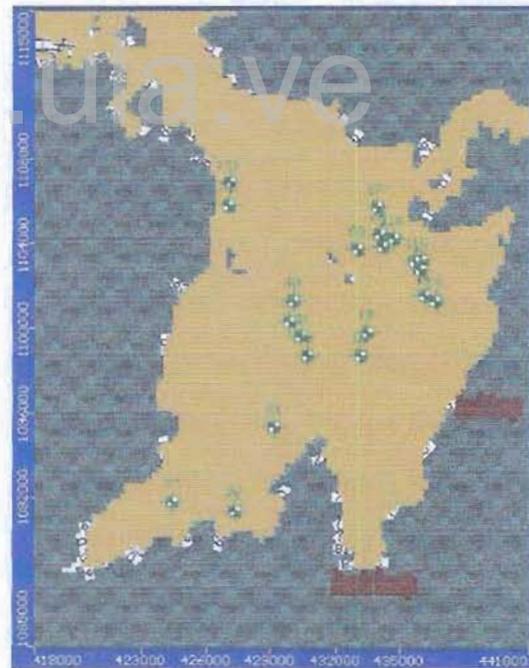


Figura I.3 Celdas secas
 Capa 12, Curvas isopiezas.
 Recarga por capas someras
 549 días

Bdigital.ua.ve

Figura I.4 Celdas secas Capa 1,
 Curvas isopiezas.
 Recarga por capas someras
 10 años con bombeo



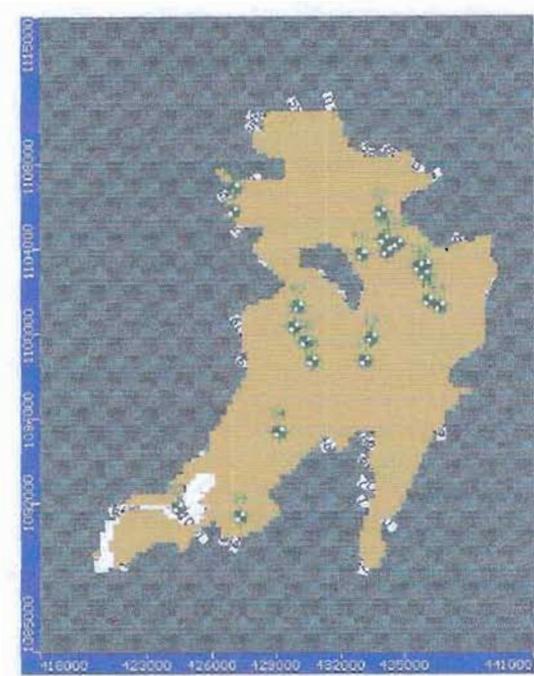
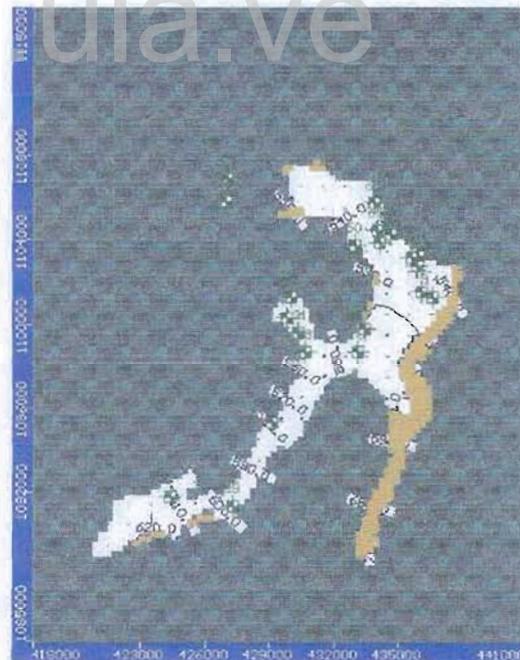


Figura I.5 Celdas secas
 Capa 6, Curvas isopiezas.
 Recarga por capas someras
 10 años con bombeo

Bdigital ula.ve

Figura I.6 Celdas secas Capa 12,
 Curvas isopiezas.
 Recarga por capas someras
 10 años con bombeo



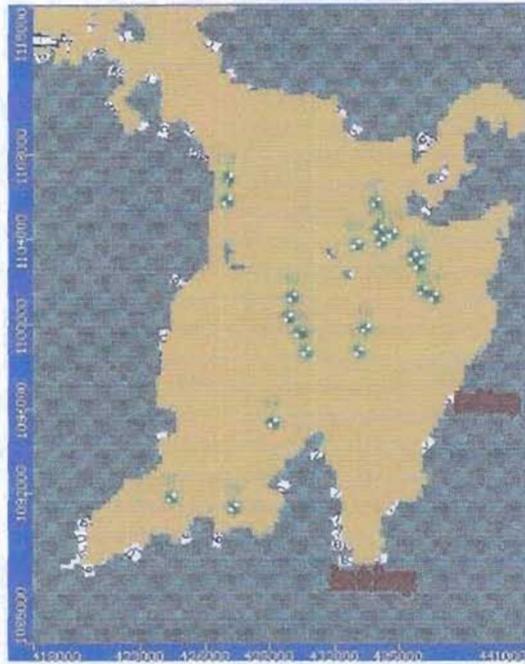
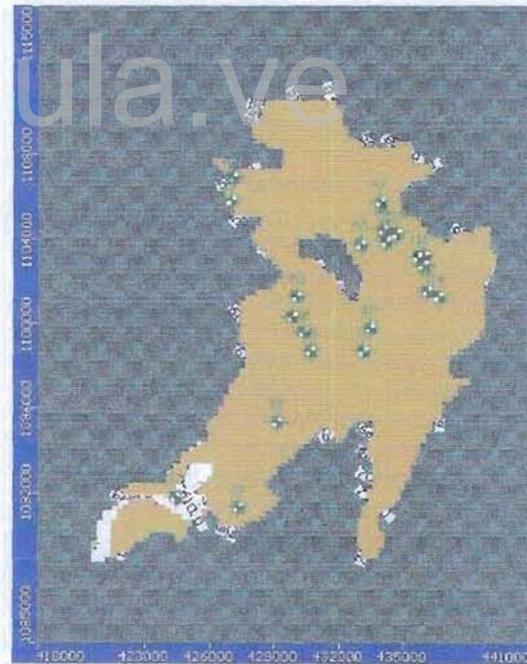


Figura I.7 Celdas secas
Capa 1, Curvas isopiezas.
Recarga por capas someras
10 años sin bombeo

Bdigital.ula.ve

Figura I.8 Celdas secas Capa 6,
Curvas isopiezas.
Recarga por capas someras
10 años sin bombeo



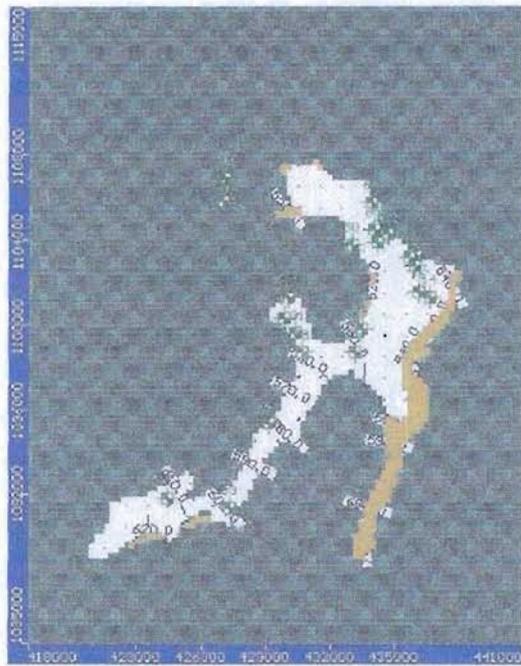
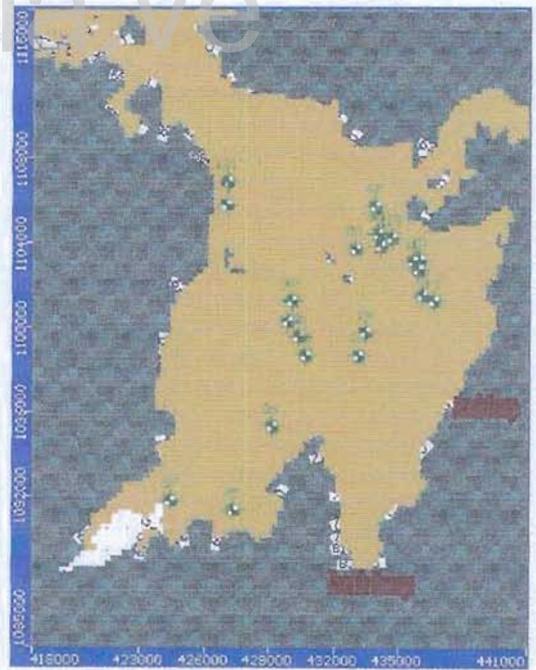


Figura I.9 Celdas secas
 Capa 12, Curvas isopiezas.
 Recarga por capas someras
 10 años sin bombeo

Bdigital.uleve

Figura I.10 Celdas secas Capa 1,
 Curvas isopiezas.
 Recarga por capas profundas
 549 días



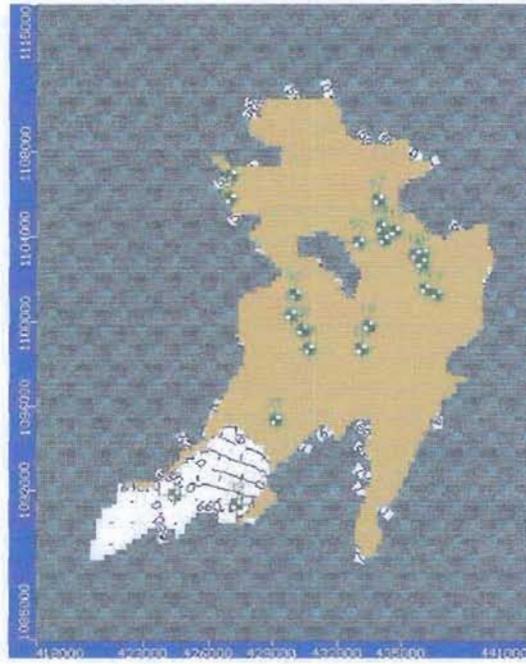
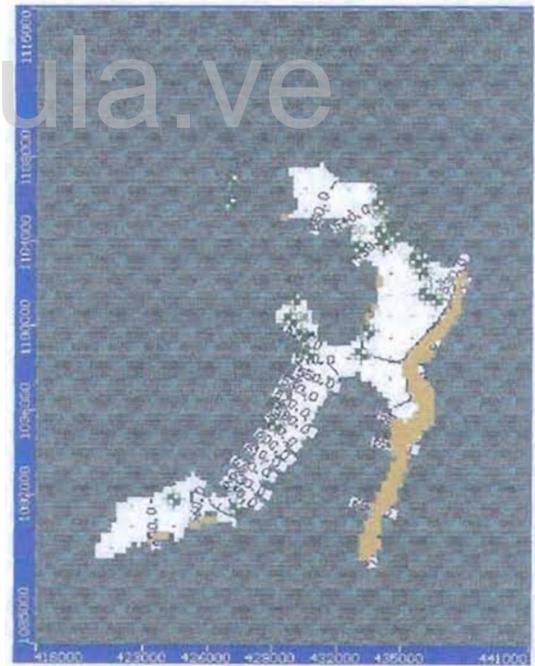


Figura I.11 ■ Celdas secas
Capa 6, Curvas isopiezas.
Recarga por capas profundas
549 días

Bdigital.ula.ve

Figura I.12 ■ Celdas secas Capa 12,
Curvas isopiezas.
Recarga por capas profundas
549 días



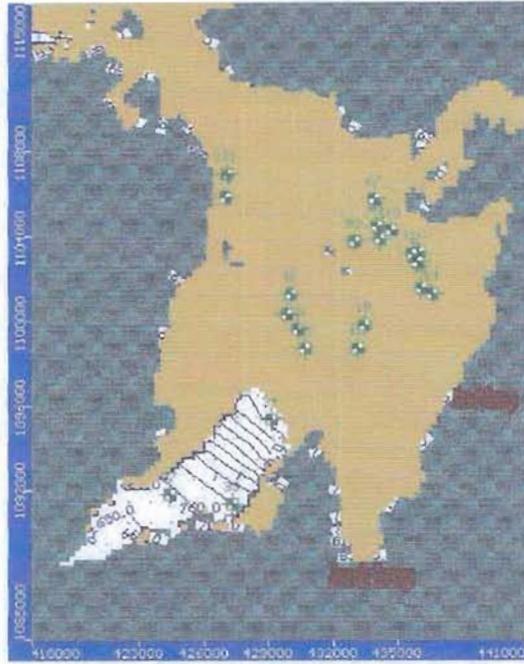
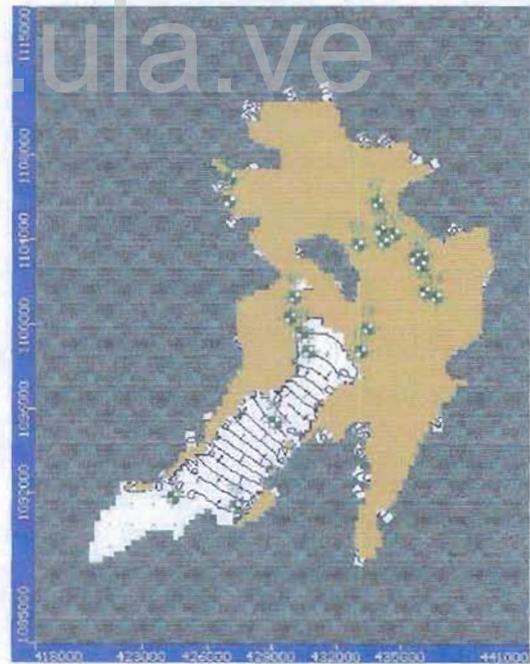


Figura I.13 ■ Celdas secas
Capa 1, Curvas isopiezas.
Recarga por capas profundas
10 años con bombeo

Bdigital.ula.ve

Figura I.14 ■ Celdas secas Capa 6,
Curvas isopiezas.
Recarga por capas profundas
10 años con bombeo



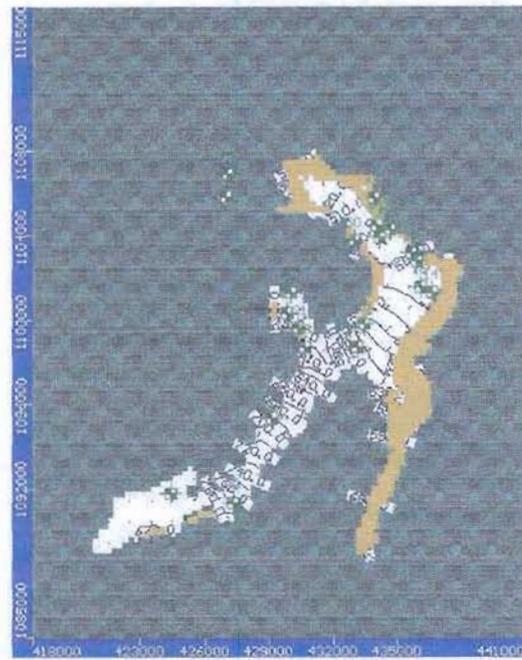


Figura I.15 ■ Celdas secas
 Capa 12, Curvas isopiezas.
 Recarga por capas profundas
 10 años con bombeo

Bdigitalula.ve

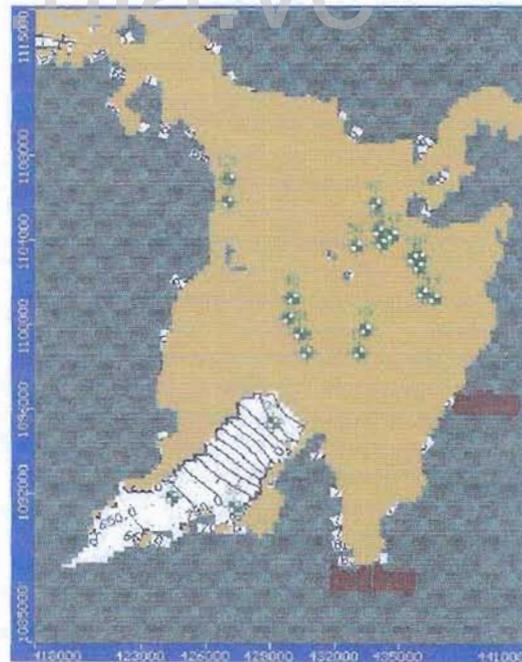


Figura I.16 ■ Celdas secas Capa 1,
 Curvas isopiezas.
 Recarga por capas profundas
 10 años sin bombeo

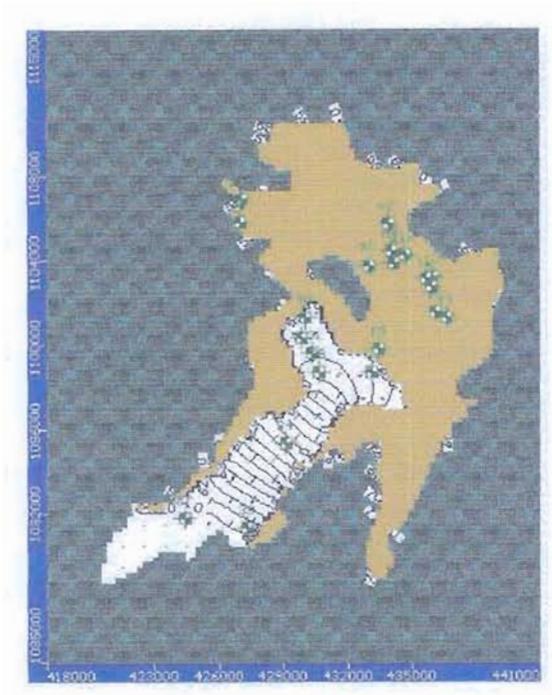
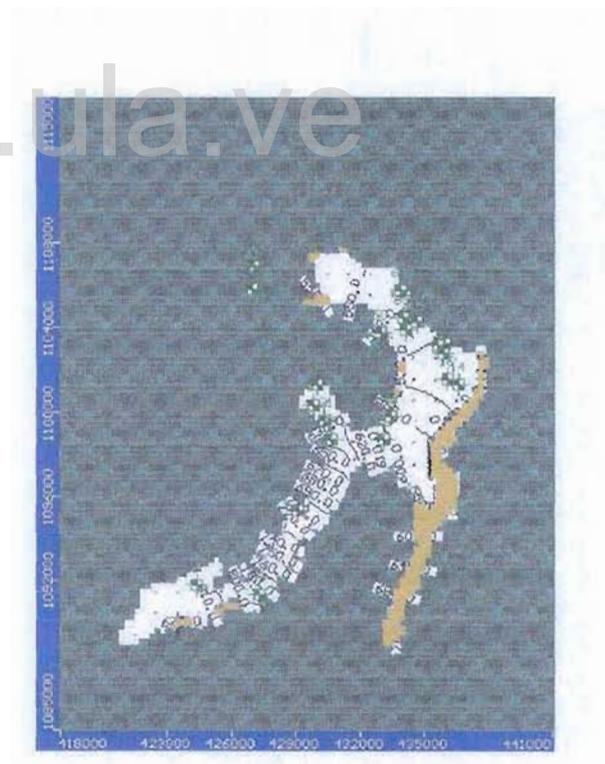


Figura I.17 ■ Celdas secas
 Capa 6, Curvas isopiezas.
 Recarga por capas profundas
 10 años sin bombeo

Bdigital.ula.ve

Figura I.18 ■ Celdas secas Capa 12,
 Curvas isopiezas.
 Recarga por capas profundas
 10 años sin bombeo



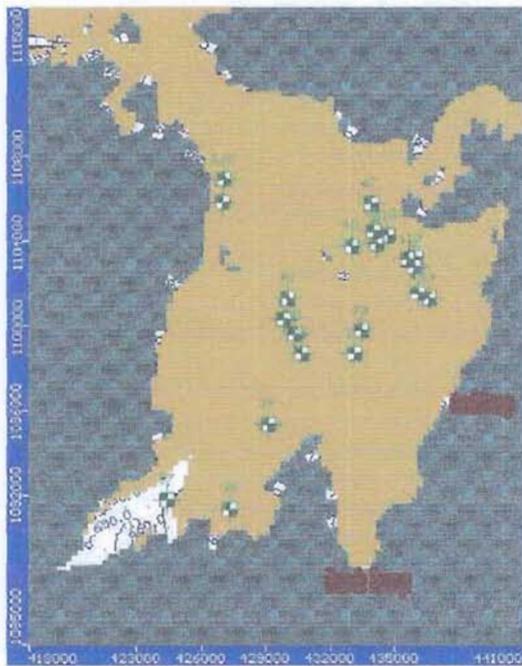
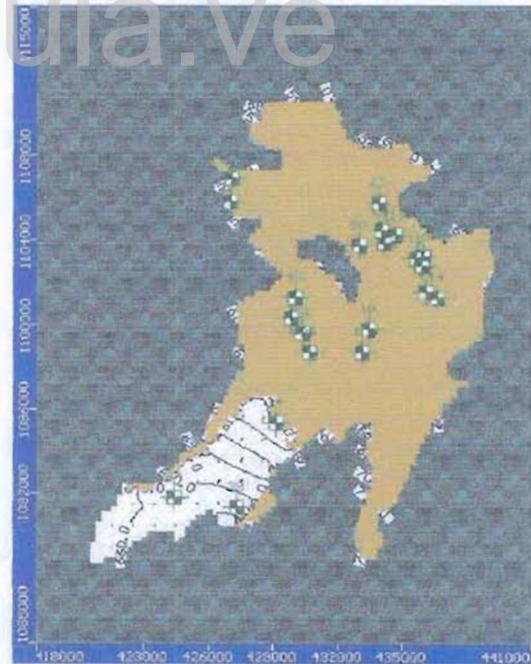


Figura I.19 ■ Celdas secas
 Capa 1, Curvas isopiezas.
 Recarga por Quebrada Las
 Guardias y Portal de salida.
 Capas profundas
 10 años con bombeo

Bdigital.ula.ve

Figura I.20 ■ Celdas secas Capa 6,
 Curvas isopiezas.
 Recarga por Quebrada Las Guardias
 Y portal de salida.
 capas profundas
 10 años con bombeo



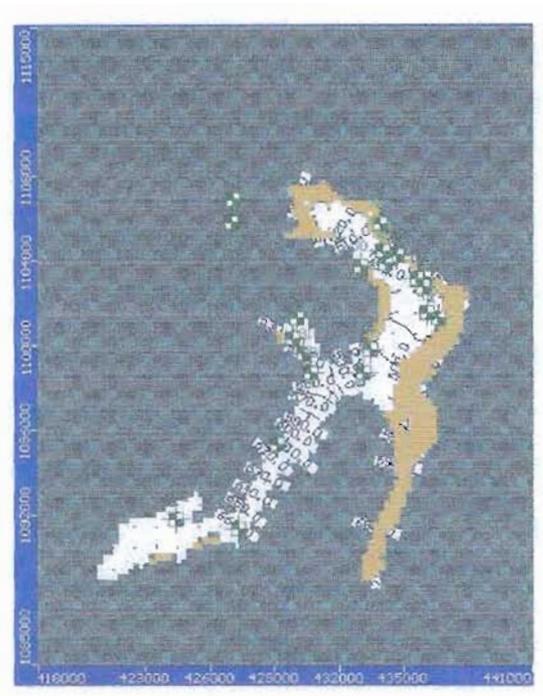


Figura I.21 ■ Celdas secas
 Capa 12, Curvas isopiezas.
 Recarga por Quebrada Las
 Guardias y Portal de salida.
 Capas profundas
 10 años con bombeo

Bdigital.ula.ve