



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES "ACATLAN"**

*Aplicación de un modelo de simulación de
aguas subterráneas (Modflow) para predecir
el impacto de las extracciones en el
almacenamiento y conservación de los acuíferos*

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL



PRESENTA

Juan Marcos Montoya Fragoso

ASESOR: ING. JORGE ESTEBAN ATHALA MOLANO.



ENERO DE 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Juan Marcos

Montoya Fragoso

FECHA: 13 de enero de 2004

FIRMA: 

Al único ingeniero que realiza
Sus obras con amor y perfección: DIOS
Por permitirme conocer mediante la
Ingeniería un poco más su creación

A los que siempre me han brindado
Su apoyo incondicional: Mis Padres
Por darme lo mejor que un hijo puede recibir:
Ejemplos de amor y lucha constante

A los que han sido mi motivación
Para ser mejor cada día: Oscar y Sarai
Por ser una parte importante en mis
Aspiraciones pasadas y futuras

A todas las personas que me han transmitido
Sus conocimientos y experiencias: Profesores y amigos
En especial al Ing. Jorge Esteban Athala
Por su tiempo y consejos dedicados a la
Culminación de este trabajo

ÍNDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

Contenido	1- 1
Introducción	1- 2
Antecedentes históricos	1- 3
¿Qué es Modflow?	1- 5

CAPITULO 2: MÉTODOS QUE SUSTENTAN AL MODFLOW

Contenido	2- 1
Introducción	2- 2
Concepto de modelo	2- 2
Concepto de sistema	2- 2
Concepto de modelo	2- 3
Concepto de simulación	2- 3
Tipos de modelos	2- 4
Modelos icónicos o físicos	2- 4
Modelo físico reducido	2- 5
Modelo físico de tanque de arena	2- 5
Modelos simbólicos o matemáticos	2- 7
Modelo matemático conceptual	2- 8
Modelo matemático determinístico	2- 8
Modelo matemático genérico	2- 9
Modelos Analógicos	2- 9
Modelo análogo eléctrico	2- 10
Construcción de un modelo	2- 15
Limitaciones y usos de los modelos	2- 17
Limitaciones de los modelos matemáticos	2- 17
Usos de los modelos matemáticos	2- 18

Métodos y técnicas matemáticas empleadas por el MODFLOW	2- 20
Método del elemento finito	2 -22
Método de diferencias finitas	2- 23
Descripción de la malla para las diferencias finitas	2- 23
Derivación de la ecuación de diferencias finitas	2- 26
Sistema de solución de las ecuaciones de diferencias finitas	2- 30

CAPITULO 3: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA GEOHIDROLOGÍA APLICADOS EN EL MODFLOW

Contenido	3- 1
Introducción	3- 3
Conceptos básicos de hidráulica aplicados en Geohidrología	3- 4
Carga hidráulica total	3- 4
Nivel de agua freática (NAF)	3- 6
Formaciones geológicas subterráneas	3- 8
Estratos confinantes	3- 8
Acuífugo	3- 8
Acuitardo	3- 8
Acuicludo	3- 8
Acuíferos	3- 9
Acuífero libre	3- 9
Acuífero confinado	3- 10
Acuífero semiconfinado	3- 11
Ecuaciones que gobiernan el flujo del agua subterránea	3- 12
El estudio de las ecuaciones del flujo de agua subterránea	3- 12
Ley de Darcy	3- 13
Ley de la conservación de la masa de un fluido	3- 15
Parámetros que caracterizan las condiciones de transmisión y almacenamiento de los acuíferos	3- 18
Porosidad	3- 18
Porosidad y clasificación de sedimentos	3- 20
Permeabilidad	3- 23
Conductividad hidráulica	3- 24
Métodos de medición para la conductividad hidráulica	3- 27
Métodos empíricos o semiempíricos	3- 27
Métodos de laboratorio: Permeámetros	3- 27
Método de campo: Prueba de trazadores	3- 30

Método de campo: Prueba en pozos de gran diámetro	3- 32
Método de campo: Pruebas en pozos de bombeo	3- 33
Homogeneidad e isotropía	3- 35
Rendimiento específico	3- 37
Retención específica	3- 38
Transmisividad	3- 39
Coeficiente de almacenamiento	3- 39
Almacenamiento específico	3- 40
Condiciones de flujo de agua subterránea en pozos de bombeo	3- 41
Importancia del estudio de los pozos	3- 41
Flujo radial establecido	3- 42
Flujo radial establecido en un acuífero confinado	3- 42
Flujo radial establecido en un acuífero libre	3- 45
Flujo radial establecido en un acuífero semiconfinado	3- 46
Flujo radial transitorio	3- 50
Flujo radial transitorio en un acuífero confinado	3- 51
Método de solución de Theis	3- 51
Método de solución de Cooper – Jacob	3- 52
Flujo radial transitorio en un acuífero libre	3- 54
Flujo radial transitorio en un acuífero semiconfinado sin almacenamiento en el acuitardo (acuitardo incompresible)	3- 57
Flujo radial transitorio en un acuífero semiconfinado con almacenamiento en el acuitardo (acuitardo compresible)	3- 60

CAPITULO 4: ESTRUCTURACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MODFLOW

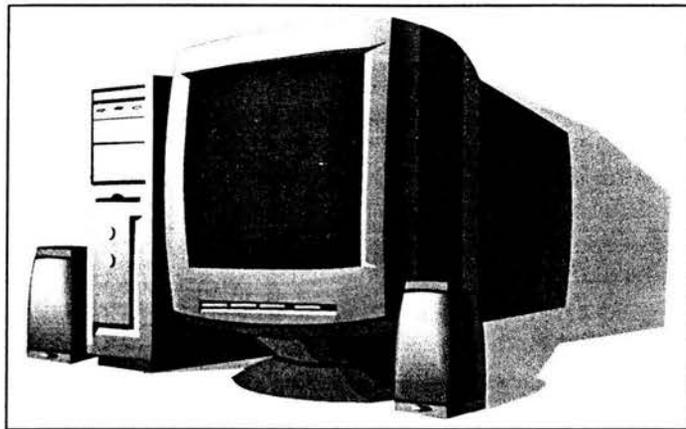
Contenido	4- 1
Estructuración	4- 2
Basic package (paquete básico)	4- 6
Block centered flow package	4- 8
Well package (paquete para pozos)	4- 9
River package (paquete para ríos)	4- 10
Drain package (paquete para drenaje)	4- 12
Recharge package (paquete de recarga)	4- 13
Evapotranspiration package (paquete de evapotranspiración)	4- 14
Solver packages (paquetes de solución)	4- 16

Funcionamiento	4- 18
Condiciones iniciales	4- 18
Condiciones de frontera	4- 19
Resolución del problema	4- 22
Calibración y verificación	4- 23
Resultados	4- 24

CAPITULO 5: EJEMPLOS PRÁCTICOS: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Contenido	5- 1
Introducción	5- 2
Afectación de tres pozos por una fuente de contaminación	5- 3
Objetivo del problema	5- 3
Breve descripción	5- 3
Entrada de datos	5- 4
Condiciones de explotación	5- 12
Ejecución del programa	5- 26
Resultados	5- 26
Emisión de contaminantes en la zona de captación de un acuífero	5- 38
Objetivos del problema	5- 38
Breve descripción	5- 38
Entrada de datos	5- 40
Condiciones de explotación	5- 42
Ejecución del programa	5- 56
Resultados	5- 60
Efectos de una fosa abandonada en dos pozos de suministro	5- 66
Objetivos del problema	5- 66
Breve descripción	5- 66
Entrada de datos	5- 67
Condiciones de explotación	5- 73
Ejecución del programa	5- 85
Resultados	5- 86
Conclusiones	6- 1
Bibliografía	

CAPÍTULO 1



Introducción

CONTENIDO DEL PRIMER CAPÍTULO

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1 Introducción
- 1.2 Antecedentes históricos
- 1.3 ¿Qué es Modflow?

1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Durante el tiempo que el hombre ha habitado la tierra, siempre ha buscado entender los fenómenos que acontecen a su alrededor. La ciencia es el medio para encontrar respuestas, la tecnología es la ciencia aplicada. Desde la aparición de la primer computadora se ha registrado un avance, a veces directa o indirectamente, en todos los campos del desarrollo humano. La presente investigación es producto de ese avance vertiginoso en la informática.

En el campo de la Ingeniería Civil, existen actualmente un sin número de programas que son usados como una poderosa herramienta por los ingenieros para descifrar las incógnitas que se presentan en los problemas de la vida laboral o científica. Cada campo de la Ingeniería Civil: Estructuras, Construcción, Sistemas, Geotecnia e Hidráulica cuenta con algún tipo de programa, en algunos casos son tan sofisticados que son reconocidos legalmente y en otros comienzan apenas a surgir.

Para el caso de la hidráulica subterránea, como una parte de la Geohidrología, el Visual MODFLOW ha demostrado ser el modelo más usado, debido a que tiene diversas ventajas que serán explicadas más adelante, en este mismo capítulo.

Muchas veces se manejan términos de forma cotidiana aunque algunas ocasiones no se les da la interpretación correcta, por ejemplo Visual MODFLOW se define como un modelo que simula un sistema mediante métodos numéricos, para entenderlo mejor, en el capítulo 2 se dará una definición detallada de cada uno de los términos y se explicarán además las bases que utiliza el MODFLOW como modelo para resolver problemas de agua subterránea.

El programa se presenta en un ambiente familiar y sencillo para el usuario, sin embargo es necesario que éste tenga las bases teóricas de Geohidrología para que pueda verificar y validar los datos introducidos y sobre todo para que pueda interpretar los resultados arrojados después de la simulación. El capítulo 3 esta dedicado para este propósito, en él se dan los conceptos básicos, se mencionan las leyes que rigen el almacenamiento y movimiento de agua subterránea en medios porosos.

El capítulo 4 trata de la estructuración y funcionamiento del programa, es el primer contacto que el usuario tiene con el MODFLOW, se verán los distintos procedimientos que son empleados en la simulación, los menús y la forma en la que están distribuidos dentro del modelo, algunas tareas que pueden ser simuladas, sin embargo el quinto capítulo contiene la aplicación del MODFLOW, en él se resolverán tres problemas cada uno con sus propias características.

Cada uno de los cinco capítulos presentados contienen imágenes que ayudan a comprender mejor el texto, a si mismo existen gráficas y tablas que sintetizan la información. Para el caso del capítulo 5, en la resolución de problemas, cada uno cuenta con imágenes que van llevando de la mano al usuario del MODFLOW. El primer problema dará los pasos para que el usuario se familiarice con las funciones básicas del programa, en él se tienen tres pozos de suministro al sur de una planta de sustancias químicas, los cuales gracias a la simulación, podemos observar el comportamiento de los niveles hidráulicos del acuífero. En el segundo problema se compararán los resultados del MODFLOW con los de otro problema resuelto en 1987 el cual usó un solucionador distinto. El problema tres demostrará la influencia que tiene un pozo que fue abandonado, quizá tiempo atrás, sobre dos pozos de bombeo en operación, cuando existe un derrame de combustible en los tanques de almacenamiento de un aeropuerto.

Si el presente trabajo logra despertar una pequeña inquietud en la mente del lector acerca del uso del Visual MODFLOW, y hacer más fuerte su curiosidad sobre las simulaciones por computadora entonces se habrá logrado el principal objetivo de este trabajo.

1.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Indudablemente el desarrollo de la ciencia que se ocupa del agua subterránea empezó hace muchos siglos, el conocimiento acumulado durante tanto tiempo ha permitido aprovechar, como otras ciencias lo hacen, la herramienta más extendida y empleada por los científicos modernos: la computadora.

Desde un punto de vista histórico es importante entender la evolución de los modelos que hicieron posible el desarrollo de la tecnología empleada por la Geohidrología. Los modelos matemáticos se desarrollaron en los últimos veinticinco años y fueron influenciados por los modelos físicos y eléctricos de forma análoga los cuales existían ya en los años cincuentas y sesentas. Los primeros esfuerzos de un modelo físico de interés aparecieron en los años cincuentas para explicar el flujo del agua subterránea. Estos fueron cajas de arena o placas paralelas de vidrio (entre los cuales un fluido viscoso simulaba el flujo del agua subterránea). En el caso de las cajas de arena, trazadores (colorantes o electrólitos como la sal) eran inyectados, el movimiento del agua era estudiado, se observaba el curso del flujo a través de un arreglo geológico común tales como lentes permeables y fallas. Estos modelos físicos fueron dentro de muy poco seguidos por modelos eléctricos los cuales están basados en una forma análoga entre la ley de Ohm del flujo de electricidad y la ley de Darcy para el flujo de agua en un medio poroso. A través de usos de largas tablas con alambres, resistores y capacitores, el flujo del agua subterránea en sistemas de extensos acuíferos podía ser simulado (Walton,1970). Los modelos análogos, físicos y eléctricos fueron principalmente modelos de flujo, en los cuales el movimiento del agua subterránea contaminada era raramente estudiada.

Los modelos análogos fueron muy populares en la década de los sesentas pero a mediados de los años setentas éstos fueron completamente reemplazados por los modelos digitales de computadora. Los modelos físicos de cajas de arena son aún

excelentes para ilustrar el comportamiento del agua subterránea, pero su uso hasta hoy es principalmente en cursos de universidades con una ocasional aplicación para el estudio complejo de la transportación de contaminantes.

Para finales de los sesentas y principios de los setentas, las principales computadoras digitales eran ampliamente disponibles y los primeros modelos sofisticados de computadora para el flujo del agua subterránea y el transporte de contaminantes empezaron a aparecer. (Pinder and Bredehoeft, 1968; Pinder and Frind, 1972). En general, estos esfuerzos de modelos digitales fueron traídos por profesionistas en modelos quienes escribieron sus propios programas de computadora en FORTRAN. Aunque otros profesionistas en Geohidrología podían usar estos programas en un principio, éstos raramente eran lo suficientemente entendibles y flexibles para ser aplicados por los no modeladores. En las décadas de los sesentas y setentas, la computación fue centralizada con computadoras de gran tamaño, las cuales se encontraban en cuartos de aire acondicionado con trabajadores en batas blancas, programas en FORTRAN en cartas con 80 columnas las alimentaban con una velocidad alta. Para programas largos el tiempo de encendido era a menudo, en un ordenador, de horas los cuales hacían errores, consumían tiempo y frustraban el proceso. Los principales computadores por si mismos fueron a propósito inaccesibles por los administradores centralistas. Los usuarios ordinarios que raramente daban un vistazo a la computadora, nunca eran capaces de tocarla. Los no matemáticos, geohidrólogos quienes no conocían como programar en FORTRAN raramente modelaban el agua subterránea. Las dos décadas (1960-1980) marcaron la centralización de la computación.

Con la aparición de la primera computadora personal de IBM en agosto de 1981, después en 1983 con el lanzamiento de un disco duro de 10 megabyte, una revolución virtual en el flujo del agua subterránea y la transportación de sus contaminantes en modelos empezó con el rompimiento del monopolio disfrutado por los hasta entonces "sacerdotes" del modelaje. Principalmente en los últimos 10 años la computación había finalmente empezado a descentralizarse, se hacia más barato y rápido lo que provocó con esto que se hiciera más accesible y más usado para todos. Hoy el modelo de agua subterránea y los paquetes de gráficas son tan sofisticados y entendibles para el usuario que cualquier geohidrólogo, aunque no haya modelado antes, puede ser fácilmente aplicado por ellos. Años atrás para ser un exitoso modelador en computación, el conocimiento de la programación en computadora y de las matemáticas era más importante que la experiencia en la práctica para resolver problemas del agua subterránea, lo contrario a esta afirmación hoy es verdad. Aplicar un modelo matemático actualmente es análogo a usar un automóvil. En la década de los años 20's para tener un vehículo y aventurarse lejos de casa en un tiempo de día y de noche se requerían conocimientos mecánicos y eléctricos del motor. Los carros frecuentemente se descomponían y sin este conocimiento, herramientas y partes de repuesto, no se podía estar tan lejos de casa. Actualmente los automovilistas no tienen que conocer sobre el motor, lo que cuenta es manejar con técnica y un sentido de la dirección. Similarmente el modelaje ha alcanzado el punto donde no se tiene que conocer las cosas de las matemáticas y programación para empezar a ser un modelador, lo que cuenta es cómo aplicarlo correctamente, creativamente y productivamente. El futuro promete ser siempre más excitante para los no matemáticos ya que los modelos de computadora incrementan el uso de gráficas y sofisticados software para visualizar sitios en mapas, propiedades de materiales geológicos, condiciones de frontera, etc.

La evolución de las computadoras personales en velocidad, memoria y gráficas llevan a una capacidad en los últimos años a desenvolver la tercera dimensión, intuitivos paquetes de software tal como el VISUAL MODFLOW han empezado un modelo

matemático en las computadoras personales o PC's (siglas en inglés), como el estado de la evaluación de la ciencia, planeando y diseñando herramientas. Donde años atrás el modelo matemático era comúnmente encontrado solo en papeles de investigación, hoy esto es una herramienta de rutina para ayudar a resolver los problemas del agua subterránea. En efecto, sería difícil encontrar un proyecto de agua subterránea hoy el cual no usara modelos en alguna extensión.

MODFLOW actualmente ha emergido como el modelo de facto para la simulación de acuíferos. La codificación original fue desarrollada con una guía de usuario muy extensa y puesto al mercado en 1984. Esta versión fue reemplazada en 1988 (Mc Donald y Hasbaugh 1988).

1.3 ¿QUÉ ES MODFLOW?

MODFLOW es uno de los modelos por computadora más populares y accesible de agua subterránea disponibles hoy en día, se basa en métodos matemáticos (diferencias finitas) para la resolución de las ecuaciones diferenciales de flujo en un ambiente sencillo y familiar para el usuario.

En la lengua inglesa el MODFLOW esta definido como "A modular, Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model".

La popularidad de este modelo puede ser atribuida a cinco factores que pueden ser tomados como ventajas sobre otros modelos. **Primero:** ha demostrado ser un producto poderoso, fuerte y hábil. Tempranamente los usuarios habían tenido gran éxito en aplicarlo a una amplia variedad de problemas prácticos ya que se convirtió en un modelo del poder público, el modelo original puede ser compilado por una gran variedad de máquinas. **Segundo:** la guía del usuario es extremadamente detallada y produce descripciones claras de como varias opciones del modelo son usadas, existe documentación extensa sobre el tema. **Tercero:** el modelo ha sido aceptado fuertemente por los encargados del estudio hidrogeológico de los Estados Unidos y se encuentra fácilmente disponible. En años recientes, más versiones especializadas del modelo han sido comercializadas por muchas compañías privadas. **Cuarto:** el éxito del modelo original ha producido un conocimiento extenso para explicarlo en cursos y un largo número de productos relacionados y módulos de cálculo. Los "límites" de los paquetes individuales pueden ser modificados para una mejor solución a un problema en específico. Además de que existen paquetes que pueden ser añadidos al modelo básico. Finalmente en el **Quinto** factor encontramos que el método numérico empleado es arcaico pero conceptualmente simple.

Muchas compañías ponen en el mercado software que asiste en la preparación del conjunto de datos para el MODFLOW, tales como, Geraghty y Miller's model cad product, Waterloo Hydrogeologic's Visual MODFLOW, y el departamento de defensa para el sistema de agua subterránea. Otras utilidades facilitan el contorno de los campos para el cálculo de las cargas hidráulicas (SURFER, golden software, inc.).

MODFLOW es actualmente un conjunto de códigos compatibles que se centran en una solución implícita de diferencias finitas para las ecuaciones de flujo tridimensional, fue codificado en Fortran en un estilo modular que permite y alienta el desarrollo de paquetes adicionales o módulos, que pueden ser añadidos o unirse al código original. El modelo

básico emplea una cuadrícula que forma bloques en diferencias finitas lo que permite espacios variables en la cuadrícula en tres dimensiones. El flujo puede ser establecido o transitorio. Los acuíferos pueden ser simulados como confinados, libres o una combinación de los dos (semiconfinados). Las propiedades del acuífero pueden variar espacialmente y la conductividad hidráulica (o la transmisividad) puede ser anisotrópica. El flujo asociado con estímulos externos, tales como pozos, distribución de recargas, evapotranspiración, drenajes, y arroyos, pueden también ser simulados a través del uso de cargas específicas, flujos específicos, o del flujo dependiente de las condiciones de frontera. MODFLOW es una serie de módulos separados, los cuales son independientes; el usuario selecciona solo el módulo necesario para un sistema en particular que está bajo estudio. Las ecuaciones implícitas de diferencias finitas pueden ser resueltas usando cualquiera de los procedimientos Strongly Implicit Procedure (SIP) o un método de divisiones sucesivas slice-successive Overrelaxation (SOOR). Existen paquetes más recientes que ofrecen muchas soluciones adicionales de algoritmos, incluyendo un solucionador directo (Harbaugh, 1995). Aunque los sistemas de entrada y salida del programa fueron diseñados para permitir una flexibilidad máxima, utilidad y facilidad, la interpretación de los resultados del modelo pueden ser mejorados usando uno de los muchos paquetes procesadores comerciales disponibles, uno de estos opera independientemente del MODFLOW, considerando que otros son directamente integrados dentro del programa.

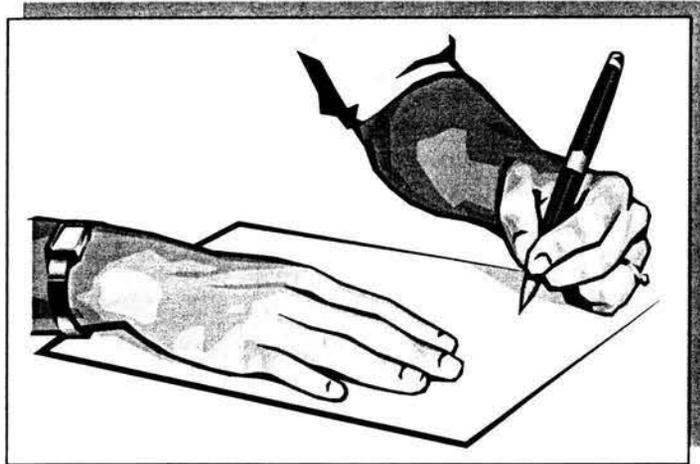
También existe una variedad de productos que siguen al MODFLOW. Pollock (1989) ha desarrollado MODPATH (un paquete de procesamiento) que toma los datos de salida del MODFLOW y determina las rutas y tiempos de viaje del movimiento del agua. Este paquete ha encontrado aplicaciones en la modelación simple de la transportación de contaminantes y en la localización de pozos para el bombeo y sistemas de tratamiento para la disolución de contaminantes. MODPHAT-PLOT es un paquete de interfase de gráficas que muestran visualmente los resultados del MODPATH (Pollock, 1994).

Hill (1992) ha desarrollado MODFLOWP, un modelo que tiene la capacidad para estimar varios parámetros requeridos en la simulación del MODFLOW. Este modelo provee una herramienta para la calibración automática. Otros avances incluyen la habilidad para simular agua subterránea y las interacciones del nivel del agua (Prudic, 1989), un nuevo solucionador de ecuaciones (Hill, 1990), aproximación para ajustar las celdas húmedas en un modelo que ha sido secado, (McDonald y otros, 1991) la habilidad para modelar la compactación de un acuífero, técnicas para representar una transmisividad en campo que varía lentamente (Goode y Appel, 1992). Y la capacidad para tratar barreras horizontales estrechas que pueden impedir el flujo de agua subterránea. Estas nuevas características hacen del MODFLOW un modelo extremadamente poderoso y capaz de manejar una gran variedad de condiciones para el agua subterránea.

MODFLOW puede ser usado para resolver problemas que involucran el agua subterránea en la zona saturada (debajo del nivel freático) en condiciones porosas y no consolidadas, por ejemplo:

- Suministro de agua
- Diseño de pozos en campo
- Filtraciones en presas
- Pendientes de drenaje
- Apertura para las construcciones de minas u obras subterráneas
- Flujo en túneles y presiones
- Tiempo de viaje del agua subterránea
- Estudios para la protección de manantiales
- Zonas de captura para agua subterránea
- Diseños de bombeo y tratamientos
- Diseño de un sistema de monitoreo

CAPÍTULO 2



*Métodos que Sustentan
al Modflow*

CONTENIDO DEL SEGUNDO CAPÍTULO

2. METODOS QUE SUSTENTAN AL MODFLOW

2.0 Introducción

2.1 Concepto de modelo

- 2.2.1 Concepto de sistema
- 2.2.2 Concepto de modelo
- 2.2.3 Concepto de simulación

2.2 Tipos de modelos

- 2.2.1 Modelos Icónicos o físicos
 - 2.2.1.1 Modelo físico reducido
 - 2.2.1.2 Modelo físico de tanque de arena
- 2.2.2 Modelos Simbólicos o matemáticos
 - 2.2.2.1 Modelo matemático conceptual
 - 2.2.2.2 Modelo matemático determinístico
 - 2.2.2.3 Modelo matemático genérico
- 2.2.3 Modelos Analógicos
 - 2.2.3.1 Modelo análogo eléctrico

2.3 Construcción de un modelo

2.4 Limitaciones y usos de los modelos

- 2.4.1 Limitaciones de los modelos matemáticos
- 2.4.2 Usos de los modelos matemáticos

2.5 Métodos y técnicas matemáticas empleadas por el MODFLOW

- 2.5.1 Método del elemento finito
- 2.5.2 Método de diferencias finitas
 - 2.5.2.1 Descripción de la malla para las diferencias finitas
 - 2.5.2.2 Derivación de la ecuación de diferencias finitas
 - 2.5.2.3 Sistema de solución de las ecuaciones de diferencias finitas

2 MÉTODOS QUE SUSTENTAN AL MODFLOW

2.0 INTRODUCCIÓN

Gracias a los modelos, nuestro conocimiento de la realidad puede ser incrementado. Este capítulo ubica al MODFLOW dentro de la clasificación que existe para los modelos. Así mismo se da el significado de algunos conceptos generales que se aplican en una simulación, con el propósito de comprender qué se usa y qué se hace cuando se emplea el MODFLOW.

Las matemáticas son las herramientas más usadas que existen hasta ahora, para tratar de explicar los fenómenos naturales que se presentan a nuestro alrededor por lo tanto no es de extrañarse que las bases empleadas por el MODFLOW para resolver los problemas de flujo subterráneo sean métodos numéricos. Estos métodos numéricos serán explicados brevemente en este capítulo, poniendo especial cuidado en aquel que es usado por MODFLOW.

2.1 CONCEPTO DE MODELO

2.1.1 CONCEPTO DE SISTEMA

Para entender mejor el concepto de modelo es necesario definir otro término, el cual esta estrechamente ligado con el primero:

*Un **sistema** es un conjunto formado para satisfacer objetivos específicos, sujeto a impedimentos y restricciones; consta de dos o más componentes interrelacionados y compatibles; cada componente es esencial para los requerimientos de ejecución del sistema.*

Debido a que los componentes deben interrelacionarse, la operación, o incluso la simple existencia de alguno de ellos, afecta de algún modo la actuación de los otros. Así mismo el funcionamiento del sistema como un todo y las limitaciones del mismo imponen restricciones sobre cada uno de los componentes.

Desde el punto de vista de la Geohidrología un *conjunto* de pozos en un acuífero conforma un sistema ya que estos son creados con el *propósito* de satisfacer las demandas de agua, los cuales están sujetos a las *restricciones* de carga hidráulica, profundidad del manto acuífero, etc. Los *componentes* que conforman el sistema, son los estratos confinantes, el acuífero y los pozos, que están interrelacionados unos con otros, a la vez que cada uno de ellos tienen sus propias características o subsistemas.

El diseño de sistemas de un proyecto comprende una serie de pasos racionales y ordenados que, dadas determinadas condiciones, conducen a tomar la mejor decisión.

2.1.2 CONCEPTO DE MODELO

Como una ayuda para la evaluación de la ejecución de un sistema y la comparación de alternativas de diseños, los diseñadores pueden representar el sistema por medio de un modelo que les permite analizarlo y evaluar su funcionamiento. La palabra modelo tiene muchas definiciones, lo que hace que algunas veces su significado sea muy variado.

Un modelo es quizá, con la definición más simple, una representación de un sistema real o proceso, sin embargo la definición más completa para los propósitos de esta investigación es:

Un modelo es una herramienta que se puede utilizar para determinar la probable respuesta de un sistema a un conjunto dado de estímulos, sin tener que imponer en la realidad estos estímulos en el sistema.

Por razones prácticas el modelo debe ser simple y congruente con la función para la cual se seleccionó. El costo de formulación y el uso del modelo debe ser ínfimo comparado en el costo del montaje y prueba del sistema real. Es común mencionar al sistema como prototipo cuando se habla de un modelo.

2.1.3 CONCEPTO DE SIMULACIÓN

Ahora que conocemos los conceptos fundamentales de sistema y modelo podemos dar una breve explicación de lo que significa simular:

Específicamente, a partir del advenimiento de las computadoras electrónicas, la simulación ha sido una de las herramientas más importantes y útiles para analizar el diseño y operación de complejos sistemas o procesos, (como el transporte de contaminantes en un acuífero). Simular, según el diccionario universitario es, "fingir", llegar a la esencia de algo, prescindiendo de la realidad. Sin embargo podemos definir la simulación de una forma más completa como:

Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con él para entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o por un conjunto de criterios) para la operación del sistema.

En consecuencia, entendemos que el proceso de simulación incluye tanto la construcción del modelo como su uso analítico para estudiar el problema.

La simulación puede ser usada para los siguientes propósitos:

- ❑ La simulación facilita el estudio y la experimentación de interacciones internas de un complejo sistema, o de un subsistema, dentro de un sistema complejo.
- ❑ Los cambios de información, organización y ambiente pueden ser simulados y los efectos de aquellas alteraciones del comportamiento del modelo pueden ser observados.
- ❑ El conocimiento ganado en el diseño de un modelo de simulación puede ser un valor grande para una sugerencia improvisada en el sistema bajo investigación.
- ❑ La simulación puede ser usada para verificar las soluciones analíticas.

2.2 TIPOS DE MODELOS

En general los modelos se pueden clasificar como uno de los siguientes tres tipos principales: Icónicos o físicos, simbólicos o matemáticos y analógicos.

2.2.1 MODELOS ICÓNICOS O FÍSICOS

El tipo icónico también conocido como físico puede ser el sistema real, una parte del mismo, o simplemente mostrar un parecido físico con él. Un modelo físico es un sistema tal que su funcionamiento puede utilizarse para predecir las características de un sistema similar o prototipo, por lo general más complejo o construido a una escala mucho mayor. Es necesario un conocimiento de las leyes que rigen los fenómenos sometidos a investigación si el estudio con el modelo va a producir resultados cuantitativamente exactos.

Las fuerzas que actúan sobre el modelo deben ser proporcionales a las fuerzas en el prototipo, las cuatro fuerzas que suelen considerarse en los modelos hidráulicos son inercia, gravedad, viscosidad y tensión superficial. Debido a que las leyes que rigen estas fuerzas y por que, normalmente, el modelo y el prototipo no son del mismo tamaño, no suele ser posible tener las cuatro fuerzas en el modelo en las mismas proporciones en que están en el prototipo. Sin embargo es sencillo tener dos fuerzas predominantes en la misma proporción. En la mayoría de los modelos, el hecho de que dos de estas cuatro fuerzas no estén en la misma proporción que en el prototipo no introduce errores serios. La fuerza de inercia, que siempre es una fuerza predominante y una de las otras fuerzas, se hacen proporcionales.

Las razones de las fuerzas de gravedad, viscosidad y tensión superficial a la fuerza de inercia, se designan como número de Froude, número de Reynolds y número de Weber, respectivamente. Si se igualan el número de Froude del modelo y el número de Froude del prototipo, se tiene la seguridad de que las fuerzas de gravedad y de inercia están en la misma proporción. En forma similar, al igualar los números de Reynolds del modelo y del prototipo se asegura que las fuerzas viscosas y de inercia estarán en la misma proporción. Al igualar los números de Weber, se asegura la proporcionalidad de la tensión superficial y la inercia.

En la actualidad se dispone de técnicas avanzadas en la modelación física de fenómenos hidráulicos que, aunadas al desarrollo de instrumentos de medición y equipos generadores de fenómenos a escala, permiten predecir con alto grado de certidumbre lo que puede ocurrir en el prototipo y, por lo tanto, se obtienen óptimos resultados en los aspectos de funcionalidad y estabilidad de la estructura por construir. Sin embargo los modelos físicos son costosos en su construcción, operación y conservación, pero son especialmente útiles para analizar fenómenos complejos que no son fáciles o que en la actualidad no es posible expresar matemáticamente. Este tipo de modelos son ampliamente utilizados por instituciones de educación superior, ya que son excelentes para mostrar en forma didáctica el comportamiento de ciertos fenómenos hidráulicos.

2.2.1.1 Modelo físico reducido

El uso de los modelos físicos a escala reducida, implican que estos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual tienen que satisfacer las leyes de similitud geométrica, cinemática y dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas, el prototipo A_p y el modelo A_m

En la figura 2.1 se observa que cada rayo de proyección que sale de una fuente hacia un centro homólogo, intercepta puntos del sistema y modelo, denominados puntos homólogos, sobre los cuales se definen otras magnitudes, tales como la velocidad, la presión, etc. De igual manera se definen lados, superficies y volúmenes homólogos, que a su vez constituyen la similitud geométrica, misma que implica una relación constante, para que cualquier longitud L resulte ser $L_p/L_m = E_L$ llamada escala de líneas o de longitudes. Los subíndices p y m se refieren al prototipo y al modelo, respectivamente.

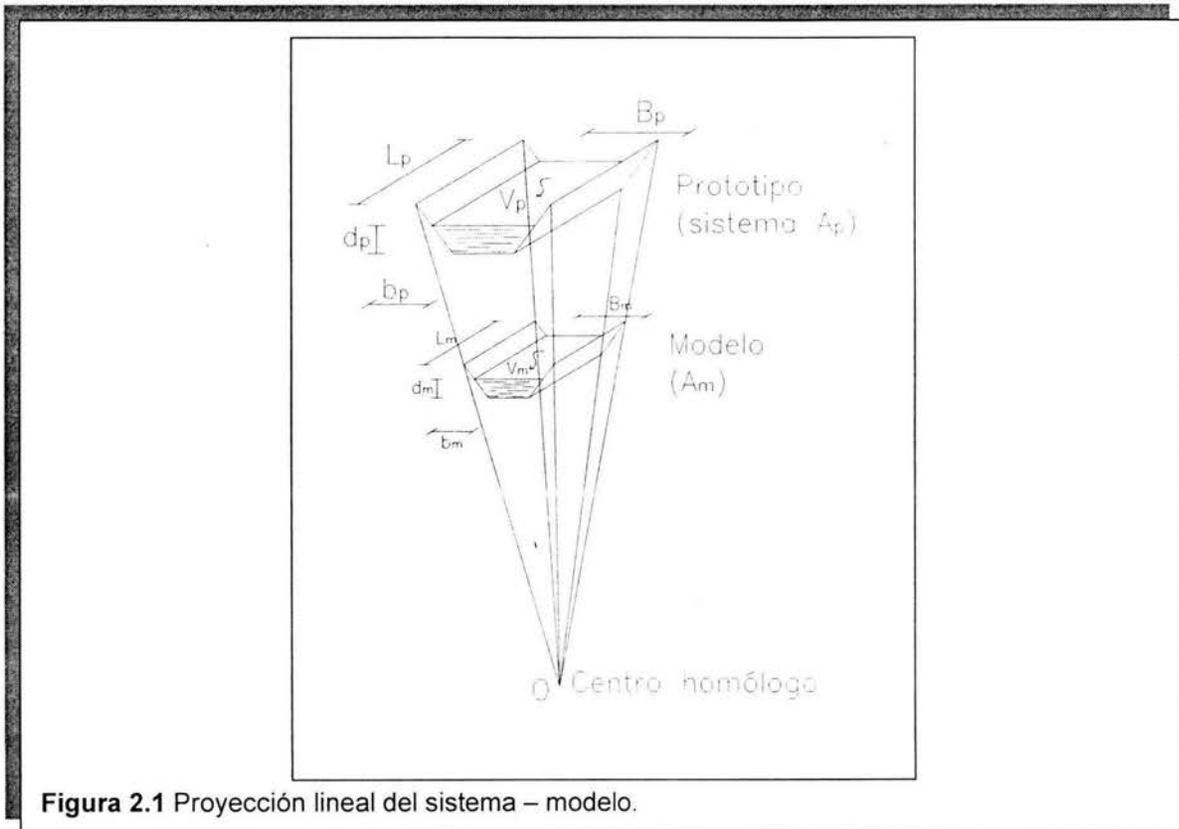


Figura 2.1 Proyección lineal del sistema – modelo.

2.2.1.2 Modelo físico de tanque de arena

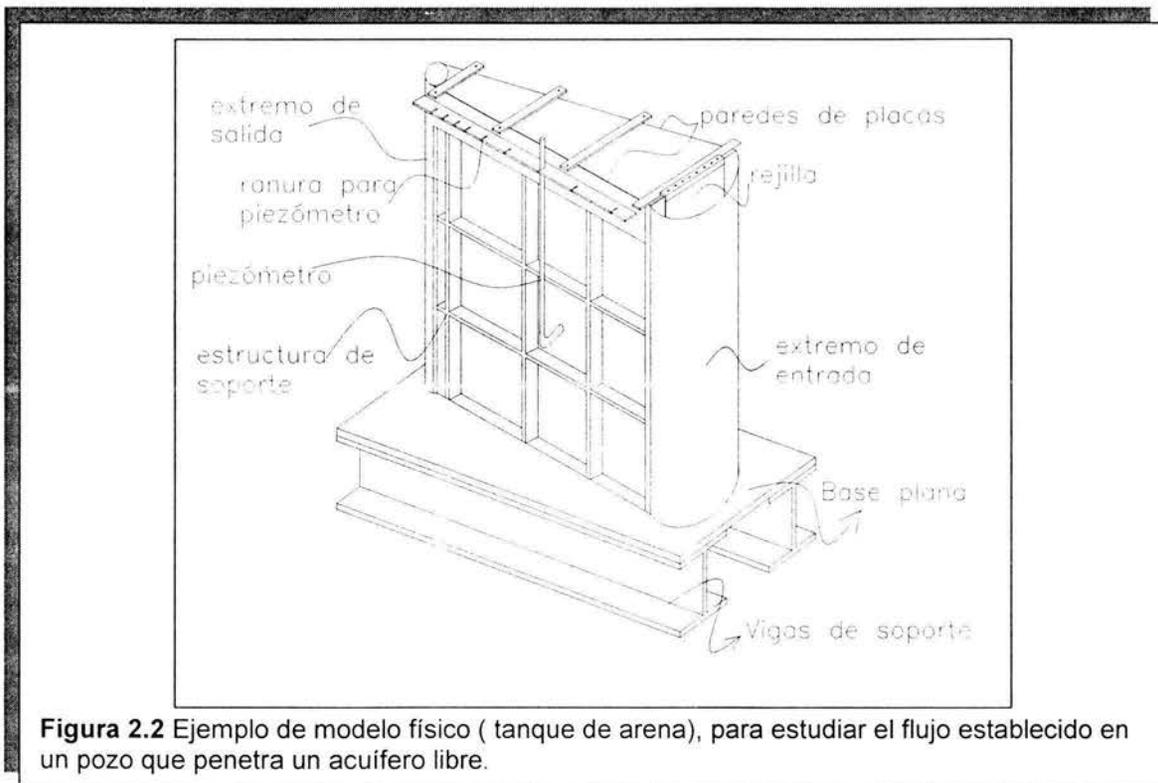
Un modelo de tanque de arena es un modelo a escala de un acuífero con las fronteras y permeabilidad – valores absolutos y distribución espacial – modificados. Los modelos de arena han sido construidos en estanques de agua de varias formas, (forma rectangular, columnas, y sectores) que son más comunes. El ejemplo de un diseño en sector aparece en la figura 2.2 desde el punto de vista del tipo del acuífero, los acuíferos

libres pueden ser modelados con el nivel freático sirviendo como una frontera superior; los acuíferos confinados son reproducidos usando una tapa impermeable de tal manera que la presión hidráulica pueda ser aplicada.

La identificación visual del nivel freático es difícil; consecuentemente, el nivel freático y los niveles piezométricos pueden ser obtenidos mejor de piezómetros que salen del modelo. Los tubos que se emplean como piezómetros deben ser pequeños para minimizar las modificaciones de los patrones de flujo. El flujo en campo puede ser descubierto por el uso de tintes que se añaden en puntos específicos de la arena.

La arena colocada en pequeñas cantidades bajo el agua y compactada consistentemente para remover aire producirá una permeabilidad uniforme dentro del modelo. Las permeabilidades en acuíferos anisotrópicos pueden ser logradas por estratos de diferentes arenas.

La elevación capilar en un modelo de arena es desproporcionalmente más grande comparado con el que ocurre bajo condiciones de campo. Para estudios de patrones de flujo, especialmente aquellos que involucran acuíferos confinados, los efectos son insignificantes; sin embargo, en un acuífero libre las investigaciones necesitan correcciones para la elevación grande de la capilaridad. El aumento puede ser minimizado usando un medio poroso de grava, y si es necesario un líquido más viscoso.



2.2.2 MODELOS SIMBÓLICOS O MATEMÁTICOS

El sistema (prototipo) se modela con conjuntos de expresiones matemáticas que representan componentes del sistema. Los modelos matemáticos están normalmente programados en un lenguaje apropiado de computadora y, al ejecutar el programa de ésta, son posibles las simulaciones del comportamiento del prototipo. Los modelos matemáticos están limitados sólo por la capacidad del creador del modelo para describir matemáticamente el prototipo, por la capacidad de los recursos de cómputo y por la disponibilidad de datos para soporte del trabajo del modelo. Estos modelos pueden ser tan sencillos o tan complejos como un análisis lo requiera, y se cuentan entre los medios más eficientes, ya que son menos costosos para desarrollar y usar que otro tipo de modelos, y son fáciles de manejar, para realizar ciertos análisis.

Los modelos simbólicos o matemáticos representan con símbolos las entradas (datos) y salidas (resultados) de un sistema y se utilizan generalmente para el análisis matemático del mismo. Ello permite una relación generalizada, más breve y mejor expresada entre la realidad y el modelo.

La precisión de los modelos matemáticos está íntimamente ligada a su costo de explotación, por lo que deben tomarse en cuenta los siguientes factores:

- *Exactitud de los datos iniciales* - Tomar en cuenta la discontinuidad de los datos y la magnitud de error de los mismos.
- *Tipo de fenómeno a estudiar* - Dependiendo el fenómeno y su importancia, dependerá su precisión.
- *Exactitud de las ecuaciones que rigen el fenómeno* - Las ecuaciones diferenciales, mediante las que se ha formulado el modelo, pueden determinar un límite a la exactitud con la que se podrá describir el fenómeno. Esto puede ser ocasionado por las hipótesis introducidas para simplificar, o bien, por constituir ellas mismas una simple aproximación al no considerar ciertas variables.
- *Forma de aproximar las ecuaciones* - Partiendo de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales que se aproximan mediante un sistema en diferencias con los consiguientes errores de truncamiento, la exactitud puede verse afectada.
- *Evolución del modelo* - Durante el proceso de cálculo, al cambiar el modelo en el espacio y en el tiempo, puede ocurrir que los errores que se producen se vayan transmitiendo o acumulando, con lo cual la precisión obtenida del modelo puede verse limitada.

Por último, hay tres conceptos importantes referentes a los modelos matemáticos que conviene aclarar. Se trata de la consistencia, estabilidad y convergencia de un modelo. Suponiendo que un modelo se ha realizado por el método de diferencias finitas, se dirá que es consistente cuando al tender a cero el tamaño de la malla y el intervalo de tiempo, las ecuaciones en diferencias dan las mismas soluciones que las ecuaciones diferenciales; que es estable si las soluciones obtenidas al hacer variar los parámetros de que depende el modelo permanecen acotadas; y que es convergente cuando el modelo es a la vez consistente y estable.

2.2.2.1 Modelo matemático conceptual

Un modelo conceptual es una hipótesis para el cual opera un sistema o proceso. Esta hipótesis puede ser expresada cuantitativamente como un modelo matemático. Los modelos matemáticos son abstracciones que representan procesos con ecuaciones, propiedades físicas como constantes o coeficientes en ecuaciones.

Un modelo conceptual es creado a través de la evaluación de los datos geohidrológicos para producir una imagen o idea de alguna región de interés. Un elemento del modelo conceptual es la estructura geohidrológica, la cual abarca las principales características de la Geohidrología normalmente determinada de investigaciones geológicas y pruebas hidráulicas. Normalmente la información es sintetizada en la forma, ancho y propiedades hidráulicas de las principales medidas geológicas (por ejemplo la conductividad hidráulica y almacenamiento), la distribución de la carga hidráulica dentro de las principales unidades geohidrológicas, la distribución y velocidades de bombeo o de la recarga del agua subterránea.

Otro elemento del modelo conceptual son las condiciones de frontera y la distribución de los periodos de explotación sobre el acuífero debido al bombeo. Las condiciones de frontera son definidas a lo largo de los bordes del dominio de la simulación, incluyendo la parte superior y el fondo del sistema. Su principal función es separar la región del modelo del resto del mundo. En otras palabras las condiciones de frontera dan razón de la influencia de las condiciones de flujo externas del dominio de la simulación. Las condiciones de frontera son requeridas para la solución de cualquier ecuación de flujo de agua subterránea.

2.2.2.2 Modelo matemático determinístico

Muchos modelos de agua subterránea, en la actualidad son modelos matemáticos determinísticos. Los modelos matemáticos determinísticos están basados en la conservación de la masa, momentum y energía, describen las relaciones causa y efecto. La suposición fundamental es tener un alto grado de entendimiento de los procesos por los cuales los estímulos externos producen respuestas subsecuentes en un sistema, las respuestas del sistema para cualquier conjunto de estímulos pueden ser predeterminados, incluso la magnitud de los nuevos estímulos pueden caer dentro del rango de los históricamente observados (críticos).

Los modelos determinísticos de agua subterránea generalmente requieren de la solución de ecuaciones diferenciales parciales. Las soluciones exactas pueden ser frecuentemente analíticas, pero un modelo analítico requiere que los parámetros y las fronteras sean altamente idealizadas. Algunos modelos determinísticos tratan las propiedades del medio poroso, con sus parámetros, dentro de un volumen pequeño (esencialmente como un cubo), lo que evita la representación de propiedades hidráulicas heterogéneas en el modelo. La heterogeneidad, o la variabilidad en las propiedades del acuífero es característica en todos los sistemas geológicos y son ahora reconocidos como una parte muy importante en la influencia del flujo del agua subterránea y el transporte de la misma. Así es frecuentemente preferible aplicar la distribución de los parámetros en los modelos, los cuales permiten la representación de distribuciones más reales en las propiedades del sistema. Los métodos numéricos producen soluciones aproximadas a las ecuaciones que gobiernan el flujo subterráneo a través de la discretización del tiempo y espacio. Dentro del dominio de los problemas de discretización, las propiedades variables

internas, fronteras, y estímulos del sistema son aproximadas. El modelo determinístico, la distribución de parámetros y los métodos numéricos pueden compensar las condiciones idealistas rígidas de los modelos analíticos, lo que los hace por lo tanto más realistas y flexibles para simular las condiciones de campo (si se aplican apropiadamente).

2.2.2.3 Modelo matemático genérico

El número y tipo de ecuaciones para ser resueltas son determinadas por los conceptos que gobiernan el dominio del proceso, los coeficientes de las ecuaciones son los parámetros que son medidos de las propiedades, fronteras, y estímulos del sistema; las variables dependientes de las ecuaciones son las medidas del estado de los sistemas y son matemáticamente determinadas por la solución de las ecuaciones. Cuando un algoritmo numérico es implementado en un código de computadora para resolver una o más ecuaciones diferenciales, el resultado del código de computadora puede ser considerado un modelo genérico. Cuando las dimensiones de la cuadrícula, condiciones de frontera, y otros parámetros (como por ejemplo la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento), son especificados en una aplicación de un modelo genérico para representar un área geográfica particular, el resultado del programa es llamado modelo de un sitio específico.

Si el usuario del modelo es inexperto o ignora los detalles de los métodos numéricos, incluyendo las derivaciones aproximadas, la escala de discretización, y las técnicas de solución de las matrices, errores significativos pueden ser introducidos y permanecer indetectables. Por ejemplo, si las ecuaciones del flujo del agua subterránea son resueltas iterativamente, pero el criterio de convergencia es demasiado amplio, entonces la solución numérica puede converger, pero a una solución muy pobre. La inexactitud de la solución puede o no puede ser reflejada en la ley de equilibrio de masas. El error en la balanza de masas por si mismo no puede ser fácilmente observada por usuarios inexpertos del modelo.

2.2.3 MODELOS ANALÓGICOS

Dos fenómenos físicos de diferente naturaleza se llaman análogos si las ecuaciones que los describen se expresan con formas matemáticas idénticas, aún cuando los símbolos de cada una de ellas tengan significado diferente, por ejemplo en la Tabla 2.1 se muestra una analogía entre el flujo de agua y el flujo de electricidad.

Es común que uno de los dos fenómenos sea de menor dificultad, por lo que éste se emplea para resolver el otro. Lo anterior ofrece una posibilidad de resolver problemas hidráulicos a base de mediciones hechas sobre un fenómeno análogo.

El flujo a través de medios porosos obedece leyes que gobiernan otros sistemas físicos incluyendo flujo laminar de fluidos, calor y electricidad. Estas similitudes hacen disponibles una variedad de técnicas para el estudio del movimiento del agua subterránea.

2.2.3.1 Modelo análogo eléctrico

El flujo de una corriente eléctrica puede ser expresado con la ley de Ohm.

$$I = -\sigma \frac{dE}{dx} \quad 2.1$$

Donde I es la corriente eléctrica por unidad de área a través de un material de conductividad específica σ , y dE / dx es el gradiente de voltaje. La ecuación 2.1 satisface la ecuación de Laplace y cuando es comparada con la ecuación de Darcy.

$$v = -K \frac{dh}{dx} \quad 2.2$$

Flujo en medio poroso, oscilación en tanques, flujo en redes de tuberías, flujo a superficie libre	Flujo de corriente eléctrica
$v = -K \frac{\partial h}{\partial l} ; \text{ Ley de Darcy.}$ $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 ; \text{ Ec. de Laplace.}$ $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 ; \text{ Ec. de continuidad.}$ $Q = \frac{K(h_1 - h_2)A}{l} ; \text{ Ec. del gasto en un flujo en medio poroso.}$ <p>Donde: u, v, w.= velocidades en las direcciones x, y, z φ = potencial de velocidades K = conductividad hidráulica Q = gasto líquido A = áreas de sección transversal h = carga hidráulica</p>	$I = -r \frac{\partial \psi}{\partial l} ; \text{ Ley de Ohm.}$ $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 ; \text{ Ec. de Laplace.}$ $\frac{\partial^2 I_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_z}{\partial z^2} = 0 ; \text{ Ley de Kirchhoff.}$ $i = \frac{r(\psi_1 - \psi_2)A}{l} ; \text{ Ec. de intensidad de corriente.}$ <p>Donde: Ix, Iy, Iz,= densidad de corriente en las direcciones x, y, z ψ = potencial electrónico r = conductividad eléctrica i = intensidad de corriente A = área del conductor eléctrico l = longitud</p>

Tabla 2.1 Ejemplo de fenómenos análogos.

La similitud entre las dos ecuaciones se vuelve aparente; la velocidad v es análoga a la corriente eléctrica I , la conductividad hidráulica K a la conductividad específica σ , y la carga h al voltaje E . Esta correspondencia sirve como base para modelos análogos eléctricos del flujo de agua subterránea en acuíferos.

Existen dos categorías básicas para los modelos análogos eléctricos. Una categoría representa los sistemas continuos que son aquellos en el cual las propiedades del acuífero son modeladas por un medio de conducción eléctrica que es continuo en el espacio. Para estos un conductor líquido o un conductor sólido sirve como acuífero análogo. La otra categoría incluye sistemas discretos en el cual las propiedades del acuífero son modelados por una reunión de elementos eléctricos, formando una red.

Modelos de conductores líquidos (sistemas continuos): Un modelo de conductor líquido esta formado por un tanque aislado y llenado con un electrolito como una solución de sulfato de cobre. Las fronteras del tanque son a escala para representar las fronteras del acuífero. Electrodo de cobre son sumergidos en el tanque para crear superficies equipotenciales. Líneas de potencial constante pueden ser rastreadas mediante una sonda conectada a un osciloscopio, un voltímetro, y un pantógrafo. La figura 2.3 muestra un circuito eléctrico para un modelo de conductor líquido.

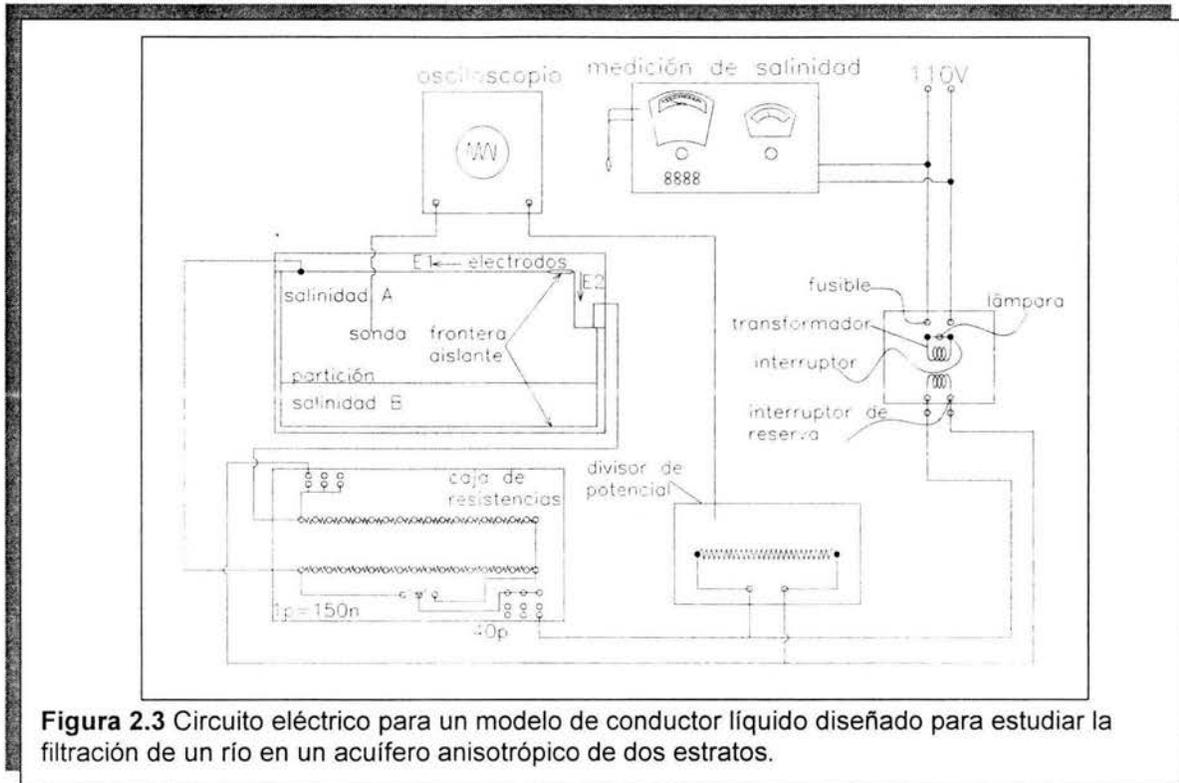


Figura 2.3 Circuito eléctrico para un modelo de conductor líquido diseñado para estudiar la filtración de un río en un acuífero anisotrópico de dos estratos.

Ambas líneas equipotenciales y de flujo pueden ser trazadas. Éstos modelos están generalmente restringidos para situaciones en estado establecido en dos dimensiones; sin embargo, con modificaciones apropiadas al modelo, acuíferos en varios estratos, permeabilidades anisotrópicas, e incluso casos en tres dimensiones pueden ser analizados.

Debido a que no existe una fuerza análoga de gravedad para producir un nivel freático, las superficies de frontera libres deben estar determinados sobre un error básico. El criterio para localizar un nivel freático esta basado en el hecho de que la disminución de la carga es proporcional a la disminución en el potencial eléctrico.

Los modelos de conductores líquidos han sido aplicados para la investigación de una variedad de condiciones de filtración, abatimientos cerca de un pozo, y dirección de flujo de agua subterránea.

Red de resistencias y capacitores (sistemas discretos): Estos modelos son típicamente empleados para evaluar acuíferos confinados en estado radial transitorio y condiciones de flujo en dos dimensiones. Esta técnica permite modelar un acuífero junto con los efectos del pozo de bombeo. En esencia, el acuífero es representado por un arreglo grande de elementos individuales eléctricos que forman una versión a escala del acuífero. Un voltaje eléctrico apropiado y la fuente de corriente son conectados a uniones individuales, o nodos, de la red del modelo para crear fuentes y fronteras externas para el acuífero. Aparatos de medidas de voltajes determinan la distribución de voltaje en la red; esto es equivalente a una versión a escala de la distribución de carga en un acuífero.

Un ejemplo de un modelo de red de resistencias y capacitores se muestra en la figura 2.4. Aquí un análisis electrónico es acoplado para un modelo análogo. Los resistores eléctricos son hechos inversamente proporcionales a la transmisividad del acuífero, mientras que los capacitores eléctricos son hechos directamente proporcionales al almacenamiento del acuífero. La correspondencia entre las unidades eléctricas e hidráulicas están descritas por los factores de escala K_1 y K_5 mostrados en el procedimiento de cálculo que se muestra en la página siguiente.

Los generadores de la onda eléctrica del análisis eléctrico provocan un flujo de corriente eléctrica en el modelo análogo en un tiempo apropiado y en proporción al flujo en el acuífero, figura 2.5. El osciloscopio traza las variaciones en un tiempo de los niveles potenciales en el modelo. Los dibujos del osciloscopio, gráficas tiempo vs. voltaje, son realmente análogos a las gráficas tiempo vs. abatimiento.

La analogía esta basada en una malla de diferencias finitas superpuesta sobre un esquema del acuífero, como el mostrado en la figura 2.4a. El área elemental a^2 debería ser muy pequeña comparada con el área total del acuífero así en la discretización del modelo puede representar el acuífero continuo. La forma de diferencias finitas del flujo transitorio, ecuación en dos dimensiones para el flujo del agua subterránea es:

$$T(h_2 + h_3 + h_4 + h_5 - 4h_1) = a^2 S \frac{\partial h_1}{\partial t}$$

2.3

Donde los subíndices sobre las cargas h se refieren a la localización de los nodos del acuífero mostrado en la figura 2.4a. Una red correspondiente al modelo resistencias capacitores con un espacio cuadrado ρ se muestra en la figura 2.4b.

Un nodo típico de la red consiste en cuatro resistores de igual valor R y un capacitor de valor C conectado a un grupo eléctrico. Para el nodo numero 1, la relación de la ley de corriente de Kirchoff es:

$$\frac{1}{R}(V_2 + V_3 + V_4 + V_5 - 4V_1) = C \frac{\partial V_1}{\partial t}$$

2.4

Aplica donde los términos V, con subíndices, refieren a los voltajes en su correspondiente número de nodo, como el mostrado en la figura 2.4b.

Comparando las ecuaciones 2.3 y 2.4 se demuestra la analogía entre el flujo en dos dimensiones de agua subterránea y el flujo de una corriente eléctrica en una red de resistencia capacitores. Además las analogías incluyen la cantidad de agua y la carga eléctrica, carga perdida y voltaje caído; de la figura 2.5 el generador eléctrico es análogo al agua bombeada, mientras que el osciloscopio funciona como una grabadora que almacena los niveles de agua.

El modelo análogo de red de resistencias y capacitores es versátil lo que provoca que fácilmente se pueda estudiar una variedad de condiciones para el acuífero, los acuíferos grandes en extensión requieren de un gran número de nodos. La técnica inclusive puede ser extendida al caso en tres dimensiones. La propiedad heterogénea del acuífero puede fácilmente ser incorporada. La única limitación significativa sobre la aplicación de este modelo involucra condiciones no lineales de variaciones de transmisividad en los acuíferos libres.

Procedimiento:

Discretización del acuífero con longitudes de malla cuadrada, L en metros. La discretización del modelo con arreglos a escala de resistores eléctricos y capacitores como proyecto.

Valores numéricos asignados para los siguientes valores a escala basados en las capacidades del equipo eléctrico disponible, la simulación del acuífero deseado, y el tamaño físico del modelo referido.

$$K_1 = \frac{q \text{ m}^3}{Q \text{ coul}} \quad K_2 = \frac{h \text{ m}}{V \text{ volt}} \quad K_3 = \frac{Q \text{ m}^3 / \text{dia}}{I \text{ amp}} \quad K_4 = \frac{t_d \text{ dias}}{t_s \text{ seg}} \quad K_5 = \frac{L \text{ m}}{\rho \text{ cm}}$$

Los valores calculados de capacitores y resistores necesitan ser simulados en cada porción del acuífero con las siguientes fórmulas:

$$R = \frac{K_3}{K_2 T} \text{ ohm} \quad C = L^2 S \frac{K_2}{K_1} \text{ faradays}$$

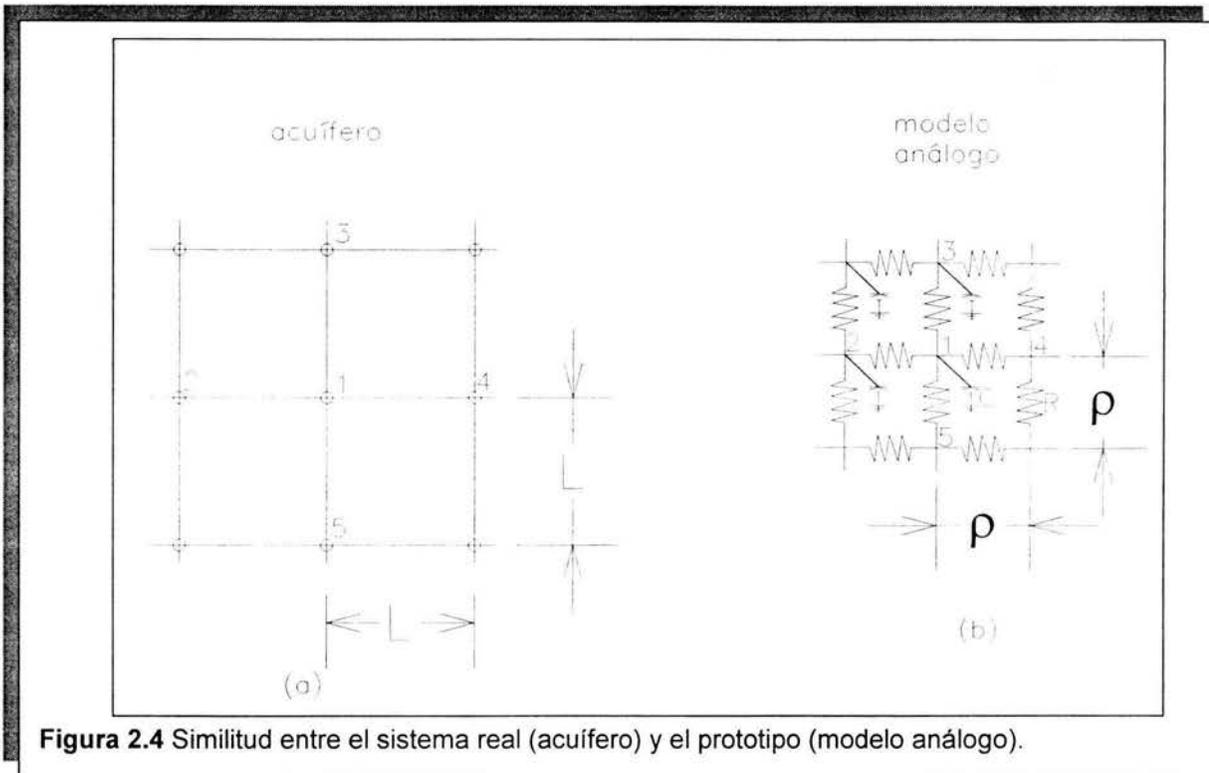


Figura 2.4 Similitud entre el sistema real (acuifero) y el prototipo (modelo análogo).

Donde T es la transmisividad local del acuifero en m²/día y S es el coeficiente de almacenamiento local (adimensional) del acuifero.

Usar los factores de escala dados abajo para calcular las corrientes eléctricas requeridas para simular los gastos de bombeo individuales.

$$I_1 = \frac{Q_1}{K_3}, \quad I_2 = \frac{Q_2}{K_3}, \dots, I_n = \frac{Q_n}{K_3} \text{ amperes}$$

Construcción de la red de resistores y capacitores, sobre una estructura apropiada para formar el modelo análogo. Interconexión del modelo análogo, generador de la onda eléctrica, generador de pulso y el osciloscopio de acuerdo con el diagrama 2.5 para formar el simulador análogo.

Valores calculados de alimentación para los resistores de la distribución de bombeo en la red de las siguientes fórmulas:

$$R_1 = \frac{V}{I_1}, \quad R_2 = \frac{V}{I_2}, \dots, R_n = \frac{V}{I_n} \text{ ohm}$$

Para la instalación de la distribución de bombeo en la red, ajustar t_s para coincidir con el deseado de bombeo t_d, a través del uso del factor de escala K₄, ajustar el generador de onda para repetir el control del generador de pulso y del osciloscopio. Los resultados del simulador se obtienen en la forma tiempo vs. voltaje trazado en el osciloscopio para puntos individuales de observación dentro del acuifero. Las gráficas de

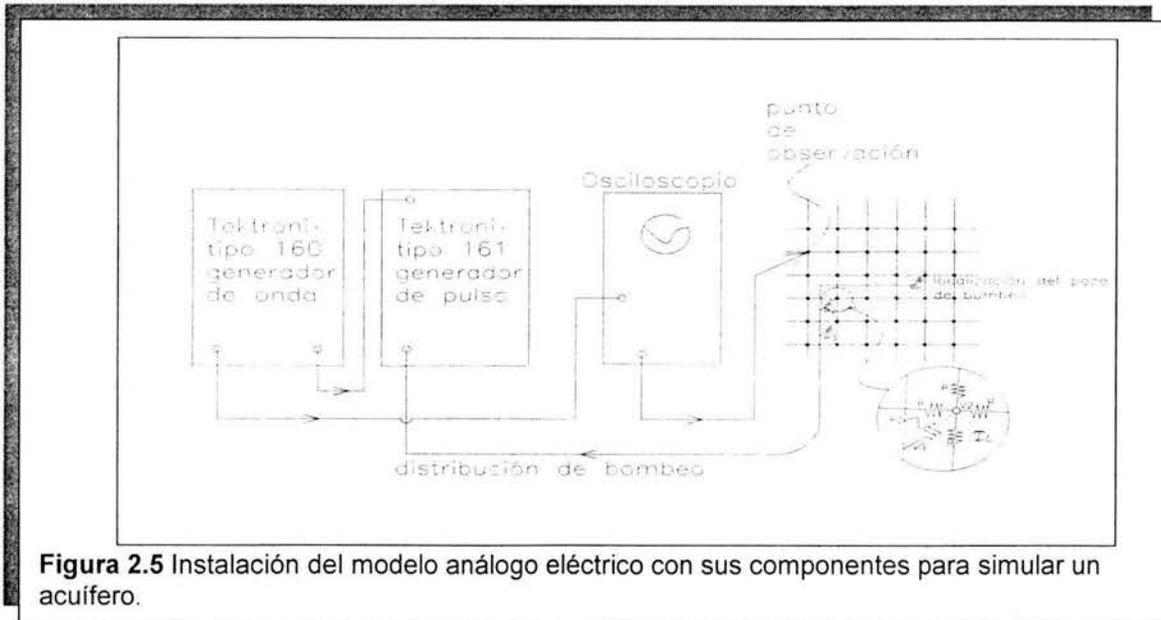


Figura 2.5 Instalación del modelo análogo eléctrico con sus componentes para simular un acuífero.

tiempo vs. voltaje son convertidos a gráficas de tiempo vs. carga con los factores de escala $K_4 = t_d / t_s$ y $K_2 = h / V$.

2.3 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO

Para construir un modelo matemático se necesita información que describa al sistema, así como también de una secuencia lógica de pasos que la relacione. A continuación se describirán ambos procedimientos.

La información proviene de los datos de campo, además de las teorías de flujo ya existentes y en general se pueden numerar como sigue:

1. Región de flujo
2. Ecuaciones de flujo
3. Condiciones de frontera
4. Condiciones iniciales
5. Parámetros del acuífero, coeficientes
6. Métodos de solución
 - Tres tipos generales:
 - Soluciones gráficas
 - Soluciones analíticas
 - Soluciones numéricas (elemento finito y diferencias finitas)

Toda la información anterior es relacionada por medio de una secuencia que da como resultado la creación de un modelo matemático. Esta secuencia se presenta en la figura 2.6, misma que consta de seis etapas:

En la primera etapa se determina por que es necesario el modelo, (propósito del modelo), posteriormente se hace una descripción del fenómeno, planteándose las variables que intervienen y las hipótesis del comportamiento del mismo. En la segunda etapa se plantean las ecuaciones diferenciales o integrales que describen matemáticamente el fenómeno, así mismo, las condiciones de frontera y la variabilidad de solución (creación de un modelo conceptual del sistema). La tercera etapa consiste en seleccionar el método de solución del modelo matemático, es decir, la elección del algoritmo de cálculo que será usado. En la cuarta etapa se elabora la programación del algoritmo de cálculo para la computadora (diseño del modelo), la malla, las fronteras y las condiciones iniciales son seleccionadas. La calibración, verificación y validación del modelo corresponde a la quinta etapa, ejecuciones diferentes del modelo son realizadas, y los parámetros del modelo se ajustan para determinar si los resultados del modelo pueden reproducir datos de campo para la carga y el flujo; y, por último, la sexta etapa corresponde a la explotación del modelo, es decir, la utilización del mismo con base en datos de campo, de experimentos en laboratorios o de supuestos para obtener predicciones. En esta última etapa el modelador puede estar listo para presentar sus resultados del estudio.

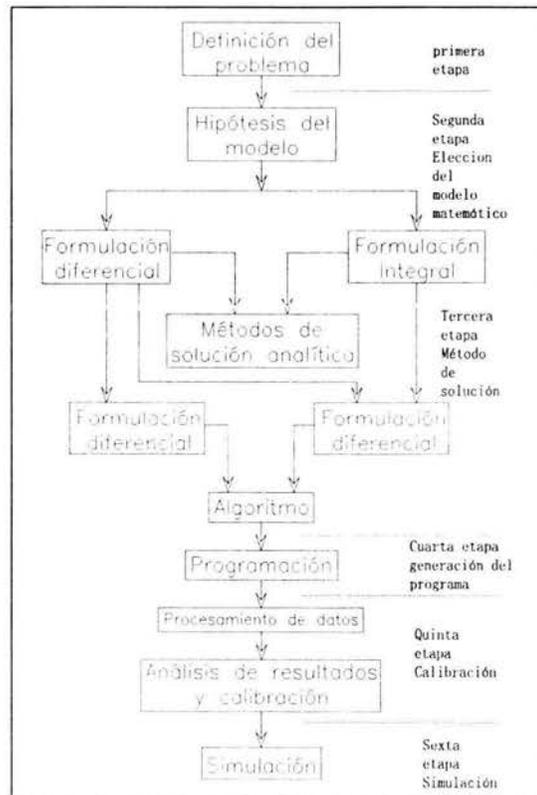


Figura 2.6 Secuencia del proceso de desarrollo de un modelo matemático.

En cada paso en el proceso, es necesario determinar si existen suficientes datos para elegir el modelo a ser efectivo. Podría ser necesario detener el proceso de modelado y regresar atrás al campo o al laboratorio para recolectar datos adicionales antes de continuar con el proceso. Si el tiempo y el presupuesto no permiten esto, entonces el proceso de modelado debería ser abandonado en vez de continuar con una conclusión incorrecta. De hecho un acto preliminar al modelaje es realizar un programa de recolecciones de datos iniciales, para ayudar a tener más datos extensos.

2.4 LIMITACIONES Y USOS DE LOS MODELOS

2.4.1 LIMITACIONES DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos expanden nuestra base de información pero no producen números de oro. Usualmente simulan las respuestas conceptuales de una versión simple de un sistema complejo. Como tal, sus resultados son imperfectos. Sin embargo cuando son usados en conjunción con la experiencia y los datos de campo correctos, ellos nos permiten tomar una decisión más técnica en una manera sistemática. Los modelos son particularmente útiles, cuando son comparadas muchas alternativas. En tales casos todas las alternativas son comparadas sobre la misma base (mismos materiales, mismos parámetros fisicoquímicos estimados, etc.)

Las predicciones hechas con modelos de simulación deben ser interpretadas con precaución. Las predicciones se convierten en un problema debido a que los sistemas de agua subterránea son a menudo pobremente caracterizados. Frecuentemente no es real encontrar los datos suficientes para describir el proceso hidrológico en el espacio y tiempo. Así el diseño del modelo depende significativamente del "juicio informado" de su constructor más que de la información real. Esta incertidumbre no desaparece simplemente por que el modelo es construido.

El proceso de verificación-calibración no lleva a una única descripción de un sistema hidrogeológico. Para sistemas pobremente conocidos, un número muy grande de diferentes modelos puede ser desarrollado sin saber, si cualquiera de ellos es correcto. De otra manera si diferentes diseñadores de modelos dan los mismos datos hidrogeológicos, probablemente diseñaran diferentes conceptualizaciones del mismo sistema, cada uno podrá ser calibrado y verificado. Un ejemplo de la dificultad de calibración de un modelo de agua subterránea es discutido por Freyberg 1998. Diferentes grupos usando los mismos conjuntos de datos desarrollaron una variedad de diferentes predicciones concernientes al comportamiento del sistema. Los orígenes de variabilidad en la calibración y los resultados de la predicción fueron relacionados a (1) la falta de datos hidrogeológicos, (2) el uso de diferentes medidas de éxito en la calibración por cada grupo, y (3) diferentes estrategias de calibración (por ejemplo, cambiando los valores locales de transmisividad alrededor de pozos contra cambios sobre las áreas grandes).

El éxito en la predicción de un modelo puede ser examinado con post-audits. Este término describe el proceso de verificar una predicción hecha por un modelo de agua subterránea. Por ejemplo, si uno hace una predicción acerca del comportamiento de un sistema para 10 años desde ahora, uno podría regresar después de 10 años, hacer las mediciones necesarias para la carga hidráulica y verificar si el modelo original puede ser validado. Bredehoeft y Konikow, 1993, comentando sobre los resultados de los pocos

post-audits disponibles indicaron que “la extrapolación para el futuro fue raramente muy exacta”, Ellos identificaron los siguientes problemas con los modelos: el periodo de historia igualado (esto es la calibración) fue demasiado corto para capturar un elemento importante del modelo, o el modelo conceptual fue incompleto, o los parámetros no fueron bien definidos. Ellos concluyeron que los modelos de validación guardados no fueron alentadores.

Si las predicciones de los modelos son inseguras, ¿Entonces qué usos se les da?. En dirección a este problema Oreskes y otros 1994 señalan que:

Los modelos pueden validar una hipótesis ofreciendo evidencias para fortalecer lo que puede ser ya en parte establecido a través de otros medios. Los modelos pueden deducir discrepancias en otros modelos, los modelos también pueden ser usados para análisis de sensibilidad por eso recalando cuales aspectos de un sistema son más necesarios de un estudio más fuerte, y donde más datos empíricos son necesitados.

En suma se debe usar el poder proporcionado por los modelos computacionales cuidadosamente. Estas son herramientas útiles que podrían ser usadas con un completo conocimiento de sus limitaciones.

2.4.2 USOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Utilizados en muchas aplicaciones de ingeniería de recursos hidráulicos, los modelos matemáticos se aplican, en particular, en investigaciones hidrológicas e hidráulicas de sistemas artificiales y naturales tanto para aguas de superficie como subterráneas. Se hace un modelo del sistema (prototipo) en conjuntos de expresiones matemáticas que representan componentes del sistema. Estas expresiones a su vez, se enlazan para representar el sistema como un todo.

Los modelos matemáticos se utilizan para análisis y diseño. Normalmente se programan en un lenguaje apropiado de computadora y al ejecutar el programa de ésta, son posibles las simulaciones del comportamiento del prototipo. Pueden ser para un solo fin (para un sitio específico) o para fines generales (aplicables a varios sitios).

Por lo general, los modelos para un solo fin representan las descripciones específicas de tiempo y espacio del prototipo directamente en el código de la computadora. Por ejemplo, la representación lógica de prototipos como las redes de caudal, zonas de captación y parámetros de filtración pueden ser parte del código fuente y se dicen que están “cableados” en el programa de la computadora. Para estos modelos, el software (código del programa de la computadora) y los códigos de aplicación de entrada (parámetros hidrológicos e hidráulicos) están unidos en una sola entidad. Ésta, empero, tiene más desventajas que ventajas, en especial cuando se necesitan modificaciones del modelo o cuando éste tiene que ser aplicado por ingenieros que no estaban comprendidos dentro de la modificación original del programa. El método que se prefiere al hacer un modelo consiste en crear modelos generales con software que es esencialmente independiente del código de aplicación de entrada.

Los modelos generales se utilizan para tareas analíticas específicas, que pueden ser tan sencillas como lo es determinar el exceso de lluvia, dados los parámetros de lluvia y de pérdida de lluvia, o tan complejas como lo es la simulación de larga duración del caudal y transporte de contaminantes en sistemas hidráulicos combinados de aguas de superficie y freáticas.

Continuamente se logran avances en recursos de computo y el uso de modelos se esta haciendo más difundido. Como resultado de esto, la conveniencia de más uniformidad en paquetes de software y de software orientado a ciencias se ha hecho patente. En el software de ciencias, todo componente de programa es tan generalizado

como factible y todo el programa es en esencia un conjunto de componentes modulares de software. Este método cuando se aplique en su totalidad, dará total compatibilidad entre todos los tipos de software de recursos hidráulicos. Así mismo, este método dará compatibilidad casi completa en todas las bases de datos, de todas las bases de datos y software, y entre los modeladores de recursos hidráulicos de gobierno, el ámbito universitario y sectores privados. El resultado será una reducción en duplicidad del trabajo de programadores y modeladores de software y un aumento en la eficiencia de investigaciones de ingeniería de recursos hidráulicos.

Entre los usos hidráulicos típicos de los modelos matemáticos se cuentan las siguientes: procesos estocásticos (probabilísticos), evaporación y riego, hidrodinámica, pronósticos hidrológicos, hidrología de cuencas hidrográficas, diseño de estructuras hidráulicas, control de embalses, impactos de inundaciones o sequías, encaminamiento de caudales, hidráulica de canales y ríos, transporte de sedimentos y contaminantes, cantidad y calidad de abastecimiento de agua, impactos y restauración de ecosistemas, impactos de rotura de presas, análisis de olas y mareas, análisis de filtrado de terraplén, así como el análisis de los fenómenos que se presentan en geohidrología, tales como:

1. Una herramienta para determinar cuánto y dónde coleccionar datos de campo, o para evaluar la utilidad de datos de campo ya existentes.
2. Para comprender y predecir el fenómeno del flujo y transporte en multiestratos, no homogéneos, sistemas de acuíferos anisotrópicos.
3. Como una herramienta para una mayor elección de alternativas en factibilidad de estudios.
4. Para delinear la protección de áreas de manantiales.
5. Para predecir rutas, formas y tiempos de viajes en el uso de la evaluación de riesgos de contaminantes específicos.
6. Para determinar dónde un contaminante se originó usando una localización de partícula en retroceso, para una localización crítica.
7. Para designar equitativamente los costos de limpieza entre grupos potencialmente responsables, cuando su colectividad tenga contaminado una localización crítica, tal como un sitio bien definido. Esto puede ser hecho en base a cada contribución de los responsables en el volumen total de contaminantes del agua la cual debe ser tratada y/o el total de la masa que debe ser removida.
8. Para evaluar el impacto de una peligrosa exposición de sitios de desperdicios, lagunas industriales, rellenos sanitarios u otros cuyo origen sea potencialmente una amenaza para el agua subterránea.
9. Para diseñar sistemas de drenaje usando pozos de extracción en minería o sitios de construcción.
10. Para diseñar la recarga de pozos en campo o en una cuenca para lograr una eficiente inyección / infiltración de agua tratada, de agua en reúso o para impedir la intrusión de agua salada.
11. Para estudiar la interacción de superficies de cuerpos de agua, tales como pequeños arroyos, ríos y lagos con el agua subterránea cuando el sistema de acuíferos es alterada por la extracción de agua mediante pozos.
12. Para propiciar el diseño de proyectos de infiltración los cuales usan agua de río como un primer origen de agua potable.

13. Para diseñar y evaluar proyectos de solución a problemas de sistemas ya existentes.
14. Para simular el impacto de la producción de nuevos pozos o niveles de agua alrededor de los pozos y en la superficie de cuerpos de agua tales como lagos y arroyos.
15. Para optimizar los recursos del agua subterránea y su limpieza.
16. Para predecir la concentración vs. tiempo en la selección de una evaluación en un riesgo de exposición química.
17. Para predecir concentración vs. tiempo en una localización seleccionada o calcular el flujo de masas en cuerpos de agua tales como arroyos o lagos para una evaluación de riesgo ecológica.

Es posible que se hagan necesarios diferentes modelos que varían en complejidad o refinamiento, o de ambos, y en el tipo de aplicación en muchos tipos de investigaciones. Como regla general, si se necesitan planes diferentes, cuanto menor sea el número de modelos que se utilicen en un estudio dado, mayor será la probabilidad de obtener resultados significativos. La disponibilidad y calidad de datos para calibración y verificación, la producción del modelo necesaria para diseño y evaluación y la aceptación general por la comunidad de ingeniería deben ser consideradas en la selección de un modelo o grupo de modelos para cualquier investigación.

El campo de los modelos matemáticos es uno de los de más rápidos cambios en ingeniería. Las aplicaciones deben actualizarse de conformidad, si se espera hacer un uso continuo de estos modelos.

2.5 MÉTODOS Y TÉCNICAS MATEMÁTICAS EMPLEADAS POR EL MODFLOW

Las ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo del agua subterránea pueden ser resueltas matemáticamente usando cualquiera de las dos opciones siguientes: *soluciones analíticas* o *soluciones numéricas*. Las ventajas de una solución analítica, cuando es posible aplicar una, son que usualmente proporcionan una solución exacta a las ecuaciones que gobiernan el agua subterránea y son frecuentemente simples y eficientes en su uso. Muchas soluciones analíticas han sido desarrolladas para las ecuaciones de flujo; sin embargo, muchas aplicaciones se limitan a los problemas de hidráulica de pozos que involucran un flujo radial. La familia de curvas de tipo Theis representan las soluciones de un modelo analítico. En general, obtener la solución analítica exacta para las ecuaciones diferenciales exactas requiere que las propiedades y las fronteras del sistema de flujo sean altamente idealizados y con esto quizás, estén fuera de la realidad. Para simular muchos problemas de campo, el beneficio de las matemáticas de obtener una solución analítica exacta es probablemente más grande que los errores introducidos por las hipótesis simplificadas del ambiente complejo del campo, que son requeridos para aplicar las aproximaciones analíticas.

Alternativamente para problemas donde los modelos analíticos simplificados ya no describen la situación física real, las ecuaciones diferenciales parciales pueden

aproximarse numéricamente. De esta manera, la ecuación diferencial continua, la cual define la carga hidráulica o la concentración de partículas en cualquier lugar en el sistema, es remplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas que definen la carga hidráulica o la concentración de partículas en un punto específico. Este sistema de ecuaciones algebraicas generalmente son resueltas usando técnicas de matrices. Esta aproximación constituye un *modelo numérico*.

La respuesta de un sistema de acuíferos es calculada por la solución numérica de una ecuación para el flujo de agua subterránea. El término numérico implica esos métodos numéricos, opuestos a las aproximaciones matemáticas analíticas. En la ecuación de flujo para el agua subterránea, la carga hidráulica es la incógnita. Las principales aproximaciones numéricas más usadas en la práctica hasta hoy para resolver las ecuaciones del flujo del agua subterránea son las **diferencias finitas (FDM) y el elemento finito (FEM)**, ambos son métodos sofisticados que en diferentes formas reemplazan la ecuación diferencial que gobierna el flujo del agua subterránea por un sistema de ecuaciones algebraicas. El FDM es un concepto más simple mientras que el FEM es más abstracto. **El MODFLOW esta basado en el método de las diferencias finitas**. Ambos métodos requieren que la región de interés sea subdividida usando una malla o red que a la vez origina pequeñas subáreas o elementos. Algunas veces, el término discretización es usado para describir este proceso.

En suma, los métodos para elemento finito y diferencias finitas, y los métodos analíticos pueden ser aplicados para resolver las ecuaciones de flujo. La principal ventaja de los métodos analíticos es que, para una región homogénea, pueden proporcionar soluciones precisas sin efectuar la discretización. Así un sistema heterogéneo puede ser representado adecuadamente por el uso de solamente unos pocos elementos grandes, el método puede ser muy eficiente en términos del tiempo usado por la computadora, ya que será menor. Si la heterogeneidad, es tal que un número grande de elementos son requeridos para describir el sistema más adecuadamente, entonces el método de las diferencias finitas o el elemento finito debería ser usado.

La aproximación de las diferencias finitas usa una discretización regular, donde un acuífero es subdividido dentro de una serie de celdas. En un modelo en dos dimensiones, cada celda del modelo es asumida para tener un espesor m . Así cada una de las celdas representa un volumen del acuífero, $(m) \times (\Delta x) \times (\Delta y)$. En un modelo tridimensional consistente de acuíferos y acuitardos, las unidades individuales son subdivididas verticalmente dentro de las celdas de un ancho especificado.

Operacionalmente, el tamaño de la celda en el plano x - y (esto es vista en planta), es usualmente una pequeña extensión del total del acuífero. El espacio entre las filas y las columnas varia, pero por simplicidad el ejemplo de la malla (figura 2.7 a,b) asume una área constante (es decir lados iguales, $\Delta x = \Delta y$). Asociado con las celdas están los nodos que representan los puntos donde es calculada la carga hidráulica desconocida. Dependiendo de la formulación del modelo numérico, los nodos pueden ser también puntos en el centro de la celda (figura 2.7b).

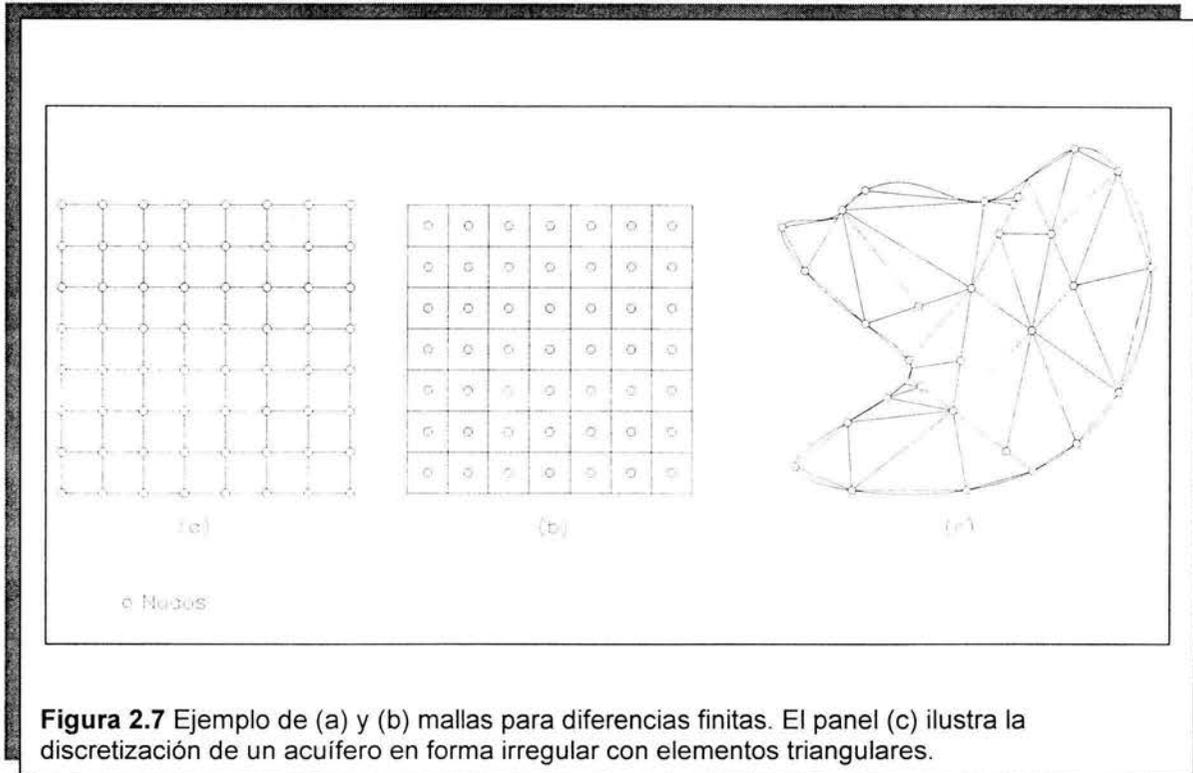


Figura 2.7 Ejemplo de (a) y (b) mallas para diferencias finitas. El panel (c) ilustra la discretización de un acuífero en forma irregular con elementos triangulares.

El método del elemento finito permite un mayor arreglo general de los nodos. La discretización con elementos triangulares (figura 2.7c) ilustra la forma fácil de definir las fronteras de un acuífero de forma irregular, y para garantizar que los nodos coinciden con los pozos de monitoreo, o con características geográficas (por ejemplo un río).

Una de las características importantes de la aproximación numérica es que las cargas hidráulicas son calculadas solamente en los nodos. Este aspecto de la formulación será aclarada en la sección 2.5.2, el cual examina la forma del desarrollo de las diferencias finitas de la ecuación del flujo del agua subterránea.

Aplicar un modelo requiere la construcción de un conjunto de datos que dupliquen las características más importantes de un sistema. Los datos básicos para este propósito provienen del modelo conceptual. Exactamente cómo los datos son organizados dependen del modelo particular. Generalmente cada nodo o celda debe ser suministrada con información sobre la conductividad hidráulica, transmisividad, el almacenamiento y flujo debido a los orígenes y descensos (esto es, recarga, bombeo y evaporación). El modelo también necesita ser suministrado con información de frontera y condición inicial.

2.5.1 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

Los modelos del elemento finito ofrecen una alternativa aproximada para los modelos numéricos del flujo de agua subterránea. En lugar de usar red de rectángulos y nodos, que es usado en el método de diferencias finitas, el acuífero es dividido en celdas poligonales, especialmente triángulos (aunque no necesariamente). La figura 2.7c muestra las celdas del elemento finito para un acuífero que va a ser modelado. Los triángulos se interceptan en nodos que representan los puntos en los cuales los valores

son desconocidos, como la carga hidráulica, que serán calculados. Los valores de la carga en el interior de cada celda es determinada por la interpolación entre los puntos nodales.

Las bases matemáticas para el método del elemento finito son mucho más complejas que en el método de las diferencias finitas. Muchas soluciones del elemento finito están basadas en el método de Galerkin. Las matemáticas no son intuitivas, a diferencia de las que usa el método de diferencias finitas.

Los modelos del elemento finito informan algo más que el modelo de diferencias finitas para problemas en los cuales hay movimiento de fronteras, como la sección de corte de un modelo en el cual el nivel freático es transitorio, así como de problemas del transporte de contaminantes. El modelo del elemento finito también tiene una ventaja ya que empieza más flexible en términos de "imitar" la geometría del sistema del acuífero que el método de diferencias finitas y requiere menos nodos.

Ya que uno de los propósitos de la presente investigación es resaltar la importancia del método matemático que ayudó al desarrollo del modelo MODFLOW (diferencias finitas), es conveniente detenerse con el estudio del elemento finito, si el lector tiene interés en profundizar en este tema, puede consultar la bibliografía que se presenta al final de este trabajo.

2.5.2 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

En esta sección se desarrolla la ecuación de diferencias finitas para simulación de acuíferos. En teoría, aquí se analiza específicamente el modelo de la industria estándar, MODFLOW. En el método de las diferencias finitas la ecuación diferencial que gobierna el flujo del agua subterránea es reemplazada por una ecuación que incluye el principio de conservación de la ecuación diferencial original. Aplicando el principio de la conservación de la masa y la ley de Darcy (los cuales se explican en el capítulo tres) a un volumen elemental de un acuífero, podemos derivar la ecuación diferencial parcial en tres dimensiones la cual puede ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W(x, y, z, t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad 2.5$$

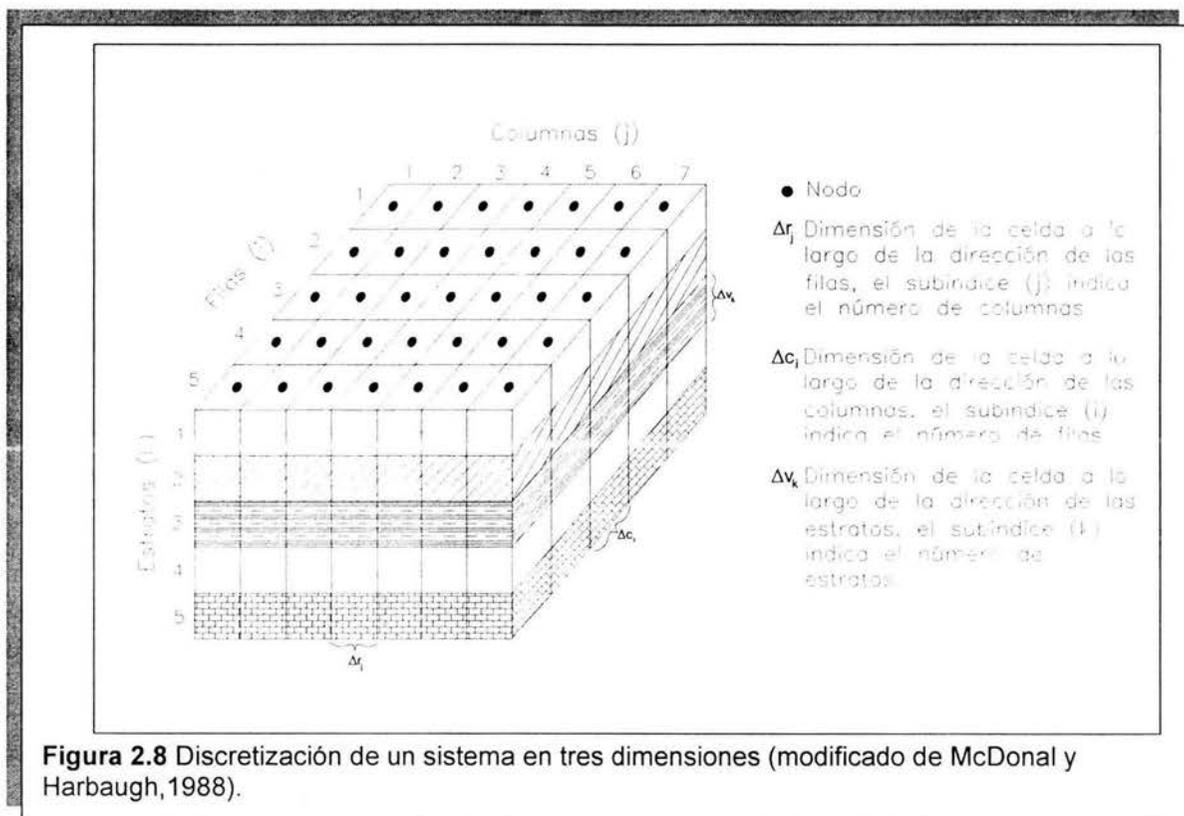
donde K_{xx} , K_{yy} , y K_{zz} son valores de la conductividad hidráulica a lo largo de los ejes coordenados x , y y z ; h es la carga hidráulica; W es el término del flujo que involucra el bombeo, recarga y otros orígenes y descensos tales como pozos o drenajes, en términos de flujo por unidad de volumen del acuífero; S_s es el almacenamiento específico; x , y y z son las direcciones de las coordenadas; y t es el tiempo. La forma de la ecuación implica que las direcciones principales de la conductividad hidráulica coinciden con los ejes coordenados.

2.5.2.1 Descripción de la malla para las diferencias finitas

La solución de las diferencias finitas requiere que el dominio del acuífero en estudio sea discretizado en una malla. Con MODFLOW las celdas son en forma de ladrillo (figura 2.8), el sistema de malla es referenciado en términos de filas, columnas y estratos numerados con nodos al centro de los bloques. Los nodos son puntos del acuífero donde

las ecuaciones son resueltas para obtener los valores desconocidos. También asociado con cada nodo están los valores de los parámetros conocidos como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

La malla básica es regular, con las filas y columnas normales o perpendiculares entre ellas mismas y la distancia en la dirección x , Δx , empieza igual a la distancia en la dirección y , Δy . Frecuentemente es conveniente variar el tamaño de las filas y columnas, así que existen más puntos nodos en ciertas partes del acuífero que en otras. De esta manera un sistema "denso" de nodos puede ser creado alrededor de una zona de mayor interés, por ejemplo alrededor de un pozo de bombeo, lugar dónde existen grandes cambios en la carga y un sistema "esparcido" de nodos puede ser creado en áreas de menor preocupación, (figura 2.9). En conjunto, la malla variable minimiza el número de nodos en una simulación. Sin embargo, debe tenerse cuidado al cambiarse el tamaño gradual de las celdas. La regla es que las dimensiones de las celdas adyacentes en una dirección dada no deberían diferir por más de un factor de 1.5



Los tamaños de las celdas en las direcciones de las filas y columnas son especificadas explícitamente en los datos de entrada (input). La dimensión vertical es especificada implícitamente por los valores de la transmisividad por celdas individuales. Mc Donalds y Harbaugh (1988) discutieron la variedad de formas de representar las capas verticales en relación a las unidades geohidrológicas. Esto esta más allá del alcance de este trabajo para discutir todas estas opciones, si el lector quiere profundizar en el tema, puede consultar la bibliografía dada al final del presente capítulo. La estrategia

más común tiene capas conformadas con unidades geológicas fácilmente identificables. Considerar el ejemplo simple mostrado en la figura 2.10a con un estrato de arenisca, arcilla y arena con grava. La discretización vertical es lograda usando tres capas o estratos en el modelo que coinciden con las unidades estratigráficas, (figura 2.10b). El cambio del ancho vertical de las celdas individuales, por ejemplo dentro del estrato 1, sería acomodando el cambio de transmisividad de cada celda.

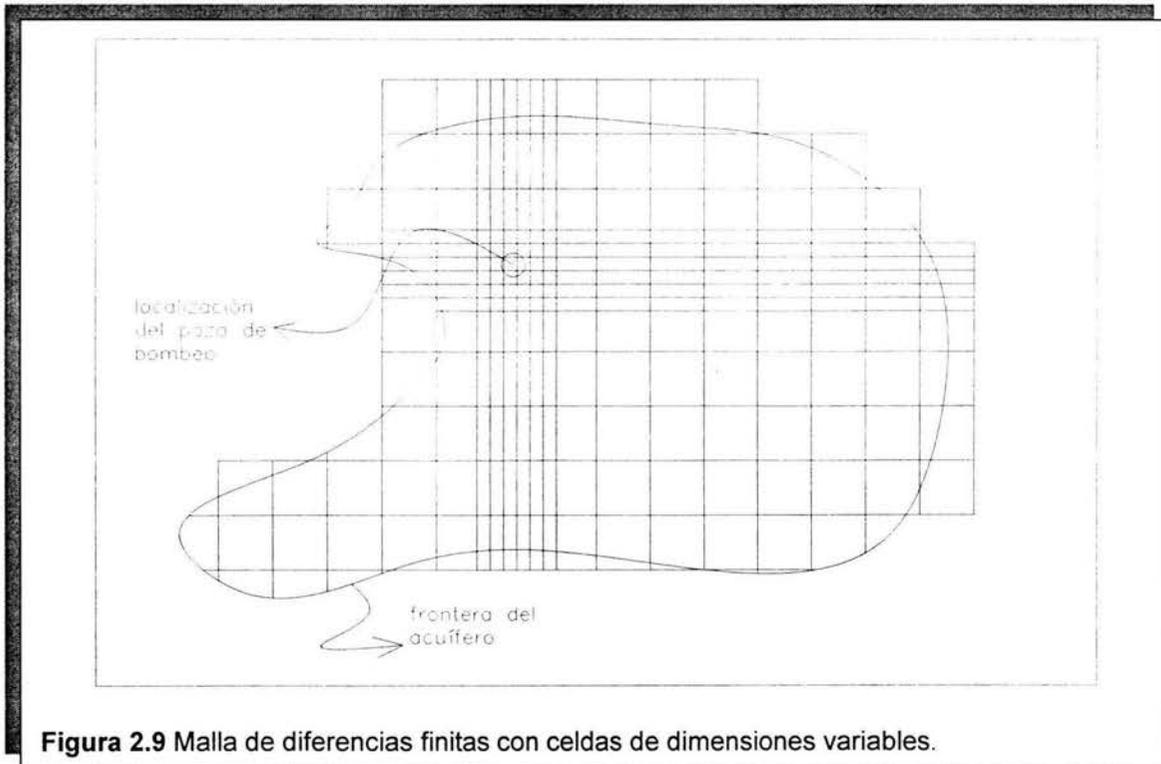


Figura 2.9 Malla de diferencias finitas con celdas de dimensiones variables.

Con los estratos del modelo así definidos, las celdas individuales no son tan largas. Ellas tienen una forma irregular donde las caras de las celdas no son rectángulos. Aunque esta representación de una celda ocasiona errores, estos son usualmente insignificantes, en relación a los errores causados por pobres estimaciones de transmisividad, almacenamiento y recargas.

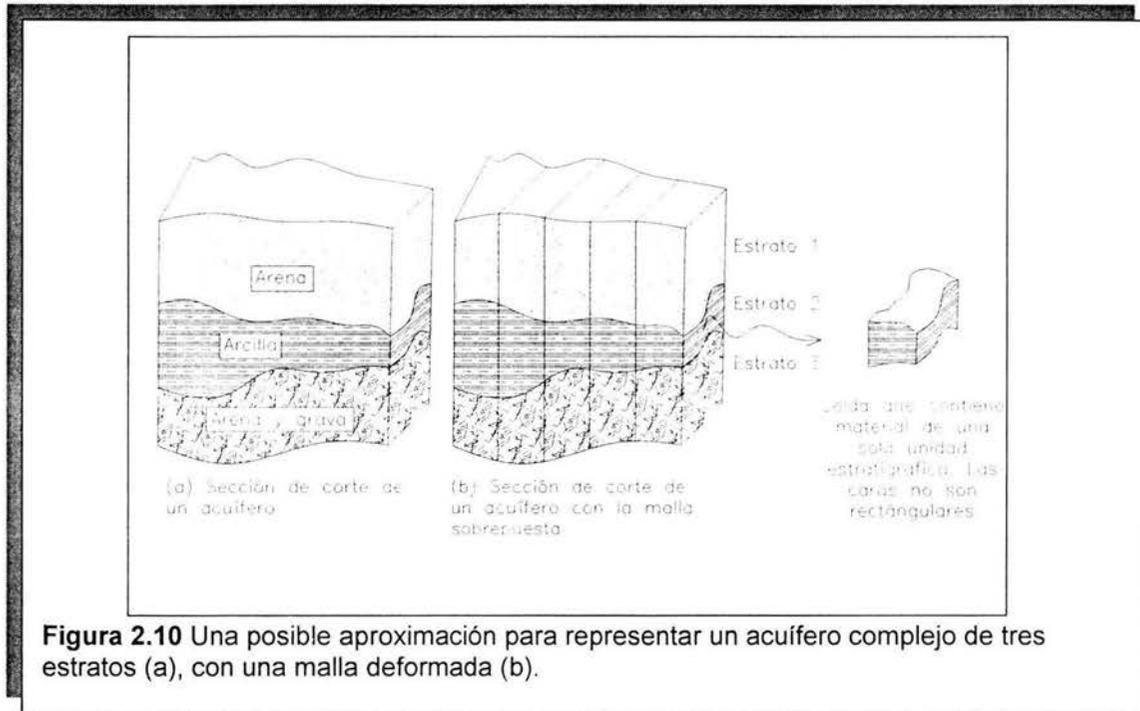


Figura 2.10 Una posible aproximación para representar un acuífero complejo de tres estratos (a), con una malla deformada (b).

2.5.2.2 Derivación de la ecuación de diferencias finitas

El desarrollo de la ecuación de las diferencias finitas esta basada en la idea de continuidad. La ecuación del estado de continuidad que suma los flujos dentro y fuera de cualquier celda es igual al tiempo de almacenamiento más o menos las adiciones de agua de orígenes o descensos. Esto esta escrito matemáticamente como:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad 2.6$$

Dónde:

Q_i es la cantidad de flujo dentro de la celda que proviene de las celdas adyacentes por ejemplo, (ver figura 2.11) a través de seis caras, para el agua añadida o retirada (por ejemplo, recarga y bombeo).

S_s es el almacenamiento específico.

Δh es el cambio en la carga bajo el intervalo de tiempo Δt .

ΔV es el volumen de la celda.

El lado izquierdo de la ecuación 2.6 puede ser explicado en términos de flujo a través de seis caras de la celda, las fuentes de agua y los descensos, y el lado derecho de la misma ecuación en términos de la dimensión de la celda, lo que resulta como:

$$Q_{i,j-1/2,k} + Q_{i,j+1/2,k} + Q_{i-1/2,j,k} + Q_{i+1/2,j,k} + Q_{i,j,k-1/2} + Q_{i,j,k+1/2} + Q S_{i,j,k} = S_{s_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

Dónde:

$Q_{i,j-1/2,k}$ es el flujo en volumen de descarga a través de la cara entre las celdas i, j, k y $i, j-1, k$.

$Q_{S_{i,j,k}}$ es la suma de todos los flujos de entrada y salida contenidos en la celda; y Δc_i , Δv_k , Δr_j son las dimensiones de la celda i, j, k , (figura 2.11).

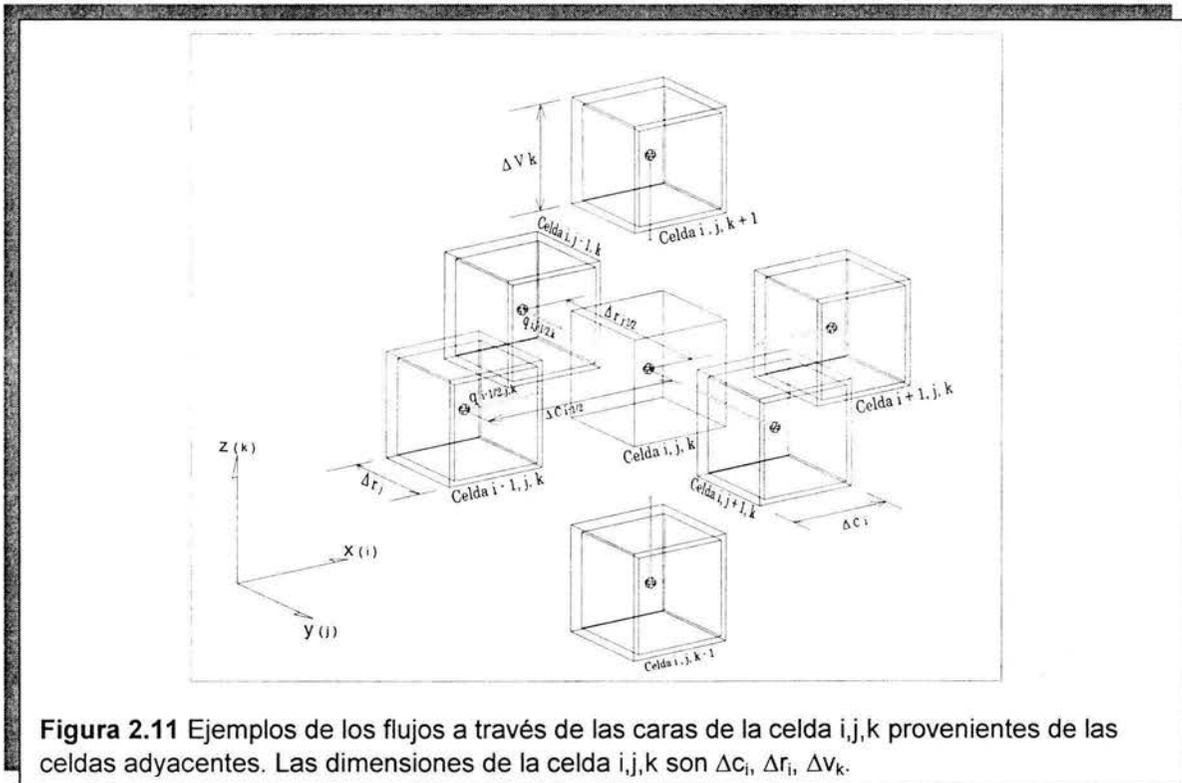


Figura 2.11 Ejemplos de los flujos a través de las caras de la celda i, j, k provenientes de las celdas adyacentes. Las dimensiones de la celda i, j, k son Δc_i , Δr_i , Δv_k .

El flujo de entrada a través de las caras de la celda puede ser extendido con la ecuación de Darcy como:

$$Q_{i,j-1/2,k} = K_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad 2.7$$

Donde:

- $h_{i,j,k}$ es la carga hidráulica en el nodo i, j, k .
- $h_{i,j-1,k}$ es la carga hidráulica en el nodo $i, j-1, k$
- $K_{i,j-1/2,k}$ es la conductividad hidráulica a lo largo de la fila entre los nodos i, j, k y $i, j-1, k$.
- $\Delta c_i \Delta v_k$ es el área de la cara de la celda normal a la dirección de la fila
- $\Delta r_{j-1/2}$ es la distancia entre los nodos i, j, k y $i, j-1, k$. (McDonald and Harbaugh, 1998).

El signo menos no es tomado en cuenta para simplificar el desarrollo. La forma de ésta y las ecuaciones similares para las otras caras pueden ser simplificadas por la definición de conductancia hidráulica, en este caso CR , R por que esta en la dirección de las filas (row), donde:

$$CR_{i,j-1/2,k} = K_{i,j-1/2,k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \quad 2.8$$

haciendo esta sustitución, las seis ecuaciones de flujo pueden ser escritas como:

$$\begin{aligned}
 Q_{i,j-1/2,k} &= CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \\
 Q_{i,j+1/2,k} &= CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\
 Q_{i-1/2,j,k} &= CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
 Q_{i+1/2,j,k} &= CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
 Q_{i,j,k-1/2} &= CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \\
 Q_{i,j,k+1/2} &= CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})
 \end{aligned}
 \tag{2.9 - 2.14}$$

donde las conductancias hidráulicas en las direcciones de las columnas y los estratos están dadas por CC y CV, respectivamente (McDonald y Harbaugh).

Siguiendo la notación de McDonald y Harbaugh (1988) los flujos combinados debido a los N orígenes o descensos esta dado por $Q S_{i,j,k}$.

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k}
 \tag{2.15}$$

Donde $P_{i,j,k}$ y $Q_{i,j,k}$ representan la suma de constantes relacionadas para N diferentes procesos de flujo de entrada y salida tales como el bombeo, carga inducida, etc.

Combinando estas ecuaciones se da la forma final para la ecuación de las diferencias finitas o :

$$\begin{aligned}
 &CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + \\
 &CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) + \\
 &P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = S_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \dots\dots\dots 2.17
 \end{aligned}$$

un paso final es el reemplazo de la derivación del término $\Delta h/\Delta t$ del lado derecho de la ecuación por un tiempo diferenciado.

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad 2.18$$

Donde:

m designa el tiempo presente en el cual las cargas son desconocidas y $m-1$ designa el tiempo previo al paso.

Todos los términos h sobre el lado izquierdo de la ecuación 2.17 traerían la inscripción m . Esencialmente, los términos de carga traerían consigo la inscripción m que son desconocidas y aquellos con la inscripción $m-1$ a los que son conocidos de un paso previo.

La forma final de la ecuación de diferencias finitas podría ser expresada.

$$CV_{i,j,k-1/2} h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k} h_{i,j-1,k}^m + \\ \left(-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k} \right) h_{i,j,k}^m \\ + CR_{i,j+1/2,k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2} h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k}$$

Donde:

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SC1_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}}$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - \frac{SC1_{i,j,k} h_{i,j,k}^m}{t_m - t_{m-1}}$$

$$SC1_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

Escribiendo una de estas ecuaciones para cada uno de los nodos en el sistema produce un sistema de ecuaciones.

$$[A] \{b\} = \{q\}$$

Donde:

A es la matriz de coeficientes.

b es el vector de los valores de carga desconocidos.

q es un vector de términos constantes de carga.

La solución matemática de este sistema de ecuaciones proporciona las cargas hidráulicas para un tiempo dado.

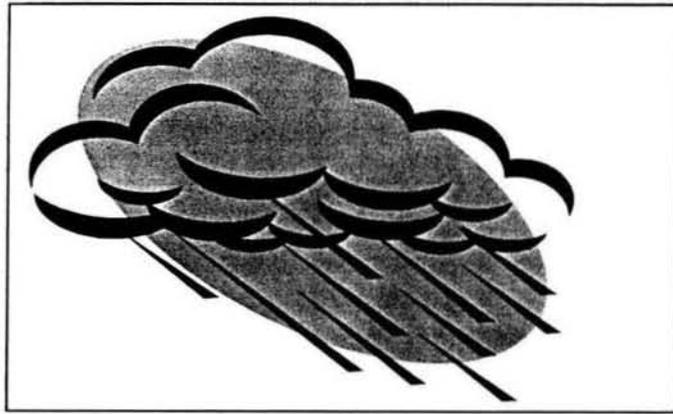
2.5.2.3 Sistema de solución de las ecuaciones de las diferencias finitas

Los procedimientos para la solución del sistema de ecuaciones algebraicas pueden ser caracterizadas como directas e interactivas. Las aproximaciones directas involucran un cambio del sistema de ecuaciones a una forma en las cuales puedan ser resueltas fácilmente, los métodos que se aprenden en el nivel de bachillerato (preparatoria) para resolver un sistema simple de ecuaciones son ejemplos de los métodos directos. La aproximación con iteraciones involucra suponer valores arbitrarios iniciales en las variables desconocidas y refinar estos valores a través de una serie de cálculos que se repiten hasta que la solución exacta es obtenida.

El MODFLOW original contiene dos métodos de iteraciones. El más simple es el Slice- Successive Overrelaxation (SSOR). En lugar de solucionar el sistema completo de las incógnitas en el mismo tiempo, las ecuaciones son formuladas para dos cortes dimensionales considerando que las cargas en los dos cortes adyacentes son conocidas. La solución del sistema de ecuaciones (realmente formulada como el cambio en la carga hidráulica) es resuelta por eliminación Gaussiana. Los cortes usualmente contendrán un número relativamente pequeño de nodos por que en muchos casos el número de estratos en el modelo es pequeño. Una iteración es completada cuando todos los cortes son procesados. Después de un largo número de iteraciones, las soluciones convergen.

El método Strongly Implicit Procedure (SIP) es una aproximación más complicada. Este procedimiento involucra la solución de incógnitas para la malla simultáneamente (McDonald y Harbaugh 1988). Más recientemente, Hill 1990 implementó un procedimiento preconditionado de gradiente conjugado para su uso con MODFLOW. En general ésta y las demás técnicas similares de solución son extremadamente rápidas y confiables, por estas razones, son ahora frecuentemente usadas para resolver sistemas de ecuaciones lineales.

CAPÍTULO 3



*Aspectos Fundamentales
de la Geohidrología Aplicados
en el Modflow*

CONTENIDO DEL TERCER CAPÍTULO

3. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA GEOHIDROLOGÍA APLICADOS EN EL MODFLOW

3.0 Introducción

3.1 Conceptos básicos de hidráulica aplicados en Geohidrología

- 3.1.1 Carga hidráulica total
- 3.1.2 Nivel de agua freática (NAF)

3.2 Formaciones geológicas subterráneas

- 3.2.1 Estratos confinantes
 - 3.2.1.1 Acuífugo
 - 3.2.1.2 Acuitardo
 - 3.2.1.3 Acuicludo
- 3.2.2 Acuíferos
 - 3.2.2.1 Acuífero libre
 - 3.2.2.2 Acuífero confinado
 - 3.2.2.3 Acuífero semiconfinado

3.3 Ecuaciones que Gobiernan el flujo del agua subterránea

- 3.3.1 El estudio de las ecuaciones del flujo de agua subterránea
- 3.3.2 Ley de Darcy
- 3.3.3 Ley de la conservación de la masa de un fluido

3.4 Parámetros que caracterizan las condiciones de transmisión y almacenamiento de los acuíferos

- 3.4.1 Porosidad
 - 3.4.1.1 Porosidad y clasificación de sedimentos
- 3.4.2 Permeabilidad
- 3.4.3 Conductividad hidráulica
 - 3.4.3.1 Métodos de medición para la conductividad hidráulica
 - 3.4.3.1.1 Métodos empíricos o semiempíricos
 - 3.4.3.1.2 Métodos de laboratorio: Permeámetros
 - 3.4.3.1.3 Método de campo: Prueba de trazadores
 - 3.4.3.1.4 Método de campo: Prueba en pozos de gran diámetro
 - 3.4.3.1.5 Método de campo: Pruebas en pozos de bombeo
- 3.4.4 Homogeneidad e isotropía
- 3.4.5 Rendimiento específico
- 3.4.6 Retención específica
- 3.4.7 Transmisibilidad
- 3.4.8 Coeficiente de almacenamiento
- 3.4.9 Almacenamiento específico

3.5 Condiciones de flujo de agua subterránea en pozos de bombeo

- 3.5.1 Importancia del estudio de los pozos
- 3.5.2 Flujo radial establecido
 - 3.5.2.1 Flujo radial establecido en un acuífero confinado
 - 3.5.2.2 Flujo radial establecido en un acuífero libre
 - 3.5.2.3 Flujo radial establecido en un acuífero semiconfinado
- 3.5.3 Flujo radial transitorio
 - 3.5.3.1 Flujo radial transitorio en un acuífero confinado
 - 3.5.3.1.1 Método de solución de Theis
 - 3.5.3.1.2 Método de solución de Cooper - Jacob
 - 3.5.3.2 Flujo radial transitorio en un acuífero libre
 - 3.5.3.3 Flujo radial transitorio en un acuífero semiconfinado sin almacenamiento en el acuitardo (Acuitardo incompresible)
 - 3.5.3.4 Flujo radial transitorio en un acuífero semiconfinado con almacenamiento en el acuitardo (Acuitardo compresible)

3 ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA GEOHIDROLOGÍA APLICADOS EN EL MODFLOW

3.0 INTRODUCCIÓN

El ambiente en que Visual MODFLOW opera, permite al usuario desenvolverse dentro del programa de una manera fácil y rápida. Sin embargo, es necesario que el usuario halla tenido un curso previo de Geohidrología o que al menos conozca los conceptos básicos que ésta ciencia maneja, ya que los datos de entrada, la simulación y los datos de salida del modelo contienen dichos conceptos.

La experiencia, los conocimientos teóricos y la tecnología hacen una poderosa fórmula para el desarrollo de cualquier ciencia. El propósito de este capítulo es dar al lector un repaso de sus conocimientos teóricos de Geohidrología, suponiendo que ya conoce esta ciencia, pero también está dedicado a aquellos que no han tenido contacto alguno con ella. El interés despertado por este capítulo en los nuevos lectores puede llevarlos a consultar la bibliografía que se presenta al final de esta investigación, si desean incrementar sus conocimientos acerca del tema.

Si el lector posee en estos momentos un dominio extenso de la Geohidrología entonces podrá pasar directamente a los siguientes capítulos, puesto que sabrá lo que el MODFLOW le pedirá para su correcta ejecución.

La palabra Geohidrología contiene la combinación de “**Geo = Tierra**” e “**Hidros = Agua**”, estos conceptos a su vez involucran términos que serán tratados de manera simple y clara en el presente capítulo:

Porosidad, estratos confinantes, acuíferos, permeabilidad, homogeneidad e isotropía... ; para **Geo**

Carga hidráulica, nivel freático, gasto...; para **Hidros**

Conductividad hidráulica, rendimiento específico, transmisividad... ; para la combinación de ambos.

Finalmente en la mayoría de los casos los estudios geohidrológicos llevan a una explotación de agua subterránea mediante pozos de bombeo. También los conceptos de explotación, tipos de flujo a pozos, etc., serán estudiados en este mismo capítulo.

3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA APLICADOS EN GEOHIDROLOGÍA

3.1.1 CARGA HIDRÁULICA TOTAL

Para comprender lo que significa este concepto, es conveniente introducir un manómetro de laboratorio, conocido como piezómetro.

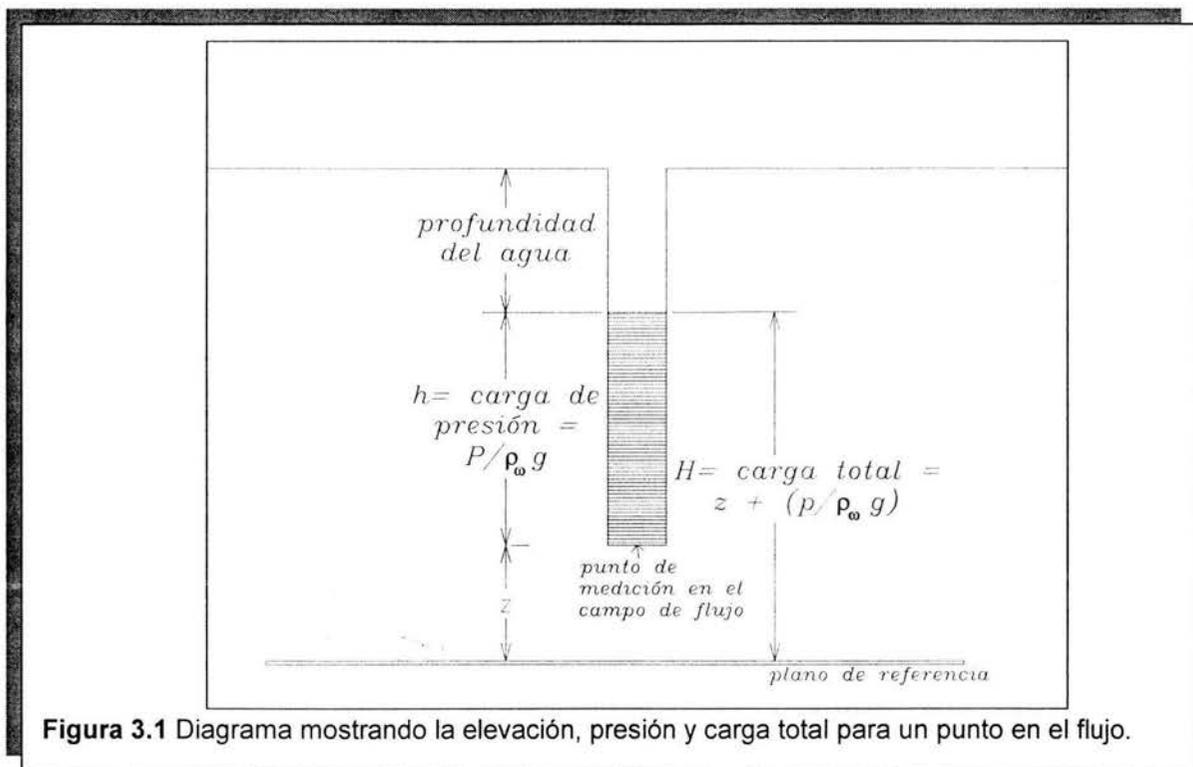


Figura 3.1 Diagrama mostrando la elevación, presión y carga total para un punto en el flujo.

Un piezómetro es un tubo usado para medir las elevaciones del nivel del agua en situaciones de campo. Éste se encuentra abierto en la parte superior dónde las medidas son tomadas y abierto en el fondo para facilitar la entrada del agua, una versión de este dispositivo se muestra en la figura 3.1, dónde se toma como referencia de elevaciones al nivel del mar (elevación cero). Los términos elevación de presión y carga total en la figura 3.1 pueden ser explicadas en términos de la ecuación de Bernoulli. Esta ecuación bajo condiciones de flujo establecido, indica que la energía total de un fluido incompresible es constante en todas las posiciones a lo largo de la trayectoria del flujo en un sistema cerrado. Esto se representa como:

$$gz + \frac{P}{\rho_w} + \frac{v^2}{2} = \text{constante} \quad 3.1$$

donde g es la aceleración debida a la gravedad, z es la elevación de la base del piezómetro, P es la presión ejercida por la columna de agua, ρ_w es la densidad del fluido, y v es la velocidad del fluido. Dividiendo entre g , la ecuación 3.1 se convierte en:

$$z + \frac{P}{\rho_w g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante} \quad 3.2$$

donde la cantidad $\rho_w g$ equivale al peso volumétrico del agua. Las ecuaciones 3.1 y 3.2 describen la energía total contenida en el fluido, donde el primer término es la energía de posición, el segundo término es la energía debida a la presión contenida en el fluido, y el tercer término es la energía debida al movimiento del fluido. Las dimensiones de la ecuación 3.1 son L^2 / T^2 o de energía por unidad de masa. La ecuación 3.2 esta expresada como energía por unidad de peso. En el Sistema Internacional de Unidades de medida (SI), las dimensiones son newton x metro por newton, o simplemente metro.

Los tres términos de la ecuación de Bernoulli cuando son expresados como energía por unidad de peso son referenciados como la carga de elevación, carga de presión y carga de velocidad, respectivamente. El término z en la ecuación 3.2 es la carga de elevación y representa la elevación en la base del piezómetro. En un sentido teórico esto representa el trabajo requerido para incrementar la elevación de una unidad de peso de agua del nivel de referencia a una altura z , figura 3.1, de otra forma cada cuerpo en la superficie de la tierra tiene una atracción gravitacional hacia el centro de la tierra. Elevar este cuerpo en contra de esta atracción requiere trabajo, y este trabajo es almacenado en la forma de energía potencial. La cantidad $P/\rho_w g$ representa la longitud de la columna de agua en el piezómetro. Este representa el trabajo que el fluido es capaz de hacer debido a su presión contenida. La suma de estos términos es llamada energía potencial del fluido. El tercer término, $v^2/2g$, es la energía cinética, o energía debida al movimiento del fluido. Como la velocidad del agua subterránea es muy baja, este término es ignorado para los propósitos de la Geohidrología. Así, la suma de la carga de elevación z y la carga de presión $P/\rho_w g$ representa la carga hidráulica total H en el sistema; esto es:

$$H = z + \frac{P}{\rho_w g} \quad 3.3$$

Simplemente, la carga total H es la suma de la elevación de la base del piezómetro más la longitud de la columna de agua en el piezómetro.

La carga total en un punto es encontrada por la medición de las elevaciones del nivel del agua en un piezómetro figura 3.1 . Sin embargo, el punto en el cual ésta carga se refiere no es el nivel del agua sino el punto en el final de la elevación del piezómetro en la elevación z . La carga total es algunas veces referenciada como la energía de posición y es una cantidad escalar.

En las unidades del Sistema Internacional de Unidades de medida (SI), H en la ecuación 3.3 esta en metros (m), z esta en metros (m) arriba del nivel de referencia (usualmente el nivel del mar), P esta en pascales (Pa), ρ_w esta en Kg/m^3 , y g esta en m/s^2 .

3.1.2 NIVEL DE AGUA FREÁTICA (NAF)

El agua puede estar presente bajo la superficie de la tierra como un líquido, sólido o vapor. Otros fluidos también pueden estar presentes, en estado de vapor o disueltos en agua. En la zona más baja de porosidad, generalmente lo que esta presente es materia mineral. Los suelos están saturados con agua, y el agua puede también contener gas disuelto. La presión del fluido es más grande que la presión atmosférica debido al peso del agua que se encuentra por encima de ella. Cuando la superficie esta próxima, la presión del fluido decrece conforme el ancho del fluido arriba de él también decrece. En alguna profundidad, el cual varia de lugar a lugar, la presión del fluido en los poros es igual a la presión atmosférica. La superficie ondulada en la cual la presión del agua en el poro es igual a la presión atmosférica es llamada nivel de aguas freáticas (NAF).

El agua en un pozo poco profundo (unos pocos metros debajo del nivel freático) subirá a la elevación del nivel freático en esa localización. La posición del nivel freático frecuentemente sigue la forma general de la topografía, aunque el relieve del nivel freático no es tan grande como el relieve topográfico. En todas las profundidades bajo el nivel freático, el suelo esta generalmente saturado con agua.

Un experimento hipotético puede servir para ilustrar la formación del nivel freático. Una caja hecha de plástico transparente es llenada con arena. Un extremo del plástico es cortado y la superficie de la arena es aplanada para modelar un valle drenando hacia el extremo cortado. Una llovizna fina de agua es entonces extendida uniformemente sobre la superficie de la arena, simulando una lluvia. La velocidad de precipitación es suficientemente baja para evitar cualquier flujo sobre la superficie de la arena. El agua se moverá hacia abajo a través de la arena, así que con el paso del tiempo, una zona de saturación se desarrollará en el fondo. Como se muestra en la figura 3.2A esta zona tendrá un nivel de superficie. Como más lluvia esta siendo simulada el nivel freático se elevará, continuando con una forma perfectamente plana. El agua seguirá este modelo hasta que el nivel freático alcance el punto más bajo del valle.

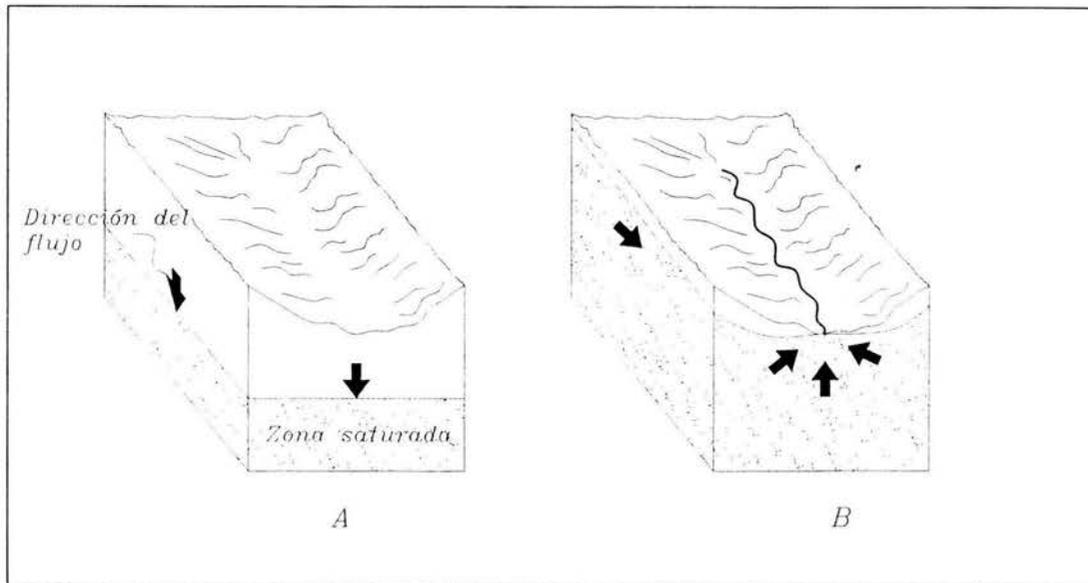


Figura 3.2A Diagrama de un nivel freático plano y horizontal en un acuífero donde existe un movimiento del agua a través de la zona no saturada pero no está presente el movimiento lateral de agua subterránea. **Figura 3.2B** Diagrama del nivel freático en una región donde el agua se está moviendo hacia abajo a través de la zona no saturada al nivel freático y existe un flujo de agua subterránea a través de la zona de saturación hacia una zona de descarga a lo largo del arroyo.

Si continúa la lluvia causará incrementos en la altura del nivel freático. En el valle, el nivel del agua estará arriba de la superficie, así que el agua ahora fluirá a través de un pequeño arroyo. Por otra parte, el nivel freático será más alto que la elevación de la parte baja del arroyo, y el agua subterránea empezará a fluir lateralmente debido al gradiente hidráulico. Ahora, el agua fluirá a través de la zona saturada hacia el punto de descarga, (figura 3.2B).

Podemos hacer las siguientes observaciones, de las cuales los puntos 4 y 5 pertenecen principalmente a regiones húmedas.

- 1.- En la ausencia del flujo de agua subterránea, el nivel freático formará un plano horizontal.
- 2.- Una pendiente en el nivel freático indica que el agua subterránea se está moviendo.
- 3.- Las zonas de descarga del agua subterránea ocurren en los lugares más bajos de la topografía.
- 4.- El nivel freático tiene la misma forma general que la superficie topográfica.
- 5.- El flujo del agua subterránea generalmente va de los lugares más altos de la topografía hacia los puntos más bajos de la topografía.

3.2 FORMACIONES GEOLÓGICAS SUBTERRÁNEAS

3.2.1 ESTRATOS CONFINANTES

Un estrato confinante es una unidad geológica que tiene poca o nada de permeabilidad intrínseca, menos que 10^{-2} darcy ($1 \text{ darcy} = 9.87 \times 10^{-13} \text{ m}^2$; este concepto se tratará en el apartado 3.4). Este es un límite poco arbitrario y depende de las condiciones locales. En áreas de arcilla con permeabilidades intrínsecas de 10^{-4} darcy, y sedimentos de 10^{-2} darcy pueden ser usados para suministrar agua a un pequeño pozo. O de otro modo el mismo sedimento podría ser considerado como un estrato confinante si se encontrara en un área de gravas con permeabilidades intrínsecas de 100 darcys. El agua subterránea se mueve a través de muchos estratos confinantes, aunque la velocidad del movimiento es muy lento. Los estratos confinantes pueden ser importantes elementos de un sistema de flujo regional, y los estratos confinantes de filtración pueden transmitir significantes cantidades de agua si el área seccional es demasiada extensa.

Las capas confinantes son algunas veces subdivididas en acuitardos, acuicludos y acuifugos:

3.2.1.1 Acuifugo

Un acuifugo es una unidad geológica subterránea absolutamente impermeable que no transmitirá ni almacenará nada de agua. Como ejemplos encontramos, rocas metamórficas, volcánicas compactas (basaltos, granitos, esquistos, etc).

3.2.1.2 Acuitardo

El acuitardo ha sido definido como un estrato subterráneo de baja permeabilidad que puede contener agua y también transmitirla de un acuífero a otro muy lentamente. El agua no es cedida con facilidad a los pozos de bombeo. Como ejemplo de esta unidad geológica encontramos arenas arcillosas, limos arenosos, arcillas arenosas, etc.

Las rocas consideradas para ser acuitardos en una región pueden servir como acuíferos en otras. Por ejemplo, en algunos lugares el suministro de agua es obtenido de muchos materiales, estos materiales no son capaces de suministrar suficientes cantidades de agua como para usos municipales y de irrigación, pero frecuentemente son adecuadas para usos domésticos o de granja en áreas rurales. Así el término acuífero y acuitardo son ambiguos.

3.2.1.3 Acuicludo

Es una formación subterránea natural que almacena agua pero que no la transmite en cantidades significativas en un balance regional de aguas subterráneas. Por ejemplo, esto ocurre en arcilla, limo, lutita cementada, pizarra, etc.

3.2.2 ACUÍFEROS

Un acuífero es una unidad geológica subterránea permeable que puede almacenar y transmitir agua en velocidades suficientemente rápidas para suministrarla en cantidades razonables a los pozos. La permeabilidad intrínseca de los acuíferos va del rango de cerca de 10^{-2} darcy a valores mayores. Algunos acuíferos pueden ser considerados económicamente aprovechables en el sentido que ellos suministran suficientemente cantidades de agua a larga escala en irrigación o para uso municipal. Arenas no consolidadas, gravas, areniscas, calizas, dolomitas, basaltos y rocas metamórficas son ejemplos de rocas conocidas para ser acuíferos. En la naturaleza podemos clasificar a los acuíferos como libres, confinados o una mezcla de los dos.

3.2.2.1 Acuífero libre

Los acuíferos pueden estar cercanos a la superficie de la tierra, con estratos continuos de materiales de alta permeabilidad intrínseca extendiéndose de la superficie del terreno a la base del acuífero. Tal acuífero es llamado acuífero de nivel freático, acuífero no confinado o libre. La recarga para el acuífero puede ser de una filtración hacia abajo a través de la zona no saturada, figura 3.3. La recarga también puede ocurrir a través de un flujo de agua subterránea o una filtración hacia arriba de un estrato adyacente.

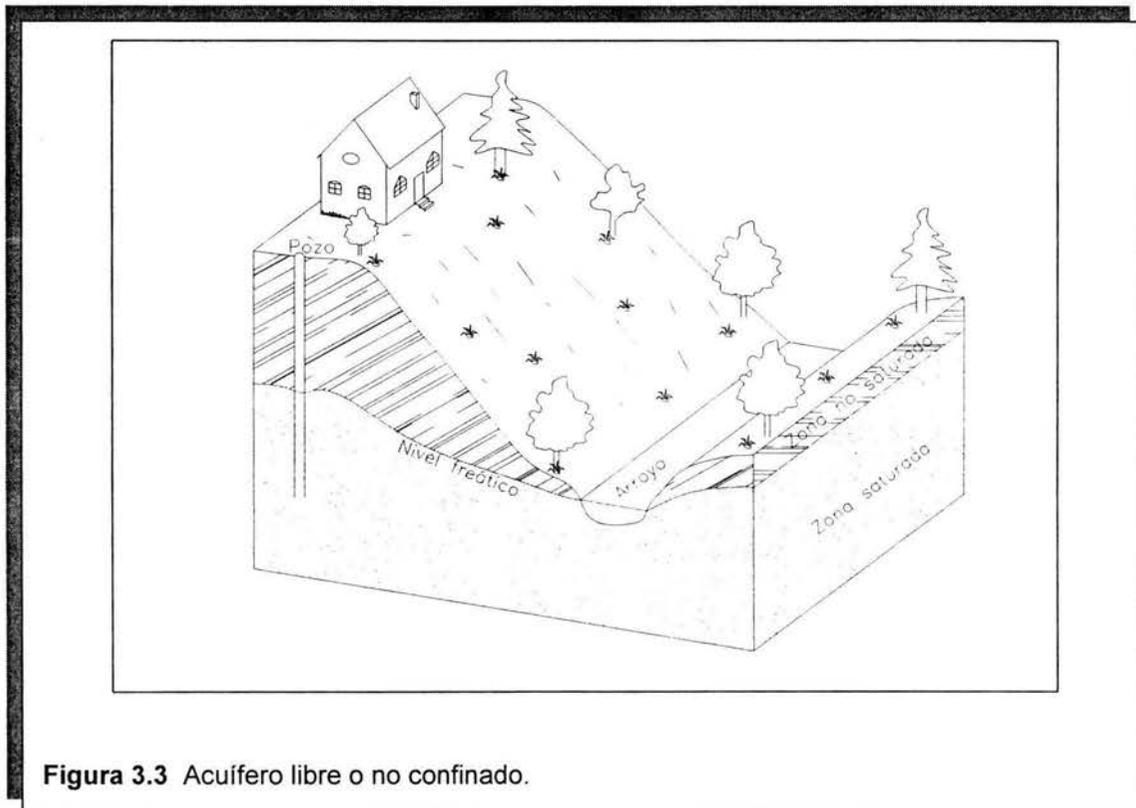


Figura 3.3 Acuífero libre o no confinado.

3.2.2.2 Acuífero confinado

Algunos acuíferos, llamados confinados, o acuíferos artesianos están cubiertos por una capa confinante. La recarga para ellos puede ocurrir en una área de recarga, donde la captación del acuífero está fuera de él, o por una lenta filtración hacia abajo a través de un estrato confinante de filtración, figura 3.4. Si un pozo es perforado en el lugar a través del estrato confinante, el agua del acuífero puede elevarse en una distancia considerable, arriba de la parte superior del acuífero, esto indica que el agua en el acuífero está bajo presión. La superficie potenciométrica para un acuífero confinado es una superficie representativa del nivel para el cual el agua del acuífero subiría en un pozo, (el término piezométrico fue usado en el pasado, este ha sido ahora reemplazado por potenciométrico). Si la superficie potenciométrica de un acuífero está arriba de la superficie de la tierra, un pozo artésiano podrá ocurrir. El agua fluirá del pozo sin necesidad de bombear. Por supuesto, si una bomba fuera instalada, la cantidad de agua obtenida del pozo podría ser incrementada.

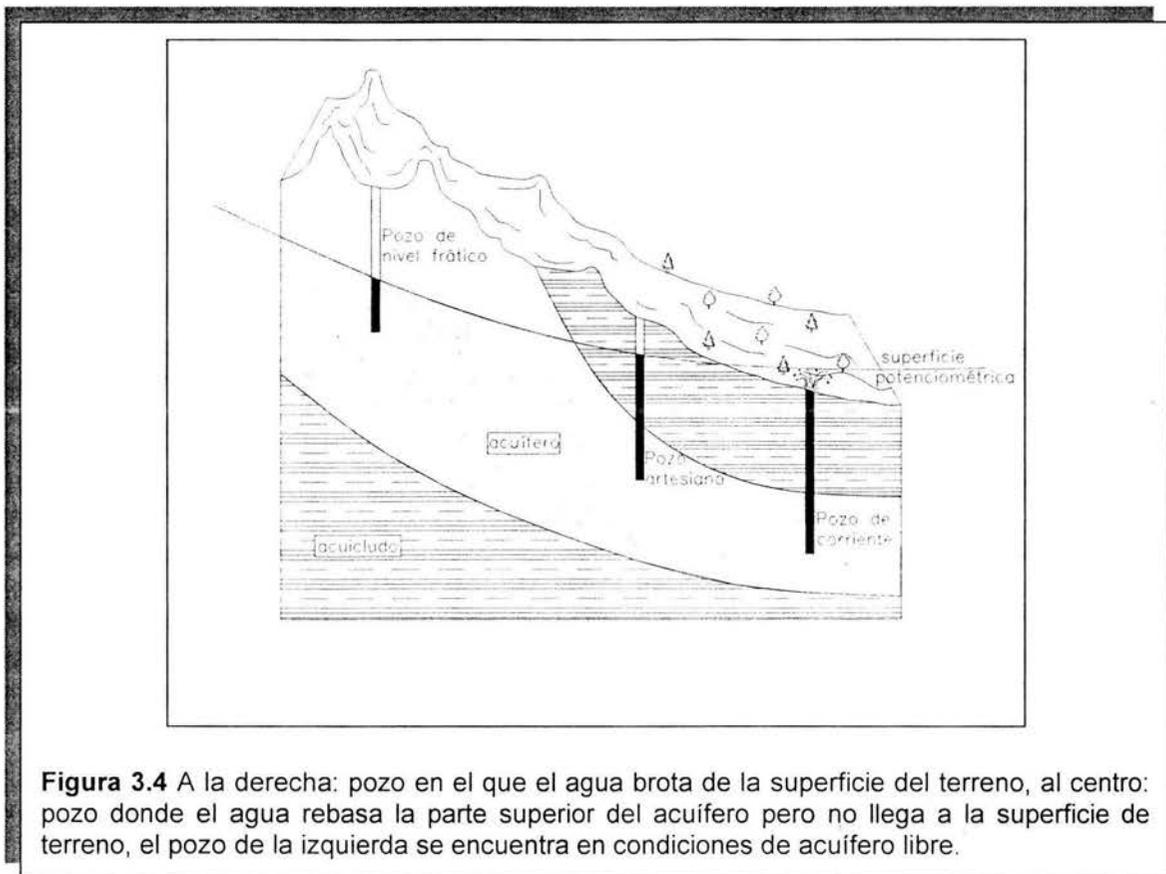


Figura 3.4 A la derecha: pozo en el que el agua brota de la superficie del terreno, al centro: pozo donde el agua rebasa la parte superior del acuífero pero no llega a la superficie de terreno, el pozo de la izquierda se encuentra en condiciones de acuífero libre.

3.2.2.3 Acuífero semiconfinado

Es un acuífero completamente saturado que está limitado abajo por un estrato confinante (acuicludo) y arriba por un acuitardo. El acuitardo puede estar parcialmente saturado cuando éste se extiende hasta la superficie de la tierra (figura 3.5 pozo de la derecha) o está completamente saturado cuando forma parte de un acuífero confinado que está limitado arriba por el Nivel Freático (figura 3.5, pozo de la izquierda).

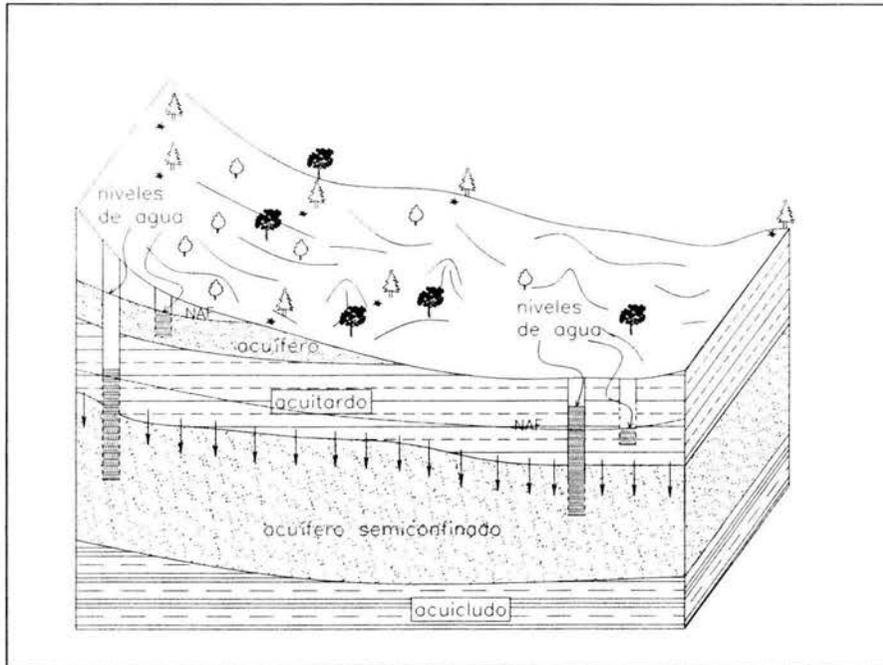


Figura 3.5 Ejemplo de acuífero semiconfinado.

El nivel potenciométrico en un pozo de un acuífero semiconfinado puede coincidir con el nivel de agua freática, si existe un equilibrio hidrológico entre la recarga del acuífero y la descarga. Un acuífero de multiestratos es un caso especial de un acuífero semiconfinado.

3.3 ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

3.3.1 EL ESTUDIO DE LAS ECUACIONES DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Lo que la Geohidrología hace, aparte de muchas otras geociencias, es enfatizar el tratamiento de problemas cuantitativamente. Estos problemas podrían incluir la predicción de cuánta carga hidráulica en un punto descenderá por el bombeo en un pozo cercano por algún tiempo en específico, o cómo la concentración de un contaminante en un punto cambiará en respuesta a algún diseño de remedio propuesto. Las aproximaciones cuantitativas también producen la base para interpretar los resultados de varias pruebas (por ejemplo pruebas en los acuíferos por medio de pozos) que los geohidrologos rutinariamente interpretan en el campo.

La esencia de la aproximación cuantitativa involucra la representación de la información acerca de un problema en términos matemáticos que eventualmente resolverán las ecuaciones.

Para ilustrar esta idea usaremos un problema de flujo simple de agua subterránea mostrado en la figura 3.6A, la cuestión a resolver es crear un modelo de los estratos geológicos (y el resultado de la distribución de la conductividad hidráulica) y la variación de la configuración del nivel freático con el tiempo. ¿Qué modelo de flujo de agua subterránea tendría lugar? La conceptualización del problema matemático (figura 3.6B) requiere (1) encontrar la ecuación apropiada para describir el flujo de agua subterránea, (2) establecer un dominio o región donde la ecuación tendrá solución y (3) definir las condiciones a lo largo de las fronteras. La solución de las ecuaciones establece la carga hidráulica en posiciones específicas (x,z) dentro del dominio. Estos valores de carga hidráulica pueden ser perfilados para proporcionar distribuciones equipotenciales de los cuales podemos deducir el modelo del flujo, figura 3.6C.

Este ejemplo simple está diseñado para resaltar algunos de los nuevos conocimientos que son requeridos para el tratamiento cuantitativo del flujo de agua subterránea. El punto de inicio es entender la forma y la función de las ecuaciones de flujo de agua subterránea y cómo son derivadas. Es necesario aprender de las condiciones de frontera y como son representadas las influencias del mundo más allá de la región de interés sobre el problema de flujo específico. El desarrollo de las ecuaciones que aplican al flujo en los acuíferos hace esto claro ya que existen importantes parámetros hidráulicos que son explicados en detalle.

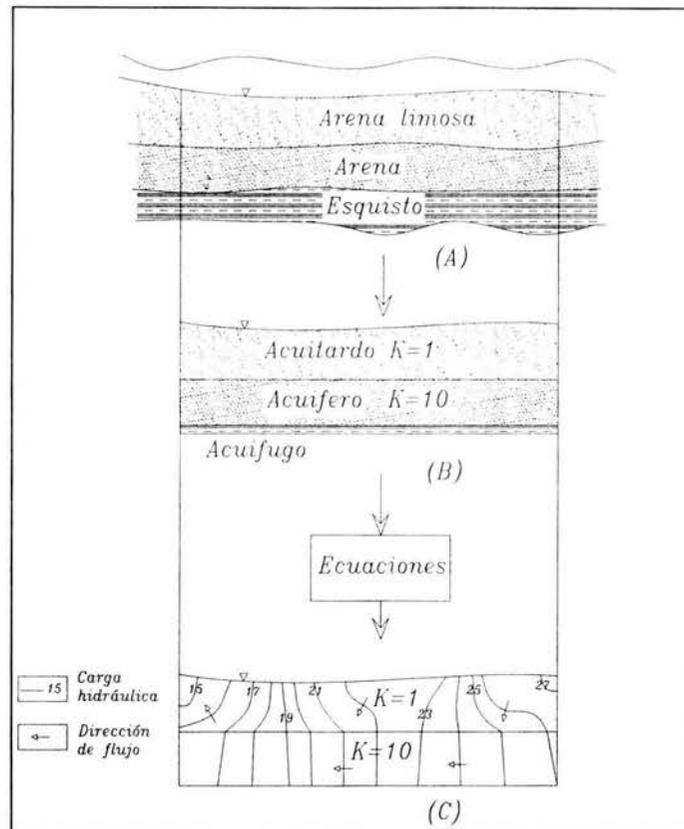
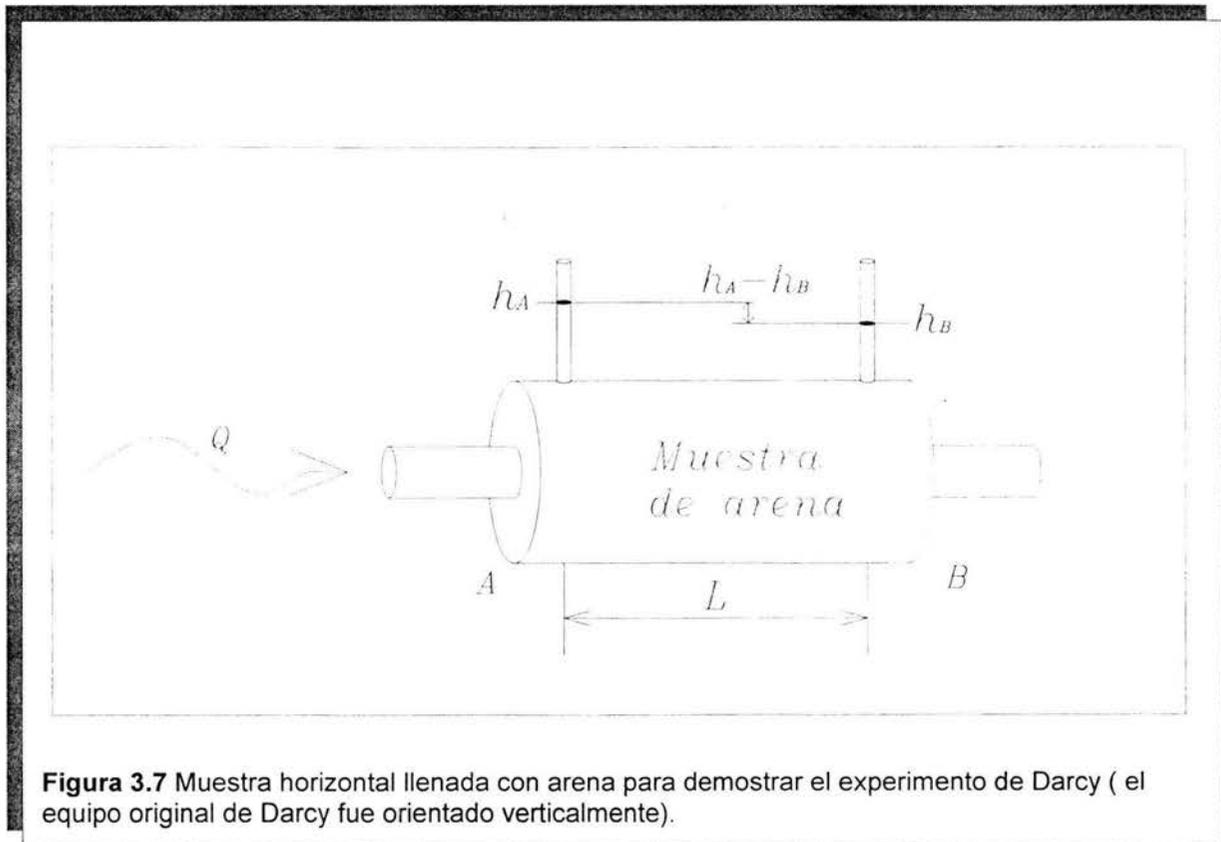


Figura 3.6 Un problema geohidroológico (A); es conceptualizado dentro de un problema matemático (B); el cual es finalmente resuelto en términos de la distribución de la carga hidráulica (C).

3.3.2 LEY DE DARCY

En la mitad del siglo XIX, el ingeniero civil y francés Henry Darcy (1856), hizo el primer estudio sistemático del movimiento del agua en un medio poroso. Él estudió el movimiento del agua a través de columnas de arena usadas para la filtración del agua. Darcy encontró que la velocidad del agua a través de la muestra de una naturaleza dada es proporcional a la diferencia en la altura de los niveles de agua entre los dos extremos de un filtro e inversamente proporcional a la longitud de la ruta del flujo. Él determinó también que la cantidad del flujo es proporcional a un coeficiente K , el cual depende de la naturaleza del medio poroso.

La figura 3.7 muestra un tubo horizontal llenado con arena, el agua es aplicada bajo presión en el extremo A. La presión puede ser medida y observada por dos tubos delgados verticales abiertos en la arena, uno en el punto A, (el flujo del agua a través del tubo y la descarga en el punto B) y el otro tubo vertical o piezómetro es colocado para medir la presión en B.



Darcy encontró experimentalmente que la descarga Q , es proporcional a la diferencia en las alturas del agua h (carga hidráulica), entre los extremos e inversamente proporcional a la longitud del flujo, L :

$$Q \propto h_A - h_B$$

$$Q \propto 1/L$$

3.4 y 3.5

el flujo es también obviamente proporcional a la sección transversal del área del tubo, A . Cuando se combinan con la constante de proporcionalidad, K , el resultado es la expresión conocida como la **Ley de Darcy**:

$$Q = -KA \left(\frac{h_A - h_B}{L} \right)$$

3.6

esto puede ser expresada en términos más generales como:

$$Q = -KA \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad 3.7$$

donde dh/dl es conocida como el gradiente hidráulico. La cantidad dh representa el cambio en la carga entre dos puntos que están muy cercanos uno del otro, y dl es la distancia pequeña entre estos puntos. El signo negativo indica que el flujo esta en la dirección de decrecimiento de la carga hidráulica. El uso del signo negativo se determina del gradiente. Si el valor de h_2 en el punto X_2 es más grande que h_1 en el punto X_1 , entonces el flujo va del punto X_2 al X_1 , si $h_1 > h_2$ entonces el flujo va de X_1 a X_2 .

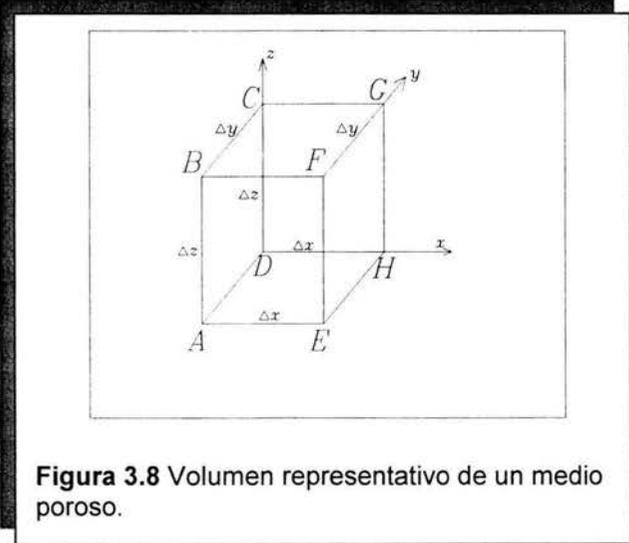
3.3.3 LEY DE LA CONSERVACIÓN DE LA MASA DE UN FLUIDO

El tratamiento matemático del flujo de agua subterránea a través de un medio poroso depende de una ecuación que captura la esencia de la física del fluido. La base para desarrollar tal ecuación es un enunciado de conservación que balancea la entrada de flujo, la salida de flujo y el cambio en la masa del agua dentro de un volumen representativo del medio poroso.

En otras palabras, el enunciado de la conservación de la masa del fluido puede estar dado, en unidades de masa por tiempo, y se puede expresar como:

Masa del flujo de entrada – masa del flujo de salida = cambio en la masa almacenada en un tiempo.

En general este enunciado puede ser aplicado a un dominio de cualquier tamaño. Considerar este enunciado como una aplicación a un pequeño cubo de material poroso de un volumen unitario donde $\Delta x \Delta y \Delta z = \text{unidad}$ (figura 3.8). Este cubo sirve para representar un volumen elemental.



Para esta figura el flujo másico que entra a través de la cara ABCD es:

$$ABCD = \rho_w q_x \Delta y \Delta z \quad 3.8$$

La densidad ρ_w tiene unidades de M/L^3 mientras que el gasto específico q_x es una velocidad L/T así que $\rho_w q_x \Delta y \Delta z$ tiene unidades de masa por tiempo.

En general la masa de salida puede ser diferente que la de entrada y esta dada como:

$$\text{masa de salida a través de la cara EFGH} = \left[\rho_w q_x + \frac{\partial(\rho_w q_x) \Delta x}{\partial x} \right] \Delta y \Delta z \quad 3.9$$

El flujo másico de salida neto es la diferencia entre el flujo de entrada y el de salida o, restando la ecuación 3.9 de 3.8

$$\text{flujo neto de salida a través de la cara EFGH} = - \frac{\partial(\rho_w q_x) \Delta x \Delta y \Delta z}{\partial x} \quad 3.10$$

haciendo cálculos similares para el resto del cubo:

$$\text{flujo neto de salida a través de la cara CDHG} = - \frac{\partial(\rho_w q_y) \Delta x \Delta y \Delta z}{\partial y} \quad 3.11$$

$$\text{flujo neto de salida a través de la cara BCGF} = - \frac{\partial(\rho_w q_z) \Delta x \Delta y \Delta z}{\partial z} \quad 3.12$$

Sumando estos resultados dados:

$$- \left[\frac{\partial(\rho_w q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w q_z)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad 3.13$$

en unidades de masa por tiempo.

El lado derecho del enunciado de la conservación de la masa es meramente un cambio en el almacenamiento de la masa con respecto al tiempo. Para representar más fácil esto en unidades de volumen, esto se convierte en

$$\frac{\partial(\rho_w n)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad . \quad 3.14$$

de nuevo en unidades de masa por tiempo. Igualando las ecuaciones 3.14 y 3.13 y dividiendo ambos lados por $\Delta x \Delta y \Delta z$. da:

$$-\left[\frac{\partial(\rho_w q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w q_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial(\rho_w n)}{\partial t} \quad . \quad 3.15$$

el cual expresa que el gasto neto de salida por unidad de volumen es igual al cambio de la masa del fluido en un tiempo. Suponiendo que la densidad del fluido no varía en el espacio, el término densidad sobre el lado izquierdo puede ser tomado como una constante así que la ecuación

$$-\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] = \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(\rho_w n)}{\partial t} \quad . \quad 3.16$$

Con la simple transformación de 3.15 a 3.16 la ecuación se transforma en volumen de fluido por unidad de volumen en lugar de masa por unidad de volumen. Para el lado izquierdo de la ecuación 3.16 q_x es meramente Q_x/A el cual expresa un flujo volumétrico por unidad de tiempo por unidad de área. Así el lado izquierdo de la ecuación 3.16 expresa el fluido neto de salida por unidad de volumen. Esto es, que el lado derecho de la ecuación 3.16 debe describir el cambio del volumen de fluido dentro de una unidad de volumen en un tiempo, o sea, $\partial(V_w/V_T)/\partial t$. Así la ecuación 3.16 expresa el flujo neto de salida por unidad de volumen igual al cambio del volumen del fluido dentro de una unidad de volumen en un tiempo.

3.4 PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN LAS CONDICIONES DE TRANSMISIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS

3.4.1 POROSIDAD

Un aspecto importantísimo para entender como se da el paso del agua subterránea a través de los estratos del subsuelo es la porosidad. Este concepto implica la existencia de vacíos en las rocas y suelos. Casi al mismo tiempo que se forman las rocas los espacios vacíos también son formados. Los procesos de intemperismo físicos y químicos también ayudan a formar los vacíos ya que degradan y descomponen a las rocas sólidas. Así mismo un ligero movimiento de las masas rocosas puede crear fracturas o agrietamientos en las mismas, propiciando de esta manera la creación de espacios.

En base al tiempo de formación de dichos vacíos se usan los términos porosidad primaria y porosidad secundaria, en el primer caso los espacios son creados al mismo tiempo que la roca es formada, por ejemplo las sedimentarias como las areniscas, gravas, arenas y en el segundo caso los espacios son formados por fracturas o disoluciones como basaltos, granitos y caliza. La figura 3.9 muestra los dos tipos de porosidad desde el punto de vista de la formación de los vacíos.

La expresión matemática para definir la porosidad esta dada por:

$$n = 100 \left(\frac{V_v}{V_T} \right) \quad 3.17$$

donde:

n es la porosidad (porcentaje)

V_v es el volumen de los espacios vacíos en una unidad de volumen del material (L^3 ; cm^3 o m^3)

V_T es el volumen total del material, incluyendo ambos, sólidos y vacíos. (L^3 ; cm^3 o m^3)

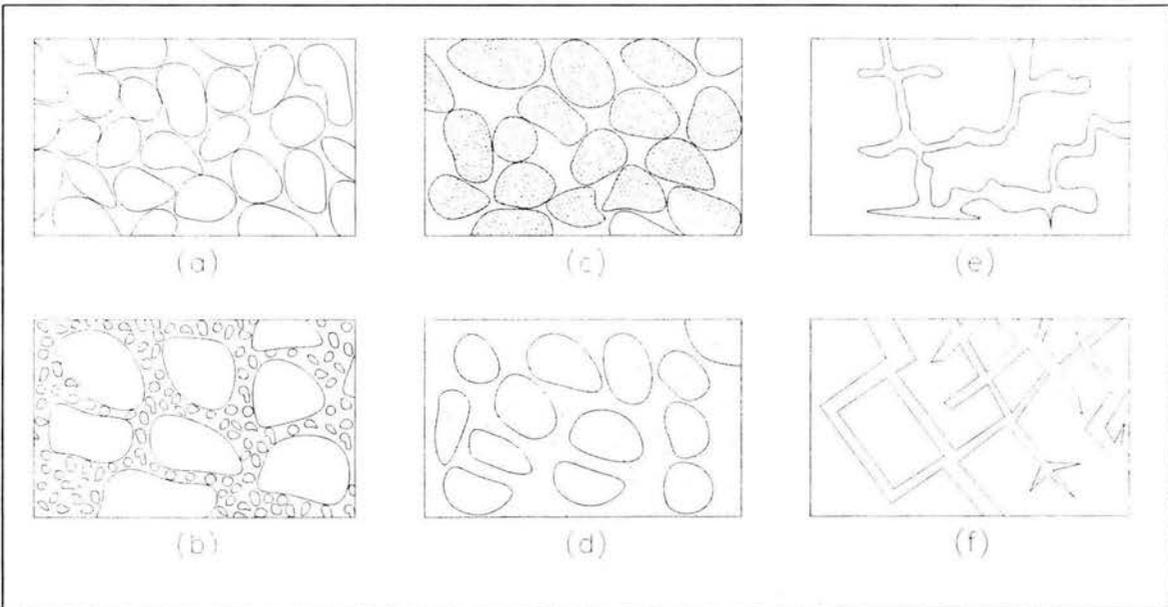


Figura 3.9 Relación entre la textura y la porosidad. (a) depósito de sedimentos uniformes con una porosidad alta; (b) depósito de sedimentos pobremente uniformes con una porosidad baja; (c) depósito de sedimentos uniformes consistentes en granos que a su vez son porosos, así que el depósito tiene una porosidad muy alta.; (d) depósitos sedimentarios uniformes los cuales la porosidad ha sido disminuida por la depositación de materia mineral en los espacios; (e) roca porosa por disolución; (f) roca porosa por fractura.

Un parámetro relacionado a este término es la relación de vacíos, designado como e , la cual esta formulada como:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad 3.18$$

donde:

- e es la relación de vacíos (adimensional)
- V_v es el volumen de vacíos (L^3 ; cm^3 o m^3)
- V_s es el volumen de los sólidos. (L^3 ; cm^3 o m^3)

La porosidad de un suelo puede medirse en el laboratorio tomando una muestra de volumen conocido. La muestra es secada en un horno a $105^\circ C$ hasta que alcanza un peso constante. Esto expulsa la humedad adherida a las superficies en la muestra, pero no el agua que esta hidratada ya que forma parte de ciertos minerales. La muestra secada es entonces sumergida en un volumen conocido de agua y se mantiene en una cámara sellada hasta que es saturada. El volumen de los vacíos (V_v) es igual al volumen

de agua original menos el volumen en la cámara después de que la muestra saturada es removida.

Este procedimiento de laboratorio produce un valor de porosidad efectiva por que excluye los poros que no son lo suficientemente grandes como para contener las moléculas de agua y aquellos que no están interconectados. Por lo tanto la porosidad efectiva (n_e) es la porosidad disponible para el flujo de agua. Peyton (1986) estudió la porosidad efectiva de sedimentos en granos finos. Una conclusión de ese estudio fue que la porosidad efectiva de un sedimento es una función del tamaño de las moléculas que están transportándose y del tamaño de las conexiones entre los poros. Estas conexiones, son típicamente más pequeñas que los poros. Si la molécula que empieza a transportarse tiene un diámetro mayor que alguno de las conexiones entre poros, esto limitaría la porosidad efectiva con respecto a esa molécula. Peyton (1986) encontró que aún en una arcilla lacustre, las moléculas de agua podían pasar a través de todas las conexiones. Así que la porosidad efectiva fue la misma que la porosidad. Esto sugiere que al menos en sedimentos todos los poros están conectados y que no es necesario preocuparse por la porosidad efectiva con respecto al flujo del agua.

3.4.1.1 Porosidad y clasificación de sedimentos

La porosidad de sedimentos consiste en los espacios vacíos entre los fragmentos sólidos. Si los fragmentos son esferas sólidas de diámetros iguales, estas pueden ser colocados juntas de tal manera que cada esfera esta colocada encima de otra exactamente en la cresta de la inferior, figura 3.10A, este ordenamiento es llamado paquete cúbico, el cual tiene una porosidad asociada de 47.65%, si las esferas se colocan en una formación como la mostrada en la figura 3.10B, el resultado es un paquete romboidal, con una porosidad de 25.95%.

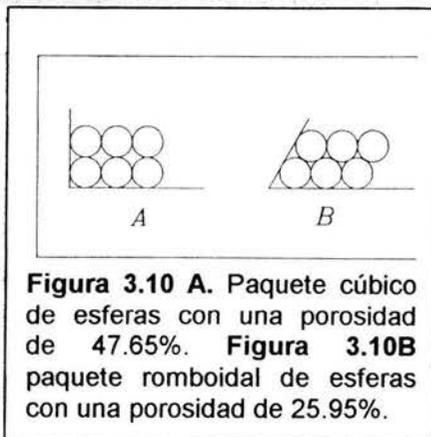


Figura 3.10 A. Paquete cúbico de esferas con una porosidad de 47.65%. **Figura 3.10B** paquete romboidal de esferas con una porosidad de 25.95%.

Estas dos configuraciones representan los extremos de porosidad para un arreglo equidimensional de esferas, en el cual cada esfera toca todas sus esferas vecinas. El diámetro de las esferas no influye en la porosidad. Si un sedimento contiene una mezcla de diferentes tamaños, la porosidad será mas baja. Las partículas más pequeñas pueden llenar los espacios vacíos entre las partículas más grandes. A más amplio el rango de tamaño de las partículas, más pequeño es el resultado para la porosidad, figura 3.11.

Los agentes geológicos pueden acomodar sedimentos de tamaños similares dentro de estratos. Viento, flujo del agua, y la acción de las olas tienden a crear sedimentos bien ordenados o uniformes, otros procesos, tales como la acción glacial y los desbordamientos, resultan en sedimentos con un rango amplio de tamaños de granos. Aquellos sedimentos pobremente uniformes tienen bajas porosidades.

Los sedimentos son clasificados en base al tamaño (diámetro) de los granos individuales. Existe también muchos sistemas de clasificación en uso. La clasificación dentro de la ingeniería de sedimentos es algo diferente que la clasificación geológica. El American Society of Testing Materials define los sedimentos en base a la distribución del tamaño de grano.

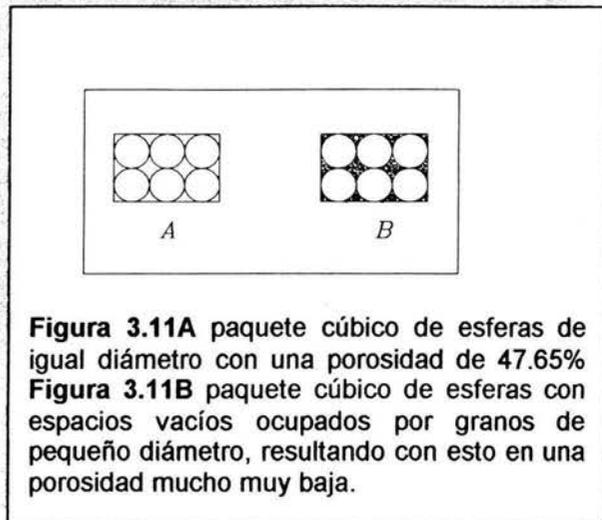


Figura 3.11A paquete cúbico de esferas de igual diámetro con una porosidad de 47.65%
Figura 3.11B paquete cúbico de esferas con espacios vacíos ocupados por granos de pequeño diámetro, resultando con esto en una porosidad mucho muy baja.

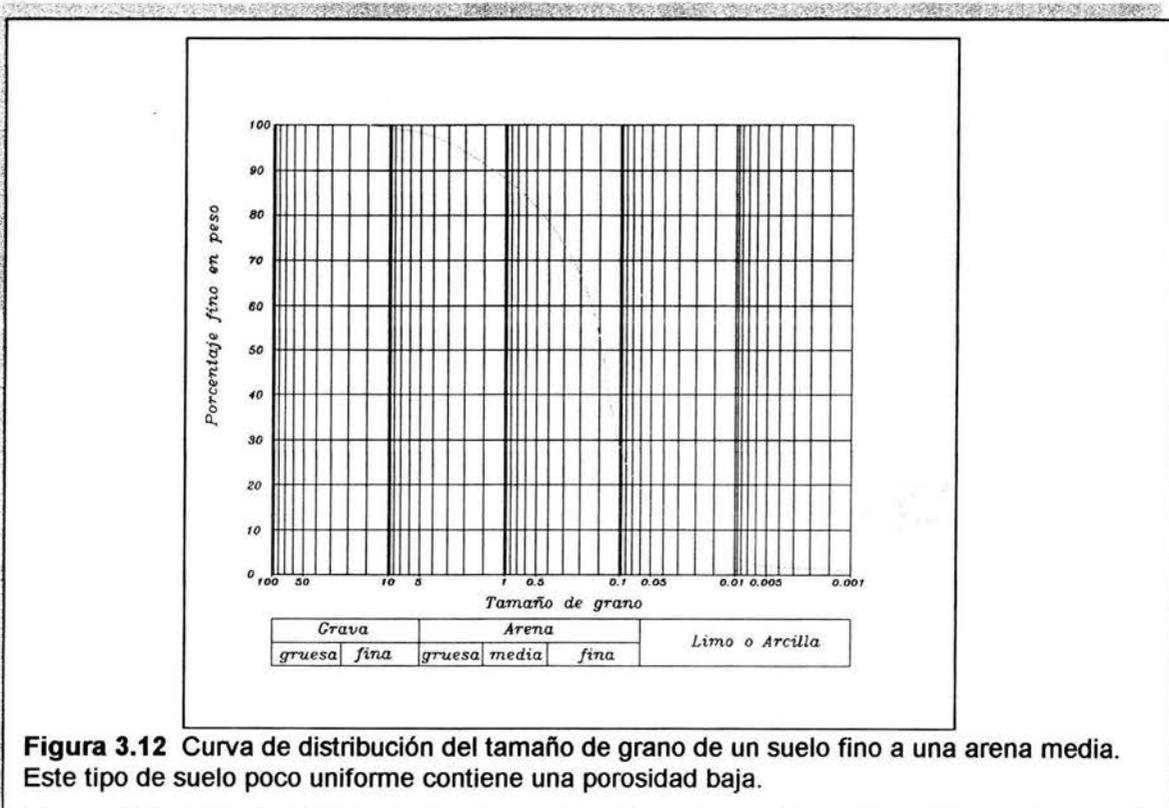


Figura 3.12 Curva de distribución del tamaño de grano de un suelo fino a una arena media. Este tipo de suelo poco uniforme contiene una porosidad baja.

La distribución del tamaño de grano de un sedimento puede ser convenientemente dibujado sobre un papel semilogarítmico. El porcentaje acumulativo más fino por peso es

dibujado sobre una escala aritmética y el tamaño del grano es dibujada sobre una escala logarítmica. El tamaño de grano de la fracción de arena es determinada por la agitación de la arena a través de una serie de cribas con aberturas de malla decreciendo. La malla 200, con una abertura de 0.075 mm, separa la fracción de arena de la de los finos. La graduación de los finos es determinada por un examen hidrométrico, el cual esta basada en la velocidad en la que los sedimentos se asientan en el fondo del agua. La figura 3.12 es una curva de distribución para un suelo con granos finos hasta arenas. Este ejemplo es pobremente ordenado o no uniforme, ya que existe un amplio rango de tamaños de partículas presentes.

La figura 3.13 es una curva de distribución de tamaño de grano para una arena fina bien ordenada. Menos del 5% de la muestra consiste en finos que pasa la malla 200.

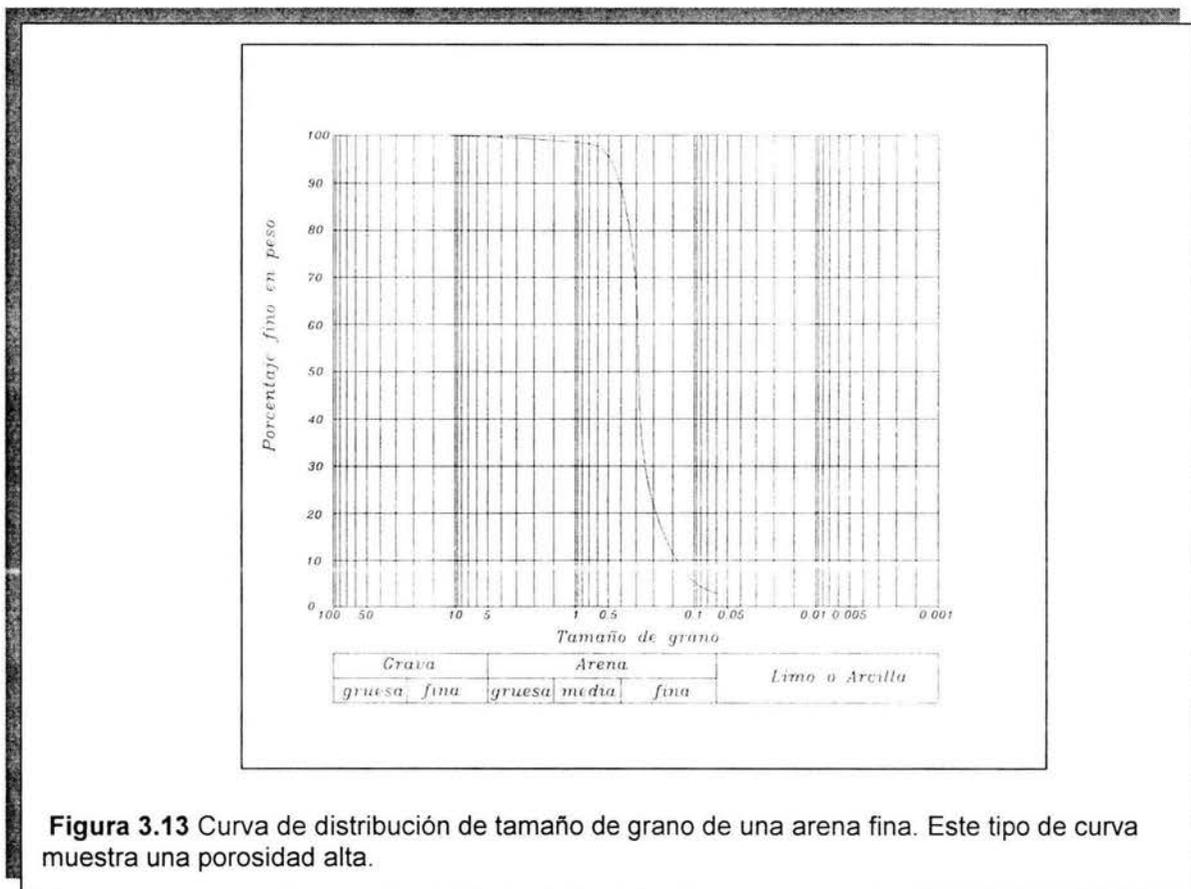


Figura 3.13 Curva de distribución de tamaño de grano de una arena fina. Este tipo de curva muestra una porosidad alta.

El *coeficiente de uniformidad* de los sedimentos es una medida de que tan bien o pobremente uniforme se encuentra un suelo. El coeficiente de uniformidad, C_u , es la relación del tamaño de partícula que es 60% más fino en peso, d_{60} , a el tamaño de grano que es 10% más fina en peso, d_{10} :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

3.19

Una muestra con un C_u menor a 4 es bien uniforme; si la C_u es mayor a 6 el suelo es pobremente uniforme. La arena pobremente uniforme en la figura 3.12 tiene un $C_u=8.3$, mientras que por el contrario la arena bien uniforme de la figura 3.13 tiene un C_u de 1.4.

El tamaño de grano efectivo, d_{10} , es el tamaño correspondiente a la línea del 10% del material más fino sobre la curva partícula-tamaño.

Las arcillas y algunos suelos orgánicos pueden tener porosidades muy altas. Los materiales orgánicos no se compactan completamente debido a sus formas irregulares. El efecto de dispersión de la carga electrostática presente en la superficie de ciertos minerales de la arcilla causan que las partículas de la arcilla estén repeliéndose unas con otras. El resultado es una proporción relativamente grande de espacios vacíos.

Un rango general de porosidad que puede ser esperado para algunos sedimentos típicos están enlistados en la tabla 3.1.

Arenas y gravas bien uniformes	25 - 50%
Arenas y gravas mezcladas	20 - 35%
Limo	35 - 50%
Arcilla	33 - 60%

Tabla 3.1 Rangos de porosidad para sedimentos.

La porosidad puede encontrarse en rangos de cero o cercanos a cero a más del 60%. En general para materiales sedimentarios, a más pequeño el tamaño de partícula, más alta es la porosidad. Esto es mejor demostrado por comparación de la porosidad de las gravas con los finos.

3.4.2 PERMEABILIDAD

Una vez definido el concepto de porosidad nos encontramos en condiciones para dar la definición de otro concepto importante para el flujo del agua en los estratos subterráneos. La permeabilidad puede ser descrita en términos cualitativos como la facilidad con la cual el fluido puede moverse a través de los poros de una roca o suelo y es medida por la velocidad del flujo en unidades apropiadas.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a características del agua circundante. Los principales factores son:

1. La relación de vacíos del suelo.
2. La temperatura del agua.
3. La estructura y estratificación del suelo.
4. La existencia de agujeros, fisuras, etc. en el suelo.

3.4.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Los materiales cercanos a la superficie de la tierra generalmente contienen algunos espacios vacíos que le dan cierto grado de porosidad. Es más, en muchos casos, estos vacíos están interconectados en algún grado. El agua contenida en los vacíos es capaz de moverse de un vacío a otro, así hay circulación a través de sedimento y/o roca. La habilidad de una roca o sedimento para transmitir agua, junto con su habilidad para contener agua, constituye la propiedad hidrológica más importante. Existen algunas rocas que muestran porosidad pero una falta de conexión de sus vacíos, por ejemplo el basalto vesicular, esas rocas no llevan agua de un vacío a otro. Algunos sedimentos y rocas tienen porosidad, pero sus poros son demasiado pequeños y el flujo del agua a través de la roca es difícil, la arcilla y el esquisto son unos ejemplos.

La ecuación 3.6 de la ley de Darcy puede ser arreglada para mostrar que el coeficiente K tiene las dimensiones de longitud / tiempo (L/T), o de velocidad. Este coeficiente ha sido llamado **conductividad hidráulica**, aunque también puede encontrarse con el nombre de **coeficiente de permeabilidad**.

$$K = \frac{-Q}{A(dh/dL)}$$

3.20

El gasto Q tiene las dimensiones de volumen / tiempo (L^3/T), el área A (L^2), y el gradiente dh/dL (L/L). Sustituyendo estas dimensiones dentro de la ecuación 3.20, las dimensiones de K son determinadas.

$$K = \frac{-(L^3/T)}{(L^2)(L/L)} = (L/T)$$

La constante de proporcionalidad de Darcy, K , es una función de las propiedades de ambos, del medio poroso y del paso del fluido a través de él. Esto es intuitivamente obvio ya que un fluido viscoso (uno más espeso), tal como el aceite, se moverá más lentamente que el agua, la cual es más delgada y tiene una viscosidad más baja. La descarga es directamente proporcional al peso específico, γ , del fluido. El peso específico es la fuerza externa por gravedad sobre una unidad de volumen del fluido. Esto representa el efecto de la fuerza por gravedad sobre el fluido. La descarga es también inversamente proporcional a la viscosidad dinámica del fluido, μ , el cual es una medida a la resistencia del fluido al cortante que es necesaria para el flujo del fluido.

Si los experimentos son realizados con esferas de vidrio de un diámetro uniforme, la descarga es también proporcional al cuadrado del diámetro de las esferas, d . Estas relaciones de proporcionalidad pueden ser expresadas como:

$$Q \propto d^2 \quad 3.21$$

$$Q \propto \gamma \quad 3.22$$

$$Q \propto \frac{1}{\mu} \quad 3.23$$

la ley de Darcy puede ser también expresada como:

$$Q = - \frac{Cd^2 \gamma A}{\mu} \frac{dh}{dl} \quad 3.24$$

la nueva constante de proporcionalidad, C, es llamada el “**factor de forma**”, ambos C y d^2 son propiedades del medio poroso, mientras que γ y μ son propiedades del fluido. Se introduce una nueva constante, k, la cual es representativa de las propiedades del medio poroso exclusivamente. Esta es llamada “**permeabilidad intrínseca**”. Esta es básicamente una función del tamaño de las aberturas a través por el cual el fluido se mueve. Si el cuadrado del poro medio, d es más grande, la resistencia al flujo será menor. El área de la sección de un poro es también una función de la forma de los espacios. Una constante puede ser usada para describir en conjunto los efectos de la forma del espacio poroso. Usando esta constante adimensional, C, la permeabilidad intrínseca está dada por la expresión:

$$k = Cd^2 \quad 3.25$$

las dimensiones de k son (L^2), o de área. La relación entre la conductividad hidráulica y la permeabilidad intrínseca es:

$$K = k \left(\frac{\gamma}{\mu} \right) \quad 3.26$$

ó

$$K = k \left(\frac{\rho g}{\mu} \right)$$

3.27

donde g es la aceleración de la gravedad y ρ es la densidad del fluido (agua).

Las unidades para k pueden estar medidas en pies cuadrados, metros cuadrados, o centímetros cuadrados. En la industria petrolera, el "darcy" es usado como una unidad de la permeabilidad intrínseca. El "darcy" es igual a:

$$1 \text{ darcy} = 9.87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$$

ambos la viscosidad y la densidad son funciones de la temperatura. En un fluido más frío, la viscosidad aumenta. También existe una relación más compleja entre la temperatura y la densidad, ya que la densidad del agua se incrementa a un valor máximo cuando alcanza la temperatura de 4°C. La conductividad hidráulica de una roca o sedimentos variara con la temperatura del agua. El valor estándar o de laboratorio de la conductividad hidráulica esta definida para agua pura a una temperatura de 15.6 °C. Las unidades están definidas en términos de longitud / tiempo (tabla 3.2).

1 gal / día / pie ² = 0.0408 m / día.
1 gal / día / pie ² = 0.134 pie / día.
1 gal / día / pie ² = 4.72 x 10 ⁻⁵ cm / s.
1 pie / día = 0.305 m / día
1 pie / día = 7.48 gal / día / pie ²
1 pie / día = 3.53 x 10 ⁻⁴ cm / s.
1 cm / s = 864 m / día.
1 cm / s = 2835 pie / día.
1 cm / s = 21,200 gal / día / pie ² .
1 m / día = 24.5 gal/día / pie ²
1 m / día = 3.28 pie / día.
1 m / día = 0.00116 cm / s.

Tabla 3.2. Valores de conductividad hidráulica en el sistema de medición SI e inglés.

3.4.3.1 Métodos de medición para la conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica puede ser medida en una variedad de formas. En la práctica, solo tres métodos comunes son empleados: 1) métodos empíricos o semiempíricos basados en el diámetro del grano y la distribución de tamaños de granos, o basados en simples modelos hidráulicos; 2) pruebas de laboratorio y 3) pruebas de campo. Las pruebas de campo son los métodos más fiables, por que ellos permiten la medición in situ de la conductividad hidráulica con un pozo de bombeo y uno o más pozos de observación.

3.4.3.1.1 Métodos empíricos o semiempíricos

Son los menos confiables y sólo se utilizan cuando se carece de datos de campo del sitio en estudio, para determinar en una medida aproximada (preliminarmente) la conductividad hidráulica.

3.4.3.1.2 Métodos de laboratorio: Permeámetros

El valor de la conductividad hidráulica de los suelos puede ser medido en el laboratorio a través de dispositivos llamados permeámetros.

El **permeámetro de carga constante** es usado para sedimentos no cohesivos, tales como la arena. Una cámara llena de agua proporciona el suministro de agua en una carga constante. El agua se mueve a través de la muestra con una velocidad establecida. La conductividad hidráulica es determinada de una variación de la ley de Darcy la cual da un flujo por unidad de tiempo, llamado la descarga Q. Si se recolecta el fluido drenado del permeámetro bajo algún tiempo t, del volumen total V, es el producto de la descarga en un tiempo. Multiplicando ambos lados de la ecuación 3.6 por el tiempo, y reordenando, se obtiene:

$$Q_t = - \frac{KA t (h_A - h_B)}{L} \quad 3.28$$

sustituyendo V por (Q x t) y usando h para - (h_A - h_B), la ecuación 3.28 puede ser reordenada de la forma:

$$K = \frac{VL}{Ath} \quad 3.29$$

donde:

- V es el volumen del agua descargada en un tiempo t (L³; cm³, y T; s)
- L es la longitud de la muestra (L; cm)
- A es la sección transversal del área de la muestra (L²; cm²)
- h es la carga hidráulica (L; cm)
- K es la conductividad hidráulica (L/T; cm/s)

Un permeámetro de carga constante se ilustra en la figura 3.14. Es difícil en estos permeámetros tener un gradiente hidráulico aproximado a aquellos en el campo. La carga no debería exceder de 0.5 de la longitud de la muestra. Algunos permeámetros comerciales permiten cargas arriba de 10 veces la longitud de la muestra. Bajo tales condiciones el número de Reynolds podría ser tan alto que la ley de Darcy es invalidada.

Si el permeámetro con flujo ascendente, presenta una velocidad alta puede provocar condiciones de "arena movediza".

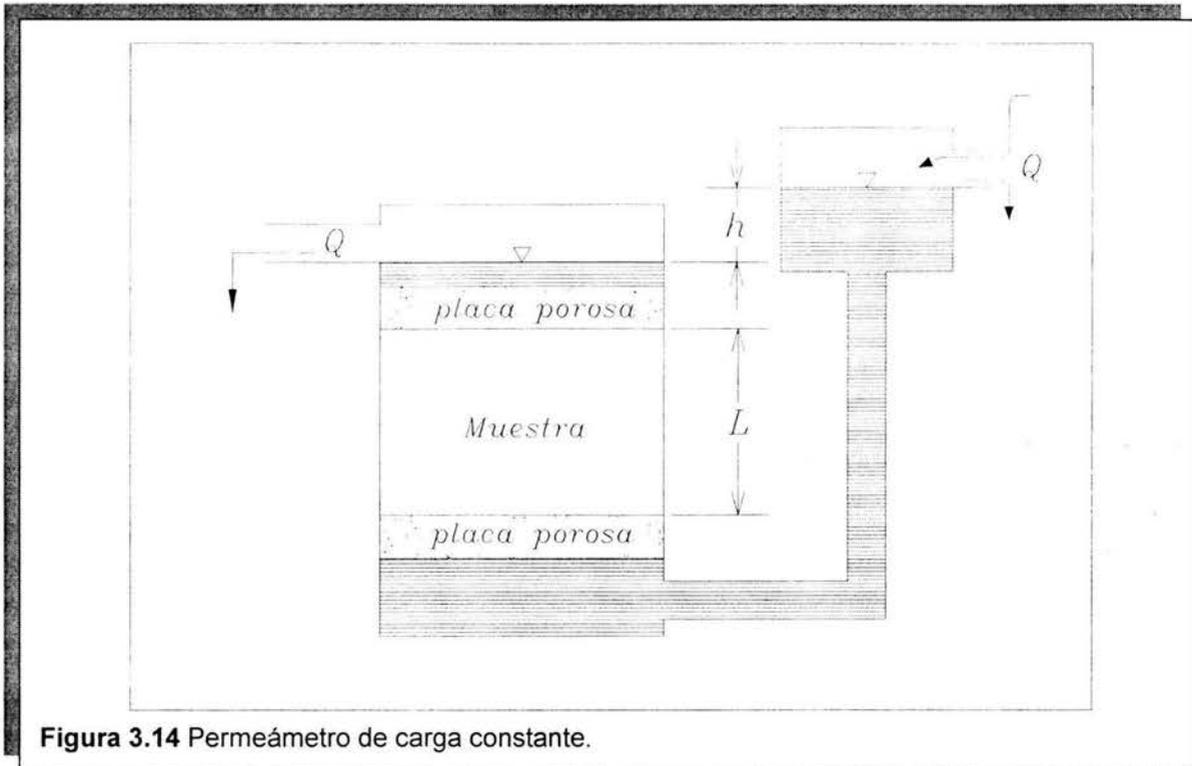


Figura 3.14 Permeámetro de carga constante.

Para sedimentos cohesivos con bajas conductividades, se usa un **permeámetro de carga variable**, figura 3.15. Un volumen mucho más pequeño de agua se mueve a través de la muestra. Un tubo de carga variable es insertado al permeámetro. El nivel inicial de agua arriba de la salida en el tubo de carga variable, h_0 es anotada. Después de algún periodo de tiempo, t , (generalmente muchas horas), el nivel de agua es nuevamente medido. El diámetro interior del tubo de carga variable, d_t , la longitud de la muestra, L , y el diámetro de la muestra, d_c , también son conocidos.

La rapidez con la que el volumen de agua drenará del tubo de carga variable dirigido a la cámara de la muestra, se obtiene con el cambio en la carga respecto al tiempo multiplicada por la sección de área, A_t , del tubo de carga variable.

$$q_m = -A_t \frac{dh}{dt}$$

3.30

si A_c es la sección transversal de área de la cámara de la muestra, se determina el volumen de agua drenada de la cámara de la muestra con la ecuación 3.31.

$$q_{out} = \frac{KA_c h}{L} \quad 3.31$$

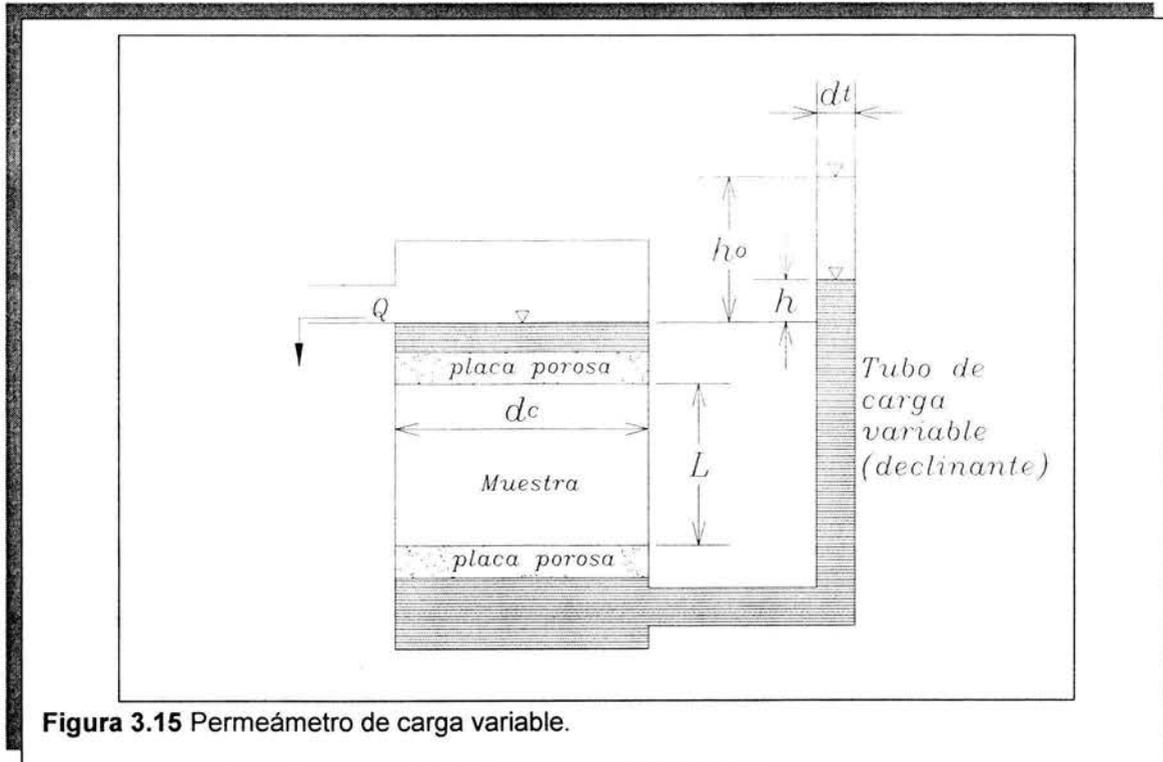


Figura 3.15 Permeámetro de carga variable.

Bajo el principio de continuidad, el volumen de agua entrando a la cámara de la muestra debe ser igual al volumen drenado del tubo de carga variable, por ejemplo $q_{in} = q_{out}$.

$$-A_t \frac{dh}{dt} = \frac{KA_c h}{L} \quad 3.32$$

arreglando la ecuación 3.32 y despejando K

$$K = -\frac{A_t L}{A_c} \frac{dh}{dt} \quad 3.33$$

integrando la ecuación 3.33 de $t=0$ a $t=1$ con la condición inicial $h = h_0$ en $t = 0$ se obtendrá la fórmula por la cual la conductividad hidráulica es determinada por un permeámetro de carga variable.

$$K = \frac{A_i L}{A_c t} \ln \left(\frac{h_0}{h} \right) \quad 3.34$$

Por conveniencia se usan los diámetros del tubo de carga variable y de la cámara de la muestra, en lugar de sus secciones de área. Ya que el área de un círculo es proporcional al cuadrado de sus diámetros, la ecuación del permeámetro de carga variable puede también ser expresada como:

$$K = \frac{d_i^2 L}{d_c^2 t} \ln \left(\frac{h_0}{h} \right) \quad 3.35$$

donde:

- K es la conductividad hidráulica (L/T ; cm/s)
- L es la longitud de la muestra (L ; cm)
- h_0 es la carga inicial en el tubo de carga variable (L ; cm)
- h es la carga final en el tubo de carga variable (L ; cm)
- t es el tiempo que toma la carga en ir de h_0 a h (T ; s)
- d_i es el diámetro interior del tubo de carga variable (L ; cm)
- d_c es el diámetro interior de la cámara de la muestra (L ; cm)

usando cualquier permeámetro, es indispensable que la muestra sea completamente saturada. Las burbujas de aire en la muestra, reducirían la sección de área del flujo, resultando en medidas más bajas de conductividad hidráulica. La muestra debe ser también herméticamente apretada contra las paredes de la cámara. Si no es así, el agua puede moverse a lo largo de las paredes, evitando el medio poroso. En este caso las medidas de conductividad hidráulica podrían ser muy altas.

3.4.3.1.3 Método de campo: Prueba de trazadores

Las determinaciones de campo de la conductividad hidráulica pueden ser hechas midiendo el intervalo de tiempo de viaje para un trazador de agua entre dos pozos de observación o perforaciones de prueba. Para un trazador un colorante, tal como sodio flourecente, o una sal, como el cloruro de calcio, son convenientes, baratos, fáciles de detectar y seguros. La figura 3.16 muestra una sección de corte de una parte de un acuífero libre con el agua subterránea fluyendo de la perforación A hacia la perforación B. El trazador es inyectado en la perforación A, después una muestra de agua con el trazador es tomada en la perforación B para determinar el tiempo de viaje del trazador. Debido a que el trazador fluye a través del acuífero con un promedio de velocidad v_m entonces:

$$v_m = \frac{K h}{n L}$$

3.36

Donde K es la conductividad hidráulica, n es la porosidad, h y L están mostradas en la figura 3.16. Pero v_m también esta dada por:

$$v_m = \frac{L}{t}$$

3.37

Donde t es el intervalo de tiempo de viaje del trazador entre las perforaciones. Igualando estas y resolviendo para K resulta:

$$K = \frac{nL^2}{ht}$$

3.38

Aunque este procedimiento es un principio simple, los resultados son solamente aproximaciones, debido a las limitaciones serias en el campo:

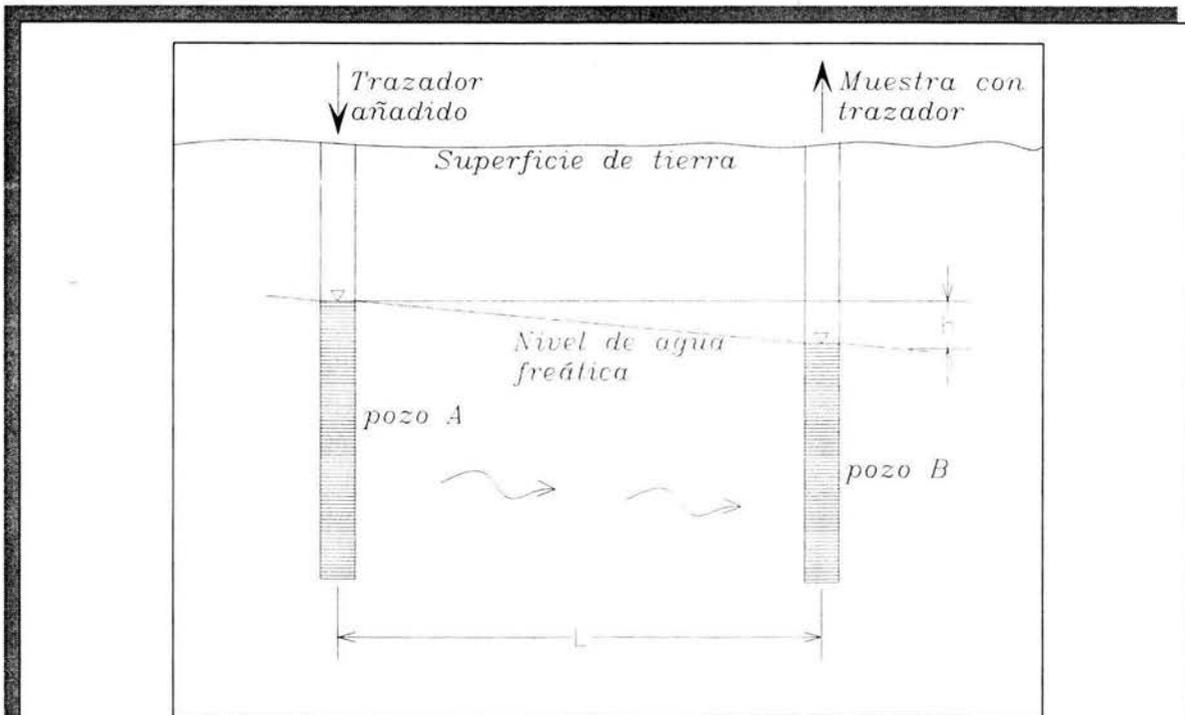


Figura 3.16 Corte de un acuífero libre que ilustra una prueba de trazador para la determinación de la conductividad hidráulica.

1. Las perforaciones necesitan estar cerca una de la otra; de otro modo el intervalo de tiempo de viaje puede ser excesivamente largo.
2. A no ser que la dirección de flujo sea realmente conocido, el trazador podría perderse completamente en la parte baja del flujo del agua subterránea. Múltiples muestras pueden ayudar, pero estas aumentan el costo y la complejidad del procedimiento de prueba.
3. Si el acuífero está estratificado con capas de diferentes conductividades, la primera muestra del trazador resultará en una conductividad considerablemente más grande que el promedio para el acuífero.

Una técnica alternativa de trazador, el cual ha sido exitosamente aplicada bajo condiciones de campo, es el método de punto de dilución. Aquí un trazador es introducido dentro de un pozo de observación y completamente mezclado con el agua contenida, después de esto, como el agua fluye dentro y fuera del pozo, repetidas mediciones de concentración de trazadores son hechas.

3.4.3.1.4 Método de campo: Prueba en pozos de gran diámetro

El método en pozos de gran diámetro involucra las medidas del cambio en los niveles del agua después de una remoción rápida de un volumen de agua de una perforación cilíndrica. Si el suelo está suelto, un protector puede ser necesario para mantener la perforación. El método es relativamente simple y es más adaptable para condiciones de nivel freático poco profundo. El valor de K obtenido es esencialmente para una dirección horizontal en la vecindad inmediata de la perforación.

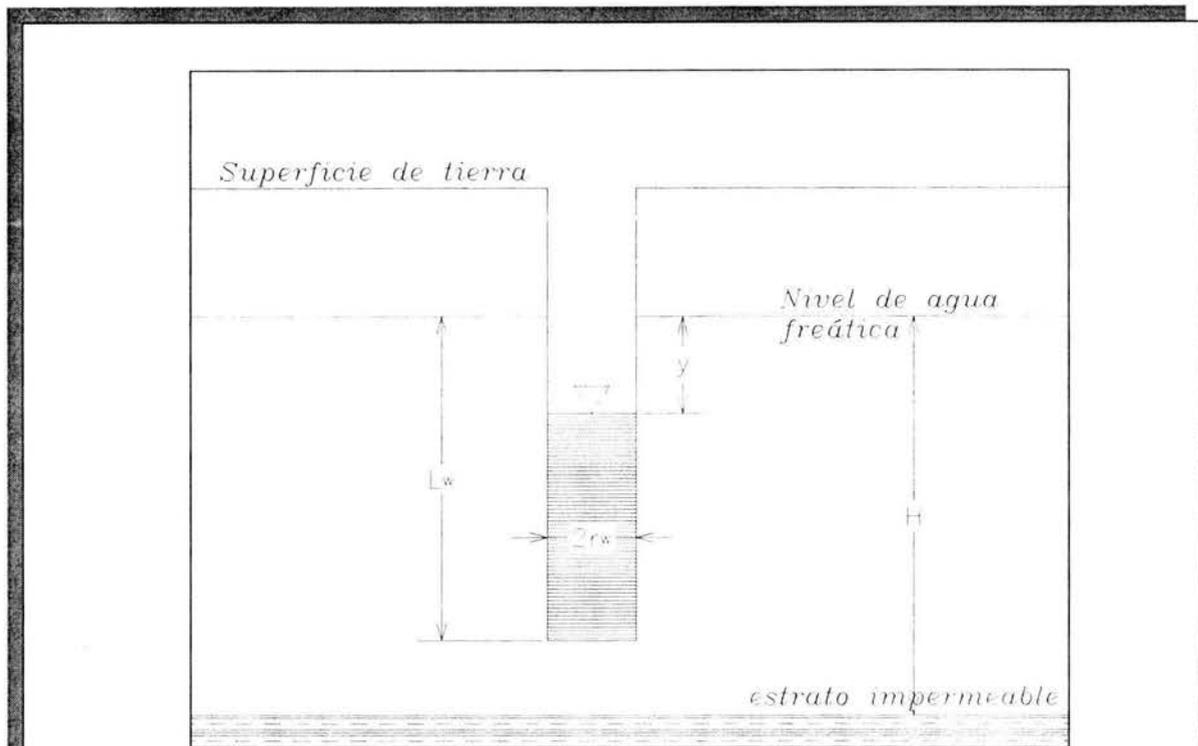


Figura 3.17 Diagrama de un pozo de gran diámetro con sus dimensiones, para determinar la conductividad hidráulica.

La figura 3.17 ilustra un pozo de gran diámetro y las dimensiones requeridas para el cálculo. La conductividad hidráulica esta dada por:

$$K = \frac{C}{864} \frac{dy}{dt} \quad 3.39$$

donde dy/dt es la velocidad medida de la elevación del nivel freático en cm/seg. El factor 864 da los valores de K en m / día. El factor C es una constante adimensional mostrada en la tabla 3.3, regida por las variables mostradas en la figura 3.17.

En la tabla 3.3 se puede ver que los valores tabulados cubren las siguientes condiciones en la perforación: una capa impermeable superficial, un estrato homogéneo infinito, y una capa altamente permeable (grava) también superficial. Los valores de C y K corresponderían a aquellos cuando dy/dt es medido.

Muchas otras técnicas similares al método en pozos de gran diámetro en los cuales los cambios del nivel de agua son medidas después de una instantánea remoción o adición de volumen de agua. Con un tubo de diámetro pequeño conducido dentro del subsuelo, la conductividad hidráulica K puede ser encontrada por el método del piezómetro o tubo. Para pozos en acuíferos confinados, el método "slug" puede ser empleado. Aquí un volumen conocido de agua es instantáneamente inyectado o removido en un pozo, después el descenso o la recuperación del nivel del agua es medido en los minutos consiguientes. Cuando una bomba no esta disponible, la conducción de una prueba de bombeo en un pozo, se puede realizar por el método de "slug" como una alternativa de aproximación.

3.4.3.1.5 Método de campo: Pruebas en pozos de bombeo

Los métodos más confiables para estimar la conductividad hidráulica de un acuífero son las pruebas en pozos de bombeo. Basados en observaciones de los niveles del agua cerca de los pozos de bombeo, un valor integral de K bajo una sección de acuífero de tamaño regular puede ser obtenida. Debido a que el acuífero no es alterado, la confiabilidad de estas determinaciones es superior a los métodos de laboratorio. Los métodos de prueba de bombeo con los procedimientos de cálculo se describen en la sección 3.5.

VALORES DEL FACTOR C														
		(H - L _w)/L _w para estrato impermeable								(H - L _w)	(H - L _w)/L _w para estrato permeable infinito			
L _w /r _w	y/L _w	0	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	∞	5	2	1	0.5
1	1	447	423	404	375	323	286	264	255	254	252	241	213	166
	0.75	469	450	434	408	360	324	303	292	291	289	278	248	198
	0.5	555	537	522	497	449	411	386	380	379	377	359	324	264
2	1	186	176	167	154	134	123	118	116	115	115	113	106	91
	0.75	196	187	180	168	149	138	133	131	131	130	128	121	106
	0.5	234	225	218	207	188	175	169	167	167	166	164	156	139
5	1	51.9	48.6	46.2	42.8	38.7	36.9	36.1		38.8		35.5	34.6	34.4
	0.75	54.8	52	49.2	46.8	42.8	41	40.2		40		39.6	38.6	36.3
	0.5	66.1	63.4	61.3	58.1	53.9	51.9	51		50.7		50.3	49.2	46.6
10	1	18.1	16.9	16.1	15.1	14.1	13.6	13.4		13.4		13.3	13.1	12.6
	0.75	19.1	18.1	17.4	16.1	15.5	15	14.8		14.8		14.7	14.5	14
	0.5	23.3	23.3	21.5	20.6	19.5	19	18.8		18.7		18.6	18.4	17.8
20	1	5.91	5.53	5.3	5.06	4.81	4.7	4.66		4.64		4.62	4.58	4.46
	0.75	6.23	5.94	5.73	5.5	5.25	5.15	5.1		5.08		5.07	5.02	4.89
	0.5	7.67	7.34	7.12	6.58	6.6	6.48	6.43		6.41		6.39	6.34	6.19
50	1	1.25	1.18	1.14	1.11	1.07	1.05			1.04			1.03	1.02
	0.75	1.33	1.27	1.23	1.2	1.16	1.14			1.13			1.12	1.11
	0.5	1.64	1.59	1.54	1.5	1.46	1.44			1.43			1.42	1.39
100	1	0.37	0.35	0.34	0.34	0.33	0.32			0.32			0.32	0.31
	0.75	0.4	0.38	0.34	0.36	0.35	0.035			0.35			0.034	0.034
	0.5	0.49	0.49	0.36	0.45	0.44	0.44			0.42			0.43	0.43

Tabla 3.3 Valores del factor C para la prueba de pozos de gran diámetro, el cual determina la conductividad hidráulica (Boast y Kirkham).

3.4.4 HOMOGENEIDAD E ISOTROPÍA

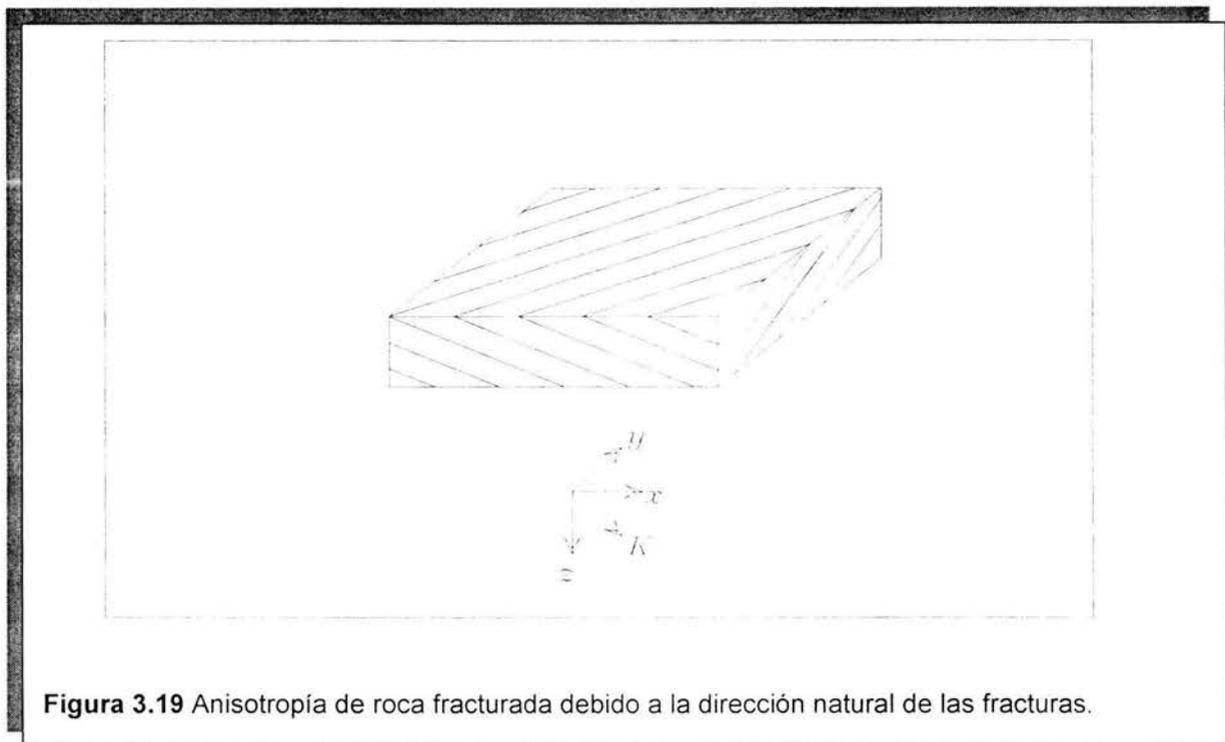
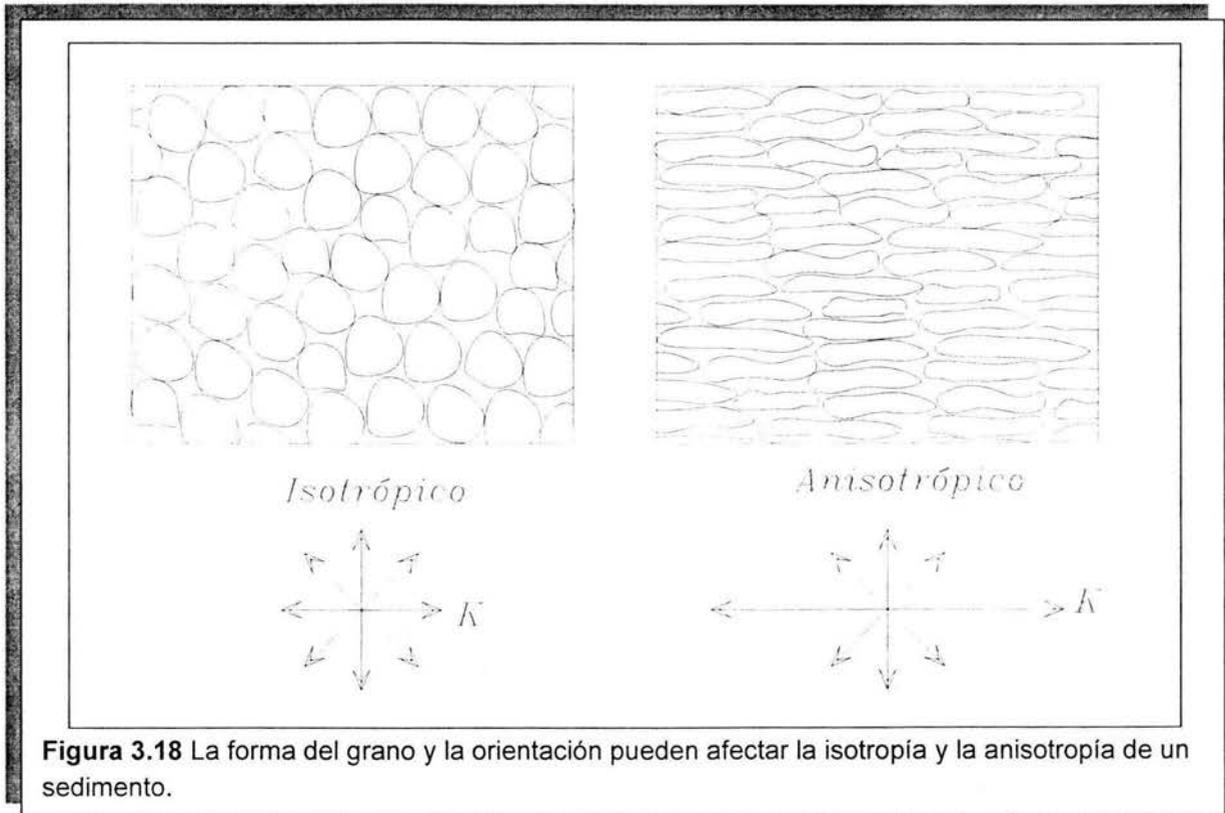
Los encargados de estudiar la geohidrología están interesados en dos propiedades claves de las formaciones geológicas: la conductividad hidráulica y el almacenamiento específico o rendimiento específico. Una tercer propiedad, el espesor, es también importante, ya que las respuestas de una unidad, en el conjunto de la geohidrología, están en función del producto de los parámetros hidráulicos y el espesor.

Una unidad homogénea es aquella que tiene las mismas propiedades en todas localizaciones. Para una arenisca, esto indicaría que la distribución del tamaño de grano, porosidad, grado de cementación, y espesor son variables solo dentro de pequeños límites. Los valores de transmisividad y almacenamiento de la unidad geológica serían aproximadamente los mismos en cualquier lugar presente. Una roca metamórfica tendría la misma cantidad de fracturas en cualquier parte. Una roca caliza tendría la misma cantidad de juntas y aberturas por solución en todas las localizaciones. Una variedad de estudios modernos han mostrado que no existe la posibilidad de encontrar una unidad verdaderamente homogénea en la naturaleza.

En las formaciones heterogéneas, las propiedades hidráulicas cambian espacialmente, un ejemplo sería el cambio en el ancho. Una arenisca que se ensancha como una cuña es no homogénea, incluso si la porosidad, la conductividad hidráulica, y almacenamiento específico permanecen constantes. El cambio en el espesor resulta en un cambio de las propiedades hidráulicas de la unidad. Si las propiedades hidráulicas de los estratos son diferentes, la unidad entera es heterogénea.

En un medio poroso hecho por esferas del mismo diámetro agrupadas uniformemente, la geometría de los vacíos es la misma en todas las direcciones. Así la permeabilidad intrínseca de la unidad es la misma en todas las direcciones, y tal unidad es llamada isotrópica. De otra manera, si la geometría de los vacíos es no uniforme, puede existir una dirección en la cual la permeabilidad intrínseca es mayor. Por lo que el medio poroso es anisotrópico. Por ejemplo un medio poroso compuesto de granos de forma alargada ordenados en una manera paralela de modo que se tenga la permeabilidad más grande en dirección paralela a los granos que cruzando la orientación de los granos, figura 3.18.

En unidades de roca fracturada, la dirección del agua subterránea es completamente restringida por la dirección de las fracturas. Puede presentarse una permeabilidad intrínseca igual a cero en la dirección no paralela al conjunto de fracturas, figura 3.19.



3.4.5 RENDIMIENTO ESPECÍFICO

Rendimiento específico (S_y) es la relación del volumen de agua que drena de un suelo saturado, debido a la atracción de la gravedad de la tierra, al volumen total del suelo, figura. 3.20.

Matemáticamente esta relación queda expresada de la siguiente manera:

$$S_y = \frac{V_d}{V_T} \quad 3.40$$

Donde:

V_d es el volumen de agua drenado.

V_T es el volumen del material que suelta el agua.

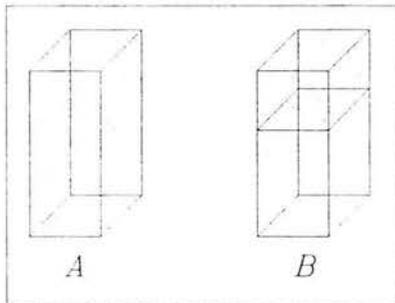


Figura 3.20 A Un volumen de suelo saturado con agua. B. Después de un drenaje por gravedad, una unidad de volumen del suelo ha sido drenada con su correspondiente descenso en el nivel de saturación.

Las moléculas del agua se adhieren a las superficies debido a la tensión superficial del agua, figura. 3.21. Si la gravedad ejerce un esfuerzo sobre una película de agua alrededor de un grano mineral, alguna película goteará hacia abajo. La membrana restante de agua será más delgada, con una tensión superficial más grande para que, eventualmente, el esfuerzo de la gravedad sea exactamente balanceada por la tensión superficial. El agua pendular es el agua adherida a las partículas del suelo debido a la tensión superficial.

Si dos muestras son equivalentes considerando la porosidad, pero el promedio del tamaño de grano de uno es mucho menor que el otro, la superficie del área de la muestra más fina será la más grande. Como un resultado, más agua puede ser sostenida como una humedad pendular por los granos finos.

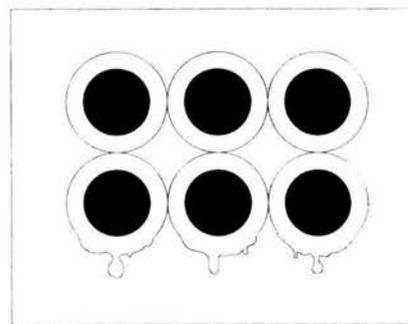


Figura 3.21 Agua pendular adherida a los granos del suelo debido a la tensión superficial. La atracción de la gravedad empuja el agua hacia abajo.

3.4.6 RETENCIÓN ESPECÍFICA

La retención específica (S_r) de una roca o un suelo es la relación de un volumen de agua que una roca puede retener contra la gravedad, al volumen total de la roca. Esto es

$$S_r = \frac{V_r}{V_T} \quad 3.41$$

donde:

V_r es el volumen retenido de agua.

V_T es el volumen total de la muestra que retiene el agua.

Ya que el rendimiento específico representa el volumen de agua que una roca puede rendir por la gravedad, al sumarlo con la retención específica los dos conceptos son iguales a la porosidad.

$$n = S_s + S_r \quad 3.42$$

Esta expresión es fácilmente comprobable si tomamos en cuenta las relaciones siguientes:

Se ha definido a la porosidad como:

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad 3.43$$

Suponiendo que la muestra esta totalmente saturada de agua, es decir que todos sus vacíos están ocupados por agua y de los conceptos anteriores se deduce que el volumen retenido de agua y el volumen drenado es igual al volumen de vacíos:

$$V_v = V_r + V_d \quad 3.44$$

Sustituyendo la ec. 3.44 en la ec. 3.43 se tiene

$$n = \frac{V_r + V_d}{V_T} = \frac{V_r}{V_T} + \frac{V_d}{V_T} = S_r + S_y \quad 3.45$$

La retención específica aumenta con la disminución del tamaño de grano, así que una arcilla puede tener una porosidad del 50% con una retención específica de 48%.

3.4.7 TRANSMISIVIDAD

Un concepto útil en muchos estudios es la transmisividad del acuífero. El cual es una medida de la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente a través de una unidad de ancho por el espesor saturado del acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario.

Matemáticamente, la transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero:

$$T = Kb \quad 3.46$$

donde:

T es la transmisividad (L²/ T; m²/d o pie²/d)
b es el espesor saturado del acuífero (L; m o pie)
K es la conductividad hidráulica (L/ T; m/d o pie/d)

Para un acuífero con diferentes estratos, la transmisividad total es la suma de la transmisividad de cada uno de los estratos.

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad 3.47$$

La transmisividad del acuífero es un concepto que asume que el flujo a través del acuífero es horizontal. En algunos casos, esta es una suposición válida, como en el caso de acuíferos confinados, y en otros no lo es, como en el caso de los acuíferos libres.

3.4.8 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

Cuando la carga hidráulica en un acuífero saturado libre o confinado cambia, el agua será almacenada o expulsada. El coeficiente de almacenamiento (S) es el volumen de agua que una unidad permeable absorberá o expulsará del almacenamiento por unidad de área de superficie y por unidad de cambio en la carga. Esta es una cantidad adimensional.

En una zona saturada, la carga crea presión, afectando el arreglo de los granos minerales así como la densidad del agua en los vacíos. Si la presión se incrementa, la estructura mineral se extenderá; si esta decae la estructura mineral se contraerá. Esto es conocido como "elasticidad". Igualmente el agua, se contraerá con un incremento en la presión y se extenderá si la presión disminuye. Cuando la carga en un acuífero disminuye la estructura del acuífero se comprime, con la reducción de la porosidad efectiva y la expulsión de agua. Agua adicional es liberada como agua de poro debido a la baja presión.

3.4.9 ALMACENAMIENTO ESPECÍFICO

El almacenamiento específico (S_s) es la cantidad de agua por unidad de volumen de una formación saturada que es almacenada o expulsada del almacenamiento debido a la compresibilidad de la estructura sólida del acuífero y la expansibilidad del agua de poro, por unidad de cambio en la carga. Este es también llamado coeficiente de almacenamiento elástico. Este concepto puede ser aplicado a ambos acuíferos, libre y confinado, figura 3.22.

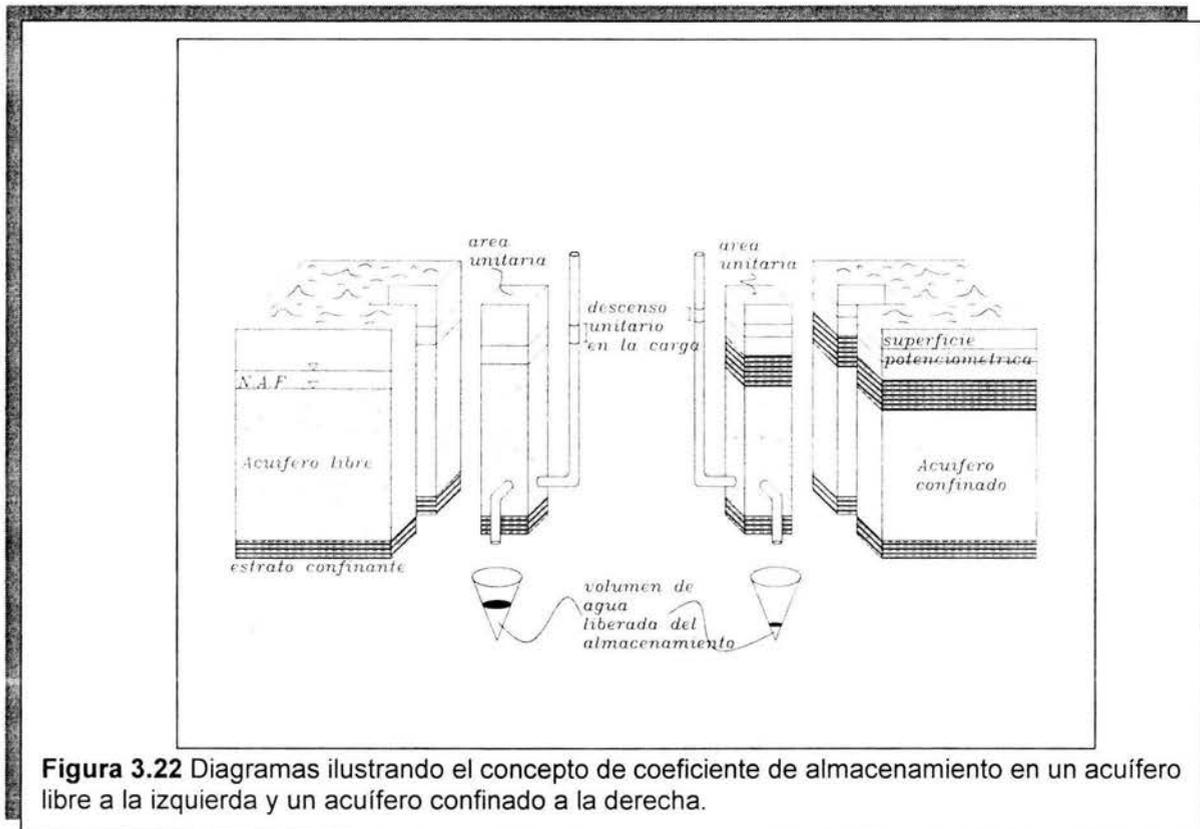


Figura 3.22 Diagramas ilustrando el concepto de coeficiente de almacenamiento en un acuífero libre a la izquierda y un acuífero confinado a la derecha.

El almacenamiento específico esta dado por la expresión (Jacob 1940,1950; Cooper 1966).

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \quad . \quad 3.48$$

donde:

ρ_w es la densidad del agua (M/L^3 ; slug/pie³ o kg/m^3)
 g es la aceleración de la gravedad (L/T^2 ; pie/s² o m/s^2)
 α es la compresibilidad de la estructura del acuífero ($1 / (M/LT^2)$; $1 / (lb/pie^2)$ o $1 / (N/m^2)$)

n es la porosidad (L^3/L^3)

β es la compresibilidad del agua ($(1 / (M/LT^2)); 1 / (lb/pie^2)$ o $1 / (N/m^2)$)

El almacenamiento específico tiene dimensiones de $1/L$. El valor del almacenamiento específico es muy pequeño, generalmente 0.0001 pie^{-1} o menos.

En un acuífero confinado, la carga puede decaer aún con la superficie potenciométrica permaneciendo arriba de la unidad geológica. Aunque el agua es liberada del almacenamiento, el acuífero permanece saturado. El coeficiente de almacenamiento (S) de un acuífero confinado es el producto del almacenamiento específico (S_s) y el espesor del acuífero (b).

$$S = S_s b$$

3.49

Ya que el almacenamiento específico tiene dimensiones de $1/L$ y el espesor del acuífero tiene dimensiones de L , el coeficiente de almacenamiento es adimensional.

Toda el agua liberada es considerada por la compresibilidad de la estructura sólida y el agua del poro. El agua proviene del espesor total del acuífero. El valor del coeficiente de almacenamiento de un acuífero confinado esta en el orden de 0.005 o menos.

En un acuífero libre, el nivel de saturación aumenta o disminuye al cambiar la cantidad de agua en el almacenamiento, debido al agua drenada de los poros. Este almacenamiento o liberación es debido al rendimiento específico (S_y) del acuífero. El agua es también almacenada o expulsada dependiendo del almacenamiento específico del acuífero. Para un acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento se determina con la fórmula:

$$S = S_y + S_s h$$

3.50

Donde h es el espesor de la zona saturada.

3.5 CONDICIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS DE BOMBEO

3.5.1 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS POZOS

Los pozos son unos de los más importantes aspectos de la Geohidrología aplicada. Los pozos de agua son usados para la extracción del agua subterránea para satisfacer las necesidades domésticas, municipales, industriales y de irrigación. Los pozos también han sido usados para el control de la intrusión salina, remover agua contaminada de un acuífero y bajar el nivel del agua freática para proyectos de construcción.

Los pozos también funcionan para inyectar fluido a las capas subterráneas. Además los pozos son algunas veces usados para la recarga artificial de los acuíferos con velocidades mayores que la recarga natural.

Las mismas consideraciones teóricas aplican a los pozos que extraen agua y aquellos que inyectan agua. Durante el bombeo en un pozo, ocurre el abatimiento de la carga en un acuífero alrededor del pozo. Durante la inyección ocurre un incremento en la carga en el acuífero.

Un cono de bombeo, cono de depresión o de abatimientos, se formará en el acuífero alrededor del pozo de bombeo cuando el nivel del agua disminuye.

3.5.2 FLUJO RADIAL ESTABLECIDO

Si un pozo bombea agua durante un periodo de tiempo suficientemente prolongado. El nivel del agua puede alcanzar un estado de equilibrio; esto es, no existe más abatimiento con el transcurso del tiempo. La región alrededor del pozo de bombeo donde la carga ha sido bajada es conocida como el cono de depresión. Cuando el equilibrio ha sido alcanzado, el cono de depresión para de crecer debido a que este ha alcanzado un límite de recarga. Estos también son conocidos como una condición de estado establecido.

El gradiente hidráulico del cono de depresión causa que el flujo del agua valla a un gasto constante de la frontera de recarga hacia el pozo. La suposición de la simetría radial significa que la frontera de recarga tiene una geometría circular incierta alrededor del pozo de bombeo.

3.5.2.1 Flujo radial establecido en un acuífero confinado

En el caso de un flujo radial establecido en un acuífero confinado, las siguientes suposiciones adicionales son necesarias.

1. El acuífero esta confinado por arriba y por abajo.
2. El pozo de bombeo tiene un gasto constante.
3. El equilibrio ha sido alcanzado, no existen más cambios en el abatimiento con el tiempo.

La figura 3.23 muestra un pozo penetrando un acuífero confinado. Bajo condiciones de estado establecido el agua que es bombeada del pozo es igual al gasto que el acuífero transmite hacia el pozo.

De la ley de Darcy el flujo de agua a través de una sección circular del acuífero hacia el pozo es el área de la sección circular, $2\pi rb$, multiplicado por la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico. Esto puede ser expresado como:

$$Q = (2\pi rb)K \left(\frac{dh}{dr} \right) \quad 3.51$$

donde:

- Q es el gasto de bombeo (L^3/T ; $\text{pie}^3/\text{día}$ o $\text{m}^3/\text{día}$)
- r es la distancia radial de la sección circular al pozo (L; m o pie)
- b es el ancho del acuífero (L; m o pie)
- K es la conductividad hidráulica (L/T ; $\text{m}/\text{día}$, $\text{pie}/\text{día}$)
- dh/dr es el gradiente hidráulico (adimensional)

Ya que la transmisividad es el producto del ancho del acuífero y la conductividad hidráulica, la ecuación 3.51 también puede ser expresada como:

$$Q = 2\pi r T \left(\frac{dh}{dr} \right) \quad 3.52$$

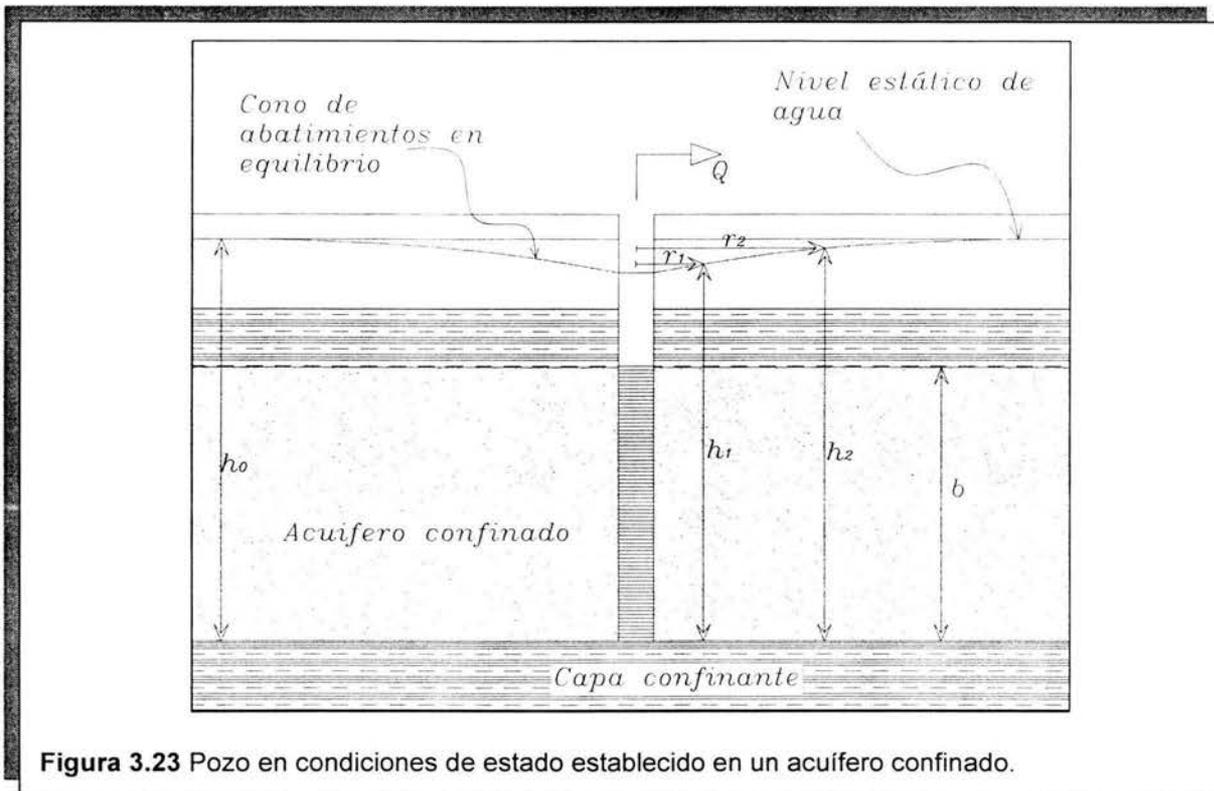


Figura 3.23 Pozo en condiciones de estado establecido en un acuífero confinado.

la ecuación 3.52 puede ser reordenada como sigue:

$$dh = \frac{Q}{2\pi T} \frac{dr}{r} \quad 3.53$$

Si existen dos pozos de observación, la carga es h_1 en una distancia r_1 del pozo de bombeo; y h_2 en una distancia r_2 . Podemos integrar ambos lados de la ecuación 3.53 con estas condiciones de frontera:

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \frac{Q}{2\pi T} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad 3.54$$

lo que puede ser resuelto como

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad 3.55$$

la ecuación 3.55 puede ser expresada con T despejada, lo que produce la ecuación de Thiem para acuíferos confinados.

$$T = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad 3.56$$

Donde:

T es la transmisividad del acuífero (L^2/T ; $m^2/día$ o $pie^2/día$)

Q es el gasto de bombeo (L^3/T ; $pie^3/día$ o $m^3/día$)

h_1 es la carga en la distancia r_1 del pozo de bombeo (L; m o pie)

h_2 es la carga en una distancia r_2 del pozo de bombeo (L; m o pie)

Si el bombeo se ha desarrollado en un punto donde al abatimiento se ha establecido, la carga es determinada en dos pozos de observación, localizados en distancias diferentes del pozo de bombeo. El gasto de bombeo, las cargas y las distancias radiales son introducidas en la ecuación 3.56, y la transmisividad del acuífero es determinada. Se nota que no existe el almacenamiento del acuífero en la ecuación 3.56, bajo las condiciones del estado establecido no existe cambio en la carga con el tiempo y el agua no proviene del almacenamiento. De aquí que la ecuación de Thiem no puede ser utilizada para determinar el almacenamiento del acuífero.

3.5.2.2 Flujo radial establecido en un acuífero libre

Thiem también derivó una ecuación para el flujo radial establecido en un acuífero libre. En esta circunstancia las siguientes suposiciones son necesarias en adición a las asunciones generales de esta sección.

1. El acuífero es libre y abajo esta cubierto por un acuicludo horizontal.
2. El pozo de bombeo tiene un gasto constante.
3. El equilibrio ha sido alcanzado, no hay cambio del abatimiento con el paso del tiempo.

El flujo radial en un acuífero libre esta descrito por:

$$Q = (2\pi r h) K \left(\frac{dh}{dr} \right) \quad 3.57$$

donde:

Q es el gasto de bombeo (L^3/T ; pie³/día o m³/día)
 r es la distancia radial de la sección circular del pozo (L; m o pie)
 h es el espesor saturado del acuífero (L; m o pie)
 K es la conductividad hidráulica (L/T; m/día, pie)
 dh/dr es el gradiente hidráulico (adimensional)

La ecuación 3.57 puede ser expresado como sigue

$$h dh = \frac{Q}{2\pi K} \frac{dr}{r} \quad 3.58$$

Si existen dos pozos de observación, la carga es h_1 en una distancia r_1 del pozo de bombeo y h_2 en una distancia r_2 . Podemos integrar ambos lados de la ecuación con estas condiciones de bombeo:

$$\int_{h_1}^{h_2} h dh = \frac{Q}{2\pi K} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad 3.59$$

lo que puede ser resuelta como:

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad 3.60$$

la ecuación 3.60 puede ser reordenada para producir la ecuación de Dupuit-Forchheimer para un acuífero libre.

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad 3.61$$

donde:

K es la conductividad hidráulica (L/T; m/día, pie/día)

Q es el gasto de bombeo (L³/T; pie³/día o m³/día)

h₁ es la carga en una distancia r₁ del pozo de bombeo (L; m o pie)

h₂ es la carga en la distancia r₂ del pozo de bombeo (L; m o pie)

Muchas pruebas de los acuíferos nunca alcanzaran el equilibrio; esto es el cono de depresión continuará creciendo con el tiempo. Esto es conocido como condiciones de no equilibrio, o transitorio. El análisis del transitorio de las relaciones tiempo-abatimiento de un pozo de observación puede ser usado para determinar la transmisividad y el almacenamiento de un acuífero, si no existen pozos de observación. Los datos tiempo-abatimiento del pozo de bombeo pueden ser usados para determinar la transmisividad del acuífero pero no el almacenamiento.

3.5.2.3 Flujo radial establecido en un acuífero semiconfinado

La ecuación general para el flujo en estado establecido en un acuífero semiconfinado es

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} - \frac{s}{B^2} = 0 \quad 3.62$$

la solución esta dada por De Glee (1930), Hantush y Jacob (1955) como sigue:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{r}{B}\right) \quad 3.63$$

donde:

s = abatimiento equilibrado a una distancia r del pozo de bombeo, (L; cm o pie)

B = factor de goteo (L; cm o pie)

$K_0\left(\frac{r}{B}\right)$ = función modificada de Bessel

$$B = \sqrt{cbK} = \sqrt{cT} = \sqrt{\frac{b'T}{K'}} \quad 3.64$$

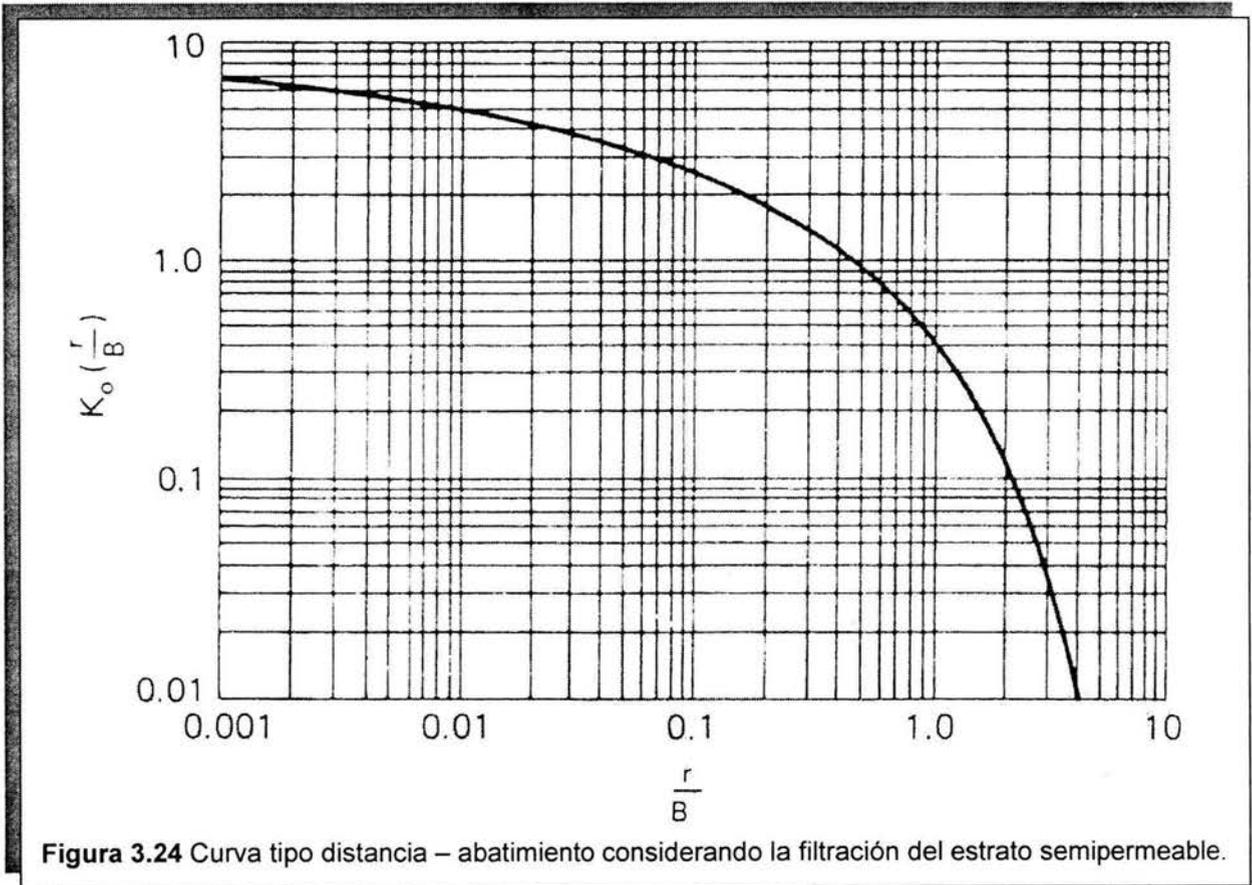
donde:

$$c = \text{Resistencia hidráulica} = \frac{b'}{K'}$$

Las relaciones entre $K_0(r/B)$ y r/B se muestran gráficamente en la figura 3.24 con la base de los valores tabulados en la tabla 3.4.

N	$\frac{r}{B}$			
	$N \times 10^{-3}$	$N \times 10^{-2}$	$N \times 10^{-1}$	N
1	7.0237	4.7212	2.4271	0.421
1.5	6.6182	4.3159	2.03	0.2138
2	6.3305	4.0285	1.7527	0.1139
2.5	6.1074	3.8056	1.5415	0.0623
3	5.9251	3.6255	1.3725	0.0347
3.5	5.7709	3.4697	1.2327	0.0196
4	5.6374	3.3365	1.1145	0.0112
4.5	5.5196	3.2192	1.0129	0.0064
5	5.4143	3.1142	0.9244	0.0037
5.5	5.319	3.0195	0.8466	
6	5.232	2.9329	0.7775	0.0012
6.5	5.152	2.8534	0.7159	
7	5.0779	2.7798	0.6605	0.0004
7.5	5.0089	2.7114	0.6106	
8	4.9443	2.6475	0.5653	
8.5	4.8837	2.5875	0.5242	
9	4.8266	2.531	0.4867	
9.5	4.7725	2.4746	0.4524	

Tabla 3.4 Valores de $K_0(r/B)$, Fuente: M.S. Hantush "Análisis of Data from Pumping Test in Leaky Aquifers" trans. Am Geophys. Union, vol 37 No 6, 1956.



El método de superposición de curvas es usado para determinar T y K_a (Walton, 1970). De las ecuaciones 3.64 y 3.63, las siguientes dos ecuaciones son determinadas:

$$\log s = \log \frac{Q}{4\pi T} + \log K_0 \left(\frac{r}{B} \right)$$

$$\log r = \frac{1}{2} \log \frac{Tb'}{K'} + \log \frac{r}{B}$$

ó

$$\log s = C_1 + \log K_0 \left(\frac{r}{B} \right)$$

3.65

$$\log r = C_1 + C_2 + \log \frac{r}{B} \quad 3.66$$

donde C_1 y C_2 son constantes.

Si se dibujan los datos de campo recolectados de s_{df} y r sobre un papel logarítmico (s , como ordenada), la curva de campo debería ser más o menos coincidente con la figura 3.24 mostrada. Un punto de ajuste es seleccionado con las cuatro coordenadas s , r , $K_0(r/B)$ y r/B . T es entonces determinada de la ecuación 3.63, K' es determinada de la ecuación 3.64, esto es, $K' = b'T/B^2$. La rapidez de filtración será $v = K'(s/b')$.

En algunos casos, cuando los valores r/B son menores a 0.05, la solución no requiere un procedimiento de sobreposición de curvas (Hantush, 1956, 1964). Si se dibuja s contra el \log de r sobre un papel semilogarítmico, una línea recta es obtenida; cuando los valores r/B son menores a 0.05, la ecuación 3.63 se reduce a:

$$s \approx \frac{2.3Q}{2\pi T} \log 1.12 \frac{B}{r} \quad 3.67$$

La pendiente de la línea recta $\Delta s_{df}/\Delta(\log r)$ es determinada de la gráfica de campo e igualada a la misma pendiente $\partial s_{df}/\partial(\log r)$ determinada por la ecuación 3.67

$$\frac{\partial s}{\partial(\log r)} = -\frac{2.3Q}{2\pi T} \quad 3.68$$

El valor de T es entonces determinado de la ecuación anterior.

Extendiendo la línea recta del dibujo de campo a $s=0$ y leyendo el valor correspondiente de r_e , de la ecuación 3.67 se observa que

$$0 = \frac{2.3Q}{2\pi T} \log 1.12 \frac{B}{r_e}$$

Por lo tanto, $\log 1.12(B/r_e) = 0$, y así $1.0 = 1.12(B/r_e)$, o

$$B = \frac{r_e}{1.12} \quad 3.69$$

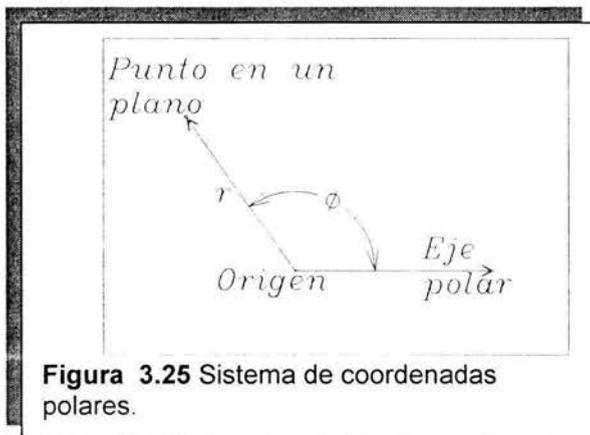
B y T son calculados, y con la ecuación 3.64, se calcula K'.

Se debería notar que los métodos usados requieren numerosos pozos de observación, (al menos tres) en diferentes distancias r. Ya que estos métodos están basados en las condiciones de estado establecido, el gasto de flujo Q es derivado de fuentes de filtración solamente y el coeficiente de almacenamiento (S) del acuífero no puede ser obtenido.

3.5.3 FLUJO RADIAL TRANSITORIO

El flujo en el cual la carga cambia con el tiempo es llamado flujo transitorio. Para propósitos de análisis, se acepta que el acuífero será isotrópico y homogéneo.

El flujo hacia un pozo se le conoce como flujo radial. El flujo radial se analiza con un sistema de coordenadas llamadas coordenadas polares. La posición de un punto en el plano es especificada de acuerdo a su distancia y dirección desde un punto fijo o polo. La distancia es medida directamente del polo al punto en el plano. La dirección se determina por el ángulo entre la línea del polo al punto y una línea de referencia (el eje polar), figura 3.25. El eje polar es usualmente dibujado horizontalmente y a la derecha del polo y el ángulo es medido en rotación con el sentido contrario a las agujas del reloj respecto al eje polar.



Solamente el valor del ángulo (ϕ) y la distancia radial (r) necesitan ser especificadas. Si el acuífero es isotrópico en un plano horizontal, entonces el flujo tendrá una simetría radial. Bajo estas condiciones, la ecuación para un flujo confinado se convierte en:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad 3.70$$

Donde:

- h es la carga hidráulica (L; pie o m)
- S es el coeficiente de almacenamiento (adimensional)
- T es la transmisividad (L^2/T);(pie²/día o m²/día)
- t es el tiempo (T; días)
- r es la distancia radial del pozo de bombeo (L; pie o m)

La solución de la ecuación de flujo para una variedad de valores de fronteras en un flujo radial a pozos, a dado un número variado de ecuaciones útiles. Las soluciones pueden ser usadas para determinar los abatimientos de la superficie potenciométrica o nivel freático cerca del pozo de bombeo, si las características de la formación acuífera son conocidas. Inversamente, si las características de la formación de un acuífero son

desconocidas, una prueba de bombeo en el acuífero es realizada. El pozo es bombeado con un gasto conocido, y la respuesta de la superficie potenciométrica es medida.

3.5.3.1 Flujo radial transitorio en un acuífero confinado

Cuando un pozo es bombeado en un acuífero confinado, el agua es obtenida del almacenamiento específico.

3.5.3.1.1 Método de solución de Theis

El primer análisis matemático para los efectos de un abatimiento transitorio en un acuífero confinado fue publicado por C.V. Theis (1935). Theis hizo las siguientes suposiciones:

1. El acuífero es confinado por arriba y abajo.
2. No existe fuente de recarga para el acuífero.
3. El acuífero es compresible y el agua es liberada instantáneamente del acuífero cuando la carga está en descenso.
4. El pozo es bombeado con un caudal constante.

La figura 3.26 ilustra estas condiciones del acuífero.

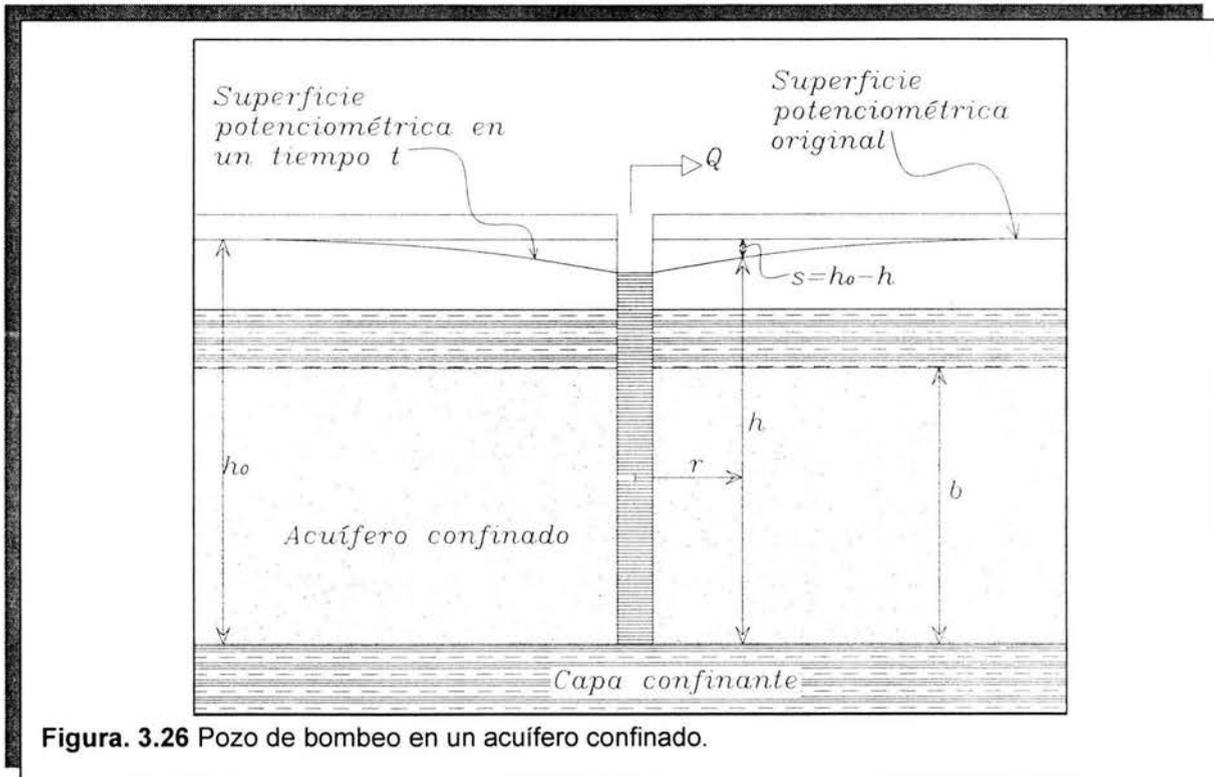


Figura. 3.26 Pozo de bombeo en un acuífero confinado.

Basado en las suposiciones anteriores, una ecuación del flujo radial del agua subterránea de un acuífero confinado a un pozo de bombeo fue deducida por Theis como sigue:

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad 3.71$$

la integral de la ecuación 3.71 se resuelve con una serie infinita, así que esta ecuación conocida como la ecuación de Theis se convierte en

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} - \frac{u^4}{4 \times 4!} + \dots \right] \quad 3.72$$

el argumento "u" esta dado como

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad 3.73$$

Donde:

- Q es el gasto de bombeo constante (L^3/T ; pie³/día o m³/día)
- h es la carga hidráulica (L; m o pie)
- h₀ es la carga hidráulica antes de que el bombeo empiece (L; m o pie)
- s = (h₀-h) es el abatimiento (L; m o pie)
- T es la transmisividad del acuífero (L^2/T ; m²/día o pie²/día)
- t es el tiempo desde que el bombeo empezó (T; días)
- r es la distancia radial desde el pozo de bombeo (L; m o pie)
- S es el coeficiente de almacenamiento del acuífero (adimensional)

La serie finita de la ecuación 3.72 se le conoce como "**función de pozo**" y está representada por la expresión W(u). Aunque la serie es fácil de evaluar matemáticamente, por conveniencia y facilidad han sido tabulados sus valores.

Usando la notación de función de pozo, la ecuación de Theis, ec. 3.72, se simplifica a:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad 3.74$$

3.5.3.1.2 Método de solución de Cooper-Jacob

Cooper y Jacob notaron que para valores pequeños de r y valores de t más grandes, u es pequeña, así que las series de la ecuación 3.72 se vuelven despreciables

después de los dos primeros términos. Como un resultado, el abatimiento puede ser expresado por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right) \quad 3.75$$

rescribiendo y cambiando el logaritmo decimal, la ecuación se reduce a:

$$s = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad 3.76$$

Por lo tanto, un punto del abatimiento s contra el logaritmo de t forma una línea recta. Proyectando esta línea en $s = 0$, donde $t = t_0$, ver figura 3.27.

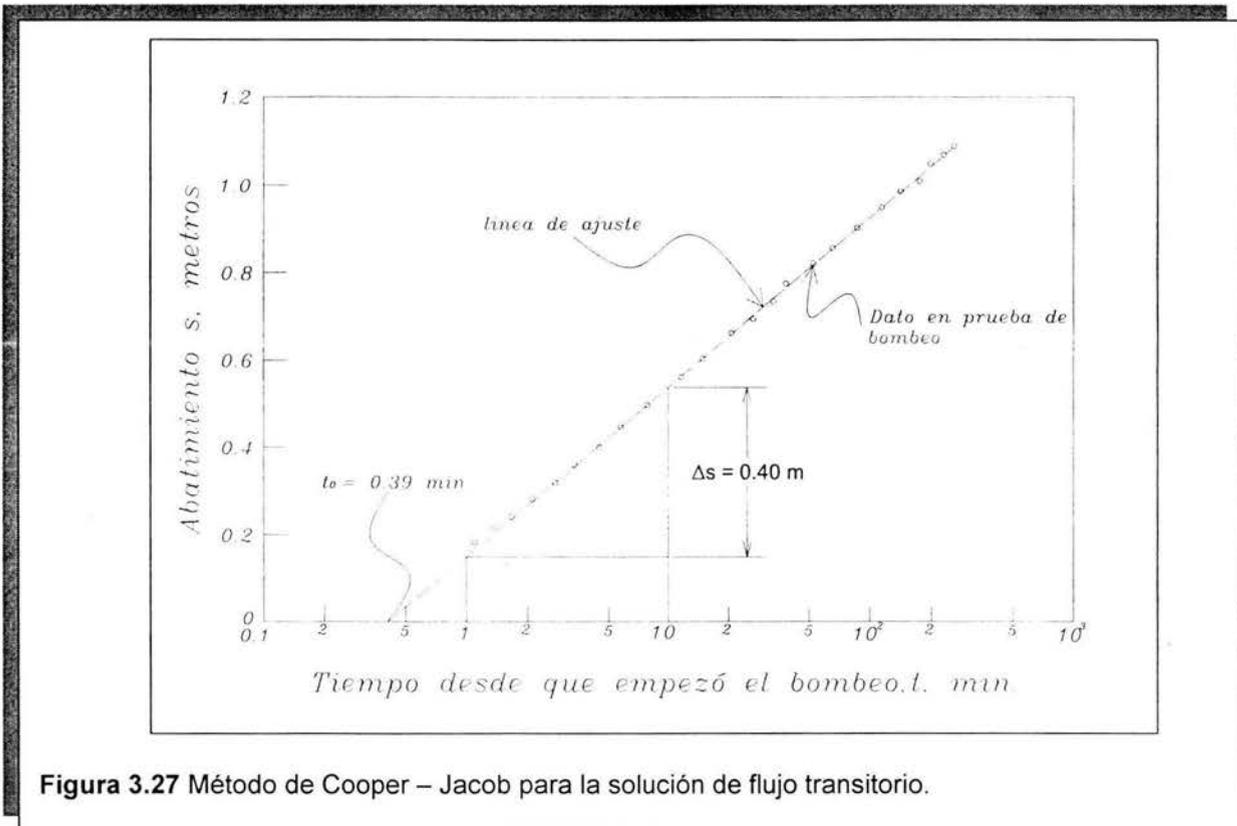


Figura 3.27 Método de Cooper – Jacob para la solución de flujo transitorio.

$$0 = \frac{2.30 Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 T t_0}{r^2 S} \quad 3.77$$

Y

$$\frac{2.25 T t_0}{r^2 S} = 1 \quad 3.78$$

resultando en

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} \quad 3.79$$

Un valor para T puede ser obtenido notando que si $t / t_0 = 10$ entonces $\log t / t_0 = 1$; por lo tanto, reemplazando s por Δs , donde Δs es la diferencia del abatimiento por un ciclo logarítmico de t, la ecuación 3.76 se convierte en:

$$T = \frac{2.30 Q}{4\pi \Delta s} \quad 3.80$$

Así, el procedimiento es resolver primero para T con la ecuación 3.80 y luego resolver para S con la ecuación 3.79. La línea de ajuste de aproximación para este método es restringida para pequeños valores de u ($u < 0.01$) para evitar errores grandes.

3.5.2.2 Flujo radial transitorio en un acuífero libre

El flujo radial del agua subterránea en un acuífero libre o no confinado hacia el pozo de bombeo esta descrito por la siguiente ecuación

$$K_r \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{K_r \partial h}{r \partial r} + K_v \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad 3.81$$

donde:

h es el espesor saturado del acuífero (L; m o pie)
 r es la distancia radial desde el pozo de bombeo (L; m o pie)
 z es la elevación arriba de la base del acuífero (L; m o pie)
 S_s es el almacenamiento específico (1/L; 1/m o 1/ pie)
 K_r es la conductividad hidráulica radial (L/T; m/día, pie/día)
 K_v es la conductividad hidráulica vertical (L/T; m/día, pie/día)
 t es el tiempo (T; días)

Un pozo de bombeo en un acuífero libre extrae agua por dos mecanismos. Como en los acuíferos confinados, la caída en la presión en el agua cede agua debido al almacenamiento elástico del acuífero (S_s). La disminución del nivel freático también cede agua como dren bajo el efecto de la gravedad en los sedimentos. Este es llamado rendimiento específico (S_y). Las ecuaciones de flujo han sido resueltas para flujo radial en acuíferos libres y compresibles bajo un número de diferentes condiciones y por el uso de una variedad de herramientas matemáticas.

Existen tres fases distintas en las relaciones abatimientos-tiempo en los pozos libres. Examinaremos la respuesta de cualquier región típica de un acuífero localizado a una distancia constante del pozo de bombeo. Algunas veces después de que el bombeo ha empezado, la presión en la región estudiada decaerá. Como la presión primero cae, el acuífero responde cediendo un pequeño volumen de agua como resultado de la expansión del agua y la compresión del acuífero. Durante este tiempo, el acuífero se comporta como un acuífero artesiano y la relación tiempo-abatimiento sigue la curva de no equilibrio de Theis para S igual al almacenamiento elástico del acuífero. El flujo es horizontal en este periodo, ya que el agua está siendo derivada de todo el espesor del acuífero.

Siguiendo esta fase inicial, el nivel del agua empieza a decrecer. Ahora el agua está siendo derivada principalmente del drenaje gravitacional del acuífero, existen ambos componentes de flujo vertical y horizontal. La relación abatimiento-tiempo es una función de la proporción de las conductividades horizontales y verticales del acuífero, la distancia al pozo de bombeo, y el espesor del acuífero.

Con el tiempo el abatimiento decrece y la contribución de descarga de la región particular al pozo disminuye. El flujo es de nuevo esencialmente horizontal y la relación descarga-tiempo de nuevo sigue la curva tipo de Theis. La curva de Theis ahora corresponde a una en la cual el almacenamiento es igual al rendimiento específico del acuífero. La importancia del componente del flujo vertical como sus efectos al promedio del abatimiento está directamente relacionado a la magnitud de la relación del rendimiento específico y al coeficiente del almacenamiento específico, (S_y/S_s). Como el valor de S_s se aproxima a cero, el tiempo de duración de la primera fase del abatimiento también se aproxima a cero. Como S_y se aproxima a cero, la longitud de la primera fase incrementa, así que si $S_y = 0$ el acuífero se comporta como un acuífero artesiano de almacenamiento S_s .

Neuman ha publicado una solución a la ecuación 3.81. Existen dos partes a la solución, una para el tiempo justo antes de que el bombeo empiece y el agua viene del almacenamiento específico y uno para mucho después, cuando el agua proviene del drenaje debido a la gravedad con el almacenamiento igual al rendimiento específico.

Las soluciones de Neuman consideran las siguientes hipótesis.

1. El acuífero es libre.
2. La zona vadosa no tiene influencia sobre el abatimiento.
3. El agua inicialmente bombeada proviene de la liberación instantánea de agua del almacenamiento específico.
4. Finalmente el agua proviene del almacenamiento debido al drenaje gravitacional de los poros interconectados.
5. El abatimiento es despreciable comparado en el espesor saturado del acuífero.
6. El rendimiento específico es al menos 10 veces el almacenamiento elástico.

Con estas ecuaciones la solución de Neuman es:

$$s = h_o - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) \quad 3.82$$

Donde $W(u_A, u_B, \Gamma)$ es la función de pozo para el nivel freático del acuífero.

$$u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{Para el primer abatimiento} \quad 3.83$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad \text{Para el último abatimiento} \quad 3.84$$

$$\Gamma = \frac{r^2 K_v}{b^2 K_h} \quad 3.85$$

donde:

$s = h_o - h$ es el abatimiento (L; m o pie)
 Q es el gasto de bombeo (L^3/T ; pie³/día o m³/día)
 T es la transmisividad (L^2/T ; m²/día o pie²/día)

r es la distancia radial desde el pozo de bombeo (L; m o pie)
 S es el almacenamiento (adimensional)
 S_y es el rendimiento específico (1/L; 1/m o 1/ pie)
 t es el tiempo (T; días)
 K_h es la conductividad hidráulica horizontal (L/T; m/día, pie/día)
 K_v es la conductividad hidráulica vertical (L/T; m/día, pie/día)
 b es el espesor saturado de el acuífero (L; m o pie).

3.5.3.3 Flujo radial transitorio en un acuífero semiconfinado sin almacenamiento en el acuitardo (acuitardo incompresible)

Cuando un acuífero semiconfinado, como el mostrado en la figura 3.28 es bombeado, el agua es retirada del acuífero y de la porción saturada del acuitardo, o estrato semipermeable.

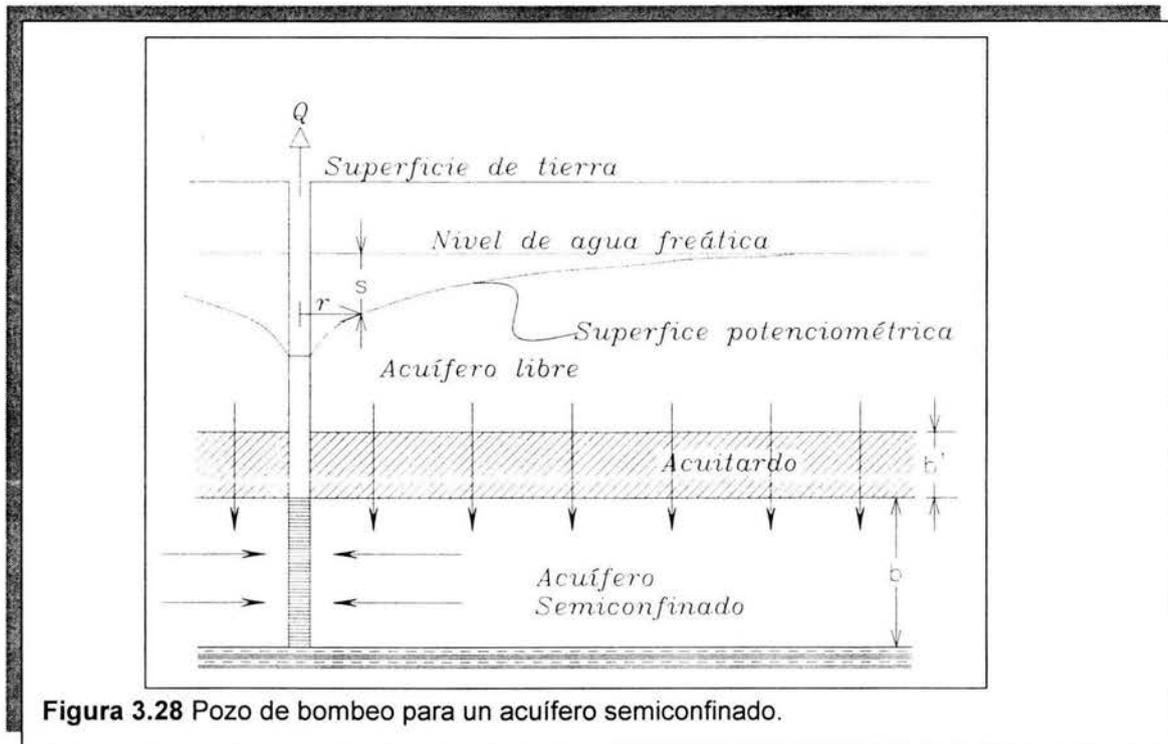


Figura 3.28 Pozo de bombeo para un acuífero semiconfinado.

La disminución de la carga piezométrica en el acuífero por el bombeo crea un gradiente hidráulico dentro del acuitardo; consecuentemente, el agua subterránea se mueve verticalmente hacia abajo en el acuífero. La cantidad de agua moviéndose hacia abajo es proporcional a la diferencia entre el nivel de agua freática y la carga piezométrica.

El flujo en estado establecido es posible en un pozo hacia un acuífero semiconfinado debido a la recarga a través del estrato semipermeable. El equilibrio será establecido cuando el gasto de bombeo sea igual a la recarga vertical de flujo dentro del

acuífero, suponiendo que el nivel freático permanece constante. Las soluciones para esta situación especial de estado establecido se analizan en el apartado 3.5.2.3.

Para el caso de flujo radial en estado transitorio en un acuífero semiconfinado, el abatimiento del nivel piezométrico está dado por la ecuación de Hantush – Jacob.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \quad 3.86$$

donde s, Q, y r son definidas de la figura 3.28, así:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad 3.87$$

y la cantidad r/B está dada por

$$\frac{r}{B} = \frac{r}{\sqrt{T/(K'/b')}} \quad 3.88$$

donde T es la transmisividad del acuífero, K' es la conductividad hidráulica vertical del acuitardo, y b' es el espesor saturado del estrato semipermeable (acuitardo) ver figura 3.28, los valores de la función W(u,r/B) fueron tabulados por Hantush. Puede notarse que la ecuación 3.86 tiene la forma de la ecuación de Theis 3.74, de hecho para un acuífero confinado, K' → 0, así que B → 0 por consiguiente se reduce la ecuación 3.86 a la ecuación de Theis.

Empleando esta analogía y el método de solución de Theis, Walton preparó una familia de curvas tipo para W(u, r/B) como las presentadas en la figura 3.29. Aquí los valores de W(u,r/B) son graficados contra 1/u para varios valores de r/B. En otro papel logarítmico de la misma escala, s contra t es graficado. Superponiendo las dos curvas mientras se conservan los ejes coordenados paralelos, una posición es encontrada donde muchos de los datos coinciden sobre una de las curvas tipo. Seleccionando cualquier punto en el área superpuesta, los valores de W(u,r/B), 1/u, s y t son anotados. T es entonces encontrada de la ecuación 3.86 y S de la ecuación 3.87. Finalmente, del valor de r/B correspondiente a la curva tipo de mejor fijación, es posible calcular K'/b' de la ecuación 3.88 y si b' es conocida de las condiciones de campo, K' puede ser evaluada.

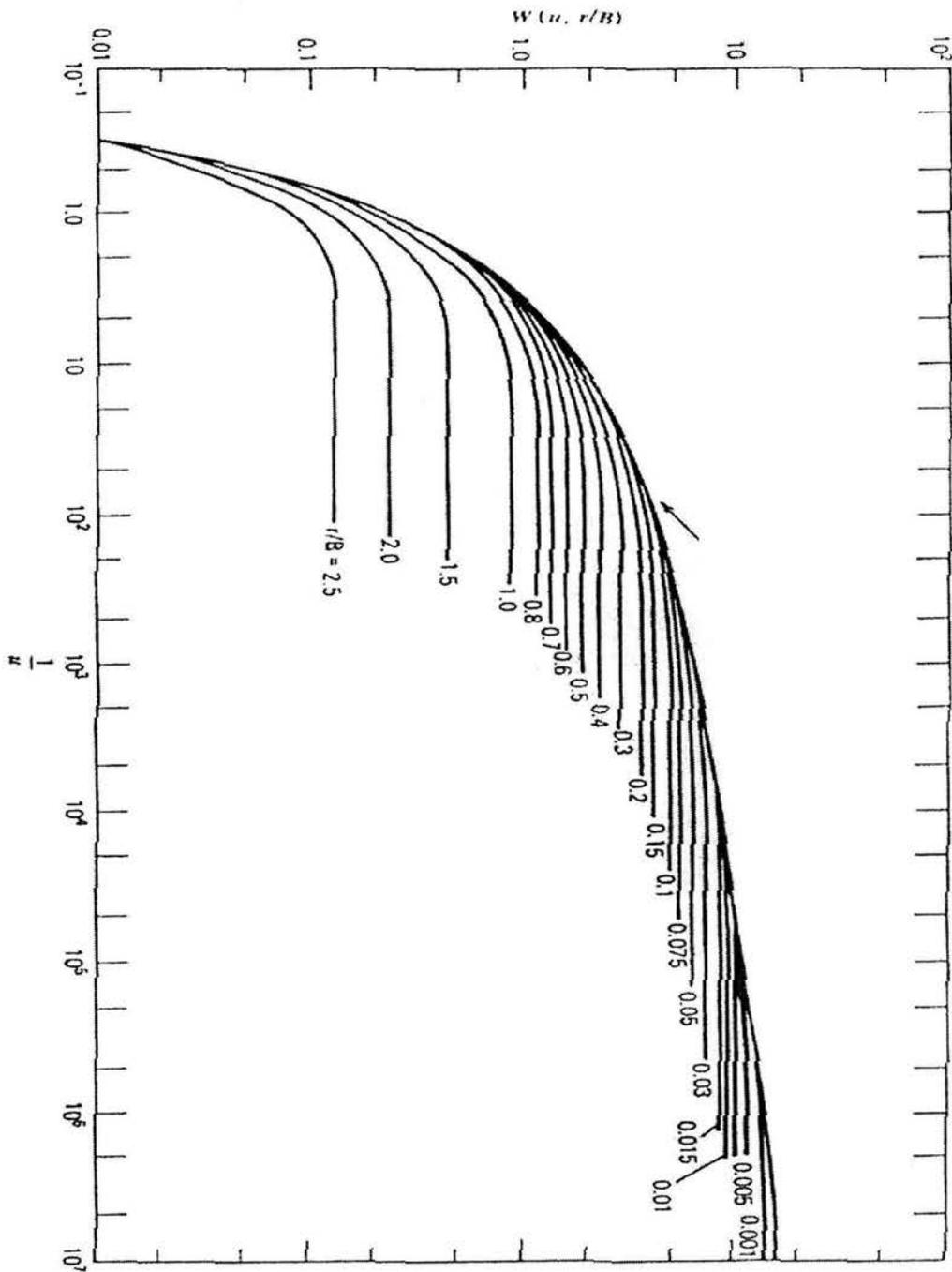


Figura 3.29 Curvas tipo para el análisis de pruebas de bombeo, para determinar el coeficiente de almacenamiento del acuífero semiconfinado.

3.5.3.4 Flujo radial transitorio en un acuífero semiconfinado con almacenamiento en el acuitardo (acuitardo compresible)

La ecuación para el flujo de agua hacia un pozo que penetra un acuífero semiconfinado considerando que el agua es liberada del almacenamiento dentro del acuitardo esta dada por:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{K'}{T} \frac{\partial s_a}{\partial y} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad 3.89$$

donde s_a es el abatimiento en el acuitardo.

La suposición de que un acuitardo es incompresible es práctica. La compresibilidad de los acuitardos existe en todo tiempo, pero no es detectada en las primeras fases de bombeo debido al tiempo de retraso involucrado en el flujo de filtración vertical. La solución de la ecuación 3.89 esta dada de la siguiente forma, (Hantush,1964).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \psi) \quad 3.90$$

donde:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{o} \quad S = \frac{4Tt}{r^2 (1/u)} \quad 3.91$$

y

$$\psi = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{S_a}{S}} \frac{r}{B} = \frac{r}{4} \sqrt{\frac{K' S_a}{T S b'}} \quad 3.92$$

S y S_a son, respectivamente, el coeficiente de almacenamiento del acuífero y del acuitardo.

Los valores de la función de pozo $W(u, \Psi)$ están dados en la tabla 3.5 (Hantush,1964) y presentados en forma gráfica en la figura 3.30 (Lohman,1972). Las curvas tiempo–abatimiento de campo son dibujadas sobre un papel logarítmico en ambos ejes de la misma escala que la gráfica teórica dada en la figura 3.30. Coincidiendo ambas

curvas, las coordenadas del punto de coincidencia tienen valores específicos de s , t , $1/u$, $W(u,\psi)$ y ψ . Si se sustituye $W(u,\psi)$ y s dentro de la ecuación 3.90, entonces T es calculada. Si sustituimos $t, 1/u$, y el valor calculado T en la ecuación 3.91, S es

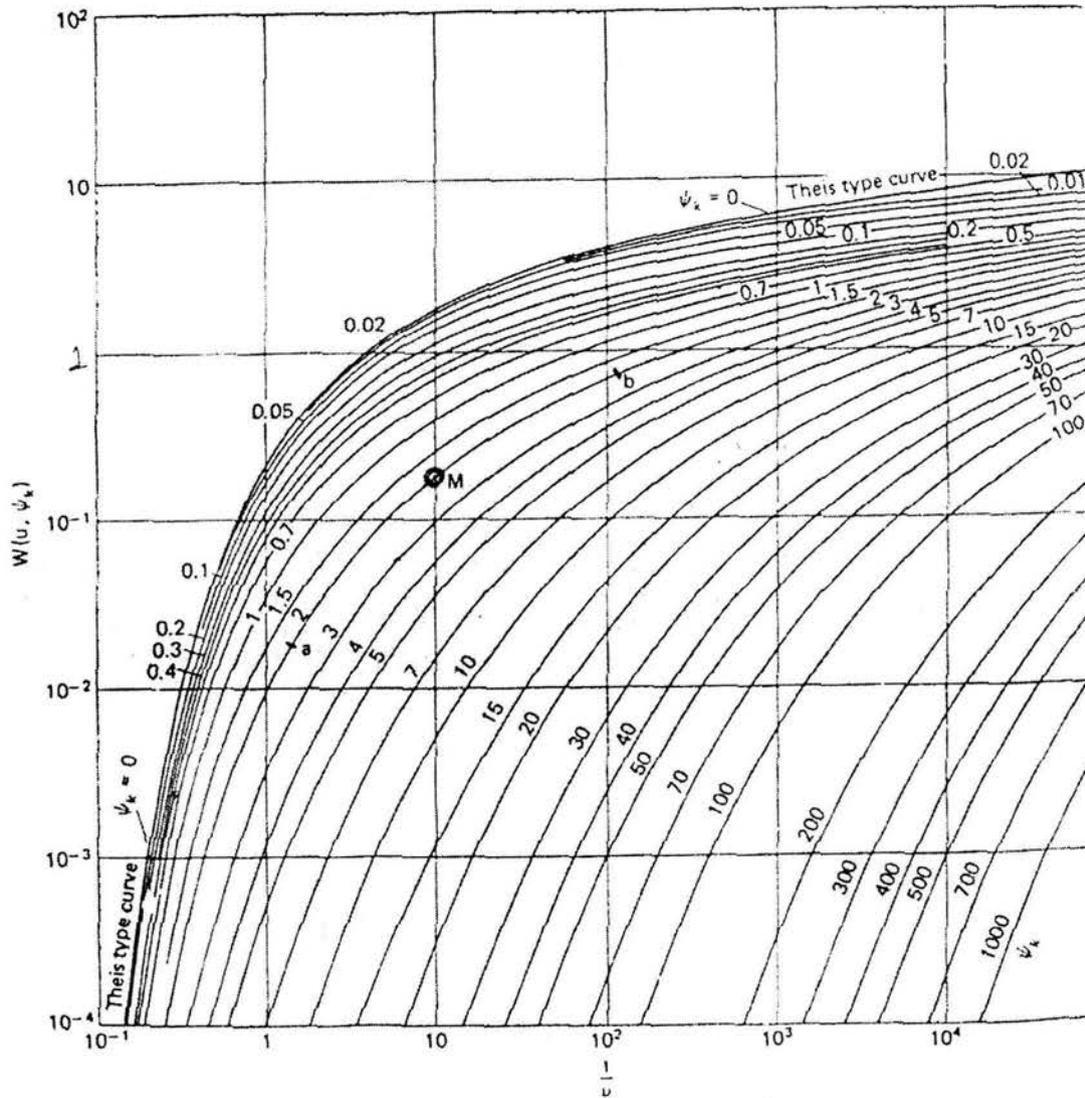


Figura 3.30 Familia de curvas tipo de $1/u$ vs $W(u,\psi)$. (S.W. Lohman, "Groundwater Hydraulics," U.S. Geological Survey Professional Paper 708, Washington, 1972).

encontrada. En la ecuación (3.92), la coordenada del punto de fijación ψ se sustituye junto con los valores determinados T y S (r y b' son conocidos); para obtener el producto $K'S_a$.

Si las pruebas de consolidación son ejecutadas sobre unas muestras no alteradas tomadas del acuitardo, entonces c_v y m_v pueden ser determinadas por las ecuaciones

$$K = c_v m_v \gamma_w \quad . \quad 3.93$$

donde

K = conductividad hidráulica, (L/T; cm/seg)
 c_v = coeficiente de consolidación (L²/T; cm²/seg)
 m_v = compresibilidad vertical del suelo (L²/M; cm²/g)

$$K_a S_a = D_a c_v m_v^2 \gamma_w^2 \quad . \quad 3.94$$

El valor experimental $K_a S_a$ verificado contra el determinado en campo. Sin embargo, si el valor de S_a es requerido, podría ser conveniente encontrar K_a de la prueba de consolidación (ecuación 3.93) y entonces calcular S_a del producto ya determinado $K_a S_a$. El valor de K_a también puede ser determinado de las pruebas de campo, (el acuitardo es considerado incompresible durante los tiempos de inicio).

Cuando el acuífero bajo investigación esta encima y debajo de otros acuíferos de los cuales se encuentran separados por un acuífero confinante, una prueba de bombeo es usado para encontrar S y T del acuífero principal. Entonces de la coordenada ψ_k del punto de fijación, el valor de $\sqrt{K_a S_a D_a}$ es obtenida de la ecuación 3.93.

$$\sqrt{\frac{K_a S_a}{D_a}} = \frac{4\psi}{r} TS \quad . \quad 3.95$$

Este valor $\sqrt{K_a S_a / D_a}$ representa el promedio de las propiedades de los acuitardos. Una vez que la prueba de bombeo es ejecutado y los parámetros ψ_k son determinados, el abatimiento s_a en cualquier acuífero puede ser evaluado usando la ecuación 3.90.

ψ U	1.00E-03			1.00E-02			1.00E-01		
	1	2	5	1	2	5	1	2	5
	1.00E-06	11.9842	11.4237	10.5908	9.9259	9.2469	8.3395	7.6497	6.959
5.00E-06	10.8958	10.6566	9.7174	9.0866	8.4251	7.5484	6.8427	6.1548	5.2459
1.00E-05	10.3739	9.9987	9.3203	8.7142	8.0657	7.1771	6.4944	5.8085	4.9024
5.00E-05	9.0422	8.8128	8.3137	7.803	7.2072	6.3523	5.6821	5.0042	4.109
1.00E-04	8.4258	8.2487	7.8386	7.3803	6.8208	5.9906	5.3297	4.6581	3.77
5.00E-04	6.9273	6.8375	6.6024	6.2934	5.8561	5.1223	4.4996	3.8527	2.9933
1.00E-03	6.2624	6.1969	6.0193	5.7727	5.4001	4.729	4.1337	3.5045	2.665
5.00E-03	4.6951	4.6649	4.5986	4.4474	4.2231	3.7415	3.2483	2.6891	1.925
1.00E-02	4.0163	3.995	3.9334	3.8374	3.6669	3.2752	2.8443	2.3325	1.6193
5.00E-02	2.459	2.4502	2.4243	2.3826	2.304	2.1007	1.8401	1.4872	0.954
1.00E-01	1.8172	1.8116	1.7949	1.7677	1.7157	1.5768	1.3893	1.1207	0.6545
5.00E-01	0.5584	0.557	0.553	0.5463	0.5333	0.4969	0.4436	0.3591	0.2083
1.00E+00	0.2189	0.2184	0.2169	0.2124	0.2097	0.1961	0.1758	0.1427	8.12E-02
5.00E+00	1.15E-03	1.14E-03	1.14E-03	1.12E-03	1.10E-03	1.04E-03	9.34E-04	7.63E-04	4.23E-04
1.00E+01	4.15E-06	4.14E-06	4.11E-06	4.07E-06	3.99E-06	3.75E-06	3.39E-06	2.77E-06	2.77E-06

Tabla 3.5 Valores de $W(u, \psi_k)$, Fuente: M.S Hantush "Hydraulics of wells", in V.T. Chow (ed.), Advances in Hydrosience, Vol. 1 Academics Press, New York, 1964.

ψ u	1.00E+00			1.00E+01			1.00E+02		
	1	2	5	1	2	3	1	2	3
1.00E-06	5.3575	4.6721	3.7756	3.111	2.4671	1.671	1.1361	0.6879	0.2698
5.00E-06	4.5617	3.8836	3.0055	2.3661	1.7633	1.0574	0.6256	0.3091	7.87E-02
1.00E-05	4.2212	3.5481	2.6822	2.059	1.4816	0.8285	0.4519	0.1978	3.88E-02
5.00E-05	3.4394	2.7848	1.9622	1.3943	0.8994	0.4024	0.1685	4.94E-02	4.05E-03
1.00E-04	3.1082	2.4658	1.6704	1.1359	0.6878	0.2692	9.63E-02	2.22E-02	1.07E-03
5.00E-04	2.3601	1.7604	1.0564	0.6252	0.3089	7.87E-02	1.66E-02	1.69E-03	1.29E-05
1.00E-03	2.0506	1.4776	0.8271	0.4513	0.1976	3.88E-02	5.90E-03	3.61E-04	
5.00E-03	1.3767	0.8915	0.4001	0.1677	4.93E-02	4.03E-03	2.05E-04	2.28E-06	
1.00E-02	1.1122	0.6775	0.267	9.55E-02	2.21E-02	1.06E-03	2.74E-05		
5.00E-02	5.5812	0.2923	7.55E-02	1.60E-02	1.64E-03	1.26E-05			
1.00E-01	0.397	0.1789	3.59E-02	5.52E-03	3.40E-04				
5.00E-01	0.1006	3.25E-02	2.88E-03	1.51E-04	1.71E-06				
1.00E+00	3.65E-02	9.93E-03	5.47E-04	1.51E-05					
5.00E+00	1.67E-04	3.09E-05							
1.00E+01									

Tabla 3.5 (... continuación) Valores de $W(u, \psi_k)$, Fuente: M.S Hantush "Hydraulics of wells", in V.T. Chow (ed.), Advances in Hydroscience, Vol. 1 Academics Press, New York, 1.

CAPÍTULO 4



*Estructuración y Funcionamiento
del Modflow*

CONTENIDO DEL CUARTO CAPÍTULO

4. ESTRUCTURACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MODFLOW

4.1 Estructuración

- 4.1.1 Basic package (paquete básico)
- 4.1.2 Block centered flow package
- 4.1.3 Well package (paquete para pozos)
- 4.1.4 River package (paquete para ríos)
- 4.1.5 Drain package (paquete para drenaje)
- 4.1.6 Recharge package (paquete de recarga)
- 4.1.7 Evapotranspiration package (paquete de evapotranspiración)
- 4.1.8 Solver packages (paquetes de solución)

4.2 Funcionamiento

- 4.2.1 Condiciones iniciales
- 4.2.2 Condiciones de frontera
- 4.2.3 Resolución del problema
- 4.2.4 Calibración y verificación
- 4.2.5 Resultados

4 ESTRUCTURACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MODFLOW

4.1 ESTRUCTURACIÓN

MODFLOW esta construido con un diseño modular que consiste en un programa principal y "paquetes". Los paquetes son grupos de subrutinas independientes que llevan a cabo simulaciones de tareas específicas, tales como la medición de flujo dentro y fuera de un río, añadir recarga en la parte superior del acuífero, o involucrar un procedimiento de cálculo específico para resolver las ecuaciones de diferencias finitas para las ecuaciones de flujo, como el Slice Overrelaxation (McDonald y Harbaugh 1998).

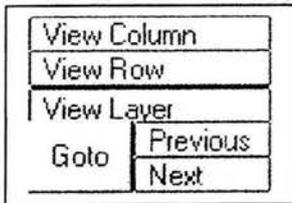
Este diseño modular es útil en varias formas, ya que proporciona una base lógica para la organización del modelo actual con elementos del programa similares o funciones conjuntamente agrupadas. Tal estructura facilita la integración de nuevos paquetes que refuerzan las habilidades del modelo. La estructura modular también proporciona una forma conveniente para organizar el manual del usuario. Finalmente, la estructura modular simplifica la preparación de datos para un ensayo de simulación. Comúnmente, los datos son leídos por una subrutina dentro de un paquete. Así para problemas simples, donde solamente pocos paquetes son usados, los datos de entrada serán sencillos.

Para comprender mejor cómo esta estructurado Visual MODFLOW, ejemplos sencillos del manejo del programa como los presentados en el capítulo 5 resultan ser la mejor guía para lograr ese objetivo. Sin embargo a continuación se muestra la explicación de los elementos que aparecen en pantalla y el cuadro de estructuración.

La tabla 4.1 muestra los paquetes en el modelo básico (Mc Donald y Harbaugh, 1988), con una breve descripción de su funcionamiento.

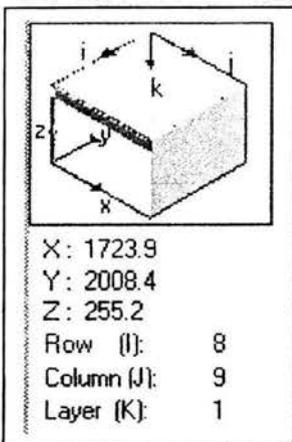
En la figura 4.1 se muestra la pantalla que se presenta más frecuentemente en el Visual MODFLOW, la cual esta compuesta por un menú superior que resulta de elegir una opción del menú principal (ver la estructuración del MODFLOW en la tabla 4.2, pág. 4 - 17), para este caso tenemos el menú que le corresponde a la opción de datos de entrada (**input**) del menú principal. Este menú superior a su vez nos ofrece opciones que pueden manipularse mediante el menú de la izquierda en color gris,

Botones para el control de imagen



La habilidad para cambiar rápida y fácilmente entre un despliegue de vista en planta y una de sección de corte dentro del modelo es una característica poderosa de Visual MODFLOW ya que permite al usuario obtener una mejor perspectiva en los aspectos del modelo en tres dimensiones de los parámetros de entrada y de los resultados de la simulación. Los botones para el control de imagen tienen la misma función para cada módulo y están localizados en la misma posición para cada módulo. Simplemente hay que seleccionar el botón de control que se desee, y hacer clic sobre la fila, columna o estrato para obtener la vista deseada.

Cubo de navegación



El cubo de navegación proporciona una representación esquemática en 3-D de la malla del modelo y de los estratos. Este cubo navegador da una referencia visual rápida de la posición actual del cursor dentro del dominio del modelo. Esto es particularmente útil cuando se trabaja con modelos que contienen multiestratos, o si se quiere ver un modelo en una sección de corte. En suma, la localización activa del puntero del mouse (las coordenadas del modelo X,Y,Z y las coordenadas de las celdas I, J, K en fila, columna y estrato respectivamente son desplegadas interactivamente debajo del cubo cuando se mueve el puntero dentro de la pantalla. Cuando se trata de una vista en estrato la coordenada z toma la elevación a la mitad de ese estrato.

Botones de atajo

Cada menú en la pantalla del Visual MODFLOW tiene un conjunto de botones de atajo localizados a lo largo del fondo de la pantalla. Estos botones permiten al usuario un acceso rápido a algunas de las funciones gráficas más comunes, tales como un acercamiento (**zoom in**) o un alejamiento (**zoom out**), moverse en cualquier dirección (**pan**), añadir o remover sobreimpresiones desplegadas (**overlay**), salvar el archivo existente (**save**), y regresar al menú principal.

Diseño de la malla del sistema discretizado

Visual MODFLOW permite tener el dominio del modelo sobre el mapa de un sitio (archivos de formatos .DXF o .BMP) para alinear la malla del modelo con las características del sitio y la dirección del flujo del agua subterránea. La malla de diferencias finitas puede ser modificada por adición, borrado, cambio de lugar de filas, columnas y estratos usando el método estándar de "señalar y clic".

La mejor interpretación de la estructuración del MODFLOW quedará reafirmada cuando el propio lector manipule las opciones antes escritas en la sección de resolución de problemas en el capítulo precedente.

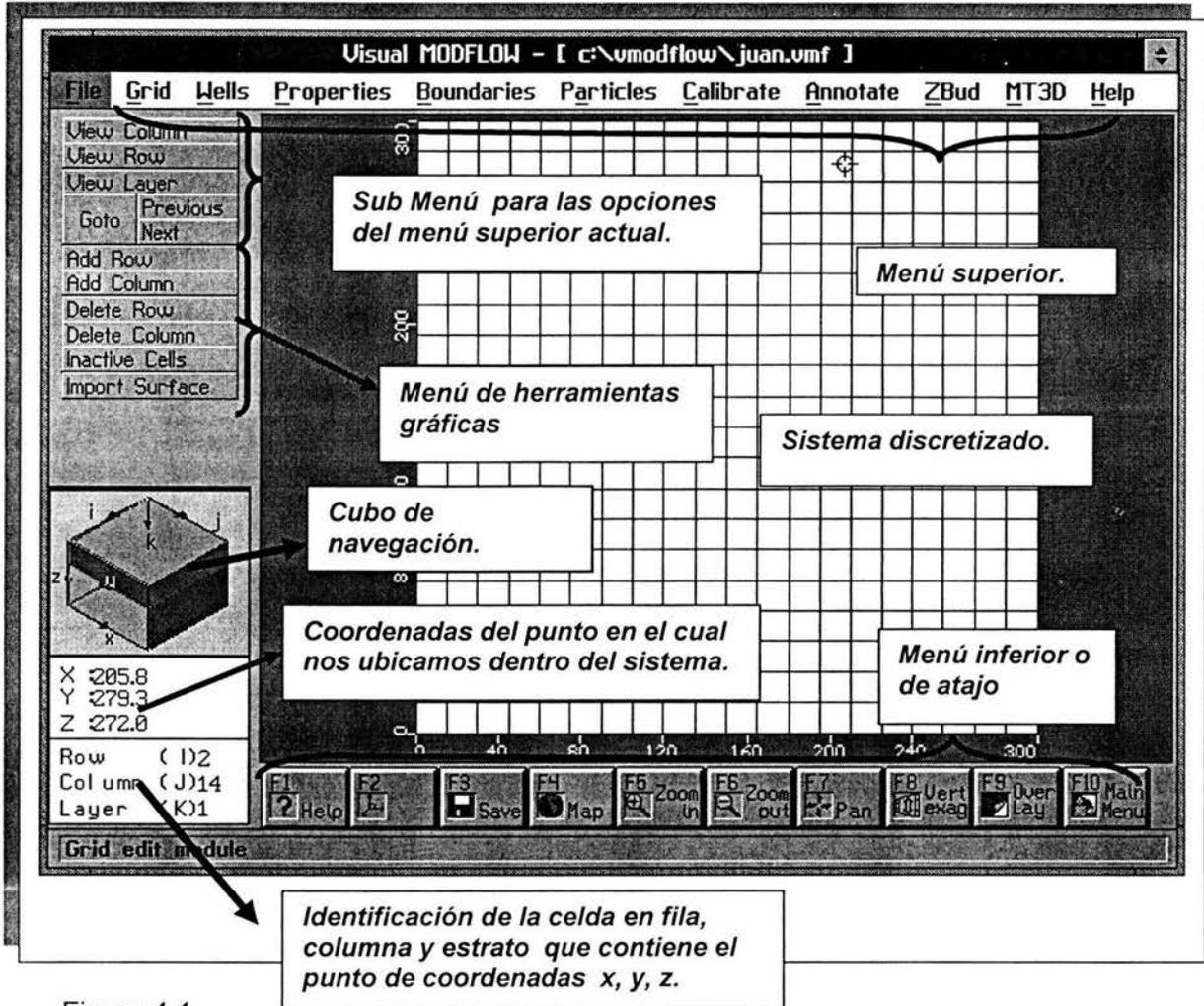


Figura 4.1

Nombre del paquete	Abreviación	Descripción del paquete
Basic	BAS	Maneja aquellas tareas que son parte del modelo como un todo. Entre estas tareas están la especificación de las fronteras, la determinación del tiempo tomado en los pasos de cálculo, establecimiento de las condiciones iniciales y la impresión de resultados.
Block-Centered Flow	BCF2	Requerido en todos los cálculos del modelo. Lee la información básica de la malla, formas de los estratos, tipos de acuíferos, y parámetros hidráulicos para calcular los términos de las ecuaciones de diferencias finitas que representan el flujo dentro de un medio poroso; específicamente, el flujo de celda a celda y del flujo dentro del almacenamiento.
Horizontal Flow Barrier	HFB	Añade resistencia entre las celdas vecinas, para representar barreras.
Well	WEL	Designado para añadir los efectos de inyección y retiro de flujo por medio de pozos. Lee la información sobre el número de pozos, su localización, y sus programas de bombeo. El paquete añade términos representando el flujo a pozos para las ecuaciones de diferencias finitas.
Recharge	RCH	Este paquete está diseñado para simular la adición de recarga natural proveniente de la precipitación para el modelo. Los términos añadidos representan la carga distribuida para las ecuaciones de diferencias finitas.
River	RIV	Este paquete proporciona la habilidad de modelar agua subterránea con interacciones de agua superficial. Toma en cuenta la afectación de los arroyos en la simulación. Añade términos representando el flujo a ríos a las ecuaciones de diferencias finitas.

Drain	DRN	Similar al paquete river excepto que considera solamente los flujos de entrada al dren. El paquete incorpora términos representando el flujo a drenes en la ecuación de diferencias finitas.
Evapotranspiration	EVT	Incorpora términos representando la evapotranspiración a las ecuaciones de diferencias finitas. Toma en cuenta los efectos de la evapotranspiración de las plantas y una evaporación directa del agua subterránea. La proporción varía como una función de la profundidad del nivel freático.
General Head Boundaries	GHB	Proporciona la habilidad de tener flujos variables que cruzan las fronteras del modelo. La extensión del flujo depende de la diferencia de carga entre la celda y alguna carga constante en una fuente lejos de la frontera. Suma términos representando fronteras de carga general a las ecuaciones de diferencias finitas.
Strongly Implicity Procedure	SIP	Soluciones iterativas para el sistema de ecuaciones de diferencias finitas usando el procedimiento Strongly Implicity.
Slice Successive Overrelaxation	SOR	Soluciones iterativas para el sistema de ecuaciones de las diferencias finitas usando el procedimiento Slice Successive
Pre Conditioned Conjugate Gradient	PCG2	Soluciones iterativas para el sistema de ecuaciones de diferencias finitas usando el método de Pre Conditioned Conjugate Gradient
Output Control	OC	Proporciona al usuario la habilidad de control para los cálculos que son impresos como datos de salida y el tiempo de paso.

Tabla 4.1

4.1.1 BASIC PACKAGE (PAQUETE BÁSICO)

Visual MODFLOW automáticamente subdivide los periodos de bombeo para cualquier tiempo que exista un cambio en gastos de bombeo, elevación del río, elevación de carga constante, etc. Ver figura 4.2

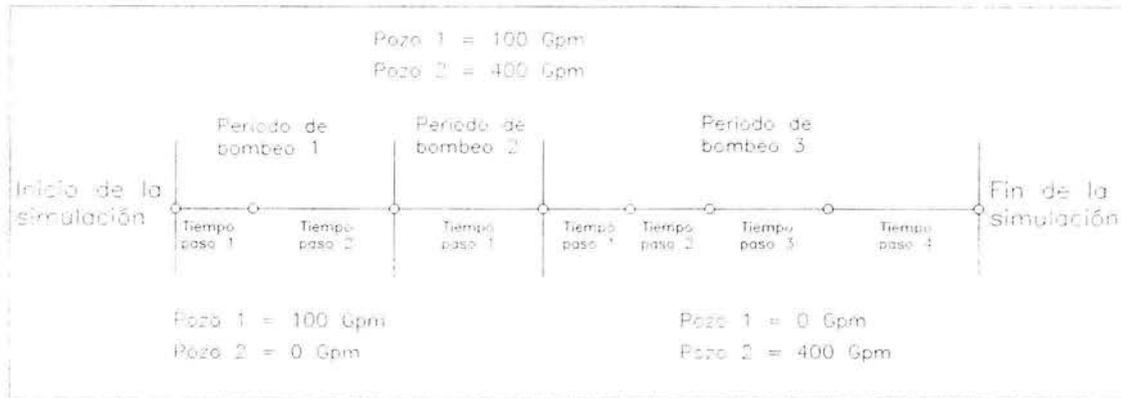


Figura 4.2 División de los periodos de bombeo.

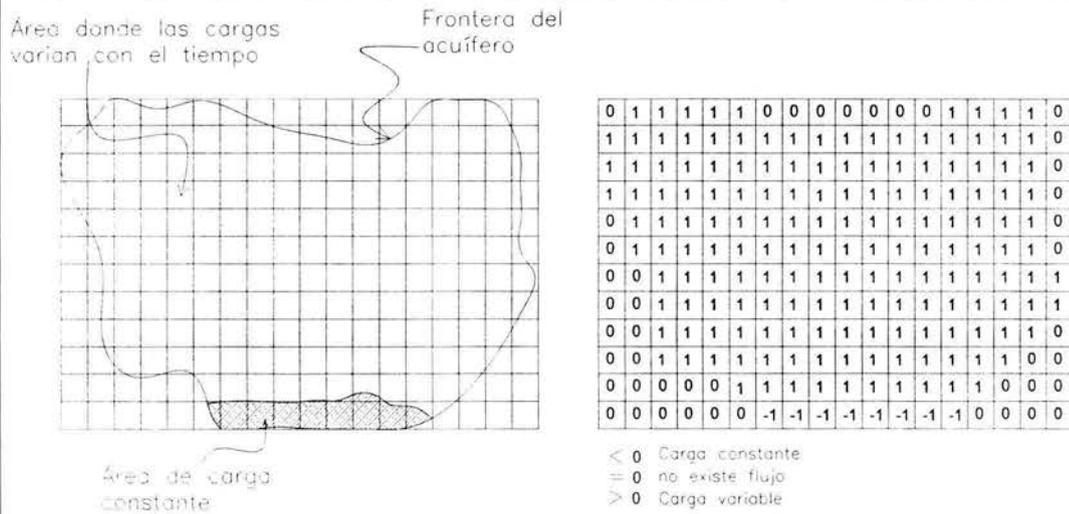


Figura 4.3 Algunas tareas que pueden lograrse con el paquete básico del MODFLOW.

4.1.2 BLOCK CENTERED FLOW PACKAGE (BCF)

MODFLOW solo lee ΔX , ΔY , no coordenadas absolutas. Por lo tanto, cuando Visual MODFLOW importa un archivo de MODFLOW, éste requiere de las coordenadas originales.

En BCF la relación anisotrópica (variable TRPY) es leída.

MODFLOW maneja la conductividad hidráulica anisotrópica de la siguiente manera:

La propiedad de anisotropía vertical en el acuífero (por ejemplo. $K_x \neq K_z$) , es posible aunque es tratada indirectamente a través de la variable VCONT. Cada celda podrá tener una diferente relación K_x / K_z .

En una anisotropía horizontal MODFLOW sólo lee K_x . K_y es calculada por multiplicación de K_x por un factor anisotrópico llamado TRPY. Es decir:

$$K_y = K_x * TRPY$$

TRPY esta definido como una propiedad del estrato, por ejemplo, no existe posibilidad de tener dos materiales con dos diferentes relaciones anisotrópicas dentro de un mismo estrato.

Visual MODFLOW necesita solamente K_x . TRPY puede ser introducido posteriormente para cada estrato y afectará a cada material en ese estrato, si se desea una conductividad diferente para K_y . En otras palabras MODFLOW reconoce K_x y K_y para cada material. Descarta totalmente K_y y usa el TRPY calculado del material anisotrópico 1 multiplicando todas las propiedades por ese factor TRPY sin ninguna precaución para el usuario.

Notas sobre la opción celdas mojadas (*rewetting*) del paquete *block centered flow*:

- el paquete original BCF no permitía celdas mojadas.
- BCF2 permite celdas para ser “mojadas nuevamente”, si éstas empiezan a secarse durante la simulación (por ejemplo, en un pozo cerrado después del bombeo por un periodo de tiempo. La opción mojado permitirá recobrar el nivel de agua freática).
- Existe una desventaja para éste paquete: la opción mojado puede causar oscilaciones numéricas y no converger a una solución, especialmente en casos donde el nivel freático cruza estratos con muy diferentes conductividades hidráulicas.

Sugerencias para minimizar las oscilaciones numéricas:

Usar un factor de relajación < 1 en una solución numérica (usualmente 0.5) especialmente durante la primera ejecución del programa.

Permitir la opción mojado solo para las celdas inferiores, más importantes porque BCF2 permite la saturación de áreas declaradas inactivas si las condiciones son conocidas

Usar un valor de umbral relativamente alto (usualmente alrededor de 1).

4.1.3 WELL PACKAGE (PAQUETE PARA POZOS)

Este paquete supone las siguientes condiciones para su correcta ejecución:

- ✓ El bombeo es introducido como un gasto negativo, en cambio la inyección es introducida como un gasto positivo.
- ✓ El pozo se ubica en el centro de la celda.
- ✓ Conceptualmente solo se permite un pozo por celda.

MODFLOW permite la asignación de gastos de bombeo para cada pozo.

Q es distribuida de acuerdo a la media aritmética de la conductividad hidráulica horizontal tomando en cuenta la longitud de la parte del pozo que acepta el flujo en esa celda, ver figura 4.4.

$$Q_1 = \frac{k_1 L_1}{k_1 L_2 + k_2 L_2}$$

4.1

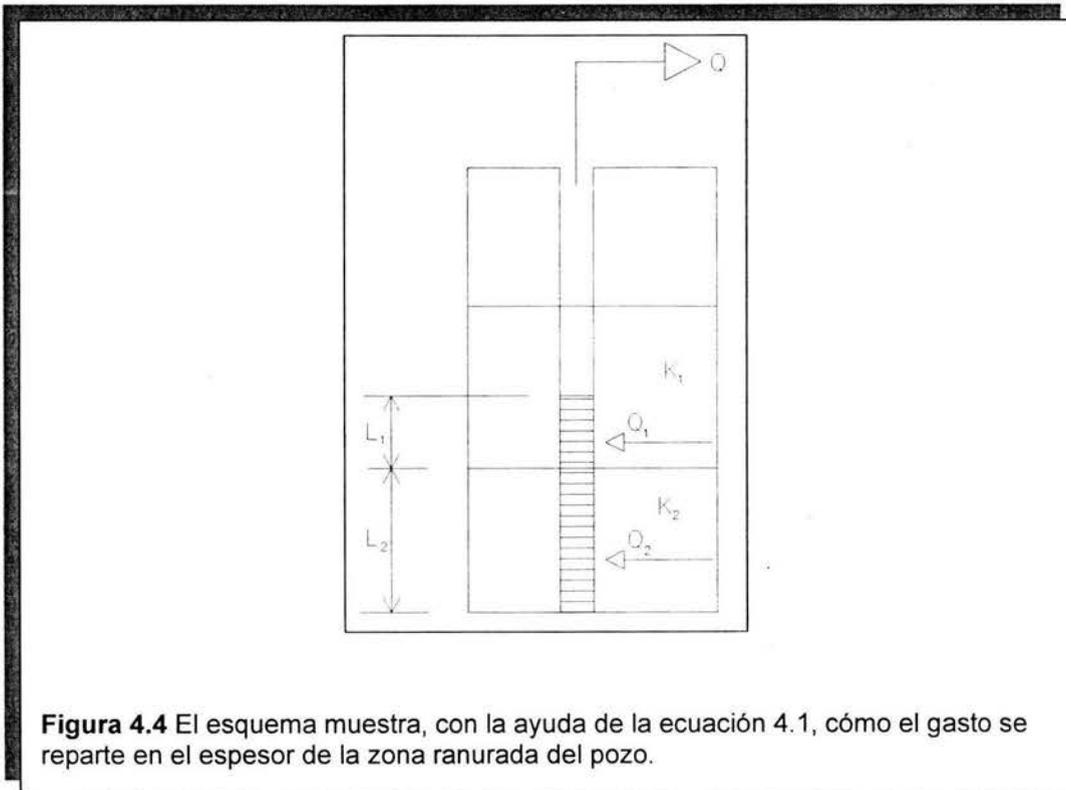
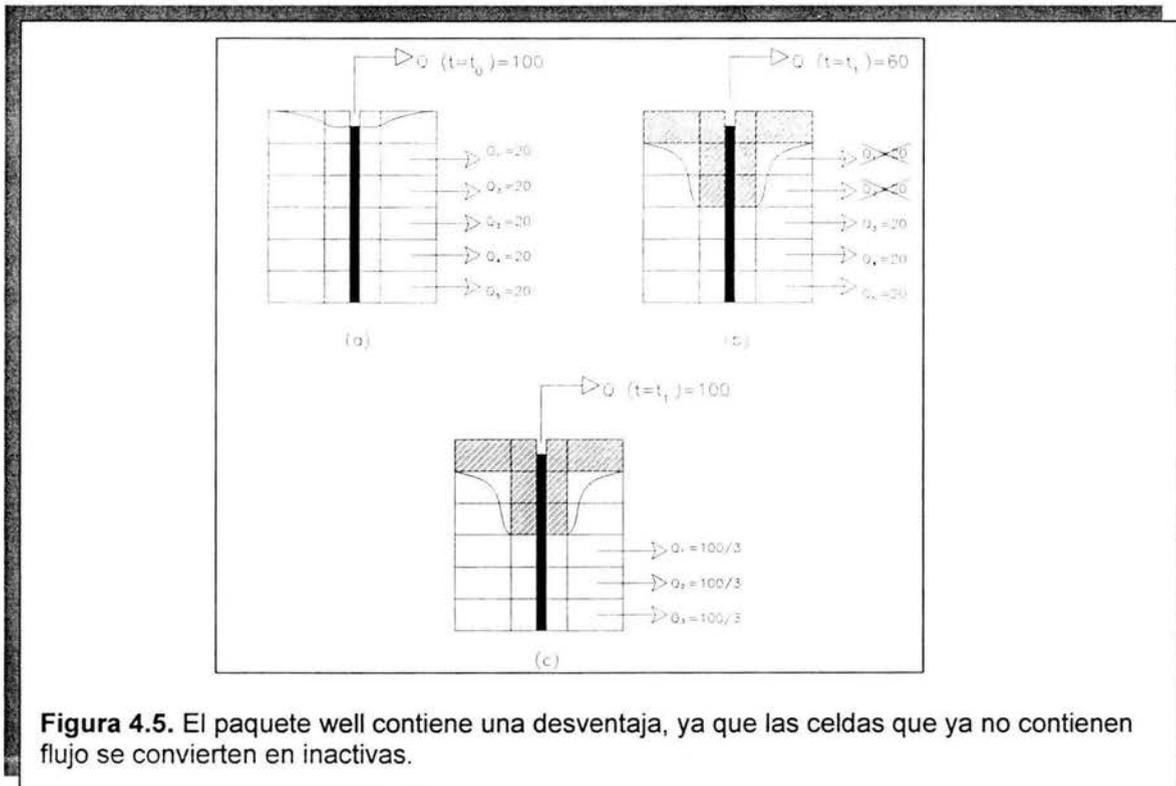


Figura 4.4 El esquema muestra, con la ayuda de la ecuación 4.1, cómo el gasto se reparte en el espesor de la zona ranurada del pozo.

A pesar de las facilidades para introducir los datos para el bombeo en este paquete, existe una desventaja: si una celda en la cual un pozo es localizado se “seca”, entonces la celda se convierte en inactiva.

Por ejemplo, si queremos bombear 100 lps de un pozo los gastos en la celda en un tiempo t_0 serán repartidos como lo muestra la figura 4.6a, después de un tiempo t_1 , dos celdas que antes daban un gasto se vuelven inactivas (es decir se “secan”), por lo que sólo se recaudarán 60 lps (figura 4.6b).



El usuario debe poner atención si cualquier celda en el bombeo fue “secada” para reasignar el flujo de bombeo original (100 en este caso) para las celdas restantes activas, las tres del fondo en este caso y resolver el problema de nuevo. (figura 4.56c).

4.1.4 RIVER PACKAGE (PAQUETE PARA RÍOS)

Este paquete toma las siguientes suposiciones.

- La carga es dependiente de las condiciones de flujo.
- Un río es una fuente infinita de agua

El gasto que proporciona al modelo esta definido por las ecuaciones 4.2 a 4.4, la figura 4.6 muestra las variables involucradas.

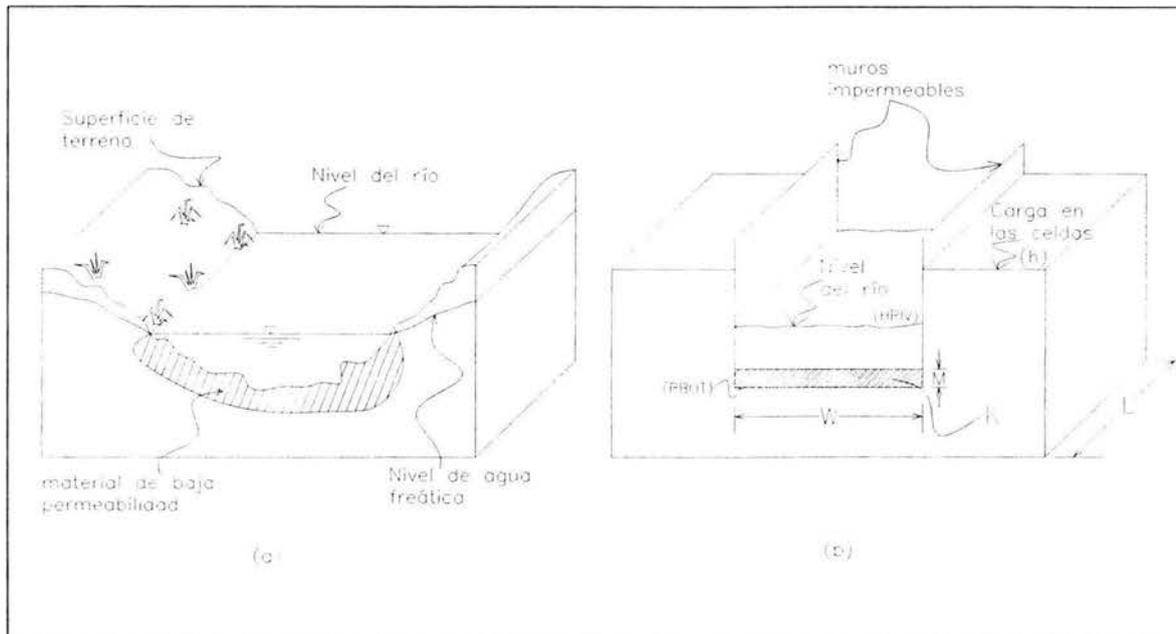


Figura 4.6 (a) Sistema natural río - acuifero , (b) Representación de un sistema natural río - acuifero en el paquete RIVER.

$$CRIV = \frac{K \times L \times W}{M}$$

4.2

$$QRIV = CRIV(HRIV - h) \quad \text{si } h > RBOA$$

4.3

$$QRIV = CRIV(HRIV - RBOA) \quad \text{si } h \leq RBOA$$

4.4

4.1.5 DRAIN PACKAGE (PAQUETE PARA DRENAJE)

Este paquete toma las siguientes suposiciones:

- Similar al paquete RIVER pero el flujo solo ocurre del acuífero al drenaje. Es decir el drenaje actúa solo como un descenso no como una fuente.
- Elevación del drenaje = carga en drenaje.
- La conductancia se define de la misma forma que el RIVER.

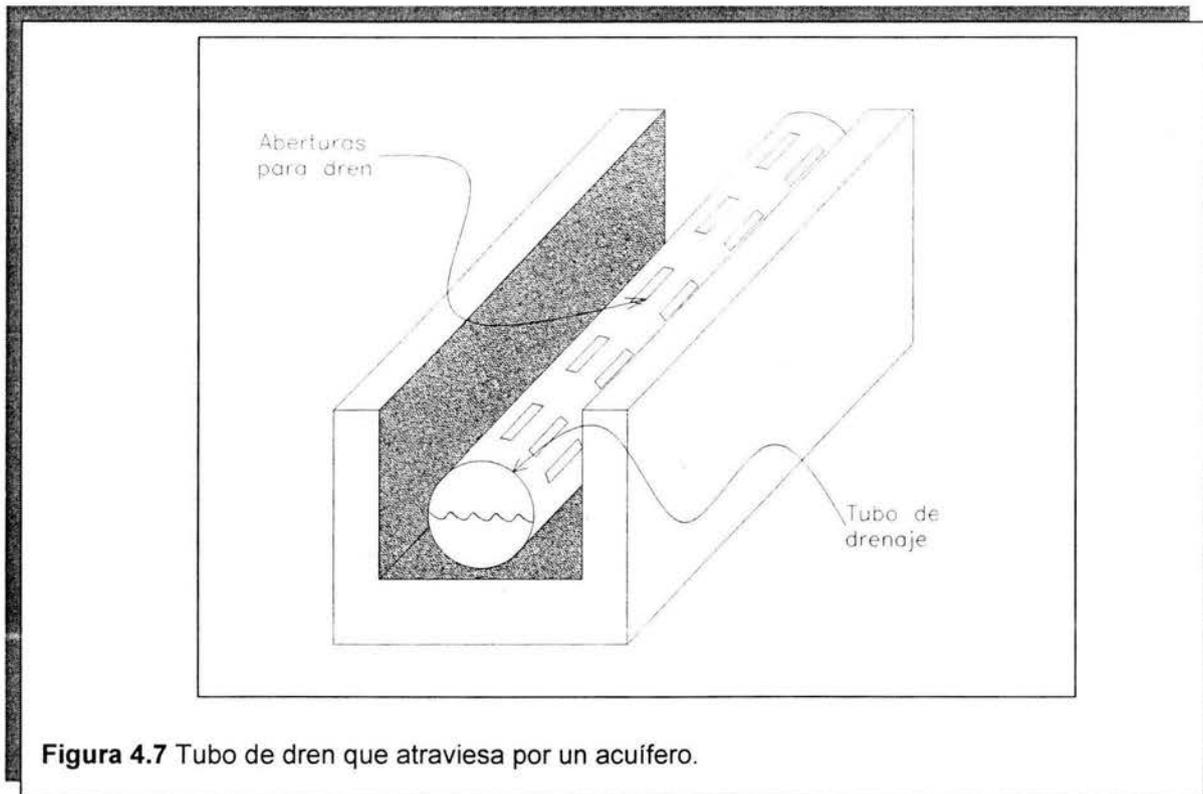


Figura 4.7 Tubo de dren que atraviesa por un acuífero.

4.1.6 RECHARGE PACKAGE (PAQUETE DE RECARGA)

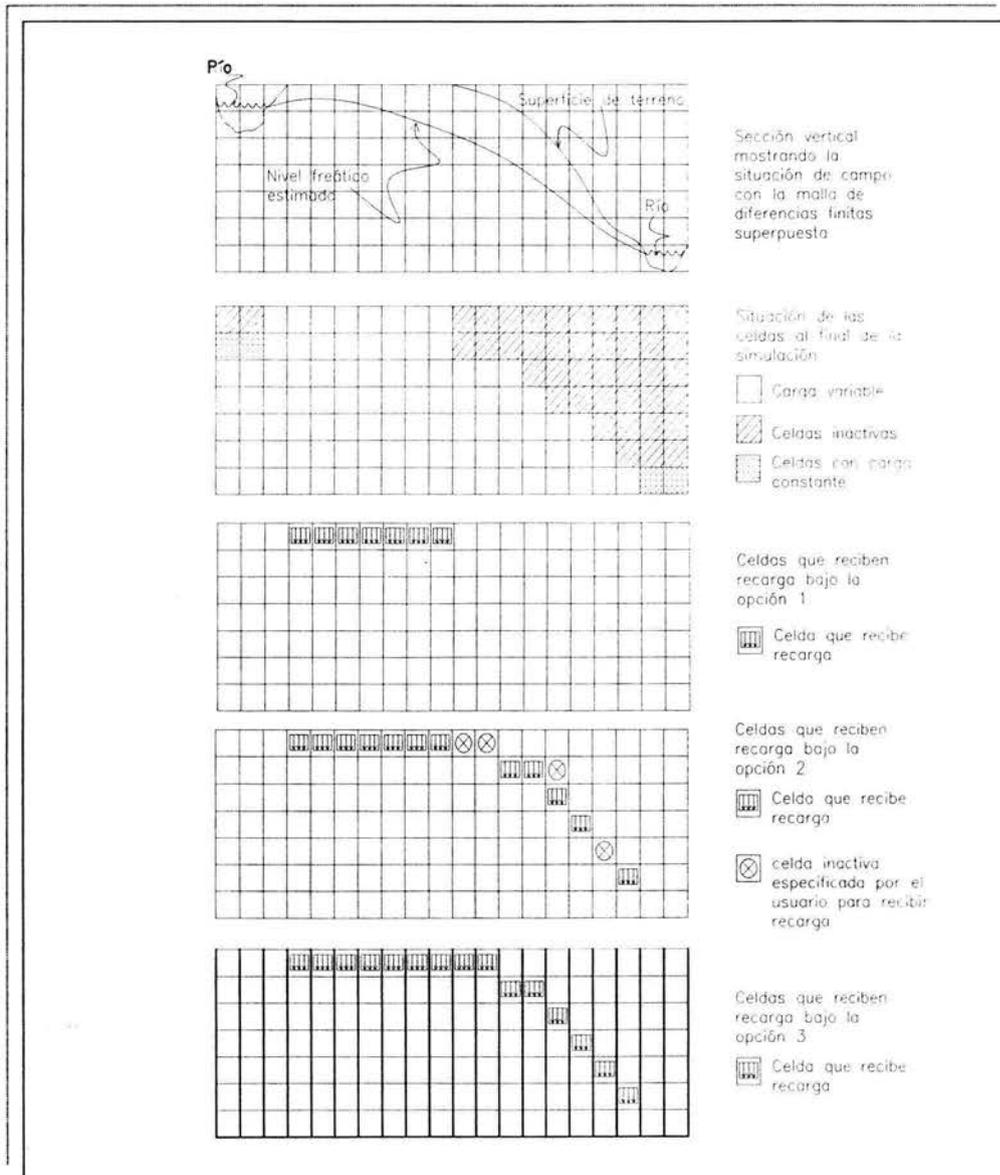


Figura 4.8 Existen tres opciones para representar la recarga del acuífero en el MODFLOW, que dependen de la mejor visualización del usuario.

4.1.7 EVAPOTRANSPIRATION PACKAGE (PAQUETE DE EVAPOTRANSPIRACIÓN)

Dentro de la ecuación de equilibrio de un elemento, la evapotranspiración representa un caudal que se suma al bombeo del nodo.

Este paquete simula los efectos de la transpiración de las plantas y la evaporación directa proveniente del suelo.

- ▶ En el modelo es supuesto que la pérdida por evapotranspiración esta en función del espesor de la franja capilar, es decir, de las características del suelo y de la profundidad de las raíces de las freatofitas de la zona.
- ▶ Cuando el nivel freático esta en la superficie, la evapotranspiración es igual a un valor máximo especificado por el usuario.
- ▶ Si el nivel freático baja por debajo de una profundidad específica (por ejemplo bajo las raíces) se conoce cómo la extracción por evapotranspiración se suspende.
- ▶ Entre esos limites la evapotranspiración es supuesta para variar linealmente (figura 4.9).

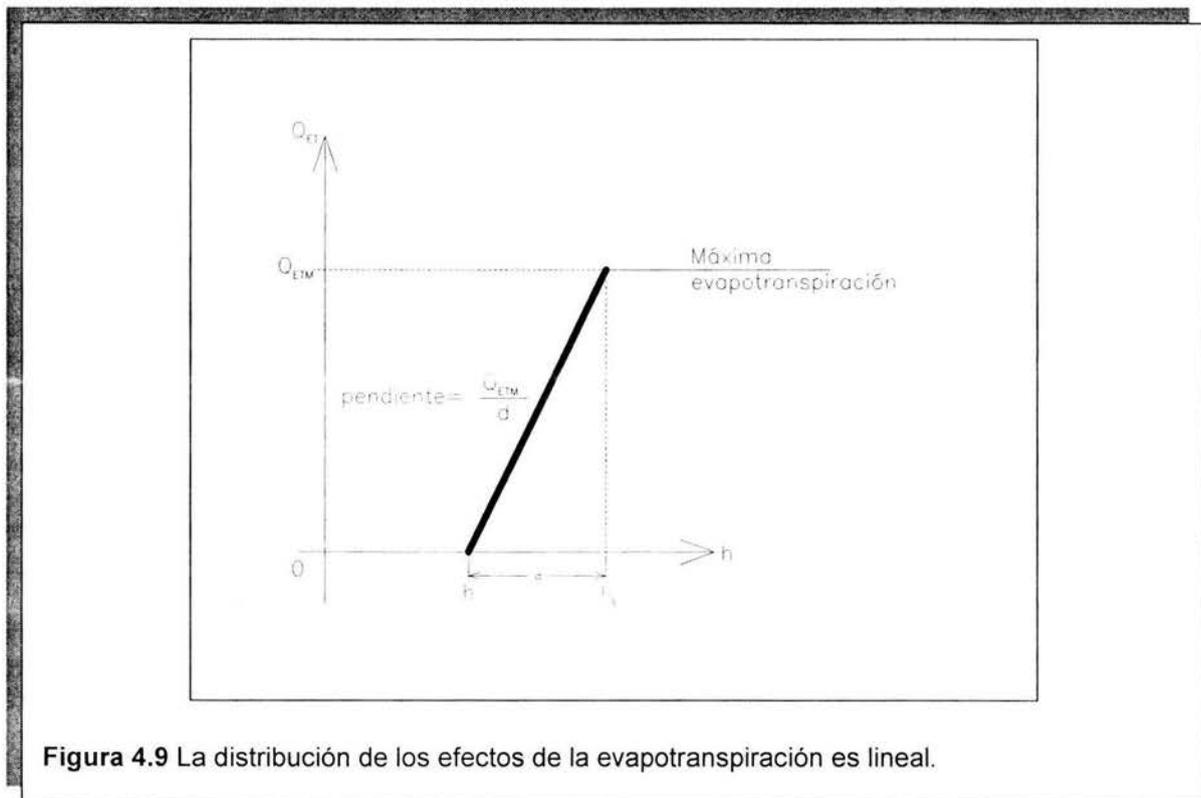


Figura 4.9 La distribución de los efectos de la evapotranspiración es lineal.

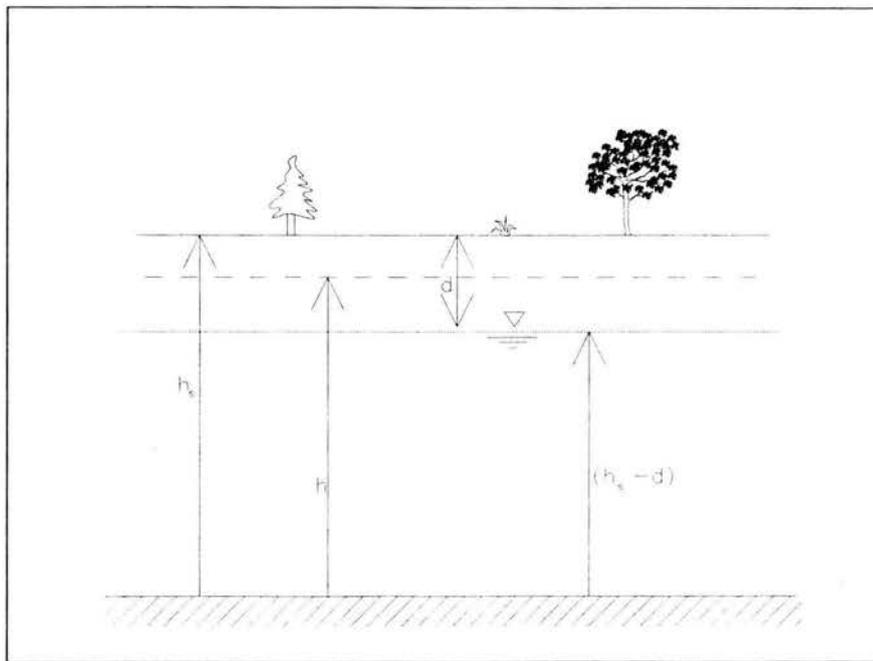


Figura 4.10 Representación de la evapotranspiración en MODFLOW.

$$W = -Q_{ETM} \Delta x \Delta y \quad \text{para } h \geq h_s \quad . \quad 4.5$$

$$W = 0 \quad \text{para } h < (h_s - d) \quad . \quad 4.6$$

$$W = -Q_{ETM} \frac{h - (h_s - d)}{d} \Delta x \Delta y \quad \text{para } (h_s - d) \leq h < h_s \quad . \quad 4.7$$

Donde: Δx , Δy son las dimensiones de la cara de la celda por donde existe el flujo
 W = es el término de la ecuación de diferencias finitas que implica evapotranspiración.
 Q_{ETM} = flujo máximo por evapotranspiración.
 h_s = es la máxima elevación del nivel freático.
 d = profundidad donde es tomado en cuenta la evapotranspiración.

4.1.8 SOLVER PACKAGES (PAQUETES DE SOLUCIÓN)

MODFLOW ofrece cuatro opciones para resolver matrices:

- Slice Successive Overrelaxation (SOR)
 - La solución es más lenta.
 - No da números confiables, ya que existen fracasos en muchos problemas complejos.
 - Relativamente requiere alta memoria.
 - Solo ventaja en modelos de sección de corte.

- Strongly Implicit Procedure (SIP)
 - Baja memoria requerida.
 - Es lento.
 - Da números confiables pero puede generar resultados engañosos debe verificarse siempre el balance de masa.

- PCG2
 - Más rápido que SIP y SOR.
 - Memoria requerida similar al SIP.
 - Falla para muchos problemas complejos.

- Waterloo Hydrogeologic Solver (WHS solver)

En adición al PCG2, SIP y SOR, Waterloo Hydrogeologic implementa una nueva y eficiente solución para resolver matrices en MODFLOW. Para ello usa el método de preconditionación de gradiente conjugado. (PCGStab).

Ventajas de WHS solver:

Extremadamente confiable. Maneja problemas donde PCG2, SOR y SIP fracasan, con una K alta entre celdas vecinas (de 1 a 1,000,000), un nivel de agua freática cruza diferentes capas, pendientes altas de estratos en un acuífero de ancho delgado. Es 10 veces más rápida que PCG2 para problemas donde ambos trabajan.

Desventajas de WHS solver:

Mucho más memoria requerida. Por ejemplo para un problema con 75,000 celdas, PCG2 requiere 4.8 Mb de memoria mientras WHS solver requiere 28 Mb.

El siguiente cuadro contiene todas las opciones que pueden presentarse en Visual Modflow de manera estructurada, tal y como parecen en el programa, del menú principal o sub-menús.

MAIN MENU					
FILE	INPUT	RUN	OUPUT	SET UP	HELP
Open	File Save Save as Select device Print Main Menu	File Save Save As Main Menu	File	Numeric Engines	General Help
New	Grid	Basic Time Initial Heads	Contours	Virtual settings and VMTEMP	About Visual MODFLOW
Import MODFLOW Flowpath	Wells	Solver PCG2 SIP SOR WHS Solver	Velocities	Run VRES. EXE	
Select Device	Properties Conductivity Storage	Recharge	Pathlines		
Print	Boundaries Constant Head River G.H.B. Drain Wall Recharge Evapotranspiration	Layers	Zbud		
System shell	Particles	BCF Rewetting Anisotropy	Annotate		
exit	Calibrate	OC Output Control List File Opts.	Help		
	Annotate	Pathlines Discharge Reference time Release time			
	ZBud	Run Run MODFLOW Run MODPATH Run Zone Budget Run MT3D			
	MT3D	Traslate Traslate MODFLOW Traslate MODPATH Traslate Zone Budget Traslate Run MT3D			
	Help	MT3D			
		Help			

Tabla 4.2

4.2 FUNCIONAMIENTO

Antes de empezar con el funcionamiento del MODFLOW es importante hacer notar que el modelo utiliza ciertas hipótesis, los cuales deben estar en el conocimiento del usuario.

- El fluido (agua) solo se encuentra en fase líquida.
- La densidad del agua es constante.
- La temperatura es constante.
- Los ejes principales de la conductividad hidráulica del acuífero K esta alineada con los ejes coordenados del modelo.
- La conductividad hidráulica (K), el coeficiente de almacenamiento (S) y la distancia (L) son funciones del espacio.
- W es una función del espacio y del tiempo.
- El acuífero en cuestión esta saturado.
- El medio poroso obedece la ley de Darcy.

4.2.1 CONDICIONES INICIALES

Antes de que la ecuación (2.5):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W(x, y, z, t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

pueda ser resuelta para la carga, uno debe definir una condición inicial la cual tiene la forma general de los problemas de tres dimensiones.

$$H = f(X, Y, Z) \quad \text{en } t = 0$$

4.8

Esto describe la variación de la carga en tres dimensiones en todo el acuífero en un tiempo igual a cero. Esta distribución, especialmente en problemas de flujo no horizontal, puede no estar disponible con facilidad. Una distribución de carga de estado establecido proveniente de una simulación previa (tal vez usada para una finalidad de calibración) es una condición inicial usada comúnmente. Algunas veces un promedio de carga constante (H_0) en todo el acuífero es usado. Una condición inicial llega a ser particularmente importante en problemas de acuífero libre donde también se define el

espesor del acuífero y la distribución inicial de la transmisividad. Se puede evitar el problema de la condición inicial completamente trabajando con los abatimientos en lugar de las cargas ($s = 0$ en cualquier lado en $t = 0$). En los problemas de dos dimensiones la expresión de arriba se reduciría a $f(X,Y)$.

4.2.2 CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera se encuentran a menudo entre los aspectos más difíciles de definir en un estudio de modelado. Por esta razón, deben ser especificadas en todos los nudos exteriores del dominio del acuífero. Usualmente es una buena idea intentar expandir una rejilla irregular hasta que las fronteras del modelo coincidan con lo natural, fronteras regionales hidrológicas tales como ríos, división del agua subterránea o barreras impermeables. Si no hay tales fronteras naturales en el área de estudio, uno podría definir cargas constantes o fronteras de flujo basados sobre niveles de agua y en mediciones de conductividad hidráulica hechas en el campo. O ellos pueden ser definidos usando una "refinada malla telescópica" en el cual una basta rejilla es colocada en las fronteras regionales y los resultados de la carga alrededor de una pequeña región dentro de la malla, son usados como condiciones de frontera para un pequeño telescopically. Las condiciones de frontera las cuales no están basadas en fronteras regionales tales como ríos y divisiones de agua subterránea son algunas veces llamadas hidráulicas o fronteras artificiales. Esos datos de campo determinados o condiciones de frontera del modelo determinados , de cualquier modo, estarían lo suficientemente lejos como para no tener una influencia significativa en las simulaciones. Anderson y Woessner (1992) señalaron que las condiciones de frontera hidráulicas pueden ser usadas para producir un estado inestable de flujo para propósitos de calibración. Debido a que las cargas y/o flujos son fijos, de cualquier modo, las condiciones de frontera pueden o no pueden ser aceptadas para problemas transitorios o predicciones del estado inestable. Este sería el caso si cambios de carga ocurrirían naturalmente a lo largo de estas fronteras artificiales si ellas no fueran fijadas. En tales casos las condiciones de frontera inclinarían los resultados finales. Una prueba para determinar si las condiciones de frontera están inclinando el resultado es cambiar las condiciones de frontera de carga constante dentro de las condiciones de flujo especificadas y viceversa. Si el cambio produce efectos insignificantes a través de las fronteras, entonces las condiciones de frontera elegidas son adecuadas.

Ocasionalmente por falta de información de las fronteras, los modeladores eligen un área muy extensa para modelar y especifican condiciones de fronteras de no flujos alrededor (el gradiente de carga con distancia es cero). Para algunos problemas transitorios esto puede funcionar, pero no trabajaría en simulación de estado inestable donde habría al menos una condición de frontera de carga constante para servir como una carga de referencia. Incluso en un problema transitorio, si el flujo de afluencia es menor que el flujo de salida, todas las condiciones de frontera del flujo podrían forzar al acuífero a estar seco si el tiempo de simulación es lo suficientemente largo.

Las tres condiciones de frontera más comúnmente usadas son:

1. Primer tipo o Dirichlet. La carga es descrita en la frontera, por ejemplo:

$$H = f(Y,Z,t) \quad \text{en } X=0$$

La carga puede ser constante o una función del espacio y/o tiempo. Ríos y lagos con mucha conductividad son ejemplos comunes de condiciones constantes de carga. Por ejemplo:

$$H = 100 \text{ metros} \quad \text{en } X = 0$$

En Visual MODFLOW, un conjunto de estas condiciones de carga constante en todas las celdas las cuales rodean la profundidad y ancho de los ríos y lagos. Si el río o lago, de cualquier modo, tienen sedimentos de baja conductividad hidráulica, esta resistencia hidráulica debería ser incluida en el paquete de ríos del MODFLOW o el tercer tipo de condición de frontera como explicamos abajo. Otra aplicación del primer tipo de condición es en la simulación del estado inestable donde no hay una condición inicial para servir como una referencia de carga. En estos casos al menos un nudo de frontera debe tener un primer tipo, condición de frontera carga constante.

2. Segundo tipo o Neumann. El flujo del agua subterránea es especificada sobre la frontera, por ejemplo:

$$-K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} = f(Y,Z,t) \quad \text{en } x=0$$

4.9

El flujo, $f(Y, Z, t)$ es definido como un flujo volumétrico por unidad de área (L^3 / TL^2). El flujo puede ser positivo tanto como el flujo que va hacia adentro desde depósitos superficiales de terrenos montañosos de los alrededores al valle de acuíferos consolidados. MODFLOW suministra para condiciones de frontera del primer y tercer tipo, pero no directamente para una condición de frontera de flujo. Específicamente las condiciones de frontera de flujo [flux = $F = L^3 / L^2T$] son simuladas usando la inyección o extracción en pozos [$Q = L^3 / T^3$] en rejillas donde el área perpendicular [L^2] del flujo es fácilmente definido. Por ejemplo, en un acuífero de dos dimensiones con ancho b , el área perpendicular al flujo en la dirección X estaría definido por $\Delta Y b$ y la velocidad de inyección volumétrica del pozo usado para simular la condición de flujo específico [L^3 / L^2T] sería calculada como $Q = F \Delta Y b$.

Un caso especial del segundo tipo de condición de frontera es la condición de no flujo el cual ocurre en donde se divide el agua subterránea y fronteras impermeables tales como rocas consolidadas no fracturadas. Una frontera de no flujo también representa una

línea de flujo, el cual puede ser muy conveniente de establecer. Mientras conviene, uno debe ser cuidadoso de no incluir los resultados finales con las condiciones de frontera. Una forma de determinar si esta inclinación ha ocurrido es redefinir la condición de frontera de no flujo como una condición de carga constante para determinar si el flujo ocurre desde esos nodos. Si esto es una línea de flujo verdadera, los flujos no deberían ocurrir.

3. Tercer tipo, mixto o Cauchy. Esta condición es matemáticamente una combinación de los tipos Dirichlet y Neumann, por ejemplo.

$$-K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{K'}{b'} (H_0 - H) \quad 4-10$$

Donde K' / b' es llamada infiltración, [1/T] hantush (1964). H_0 es frecuentemente considerado como una constante, pero puede ser considerado una función de variables espaciales y de tiempo. La ecuación (1-13) puede también ser escrita de la siguiente forma:

$$-K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{K'}{b'} H = \frac{K'}{b'} (H_0) \quad \text{en } z = 0$$

Mientras no es tan común como el primer y segundo tipo de condiciones de frontera, el tercer tipo es usado para modelos de infiltración a través de capas, tales como aquellas encontradas en acuíferos semiconfinados o debajo de ríos, lagos y lagunas de desecho de la industria. En adicción, el tercer tipo de condición de frontera es la forma matemática de la condición de frontera de carga general (GHB) la cual es muy popular en la simulación del MODFLOW. Esta condición de frontera es algunas veces usada para describir el flujo horizontal que cruza la frontera lateral de un acuífero causada por una diferencia de carga entre el acuífero y una carga constante de frontera distante tal como un río. Esto ahorra la creación de una extensa malla que incluye una carga regional constante. Esto también no fuerza la carga sobre una frontera del acuífero para ser fijada, pero en lugar de eso permite el cambio de problemas envolventes. El b' en este caso es una medida horizontal entre el río, por ejemplo, y la frontera del acuífero. La K' es el promedio de conductividad hidráulica entre el origen de la carga constante y la frontera del acuífero.

La figura 4.11 muestra un problema típico de campo, vista en planta y en una sección de corte con ejemplos identificados de todos los tres tipos de condiciones de frontera. (Cleary, 1989). A lo largo BC, CD, y AD son del segundo tipo, condiciones de no flujo para ambos acuíferos; GH es una condición de frontera de no flujo para un acuífero confinado; AB es una carga constante, primer tipo de condición de frontera para el nivel de agua freática del acuífero; y EF es un ejemplo de un tercer tipo de frontera

describiendo infiltraciones desde el nivel de aguas freáticas a la parte más baja del acuífero confinado. El pozo de bombeo es un descenso matemático para el acuífero confinado y es modelado usando las funciones delta Dirac, como se muestra en la ecuación (2-5) para el caso de tres dimensiones.

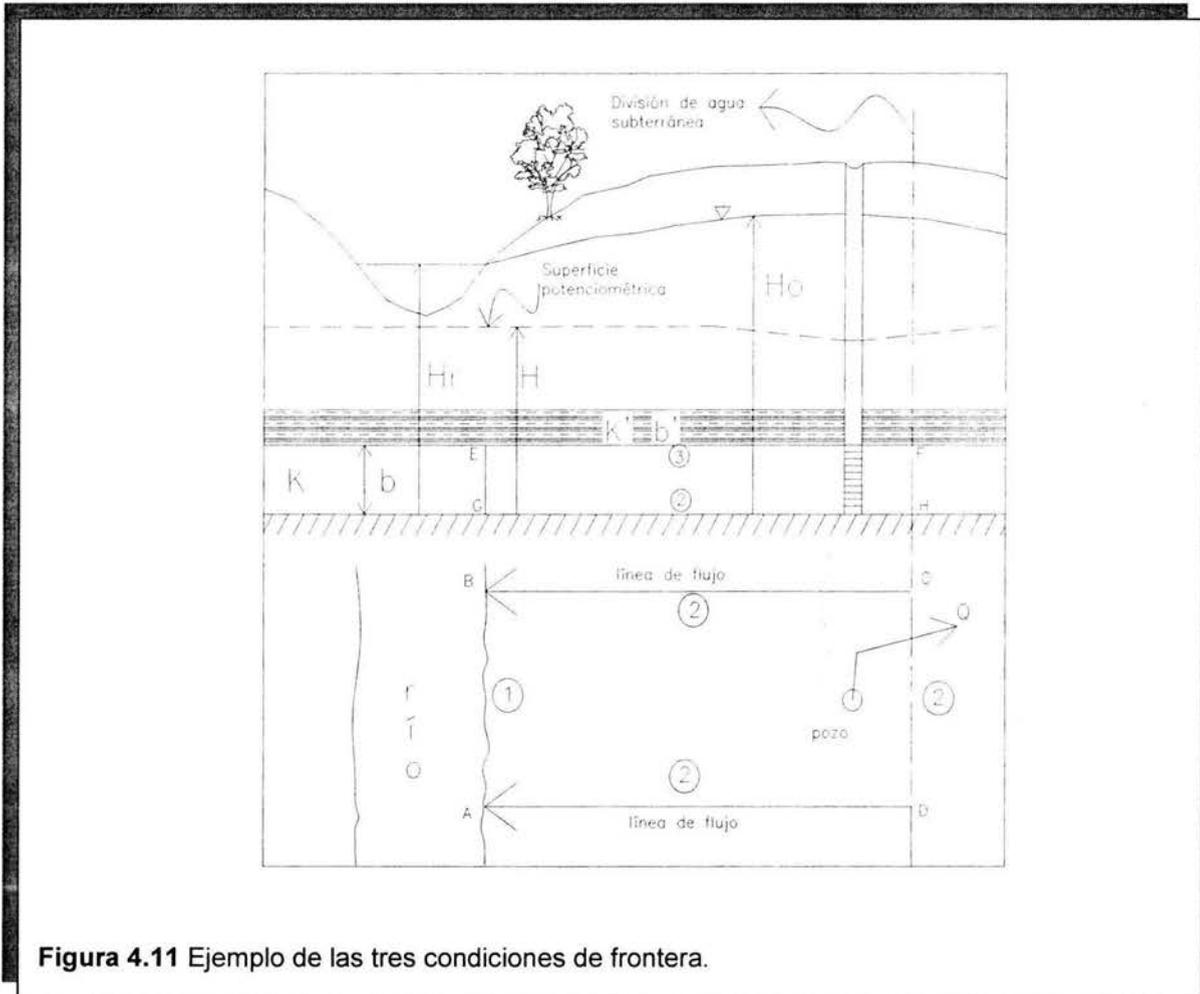


Figura 4.11 Ejemplo de las tres condiciones de frontera.

4.2.3 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Las aproximaciones de las diferencias finitas conducen a convertir la ecuación diferencial compleja en tres dimensiones para el flujo de agua subterránea en ecuaciones algebraicas simples para cada nodo. El conjunto de ecuaciones algebraicas puede ser resuelto por uno de los dos métodos básicos directos o iterativos. Ambos realizan una propuesta inicial de solución, después desarrollan esta propuesta por algún proceso de iteración hasta que un criterio de error es satisfecho.

El MODFLOW cuenta con los solucionadores vistos en el apartado 4.18 para encontrar los resultados a las ecuaciones algebraicas.

4.2.4 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN

Una vez que se dispone de los datos, se ha dibujado la malla y se ha elegido el método de cálculo, teóricamente se podría pasar a utilizar el modelo. Sin embargo es preciso comprobar la validez de estos datos. Para ello hay que realizar la fase llamada ajuste, verificación, validación o calibración del modelo. Este estudio consiste en simular un periodo histórico y comprobar si los niveles obtenidos con el modelo para ese conjunto de datos se ajusta de forma aceptable a los niveles observados, En general no ocurrirá así, por lo cual será preciso modificar los datos de partida hasta conseguir que las diferencias entre niveles históricos y calculados sean adecuadas para la precisión requerida por el problema tratado.

No estén normas fijas para la realización de estas modificaciones, aunque ha habido intentos de preparación de programas de ajuste automático. Sin embargo, se puede hacer una serie de recomendaciones y consideraciones que conviene tener en cuenta.

- Es fundamental que en el ajuste intervenga un hidrogeólogo que conozca el acuífero estudiado.

- Los resultados del modelo no pueden ser mejores que los datos de partida. Esto implica que si los datos son malos, aunque el ajuste sea bueno, los resultados no serán de garantía, ya que hay infinitas combinaciones de los datos geométricos, hidrogeológicos e históricos que producen los mismos niveles. Evidentemente, si el periodo histórico que se ha conseguido reproducir es suficientemente largo, la posibilidad de que la combinación de datos ajustada sea incorrecta se reduce considerablemente.

- Para evitar este problema, deben variarse aquellos datos que produzcan el ajuste deseado, siempre que halla una variación física para ello. Esto implica la necesidad de conocer el verdadero valor de cada dato y su posible margen de error. Por ejemplo, si se han obtenido niveles demasiado altos y se supone que las transmisividades, recargas y bombeos son correctos habrá que disminuir el coeficiente de almacenamiento. La magnitud de esta disminución puede estimarse en función del exceso de nivel y el balance en un intervalo, pero debe tenerse en cuenta que el valor obtenido sólo será aplicable si existen razones que justifiquen el cambio

- En relación con este problema de modificación de datos hay distintas opiniones. Hay quien cambia únicamente si la justificación física esta totalmente comprobada y quien desecha los datos originales si intuitivamente parece que el nuevo valor podría ser aceptable. No conviene olvidar que los datos originales suelen ser puntuales, mientras que el modelo maneja varios medios en cada elemento que puede ser bastante distintos de aquellos.

- La calibración tiene tres fases bien diferenciadas. En la primera debe comprobarse la coherencia de los datos originales. Conjunto de datos que parecen correctos, pueden ser incongruentes entre sí, hecho que es detectado rápidamente por el modelo. Esta es una ventaja esencial del uso del modelo. En la segunda fase deben ajustarse las tendencias de los niveles en el espacio y en el tiempo. Esto equivale a comprobar que el modelo conceptual del funcionamiento hidráulico del acuífero es correcto. En algunos casos bastará con esto, pero en general, hay que realizar una tercera fase en que se intenta conseguir que las diferencias entre los niveles observados y los calculados sean mínimos.

Hasta ahora se ha hablado de ajuste de niveles, por ser éstos las incógnitas de la ecuación, pero en ciertos casos será más interesante ajustar caudales. Esta operación es

equivalente a la anterior, pues conocidos los niveles y transmisividades, se calculan inmediatamente los caudales.

- Una vez realizado el ajuste con la precisión requerida, se puede hablar del modelo del acuífero tratado. Se llama modelo del acuífero al conjunto formado por los datos geométricos e hidrológicos ajustados y el sistema de programas que realizan los cálculos. Los datos de bombeo y recarga no son parte integrante del modelo, y que son acciones exteriores no influidas por el estado del acuífero, y cuyo valor cambia en cada hipótesis de explotación. Como consecuencia, los datos geométricos e hidrogeológicos son invariables. Si se dispone de nuevos valores procedentes en ensayos de bombeo o de nuevos estudios y se quieren incluir en el modelo, hay que realizar un nuevo ajuste.

- Si las condiciones de explotación que se van a estudiar difieren mucho del periodo histórico, en algunos casos los resultados no serán muy variables, ya que el ajuste se ha realizado para estados del acuífero distintos de los resultados de la simulación. Por ello, conviene elegir un periodo histórico suficientemente largo y que presente estados extremos del acuífero. De aquí la dificultad de modelar acuíferos sin explotar.

- Por estas consideraciones se comprende que no cabe hablar de longitud recomendada del periodo histórico. Puede indicarse como conveniente una serie de tres a cinco años. Por otra parte hay que tener en cuenta que los primeros intervalos no son muy precisos y conviene tener siempre un periodo de prueba del modelo, lo cual dificulta el uso de periodos de longitud menor de un año. Esto se debe a la necesidad de compensar los errores por falta de equilibrio en el estado inicial de niveles. Si éste fuera congruente con los datos geométricos e hidrogeológicos supuestos no habría razón para la existencia de un periodo de prueba.

4.2.5 RESULTADOS

Es natural para la gente que aplica los modelos de agua subterránea, así como aquellos quienes toman decisiones basadas en los resultados del modelo, quieran asegurarse de que son válidos. Los modelos de agua subterránea son representaciones de varias teorías científicas e hipótesis. Karl Popper (1959) sostiene que “como científicos no podemos validar nunca una hipótesis, solamente la podemos invalidar”. La misma filosofía ha sido aplicada específicamente a los modelos de agua subterránea. Los resultados arrojados por el MODFLOW deben estar fundamentados preferentemente por datos históricos (calibración) y por datos actuales confiables apegados a la realidad. Quizá dos o más simulaciones del mismo problema puedan ser más útiles puesto que se puede tomar un promedio. Ya que el MODFLOW esta basado en las diferencias finitas (matemáticas exactas), lo más probable es que si existe un error éste pueda deberse a la intervención del operador, es por ello que el usuario debe tener suficiente conocimiento de los aspectos de campo y de modelación.

CAPÍTULO 5



*Ejemplos prácticos:
Resolución de Problemas*

CONTENIDO DEL QUINTO CAPÍTULO

5 EJEMPLOS PRÁCTICOS: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

5.0 Introducción

5.1 Afectación de tres pozos por una fuente de contaminación

- 5.1.1 Objetivos del problema
- 5.1.2 Breve descripción
- 5.1.3 Entrada de datos
- 5.1.4 Condiciones de explotación
- 5.1.5 Ejecución del programa
- 5.1.6 Resultados

5.2 Emisión de contaminantes en la zona de captación de un acuífero

- 5.2.1 Objetivos del problema
- 5.2.2 Breve descripción
- 5.2.3 Entrada de datos
- 5.2.4 Condiciones de explotación
- 5.2.5 Ejecución del programa
- 5.2.6 Resultados

5.3 Efectos de una fosa abandonada en dos pozos de suministro

- 5.3.1 Objetivos del problema
- 5.3.2 Breve descripción
- 5.3.3 Entrada de datos
- 5.3.4 Condiciones de explotación
- 5.3.5 Ejecución del programa
- 5.3.6 Resultados

5 EJEMPLOS PRÁCTICOS: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

5.0 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se resolverán tres ejercicios usando Visual MODFLOW, los cuales tienen como finalidad dar al lector una introducción a las operaciones que pueden ser ejecutadas. En cada uno de ellos se da una breve descripción del problema, las características geológicas e hidráulicas, los objetivos planteados, el proceso de simulación y los resultados arrojados. El usuario sin embargo puede modificar los datos aquí dados, lo cual se recomienda una vez que se hayan simulado los tres problemas con éxito, para que tenga una mayor comprensión del manejo del programa. De hecho uno de los propósitos de este trabajo es que el usuario por si solo intente simular problemas cada vez más complejos, ya sea que lo haga a nivel académico o laboral.

Cada problema cuenta con figuras ilustrativas que ayudan al usuario a tener una mayor comprensión de las acciones ejecutadas dentro del programa. Sin embargo el primer problema contiene la mayor parte de estas figuras debido a que muchas se presentan en los otros dos de manera repetitiva, es decir, se consideró que no era necesario colocar, por ejemplo, el mismo cuadro de entrada de datos tres veces, uno para cada problema.

Con el objeto de agilizar la manipulación de la simulación para los tres ejemplos se propone el uso de las siguientes convenciones y anotaciones :

El símbolo ↵ significa presionar la tecla entrar.

Visual MODFLOW usa el mouse extensivamente para ingresar información y para seleccionar y modificar los resultados de salida.

⇐ significa clic en el botón izquierdo del mouse.

⇒ significa clic en el botón derecho del mouse.

⇐⇐ significa doble clic consecutivo en el botón izquierdo del mouse.

5.1 AFECTACIÓN DE TRES POZOS POR UNA FUENTE DE CONTAMINACIÓN

5.1.1 OBJETIVO DEL PROBLEMA

El objetivo de este problema es dar un ejemplo de introducción para demostrar las funciones básicas de Visual MODFLOW.

5.1.2 BREVE DESCRIPCIÓN

Este ejemplo consiste en un acuífero superior (libre), un acuitardo intermedio (estrato confinante) y un acuífero inferior (semiconfinado). El acuífero libre se supone que tiene una conductividad horizontal de 5 pies/día y 0.5 pies/día como conductividad vertical. El acuitardo tiene un espesor de 10 pies y tiene una conductividad hidráulica de 0.2 pies/día horizontalmente y una conductividad vertical de 0.02 pies/día. El acuífero inferior es más permeable, con un promedio horizontal de conductividad hidráulica de 300 pies/día y 30 pies/día verticalmente, el diagrama conceptual de este ejemplo se muestra en la figura 5.1.

En este ejemplo localizaremos tres pozos en la parte sur de los límites de una empresa de sustancias químicas. Verificaremos si estos pozos capturarán un contaminante que proviene de la planta y observaremos la relación entre los acuíferos libre y semiconfinado en la cercanía de los pozos. El flujo será primeramente de norte a sur en el acuífero semiconfinado y en el acuitardo. En el acuífero libre existirá un flujo radial. El flujo converge y fluye hacia abajo, hacia el sur de la frontera.

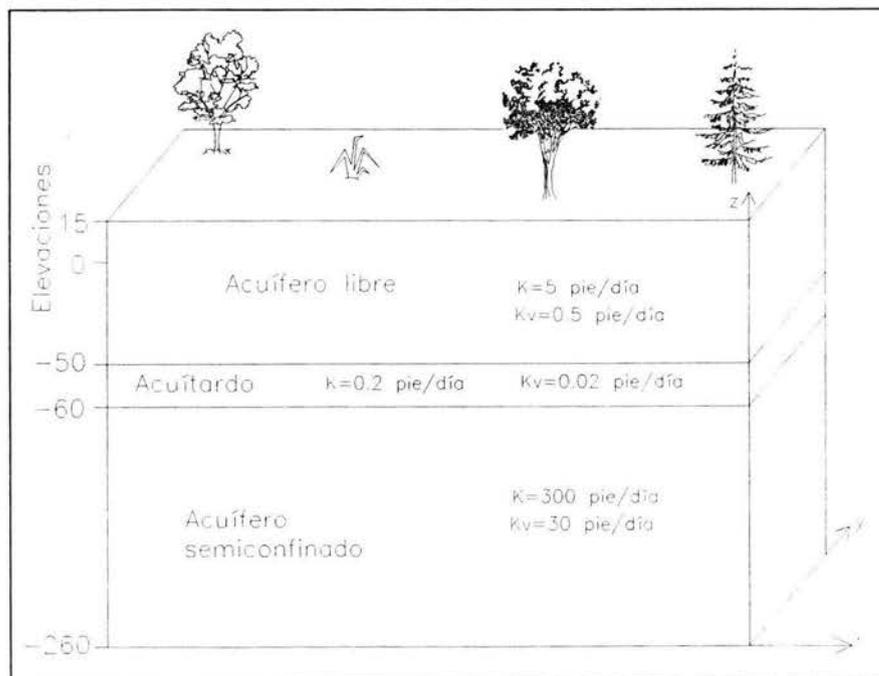


Figura 5.1 Valores de conductividad hidráulica para el problema 5.1.

5.1.3 ENTRADA DE DATOS

1 Inicio de MODFLOW .- Para ejecutar MODFLOW se hace doble clic en el icono de MODFLOW que aparece en el escritorio de windows cuando se ha instalado previamente el programa y se le da acceso directo al mismo, en caso de que no sea así buscaremos mediante el explorador de window la carpeta VMODFLOW, la cual contiene el archivo ejecutable VMODFLOW, daremos doble clic sobre este archivo para entrar en el ambiente de Visual MODFLOW.

2 Generación de un nuevo conjunto de datos.- En la figura 5.2 se muestra la primer ventana que aparece cuando se da doble clic al icono MODFLOW.

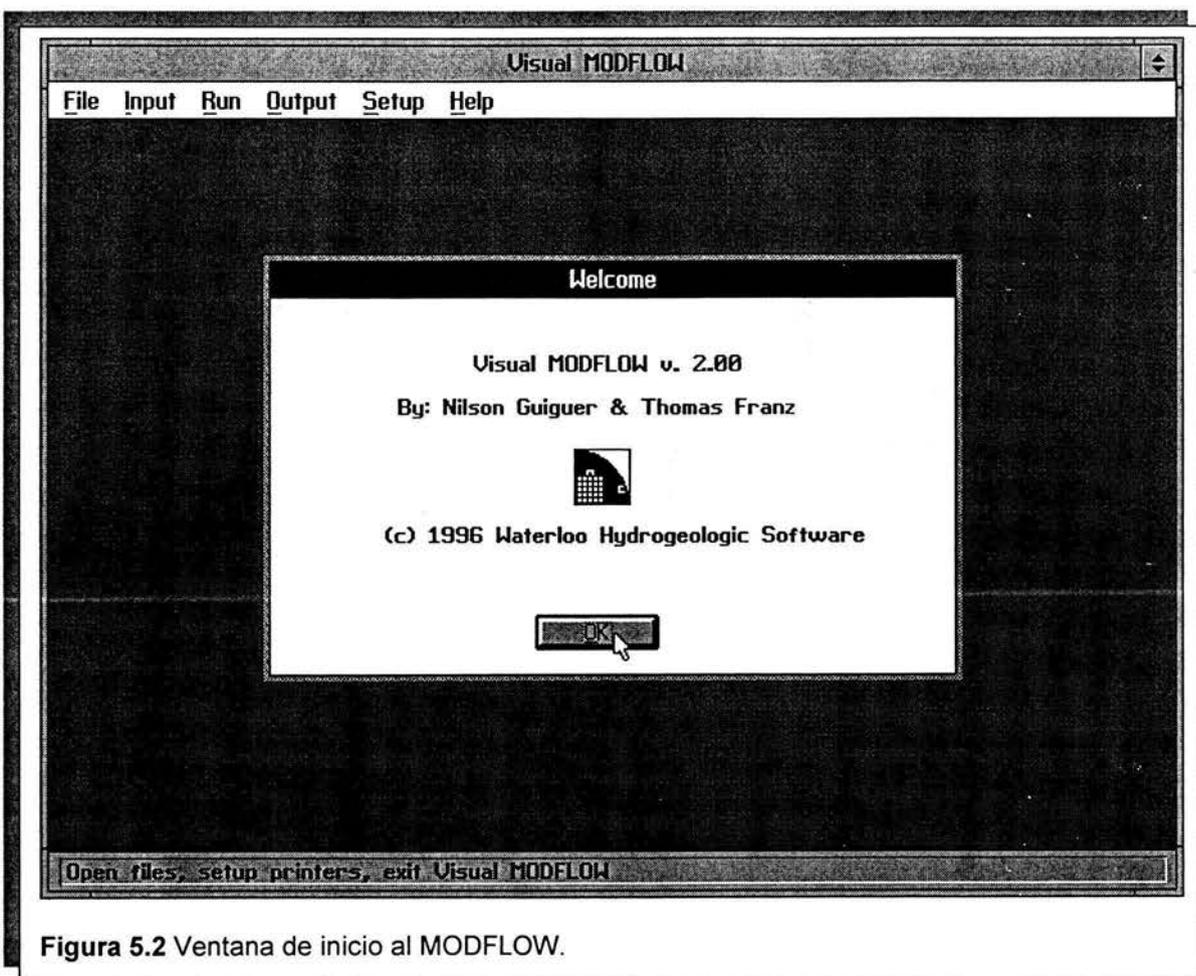


Figura 5.2 Ventana de inicio al MODFLOW.

- ← en archivo (**File**).
- ← en nuevo (**New**).

En el cuadro destinado para el nombre de archivo (**Filename**) teclearemos

Problema 5-1 ↵

Este nombre es con el que será guardado el nuevo archivo. En la figura 5.3 se muestra este proceso, se puede ver que en el cuadro directorios (*Directories*) el nuevo archivo lo podemos almacenar en una carpeta que se haya creado con anticipación o en una carpeta ya existente, en nuestro caso mediante el explorador windows ya habíamos creado una nueva carpeta con el nombre "tesis", la cual contendrá los problemas 5.1, 5.2 y 5.3. Así también podremos elegir mediante el cuadro unidades (*Drives*) la unidad de la computadora en la que deseemos almacenar nuestros datos.

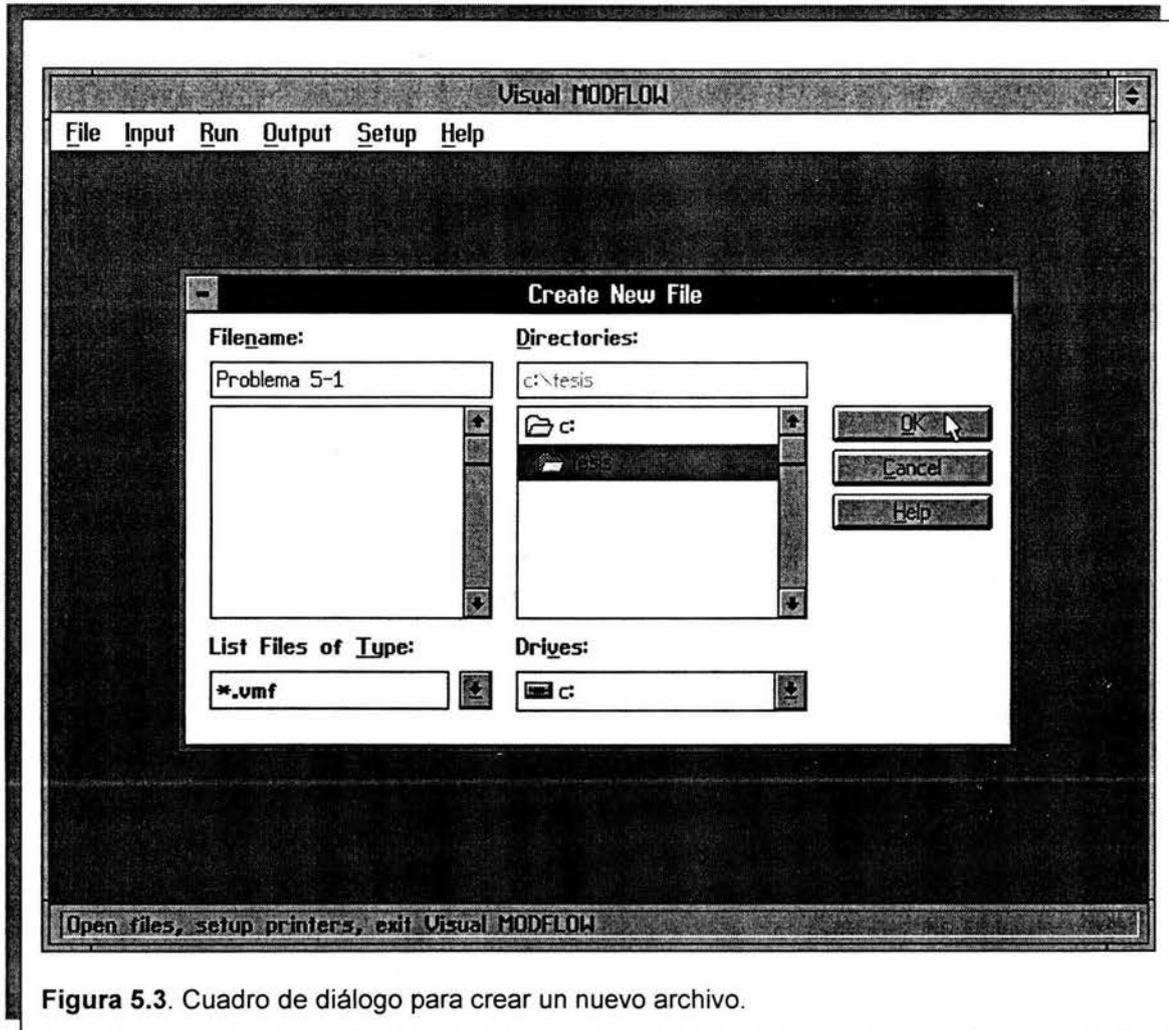


Figura 5.3. Cuadro de diálogo para crear un nuevo archivo.

En seguida aparecerá la ventana de selección de unidades de medida, en la cual se especifican las unidades con las que el modelo trabajará. Seleccionaremos las unidades mostradas en la figura 5.4.

Para realizar la selección solo se tiene que hacer clic en el círculo que marque la elección que se desea. Para longitud elegiremos pies "*feet*", para la conductividad hidráulica elegiremos pies/día "*ft/day*", para tiempo seleccionaremos días "*days*", para el gasto de bombeo seleccionaremos galones por minuto "*US gpm*" y para la recarga seleccionaremos pulgadas por año "*inches/year*". Una vez que se hallan realizado todas las selecciones anteriores procederemos a hacer clic en *Ok*.

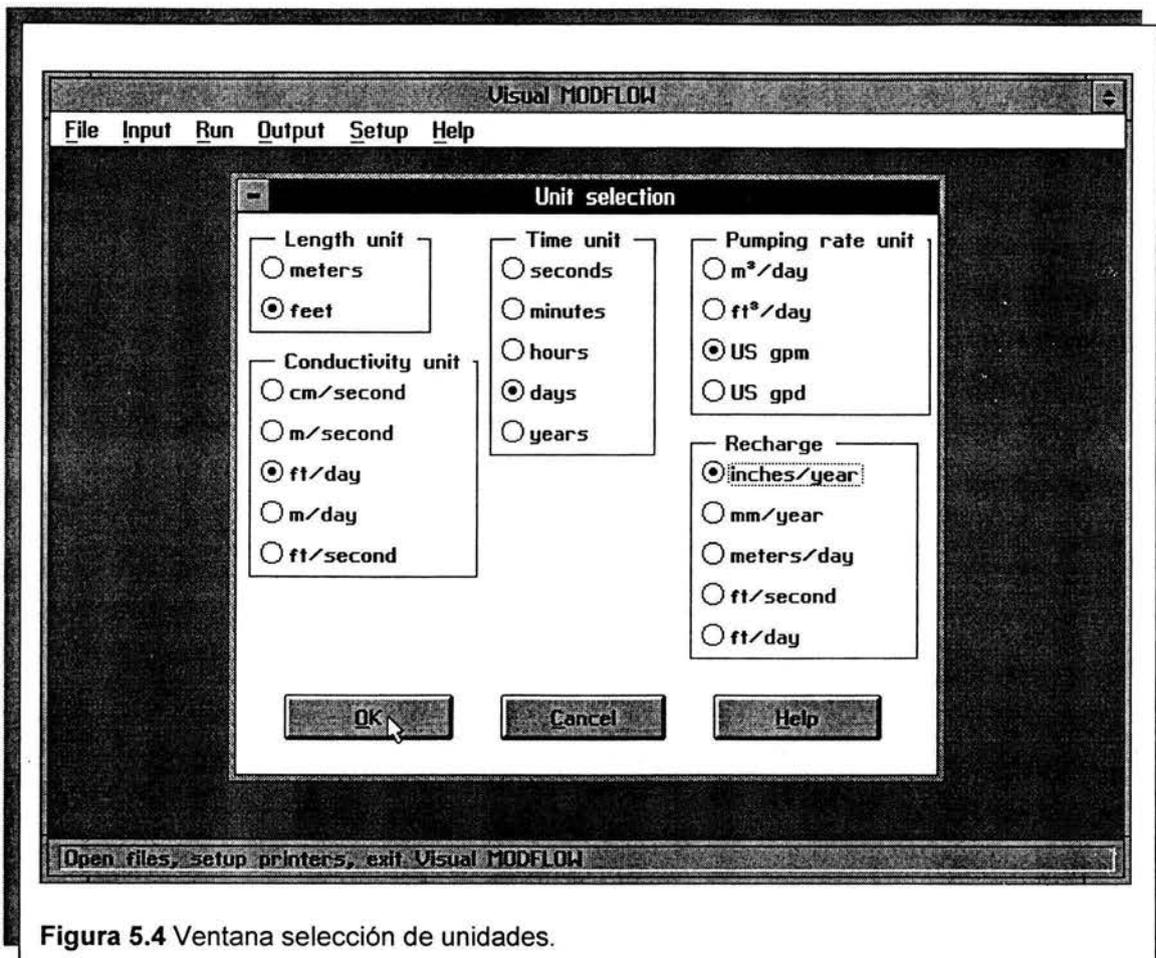


Figura 5.4 Ventana selección de unidades.

3 Creación de la malla.- Una ventana de diálogo preguntará si queremos usar las coordenadas de un sitio ya determinado previamente como una base para definir las coordenadas del nuevo modelo.

“Retrieve site coordinates from a DXF Map?”

Los archivos con extensión .dxf son especiales para dibujo, de hecho estos archivos pueden ser creados, o modificados mediante el programa AUTOCAD, solo que al guardarlos en ese programa se debe tener la certeza de que sean grabados como archivos (.dxf), si se quieren abrir posteriormente en MODFLOW.

Para este caso tenemos un archivo dxf que servirá en la simulación actual por lo que procederemos con:

⇐ en si (**Yes**).

El cuadro **Extents from DXF** aparecerá en pantalla, con él podremos buscar dentro de la unidad C el archivo problema 5.1.dxf, el cual fue creado con anticipación en el programa AUTOCAD y guardado como archivo dxf. Una vez encontrado el archivo:

⇐ en probl1.dxf

⇐ en **Ok**.

Una ventana aparecerá para ayudarnos a definir las dimensiones de la malla. Usaremos la siguiente información para definirla. Se notará que solo crearemos un estrato en el modelo por ahora ya que posteriormente procederemos a subdividirlo en tres estratos, como lo marca el problema 5.1. Podemos guiarnos en la figura 5.5 para introducir esta información:

Número de columnas	30.↵
X mínima (pies)	0.↵
X máxima (pies)	13000.↵
Número de filas	30.↵
Y mínima (pies)	0.↵
Y máxima (pies)	14000.↵
Número de columnas	1.↵
Elevación Z mínima (pies)	-260.↵
Elevación Z máxima (pies)	15.↵

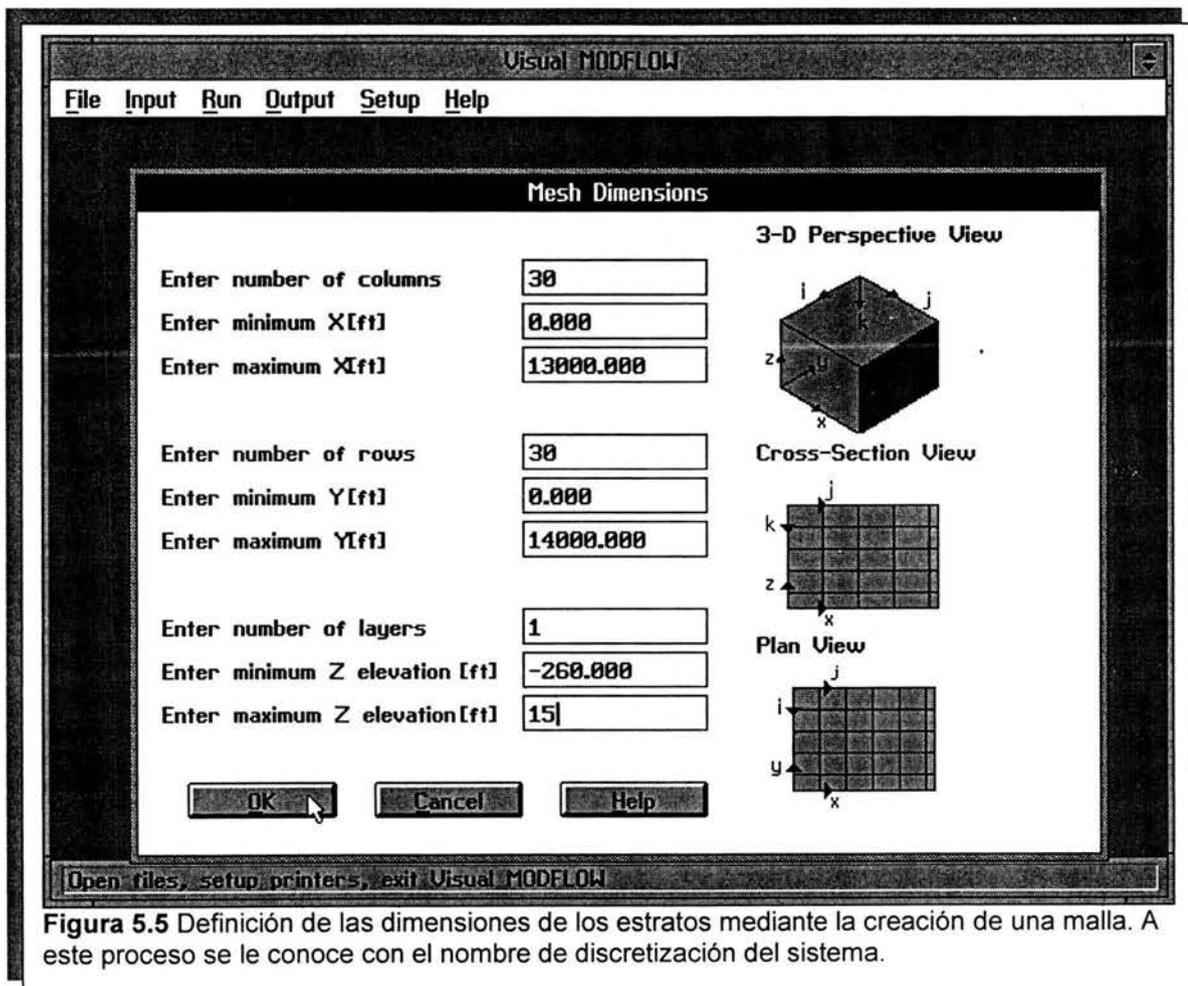


Figura 5.5 Definición de las dimensiones de los estratos mediante la creación de una malla. A este proceso se le conoce con el nombre de discretización del sistema.

⇐ en *Ok*.

La malla que se acaba de definir (30 columnas, 30 filas y 1 estrato) es dibujada en la pantalla con una vista en planta, fig 5.6.

⇐ en datos de entrada (*Input*).

Ahora estamos en el modo de entrada de datos (*Input*) donde especificaremos todos los datos de entrada requeridos para simular en MODFLOW. Dentro del menú malla (*Grid*), uno puede ver y editar la malla por estrato, fila o columna. Añadiremos dos estratos más a la malla para representar el acuitardo y el acuífero libre, (mostrado en la figura 5.1). En el menú mostrado en gris en la parte izquierda de la pantalla:

⇐ en vista en columna (*View Column*).

Queremos “saltar” de una representación del acuífero en planta a una representación en vista de corte. Para hacer esto, moveremos la flecha del mouse dentro del área del modelo, es decir dentro de la malla.

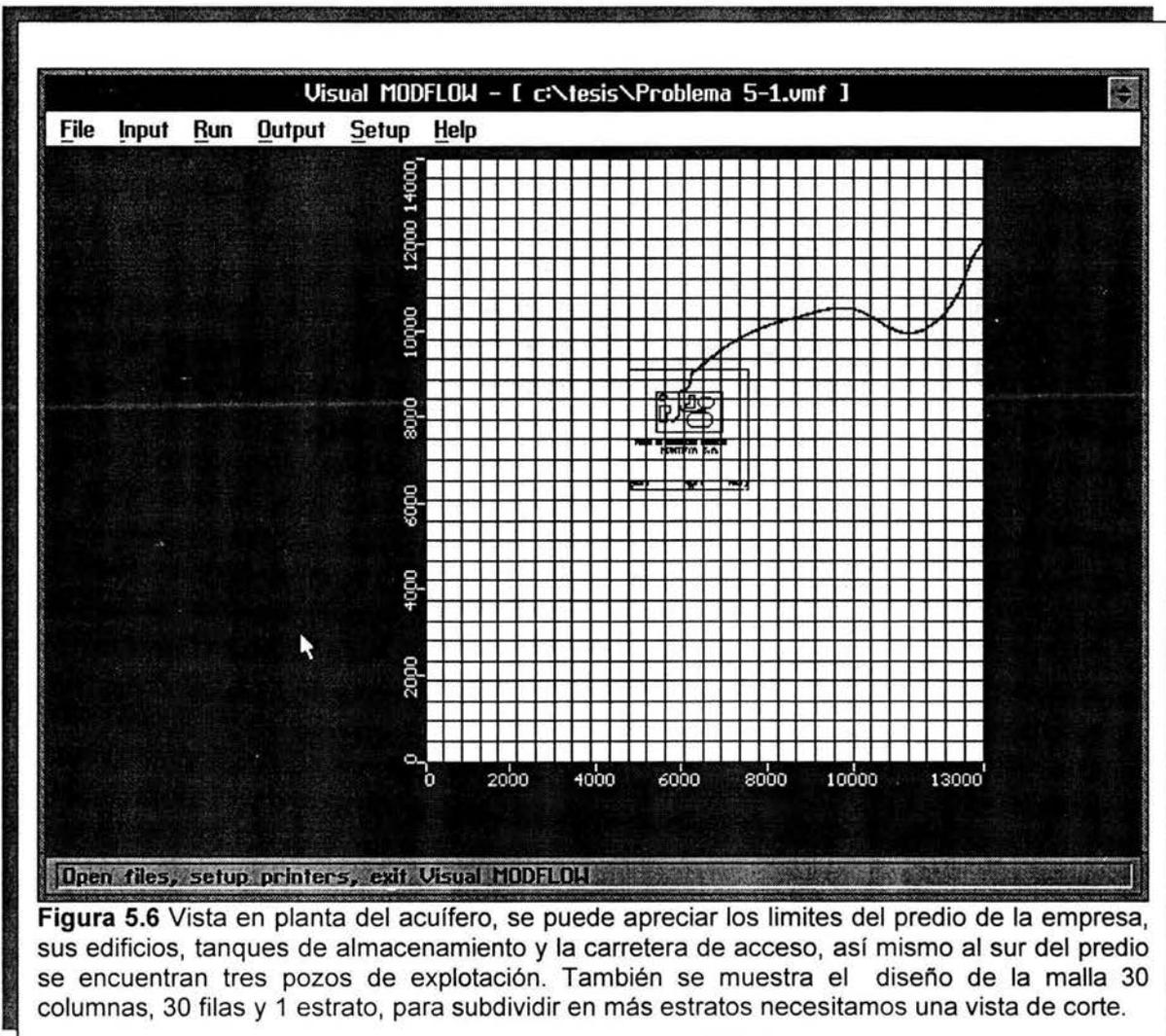


Figura 5.6 Vista en planta del acuífero, se puede apreciar los límites del predio de la empresa, sus edificios, tanques de almacenamiento y la carretera de acceso, así mismo al sur del predio se encuentran tres pozos de explotación. También se muestra el diseño de la malla 30 columnas, 30 filas y 1 estrato, para subdividir en más estratos necesitamos una vista de corte.

Mientras se esta en la malla se podrá ver una barra roja moviéndose a lo largo del área de dominio en columna junto con el puntero, el cual cambia de forma. Esta barra roja indica en qué sección será dibujado el perfil o corte, figura 5.7.

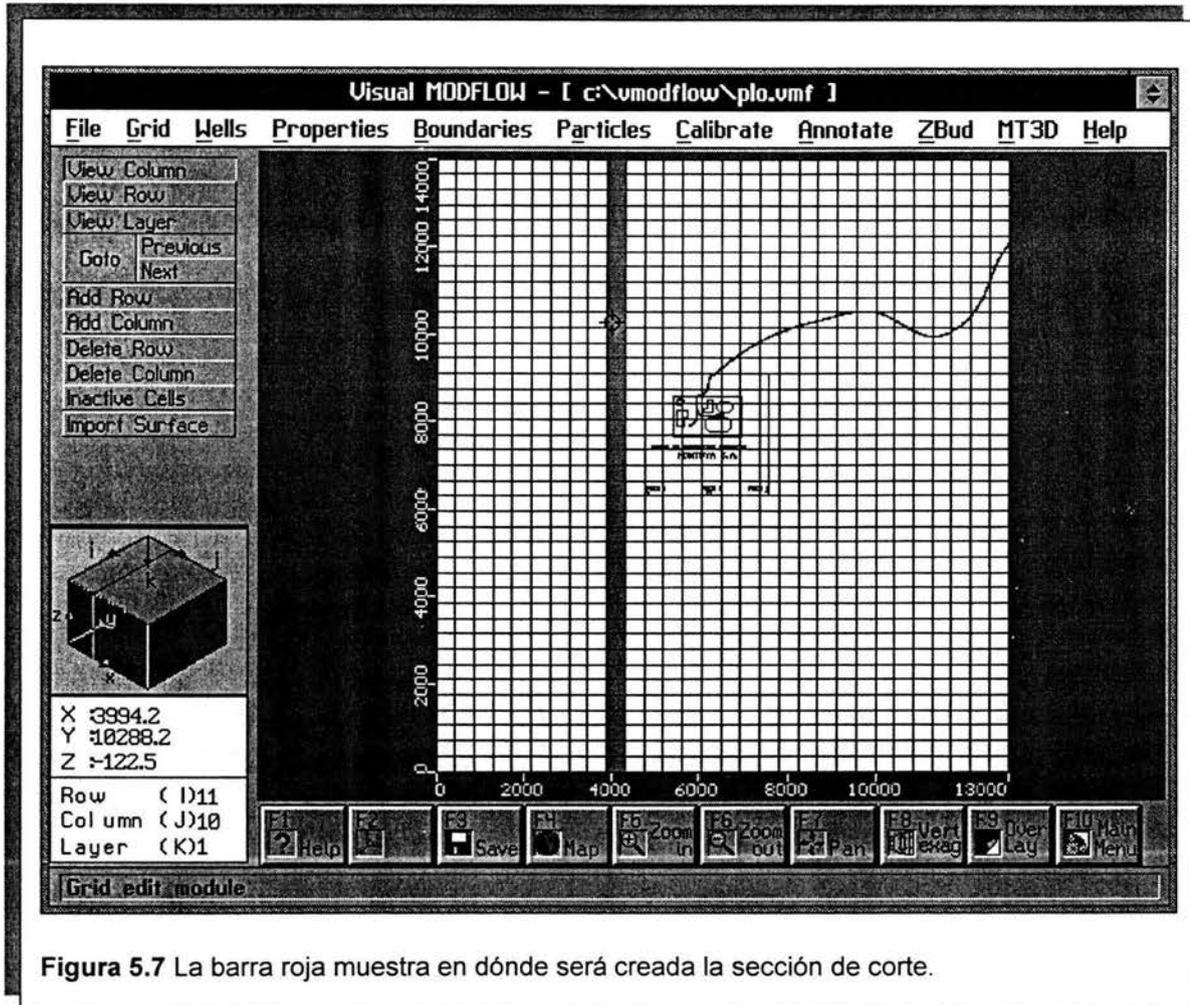


Figura 5.7 La barra roja muestra en dónde será creada la sección de corte.

Una vez que aparece la columna roja, haremos clic en cualquier columna.

En este punto podemos ver el perfil del dominio del modelo con las dimensiones normales de Y y Z. Presionaremos la tecla F8 o clic sobre el botón exageración vertical (**Vert exag**) que se encuentra en la parte inferior de la pantalla, figura 5.7, para introducir un valor de exageración vertical. Esta función nos permite visualizar con mayor claridad el problema, sin afectar los resultados. El valor de uno significa una escala verdadera (real) para el perfil.

Teclearemos 20.↓

← en **Ok** o ↓

← en añadir estrato (**Add Layer**) dentro del menú gris ubicado en la parte izquierda de la pantalla.

Ahora moveremos el puntero dentro del área de dibujo. Podemos añadir un estrato en cualquier punto del dominio del modelo en esta vista. Para añadir un estrato en una localización precisa:

⇐ en el botón derecho del mouse.

Ya que nosotros queremos localizar un estrato exactamente en -50, y otra en -60, colocaremos estos números junto al cuadro añadir una línea en la malla ("**Add horizontal layer at**"), figura 5.8. Empezaremos escribiendo -60, ⇐ en **Ok**. Repetiremos el mismo procedimiento para -50.

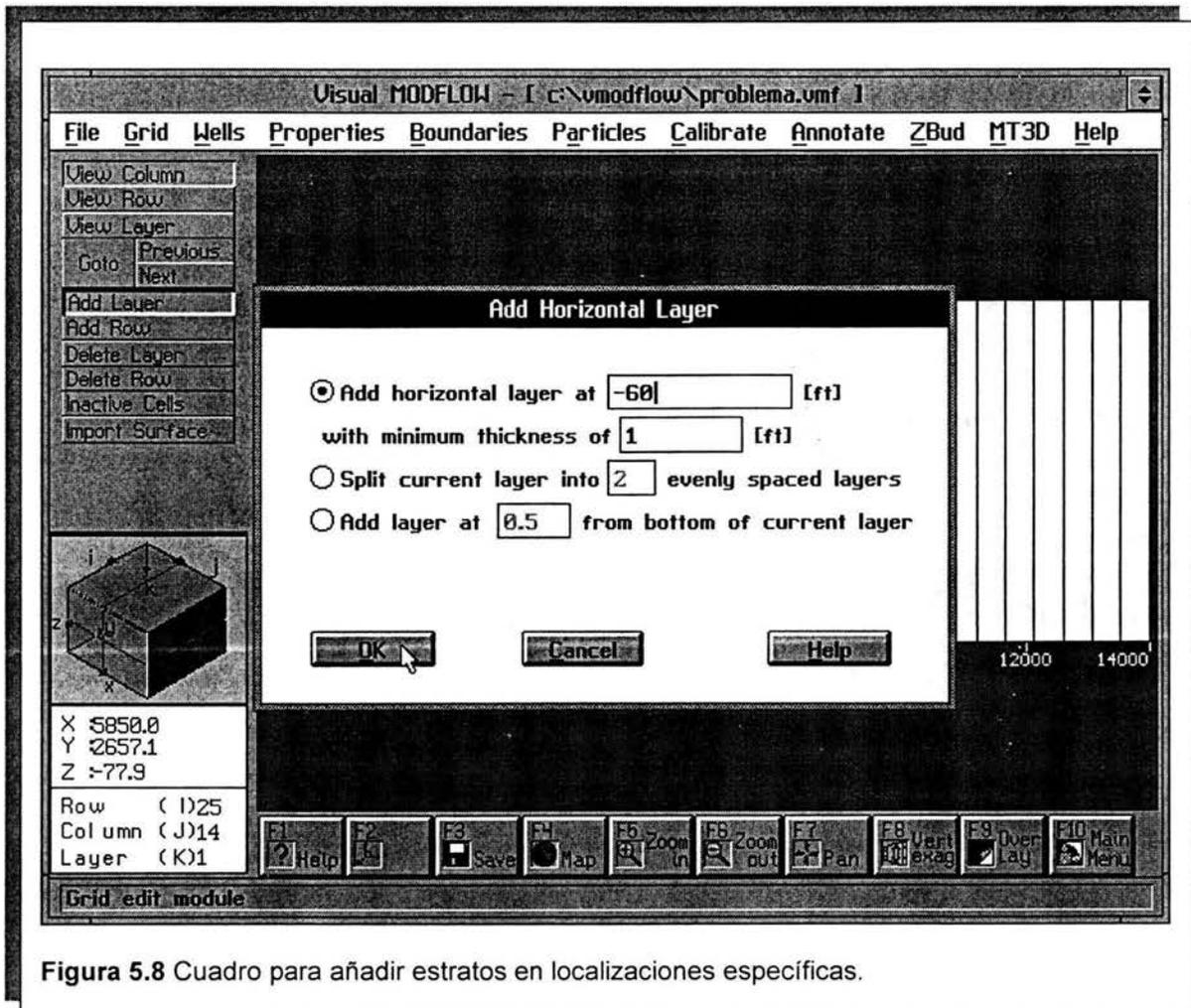


Figura 5.8 Cuadro para añadir estratos en localizaciones específicas.

Ahora vamos a refinar la malla, a lo largo de la frontera sur del área correspondiente a la empresa de sustancias químicas, alrededor de los pozos. Para este propósito, debemos ver el modelo en vista de planta.

⇐ en vista en estrato (**View Layer**).

Moveremos el cursor dentro del área del modelo, resaltando con una barra roja, el estrato superior y clic.

← en añadir fila (*Add Row*).

Moveremos el cursor dentro del área de dibujo. ← en el lugar que se desea localizar las nuevas filas. Refinaremos la malla de manera que se parezca a la figura 5.9. Aquí no necesitamos una localización precisa, ya que esto se hace para tener una mejor visualización de los resultados al final de la simulación en el área próxima que contiene a los pozos de explotación.

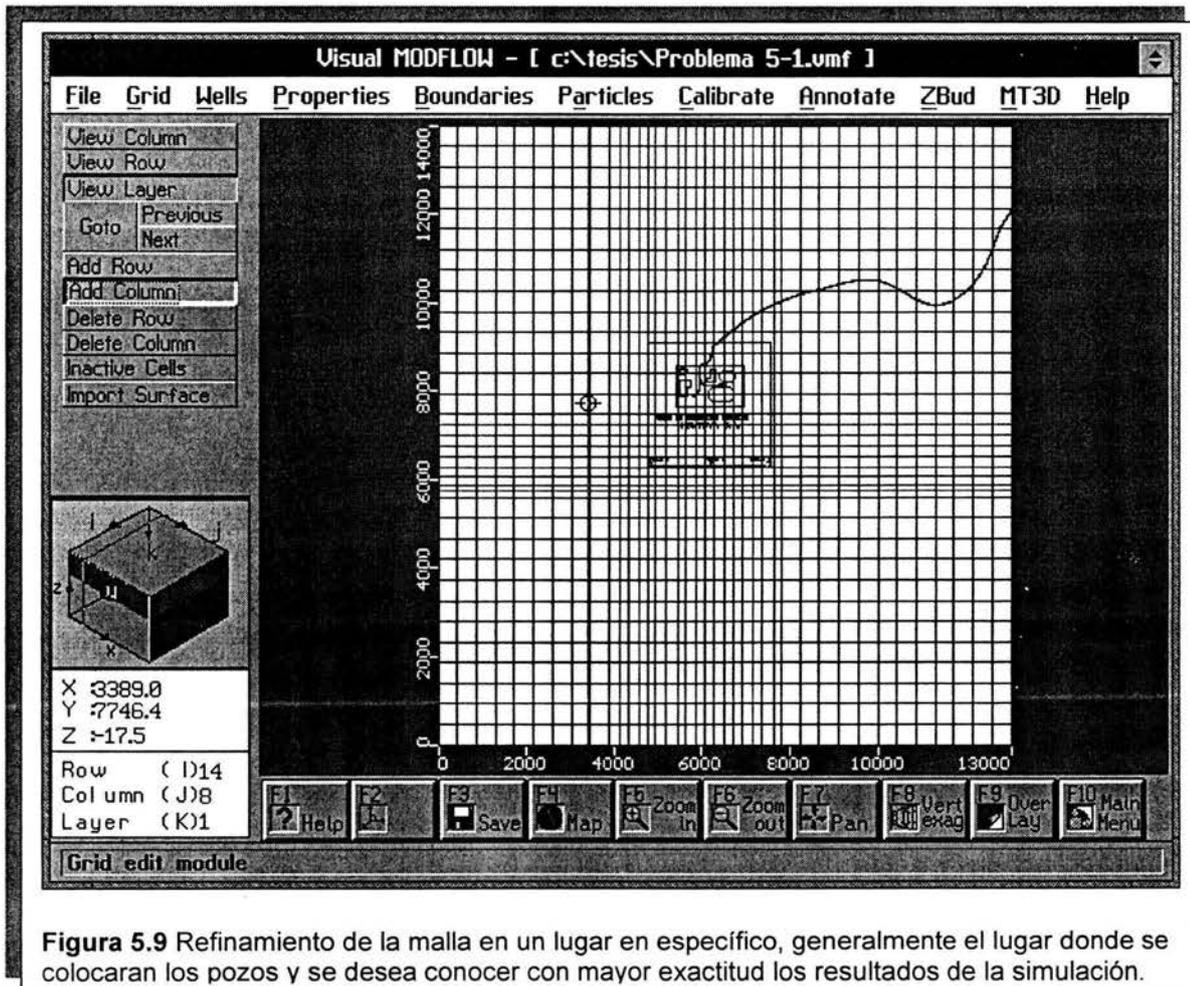


Figura 5.9 Refinamiento de la malla en un lugar en específico, generalmente el lugar donde se colocaran los pozos y se desea conocer con mayor exactitud los resultados de la simulación.

Después añadir columnas:

← en añadir columna (*Add Column*).

repetiremos el procedimiento para refinar la malla con más columnas verticales, figura 5.9.

Con esto damos por concluido el refinamiento de la malla.

5.1.4 CONDICIONES DE EXPLOTACIÓN

4 Propiedades del acuífero y recarga.-

- ⇐ en propiedades (*Properties*) en la barra de menú superior.
- ⇐ en conductividad (*Conductivity*).

Un cuadro de diálogo preguntará si deseamos guardar la información de la malla antes de salir e ir a propiedades (*Properties*):

⇐ en si (*Yes*), un pequeño símbolo en forma de disquete aparecerá indicando que la información de la malla ha sido guardada. Introduciremos los siguientes valores por defecto para las propiedades hidráulicas del acuífero, figura 5.10.

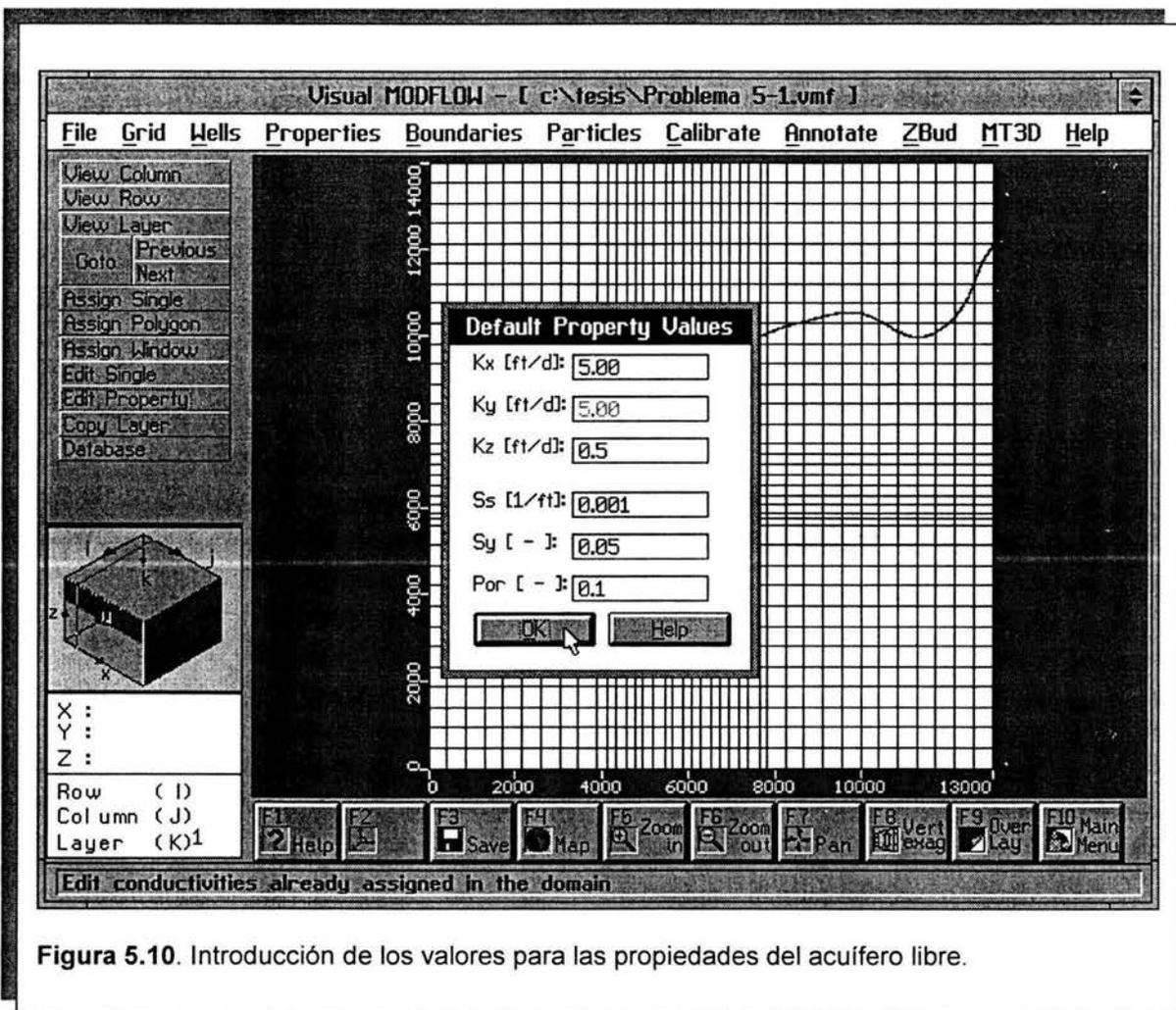


Figura 5.10. Introducción de los valores para las propiedades del acuífero libre.

Conductividad hidráulica en x (pies/día) (K_x) = 5.0 ↓

El valor de K_y será designado automáticamente ya que Visual MODFLOW supone una isotropía horizontal. Si uno quisiera tener una anisotropía horizontal, se podría hacer modificando el archivo BCF. Es importante notar que MODFLOW permite una sola relación de anisotropía por estrato, aunque muchos materiales pueden estar presentes en un estrato. Por lo tanto, modificar los valores para K_x y K_y para cada material sería erróneo, ya que uno no puede usar relaciones diferentes de K_x/K_y en el mismo estrato en MODFLOW.

Conductividad hidráulica en z (pies/día) (K_z) =	0.5 ↓
Almacenamiento específico (S_s) =	0.001 ↓
Rendimiento específico (S_y) =	0.05 ↓
Porosidad (por) =	0.1

⇐ en **Ok**.

Estos valores serán asignados a cada celda en los tres estratos. Ahora especificaremos diferentes valores de propiedades para todas las celdas en el estrato 2 (acuitardo) y en el estrato 3 (acuífero semiconfinado), figura 5.1.

⇐ en ir a (**Goto**) en el lado izquierdo de la pantalla.

ingresaremos el estrato al que deseamos ir: 2 ↓

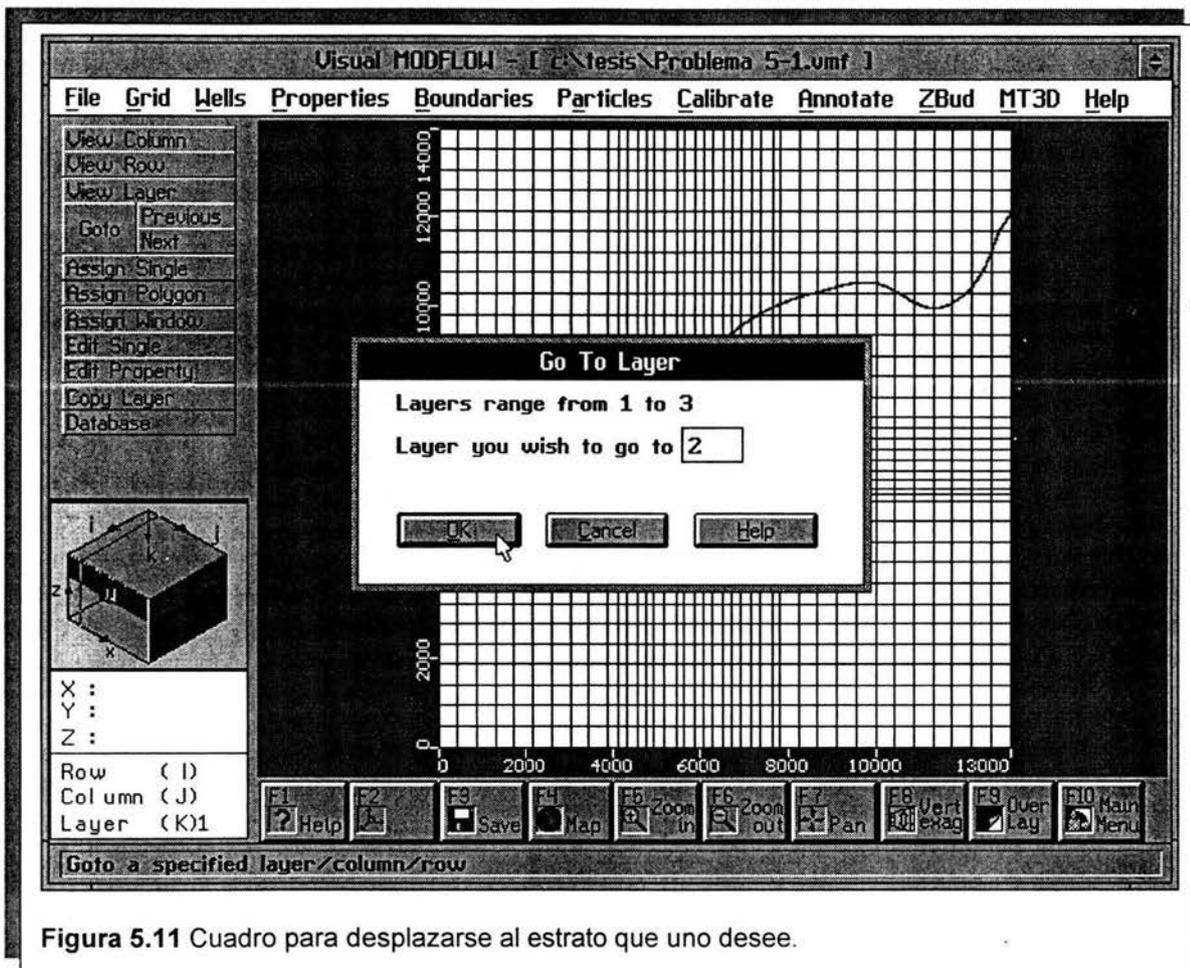


Figura 5.11 Cuadro para desplazarse al estrato que uno desee.

Ahora nos encontramos en el acuitardo.

⇐ en asignar ventana (*Assign Window*).

Extenderemos una ventana cubriendo todas las celdas en el dominio, ⇐ en la esquina superior izquierda de la malla del modelo y arrastraremos el cuadro hacia la esquina inferior derecha de la malla y ⇐ en ese lugar.

Una ventana de diálogo se mostrará, preguntando qué propiedades se desea asignar al material, figura 5.12. Teclearemos:

Propiedad # (*Property #*): 2

⇐ en nuevo (*New*), todas las celdas en el estrato 2 se tornaran azules.

Kx 0.2 ↓
Kz 0.02 ↓

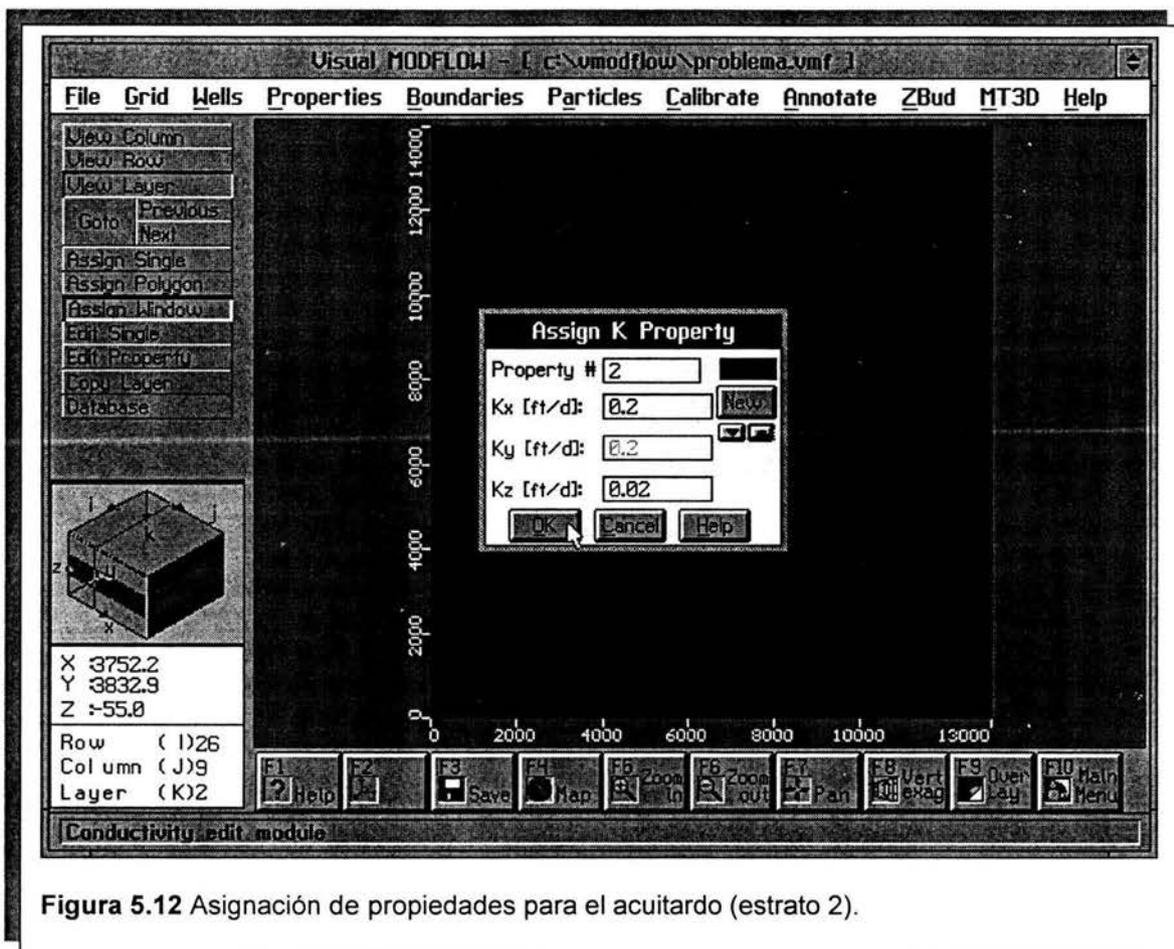


Figura 5.12 Asignación de propiedades para el acuitardo (estrato 2).

Esto asignará la propiedad # 2 al estrato completo que corresponde al acuitardo (el total de la malla sería azul).

⇐ en **Ok** en el cuadro asignar propiedades de K (**Assign K Property**) en la ventana de diálogo.

Ahora iremos debajo del estrato intermedio, es decir al estrato 3, (acuífero inferior).

⇐ en siguiente (**Next**).

⇐ en asignar ventana (**Assign Window**).

De nuevo, extenderemos una ventana cubriendo todas las celdas en el estrato 3, ⇐ en la esquina superior izquierda del modelo y arrastraremos el cuadro hacia la esquina inferior derecha de la malla, y ⇐ en ese lugar.

Una ventana de diálogo se mostrará preguntando qué propiedades se asignarán al material, teclearemos:

Propiedades # (Property #):	3
⇐ en nuevo (New), el área iluminada se tornará verde.	
Kx	300 ↵
Kz	30 ↵

Esto asignará la propiedad # 3 al total del estrato (el total del estrato sería verde).

⇐ **Ok** en la ventana de diálogo asignar propiedad K (**Assign K Property**).

Con esto hemos terminado con las definiciones de la conductividad hidráulica. Ahora definiremos la recarga para el estrato superior (acuífero libre). Para esto debemos estar sobre el estrato superior del modelo.

⇐ en ir a (**Goto**).

Teclearemos 1 ↵

⇐ en **Ok**.

⇐ en frontera (**Boundaries**).

⇐ en recarga (**Recharge**).

La ventana "recarga" aparecerá en pantalla, introduciremos un tiempo de 365 días de recarga:

365 ↵

Se nos preguntará por una recarga en pulgadas por año (*in/year*), unidades por defecto, figura 5.13.

Teclaremos: 5 ↵

← Ok o ↵

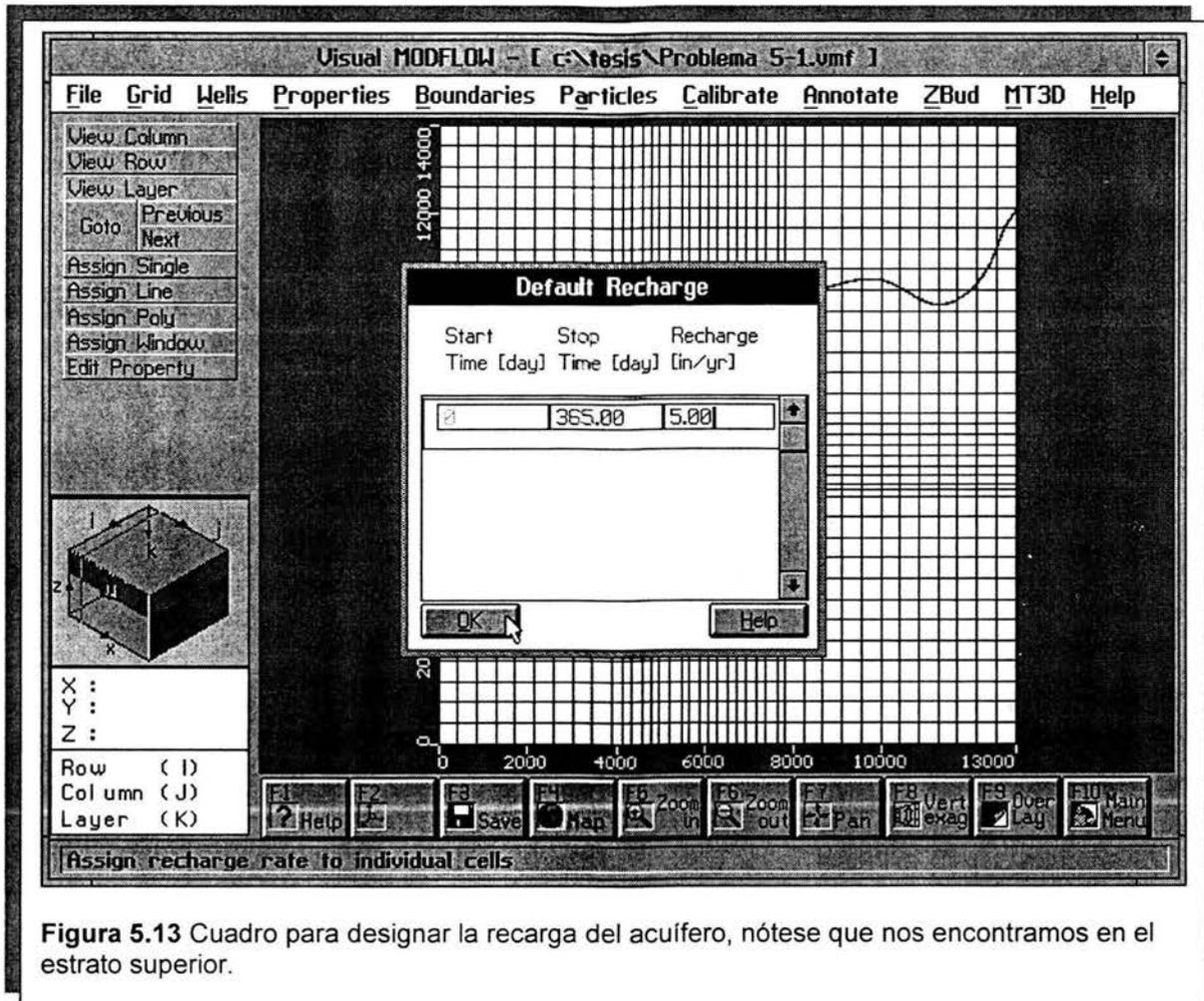


Figura 5.13 Cuadro para designar la recarga del acuífero, nótese que nos encontramos en el estrato superior.

5 Datos de entrada para condiciones de frontera.-

← en fronteras (*Boundaries*).

← en carga constante (*Constant Head*).

Se nos preguntará si deseamos salvar la información que acabamos de introducir. ← en si (*Yes*).

Vamos a dar los datos de entrada de carga constante a lo largo de las columnas verticales las que se encuentran a la izquierda y a la derecha dentro del estrato 1 (figura

5.14). Verificaremos si el cubo que se encuentra en la parte izquierda inferior de la pantalla tiene el estrato superior iluminado en azul y café.

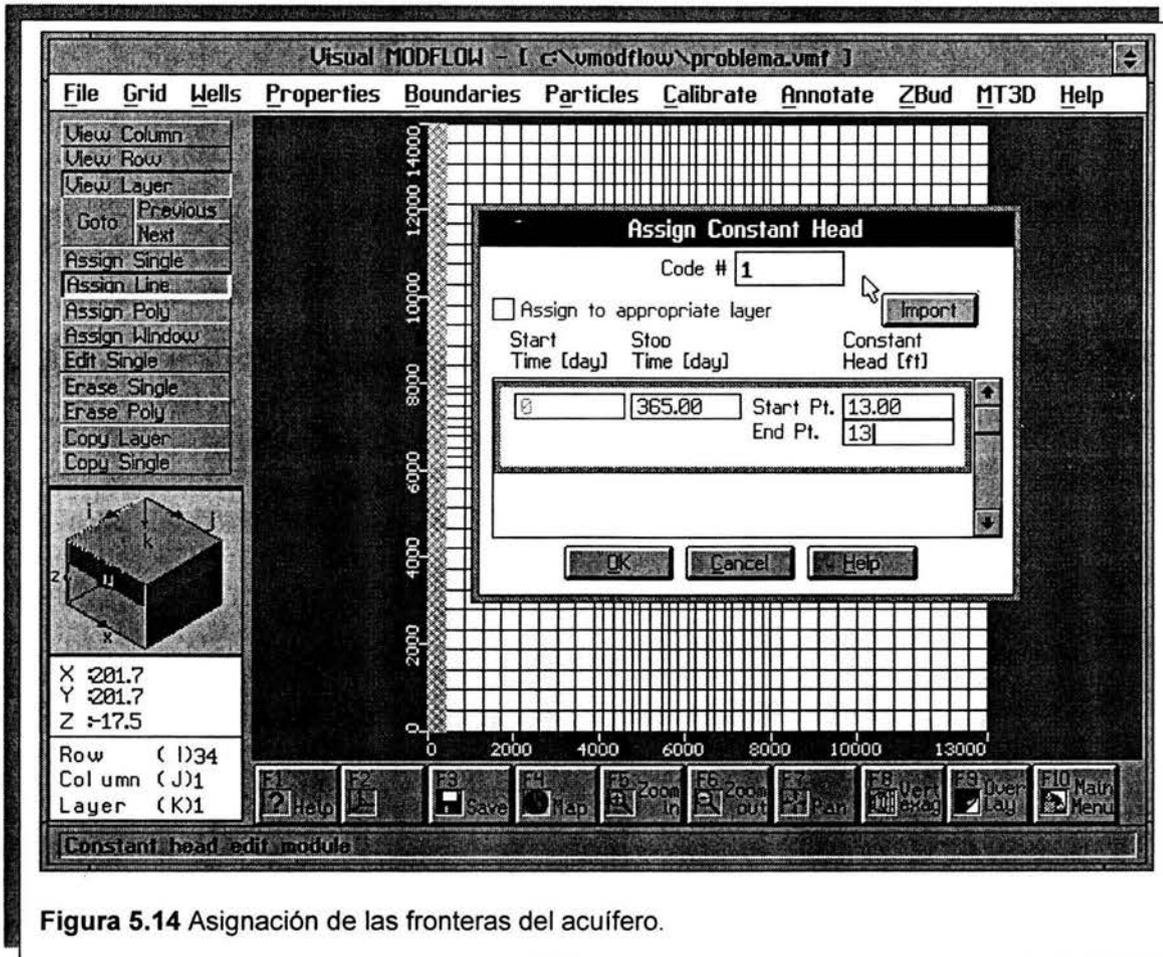


Figura 5.14 Asignación de las fronteras del acuífero.

← en asignar línea (**Assign Line**) (en la parte izquierda del menú).

← en la celda superior izquierda de la malla, moveremos el cursor a la parte del fondo en la celda inferior izquierda de la malla (una línea vertical seguirá el cursor; figura 5.14). Cuando alcancemos el fondo de la columna ← en el botón derecho del mouse. Todas las celdas a lo largo de la columna vertical que se encuentra en el extremo izquierdo de la malla se iluminaran en rosa. La ventana de diálogo "asignar carga constante" "**Assign Constant Head**" aparecerá. Escribiremos:

Código # (Code#)	1 ↵
Parar tiempo (Stop Time)	365 ↵
Empezar punto (Start Point)	13 ↵ (valores de carga en
inicio y fin de los puntos de línea)	
Punto final (End Point)	13

← en **Ok** (para cerrar la ventana de diálogo).

Repetiremos el mismo procedimiento para la columna que se encuentra en el extremo derecho de la malla, en $x = 13,000$, \leftarrow en asignar línea (**Assign Line**) etc... teclaremos :

Código # (Code#)	2 ↵
Parar tiempo (Stop Time)	365 ↵
Empezar punto (Start Point)	12 ↵ (valores de
carga en inicio y fin de los puntos de línea)	
Punto final (End Point)	12

\leftarrow en **Ok** (para cerrar la ventana de diálogo).

Ahora definiremos una carga general de frontera (**G.H.B**), a lo largo de la malla en las filas norte (superior) y sur (inferior) del estrato 3 (figura 5.15). Primero tendremos que ir al estrato 3 (en este momento nos encontramos en el estrato 1).

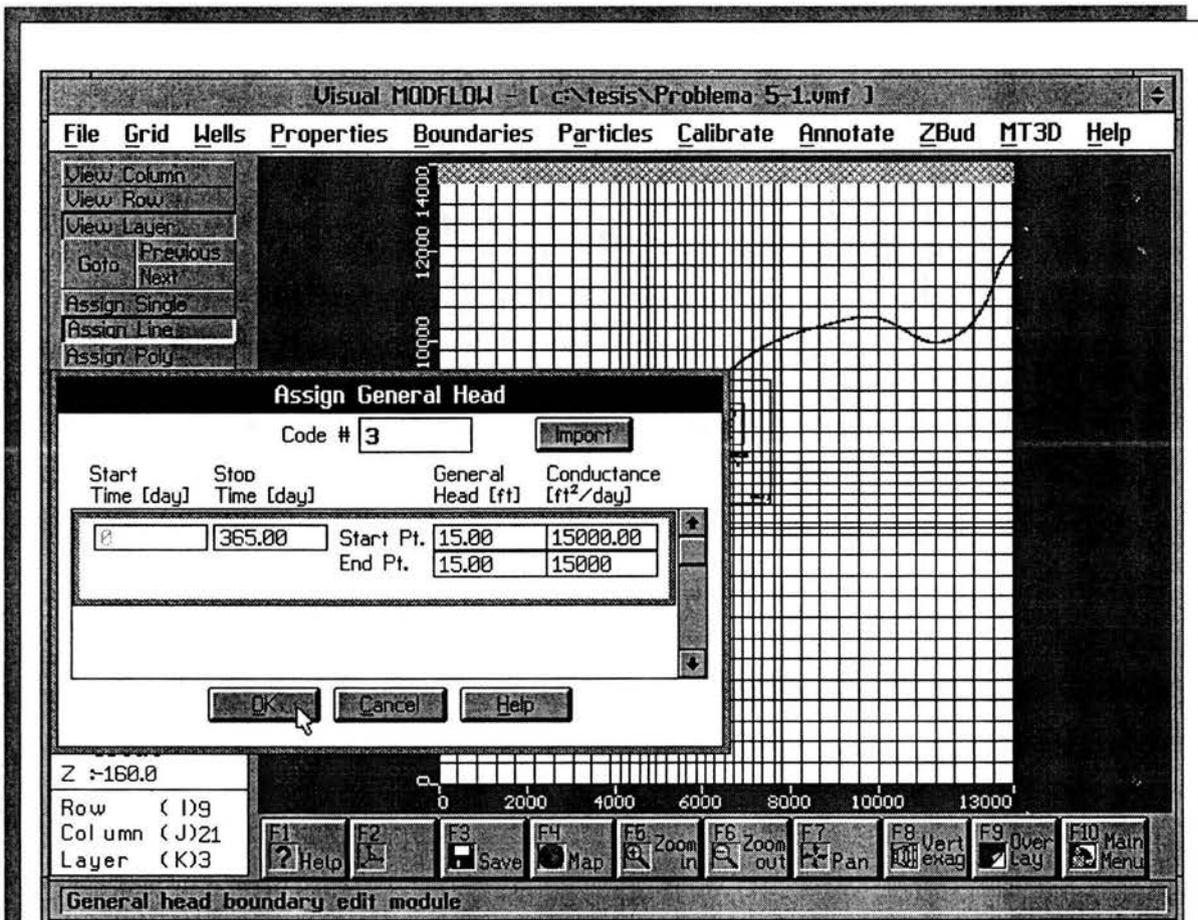


Figura 5.15 Asignación de las fronteras generales.

⇐ en siguiente (**Next**) (para ir al estrato 2).

El estrato 2 es un acuitardo el cual dejaremos con una condición de frontera de no flujo sobre sus cuatro lados).

⇐ en siguiente (**Next**) (para ir al estrato 3).

⇐ en fronteras (**Boundaries**).

⇐ en **G. H. B.** , para dar entrada a la carga general de frontera.

⇐ en asignar línea (**Assign Line**) en el lado izquierdo del menú.

Resaltaremos la fila superior, extenderemos una línea horizontal cruzando las celdas en esta fila como sigue.

Nos moveremos a la celda superior izquierda, en la esquina de la malla. (figura 5.15).

⇐ en esa celda.

nos moveremos a la celda superior derecha, en la esquina de la malla.

⇐ con el botón derecho del mouse.

Hemos inducido un parámetro de carga general de frontera, escribiremos:

Código # (Code #)	3 ↓
Parar tiempo (Stop Time)	365 ↓
Empezar pt carga general (Start pt general head)	15 ↓ (valores de
carga y conductividad en el inicio y final de los puntos de la línea)	
Empezar pt conductancia (Start pt conductance)	15000 ↓
Final pt carga constante (End pt general head)	15 ↓
Final pt conductancia (End pt Conductance)	15000

⇐ en **Ok** (para cerrar la ventana de diálogo).

Una barra verde aparecerá a lo largo de la fila norte (superior).

Repetiremos el mismo procedimiento para la fila sur (inferior). Escribiremos:

Código # (Code #)	4 ↓
Parar tiempo (Stop Time)	365 ↓
Empezar pt carga general (Start pt general head)	6 ↓ (valores de
carga y conductividad en el inicio y final de los puntos de la línea)	
Empezar pt conductancia (Start pt conductance)	15000 ↓
Final pt carga constante (End pt general head)	6 ↓
Final pt conductancia (End pt Conductance)	15000

⇐ **Ok** (para cerrar la ventana de diálogo).

una barra verde aparecerá a lo largo de la fila del fondo.

6 Añadiendo pozos .-

⇐ en pozos (**Wells**) , en la barra del menú superior.

⇐ en si (**Yes**), para salvar datos de frontera.

⇐ en F5, que se localiza en la parte inferior de la pantalla para ir a **Zoom In**.

para crear un cuadro de zoom alrededor de los tres pozos de explotación, ⇐ sobre una celda del dominio, una ventana aparecerá, extenderemos esta ventana para cubrir el área a ser aumentada y ⇐ cuando se tenga la esquina inferior derecha de la ventana, figura 5.16.

⇐ en añadir pozo (**Add Well**), en el menú izquierdo de la pantalla.

⇐ en el cuadro que contiene al pozo 1.

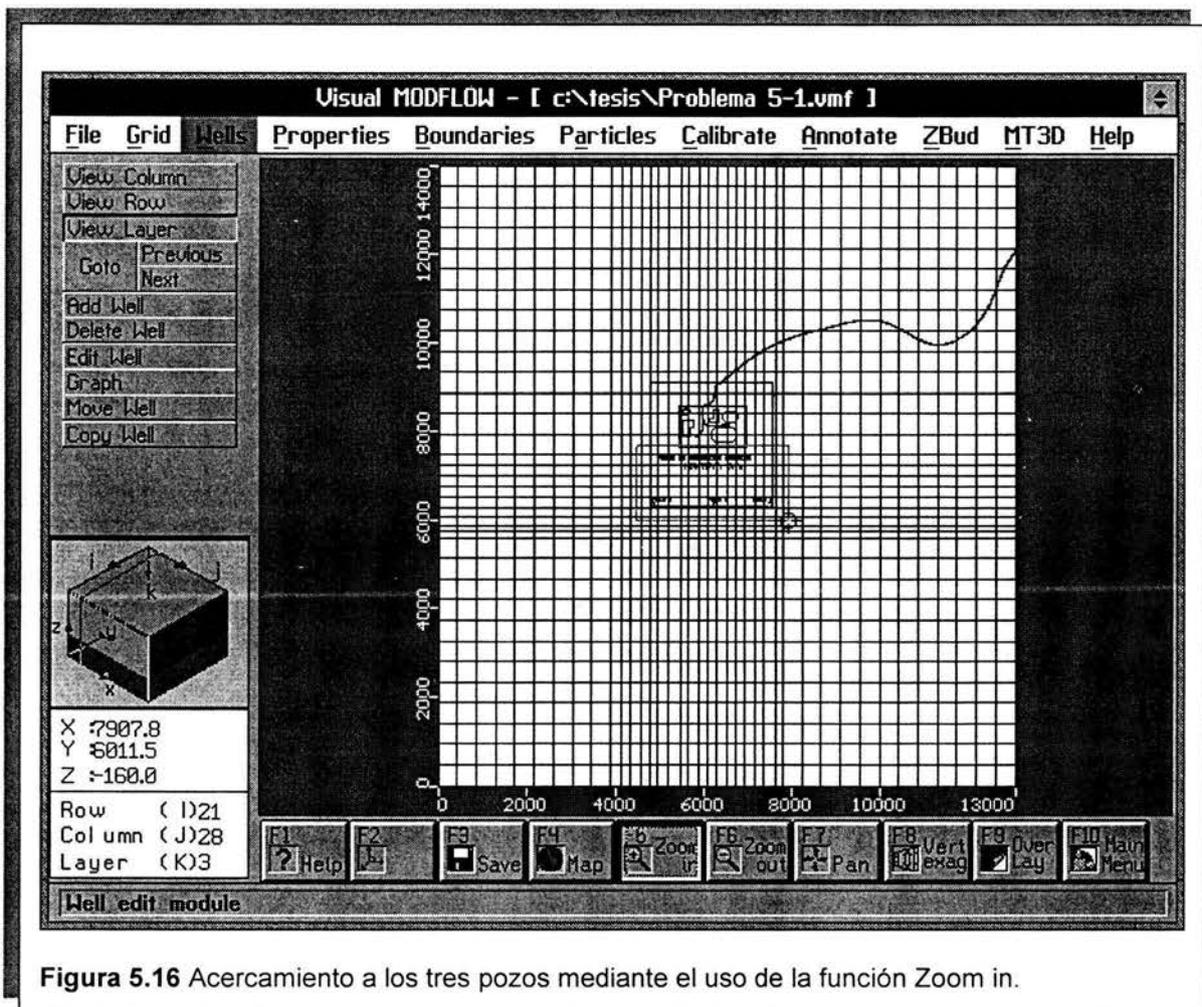


Figura 5.16 Acercamiento a los tres pozos mediante el uso de la función Zoom in.

deberíamos ver una pantalla similar a la figura 5.17, para definir una porción de la rejilla del pozo. La rejilla es la porción del pozo que acepta el flujo de agua subterránea.

⇐ en añadir rejilla de pozo (**Add Screen**) que se encuentra en el centro de la pantalla.

⇐ dentro del pozo, en la elevación de superficie subterránea (15.00 ft).

Nos moveremos abajo hasta la parte superior del acuitardo (elevación igual a -50 ft), extendiendo un rectángulo rojo sobre el total del acuífero superior y ⇐ en botón derecho del mouse, figura 5.17.

⇐ en el cuadro parar (**Stop**) sobre la ventana programa de bombeo (en el lado derecho de la pantalla).

Introduciremos 365 ↵ en parar tiempo "**Stop Time**".

-35 en gasto de bombeo "**Pumping Rate**".

⇐ en la ventana nombre de pozo (**Well name**) (centro del cuadro) escribiremos

Pozo 1 ↵

⇐ en **Ok**.

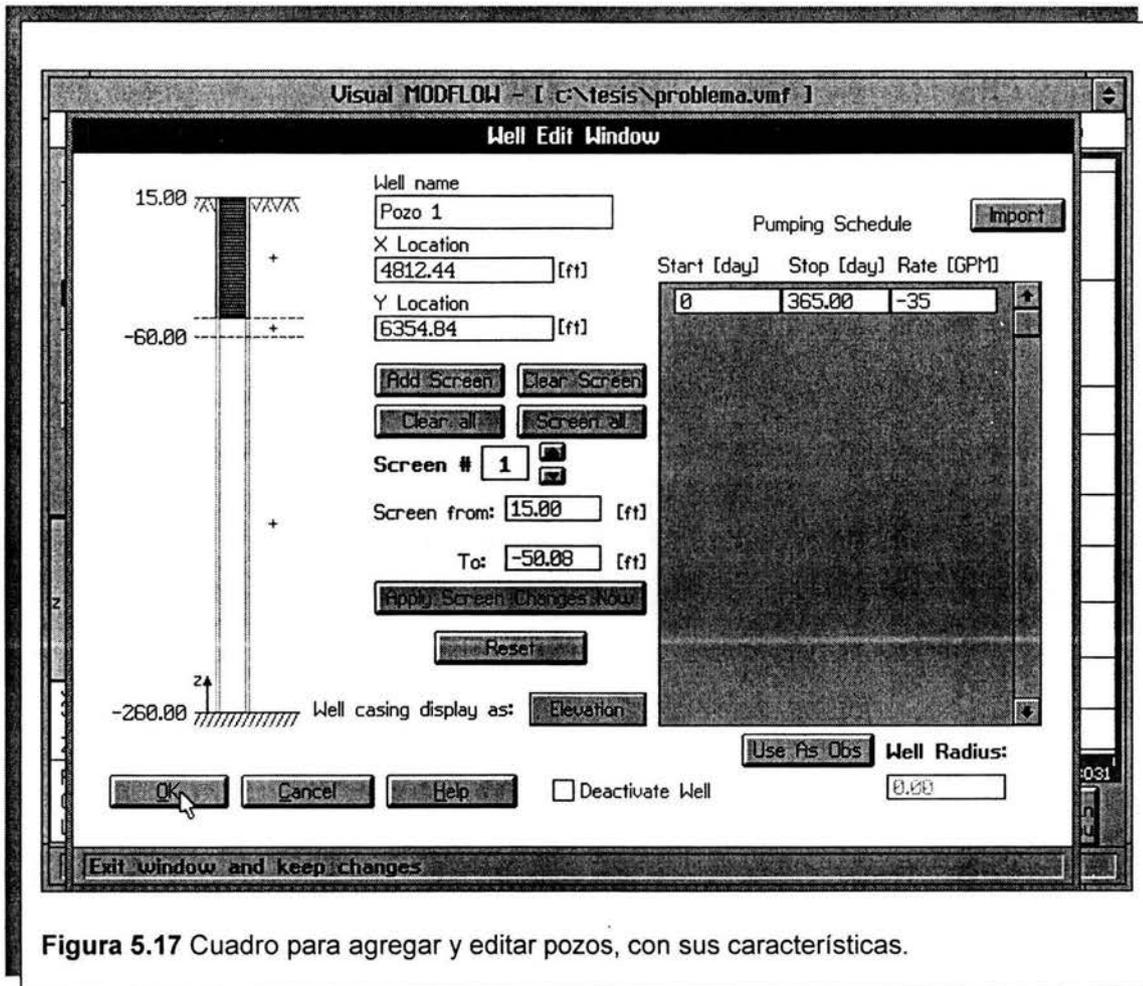


Figura 5.17 Cuadro para agregar y editar pozos, con sus características.

Repetiremos este procedimiento, con el mismo gasto de bombeo (-35 gpm) y usando los nombres de pozos "Pozo 2" y "Pozo 3" para dar entrada a los 2 pozos restantes mostrados en la figura 5.16. Podemos notar que, aunque la celda entera donde un pozo es presentado esta iluminada, Visual MODFLOW mantiene la localización original de los pozos. Esto nos permite modificar la malla por adición o borrado de filas, columnas y estratos sin perder la información de la localización de los pozos y elevaciones de las rejillas.

Debemos tener en mente que MODFLOW considera un pozo en una celda para ser del tamaño de la celda, lo cual es por que la celda entera es sombreada. Esto significa que un pozo de 6 pulgadas en una celda de 400 x 400 ft, es considerado para tener un área efectiva de 16,000 ft². Esta es una razón por la que el espaciamiento de la malla alrededor de los pozos es recomendada.

7 Datos de entrada de partículas .-

- ⇐ en ir a (**Goto**), para ir al estrato 1.
- ⇐ en F6 (**Zoom out**) para visualizar todo el sistema.

Ahora ingresaremos los datos de partículas donde queremos visualizar las rutas de los contaminantes (**Pathlines**).

- ⇐ en partículas (**Particles**) sobre la barra de menú superior.
 - ⇐ en si (**Yes**) para salvar la información de los pozos.
- Añadiremos algunas partículas hacia atrás alrededor de los pozos para visualizar las zonas de captura. Esto hace que los pozos “detecten” un contaminante dentro de su zona e influencia, si es que existe presencia del mismo.
- ⇐ en (**Zoom In**) para visualizar una área similar a la mostrada en la figura 5.18.

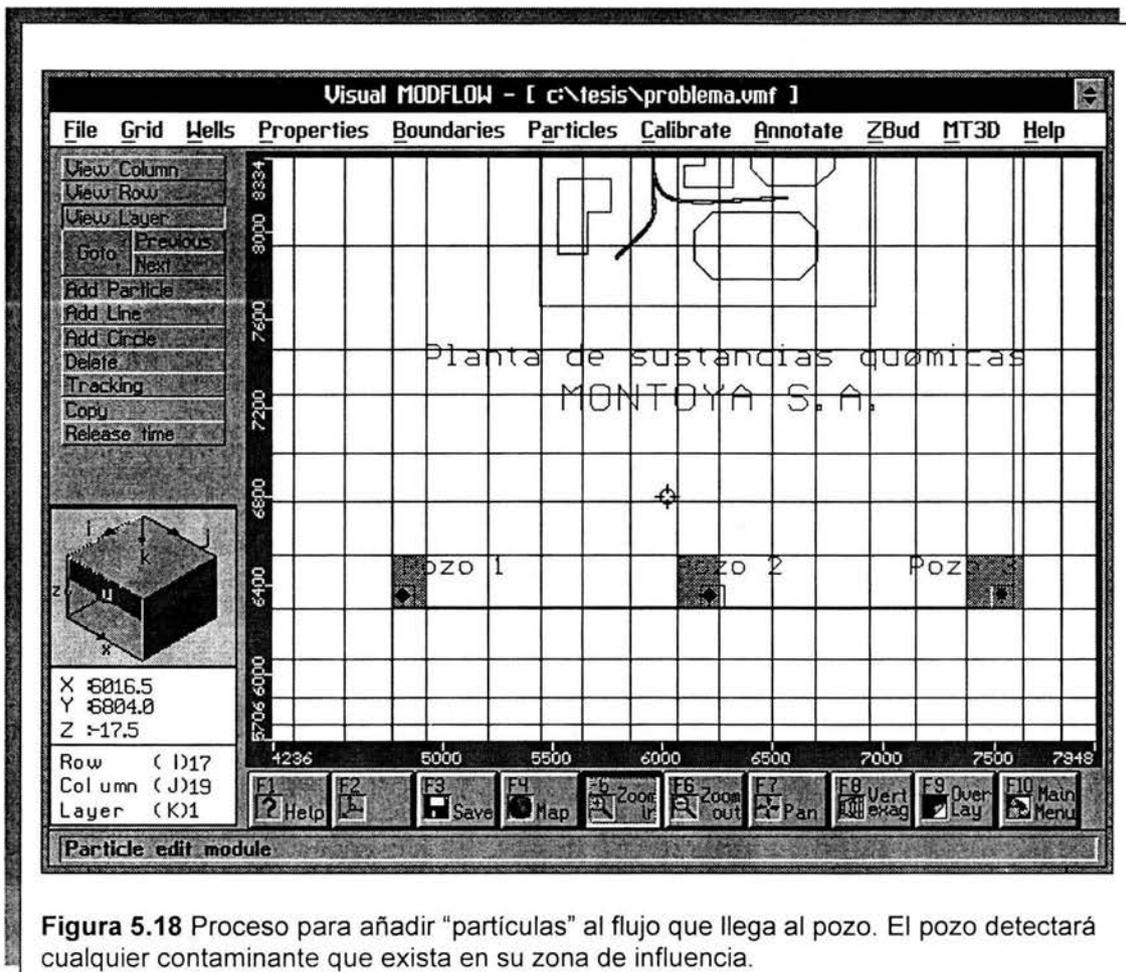


Figura 5.18 Proceso para añadir “partículas” al flujo que llega al pozo. El pozo detectará cualquier contaminante que exista en su zona de influencia.

- ⇐ en añadir círculo (**Add Circle**), en el menú izquierdo de la pantalla.
- ⇐ en el centro del pozo 1.

Moveremos el cursor y extenderemos un círculo hasta que éste sea lo suficientemente grande para encerrar la celda del pozo y ⇐.

Una ventana de diálogo preguntará la localización, dirección y el número de partículas figura 5.19.

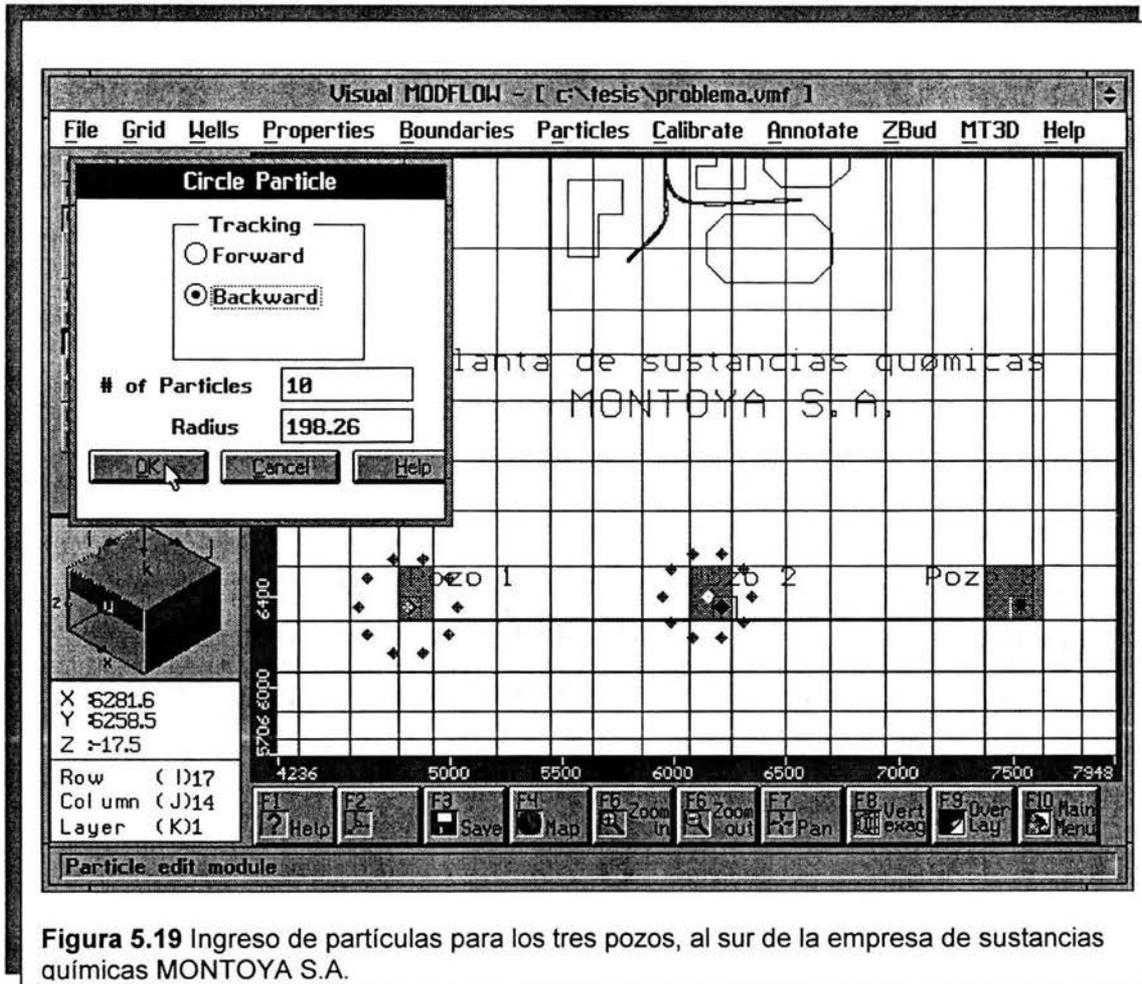


Figura 5.19 Ingreso de partículas para los tres pozos, al sur de la empresa de sustancias químicas MONTOYA S.A.

- ⇐ en hacia atrás (**Backward**).
- # de partículas (**# of Particles**): 10
- ⇐ en **Ok**.

Repetiremos el procedimiento para añadir 10 partículas hacia atrás alrededor de cada uno de los dos pozos restantes.

- ⇐ en F6 (**Zoom out**), botón en la parte inferior de la pantalla.
 - ⇐ en ir a (**Goto**) en el menú del lado izquierdo de la pantalla.
- estrato al que deseamos ir: 3

⇐ en **Ok**.

Ahora añadiremos algunas partículas hacia adelante en el acuífero inferior o semiconfinado. Esta acción liberará partículas contaminantes que serán arrastradas por el flujo del agua.

⇐ en añadir línea (**Add Line**).

extenderemos una línea horizontal a lo largo de la coordenada "y" de aproximadamente 12,000.

⇐ en la celda en el extremo del lado izquierdo de la fila 5 (observaremos que el indicador de fila tenga 5 en la esquina inferior izquierda de la pantalla).

extenderemos una línea horizontal y ⇐ en la celda que se encuentra al extremo derecho de la fila 5.

Una ventana de diálogo "línea partícula" "**Line Particle**" aparecerá.

⇐ en hacia delante (**Forward**).

de partículas (**# of Particles**): 10

⇐ en **Ok**.

la ventana final para este proceso se muestra en la figura 5.20.

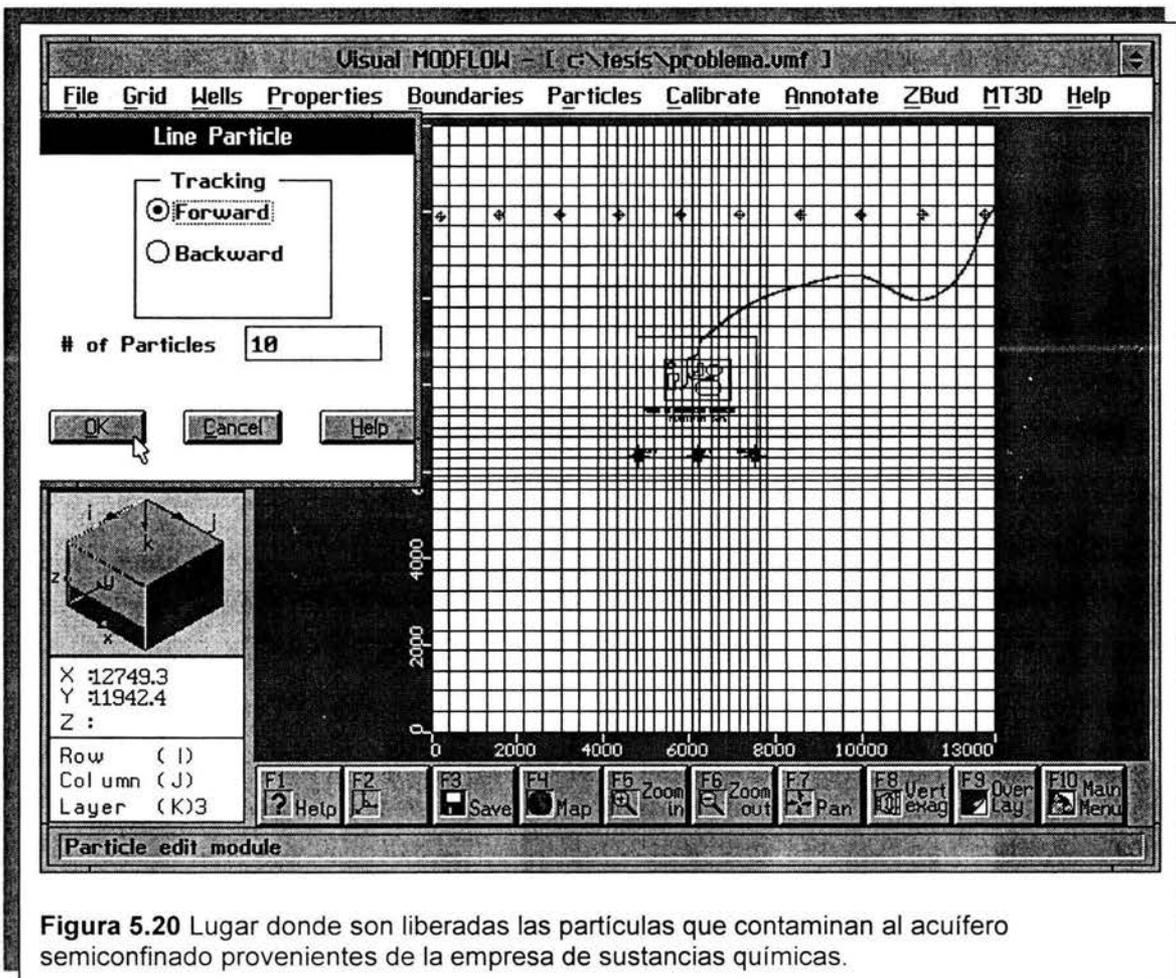


Figura 5.20 Lugar donde son liberadas las partículas que contaminan al acuífero semiconfinado provenientes de la empresa de sustancias químicas.

8 Implementando zona de balance .-

Ahora definiremos zonas para localizar cálculos de balance de agua. La **Zone Budget Package** es una nueva adición a Visual MODFLOW, el cual permite al usuario calcular redes de flujo dentro y fuera de diferentes áreas del modelo. Este cálculo es bastante útil, por ejemplo, el flujo del agua subterránea emanando debajo de una propiedad, o flujos dentro o fuera de ciertas partes de un río. Por defecto, Visual MODFLOW calcula el dominio completo como propiedad #1. Nosotros definiremos pequeñas áreas para ser calculadas los cuales pueden ser entonces comparadas con el resto del dominio. Primero iremos atrás al estrato 1.

⇐ en ir a (**Goto**) en el menú izquierdo de la pantalla.
estrato al que deseamos ir: 1

⇐ en **Ok**.

⇐ en **ZBud**, sobre el menú superior.

⇐ en si (**Yes**), para salvar los datos de partículas.

⇐ en asignar ventana (**Assign Window**).

Asignaremos una ventana para cada estrato (ver figura 5.21) alrededor del área de interés para determinar cómo la filtración esta ocurriendo de estrato a estrato.

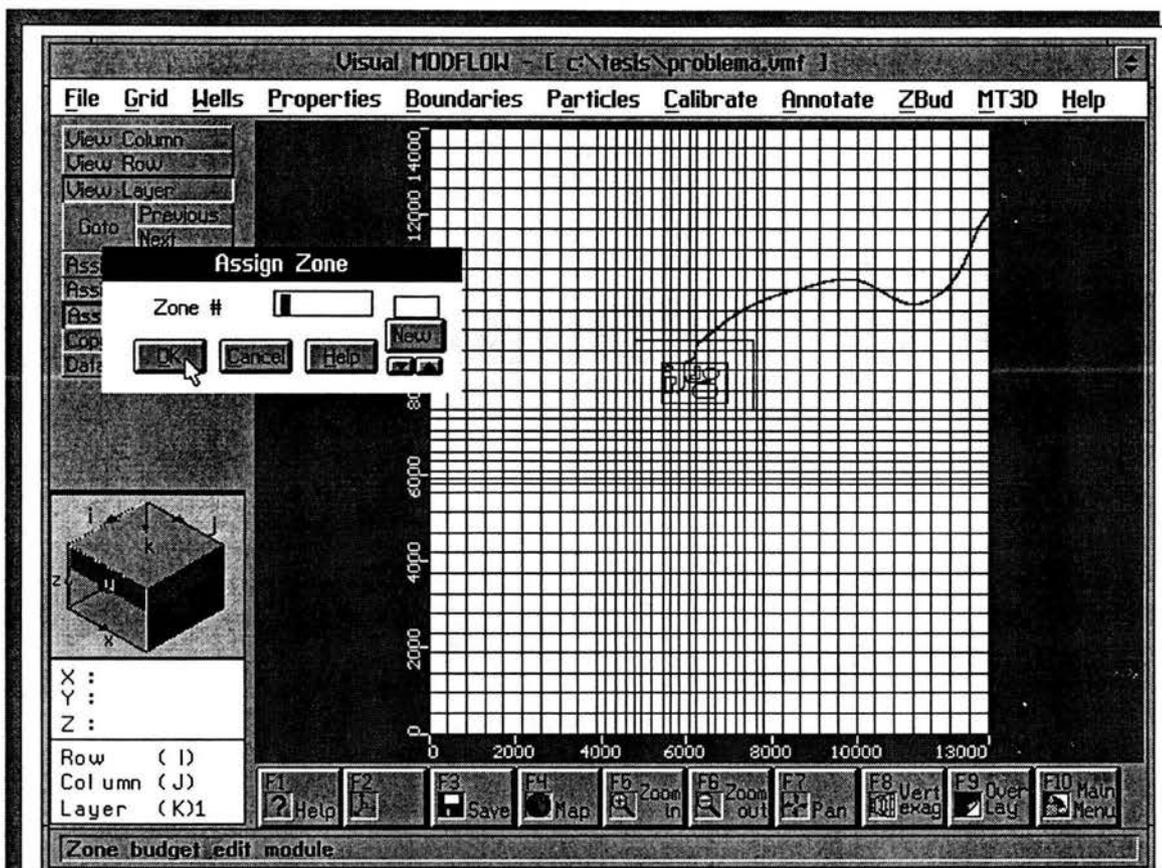


Figura 5.21 Podemos determinar una área para verificar las filtraciones que suceden entre estratos.

⇐ en la esquina superior izquierda de la ventana alrededor del área de interés (zona donde se localizan los pozos). Aproximadamente en $x=4000$, $y=7300$.

⇐ en la porción inferior derecha del área de interés (zona de pozos), en aproximadamente $x=7700$, $y=5700$, para cerrar la ventana.

Una ventana de asignar propiedad de zona aparecerá.

⇐ en nuevo (**New**), el cuadro alrededor de la zona de interés se tornara azul, la zona # será 2.

⇐ en **Ok**.

⇐ en siguiente (**Next**) para ir al estrato 2 o acuitado.

⇐ en asignar ventana (**Assign Window**).

⇐ en la esquina superior izquierda de la ventana alrededor del área de estudio justo en donde se hizo para el estrato 1.

⇐ en la esquina inferior derecha de la ventana alrededor del área de estudio, cerraremos la ventana.

La ventana de asignar propiedad de zona aparecerá.

⇐ en nuevo (**New**) la ventana seleccionada se tornará verde. El número de la zona será 3

Repetiremos este mismo procedimiento para el estrato 3 o acuífero semiconfinado, la zona será la # 4 y su color será verde aguamarina.

5.1.5 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

9 Ejecutando MODFLOW .-

⇐ en archivo (**File**), en la parte superior de la barra de menú.

⇐ en menú principal (**Main Menu**).

⇐ en si (**Yes**).

⇐ en ejecutar (**Run**).

⇐ en estado establecido (**Steady State**).

⇐ en **Ok**.

⇐ en ejecutar (**Run**) en el menú que se encuentra en la parte superior de la pantalla.

⇐ en ejecutar MODFLOW (**Run MODFLOW**).

⇐ en ejecutar MODPATH (**Run MODPATH**).

⇐ en ejecutar zona de balance (**Run Zone Budget**).

⇐ en **Ok**.

MODFLOW se ejecutará dentro de Visual MODFLOW. Veremos la información en una lista sobre la pantalla de cómo Visual MODFLOW ejecuta la simulación. Ahora ya podemos visualizar los resultados.

5.1.6 RESULTADOS

10 Visualización de los resultados .-

⇐ en datos de salida (**Output**), en el menú principal.

Los resultados deberían ser similares a los mostrados en la figura 5.22.

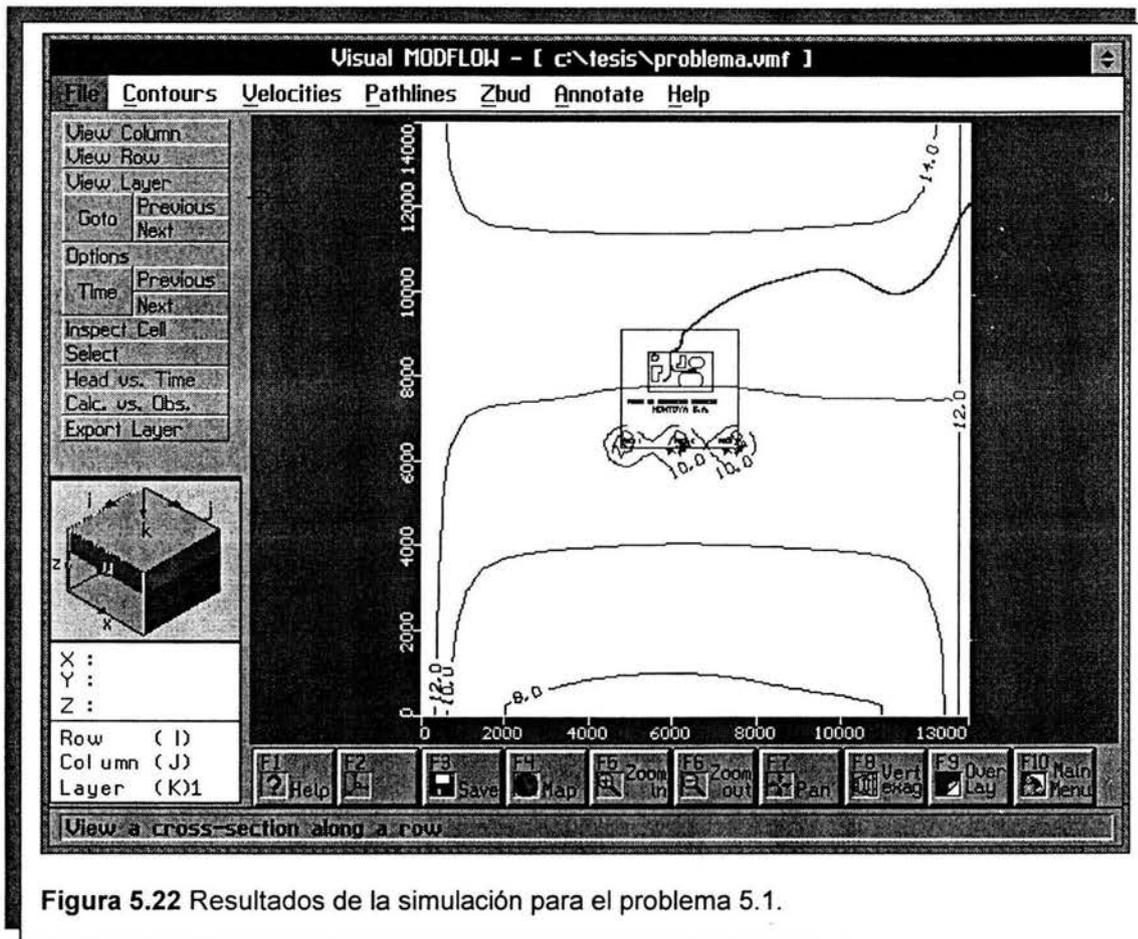


Figura 5.22 Resultados de la simulación para el problema 5.1.

- ← en siguiente (**Next**) para ver los resultados en el estrato 2.
- ← en siguiente (**Next**) para ver los resultados en el estrato 3.
- ← en vista de fila (**View Row**) para obtener una vista en corte.

Moveremos el cursor al área de dibujo y arrastraremos la barra roja iluminada cruzando la malla y ← en la fila que contiene los tres pozos.
Los resultados deberían ser similares a los mostrados en la figura 5.23.

- ← en vista en columna (**View Column**).

Moveremos el cursor en el área de dibujo y arrastraremos la barra roja iluminada a través de la malla al pozo central y ←.

Los resultados deberían ser similares a unos mostrados en la figura 5.24.

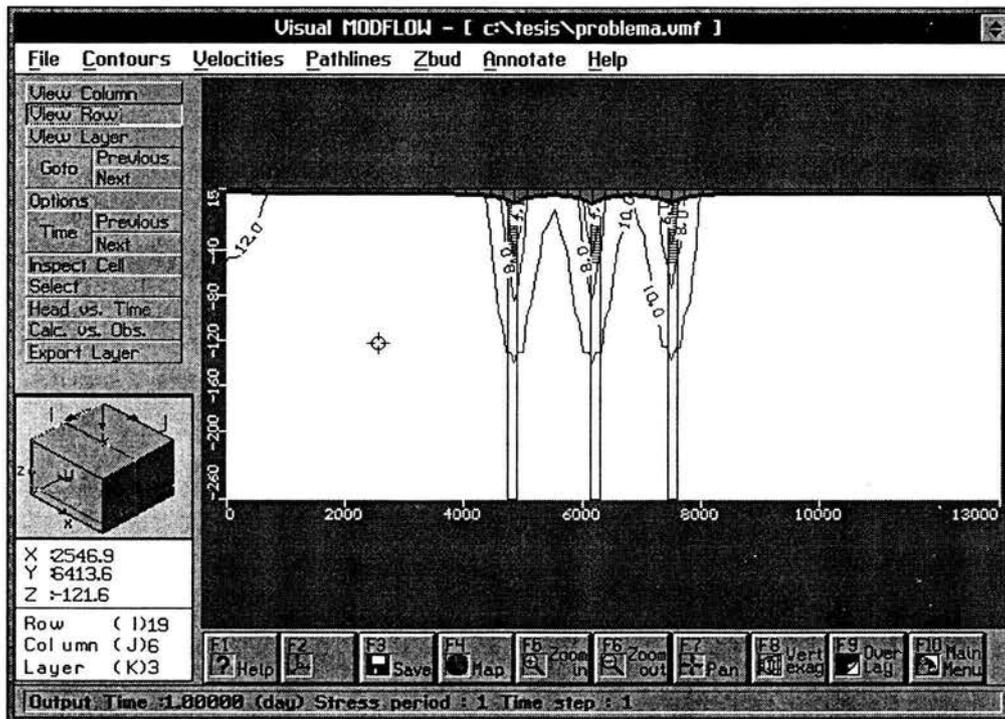


Figura 5.23 Vista en corte de los tres pozos utilizando View Row.

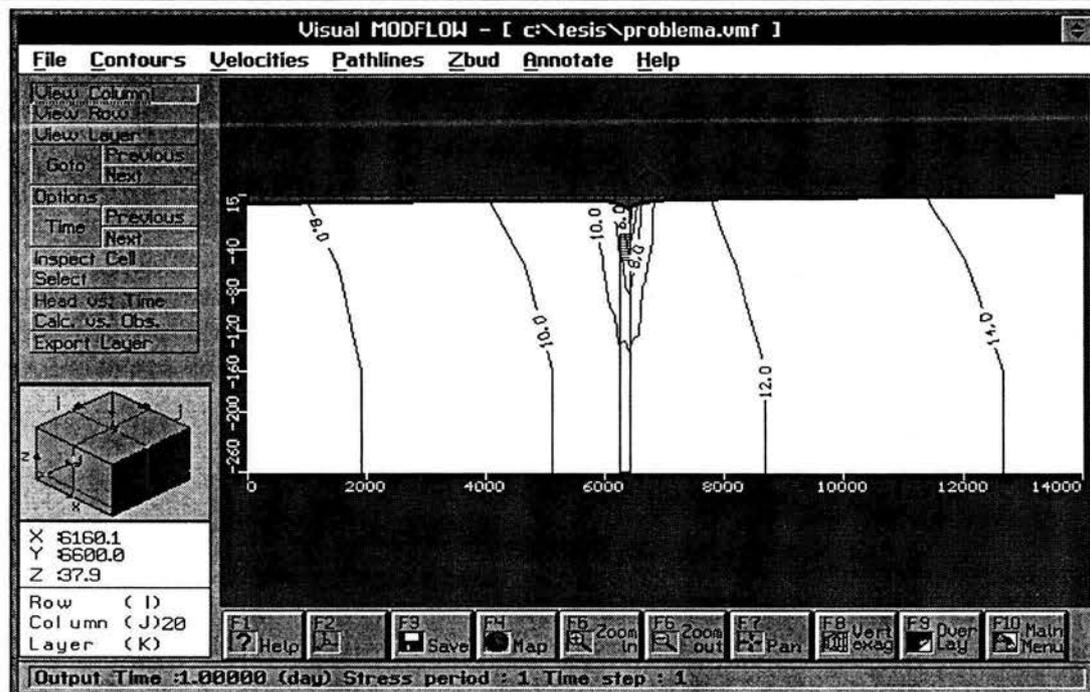


Figura 5.24 Vista en corte para el pozo central, utilizando View Column.

- ⇐ en la barra de desplazamiento hasta que el término **LABELS** aparezca en la lista mostrada en la pantalla.
- ⇐ ⇐ en **LABELS** esto apagará esta función. El asterisco de la izquierda de la palabra Labels tiene que desaparecer.
- ⇐ en **OK**.
- ⇐ en velocidades (**Velocities**) que se encuentra en la barra superior del menú.
- ⇐ en dirección (**Direction**) en el menú izquierdo de la pantalla.

se mostrará una imagen similar a la figura 5.25.

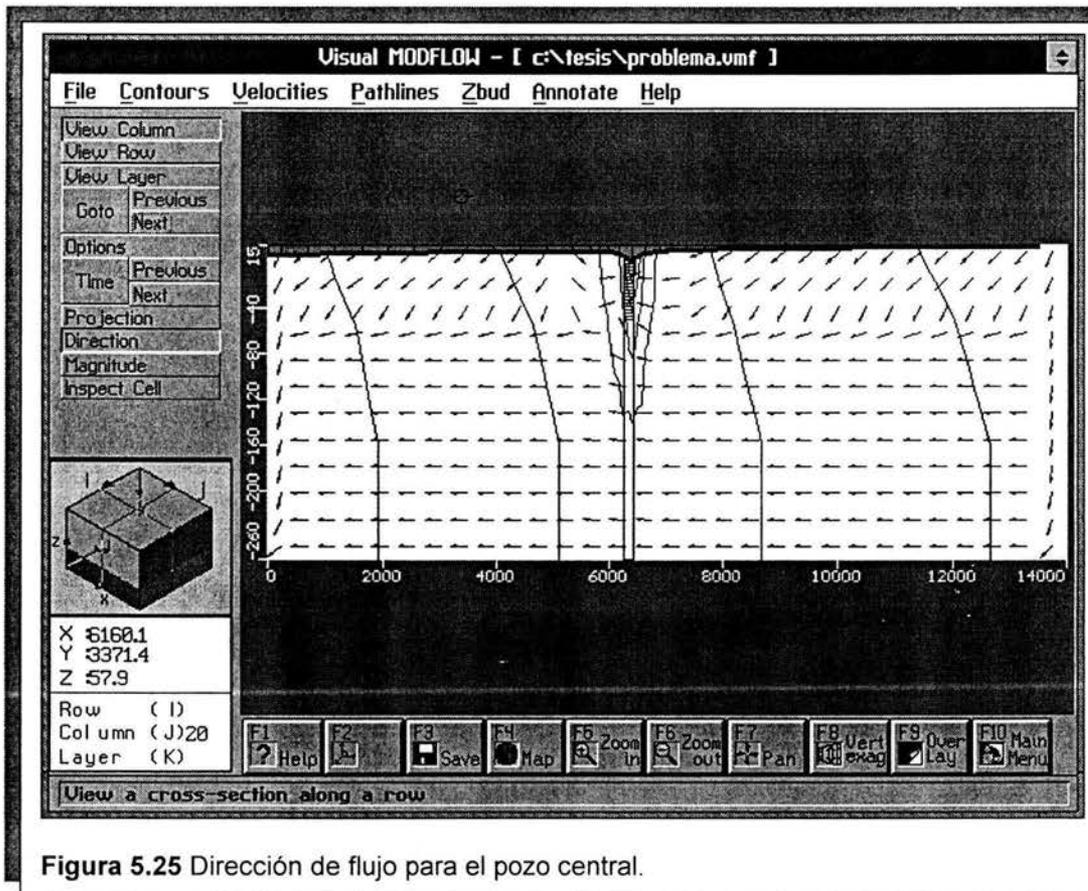


Figura 5.25 Dirección de flujo para el pozo central.

- ⇐ en vista de estrato (**View Layer**).
- moveremos el cursor al área de dibujo y arrastraremos la barra iluminada al estrato 1 y ⇐ figura 5.26.

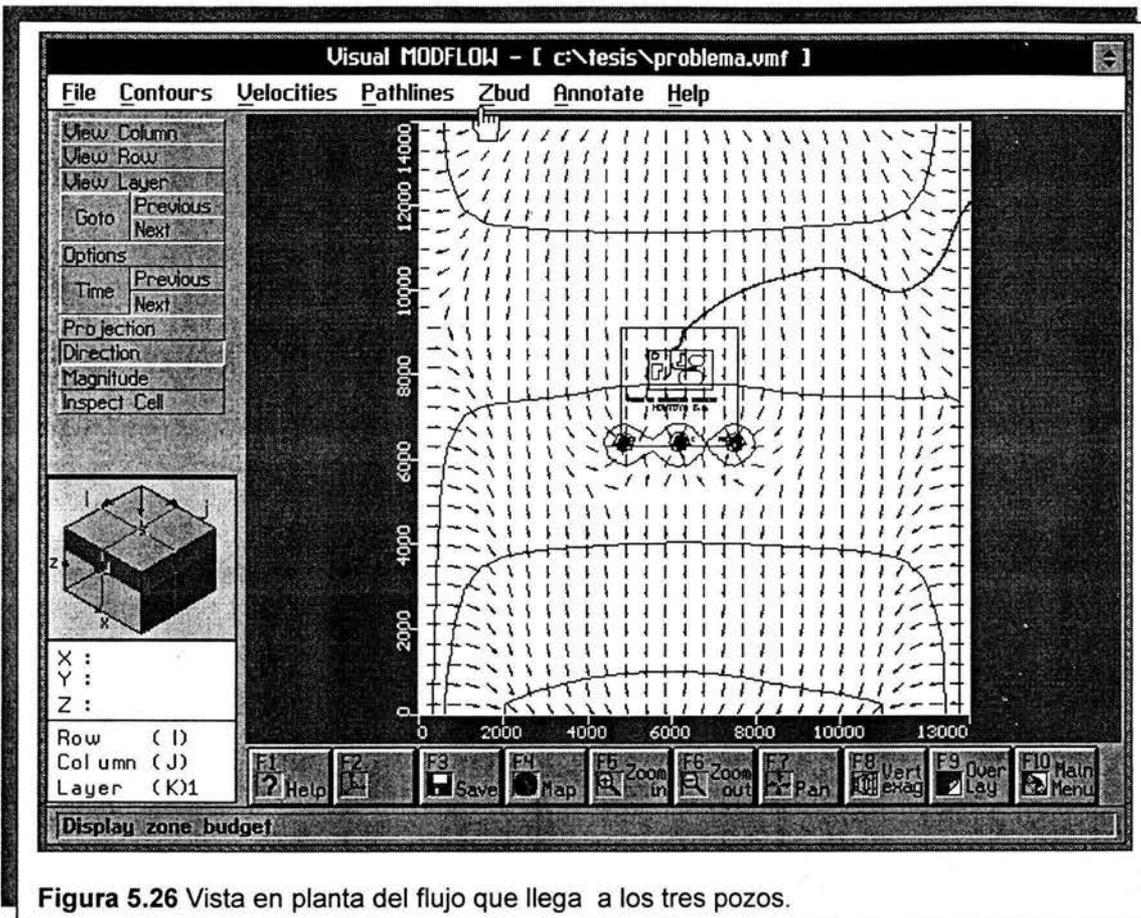


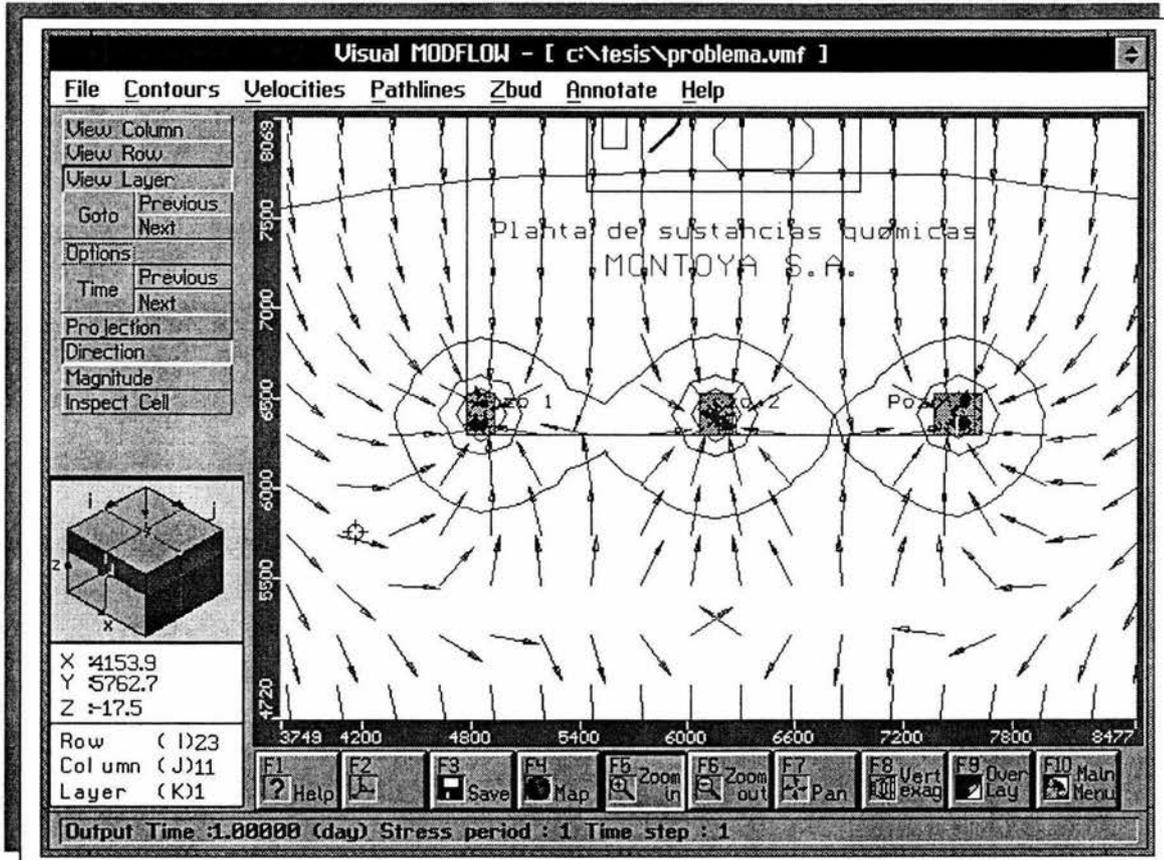
Figura 5.26 Vista en planta del flujo que llega a los tres pozos.

- ⇐ en **Zoom in** , en la parte inferior de la pantalla.
- ⇐ en aproximadamente $(X,Y) = (4000, 8000)$.
- ⇐ en aproximadamente $(X,Y) = (8500, 4700)$.
- ⇐ en opciones (**Options**), en el menú izquierdo.
- ⇐ en vector: 50 (en lugar de 30).
- ⇐ en autoescala (**Autoscale**) creando una x en el cuadro.

Podemos notar un color verde. Por defecto, el rojo es un flujo que sale de la pantalla (por ejemplo cuando la vista es por estrato); el azul es un flujo que se adentra en la pantalla (por ejemplo cuando la vista es por estrato); y el verde está en el plano de la pantalla (por ejemplo horizontal cuando la vista está por estrato).

- ⇐ en **Ok**.

Los resultados deberían ser similares los mostrados en la figura 5.27.



⇐ en **Zoom out**.

⇐ en ruta de líneas (**Pathlines**) en la barra superior del menú principal.

⇐ en F9 (**Overlay**).

Usaremos la barra de desplazamiento hasta que el término **velocidades (Velocities Overlay)** aparezca en la lista.

⇐ ⇐ en velocidades (**Velocities Overlay**) esto apagará velocidades. El asterisco de la izquierda de velocidades debería desaparecer.

⇐ en **Ok**.

Una proyección de todas las rutas de desplazamiento de las partículas será mostrada: las partículas liberadas alrededor del pozo en el estrato 1, y las partículas liberadas en una línea del estrato 3.

⇐ en vista de columna (**View Column**).

⇐ en la columna que pasa a través del pozo central.

La zona de captura del pozo y el **pathlines** en el estrato 3 desaparecerá. Ya que todas la **pathlines** son proyectadas en el plano, la figura puede estar saturada, por lo tanto mostraremos solamente las **pathlines** que empiezan en el plano actual.

⇐ en opciones (**Options**) sobre la barra de menú izquierda.

⇐ en empezar en la estrato actual (**Start in current layer**) al fondo en la izquierda de la ventana de diálogo.

- ⇐ en **Ok**.
- ⇐ en siguiente (**Next**) un par de veces para visualizar el inicio de las *pathlines* en diferentes columnas.

11 Evaluando la zona de resultados .-

- ⇐ en vista en estrato (View Layer)
- ⇐ en el estrato superior
- ⇐ en **Zbud**.
- ⇐ en **Zbud Output**.

Ahora utilizaremos la barra de desplazamiento para evaluar los resultados. Los resultados son presentados en una tabla y deberían ser similares a la figura 5.28.

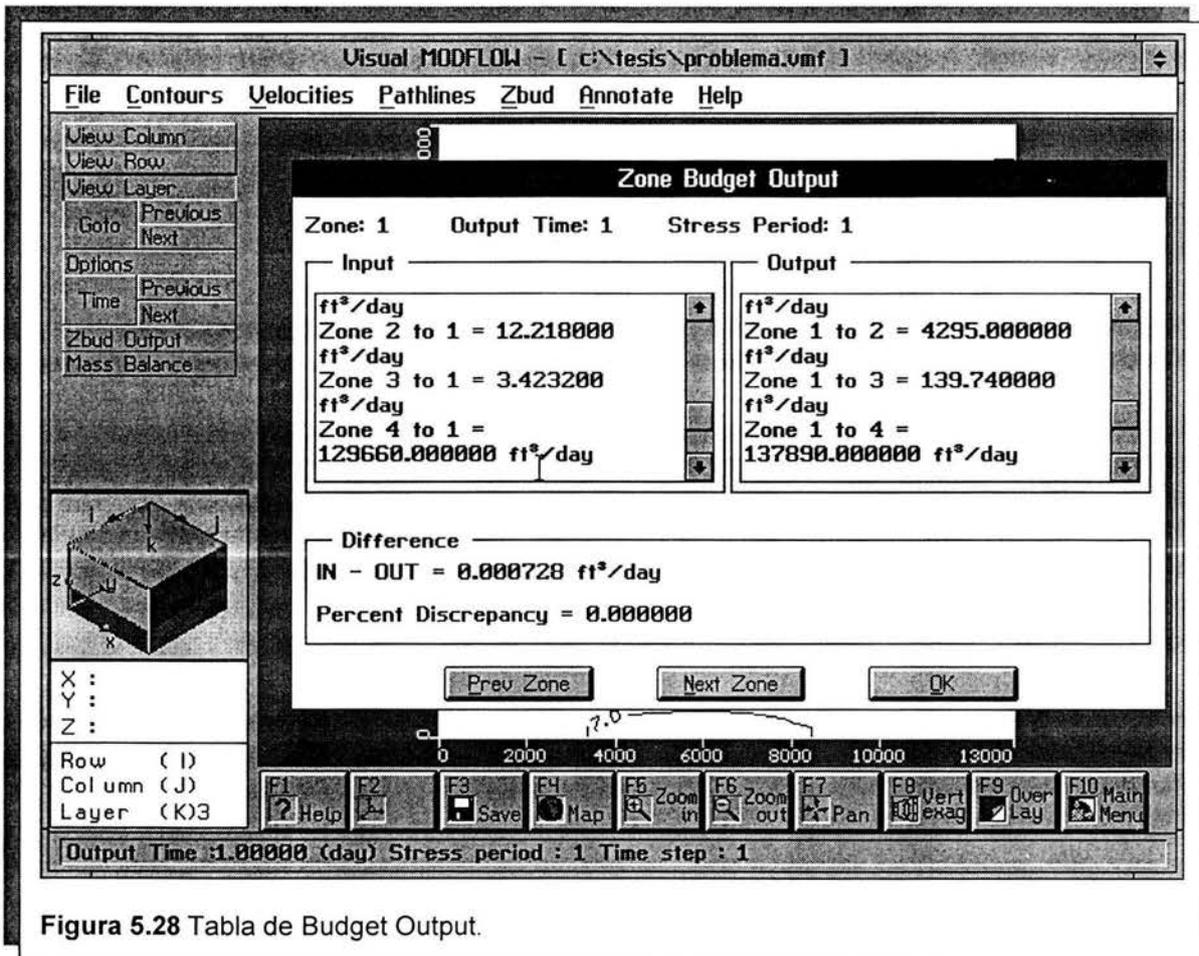


Figura 5.28 Tabla de Budget Output.

La figura 5.28 muestra los resultados de los datos de entrada y salida para la zona 1. La ventana de los datos de entrada sobre el lado izquierdo de la pantalla da cálculos de flujo dentro de la zona 1, provenientes de las zonas adyacentes. Por ejemplo el flujo de la zona 2 dentro de la zona 1 es igual a 12.210 ft³/día. La ventana de datos de salida sobre la derecha de la pantalla muestra los resultados de los cálculos para los datos de salida

de la zona 1 a las zonas adyacentes. Por ejemplo el flujo de datos de salida de la zona 1 a la zona 3 es igual a 139.74 ft³/día. En el fondo de la ventana de la pantalla , se calcula el balance de masa para la zona 1. Un Clic sobre la zona siguiente (**Next Zone**), y zona previa (**Previous Zone**) nos permite la vista de los resultados de entrada y salida para otras zonas especificadas por el usuario (**zona de Budget**). La Zona 1 por defecto representa el dominio completo. Como zonas subsecuentes son añadidas por el usuario, la zona 1 decrecerá en tamaño.

← en zona siguiente y zona previa (**Next Zone and Previous Zone**) para comparar los resultados de los diferentes estratos.

Notemos que en la zona **Budget**, rápidamente podemos ver el balance de agua, dando un clic sobre balance de masa (**Mass Balance**). Los resultados para esta simulación están mostrados en la figura 5.29.

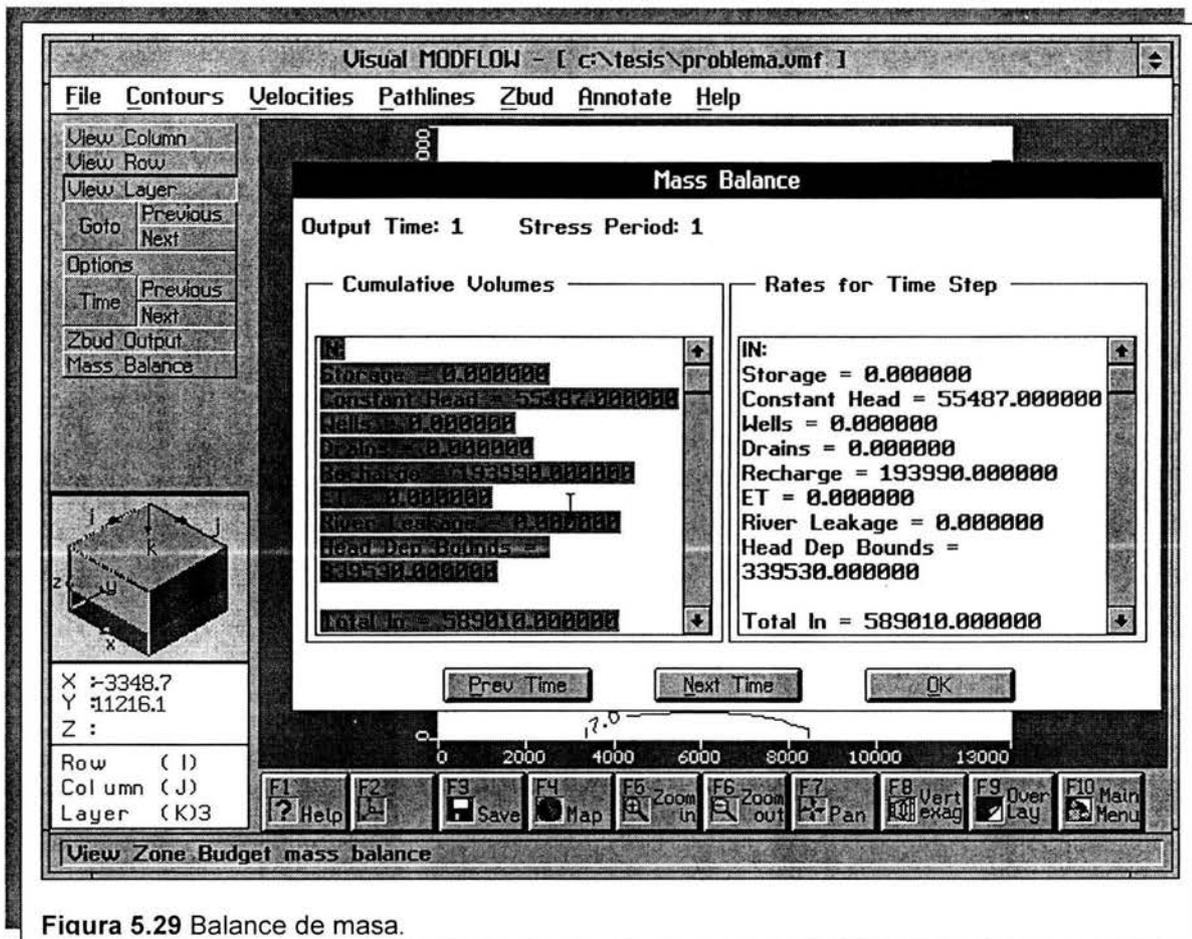


Figura 5.29 Balance de masa.

12 Ejecutando una simulación transitoria .-

Ahora vamos a ejecutar una simulación con flujo transitorio, considerando un programa de bombeo para pozos. Primero vamos a reejecutar la simulación con los pozos apagados para simular antes las condiciones de bombeo.

← en F10 menú principal (**Main Menu**).

- ⇐ en datos de entrada (**Input**).
- ⇐ en pozos (**Wells**), en la barra superior del menú principal.
- ⇐ en F5 (**Zoom in**) para un acercamiento del área como la mostrada en la figura

5.16.

- ⇐ en editar pozo (**Edit Well**) en el menú izquierdo.
- Vamos ahora a desactivar cada uno de los tres pozos para esta simulación.

Moveremos el cursor y ⇐ sobre un pozo.

El perfil del pozo en pantalla debería aparecer de pronto.

⇐ en desactivar pozo (**Deactivate Well**), al fondo de la ventana . Un símbolo de X debe ser marcado dentro del cuadro

- ⇐ en **Ok**.

Repetiremos el procedimiento desactivar pozo (**Deactive Well**) para los dos pozos restantes. Los tres pozos deberían tornarse azules, indicando con esto que ellos no serán considerados durante la simulación.

Reejecutaremos MODFLOW para las no condiciones de bombeo:

- ⇐ en archivo (**File**) en la barra de menú superior.
- ⇐ en menú principal (**Main Menu**).
- ⇐ en si (**Yes**) para salvar la información de los pozos.
- ⇐ en ejecutar (**Run**).
- ⇐ en estado estable (**Steady State**).
- ⇐ en **Ok**.
- ⇐ en ejecutar modelo (**Run**).

⇐ en ejecutar MODFLOW (**Run MODFLOW**) , debemos estar seguros de que una X este dentro del cuadro correspondiente.

- ⇐ en **Ok**.

MODFLOW se ejecutará. Ya que el propósito de la ejecución de esta simulación fue obtener una condición inicial para ejecutar la simulación transitoria, no existe la necesidad para visualizar los resultados. Ahora modificaremos el programa de bombeo para tener una velocidad de bombeo variable.

- ⇐ en datos de entrada (**Input**).
- ⇐ en pozos (**Wells**).
- ⇐ en editar pozos (**Edit Wells**).

Moveremos el cursor y ⇐ en cualquiera de los tres pozos.

Moveremos el cursor al área del programa de bombeo y modificaremos los flujos de bombeo similares como la mostrada en la figura 5.30. Debemos estar seguros de que el cuadro "desactivar pozo" este vacía.

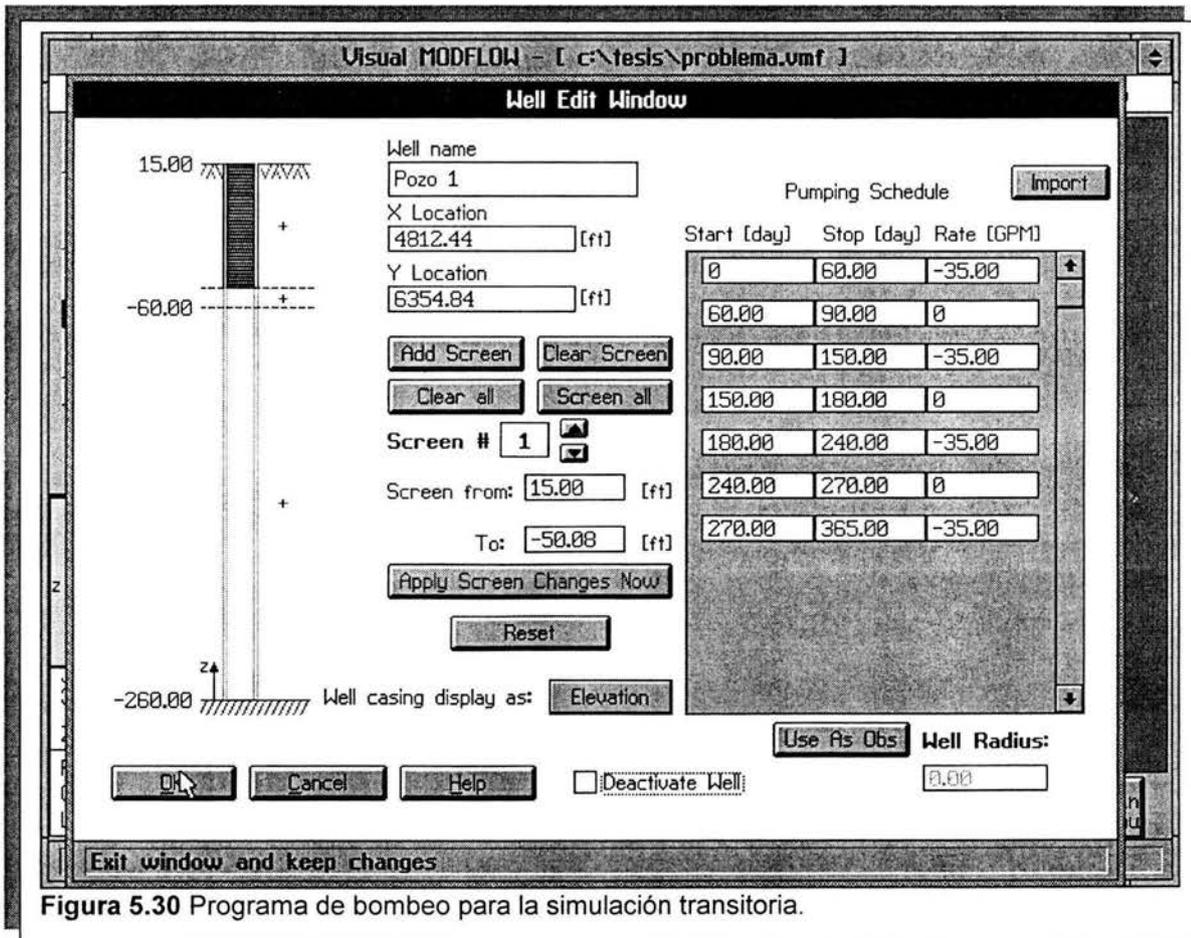


Figura 5.30 Programa de bombeo para la simulación transitoria.

← en **Ok**.

repetiremos el procedimiento anterior para modificar el programa de bombeo de los otros 2 pozos.

Antes de ejecutar MODFLOW, vamos a añadir tres pozos de observación, en tres diferentes profundidades, en la proximidad del centro de un pozo de bombeo. Esto permitirá tener una gráfica de carga contra tiempo, o abatimiento contra tiempo en estos puntos. Si habíamos medido las cargas, estos puntos podrían ser también usados como objetivos de calibración y seríamos entonces capaces de mostrar una gráfica para observar los cálculos de carga en diferentes tiempos.

- ← en calibrar (**Calibrate**) en la barra de menú superior.
- ← En si (**Yes**).
- ← en añadir pozos de observación (**Add Obs.**) sobre el menú izquierdo.
- ← en las proximidades del pozo de bombeo.
- ← dentro de la ventana nombre de pozo de observación (**Observation Name**).

escribiremos "profundo", como un nombre para este pozo de observación.

- ← en **Set Obs Point**.
- ← en el centro del cuadro inferior en el área del pozo. (la barra roja horizontal debería ser movida a ese punto).
- ← en **Ok**.

añadimos un pozo de observación a la mitad del acuífero inferior. Ahora agregaremos pozos de observación a la mitad del acuitardo y a la mitad del acuífero superior.

⇐ en añadir pozos de observación (**Add Obs.**).

Moveremos el cursor y ⇐ en las proximidades del pozo de bombeo.

⇐ en la ventana de nombre de observación (**Observation Name**) escribiremos "medio" como un nombre para el pozo de observación.

⇐ en **Set Obs Point**.

⇐ en el centro del acuitardo (mitad del estrato) en el área del pozo. La barra roja horizontal debería moverse a ese punto.

⇐ en **Ok**.

⇐ en añadir pozos de observación (**Add Obs.**).

Moveremos el cursor y ⇐ en las proximidades del pozo de bombeo.

⇐ en la ventana para nombre pozo de observación (**Observation Name**). escribiremos "superficial" como un nombre para el pozo de observación.

⇐ en **Set Obs Point**.

⇐ en el centro del estrato superior en el área del pozo. (la barra roja horizontal debería ser movida a ese punto.

⇐ en **Ok**.

reejecutaremos MODFLOW una vez más para simular las condiciones transitorias.

⇐ en archivo (**File**) en la barra superior de la pantalla principal.

⇐ en menú principal (**Main Menu**).

⇐ en si (**Yes**) para salvar la calibración de los pozos (pozos de observación).

⇐ en ejecutar (**Run**).

⇐ en transitorio (**Transient**).

⇐ en **Ok**.

Ya que la ejecución previa fue para el estado estable, estamos ofreciendo una elección para el tiempo de los datos de salida para ser usados como una condición inicial.

⇐ en ejecutar modelo (**Run**).

⇐ en ejecutar MODFLOW (**Run MODFLOW**) debemos estar seguros de que una X se encuentre dentro de la ventana.

⇐ en **Ok**.

MODFLOW reejecutara el modo transitorio, Visual MODFLOW identifica automáticamente el número de periodos de bombeo (**Stress**) para ser simulados. En este caso, ya que hay 7 diferentes velocidades de bombeo, 7 periodos de stress serán simulados, cada uno entonces se subdivide en dos pasos. Una vez más la simulación es hecha.

⇐ en datos de salida (**Output**).

Podemos ahora ver los contornos de carga hidráulica mostrados en la pantalla. ⇐ en siguiente periodo (**Next Time**) con esto podemos ver los resultados del final de cada periodo de bombeo. Exploraremos Visual MODFLOW el cual muestra los periodos futuros mediante gráficas de cargas contra tiempo en cualquier monitoreo de pozo.

⇐ en selección (**Select**).

⇐ en ventana (**Box**).

extenderemos una ventana alrededor del centro del pozo para seleccionar todos los pozos monitoreados en esa área. El monitoreo de pozos debería tornarse azul.

← en carga vs. tiempo (*Head vs. Time*).

Veremos una gráfica carga contra tiempo similar a una mostrada en la figura 5.31. Los niveles del agua en el acuífero inferior (pozo profundo, *deep*) casi no responden al bombeo, mientras que los niveles en el acuífero superior (pozo superficial, *shallow*) presentan los efectos más pronunciados.

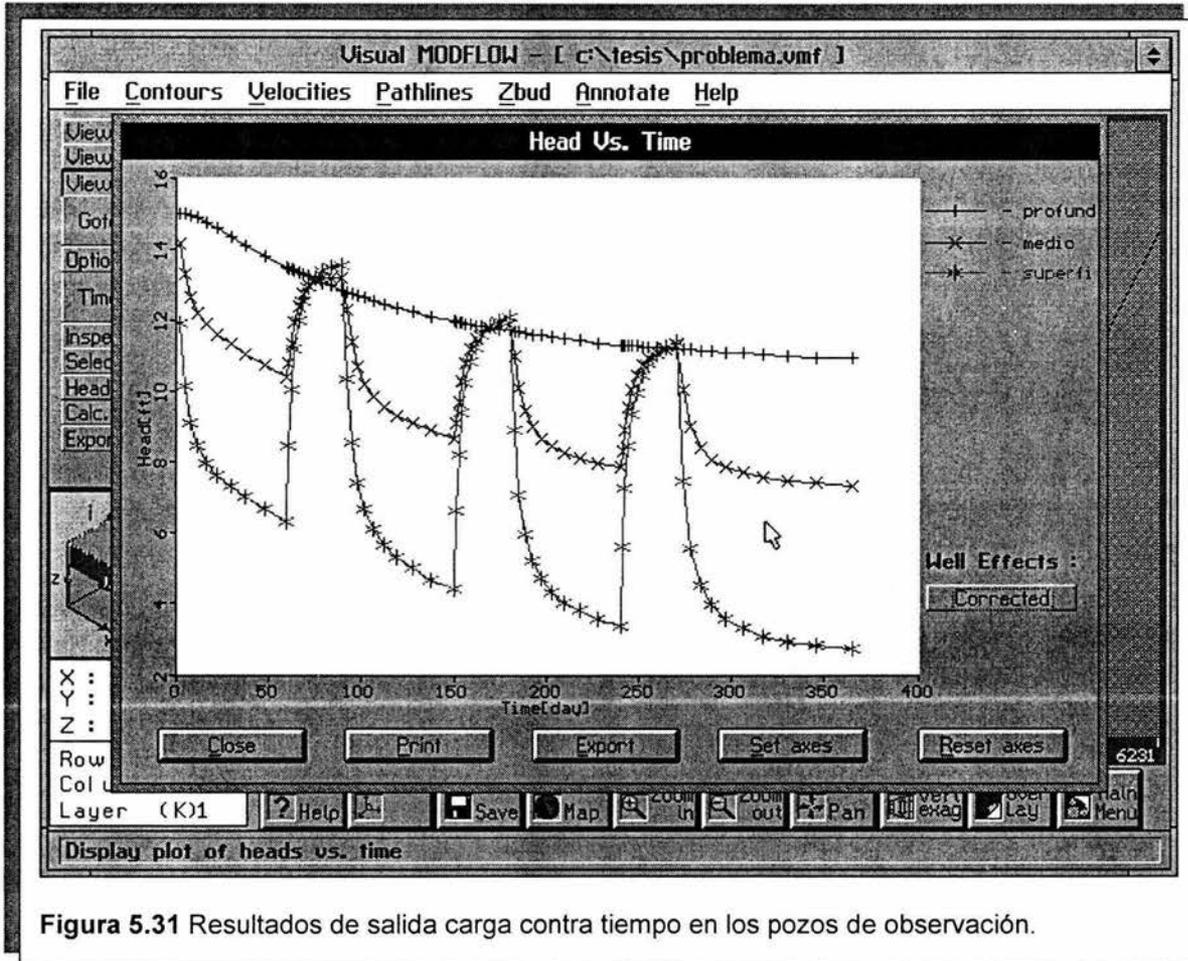


Figura 5.31 Resultados de salida carga contra tiempo en los pozos de observación.

Con esto damos por concluido el problema 5.1.

- ← en cerrar (*Close*).
- ← en archivo (*File*).
- ← en menú principal (*Main Menu*).
- ← en archivo (*File*).
- ← en salir (*Exit*).

5.2 EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ZONA DE CAPTACIÓN DE UN ACUÍFERO

5.2.1 OBJETIVOS DEL PROBLEMA

1. Crear un sistema de multi-acuíferos.
2. Observar los efectos de una anisotropía vertical y recarga de volúmenes de contaminantes en tres dimensiones y zona de captura para pozos en sistemas de multi-acuíferos.
3. Notar la diferencia entre la zona de captura para tres dimensiones vs zona de captura para dos dimensiones.
4. Describir los efectos de condiciones de frontera de no flujo en la simulación de estado establecido.

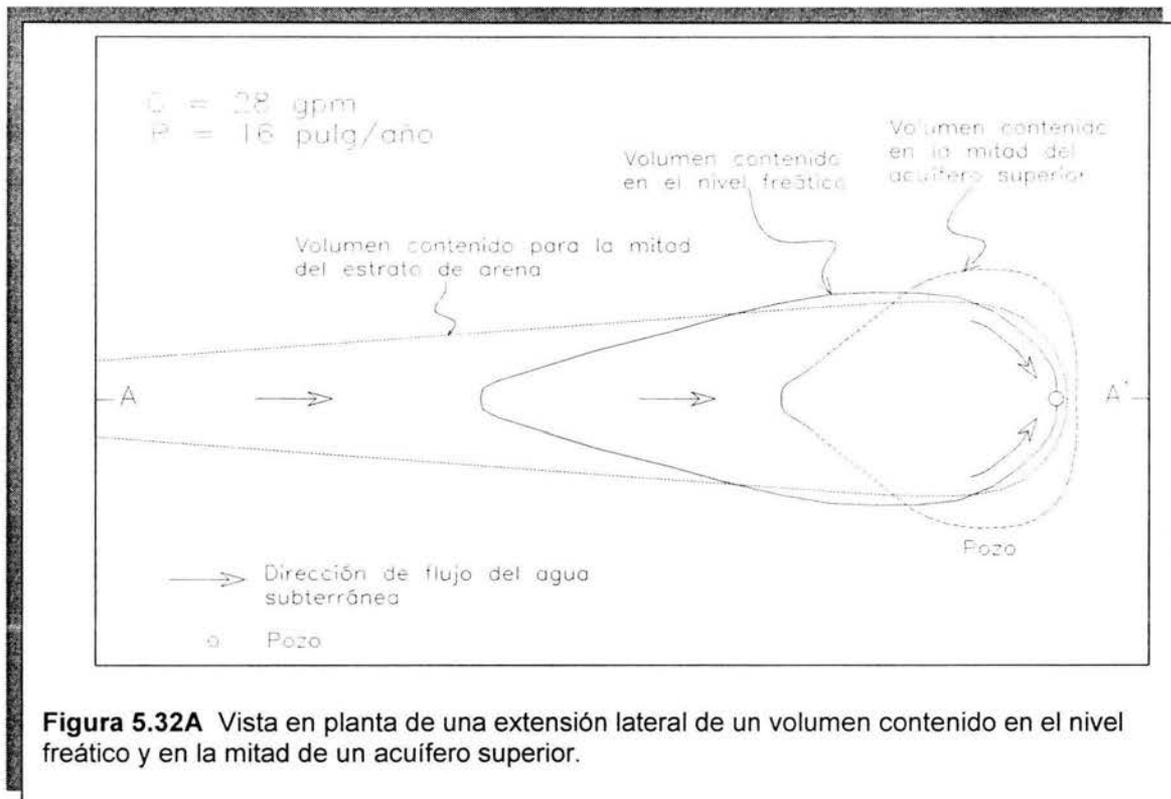
5.2.2 BREVE DESCRIPCIÓN

Para el análisis de la zona de captura y del volumen contenido de agua subterránea, la presentación por Larson et al. (1987) es uno de los primeros intentos para ilustrar las diferencias significativas entre los resultados de los modelos en dos y tres dimensiones de las zonas de captura y volúmenes contenidos. Hasta hoy, muchos acuíferos fueron analizados con modelos en dos dimensiones, la inmensa mayoría isotrópico en la naturaleza.

Estos autores señalan cómo la velocidad de recarga determina el área horizontal del volumen contenido en la superficie del nivel freático para un pozo de bombeo (área = velocidad de bombeo/recarga), mientras que la forma del volumen contenido debajo del nivel freático es determinado por el grado de una penetración parcial, de la proporción de la conductividad hidráulica horizontal a la vertical, de la velocidad y dirección del flujo del agua subterránea y de cualquier grado de heterogeneidad que pudiera estar presente. Estas generalidades son válidas si el suministro de recarga es la mayor fuente de agua subterránea (el origen de la superficie subterránea de agua es insignificante). Por ejemplo, para un acuífero homogéneo, pero anisotrópico, se muestra una penetración más profunda del pozo de bombeo y/o una conductividad hidráulica vertical más alta que incrementará la profundidad del volumen contenido y disminuirá el ancho. Lo opuesto es verdad para una penetración de pozos poco profundos, una baja conductividad hidráulica vertical.

Muchos ejemplos ilustran estos conceptos y son presentados para incluirse en una tercera dimensión, problemas en una zona de captura contaminada para un sistema multi-acuífero y anisotrópico (K_h / K_v), con recarga. En este ejemplo a pesar de que un pozo penetra la carga de un *Plume* (pluma de contaminación), los resultados del volumen contenido en tres dimensiones mostraron que la mayor parte del contaminante no fue capturado. Aunque no ampliamente citado en la literatura, su trabajo es muy instructivo por la implicación que tiene para los diseños de captura en contaminantes y el análisis de la protección de manantiales en acuíferos heterogéneos, anisotrópicos, y en tres dimensiones, en los cuales la recarga juega un papel muy importante.

La línea punteada en la figura 5.32A muestra la forma de un volumen contaminado para la mitad del estrato de arena pronosticada por un modelo en dos dimensiones, el cual no tomó en cuenta el flujo vertical. La figura 5.32B muestra un perfil vertical de una verdadera zona de captura usando un modelo tridimensional, el cual considera un flujo vertical. Si este diseño de limpieza general hubiera sido basado en un modelo de dos dimensiones, hubiera fallado, como muchos de los volúmenes esperados que no serían capturados. En efecto en este caso, de un diseño dimensional, una gráfica de concentración vs. tiempo mostraría un decremento hasta que el cero fuera alcanzado. En el cual en este punto uno debería concluir erróneamente que no existe contaminación y que la operación fue un éxito.



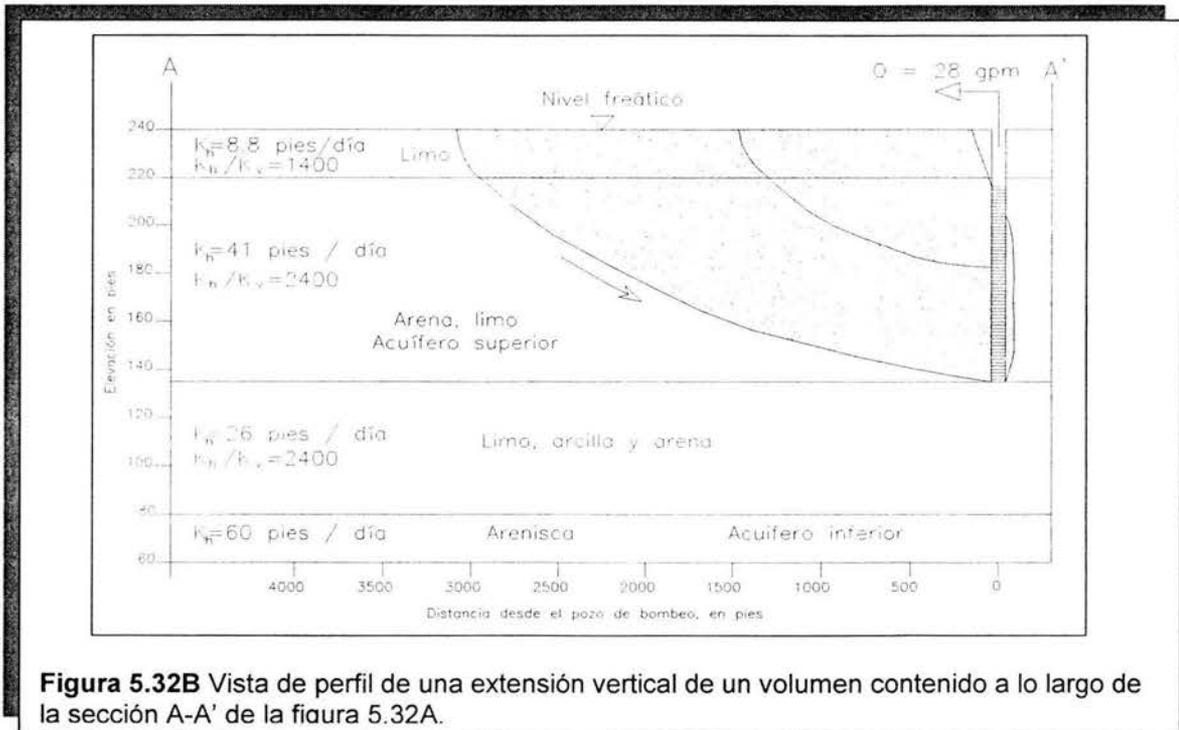


Figura 5.32B Vista de perfil de una extensión vertical de un volumen contenido a lo largo de la sección A-A' de la figura 5.32A.

Estos resultados fueron obtenidos usando el modelo de flujo tridimensional U.S.G.S. de Trescott y Larson (1976) junto con un simple modelo de "pathline". El uso de U.S.G.S. del MODFLOW y MODPATH para el mismo problema resulta muy similar, pero no igual. Nos permitimos usar VISUAL MODFLOW (y el U.S.G.S. del MODFLOW y MODPATH) para simular este problema.

5.2.3 ENTRADA DE DATOS

1 Inicio de Visual MODFLOW.- Para ejecutar MODFLOW se hace doble clic en el icono de MODFLOW que aparece en el escritorio de windows cuando se ha instalado previamente el programa y se le da acceso directo al mismo, en caso de que no sea así buscaremos mediante el explorador de window la carpeta VMODFLOW, la cual contiene el archivo ejecutable VMODFLOW, daremos doble clic sobre este archivo para entrar en el ambiente de Visual MODFLOW.

Estamos ahora en la primer pantalla de Visual MODFLOW.

2 Generación de un nuevo conjunto de datos.-

⇐ en archivo (**File**), un menú aparecerá.

⇐ en nuevo (**New**).

Una ventana de diálogo de selección de archivo se mostrará con el cursor en el cuadro del nombre del archivo.

escribiremos: *Problema 5-2*

⇐ en **Ok**.

Usando la figura 5.33 como una guía, señalaremos y haremos clic en las siguientes unidades:

Length: feet
Conductivity: ft/day
Time: days
Pumping rate: US gpm
Recharge: inches/year

Distancia: pies
 Conductividad: pies / día
 Tiempo: días
 Gasto de bombeo: US galones por minuto
 Recarga: pulgadas / año

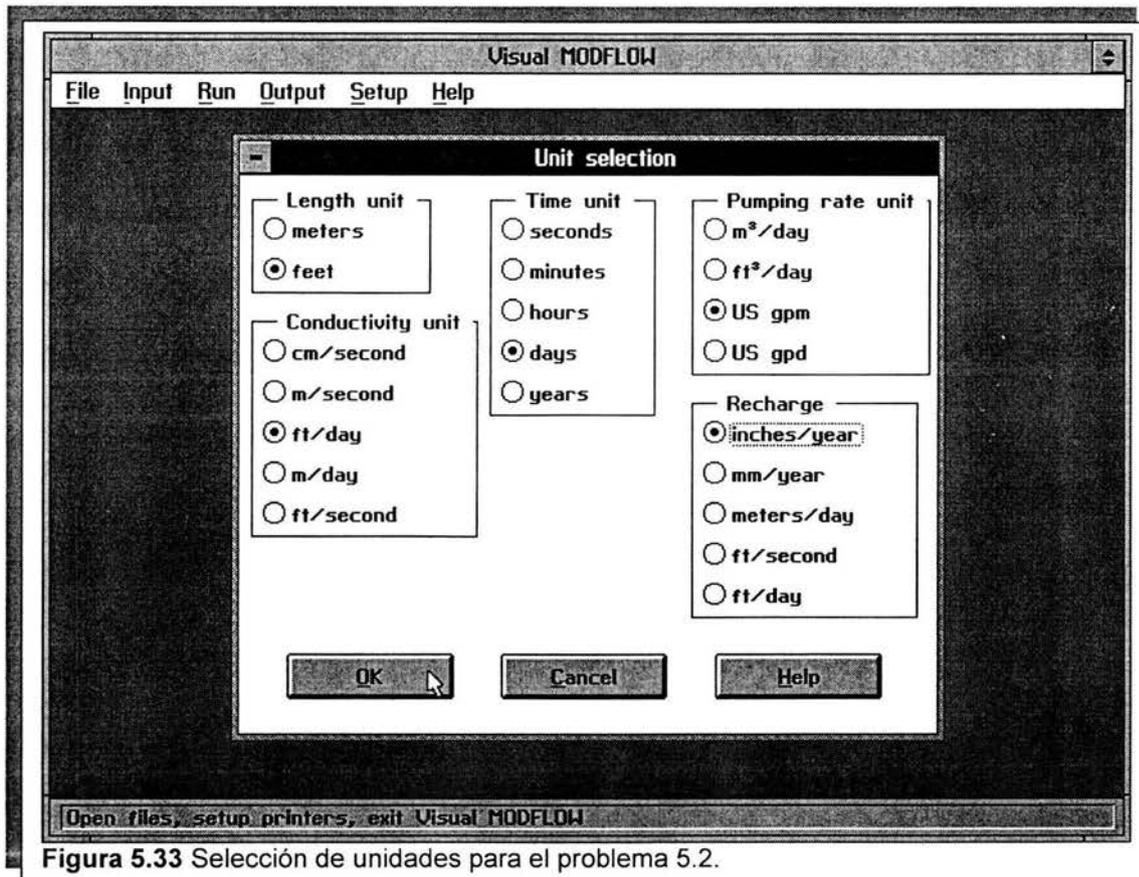


Figura 5.33 Selección de unidades para el problema 5.2.

⇐ en **Ok**.

Se nos preguntará “¿Recuperar coordenadas del sitio desde un mapa DXF?” (“**Retrieve site coordinates from a DXF Map?**”)

⇐ en **No**.

3 Creación de la malla .- Ahora dimensionaremos la malla, escribiremos lo siguiente:

Introduciremos el número de columnas	30 ↓
Introduciremos el mínimo X (ft)	0 ↓
Introduciremos el máximo X (ft)	6000 ↓
Introduciremos el número de filas	20 ↓
Introduciremos el mínimo Y (ft)	0 ↓
Introduciremos el máximo Y (ft)	3000 ↓

Introduciremos el número de estratos 1 ↵
 Introduciremos la mínima Z (ft) 50 ↵
 Introduciremos la máxima Z (ft) 240 ↵
 ← en **Ok**.

Una malla de 20 x 30 aparecerá.

5.2.4 CONDICIONES DE EXPLOTACIÓN

4 Propiedades del acuífero y recarga.-

Incorporaremos 4 unidades hidroestratigráficas (estratos por arriba y debajo de los acuíferos).

El acuífero superior de la figura 5.32A tiene aproximadamente un espesor de 160 pies y consiste en 3 subunidades cada uno con una conductividad hidráulica horizontal diferente y una relación particular de K_h / K_v . Este acuífero se extiende sobre una arenisca limpia, e isotrópica, de aproximadamente 80 pies de ancho, conocido como el acuífero inferior. En este momento tenemos un estrato en el modelo. Usando la figura 5.34 como una guía, definiremos un modelo con 4 estratos.

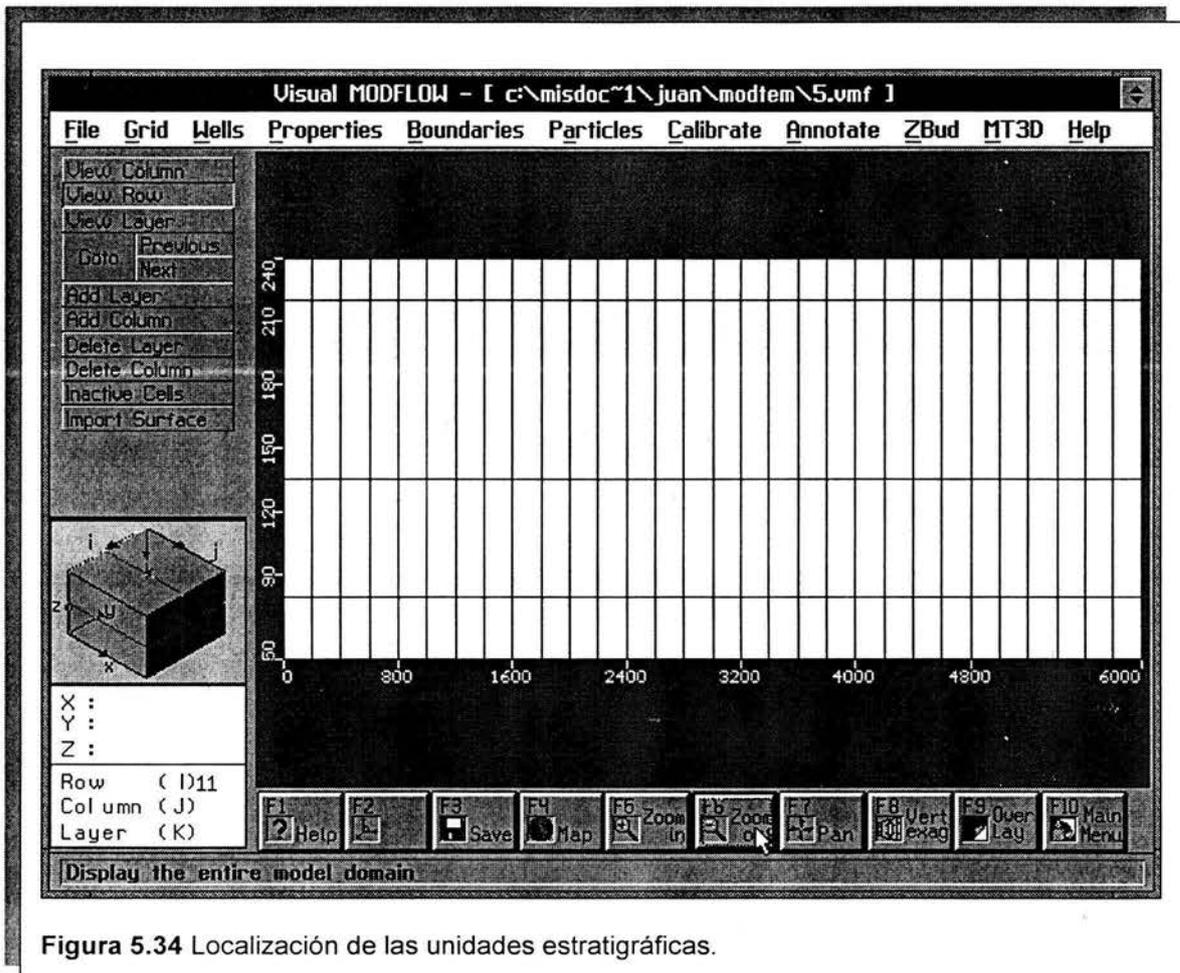


Figura 5.34 Localización de las unidades estratigráficas.

- ⇐ en datos de entrada (**Input**).
- ⇐ en vista en fila (**View Row**).

Moveremos el cursor del mouse a cualquier parte en la malla.

- ⇐ una vez más (para ver una vista de perfil con una no exageración vertical).

El acuífero es demasiado delgado para verse, propondremos una exageración vertical en la malla.

⇐ en la tecla función 8, exageración vertical (**Vert exag**) en el botón inferior de la pantalla.

Teclearemos 15 ↵

- ⇐ en **Ok**.
- ⇐ en añadir estrato (**Add Layer**).

Si deseamos añadir algún estrato en una localización precisa. Necesitaremos el botón derecho del mouse para esto:

Moveremos el cursor para cualquier lugar en la malla y ⇒ en el botón derecho del mouse

Una ventana aparecerá con tres opciones. Y añadiremos solamente una línea en la malla, solamente necesitamos decir dónde queremos un estrato horizontal. Si no existe un punto negro en el círculo de la opción "**Add horizontal layer at**", haremos clic sobre ese círculo.

Colocaremos el cursor en frente del número en el cuadro (la flecha se convertirá en una línea vertical) clic y mientras sostenemos el botón del mouse, arrastraremos el mouse al lado derecho para crear una barra verde cruzando el número actual.

Teclearemos 220 ↵ (elevación del estrato de arenisca).

- ⇐ en **Ok**.

Podemos ver extrañas líneas rojas. Estas desaparecerán cuando la pantalla se redibuje (**Redraw**), que se logra pulsando la tecla F6 (**Zoom out**).

Con el cursor en cualquier área en la malla, ⇒ sobre el botón derecho del mouse.

Repetiremos como arriba: ⇐ en una sola línea del cuadro antes del número, arrastraremos una franja verde cruzando el número y:

Escribiremos 135 ↵ (elevación del acuífero superior de arena limosa **sand silt**).

- ⇐ en **Ok**.

Con el cursor del mouse en cualquier área de la malla, clic sobre el botón derecho del mouse.

Repetiremos como arriba: clic en una sola línea de la ventana, arrastraremos una franja verde hasta cruzar el número y:

Escribiremos 80 ↵ (elevación del acuífero inferior de arena).

← en **Ok**.

Identificaremos una pantalla como la figura 5.34, deberíamos ver 3 líneas horizontales y negras definiendo 4 unidades hidroestratográficas conformando la parte superior e inferior de los acuíferos. Si aparece cualquier línea extraña roja, clic en la tecla F6 (**Zoom out**) para redibujar la malla.

5 Refinamiento de la malla por estrato.-

Refinaremos la malla vertical para añadir más estratos a esa parte del acuífero superior que contiene un pozo que penetra completamente (de 135 a 220 pies, como lo muestra la figura 5.32B).

← sobre la tecla función 6 (**Zoom out**) para redibujar la pantalla.

← en añadir estrato (**Add Layer**).

Con el cursor en cualquier lugar en el área de la malla, clic sobre el botón derecho del mouse.

← sobre el espacio "**Add horizontal layer at**".

Clic en la ventana antes del número actual y arrastraremos una barra verde.

Escribiremos 210 ↵

← en **OK**.

Con el cursor situado entre los estratos con cotas 135 y 210 ⇒ en el botón derecho del mouse.

← en "**Split current layer into**"

Escribiremos 5 ↵

← en **OK**.

Empezando en 135, colocamos un estrato cada 15 pies; el último estrato es solamente de 10 de pies de ancho, para un total de 6 estratos).

← en la tecla F6 (**Zoom out**) para redibujar la malla.

← sobre añadir estrato (**Add Layer**) añadiremos un estrato cerca del pozo en pantalla.

Colocaremos la línea roja del cursor entre los estratos en 135 y 150 y haremos clic una vez más.

Una línea azul aparecerá. Cuando la pantalla esta redibujandose usando la tecla F6, todas las líneas se tornaran negras, (después colocaremos partículas hacia atrás en este estrato delgado cerca de la base de la rejilla del pozo para ayudar a definir mejor la frontera exterior del volumen contenido).

← sobre la tecla F6 (**Zoom out**) para redibujar la malla.

Veremos una malla similar a la figura 5.35.

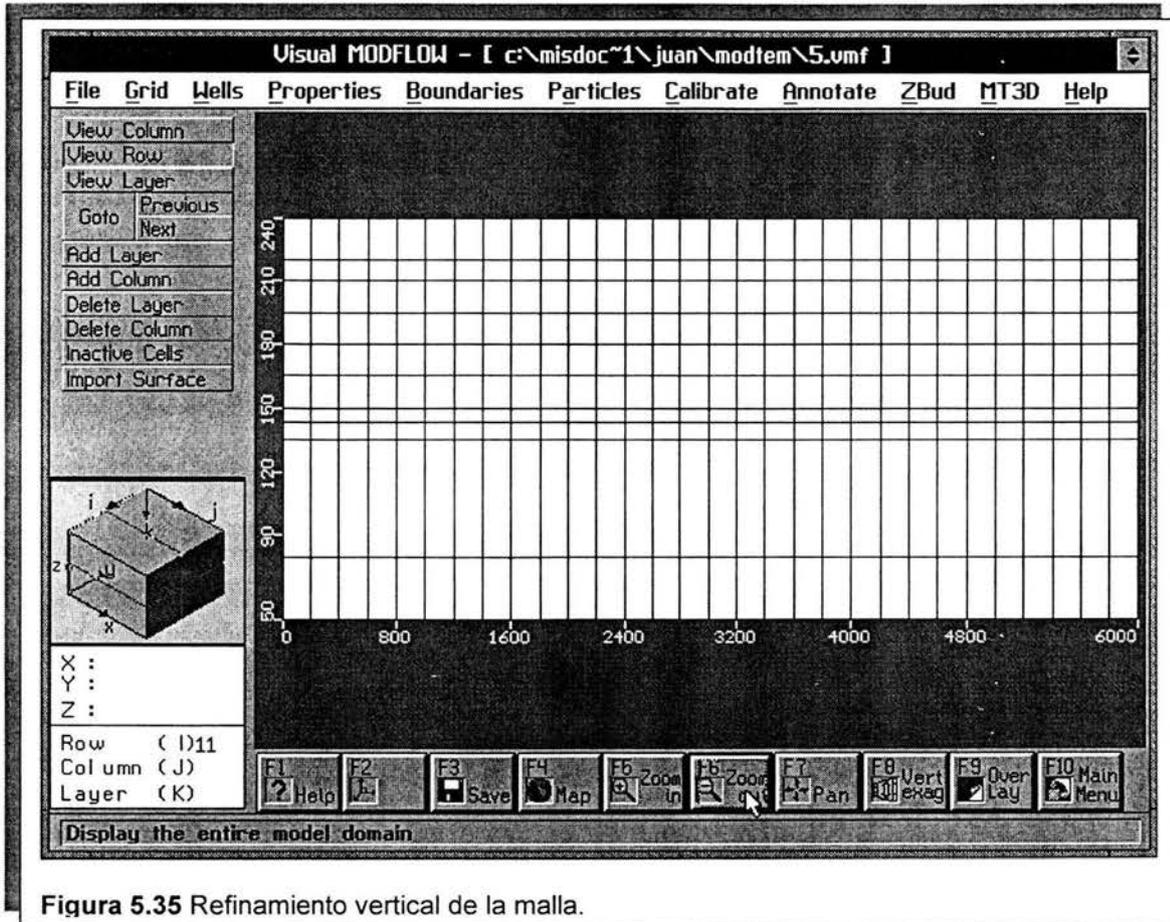


Figura 5.35 Refinamiento vertical de la malla.

6 Propiedades del material y datos de entrada para la recarga .-

← en vista de estrato (**View Layer**).

Moveremos el cursor al estrato 1, indicada por una barra roja y clic.
Una vista en planta del estrato 1 aparecerá.

← en propiedades (**Properties**) en la barra superior del menú principal.

← en conductividad (**Conductivity**).

← en sí (**Yes**), para salvar los datos de la malla.

Teclearemos el siguiente valor:

K_x (ft/d) 8.8 ↵

Por defecto Visual MODFLOW sitúa K_y igual a K_x . Esto es así ya que MODFLOW permite solamente una relación de K_x / K_y por estrato. Por esta razón debemos tener cuidado cada vez que las propiedades de diferentes materiales son introducidos en el mismo estrato puesto que sería engañoso ya que MODFLOW aceptará solamente un valor de esta razón por estrato. Por este motivo K_y es asignada como la misma para K_x . Después si uno desea asignar una razón anisotrópica para cada estrato, esto puede ser hecho por una simple edición del archivo BCF.

K_z	0.00628 ↓	($K_x/K_z = 1400$)
S_s	0.001 ↓	
S_y	0.015 ↓	
Por	0.25 ↓	

← en **Ok**.

Estas propiedades de los materiales por defecto son asignadas a todas las celdas en todos los 10 estratos. En este ejemplo estaremos ocupándonos con problemas de estado establecido. Por esta razón no estaremos usando las propiedades de almacenamiento de cada unidad hidroestratográfica. Por lo tanto permitiremos los valores de almacenamiento (S_s , S_y y Por) para todas las estratos de abajo que serán las mismas a los valores por defecto de arriba para el estrato superior de Limo (silt). Si de cualquier modo uno desea ejecutar el análisis de estado no establecido o transitorio en el futuro, los valores de los parámetros de almacenamiento apropiados deben ser introducidos para cada estrato.

Ya que en realidad cada estrato tiene una conductividad hidráulica diferente, modificaremos los valores de propiedad estrato por estrato. Empezaremos con el estrato 2.

← en siguiente (**Next**) en el menú que se encuentra al lado izquierdo de la pantalla.

Verificaremos el cubo navegador abajo del menú para ver si el estrato 2 esta indicado. Además si movemos el cursor dentro de la malla, la descripción de la fila, columna, y el estrato del cubo cambian, en el fondo de la pantalla deberíamos ver estrato 2 (**layer 2**).

← en asignar ventana (**Assign Window**).

Moveremos el cursor al centro de la celda que se encuentra en la parte de la esquina superior izquierda (fila 1, columna 1), clic para anclar una esquina de una ventana.

Arrastraremos la ventana diagonalmente con el mouse para el centro de otra celda que se encuentra en la esquina inferior derecha (fila 20, col 30.) y clic para anclar la otra esquina de la ventana.

Una ventana para asignar K aparecerá.

Escribiremos 2 ↵ (para la propiedad del material número 2, la propiedad del material número 1 es el valor por defecto).

El estrato completo se tornará azul, color para la propiedad del material 2.

⇐ en la ventana K_x y escribiremos 41 ↵

Escribiremos 0.0171 ↵ (K_z ; razón anisotrópica = $K_x / K_z = 2400$).

⇐ en **Ok**.

Copiaremos las propiedades de la conductividad hidráulica para del estrato 2.

⇐ en copiar estrato (**Copy Layer**).

⇐ en copiar todas las propiedades, en la parte superior de la ventana copiar.

⇐ sobre estratos 3 al 8 en la ventana copiar (**Copy**), cubriendo cada número de color verde.

⇐ en **Ok**.

⇐ en ir a (**Goto**).

Teclearemos 9 ↵

⇐ en **Ok**.

Repetiremos los pasos anteriores:

⇐ sobre asignar ventana (**Assign Window**).

Moveremos el cursor al centro de la celda que se encuentra en la esquina superior izquierda (fila 1, columna 1) y clic para anclar una esquina de una ventana.

Arrastraremos la ventana diagonalmente con el mouse al centro de otra celda que se localiza en la esquina inferior derecha (fila 20, columna 30) y clic para anclar la otra esquina de la ventana.

Escribiremos 3 ↵ (propiedad del material # 3; verde es el color).

⇐ en el cuadro para K_x y escribiremos 26 ↵

Escribiremos 0.0108 ↵ (K_z ; razón anisotrópica = $K_x / K_z = 2400$).

⇐ en **Ok**.

⇐ en siguiente (**Next**), para movernos al estrato 10; veremos el cubo navegador y el indicador de estratos.

Repetiremos los pasos anteriores:

⇐ en asignar ventana (**Assign Window**).

Moveremos el cursor hacia el centro de la celda que se encuentra en la esquina superior izquierda (fila 1, columna 1) y clic para anclar una esquina de una ventana.

Arrastraremos la ventana diagonalmente con el mouse hacia el centro otra celda que se encuentra en la esquina inferior derecha (fila 20, columna 30) y clic para anclar la otra esquina de la ventana.

Escribiremos 4 ↵ (propiedad del material # 4; el color es verde azulado)

Clic en el cuadro K_x y escribiremos 50 ↵

Escribiremos 50 ↵ (K_z ; acuífero isotrópico).

← sobre **Ok**.

Ahora ingresaremos los datos de entrada por recarga del estrato superior 1. Para regresar al estrato 1 desde el estrato actual 10:

← en ir a (**Goto**).

Teclearemos 1 ↵

← en **Ok**.

← en fronteras (**Boundaries**).

← en recarga (**Recharge**).

← en el cuadro **Stop time** introduciremos 365 ↵

Estamos por introducir una velocidad de recarga por defecto en pulgadas por año (**in/yr**).

Escribiremos 15 ↵

← sobre **Ok**.

7 Creación de pozos.-

Necesitamos un pozo que penetre la captura de contaminantes y que atraviese los estratos 2 a 8.

← sobre pozos (**Wells**) en la barra superior del menú principal.

← en si (**Yes**), para salvar las propiedades de los datos anteriores.

← en añadir pozo (**Add Well**).

Moveremos el cursor del mouse en cualquier lugar en la malla y ← una vez más.

La ventana de edición de pozo aparecerá. Aquí podemos especificar la localización del pozo dentro de la malla y su programa de bombeo, como muestra la figura 5.36.

← en el nombre del pozo en la parte superior de la pantalla y escribiremos PW-1.

Entonces presionaremos ↵

Escribiremos 5000 ↵ (localización en X)

Escribiremos 1500 ↵ (localización en Y)

← sobre añadir rejilla de pozo (**Add Screen**) y sostendremos el botón izquierdo justo antes del número en el cuadro rejilla de pozo (**Screen from**).

Entonces arrastraremos una barra verde en el número actual.

Escribiremos 135 ↵ (localización del fondo la rejilla).

Escribiremos 220 ↵ (localización de la rejilla en su parte superior).

← en "**Apply Screen Changes Now**".

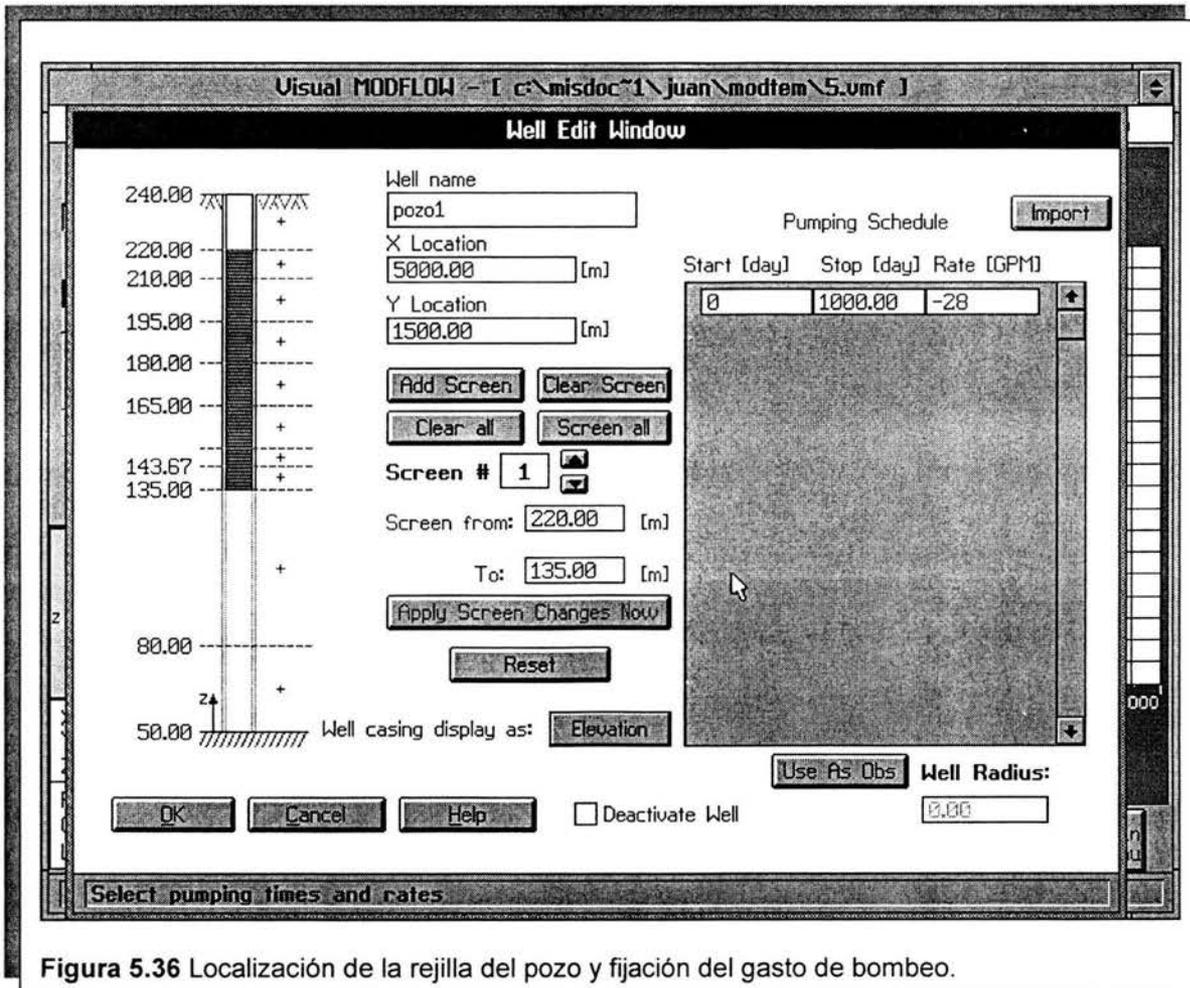


Figura 5.36 Localización de la rejilla del pozo y fijación del gasto de bombeo.

Una pantalla azul aparecerá de 135 a 220 pies.

← en el cuadro parar (**Stop**) del programa de bombeo (lado derecho de la pantalla).

Escribiremos 1000 ↵

Escribiremos -28 (28 gpm; la tecla entrar no es necesaria; no olvidemos que el signo negativo es para la extracción).

Si oprimimos entrar (**Enter**) obtendremos otra fila completa. Solo ignoraremos esto y daremos un clic sobre **Ok**. La ventana de edición de pozo sería similar a la figura 5.36.

← en **Ok**.

Un punto rojo aparecerá en $X = 5000$ $Y = 1500$. Una cuestión de cuidado es que el área de la malla próxima al pozo es considerada por MODFLOW como el área del pozo. Esto significa que un pozo con 6 pulgadas de diámetro, en una celda de 200 X 200 es considerado por el modelo para tener un área efectiva de 40,000 ft². Esto ilustra una razón por el cual el refinamiento de la malla es siempre hecha alrededor de los pozos.

8 Refinamiento la malla cerca del pozo.-

Refinaremos la malla en la proximidad del pozo añadiendo 3 o 4 filas, similar a la malla mostrada en la figura 5.37.

← en malla (**Grid**) , en la barra superior del menú principal

← en si (**Yes**), para salvar los datos de pozos.

← en añadir columna (**Add Column**). Usando la figura 5.37 como guía, moveremos la línea del cursor vertical hasta que se encuentre en el centro del área roja asurada, entonces haremos clic para colocar una columna la cual divide el área asurada en dos partes. Moveremos el mouse a la posición de la siguiente columna y clic para asegurar el procedimiento. Repetiremos el proceso, añadiendo 3-4 columnas en todo hasta que la malla sea similar a la figura 5.37.

Redibujaremos la pantalla presionando la tecla F6.

← en añadir fila (**Add Row**). Usando la figura 5.37 como referencia, moveremos el cursor al centro del área roja asurada y clic para colocar una fila. Dividiendo el área externa en dos partes. Moveremos el mouse a la posición de la siguiente fila y clic para asegurar el procedimiento. Repetiremos este proceso, añadiendo 3-4 filas en todo hasta que la malla sea similar a la figura 5.37

← sobre la tecla 6 (**Zoom out**), para redibujar la pantalla.

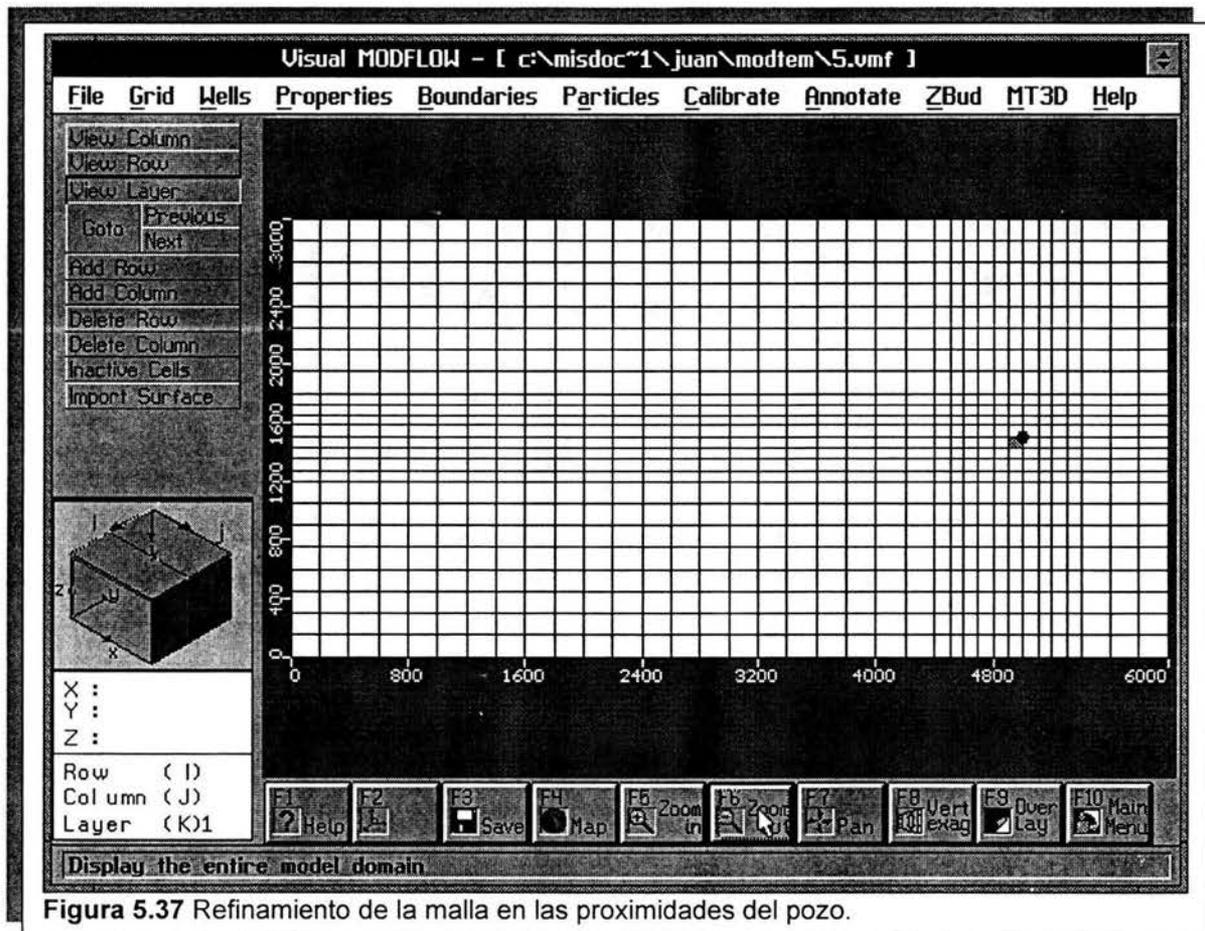


Figura 5.37 Refinamiento de la malla en las proximidades del pozo.

Para ayudar a definir y visualizar el volumen contenido y la zona de captura, colocaremos la localización de partículas hacia atrás alrededor del pozo, y localización de partículas hacia delante en la parte izquierda y derecha del pozo.

Partículas hacia delante:

- ⇐ sobre partículas (**Particles**) en la barra del menú en la parte superior.
- ⇐ en si (**Yes**), para salvar los datos de la malla.
- ⇐ en añadir línea (**Add Line**).

Usando la figura 5.38 como una guía, ⇐ sobre una localización a la derecha del pozo pero en la misma fila. Arrastraremos la línea horizontalmente a la izquierda hasta una X aproximadamente igual a 500 ft.

⇐ en **Ok**, aceptaremos 10 partículas distribuidas y niveladas; el valor por defecto cuando se añade una línea es elegida hacia adelante (**Forward**) las partículas son verdes.

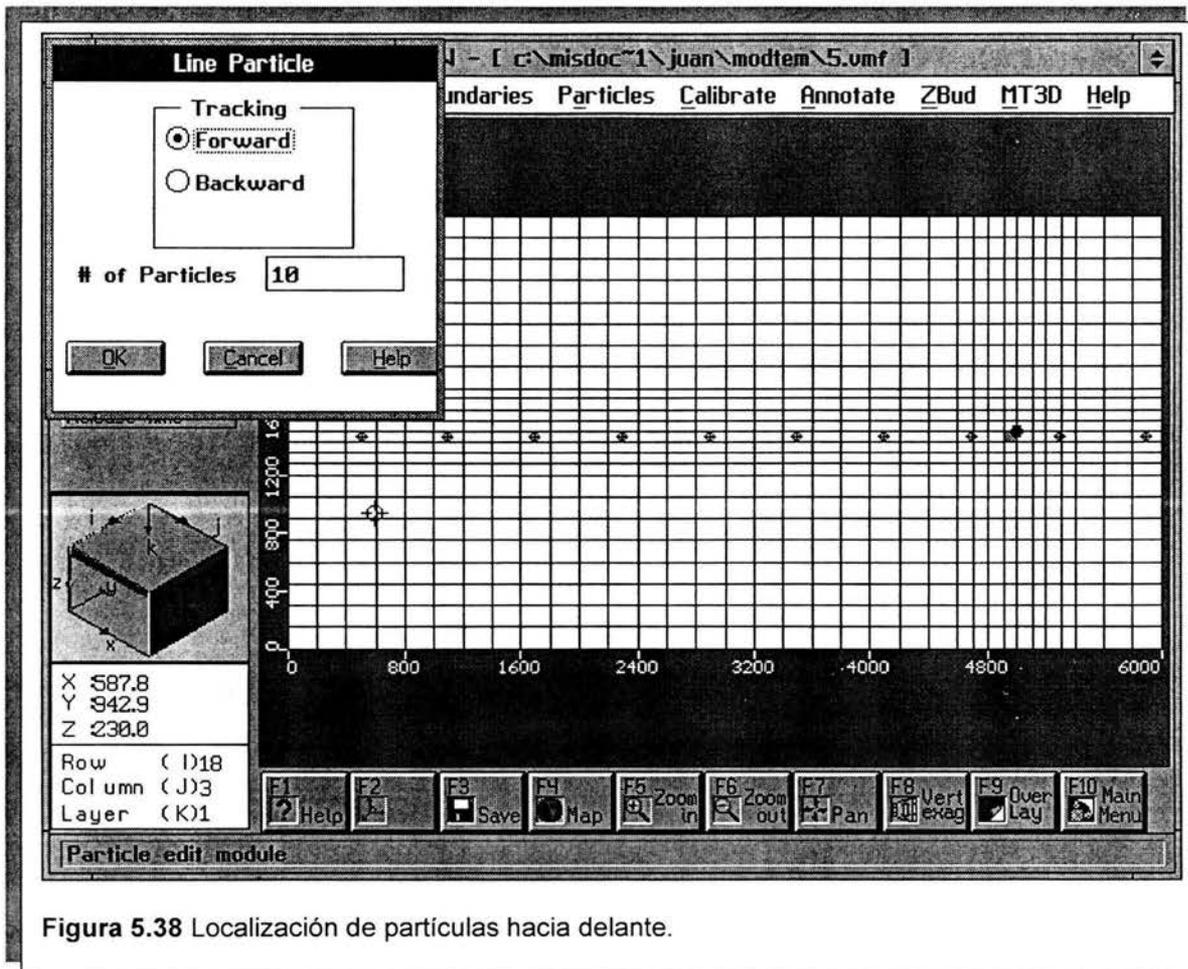


Figura 5.38 Localización de partículas hacia delante.

⇐ sobre vista de estrato (**View Layer**).

⇐ en siguiente (**Next**), (para movernos al estrato 2, el primer estrato contiene el pozo completamente penetrado).

Sería más fácil añadir las partículas hacia atrás si hacemos un acercamiento al pozo (**Zoom in**).

⇐ sobre la tecla F5 (**Zoom in**).

Consultando la figura 5.39, moveremos el cursor a una localización muy corta para la izquierda superior del pozo y clic una vez más para anclar una esquina de una ventana.

Arrastraremos el cursor diagonalmente para mover el cursor a una posición escasamente a la derecha y abajo del pozo y clic una vez más.

Un **Zoom** en la ventana aparecerá, similar a la figura 5.40 (por el momento, sin el circulo de partículas).

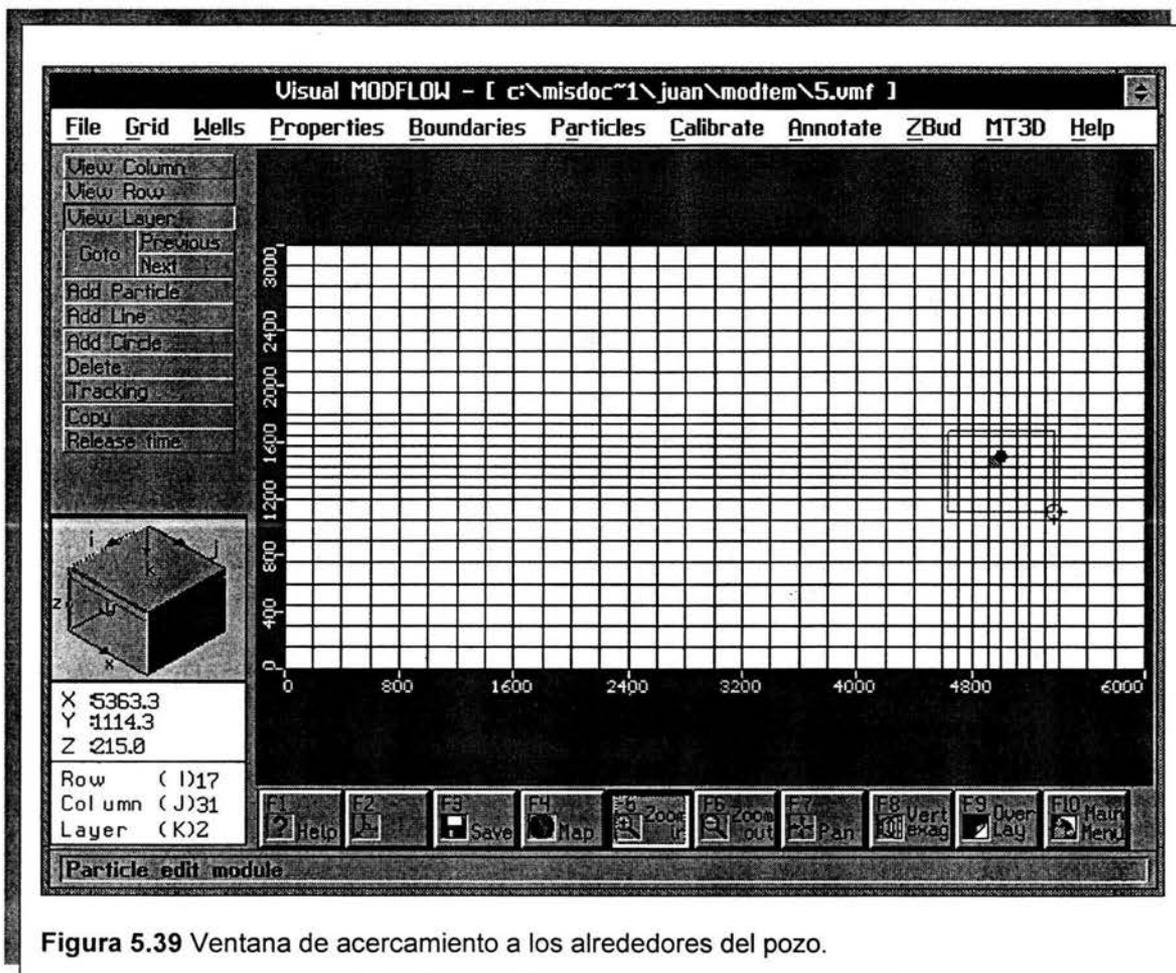


Figura 5.39 Ventana de acercamiento a los alrededores del pozo.

⇐ en añadir círculo (**Add Circle**).

Moveremos el cursor circular hacia el centro del área roja asurada, clic y sostendremos el botón izquierdo mientras nos movemos lentamente para crear un círculo escasamente más grande que el área asurada, ocuparemos el botón izquierdo del mouse para producir un círculo. Entonces haremos clic en el botón izquierdo una vez más para colocar 10 partículas hacia atrás (**backward**) alrededor del pozo. Deberíamos ver algo similar a la figura 5.40.

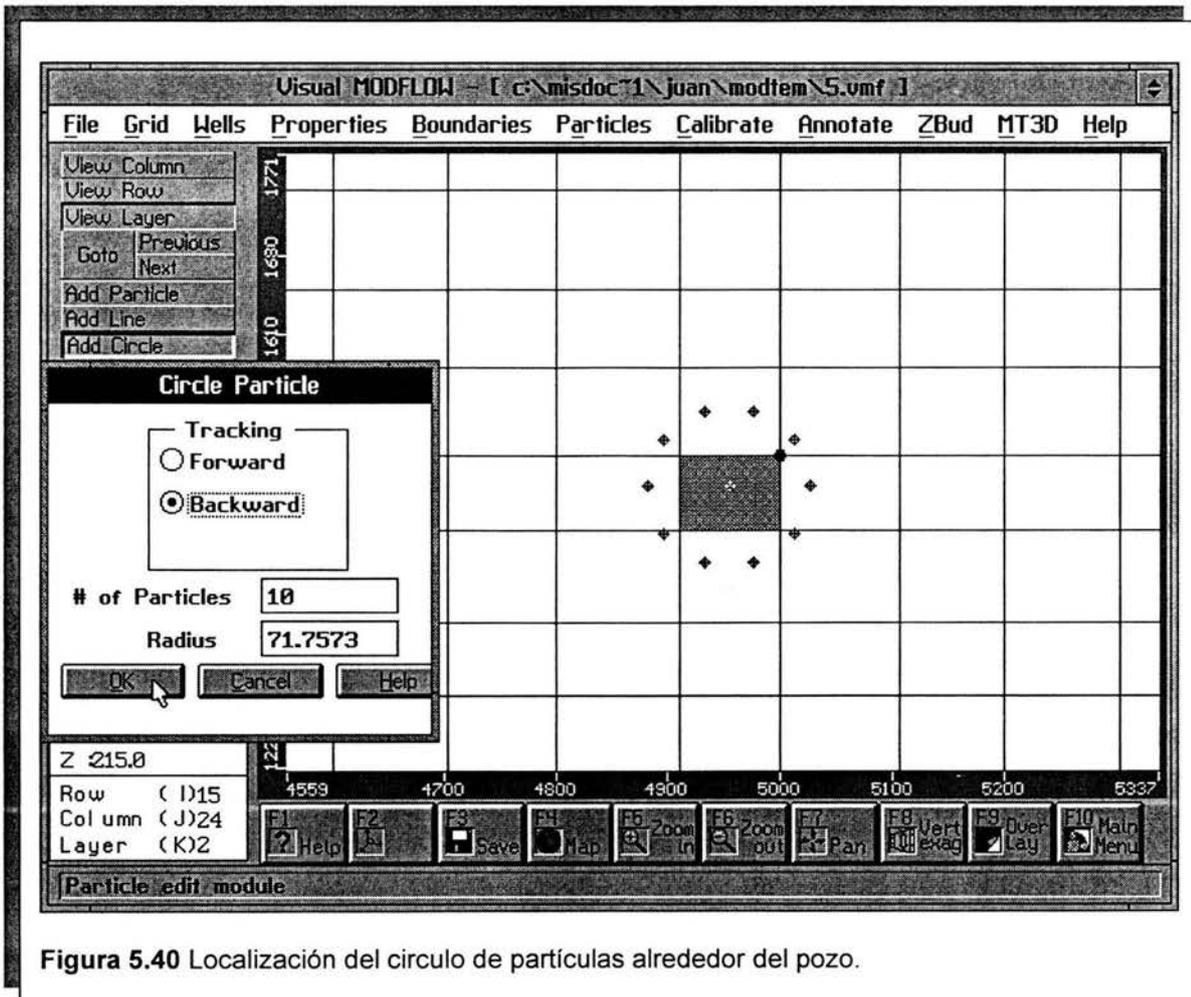


Figura 5.40 Localización del círculo de partículas alrededor del pozo.

← en **Ok** (para aceptar 10 partículas; el valor por defecto cuando se añade círculo es elegido como partículas hacia atrás, las partículas hacia atrás son rojas).

← en copiar (**Copy**).

Colocaremos el cursor circular sobrepuesto a una de las partículas en el círculo y clic una vez más.

Todas las partículas se tornaran azules.

← sobre estratos 3 a 8 (junto con las partículas en el estrato 2 esto colocará partículas a lo largo de la longitud de la malla completa).

← sobre **Ok**.

⇐ en la tecla F6 (**Zoom out**).

⇐ en vista de fila (**View Row**), para verificar si todas las partículas han sido copiadas.

Colocaremos la barra del cursor roja sobre la fila que contenga el pozo y clic una vez más.

Una vista de perfil aparecerá similar a la figura 5.41. Si no colocamos el cursor sobre la fila que contiene el pozo exactamente, podemos hacer clic en siguiente o previo (**Next or Previous**) un par de veces (moviendo arriba o abajo las filas) hasta que logremos ver el pozo.

El pozo completamente penetrado se extiende desde el estrato 2 hasta el estrato 8 .Quizá el estrato más importante para colocar las partículas hacia atrás es la estrato 8 porque viene lo más aproximado a las superficies exteriores del volumen contenido y de captura por el pozo.

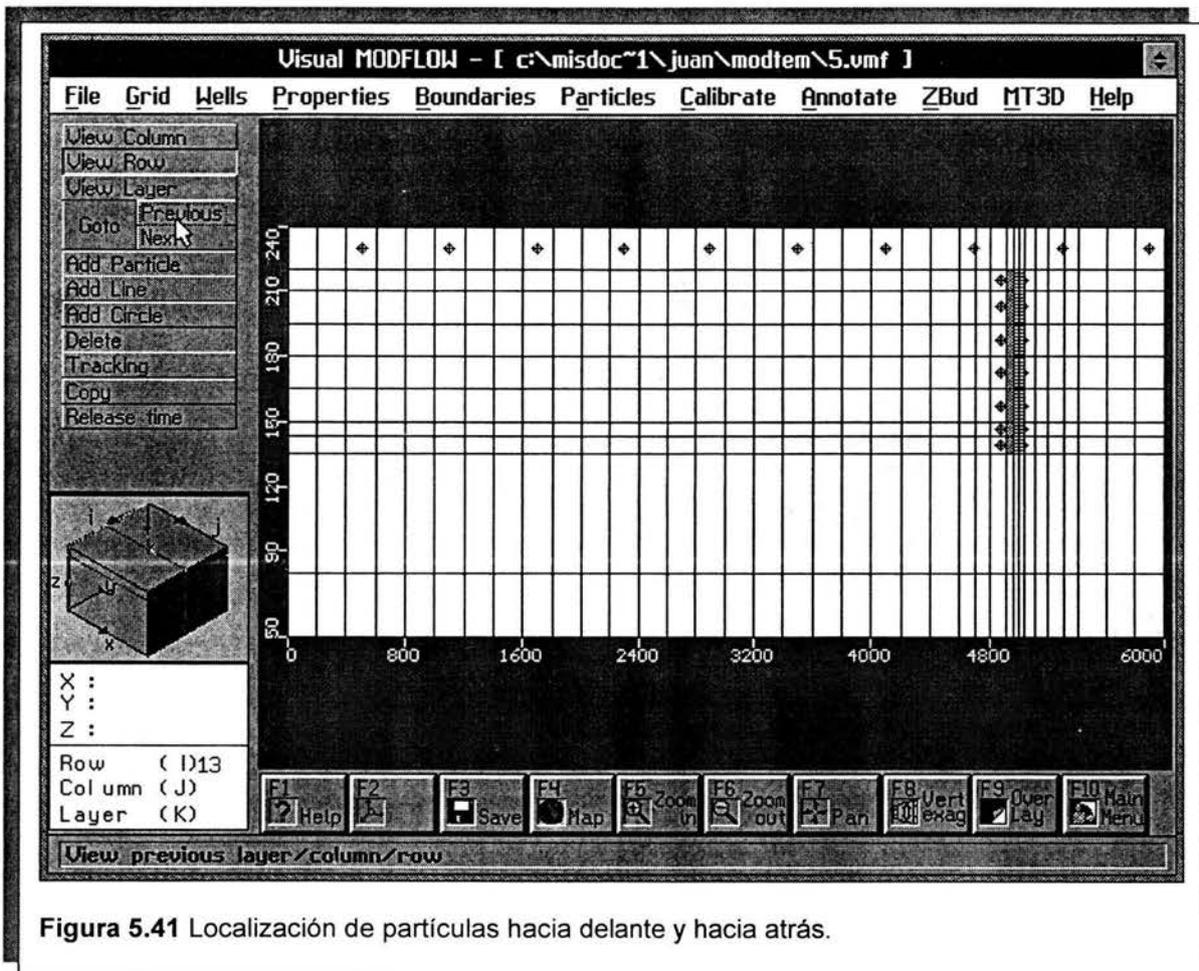


Figura 5.41 Localización de partículas hacia delante y hacia atrás.

10 Realización de anotaciones y texto .-

Visual MODFLOW tiene una característica de anotación el cual permite a uno añadir texto, círculos, flechas, líneas o rectángulos a una figura. La figura 5.42 ilustra algunos ejemplos usando la característica de texto. Experimentaremos con esta función, mientras aún esta la vista de perfil (*Profile View*).

← en anotación (**Annotate**) en la barra de menú superior.

← sobre si (**Yes**) para salvar los datos de partículas.

← en añadir texto (**Add Text**).

Moveremos el cursor a donde deseemos la primera letra para empezar y clic.

Teclearemos el texto definitivo. Por ejemplo "acuífero superior".

Moveremos el cursor arriba o abajo para hacer las letras más pequeñas; nos moveremos también para la derecha para hacer el texto más ancho. Entonces clic una vez más para anclar el texto.

Podemos añadir texto tanto como deseemos repitiendo los pasos antes mencionados.

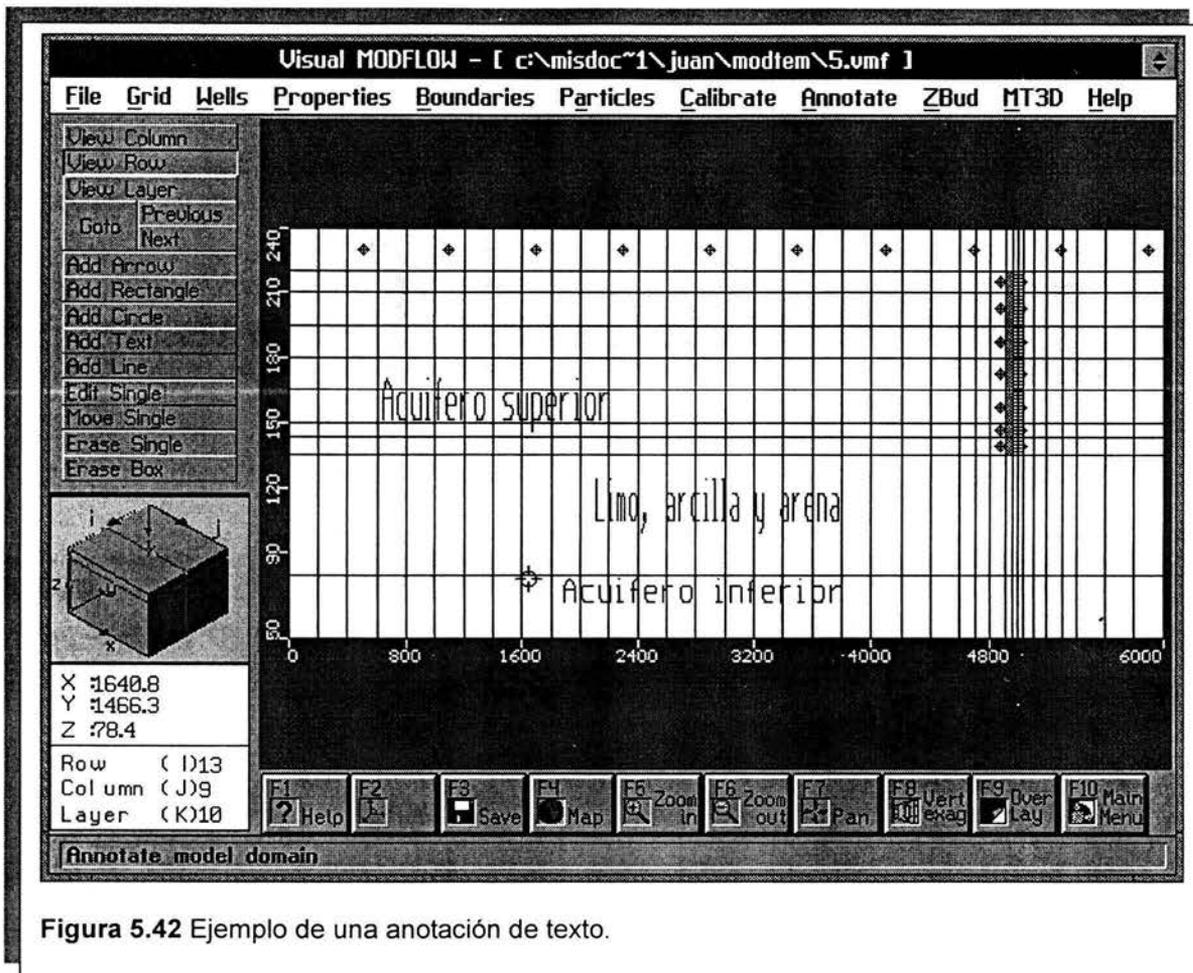


Figura 5.42 Ejemplo de una anotación de texto.

Si cometemos un error o deseamos borrar algo diferente en algún texto u otro objeto de anotación, haremos clic en borrar solo (**Erase Single**) y colocaremos el cursor en cualquier lado sobre el texto u objeto y clic una vez más. Redibujaremos con F6.

Haremos lo siguiente antes de intentar ejecutar el modelo:

Regresaremos a la vista en planta (**Plan View**), es decir:

⇐ en vista de estrato (**View Layer**).

Moveremos el cursor al estrato 1 y clic una vez más.

Es necesario tomar las siguientes consideraciones antes de ejecutar el MODFLOW / MODPATH.

Nosotros no tenemos explícitamente establecido cualquier condición de frontera. Si la condición de frontera no es especificada en Visual MODFLOW, las condiciones de no flujo son asumidas en todas las fronteras por defecto.

La única fuente de agua para este sistema de acuíferos es la recarga, mientras que solamente la descarga de agua es por la extracción por pozo.

Por el momento, veremos que pasa si usamos las condiciones de no flujo en todas las fronteras y ejecutaremos el modelo bajo las condiciones de estado estable.

5.2.5 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

11 Ejecución de (runnig) MODFLOW / MODPATH .-

⇐ en archivo (**File**).

⇐ sobre menú principal (**Main Menu**).

⇐ en si (**Yes**) para salvar anotaciones.

⇐ en ejecutar (**Run**).

⇐ en **Ok**. (para aceptar el estado establecido).

⇐ en correr modelo (**Run**).

⇐ en correr modelo MODFLOW dejando una X en el cuadro.

⇐ en correr MODPATH dejando una X en el cuadro.

⇐ en **Ok**.

Visual MODFLOW trasladará la información proveniente de la sección de entrada del programa dentro de un U.S.G.S. estándar. Los archivos MODFLOW Y MODPATH tendrán sus apropiadas extensiones (BAS, .WEL, BCF, etc.).

Después de un breve tiempo, el programa entonces empezará a ejecutar los modelos oficiales U.S.G.S. MODFLOW y MODPATH.

Podemos hacer los siguientes comentarios sobre la convergencia para el caso de fronteras de no flujo condiciones bajo estado establecido.

Observaremos los residuos máximos en la columna más alejada de la derecha usando el solucionador WHS. Veremos oscilar desde números muy pequeños a grandes, obviamente no convergiendo. En una breve cantidad de tiempo, el solucionador imprime:

Número entero o error de punto flotante..... (**Integer or floating point error**).

Presionaremos entrar para continuar.

Presionaremos entrar (**Enter**) para regresar al archivo actual en Visual MODFLOW. Podemos hacer pausa a los números que aparecen rápidamente en forma de lista antes que este mensaje sea alcanzado, usando la combinación de las teclas Ctrl-C. El programa parará y nos regresará a la primer pantalla de Visual MODFLOW.

¿ Por qué falla esta simulación al converger?.

Esta simulación errónea nos muestra qué pasa cuando todas las condiciones de frontera son de no flujo y el modelo esta siendo simulado bajo las condiciones de estado establecido. Los problemas de estado estable requieren de al menos una carga constante (primer tipo) de condición de frontera para servir como una carga de referencia. Los problemas transitorios también necesitan una carga de referencia, pero esta puede ser suministrada por la condición inicial, y por lo tanto uno pudiera simular sin el uso de todas las condiciones de no flujo en algunos casos de problemas transitorios.

Aunque la razón para el fracaso en este caso es obvio, estar conciente que algunas veces los solucionadores estándar los cuales vienen con MODFLOW (PCG2, SIP y SOR) no convergen para ciertos problemas, aún después de cambiar el criterio del error y número de iteraciones. La razón es a menudo un problema pobremente planteado. Reponiendo las condiciones de frontera, la malla, etc. Puede resultar en una convergencia, algunas veces, aún esto no trabaja y entonces la única solución sería otro solucionador u otro modelo de flujo. Además los solucionadores estándar del MODFLOW, Visual MODFLOW vienen con su propia solución rápida y confiable. Esto trabajará usualmente cuando otros solucionadores han fracasado.

12 Condiciones de frontera .-

Añadiremos algunas cargas constantes en las condiciones de frontera a la izquierda y derecha del modelo y simularemos en problema bajo condiciones de estado establecido.

- ← en datos de entrada (**Input**).
- ← en fronteras (**Boundaries**).
- ← en carga constante (**Constant Head**).
- ← en asignar línea (**Assign Line**).
- ← sobre el centro de la celda de la malla que se ubica en la esquina superior izquierda (Col 1, fila 1, estrato 1) y arrastraremos una delgada línea roja abajo hacia el centro de la celda de la malla que se encuentra en la parte inferior izquierda, entonces clic sobre el botón derecho del mouse. Debemos usar el botón derecho al final del punto (**End point**) de la condición de frontera.

Una luz rosa cubrirá todo el bloque de malla a lo largo de la primer columna.

Presionaremos la tecla entrar (**Enter**) (para aceptar código #0; todos los códigos de números aquí (#0, #1, etc.) son usados solamente para identificar propiedades que deseemos copiar a otro estrato).

⇐ para colocar una X en asignar a estrato apropiado (**Assign to appropriate layer**) (si una X ya existe ir al siguiente paso).

⇐ sobre el cuadro parar tiempo (**Stop Time**) y teclearemos 1000 ↵

Escribiremos 240 ↵ (empezar punto de la B.C.).

Escribiremos 240 ↵ (fin pt. de la B.C.).

⇐ en **Ok**.

Un rojo brillante reemplazará la luz rosa.

Ahora haremos la condición de frontera derecha en la misma forma:

⇐ en asignar línea (**Assign Line**).

⇐ en el centro de la celda de la parte superior derecha y arrastraremos una línea delgada roja hacia el centro de la celda de la parte inferior derecha de la malla, entonces daremos clic sobre el botón derecho del mouse. Debemos usar el botón derecho al final del punto (**End Point**) de la condición de frontera.

Una luz rosa cubrirá todos los bloques a lo largo de la primer columna.

Presionaremos entrar (**Enter**) (para aceptar código # 0; usado solamente para identificar propiedades que uno desee copiar a otros estratos).

⇐ para colocar una X en asignar a estrato apropiado (**Assigning to appropriate layer**) (si una X ya existe ir al siguiente paso).

⇐ en el cuadro parar tiempo (**Stop Time**) y escribiremos 1000↵

Escribiremos 240 ↵ (empezar punto de B.C.).

Escribir 240 ↵ (terminación pt. De el B.C.).

⇐ sobre **Ok**.

Un rojo brillante reemplazará una luz rosa. Los resultados finales con ambas condiciones de frontera definidas se deberían ver como la figura 5.43.

Copiaremos las condiciones de frontera definidas en el estrato 1 a todos los otros estratos.

En este primer ejemplo, definiremos las condiciones de carga constante sobre las fronteras izquierda y derecha para todos los estratos desde arriba hacia el fondo. Para hacer esto, usaremos el comando copiar.

⇐ en copiar estrato (**Copy Layer**).

⇐ en copiar todos los códigos (**Copy all codes**) del cuadro, en la parte superior izquierda.

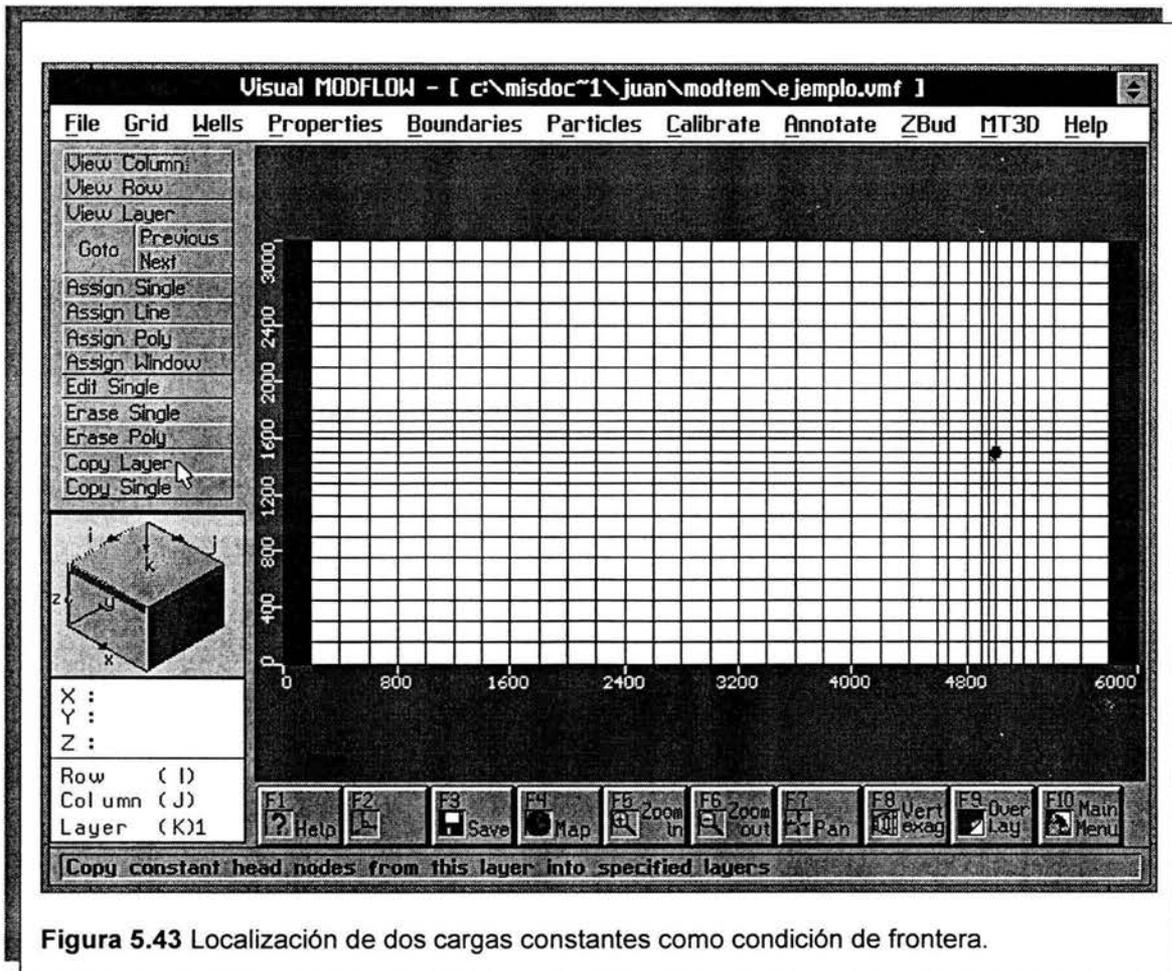


Figura 5.43 Localización de dos cargas constantes como condición de frontera.

← sobre estratos (**layer**) 2 a 10 individualmente, cuando alcancemos la estrato 8, clic sobre la flecha de la barra de desplazamiento para ver estratos 9 al 10, entonces clic sobre ellos. Deberían tornarse verdes.

← sobre **Ok**.

← sobre vista de fila (**View Row**) (para verificar si el B.C.S. fueron copiados a todas las estratos).

Moveremos el cursor a cualquier lado de la malla y clic una vez más.

Deberíamos ver dos columnas rojas y verticales sobre los lados izquierdo y derecho de la malla.

← en vista de estrato (**View Layer**).

Moveremos el cursor al estrato 1 y clic una vez más.

← en archivo (**File**).

← en menú principal (**Main Menu**).

← en si (**Yes**), para salvar los datos de frontera.

← sobre ejecutar (**Run**).

⇐ en **Ok**, para aceptar el estado estable.

⇐ en ejecutar modelo (**Run**).

⇐ en **Ok**, deberíamos estar seguros que existe una X a lado de MODFLOW y MODPATH primero, si no, clic sobre esos cuadros hasta que una X aparezca.

Una vez más, el programa traslada desde el formato archivo Visual MODFLOW a el formato usado por MODFLOW. Entonces se ejecutará el MODFLOW. Observemos el residuo máximo decreciendo hasta que alcanza un criterio numérico presente, estos criterios pueden ser cambiados en el menú ejecutar (**Run Menu**), sobre el solucionador. Si la simulación es considerada exitosa. El programa entonces regresa al Visual MODFLOW.

5.2.6 RESULTADOS

⇐ en **Output**.

El contorno potenciométrico en el mapa para el estrato 1 será desplegado. Con dos condiciones de frontera de carga constante idénticas en magnitud y recarga de 15 pulgadas por año, el agua subterránea se divide en la mitad del primer estrato.

⇐ en vista de fila (**View Row**).

Moveremos el cursor hasta que la barra roja coincida con la fila del pozo, (indicado por el block de rejilla rojo asurado), entonces clic una vez más.

Un mapa potenciométrico en perfil vertical aparecerá.

⇐ en **Pathlines**.

Todas las **Pathlines** aparecerán, inclusive aquellas no están en la sección actual de corte.

⇐ sobre segmentos (**Segments**), para presentar solamente aquellas líneas de ruta (pathlines) en la sección actual de corte.

Usaremos una conductividad extensa para delinear las 4 unidades hidroestratográficas y veremos el volumen contenido en relación con el acuífero superior.

⇐ en F9 (**Over lay**).

⇐ ⇐ sobre cubrir conductividad (**Conductivity Overlay**).

⇐ en **Ok**.

Veremos algo similar a los resultados presentados en la figura 5.44.

Comparación de los resultados de volumen contenido con los estudios originales por Larson ET AL (1987)

La "pathline" se origina en la base del pozo dejando indicio aproximadamente a la extensión máxima del volumen contenido. Comparamos los resultados de la figura 5.32A de Larson et al (1987) (las escalas horizontales son diferentes, pero pueden ser comparadas). Nuestro volumen contenido esta cercano a los suyos pero no exactamente son los mismos. En Larson et al. el volumen contenido se extiende cerca de 2400 pies desde el pozo, mientras que nuestros resultados se extienden cerca de 2000 pies desde el pozo. Las diferencias pueden ser explicadas por cualquiera de muchas razones.

Sus condiciones de frontera pueden ser diferentes a las que nosotros usamos (el estudio original desafortunadamente no proporciona cualquier información sobre las condiciones de frontera usados). Otra razón para la diferencia podría ser que usamos un modelo diferente, MODFLOW (presuntamente más exacto), mientras que ellos usaron el Trescott and Larson (1976) 3d modelo. Finalmente, el modelo de pathline que nosotros usamos fue el altamente aclamado por U.S.G.S. MODPATH, mientras que ellos admitieron usar un simple proyecto de pathline.

Las condiciones de frontera son una parte importante y determinante en la forma y localización del volumen contenido. Podríamos estar preguntándonos, por lo tanto, lo que los resultados se parecerían si las condiciones de frontera fueran diferentes. Por ejemplo si existiera una condición de no flujo a la izquierda y una carga constante de 240 pies sobre la derecha. Las figuras 5.45 y 5.46 muestran los resultados que se obtendrían. Ellos son significativamente diferentes desde el estudio original, indicando si no existió las condiciones de frontera usados por los autores.

13 Zonas de captura horizontales .-

Larson et al. (1987) define el volumen contenido como el volumen de agua subterránea la cual rodea todas las pathlines, las cuales terminan en el pozo. Además, ellos definen una zona de captura como un corte horizontal del volumen contenido en el nivel de aguas freáticas (superficie) o cualquier otro intervalo de profundidad. Veremos algunas zonas de captura por estrato.

← sobre vista de estrato (**View Layer**).

Moveremos el cursor al estrato más alto en la figura y clic una vez más.

Verificaremos la designación del estrato 1 en el fondo de la pantalla.

← en proyección (**Projections**).

← en ir a (**Goto**).

Escribiremos 2 ↵

← en **Ok**.

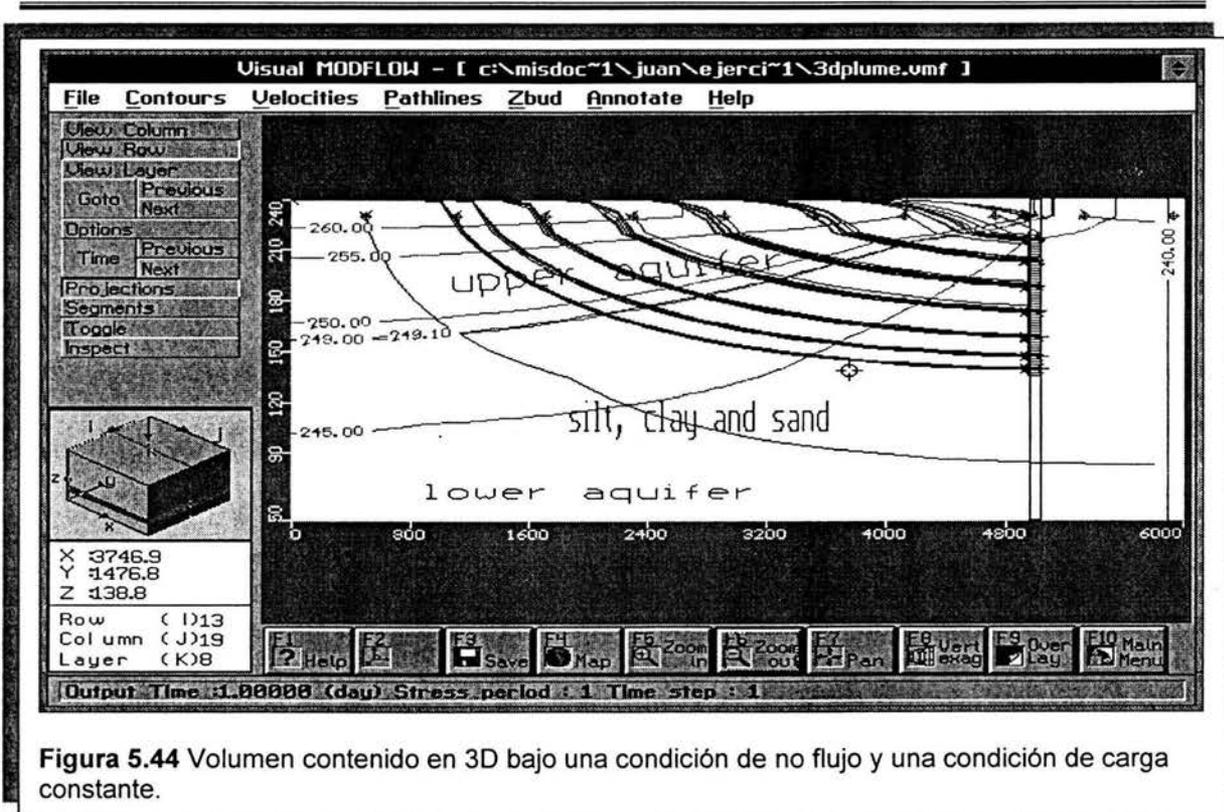


Figura 5.44 Volumen contenido en 3D bajo una condición de no flujo y una condición de carga constante.

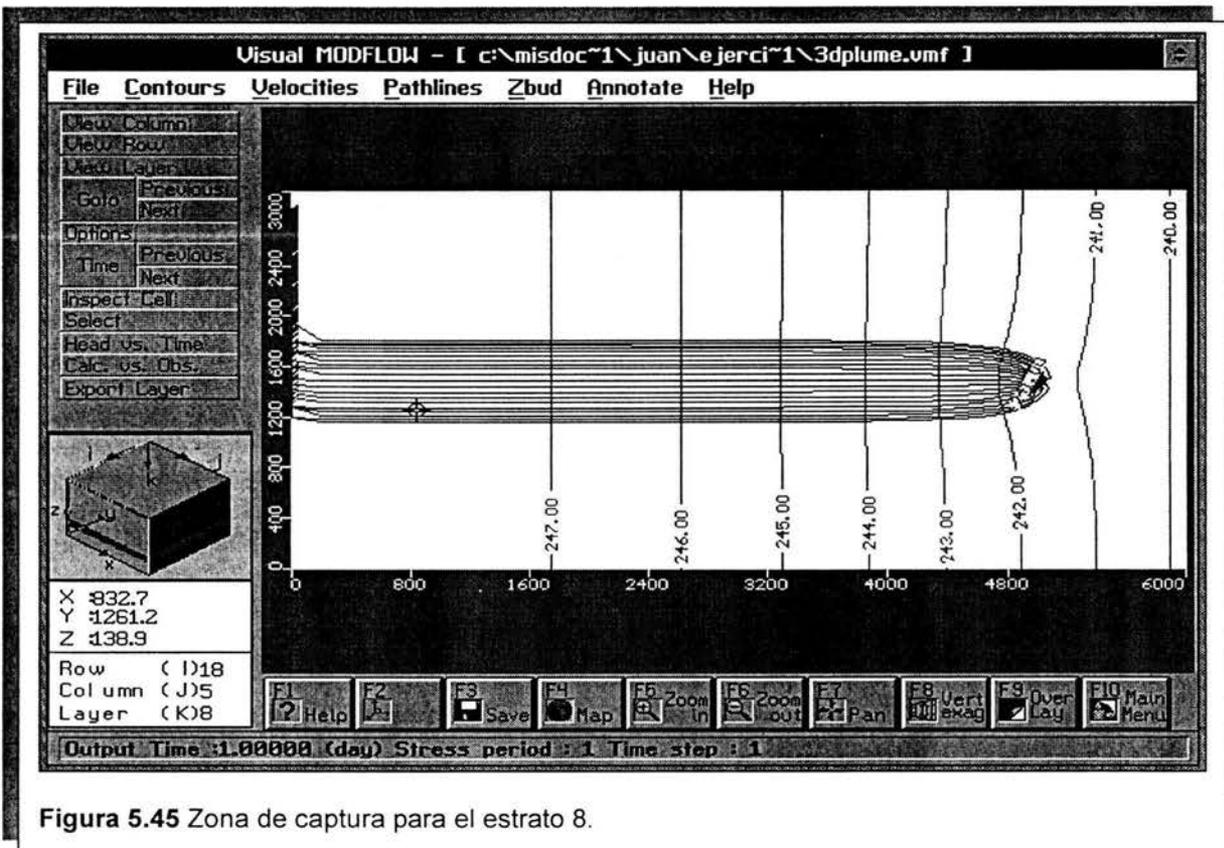


Figura 5.45 Zona de captura para el estrato 8.

Una zona de captura para el estrato 2 será mostrada. Si las líneas equipotenciales no son mostradas, clic sobre equipotenciales sobre la barra de menú superior, entonces clic en **Pathlines** de nuevo. Notificaremos que todas las pathlines para todos los estratos subyacentes son también proyectadas. Seleccionaremos solo las pathlines en el estrato actual.

- ⇐ en opciones (**Options**).
- ⇐ en iniciar en estrato actual "**(Start in current layer)**" un círculo en la parte baja izquierda de la pantalla.
- ⇐ en **Ok**.
- ⇐ en siguiente (**Next**), para ver la zona de captura para el estrato 3.
- ⇐ en siguiente (**Next**) 5 veces más (hasta el estrato 8). Notificaremos ahora al área horizontal de la zona de captura incrementadas con profundidad debido a la alta relación vertical anisotrópica. Dos dimensiones, modelos horizontales no pueden mostrar una forma de la zona de captura cambiando con la profundidad.

Veremos los resultados para el estrato 8 similar a aquellos presentados en la figura 5.46.

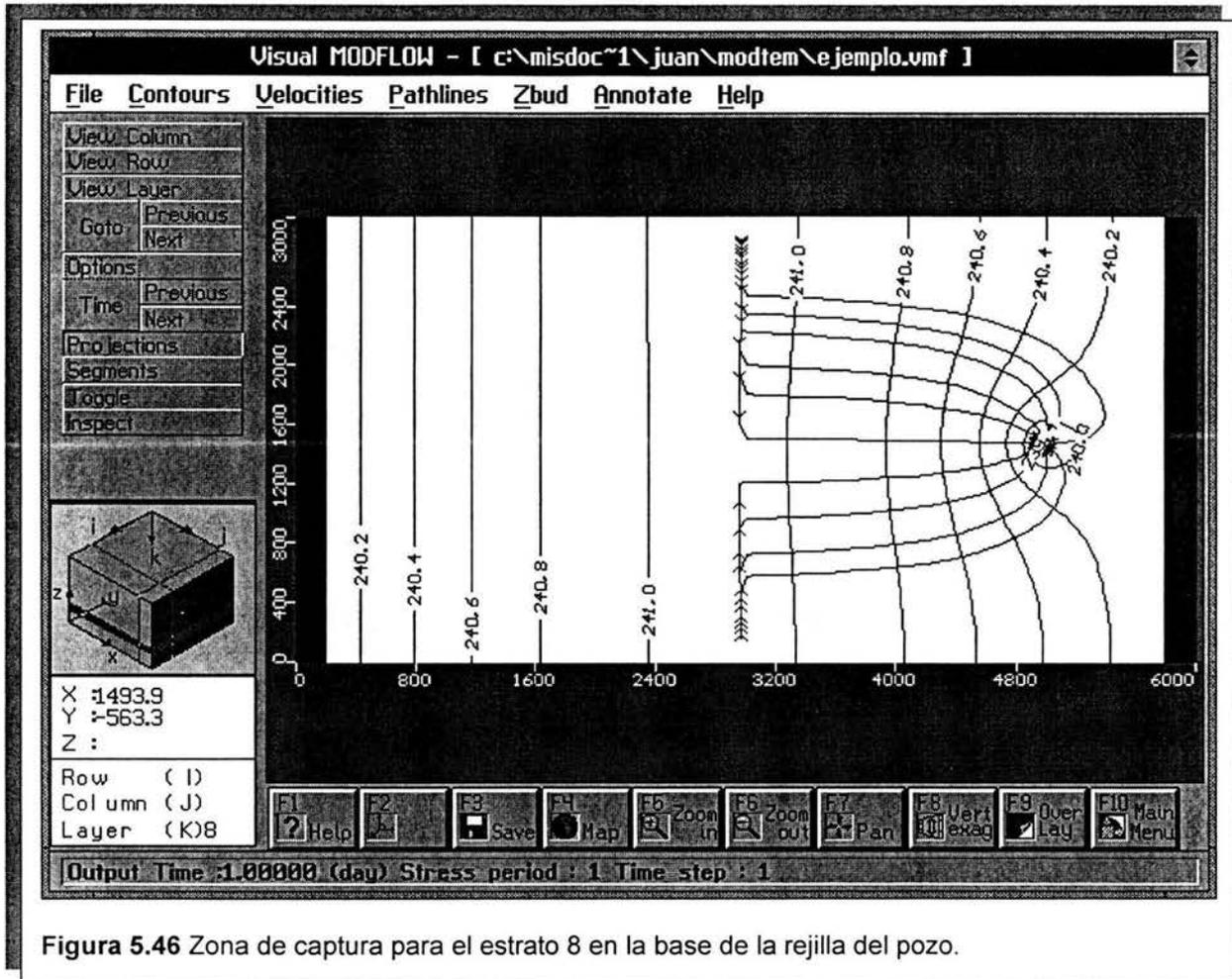


Figura 5.46 Zona de captura para el estrato 8 en la base de la rejilla del pozo.

14 Balance de masa .-

Una necesaria pero no suficiente condición, para un resultado del modelo exitoso es tener un balance de masa razonable. Veremos los resultados del balance de masa.

⇐ en **Zbud** (zona de cálculos para el balance, **Zone budget calculations**).

⇐ en balance de masa (**Mass Balance**).

⇐ sobre la tecla de la flecha de la barra de desplazamiento de la ventana de la izquierda hasta que la última línea aparezca donde el % de discrepancia sea dado. Es deseable que sea menor que el 0.1 %, pero 1% es frecuentemente aceptable.

Algunas veces, de cualquier modo, el balance de masa es 10 % o más alto (Anderson y Woessner 1993 cita un ejemplo de una frontera de carga general usando conductividades muy altas donde el error de balance de masa puede ser arriba de 200%). Cuando el balance de masa es demasiado alto, el primer paso para reducir esto es cambiar el criterio de convergencia (típicamente reduciendo esto por un factor de 10) de la solución particular usada. El máximo número de iteraciones puede también ser incrementado. Podemos hacer esto eligiendo solucionador (**Solver**) en el menú ejecutar (**Run**). Continuamos reduciendo el criterio de convergencia hasta que un error aceptable sea llevado a cabo. Algunas veces debido a la naturaleza del problema particular bajo estudio, los solucionadores ciertamente no producen convergencia, resultados oscilatorios. En esos casos, otro solucionador debe ser probado. Si el problema aún no converge para un nivel aceptable de error, el diseño del modelo y/o modelo conceptual puede necesitar ser cambiado. (ejemplo, diseño de malla, distribución de las propiedades de los materiales, reposición de condiciones de frontera, etc.).

⇐ en **Ok**.

15 Efectos de la selección condiciones de frontera en el volumen contenido en 3D.-

En este ejemplo, las condiciones de frontera a la derecha y a la izquierda fueron cada uno un conjunto igual a 240 pies por todo el sistema de ancho del acuífero entero. El estudio original de Larson et al. (1987) no da información de las condiciones de frontera usadas. Usando dos cargas constantes de condición de frontera como nosotros hicimos, damos un volumen contenido cercano a esa presentación en su estudio original. Desde un punto de vista práctico, de cualquier modo, un sistema real de acuíferos debe tener gradientes o el agua subterránea no fluiría. Un razonable conjunto de condiciones de frontera entonces debe ser una condición de no flujo sobre la izquierda y una carga constante de 240 pies sobre la derecha.

Los siguientes pasos son un resumen de cómo hacer esto, es recomendable que se realice,: ir al menú entrada de datos **Input** (archivo, menú principal, datos de entrada) (**File, Main Menu, Input**) elegir fronteras, seleccionar carga constante, borrar poly (para borrar la condición de carga constante izquierda), siguiente (para ir al siguiente estrato (10 estratos en total) y usar borrar poly de nuevo para remover B.C.) archivo, menú principal, ejecutar, ejecutar modelo. Los resultados finales se deberían ver como la figura 5.44 y 5.45 los cuales difieren sustancialmente de la figura 5.46 (observemos si no existe división de agua subterránea y si el volumen contenido es mucho.

En este punto, podemos salir del programa (archivo, menú principal, archivo, salir) (**File, Main Menu, File, Exit**) o ir atrás a la pantalla de datos de entrada y experimentar con otros escenarios. Por ejemplo, cambiar la razón K_h / K_v , añadir lentes permeables, añadir otra extracción o inyección en pozos, cambiar las condiciones de frontera (ej. carga constante solamente en estrato 1, simulando un río parcialmente penetrado....

16 Impresión de resultados .-

Aunque nosotros no vamos a imprimir por ahora, discutiremos cómo uno imprime los resultados de la pantalla.

← en archivo (**File**).

← sobre imprimir (**Print**).

← en el cuadro de proyecto sobre la información de proyecto.

Escribiremos el nombre del proyecto y presionamos entrar (**Enter**).

Presionamos entrar (**Enter**) (para aceptar el dato actual).

Escribiremos una descripción y presionamos (**Enter**).

Escribiremos un nombre y presionaremos (**Enter**).

← en seleccionar (**Select**).

Si el mecanismo de la impresora actual de datos de salida es correcto, iremos al siguiente paso. Si no es correcto, clic sobre la flecha de abajo para más selecciones o la tecla Añadir (**Add**) para más selecciones. Clic sobre la impresora correcta y clic en **On Set as current output device button**, ← sobre **Setup**.

Elegiremos también formato portrait o lanscape y la resolución.

← en **Ok**.

← en cerrar (**Close**).

Con esto damos por terminado este ejemplo.

5.3 EFECTOS DE UNA FOSA ABANDONADA EN DOS POZOS DE SUMINISTRO

5.3.1 OBJETIVOS DEL PROBLEMA

1. Crear un sistema de multi-estratos (acuífero y acuitardo).
2. Importar un mapa desde un archivo DXF.
3. Generar una superficie topográfica e importarla a visual MODFLOW.
4. Definir las condiciones de frontera para el sistema.
5. Simular una fosa que gotea.
6. Ejecutar MODFLOW usando diferentes solucionadores y comparar los resultados de balance de masa.

5.3.2 BREVE DESCRIPCIÓN

Este ejemplo está basado sobre un flujo de agua subterránea en un sistema de tres estratos consistentes en un acuífero libre superior, un acuitardo intermedio y un acuífero semiconfinado inferior como lo ilustra la figura 5.47.

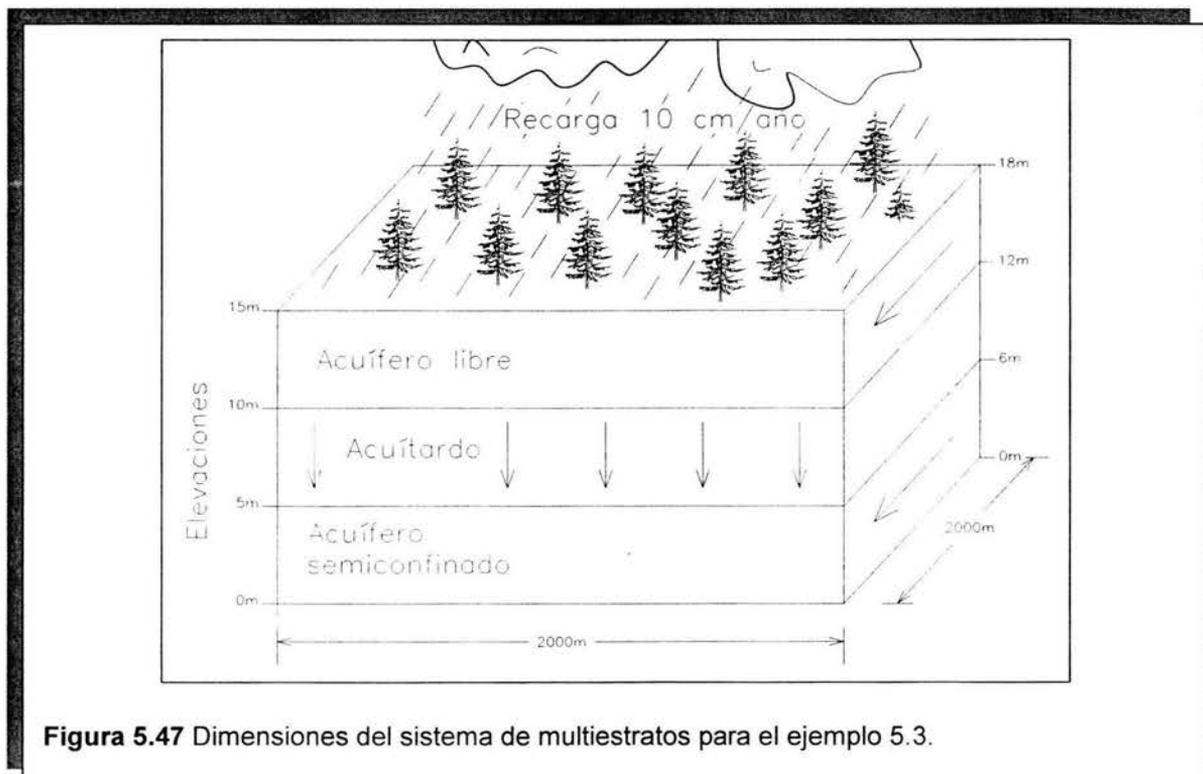


Figura 5.47 Dimensiones del sistema de multiestratos para el ejemplo 5.3.

5.3.3 ENTRADA DE DATOS

1 Inicio de VISUAL MODFLOW.- Para ejecutar MODFLOW se hace doble clic en el icono de MODFLOW que aparece en el escritorio de windows cuando se ha instalado previamente el programa y se le da acceso directo al mismo, en caso de que no sea así buscaremos mediante el explorador de window la carpeta VMODFLOW, la cual contiene el archivo ejecutable VMODFLOW, daremos doble clic sobre este archivo para entrar en el ambiente de Visual MODFLOW.

Estamos ahora en la primer pantalla de Visual MODFLOW.

← en **Ok** para proceder al menú principal.

2 Generación de un nuevo conjunto de datos.-

← en archivo (**File**), un menú aparecerá.

← en nuevo (**New**).

Una ventana de diálogo de selección de archivo se mostrará con el cursor en el cuadro del nombre del archivo.

Sobrescribiremos en el archivo *.vmf para escribir:

Tres .J

Visual MODFLOW automáticamente asignará este archivo con una extensión (.vmf) al final del nombre.

La ventana de selección de unidades aparecerá, especificaremos las unidades para el sistema establecido haciendo clic con el mouse sobre la elección deseada. Seleccionaremos las siguientes unidades.

← metros (**meters**), para unidad de longitud.

← m/seg (**m/sec**), para unidades de conductividad hidráulica.

← días (**days**), para unidades de tiempo.

← m³/día, (**m³ /day**) para unidades de bombeo o de gasto.

← mm/año (**mm/year**) para unidades de recarga.

Una vez que hallamos realizado todas las selecciones:

← en **Ok**.

3 Creación de la malla .-

Una ventana de diálogo nos preguntará:

¿Recuperar las coordenadas del sitio desde un mapa DXF? (**"Retrieve site coordinates from a DXF Map?"**).

← en si (**Yes**), una ventana de diálogo nos preguntará por un archivo DXF.

← ← en Airport.DXF

Visual MODFLOW leerá las coordenadas mínimas y máximas para el sitio del mapa y sugerirá entonces las dimensiones por defecto. Una ventana aparecerá preguntándonos para definir las dimensiones de la malla. Escribiremos los valores mostrados sobre la pantalla:

Introduciremos número de columnas	40 ↓
Introduciremos la X mínima (m)	0 ↓
Introduciremos la X máxima (m)	2000 ↓
Introduciremos el número de filas	40 ↓
Introduciremos la Y mínima (m)	0 ↓
Introduciremos la Y máxima (m)	2000 ↓
Introduciremos el número de estratos.	6 ↓
Introduciremos la elevación de Z mínima	0 ↓
Introduciremos la elevación de Z máxima	15 ↓

Después de introducir los valores de la malla

← en **Ok**.

Cuando las celdas o la malla estén en una vista en planta. La parte superior será designada como norte, la parte inferior de la malla como sur, la izquierda como oeste y la derecha como este.

Una malla de 40 x 40 celdas y un mapa base (figura 5.48) aparecerá sobre la pantalla.

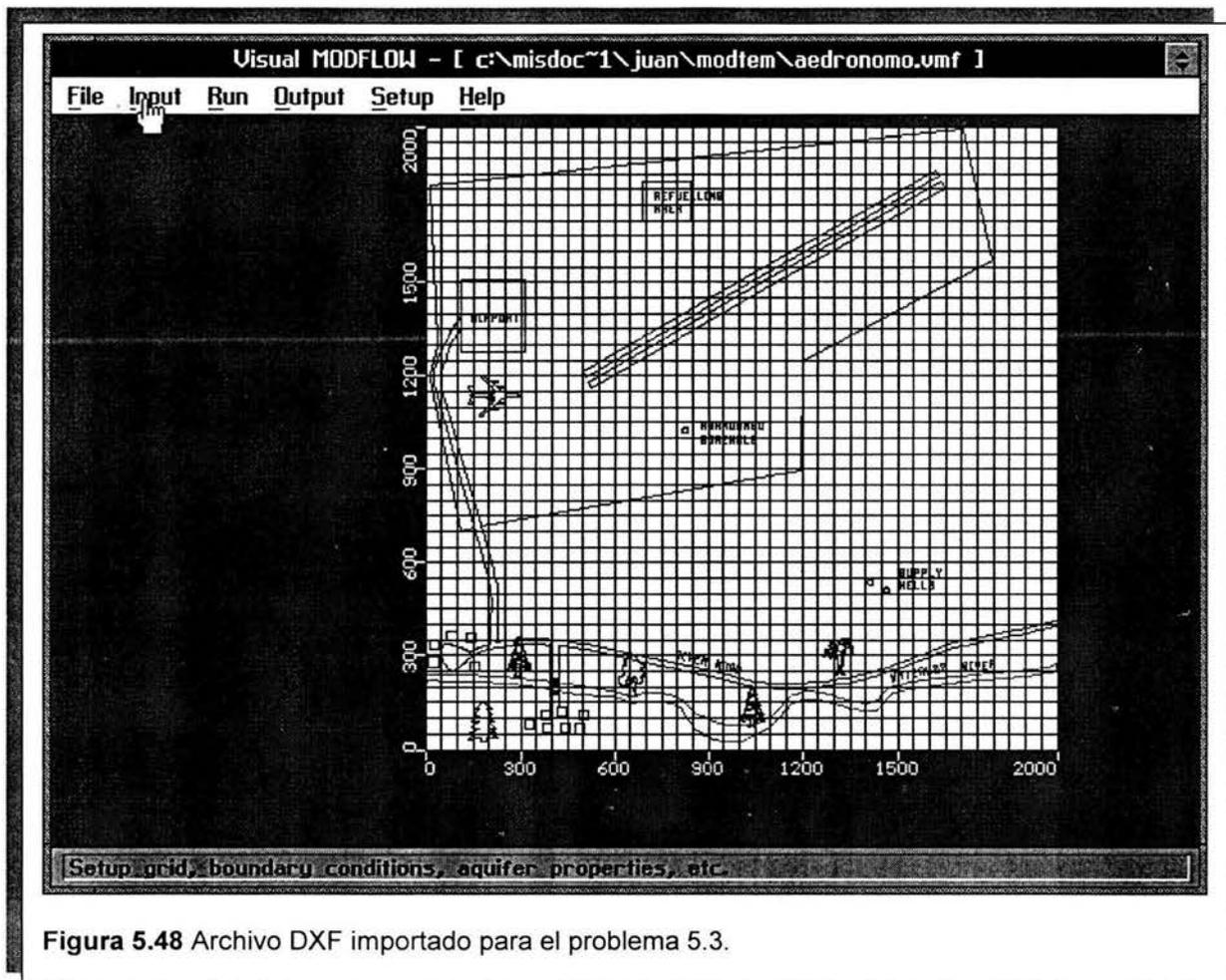


Figura 5.48 Archivo DXF importado para el problema 5.3.

4 Refinamiento de la malla .-

Queremos refinar los alrededores de la malla donde aparecen los pozos de suministro y la fosa abandonada. El tamaño de la celda representa el tamaño del pozo, por lo tanto una malla fina simula el pozo más realmente. Además del tamaño del pozo, si los abatimientos están ocurriendo alrededor del pozo, con una malla de espacios muy estrechos, el nivel del agua tendrá una superficie más fina en áreas de los abatimientos. Primero refinaremos la malla alrededor de los pozos de suministro.

⇐ en datos de entrada (*Input*).

⇐ en añadir columnas (*Add Column*).

Moveremos el mouse a cualquier lugar en la malla y ⇐ sobre el botón derecho del mouse. Haciendo clic sobre el botón izquierdo del mouse podemos definir localizaciones exactas para la malla. Una pantalla aparecerá automáticamente preguntándonos por la información de la malla.

Elegiremos “**Evenly spaced grid lines from...**” (haciendo clic sobre el círculo abierto)

⇐ dentro del cuadro para introducir los siguientes valores:

De (<i>from</i>)	1350 ↓
A (<i>to</i>)	1550 ↓
En intervalos de	25 ↓

⇐ en *Ok*.

⇐ en añadir filas (*Add Row*).

Moveremos el cursor a cualquier lado de la malla y ⇐ sobre el botón derecho del mouse. Una pantalla aparecerá para introducir información de la malla.

Elegiremos “**Evenly spaced grid lines from...**” (haciendo click sobre el círculo abierto)

⇐ dentro del cuadro para introducir los siguientes valores:

De (<i>from</i>)	450 ↓
A (<i>to</i>)	600 ↓
En intervalos de	25 ↓

⇐ en *Ok*.

ahora refinaremos la malla alrededor de la fosa abandonada:

⇐ en añadir columnas (*Add Columns*).

Moveremos el mouse a cualquier lugar en la malla y ⇐ sobre el botón derecho del mouse. Una ventana preguntará por la información de la malla.

Elegiremos la opción “**Evenly spaced grid lines from...**” (haciendo click sobre el círculo abierto):

⇐ dentro del cuadro para introducir los siguientes valores:

De (from)	795 ↓
A (to)	900 ↓
En intervalos de	10 ↓

⇐ en **Ok**.

⇐ en añadir fila (**Add Row**).

Moveremos el mouse a cualquier lado en la malla y clic sobre el botón derecho del mouse. Una pantalla preguntará por la información de la malla.

Elegiremos la opción “**Evenly spaced grid lines from...**” (haciendo click sobre el círculo abierto).

⇐ dentro del cuadro para introducir los siguientes valores:

De (from)	950 ↓
A (to)	1100 ↓
En intervalos de	10 ↓

⇐ en **Ok**.

⇐ en vista de fila (**View Row**).

Moveremos el cursor del mouse a cualquier lado de la malla, cuando movamos el cursor a través de la pantalla, una barra roja iluminará la fila que ha sido ocupada. Si hacemos clic en una fila, Visual MODFLOW transferirá la vista del modelo de una vista en planta a una vista de sección de corte del sistema.

⇐ una vez más en cualquier lugar dentro de la malla para propiciar una vista de sección de corte. En este punto, el modelo no tiene una exageración vertical, que se hace para visualizar mejor el sistema:

⇐ en F8 exageración vertical en el fondo de la pantalla (**Vert exag**).

Una ventana aparecerá preguntándonos los valores a lo cual escribiremos:

25 ↓

⇐ en **Ok**.

los seis estratos estarán mostrados sobre la pantalla.

5 Creando e importando una superficie .-

Visual MODFLOW nos permite importar la elevación variable de estratos desde archivos de superficie o desde archivos discretos x, y, z ASCII. En este ejemplo vamos a crear rápidamente un archivo x,y,z ASCII e importar las elevaciones como una superficie subterránea.

⇐ en menú principal (**Main Menu**) o en **F10** en el menú inferior de la pantalla.

- ← en archivo (**File**).
- ← en salir (**Exit**).

se nos sugerirá salvar el archivo **airport.asc**
seleccionaremos si (**Yes**), o ↵
regresaremos al ambiente de DOS
escribiremos:

Exit ↵

esto nos regresará al ambiente de Visual MODFLOW.
Ahora estamos listos para importar la superficie que creamos en el archivo **airport.asc**.

- ← en datos de entrada (**Input**).
- ← en vista de columna (**View Column**).

Moveremos el mouse dentro de la malla y clic en cualquier columna dentro de la malla.

- ← en importar superficie (**Import Surface**).

Un menú como el representado en la figura 5.50 aparecerá en la pantalla

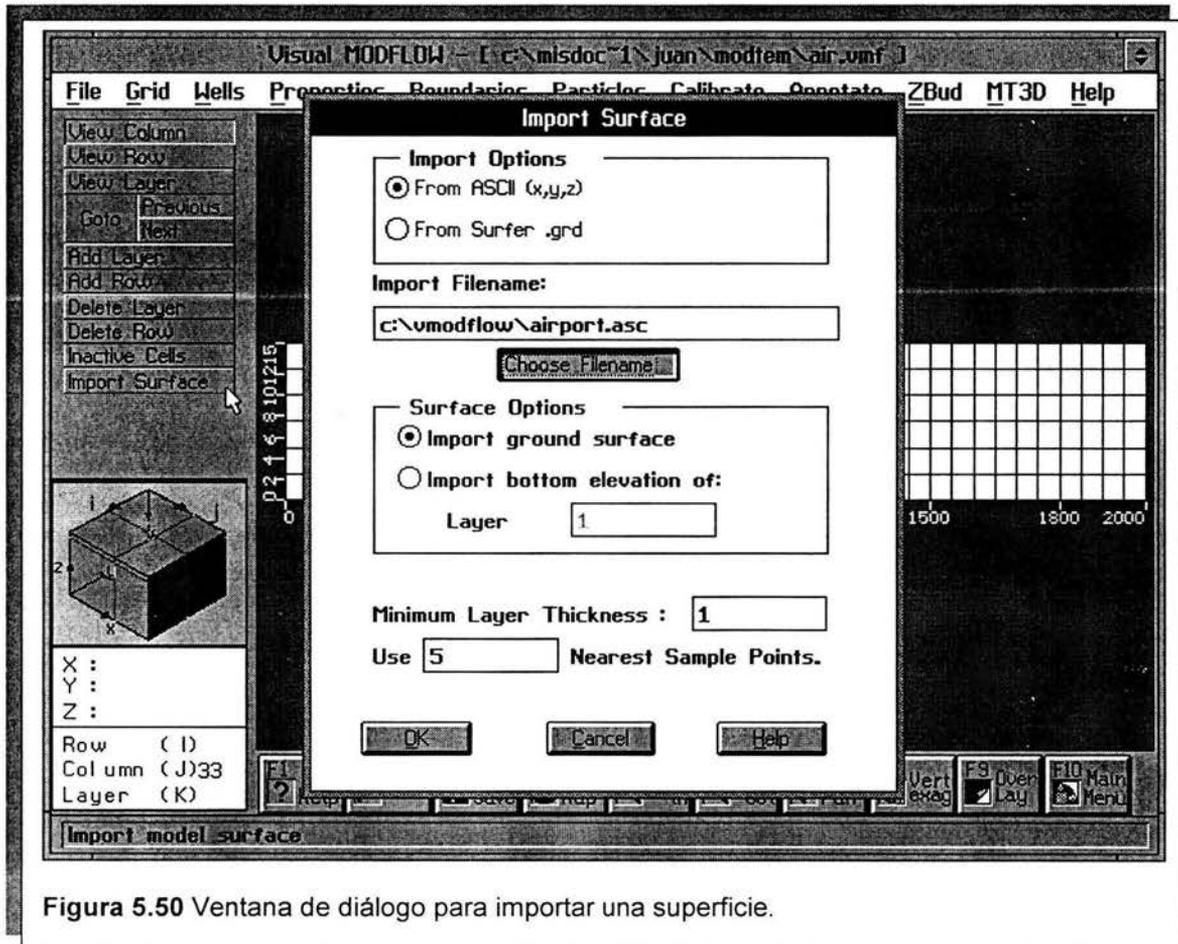


Figura 5.50 Ventana de diálogo para importar una superficie.

- ⇐ en elegir nombre de archivo (**Choose Filename**).
- ⇐ ⇐ en **airport. asc**
- ⇐ en **Ok**.

esto importará una superficie con alturas de 18 metros en la frontera norte a 15 metros en la frontera sur (ver figura 5.51).

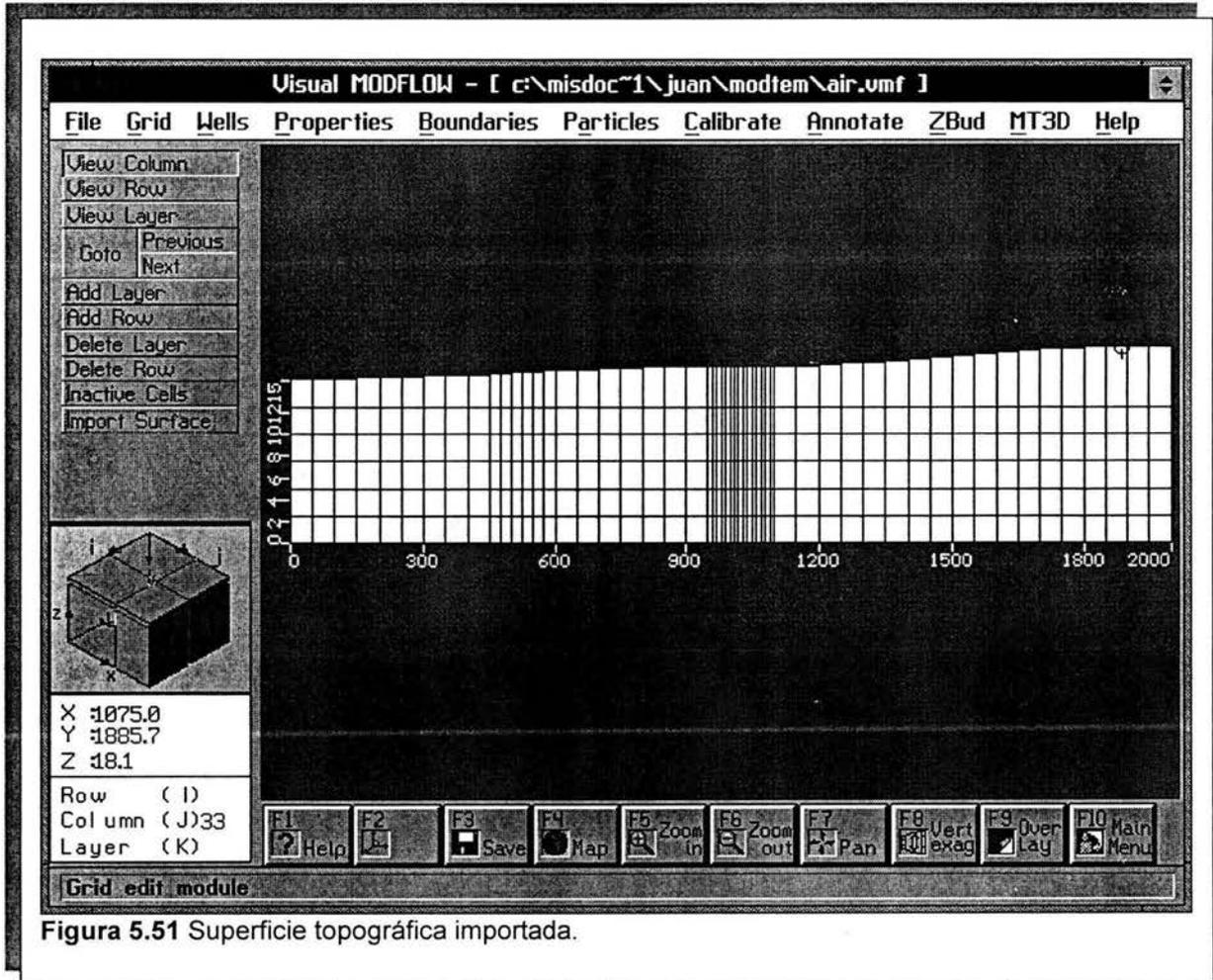


Figura 5.51 Superficie topográfica importada.

5.3.4 CONDICIONES DE EXPLOTACIÓN

6 Datos de entrada de conductividad, almacenamiento y recarga .-

- ⇐ en vista de estrato (**View Layer**) (iluminaremos el estrato superior del modelo y clic en él) esto debería llevarnos a una vista en planta del sitio de airport.
- ⇐ en propiedades (**Properties**).
- ⇐ en conductividad (**Conductivity**).

se nos sugerirá salvar la información de la malla antes de ir a propiedades.

⇐ en si (**Yes**).

Debemos asegurarnos de que nos encontramos en el estrato superior (estrato 1) viendo la localización de la celda actual bajo el cubo navegador. Introduciremos los siguientes valores por defecto para las conductividades hidráulicas y valores de almacenamiento.

Introduciremos los valores usando el siguiente formato:

Conductividad hidráulica en X (m/sec) K_x	2e-4	↵
Conductividad hidráulica en Z (m/sec) K_z	2e-4	↵
Almacenamiento específico (Ss)	1e-4	↵
Rendimiento específico (Sy)	0.2	↵
Porosidad (por)	0.35	↵

⇐ en **Ok**.

Ahora asignaremos los valores de conductividad para el acuitardo en los estratos 3 y 4.

⇐ en ir a (**Goto**), en el menú de la izquierda.

Un menú aparecerá, escribiremos:

3 ↵

⇐ en **Ok**.

⇐ en asignar ventana (**Assign Window**).

Moveremos el mouse a la esquina superior izquierda de la malla y click en el centro de la celda, entonces moveremos el mouse a la esquina inferior derecha y ⇐ en el centro de la celda. Este contorno en ventana cubrirá los estratos completos.

Una ventana de asignar propiedades aparecerá.

⇐ en nuevo (**New**), la malla se tomará azul completamente.

introduciremos los valores siguientes de conductividad para el acuitardo.

⇐ sobre K_x y escribiremos 1e-10 ↵

(el valor de K_y automáticamente será introducido)

en el cuadro para K_z (m/seg) escribiremos 1e-10 ↵

⇐ en **Ok**.

⇐ en copiar estrato (**Copy Layer**).

Un menú de copiar estrato aparecerá.

⇐ en copiar todas las propiedades (**Copy all Properties**).

⇐ en estrato 4 (**Layer 4**) , esto resaltaré en un asurado azul.

⇐ en **Ok**.

Ahora asignaremos las propiedades de almacenamiento del acuitardo.

⇐ en propiedades (**Properties**) en la barra de menú superior.

⇐ en almacenamiento (**Storage**).

⇐ en asignar ventana (**Assign Window**).

Así como en asignar la ventana de los valores de conductividad, click sobre el centro de la celda de la esquina superior izquierda de la malla, entonces moveremos el mouse a la esquina inferior derecha y clic en el centro de esa celda. Una ventana de asignar S aparecerá

⇐ en nuevo (**New**).

El valor de la propiedad se cambiará automáticamente al #2 y la malla se tornará azul. Introduciremos los siguientes valores de almacenamiento para el acuitardo.

Ss (1/m)	1e-2 ↓
Sy	0.003 ↓
Por:	0.65 ↓

⇐ en **Ok**.

⇐ en copiar estrato (**Copy Layer**).

Una ventana de copiar estrato aparecerá.

⇐ en copiar todas las propiedades (**Copy all properties**).

⇐ en estrato 4 (esto resaltará a un asurado azul).

⇐ en **Ok**.

Debemos verificar ambos datos de conductividad y almacenamiento, ⇐ en el editor de una sola celda (**Edit Single**) y entonces ⇐ en cualquier celda dentro de la malla. Esto generará un menú que nos mostrará los datos de conductividad y almacenamiento para esa celda individual. Ahora simularemos el hoyo de filtración abandonado, y veremos su efecto sobre el transporte de contaminantes.

⇐ en **Ok**.

⇐ en propiedades (**Properties**).

⇐ en conductividades (**Conductivity**).

⇐ en ir a (**Goto**) introduciremos el valor de 1 para ir a al estrato 1.

⇐ en **Ok**.

⇐ en **Zoom in o** en la tecla F5.

crearemos una ventana que incluya el área del hoyo abandonado.

⇐ en asignar individualmente (**Assign Single**) esto asignará una propiedad a una celda individual.

una ventana de asignar propiedades aparecerá.

⇐ en la celda que contiene el hoyo abandonado.

⇐ en nuevo (**New**) la propiedad se tornará verde, figura 5.52.

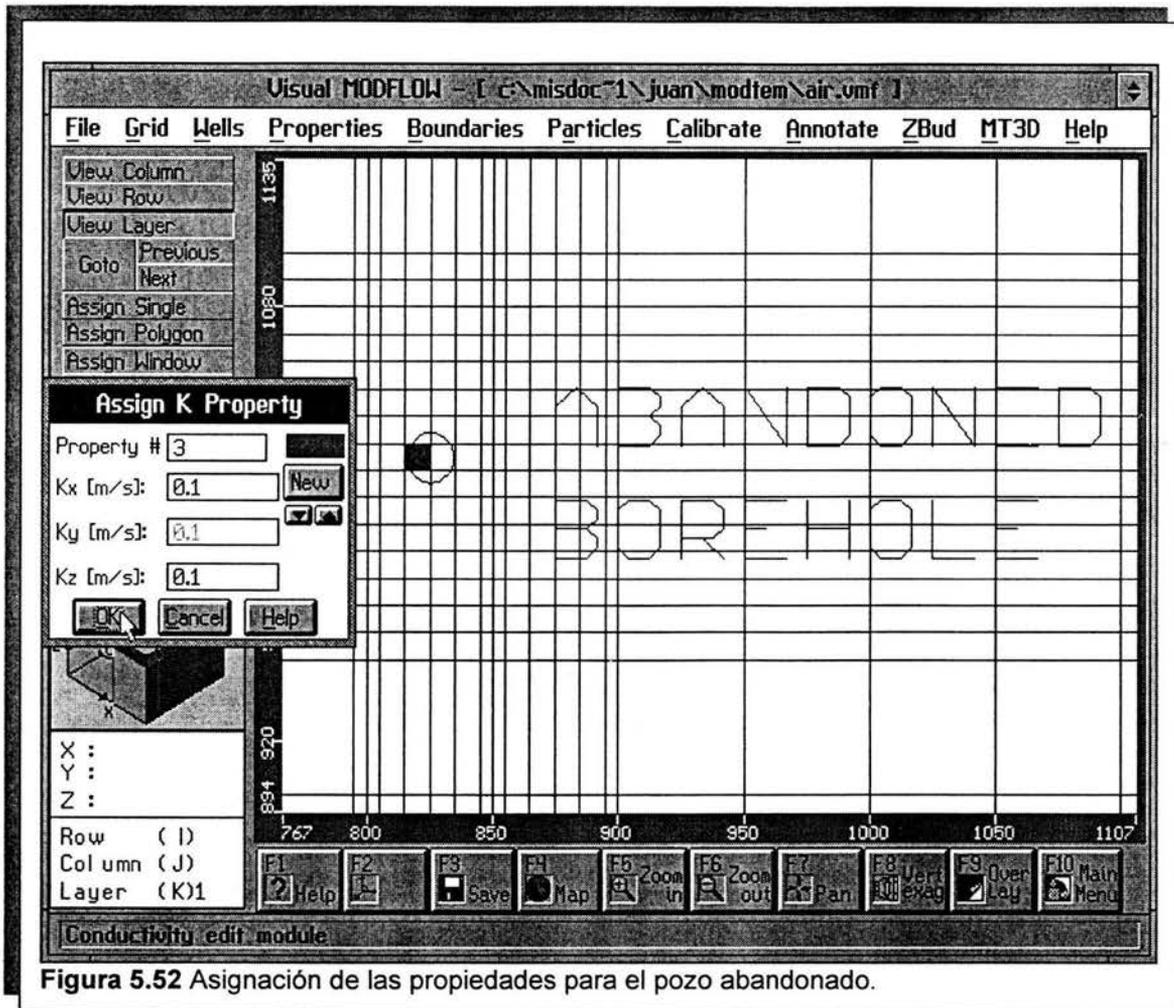


Figura 5.52 Asignación de las propiedades para el pozo abandonado.

Introduciremos los valores siguientes de conductividad para el hoyo, haciendo clic dentro de la K_x y escribiremos:

K_x	0.1 ↵
K_y	0.1 ↵
K_z	0.1 ↵

⇐ en **OK**.

⇐ en copiar estrato (**Copy Layer**).

una ventana de copiar estrato aparecerá.

⇐ en copiar solamente propiedad # (**Copy Only Property #**).

escribiremos: 3 ↵

⇐ en seleccionar todo (**Select All**) todas los estratos estarán resaltados de verde claro como lo ilustra la figura 5.53.

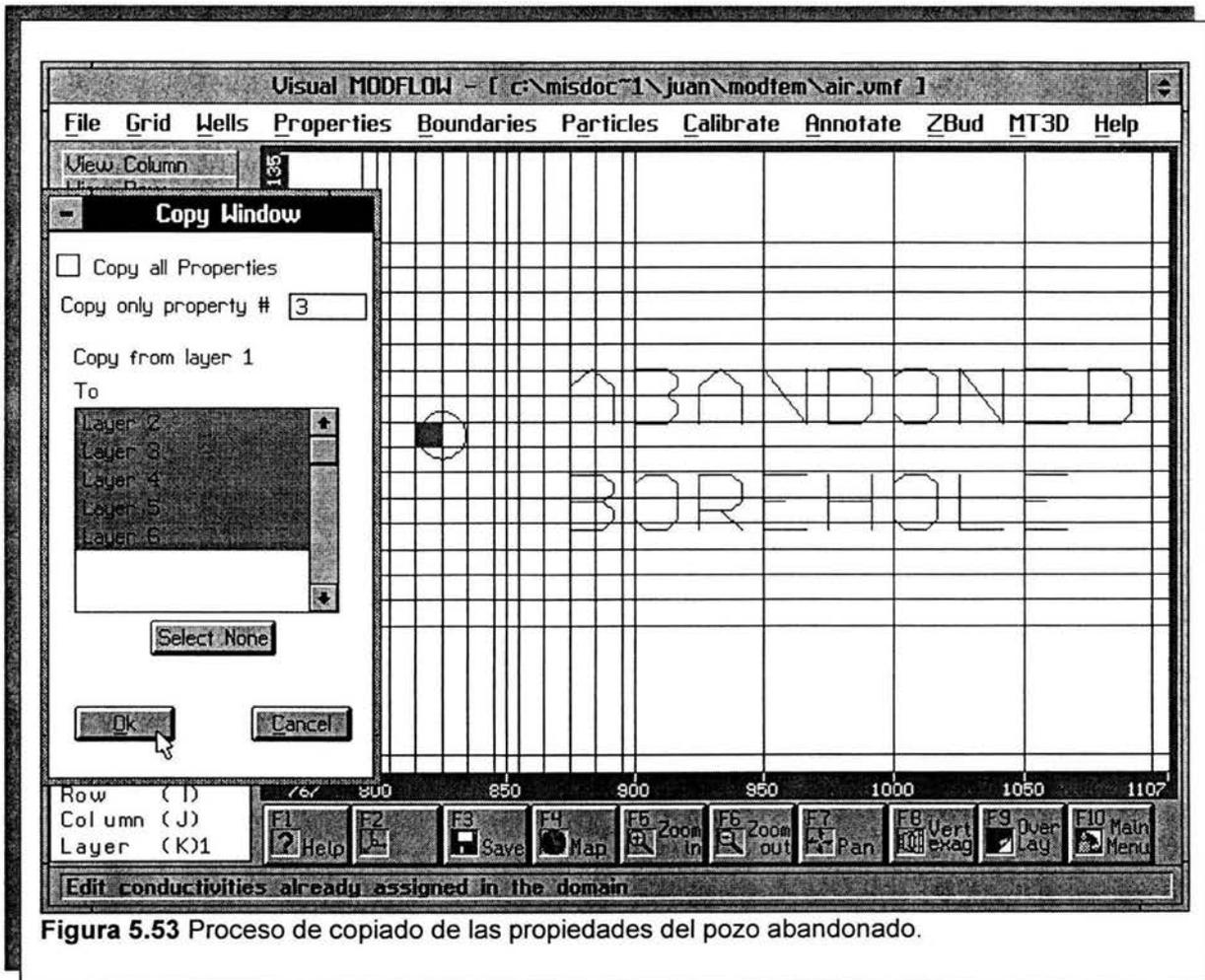


Figura 5.53 Proceso de copiado de las propiedades del pozo abandonado.

- ← en **Ok**.
- ← en **Zoom out**.

Ahora daremos al estrato superior de la malla un valor de recarga.

- ← en fronteras (**Boundaries**).
- ← en recarga (**Recharge**).

Una ventana de valores de recarga aparecerá. En el interior del cuadro recarga (**recharge**) escribiremos:

3650 ↵ para **stop time** y
100 ↵ para **recharge**.

← en *Ok*.

Visual MODFLOW automáticamente asignará los valores de recarga en toda el estrato superior del modelo.

7 Introducción de las condiciones de frontera .-

← en fronteras (*Bondaries*).

← en carga constante (*Constant Head*).

Una ventana aparecerá preguntándonos para salvar los datos de propiedades antes de salir

← en si (*Yes*).

← en asignar línea (*Assign Line*).

Moveremos el mouse a la esquina superior izquierda de la malla. Clic en el centro de la celda. Entonces con el botón derecho del mouse clic en el centro de la celda en la esquina superior derecha de la malla. La línea horizontal de celdas será resaltada en rosa y una carga constante aparecerá. (figura 5.54) introduciremos los siguientes valores:

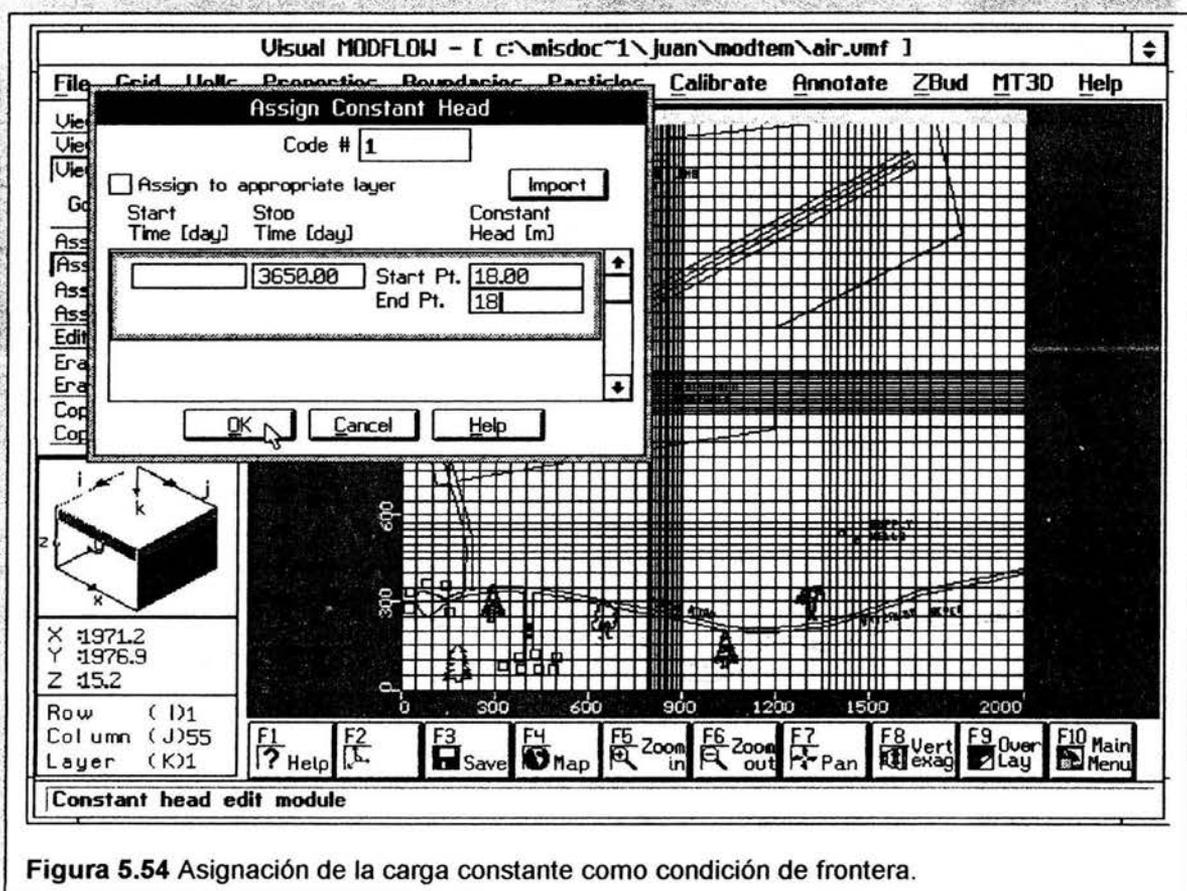


Figura 5.54 Asignación de la carga constante como condición de frontera.

Código # :

1 .

⇐ en el cuadro **Stop Time**

Stop Time	3650 ↵
Start Point	18 ↵
End Point	18

⇐ en **Ok**.

La línea rosa ahora se tornará a un rojo, indicando que los valores de una frontera de carga constante han sido asignados.

⇐ en copiar estrato (**Copy Layer**).

El menú de copiar estrato aparecerá. Dentro de “ **Copy only code #** ” el valor de 1 estará listo para ser presentado.

⇐ en estrato 2 (**layer 2**), se resaltara en una sombra azul.

⇐ en **Ok**.

Ahora introduciremos la frontera de carga constante para el acuífero inferior.

⇐ en ir a (**Goto**) sobre la barra de menú.

El menú de ir a estrato aparecerá.

En la ventana “estrato al que deseas ir “ **layer you wish to go to** ”, resaltaremos el número 1 el cual será reemplazado por el número actual por escribir.

5 ↵

⇐ en **Ok**.

⇐ en asignar línea (**Assign Line**).

Moveremos el mouse a la esquina superior izquierda de la malla y clic en el centro de la celda, entonces con el botón derecho clic sobre el centro de la celda en la esquina superior derecha, la línea se sobresaltara en rosa y un menú de carga constante aparecerá. Introduciremos los siguientes valores.

Code #: 2 ↵

⇐ en el cuadro **Stop Time**

Stop Time:	3650 ↵
Start Time	16.5 ↵
End Point:	16.5

⇐ en **Ok**.

⇐ en copiar estratos (**Copy Layer**).

El menú de copiar estratos aparecerá, dentro del cuadro copiar solamente código remplazaremos el número actual por 2.

⇐ en estrato 6 (**Layer 6**), esto sobresaltará una sombra azul.

⇐ en **Ok**.

⇐ en asignar línea (**Assign Line**).

Moveremos el cursor a la esquina inferior izquierda de la malla y click en el centro de la celda. Entonces con el botón derecho del mouse clic en el centro de la celda en la

esquina inferior derecha de la malla, la línea será sobresaltada en rosa y un menú de carga constante aparecerá. Introduciremos los siguientes valores.

Code# 3 ↵
 ⇐ en el cuadro **Stop Time**
 Stop Time 3650 ↵
 Start Point 14.5 ↵
 End Point 14.5
 ⇐ en **Ok**.
 ⇐ en copiar estrato (**Copy Layer**).

el menú de copiar estrato aparecerá. Dentro de la ventana copiar solamente código # reemplazaremos el número actual con 3.

⇐ en estrato 6 (**Layer 6**), lo cual sobresaltara con una sombra azul.
 ⇐ en **Ok**.

después de asignar los valores de carga constante.

⇐ en vista en columna (**View Column**).
 ⇐ en cualquier columna.

verificaremos que las fronteras sean similares a la figura 5.55.

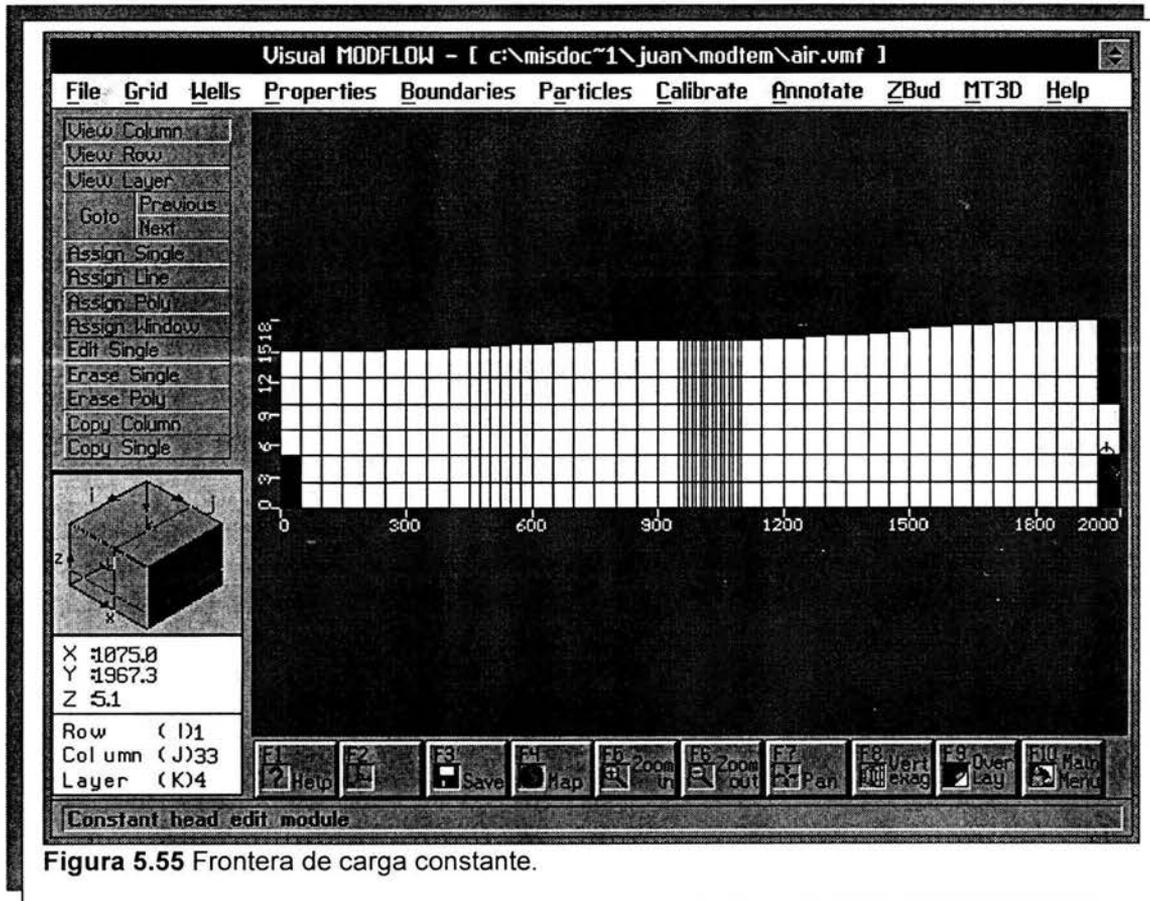


Figura 5.55 Frontera de carga constante.

⇐ en vista de estrato (**View Layer**).

Resaltaremos el estrato superior del modelo y clic en él.

Ahora asignaremos un río a lo largo de la frontera sureste en el estrato superior del modelo.

- ← en frontera (**Boundaries**).
- ← en ríos (**Rivers**).
- ← en asignar línea (**Assign Line**).

Usando el mapa como guía, empezando sobre el lado sur oeste (lado izquierdo de la malla) digitalizaremos el río haciendo clic sobre su ruta con el botón izquierdo del mouse. Cuando alcancemos la frontera sureste (lado derecho de la malla), ← sobre el botón derecho del mouse.

Un menú, figura 5.56, nos sugerirá introducir información acerca del río.

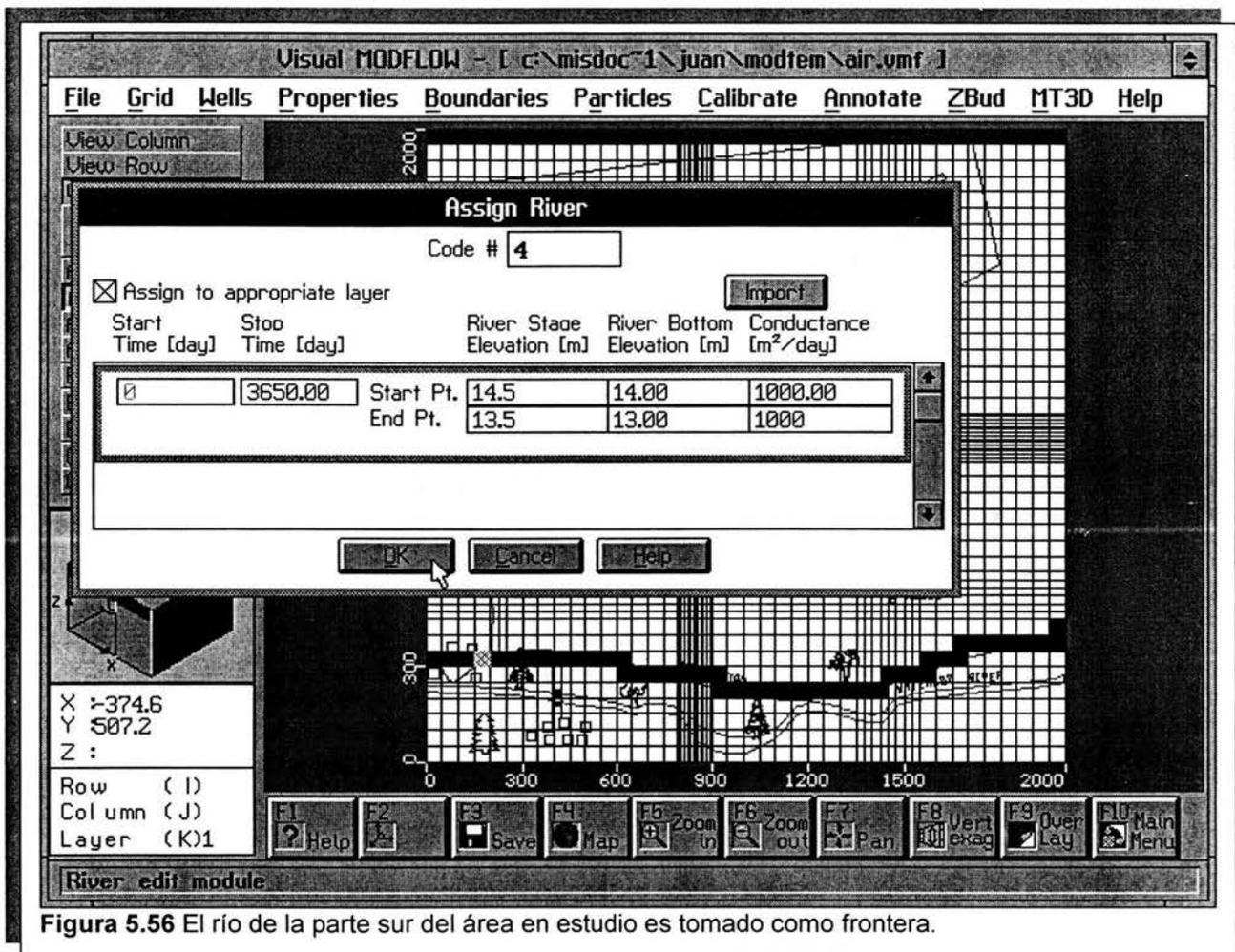


Figura 5.56 El río de la parte sur del área en estudio es tomado como frontera.

Introduciremos los siguientes valores:

Code #	4	
⇐ en el cuadro Stop time.		
Stop time	3650	↵
Start point River stage	14.5	↵
Star point River bottom	14.0	↵
Conductance	1000	↵
End point river stage	13.5	↵
End point river bottom	13.0	↵
Conductance	1000	

⇐ en **Ok.**

Después de que el río ha sido definido, una línea azul aparecerá extendiéndose.

Nota: técnicamente hablando, estos valores de conductividad son un error por que dentro de MODFLOW, la conductancia esta definida como (conductividad hidráulica / espesor del acuífero) X el área de la celda. Discretizando la malla, crear celdas de diferentes áreas, las cuales a su vez crean celdas de diferentes valores de conductancia. Para este propósito de este ejemplo, diferentes valores de conductancia para celdas individuales no serán creadas, de cualquier modo, el usuario debe estar consiente de estos problemas.

8 Asignar partículas.-

Ahora descargaremos algunas partículas emanando del área de combustible para ver dónde los contaminantes se introducen al agua subterránea en esa área a la que iremos.

⇐ en partículas (**Particles**).

⇐ en si (**Yes**) para salvar los datos de frontera.

⇐ en agregar círculo (**Add Circle**).

⇐ dentro del centro del área de combustible, al norte de la franja de desembarco, y extenderemos el círculo hasta que llene el área y entonces clic de nuevo.

Un menú aparecerá, figura 5.57.

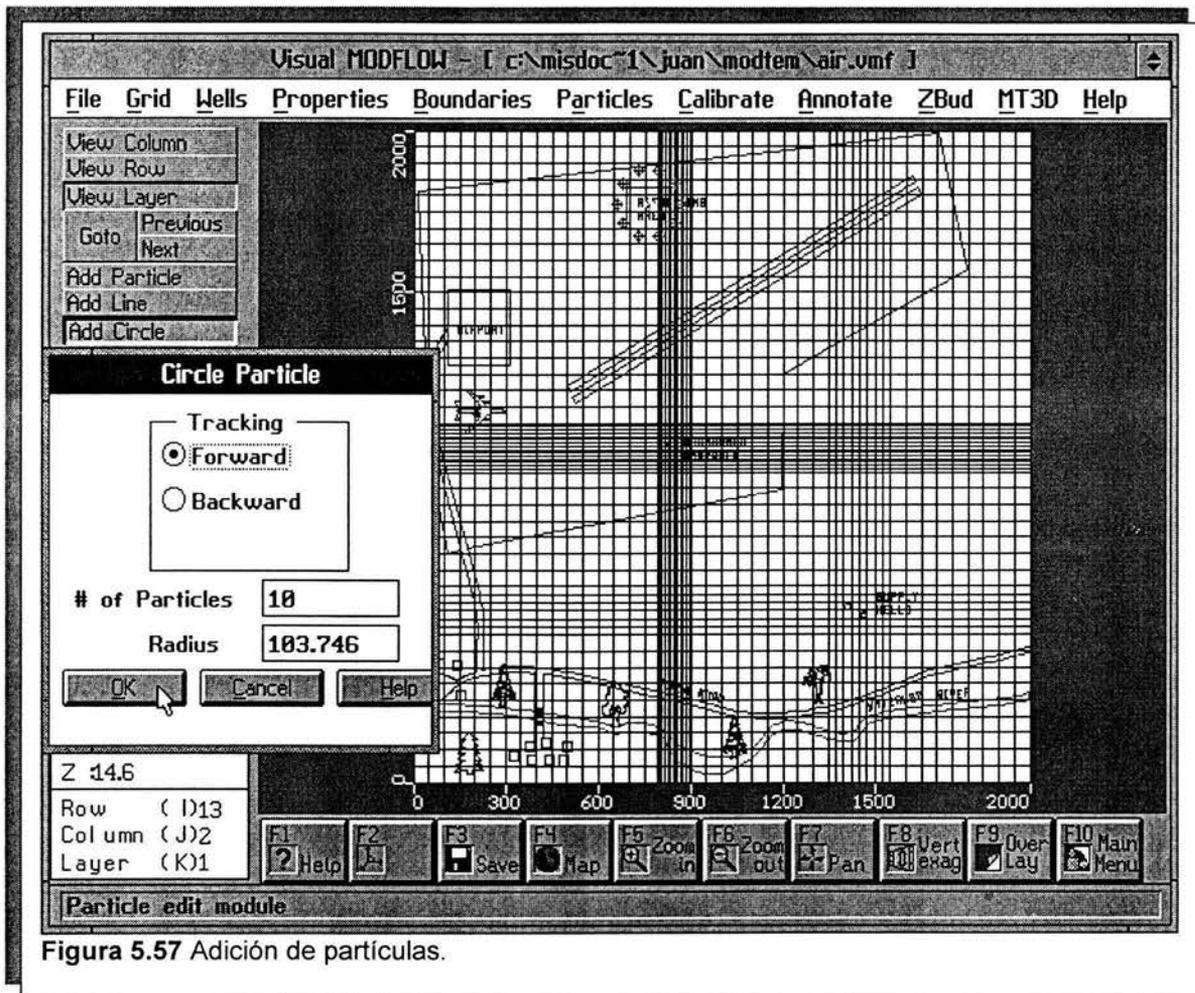


Figura 5.57 Adición de partículas.

- ← en siguiente (*Forward*).
- ← en *Ok*.

9 Añadiendo pozos .-

- ← en pozo (*Wells*).
- ← en si (*Yes*) para salvar los datos de partícula
- ← en *Zoom in F5*.

Click en el centro de una celda cerca de un pozo de suministro, noreste del río, y extenderemos un cuadro alrededor de los pozos de suministro y clic de nuevo.

- ← en añadir pozos (*Add Well*).

Moveremos el cursor dentro de una celda que contenga el pozo del oeste y clic sobre él. Un cuadro nos sugerirá para especificar información mostrada sobre la rejilla del pozo, figura 5.58.

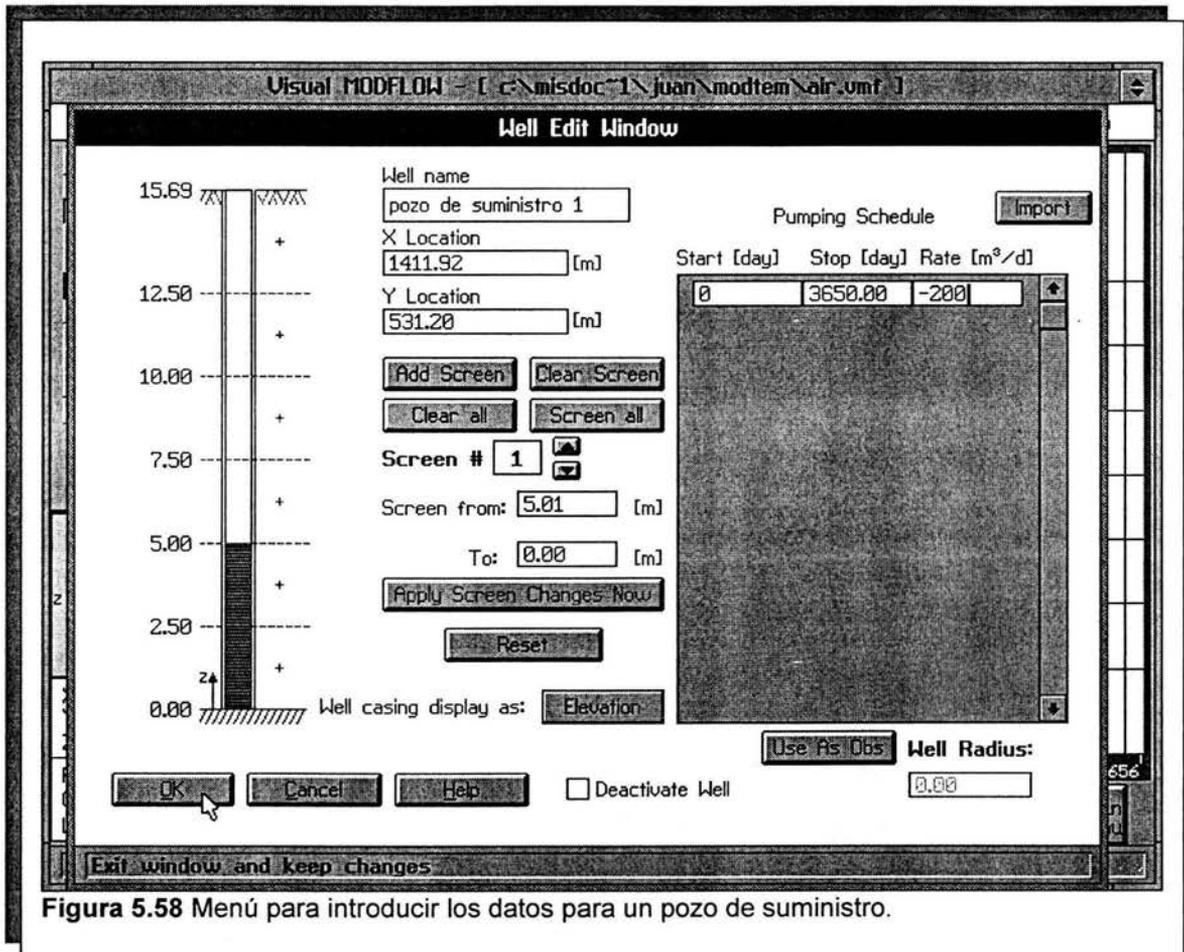


Figura 5.58 Menú para introducir los datos para un pozo de suministro.

Introduciremos la siguiente información:

Nombre del pozo (Well name):	pozo de suministro 1
Tiempo de bombeo (Stop day):	3650
Bombeo (Rate):	-200

⇐ en añadir rejilla de pozo (**Add Screen**).

Queremos proyectar el pozo en el fondo del acuífero solamente, el cual tiene un fondo de 5 metros. Clic dentro del pozo, en elevación de 5 metros, estiraremos una barra roja hasta el fondo del acuífero y entonces clic de nuevo. El fondo de 5 metros del pozo sería sombreado en azul después de asignar la proyección.

⇐ en **Ok**.

si hubiéramos fallado para introducir algún dato, Visual MODFLOW nos permite completar la tabla en este momento.

⇐ en copiar pozo (**Copy Well**).

Moveremos el cursor al pozo oeste y clic sobre él. Entonces moveremos el cursor en la localización del pozo este y clic de nuevo para copiar el pozo.

⇐ en editar pozo (**Edit Well**).

⇐ en el pozo este (ya que fue creado por copia del pozo de suministro # 1).

cuando la pantalla de editar pozo aparezca, ir dentro del nombre del pozo en la porción del cuadro y cambiar el nombre a pozo de suministro 2.

- ⇐ en **Ok**.
- ⇐ en Menú principal (**Main Menu**) o en F10.
- ⇐ en si (**Yes**), para salvar la información del pozo.

5.3.5 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

10 Ejecutar MODFLOW .-

- ⇐ en ejecutar (**Run**).
- ⇐ en **Ok**, para aceptar el estado establecido.
- ⇐ en ejecutar modelo (**Run**).

Una pantalla aparecerá (figura 5.59) sugiriéndonos definir que tarea simular.

- ⇐ en ejecutar MODFLOW (**Run MODFLOW**).
- ⇐ en ejecutar MODPATH (**Run MODPATH**).
- ⇐ en **Ok**.

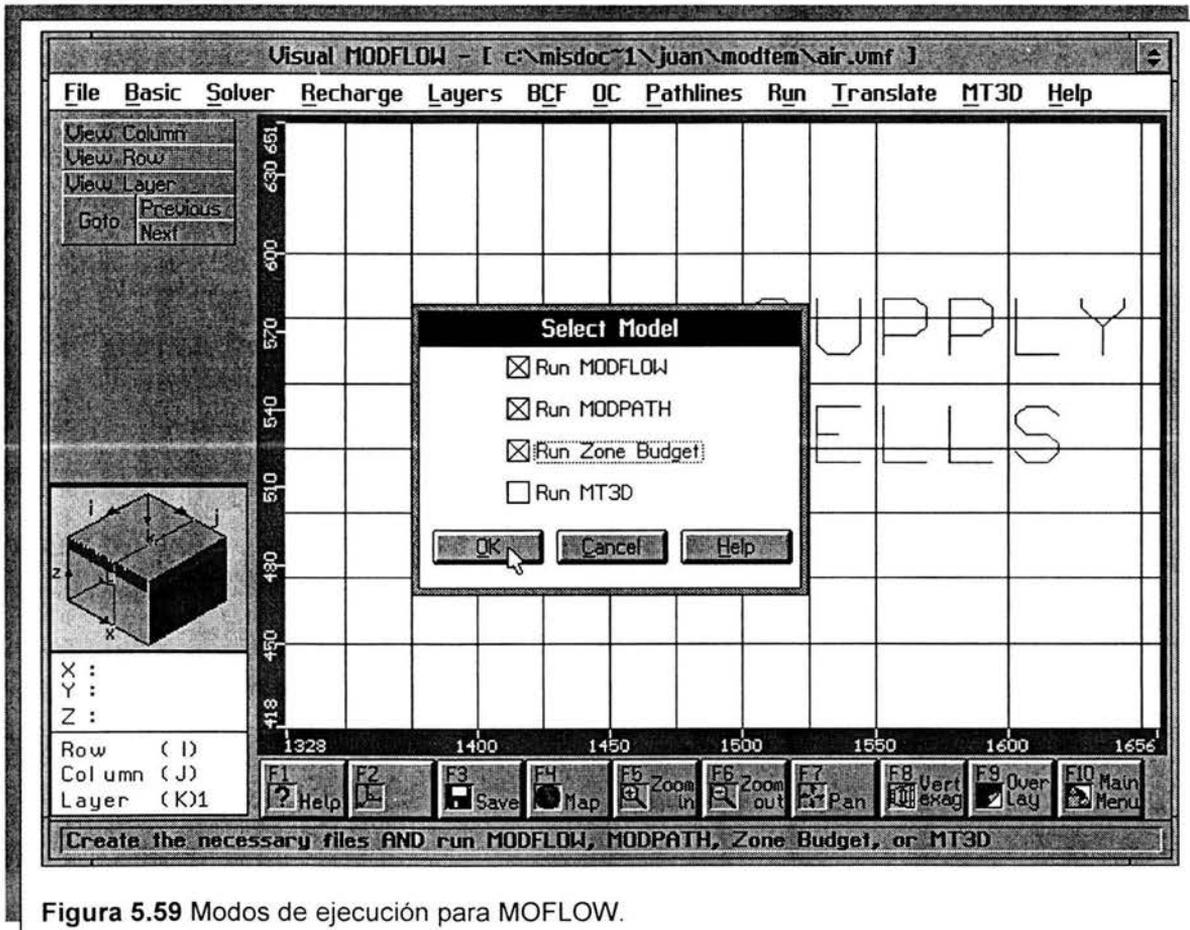


Figura 5.59 Modos de ejecución para MOFLOW.

El solucionador por defecto es el **Waterloo Hydrogeologic Software Solver**. Primero ejecutaremos la simulación usando el W.H.S Solver y después lo compararemos con P.C.G.2.

Visual MODFLOW traslada la información producida en la sección de datos de entrada del programa dentro de los archivos estándar de U.S.G.S. MODFLOW y MODPATH y sus apropiadas extensiones (BAS; WEL, BCF, etc), el programa entonces ejecuta el oficial U.S.G.S. modelos modpath y MODFLOW.

5.3.6 RESULTADOS

11 Visualización de los resultados.

- ⇐ en datos de salida (*Output*).
- ⇐ en rutas de contaminantes (*Pathlines*).

las *Pathlines* serán dibujadas en pantalla (figura 5.60).

- ⇐ en vista de columna (*View Columns*).

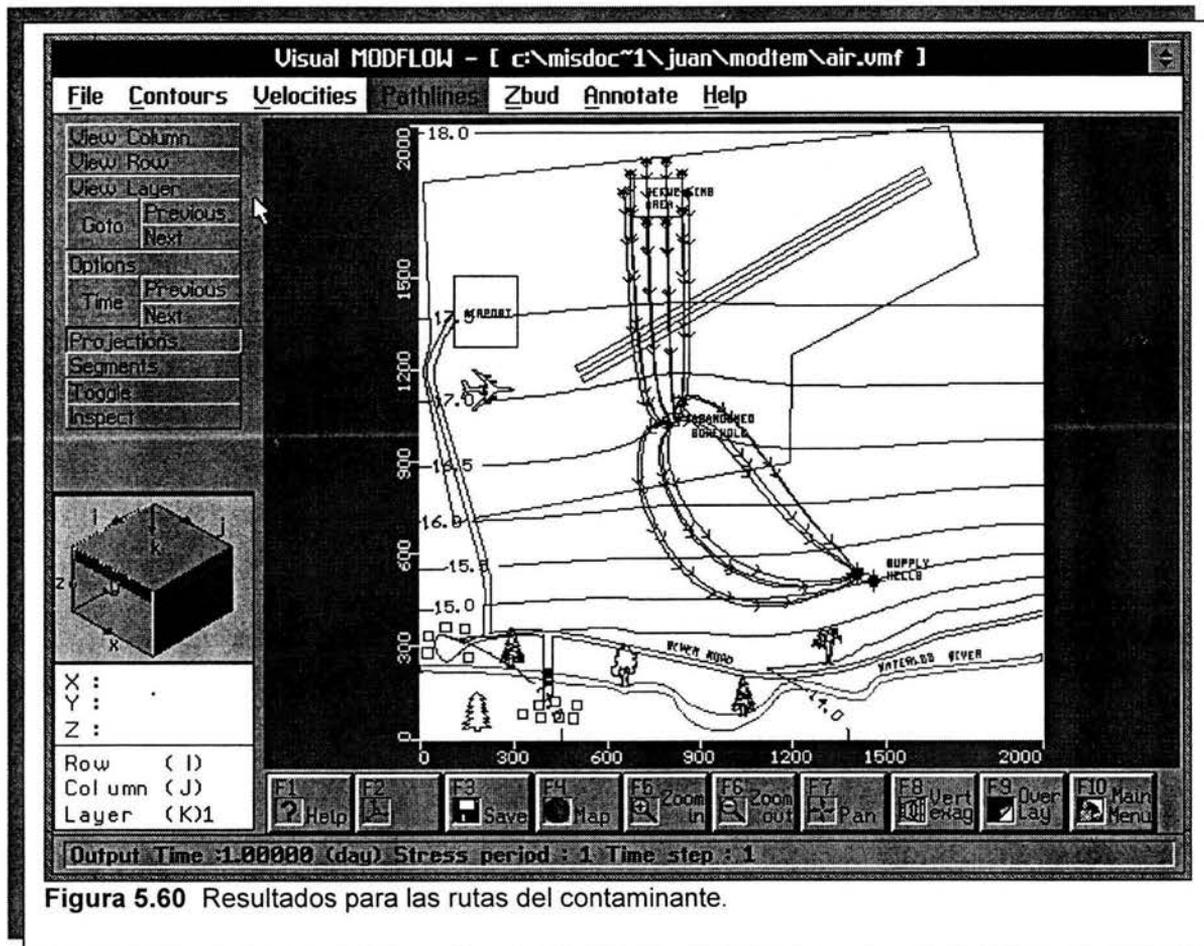


Figura 5.60 Resultados para las rutas del contaminante.

Moveremos el cursor cruzando la pantalla hasta que la barra roja iluminada este en la vecindad del hoyo abandonado y clic sobre él.

⇐ en (**Overlay**).

Una lista aparecerá con varias opciones, moveremos la barra de desplazamiento hasta que alcancemos las conductividades overlay.

⇐ ⇐ en conductividades (**Conductivities Overlay**), este acto lo enciende.

⇐ en **Ok**.

12 Comparando diferentes solucionadores .-

⇐ en **Zbud**

⇐ en balance de masa (**Mass Balance**).

Aparecerá una lista de los cálculos de balance para determinar el % de discrepancia. Ahora regresaremos el ejemplo de airport para usar un solucionador diferente con la finalidad de comparar resultados.

⇐ en **Ok**.

⇐ en menú principal (**Main Menu**).

⇐ en ejecutar (**Run**).

⇐ en **Ok**, para aceptar el estado establecido.

⇐ en solucionador (**Solver**).

⇐ en **P.C.G.2**.

⇐ en **Ok**.

⇐ en ejecutar modelo (**Run**).

⇐ **Run MOFLOW** (si no esta establecido).

⇐ **Run MODPATH** (si no esta establecido).

⇐ **Ok**.

Cuando MODFLOW termina de ejecutar, regresaremos a los datos de salida y Zbud para observar la diferencia de balance de masas.

Comparemos las veces que se hacen iteraciones para ver cuál solucionador trabaja más rápido. Usando los valores por defecto para convergencia, PCG2 suministrará un razonable balance de masa para este ejemplo, sin embargo, esto requiere mucho más tiempo de duración de simulación (15 minutos contra 45 segundos).

13 Efectos de un hoyo abandonado .-

Como una ejercicio opcional, vamos a las conductividades y reemplacemos las propiedades del hoyo abandonado (**borehole**) con las propiedades de las formaciones adyacentes. Reejecutaremos las simulaciones y compararemos los resultados.

Las rutas de contaminantes (**pathlines**) deberían ser similares a las figuras 5.61 y 5.62 ; podemos notar los dramáticos efectos de la presencia del borehole abandonado. Si el borehole no es considerado entonces uno predeciría que los contaminantes permanecerían en el acuífero superior y no alcanzaría a los pozos de suministro. Con esto damos por concluido el ejemplo.

⇐ menú principal (**Main Menu**).

⇐ en salir (**Exit**).

Con esto damos por terminado el ejemplo 5.3.

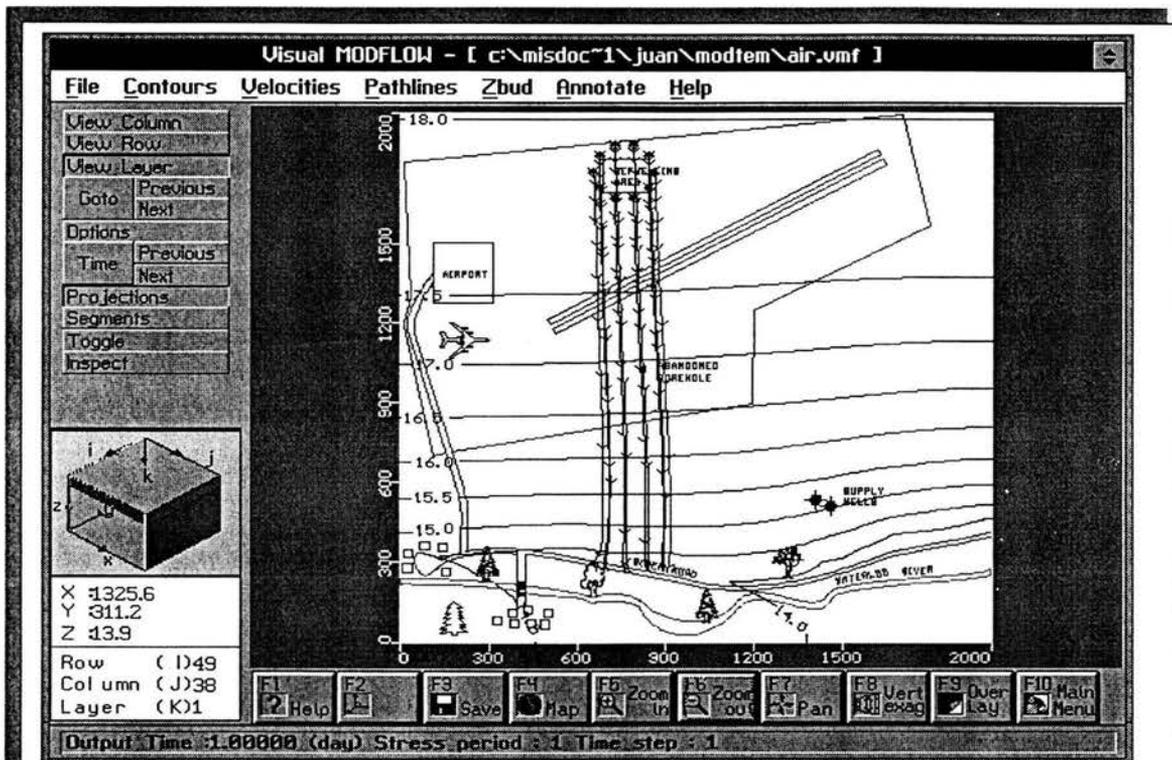


Figura 5.61 Ruta del contaminante cuando no es considerado el hoyo abandonado.

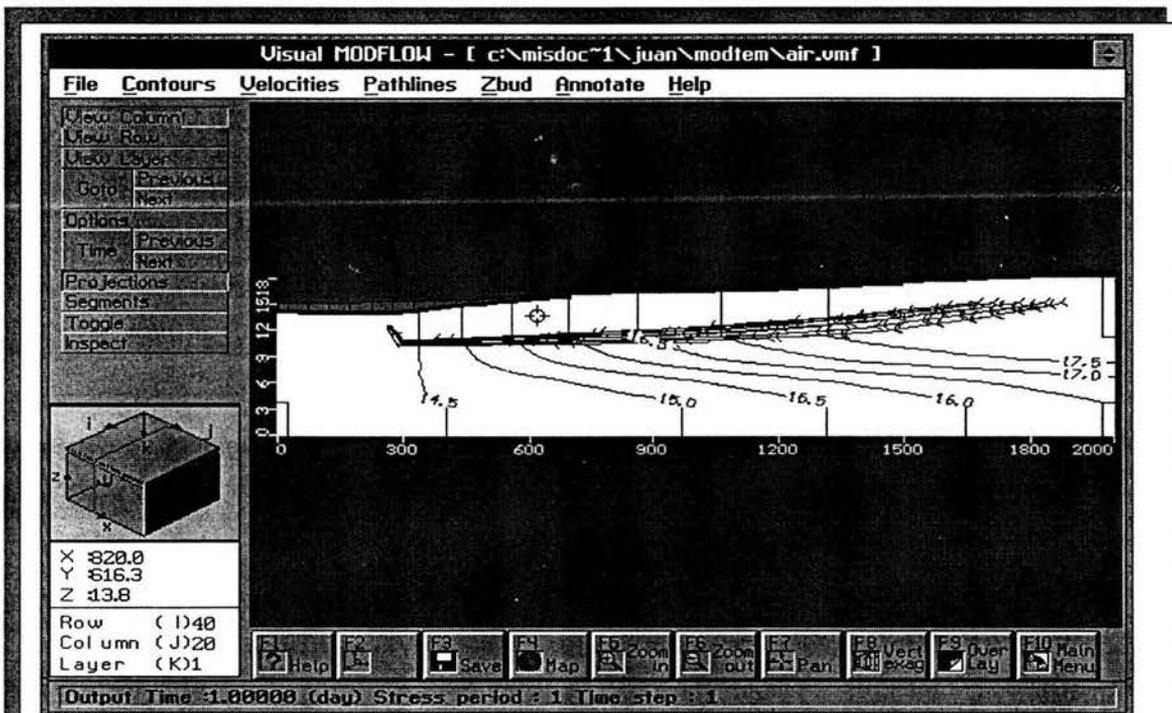


Figura 5.62 Sección de corte que muestra cómo las rutas del contaminante están confinadas en el acuífero superior, cuando el hoyo abandonado es ignorado.

CONCLUSIONES

Actualmente el uso de la computadora en las actividades que impulsan el desarrollo del país es indispensable, puesto que ella nos lleva a una mejor agilización y precisión en los resultados, disminuye el tiempo y costo en diferentes procesos. Desde el uso que le da una secretaria en una oficina particular o gubernamental hasta el uso que le da un prestigiado investigador en un laboratorio.

Sin embargo el uso de la computadora puede resultar contrario a su propósito. El usuario debe tener los conocimientos teóricos y la facilidad de comprender los datos que son introducidos. De nada sirve contar con el equipo más moderno y costoso si no existe un hombre experimentado que lo opere adecuadamente. Experiencia y tecnología hacen una fórmula magnífica que impulsa el avance de la ciencia y por ende el del bienestar humano.

En ingeniería no es la excepción ya que el ordenador se ha convertido en una herramienta poderosísima para el análisis de diversos fenómenos físicos y económicos. En las aulas donde se forma a los ingenieros una idea es siempre constante y debe permanecer en su mente: ***El papel del ingeniero es optimizar los recursos mediante el estudio de diversas alternativas, usando todos sus conocimientos y aplicando la técnica disponible para ello.***

El presente trabajo es un esfuerzo para reafirmar este pensamiento. La tecnología está en el programa Visual MODFLOW, la teoría en la Geohidrología y la experiencia en el usuario. El uso correcto del programa Visual MODFLOW ofrece diversas alternativas de solución para diferentes condiciones físicas del sistema, además de que disminuye significativamente el uso de costosos procedimientos y aparatos para el estudio del mismo sistema.

Otra de las ventajas de Visual MODFLOW es que mediante el uso del método matemático de diferencias finitas, facilita la interpretación y el manejo de las ecuaciones complejas que rigen el flujo de agua subterránea. Por ejemplo, anteriormente el empleo directo de gráficas y ecuaciones era el único medio para resolver los problemas, además una vez solucionados, los resultados tenían que ser transformados de números abstractos a situaciones físicas reales, estas acciones centralizaban a la Geohidrología a un círculo reducido de profesionistas. Hoy, gracias al Visual MODFLOW, esa realidad ha sido cambiada, ya que no es necesario saber de matemáticas, aunque si es conveniente, para introducir los datos que son utilizados en el MODFLOW. Los resultados son muy ilustrativos ya que aparecen en forma tan clara y sencilla que hasta una persona que no ha tenido ningún contacto con Geohidrología, como es el caso de amas de casa, políticos, empresarios,.... pueden observar cómo se presenta el flujo del agua en los mantos acuíferos.

Visual MODFLOW no realiza el trabajo por nosotros mismos, no debemos olvidar que una máquina no cuenta con un cerebro propio por lo que no puede hacer decisiones por si sola. La toma de decisiones le corresponde al Ingeniero, por lo tanto la responsabilidad del desarrollo del país, en este caso de la dotación de agua en

actividades económicas o domésticas en un sentido estrictamente técnico, sigue perteneciendo a los ingenieros.

Con Visual MODFLOW se puede dar solución a una variedad muy amplia de problemas, sin embargo para el caso de esta investigación solo se dieron tres problemas resueltos, capítulo 5, que tienen la finalidad de introducir al lector al extenso mundo del MODFLOW. En ellos los resultados pueden ser comparados, por ejemplo, podemos simular el acuífero en una primera instancia sin causarle ningún efecto por cuestiones que resulten de actividades humanas (bombeo, recarga, contaminación) y en otra instancia podemos simularlo con afectaciones o explotaciones. En la figura 6.1 se pueden apreciar los efectos de la dirección del flujo de agua subterránea y de abatimientos para dos simulaciones del mismo sistema, uno cuando existen pozos de bombeo inactivos (figura 6.1a) y el otro cuando están operando (figura 6.1b). Estos resultados, junto con el de abatimientos, niveles piezométricos, etc. pueden llegar a proporcionar distintas opciones de alternativas para finalmente tomar la mejor decisión de solución.

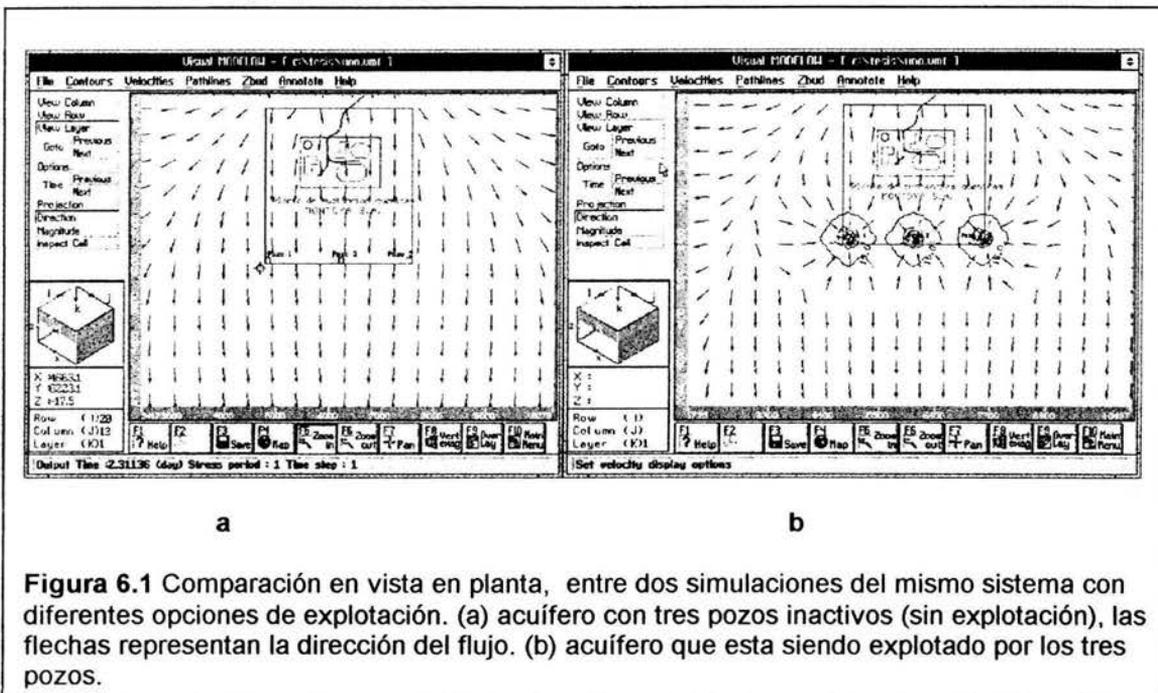
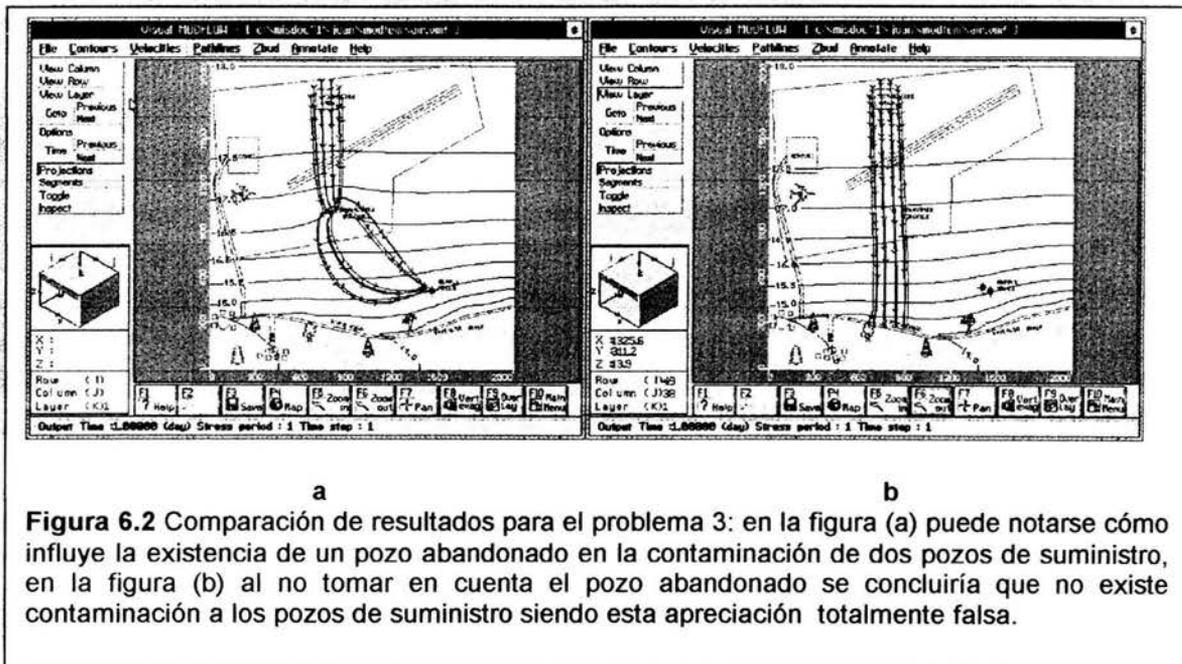


Figura 6.1 Comparación en vista en planta, entre dos simulaciones del mismo sistema con diferentes opciones de explotación. (a) acuífero con tres pozos inactivos (sin explotación), las flechas representan la dirección del flujo. (b) acuífero que esta siendo explotado por los tres pozos.

En el capítulo 5, respecto al primer problema “Afectación de tres pozos por una fuente de contaminación”, puede observarse que cuando existen tres pozos de explotación cercanos, el abatimiento del nivel de agua es mayor para el pozo central, debido a la influencia que le ocasionan los otros dos. Para la simulación transitoria, donde existen diferentes periodos de bombeo, el estrato superior es el que más “siente” la explotación, figura 5.31 debido a que en él se encuentra la rejilla, además puede observarse una recuperación de la carga hidráulica a través del tiempo, el acuífero inferior casi no es influenciado por el bombeo por lo que para las condiciones dadas no afecta los resultados.

Visual MODFLOW requiere de condiciones de frontera adecuadas al sistema para que pueda simular. El problema 2 "Emisión de contaminantes en la zona de captura" da a notar que MODFLOW puede no ser perfecto, puesto que se puede simular al inicio con datos de entrada erróneos y obtener resultados igualmente falsos lo que llevaría a tomar una decisión equivocada. Sin embargo cuando los datos son analizados detalladamente y se logra obtener una calibración óptima, MODFLOW demuestra ser aún más eficiente como herramienta. De acuerdo con una comparación de resultados entre el problema 2 y un problema resuelto previamente por un investigador en 1987 se puede decir que ambas soluciones son muy parecidas, aunque MODFLOW es más exacto ya que el investigador admitió usar un simple solucionador de ecuaciones, mientras que el MODFLOW usa cuatro diferentes solucionadores, y entre ellos se encuentra el más avanzado y aceptado por el United States Geological Survey (USGS), organismo regulador de agua en los Estados Unidos de Norteamérica.

Los resultados del problema 3 son sorprendentes, ya que se estaría cayendo en un grave error, si no se tomara en cuenta la presencia del pozo abandonado en el dominio del sistema, ya que se diría que no existe contaminación para los pozos de suministro, la figura 6.2 ilustra mejor este caso:



El impacto que trae consigo la explotación desmedida de los acuíferos en el país se refleja en graves problemas como lo es la disminución de capacidad de carga de los suelos, por ejemplo el hundimiento de la Ciudad de México puede predecirse con modelos de simulación, y que el MODFLOW puede ser usado para este propósito. Además la conservación de los mantos acuíferos es un rasgo que no se debe olvidar, ya que pueden resultar contaminados por una fuente externa, y que también el MODFLOW como modelo trata este problema. Las bases para la operación del MODFLOW se presentan en este trabajo y se podrá profundizar tanto como el usuario lo requiera en casos reales, que es una de las finalidades de esta investigación.

México necesitará de profesionales preparados que sean capaces de explotar otras alternativas para el abastecimiento de agua subterránea, se tiene previsto que para el año 2015* se tendrá una mayor escasez del vital líquido, incluso el "oro azul" como muchos la han llamado será motivo de guerra entre países. Por esta razón deberán usarse todos los medios disponibles para aprovechar lo mejor posible este recurso, entre los que se encuentran, como herramienta indispensable hoy en día, los modelos de simulación por computadora.

El esfuerzo del ingeniero para actualizarse y aprovechar la tecnología en la modelación matemática de los recursos naturales debe ser constante, ya que ésta evoluciona día a día.

* Fuente: Revista interna de la Comisión Nacional del Agua (CNA) "Vertientes" Año 9 Núm. 87.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Fetter C.W. **“Applied hidrogeology”** third edition. Edit. Prentice Hall, New Jersey, 1994.
- 2 Domenico Patrick A. and Schwartz Franklin W. **“Physical and Chemical Hidrogeology”** second edition. Edit John Wiley and sons,inc. 1998.
- 3 Delleur Jacques W. **“The hanbook of Groundwater Engineering”**. Edit. CRC Press, 1999.
- 4 Kashef Ismail Abdel – Aziz **“Groundwater Engineering”** . Edit McGraw Hill, 1987.
- 5 Tood Keith David **“Groundwater Hydrology”** second edition. Edit John Wiley and sons,inc. 1980.
- 6 Fuentes Reyes Edgar **“Fundamentos de Geohidrología”** Tesis profesional, Ingeniería Civil ENEP Acatlán-UNAM, México, 2000.
- 7 Comisión Federal de Electricidad **“Geohidrologia”** Manual de Diseño de Obras Civiles Sección (A) - Hidrotécnia (A1.12), México, 1983.
- 8 Cleary Robert W. **“Introduction to applied groundwater flow modeling”**. National Ground Water Association’s. Visual Modflow Course. 1995.
- 9 Franz Thomas **“How to build a model”** National Ground Water Association’s. Visual Modflow Course. 1995.
- 10 Vergara S. Miguel A. **“Técnicas de modelación en hidráulica”**. Edit. AlfaOmega, México D.F. 1995.
- 11 Shannon Robert E. **“Simulación de sistemas, diseño, desarrollo e implementación”**. Edit Trillas, México D.F. 1988.
- 12 Haitjema H.M. **“Analytic element modeling of groundwater flow”**. Edit. Academic Press, 1995.
- 13 Vargas A. V. **“Técnicas y análisis de costos de pozos profundos y agua subterránea”** Edit. Limusa, México, 1976.
- 14 Argüelles Iturbe R. y Martínez Silva A. **“Agua subterránea y contaminación”** Instituto de ingeniería. (No 539) – UNAM, México, Julio de 1992.
- 15 Verruijt A. **“Groundwater Flow”** (second edition) Edit. Edward Arnold, London, 1982.