

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS Y DE
INGENIERÍA DE MINAS**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Optimización de un abatimiento del nivel freático para una excavación mediante el programa Modflow

Titulación: Graduado en Ingeniería Civil

Alumno: D. Jesús Hidalgo Pérez

Director: Dr. Iván Alhama Manteca

Cartagena, 13 de Octubre de 2015

AGRADECIMIENTOS

He de expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que me han dado la oportunidad de desarrollarme, tanto intelectual como personalmente. Su influencia es de una importancia capital para poder llegar al punto en el que me encuentro, finalizando una carrera y el trabajo culmen de la misma.

No puedo nombrar a todos, pero si quiero reconocer específicamente su valor a algunos de ellos:

D. Iván Alhama Manteca, mi director de trabajo, cuya importancia ha sido vital en el desarrollo del mismo por aportar sus conocimientos y su experiencia, y por ser el creador de esta idea.

Mi familia, por su apoyo y empuje incondicional.

Y, finalmente, a mi novia, mis amigos y mis compañeros de clase, por su ánimo y apoyo desinteresados en todo momento.

ÍNDICE

<i>CAPÍTULO 1</i>	<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>CAPÍTULO 2</i>	<i>OBJETIVOS Y ALCANCE</i>	2
<i>CAPÍTULO 3</i>	<i>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</i>	3
3.1	EL AGUA EN EL MEDIO POROSO. ACUÍFEROS.....	3
3.2	MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL MEDIO: PIEZOMETRÍA Y LEY DE DARCY	9
3.3	ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO: ECUACIÓN DE LAPLACE Y ECUACIÓN DE POISSON	15
<i>CAPÍTULO 4</i>	<i>EL PROGRAMA MODFLOW</i>	22
4.1	DESCRIPCIÓN GENERAL	22
4.2	INTERFAZ DE COMUNICACIÓN CON MODFLOW: VISUAL MODFLOW PREMIUM V.4.2	26
4.2.1	INTRODUCCIÓN DE DATOS (<i>INPUT</i>)	27
4.2.2	SIMULACIÓN (<i>RUN</i>)	37
4.2.3	VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS (<i>OUTPUT</i>).....	39
<i>CAPÍTULO 5</i>	<i>APLICACIONES</i>	41
5.1	CONSTRUCCIÓN DE LA PANTALLA	44
5.2	OPTIMIZACIÓN DEL CAUDAL PARA EL CASO DE UN POZO	48
5.3	OPTIMIZACIÓN DE LA POSICIÓN Y DEL CAUDAL PARA EL CASO DE DOS POZOS	53
5.4	OPTIMIZACIÓN DEL CAUDAL PARA EL CASO DE TRES POZOS	63
<i>CAPÍTULO 6</i>	<i>CONCLUSIONES</i>	70
<i>CAPÍTULO 7</i>	<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	72

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se aborda un problema de abatimiento de nivel freático en una excavación mediante el empleo de métodos numéricos. La estructura del documento describe, en primer lugar, los fundamentos teóricos del flujo de agua en medios porosos. Posteriormente se hace una descripción sucinta del programa Modflow (Langevin et al, 2003), herramienta numérica utilizada para la resolución de las ecuaciones de gobierno, y del entorno de ventanas de la interfaz Visual Modflow Professional, versión 4.2 (www.waterloohydrogeologic.com) que es el software utilizado. Finalmente se presentan y comentan los distintos escenarios estudiados para la optimización de la solución propuesta.

El interés de este trabajo radica en que aborda un campo fundamental en ingeniería del terreno, la presencia de agua en el suelo, desde el punto de vista de los métodos numéricos. Estas técnicas se han convertido hoy día en una herramienta que facilita la labor del experto en geotecnia. En concreto, el empleo de métodos numéricos para la resolución de problemas de flujo en medios porosos, es en ocasiones exigido en los pliegos de prescripciones técnicas de obras de cierta relevancia ofertadas por organismos públicos.

Capítulo 2

OBJETIVOS Y ALCANCE

Este proyecto específico tiene por objeto la familiarización con el manejo del software Visual Modflow Professional, versión 4.2. Este programa permite la resolución numérica de problemas de flujo de agua en medios poroso. En el caso del estudio planteado en este trabajo se ha llevado a cabo una optimización de caudales y del número y disposición de pozos para el diseño de un abatimiento del nivel freático en un acuífero libre.

La revisión de los aspectos teóricos del flujo de agua en medios porosos permite situarse en disposición de controlar y entender los parámetros que se introducen en el *input* e interpretar los resultados del *output*.

Pese a la simplificación del escenario planteado, se han adquirido los conocimientos básicos necesarios para abordar problemas más complejos, como pueda ser el de acuíferos multicapa, heterogéneos o confinados.

Capítulo 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. EL AGUA EN EL MEDIO POROSO: ACUÍFEROS.

Un acuífero es una formación geológica que almacena agua y que es capaz de transmitirla de manera que puede ser aprovechada como recurso. El agua de superficie se infiltra a través del suelo hasta encontrarse con una capa impermeable; entonces se acumula y llena los poros y fisuras de las rocas, dando lugar a una zona de saturación. El agua subterránea puede brotar de modo natural (manantiales o fuentes) o ser extraída mediante pozos u otros elementos de captación. Las características fundamentales de un acuífero son la baja velocidad en el movimiento del agua subterránea, los grandes volúmenes de reservas y el gran tiempo de renovación del agua en el sistema.

Según el comportamiento hidráulico del agua, los acuíferos se pueden clasificar en:

- Acuífero libre: Es un acuífero no limitado en la parte superior por un techo impermeable, de manera que existe un nivel freático a una cierta profundidad. Cuando una perforación alcanza este nivel aparece un cierto volumen de agua libre. Estos acuíferos pueden recargarse desde la superficie mediante una fracción de la pluviometría o excedentes de riego.
- Acuífero confinado: Es un acuífero limitado en la parte superior por un techo impermeable, de manera que el agua que se encuentra a presión superior a la atmosférica en todos los puntos. Cuando una perforación llega al techo del acuífero el agua sube por el tubo hasta que se estabiliza a una profundidad correspondiente a su nivel piezométrico. La recarga de estos acuíferos se produce lateralmente.

- Acuífero semiconfinado: Es un acuífero de tipo confinado que se diferencia de este en que se encuentra limitado en la parte superior por una formación geológica muy poco permeable pero que es capaz de producir recarga al acuífero.

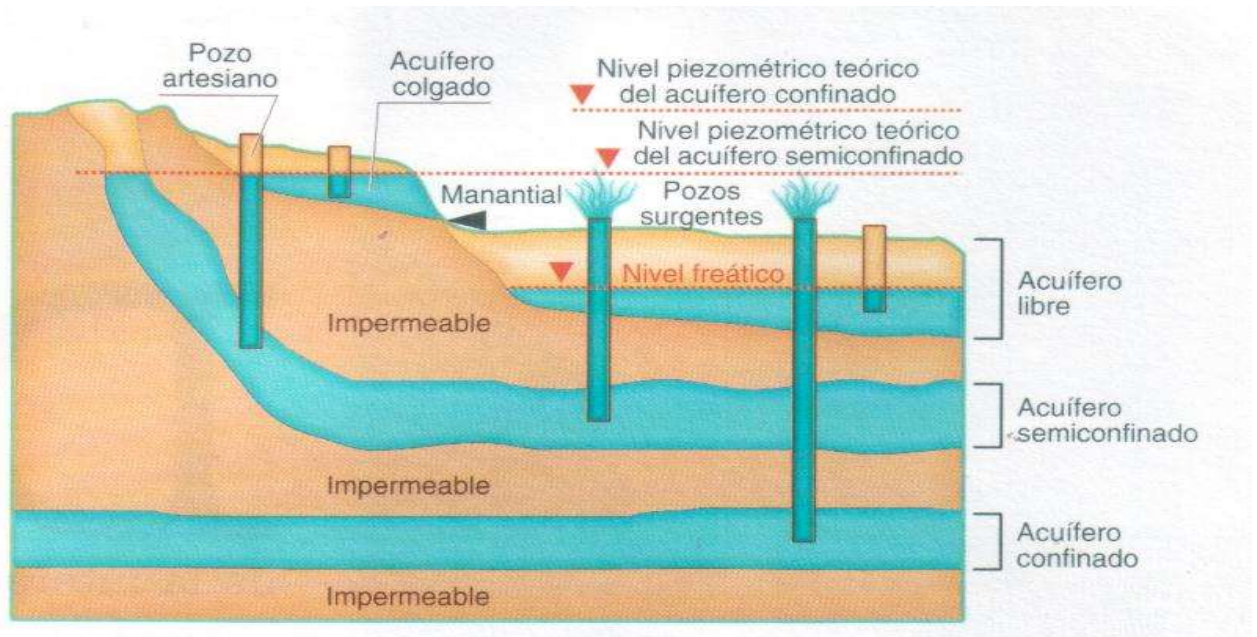


Figura 3.1. Tipos de acuíferos. Fuente: www.artinaid.com.

La capacidad de almacenar y transmitir el agua por parte de un acuífero debe ser cuantificada para evaluar las formaciones desde el punto de vista hidrológico. Por ello, se asocian a las formaciones cuatro parámetros básicos en cuanto a su comportamiento respecto al agua que puedan contener y transmitir.

Estos cuatro parámetros hidrogeológicos característicos de las formaciones geológicas son: porosidad, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad.

- Porosidad: La porosidad es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica, sin que intervenga la forma geométrica ni la potencia de la formación o su mecanismo de funcionamiento hidráulico en la naturaleza.

Según el tipo de formación, los poros pueden ser debidos a espacios intergranulares, en las formaciones detríticas, o a grietas y fisuras, en el caso de rocas fisuradas o cársticas; el concepto de porosidad puede asociarse a unas y otras. La porosidad de una formación puede estar ligada únicamente a la textura de la misma o depender además de las características del fluido que se mueve en su interior.

La primera de ellas es la porosidad total n , referida al volumen total de poros, independientemente de que el fluido tenga o no la capacidad de circular entre ellos:

$$n = \frac{\text{Volumen de los poros}}{\text{Volumen total}}$$

El segundo concepto es la porosidad eficaz n_e , también denominada porosidad cinemática, referida al volumen de poros conectados por los que el transporte de fluido es posible, y queda ligada no solo a la textura de la formación, sino también a las características del fluido:

$$n_e = \frac{\text{Volumen poros conectados}}{\text{Volumen total}}$$

- Coeficiente de almacenamiento: Este coeficiente representa la capacidad para liberar agua de un acuífero. Se define como el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de base unitaria y de altura la del acuífero, cuando desciende 1 m el nivel piezométrico. Es, en consecuencia, un parámetro físico referido al volumen cedido por unidad de volumen de acuífero y, al igual que la porosidad, es adimensional. La forma en que las formaciones geológicas permeables liberan agua es distinta según su situación en la naturaleza y el estado de sus niveles piezométricos.

Así, cabe distinguir formaciones o acuíferos en funcionamiento confinado o acuíferos en funcionamiento libre.

- Permeabilidad: La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de la misma, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica. Dentro de este concepto pueden definirse otros dos:
 - o La permeabilidad ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite, denominada *permeabilidad efectiva* o *conductividad hidráulica*, representada por el coeficiente de permeabilidad, k .
 - o La denominada *permeabilidad intrínseca*, K , que es sólo dependiente de las características internas del medio permeable.

La permeabilidad efectiva k se define como el caudal que es capaz de atravesar una sección unitaria del acuífero, normal al flujo, bajo un gradiente piezométrico unitario. Depende, en consecuencia, tanto de las características del medio físico (acuífero), como de las del fluido que lo atraviesa (agua). Por razones de su definición (caudal por unidad de superficie), las dimensiones de la permeabilidad efectiva pueden establecerse:

$$[k] = \frac{L^3 T^{-1}}{L^2} = L T^{-1}$$

Se usan cm/s y m/día como unidades más habituales (m/día suele utilizarse en hidrogeología con carácter prácticamente general), y cm/s en ingeniería. La permeabilidad intrínseca y la permeabilidad efectiva se relacionan únicamente por los parámetros capaces de definir las características del fluido.

$$k = K \frac{\gamma}{\mu} \quad \text{O bien } k = K \frac{g}{\eta}$$

Donde: k = permeabilidad efectiva [LT^{-1}]

K = permeabilidad intrínseca

γ = peso específico del agua [$ML^{-2}T^{-2}$]

μ = viscosidad dinámica del fluido [$ML^{-1}T^{-1}$]

η = viscosidad cinemática [L^2T^{-1}]

g = aceleración de la gravedad [LT^{-2}]

Y en consecuencia:

$$[K] = \left[k \frac{\mu}{\gamma} \right] = \frac{LT^{-1} * ML^{-1}T^{-1}}{ML^{-2}T^{-2}} = L^2$$

No ha sido posible encontrar una relación capaz de definir, con carácter generalista, la permeabilidad intrínseca en función del medio, a pesar de los esfuerzos de diversos investigadores. En cualquier caso, no influye solamente el tamaño de las partículas que conforma el medio, sino también su forma y superficie, no admitiendo generalización estas dos últimas características. Diversos autores de esta temática han establecido las siguientes relaciones:

$$K = c * d^2 \quad \text{Hazen}$$

$$K = c * m * d^2 \quad \text{Slichter}$$

$$K = \lambda * \left(\frac{m-0.13}{(1-m)^{1/3}} \right)^2 * d^2 \quad \text{Terzaghi}$$

La variable d es el denominado diámetro eficaz, que, para el caso más general es el d_{10} de la curva granulométrica de la muestra; es decir, el tamaño de abertura de tamiz que permite el paso del 10 % en peso de la muestra de material granular.

Los coeficientes c , m , n y λ dependen de las características geométricas y de fricción de los granos, pudiendo por ello admitirse que para cualquier caso:

$$K = cte * d^2 \quad \text{Y por tanto:} \quad K = cte * d_{10}^2$$

Para un mismo fluido a una misma temperatura. La permeabilidad, al contrario que ocurría con la porosidad, sí depende del tamaño del grano; tal y como se ha visto, el valor d_{10} condiciona el valor de la permeabilidad. En definitiva, *la conductividad hidráulica o permeabilidad efectiva k* nos da una idea de la relación existente entre el caudal por unidad de sección y el gradiente hidráulico. A mayor conductividad hidráulica mayor caudal, o menor gradiente hidráulico se precisa para un mismo caudal. Guarda relación con otros parámetros que intervienen en otros procesos físicos, como la conductividad eléctrica (inverso de la resistividad) y depende de las características del medio poroso y del fluido. Mientras que la *permeabilidad intrínseca* nos da una idea de las características del terreno, y al medirse en unidades de superficie y tener valores tan bajos, podemos considerarla como “una medida de la superficie del poro”.

- Transmisividad: La transmisividad T es el parámetro definido para evaluar la capacidad de transmitir agua de los acuíferos, teniendo en cuenta no sólo la textura del acuífero y las características del fluido, sino también las características estructurales o geométricas. Se define como el producto de la conductividad hidráulica k y el espesor del acuífero b :

$$T = k * b$$

Acuíferos muy permeables pero de bajo espesor pueden, a pesar de sus excelentes características texturales, no ser aptos para una eficaz transmisión del agua debido a su bajo espesor y, consecuentemente, baja transmisividad.

3.2. MOVIMIENTO DE AGUA EN EL MEDIO: PIEZOMETRÍA Y LEY DE DARCY.

El movimiento del agua en las formaciones geológicas está condicionado por la capacidad de realizar trabajo de sus partículas elementales, es decir, por su energía. La energía depende, de una parte, del campo de fuerzas a que está sometido el fluido y del agente sensible a dicho campo y, de otra, del tipo de energía en sí o forma en que el cuerpo tenga almacenada su capacidad de desarrollar trabajo.

Los tres tipos de energía que pueden incidir sobre el agua que se mueve en el seno de una formación permeable, asumiendo que no van a existir cambios de calor, son las siguientes:

- Energía potencial: $E_h = m \cdot g \cdot z$
- Energía cinética: $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
- Energía de presión: $E_p = p \cdot V$

Donde g representa la intensidad del campo gravitatorio y m la masa o agente sensible al campo gravitatorio, z es la altura respecto a una cota de referencia, v es la velocidad del fluido (agua), p es la presión a que está sometido el fluido y V es el volumen. Por el principio de conservación de la energía, ésta va a permanecer constante a lo largo de una línea de corriente, y por tanto:

$$E = E_h + E_c + E_p = \text{cte} \quad (\text{Caso de los fluidos ideales y cuando el régimen es estacionario})$$

$$\text{O bien: } m \cdot g \cdot z + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + p \cdot V = \text{cte}$$

$$\text{Sacando } m \cdot g \text{ factor común: } m \cdot g \cdot \left(z + \frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} \right) = \text{cte}$$

Siendo ρ la densidad del agua.

Ante un mismo fluido y un mismo campo gravitatorio, el terrestre, se tiene:

$$\left(z + \frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} \right) = \text{cte}$$

Que no es más que la expresión del teorema de Bernoulli y en la que todos sus términos tienen dimensiones de longitud:

$$[z] = L$$

$$\left[\frac{v^2}{2 \cdot g} \right] = \frac{L^2 T^{-2}}{L T^{-2}} = L$$

$$\left[\frac{p}{\rho \cdot g} \right] = \frac{M L T^{-2} L^{-2}}{M L^{-3} L T^{-2}} = L$$

En consecuencia, a los términos de la ecuación se les denomina alturas:

$Z \rightarrow$ Altura de posición

$\frac{v^2}{2 \cdot g} \rightarrow$ Altura de velocidad

$\frac{p}{\rho \cdot g} \rightarrow$ Altura de presión

El término $v^2/2 \cdot g$, o altura de velocidad, en el caso del movimiento del agua en el seno de un medio permeable, puede ser despreciado frente a la altura de presión y la altura de posición, dado lo bajo del valor de la velocidad del agua en dichos medios y, por tanto, la capacidad para realizar trabajo por parte del agua en un punto A de un acuífero, vendrá dada por su nivel piezométrico o suma de las alturas de posición y presión:

$$h_a = z_a + \frac{Pa}{\gamma}$$

Siendo γ el peso específico del agua.

Al nivel piezométrico se le suele denominar también altura piezométrica, cota piezométrica o carga hidráulica. El nivel piezométrico se mantiene constante en la vertical de un almacenamiento de agua libre o en la vertical de un medio permeable saturado cuando éste es homogéneo e isótropo.

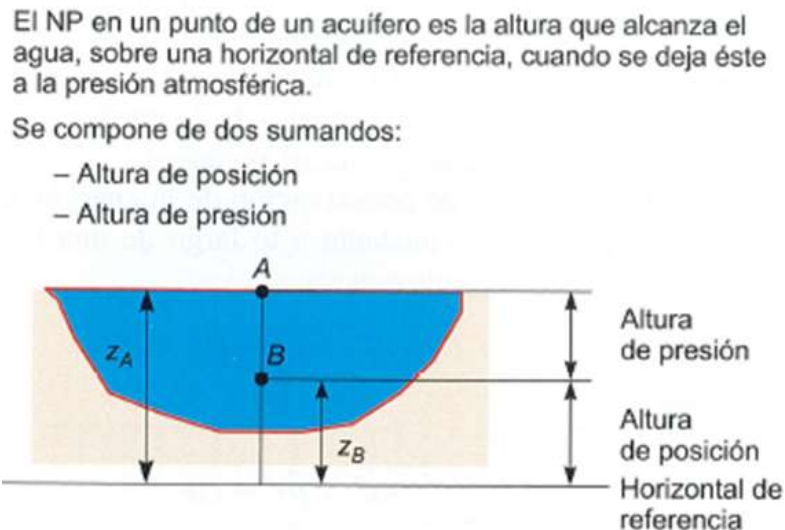


Figura 3.2. Nivel piezométrico.

Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

Tal y como se ve en la Figura 3.2, el punto A está a presión atmosférica y por tanto su nivel piezométrico, h_a , es igual a la altura de posición Z_a . El punto B tiene un nivel piezométrico, h_b , que se quiere comparar con h_a .

Sea P_b la presión en el punto B y Z_b su altura de posición:

$$h_a = Z_a$$

$$h_b = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} = Z_b + \frac{(Z_a - Z_b) * \gamma}{\gamma} = Z_a = h_a$$

Es decir, el nivel piezométrico es el mismo en los puntos A y B.

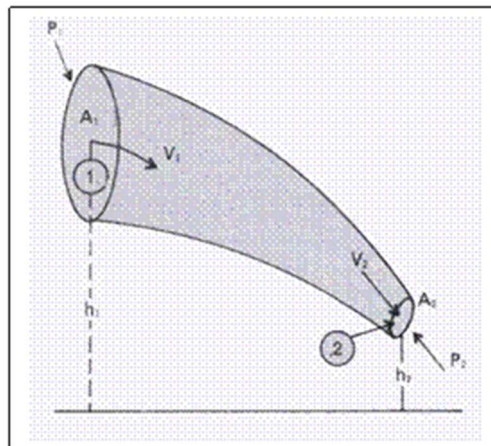


Figura 3.3. Teorema de Bernoulli.

La ley de Darcy Fue enunciada por su autor en 1856, después de diversos trabajos y experimentaciones. Establece que el caudal Q que es capaz de atravesar un medio permeable, es proporcional al área de paso del medio permeable A , normal al flujo, y al gradiente de niveles piezométricos entre la entrada y la salida del flujo en el medio permeable, i . La constante de proporcionalidad es la permeabilidad del medio, en la que quedan incluidas las características del fluido, es decir, es la permeabilidad efectiva, conductividad de Darcy o conductividad hidráulica. En consecuencia y con carácter global:

$$Q = -k * A * i$$

Siendo: Q = Caudal de paso [L^3T^{-1}]
 k = Permeabilidad de Darcy [LT^{-1}]
 A = Área de paso [L^2]
 i = Gradiente piezométrico

Como es sabido, el gradiente de un escalar es un vector, definido por su módulo, dirección y sentido. El módulo es la derivada direccional de la función escalar, la dirección es la normal a las curvas de nivel de la función escalar, el sentido es el del aumento en el valor de la función.

Al moverse el flujo de zonas de mayor a menor nivel piezométrico, que es en este caso la función escalar, el flujo y el gradiente tienen direcciones distintas, lo que justifica el signo negativo en el segundo término de la ecuación de Darcy. Llamando h al nivel piezométrico y x al espacio en el sentido del flujo, la ecuación puede expresarse en forma diferencial, considerando la variación de niveles piezométricos a lo largo del recorrido del flujo por el medio poroso:

$$Q = -k * A * \frac{dh}{dx}$$

En el caso de la Figura 3.4, el experimento mantiene constantes los niveles h_a y h_b , y al ser constantes k y A para todo el medio permeable se establece la forma más sencilla de Darcy:

$$Q = k * A * \frac{H_a - H_b}{L}$$

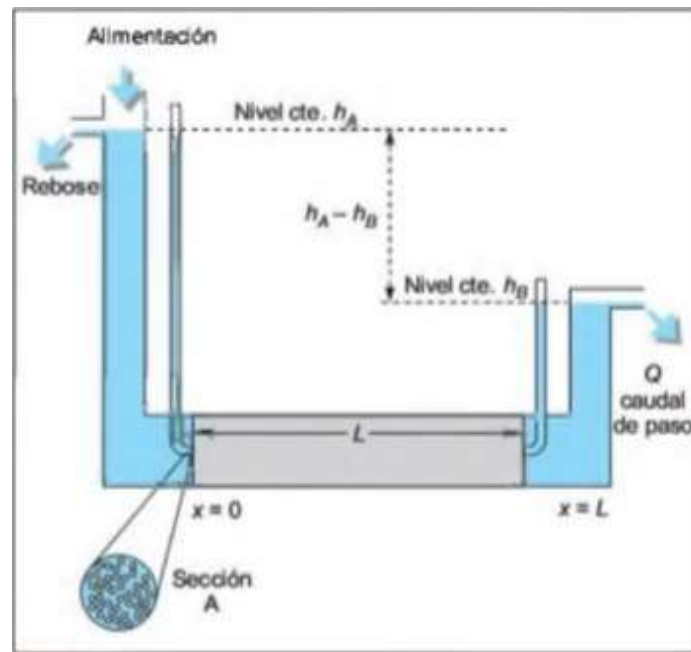


Figura 3.4. Ley de Darcy. Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

La ley de Darcy es únicamente válida para el caso en que el régimen sea laminar. Para evaluar si el régimen es realmente laminar hay que acudir al denominado número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas en el seno de un fluido:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}$$

Donde: v = Velocidad del fluido
 d = Tamaño medio de las partículas, se considera el d_{10} en medios granulares y $2e$ en medios fisurados, siendo e el ancho medio de las fisuras.
 ρ = Densidad del fluido
 μ = Viscosidad dinámica

El número de Reynolds es adimensional.

$$[R_e] = \frac{(ML^{-3})(L)}{(MLT^{-2})(T)(L^{-2})} \rightarrow \text{Adimensional}$$

De cualquier modo, para su cálculo habrá que utilizar unidades homogéneas; por ejemplo, v en cm/s, d en cm, ρ en g/cm³ y μ en dina * seg/cm². Un valor del número de Reynolds comprendido entre 1 y 10 denota un régimen laminar en el que puede considerarse aplicable la ley de Darcy, aunque es particularmente fiable para valores inferiores a 4. El régimen se manifiesta totalmente turbulento para valores de 60 a 180, y en los valores intermedios puede asumirse como cuasi-turbulento. En cualquier caso, con esta última gama de parámetros, el flujo no cumpliría la ley de Darcy.

3.3. ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO: ECUACIÓN DE LAPLACE Y ECUACIÓN DE POISSON.

Ecuación de Laplace: La ecuación de Laplace es la primera de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan el flujo en medios porosos (permeables en general, cuando el medio pueda ser asumido como poroso). Se refiere al flujo en condiciones de régimen permanente y en ausencia de fuentes y sumideros.

Esta ecuación, como todas las ecuaciones del flujo en medios porosos, se obtiene aplicando conjuntamente la ecuación de la continuidad y la ley de Darcy. El flujo se estudia aceptando, de una parte, que la masa entrante debe ser igual a la saliente, y que ambas, dentro del medio poroso, están condicionadas por los planteamientos de Darcy. Así, se tiene:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{Continuidad})$$

$$v_x = -k_{xx} * \frac{\partial h}{\partial x}; \quad v_y = -k_{yy} * \frac{\partial h}{\partial y}; \quad v_z = -k_{zz} * \frac{\partial h}{\partial z}$$

Sustituyendo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_{xx} * \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k_{yy} * \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_{zz} * \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

Si se considera el medio homogéneo (la permeabilidad es la misma en cualquier punto del espacio) e isótropo (la permeabilidad es la misma en cualquier dirección del espacio), se tiene que:

$$k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$$

Y:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Que es la ecuación de Laplace (régimen permanente, medio homogéneo e isótropo y ausencia de fuentes y sumideros). Hay dos tipos característicos de condiciones de contorno:

- Condiciones Dirichlet: nivel piezométrico conocido en frontera.
- Condiciones Neuman: flujo conocido en frontera.

La resolución de la ecuación solo es posible por métodos analíticos en sistemas físicos sencillos, como es el caso de flujo hacia pozos y algunos problemas de flujo entre zanjas.

Para casos reales más complejos debe acudir se a métodos aproximados de resolución numérica, o también, en algunos otros casos, a métodos gráficos de resolución, como redes de flujo.

Ecuación de Poisson: Laplace no integra en sus planteamientos la existencia de fuentes y sumideros. Sin embargo, y aún en problemas de régimen permanente, es preciso incluir bombeos y recargas (fuentes y sumideros) asociados a problemas reales. La ecuación de Poisson de flujo en medios porosos en régimen permanente, y con posibilidad de integrar bombeos y recargas, puede desarrollarse con la ayuda del esquema de la Figura 3.5.

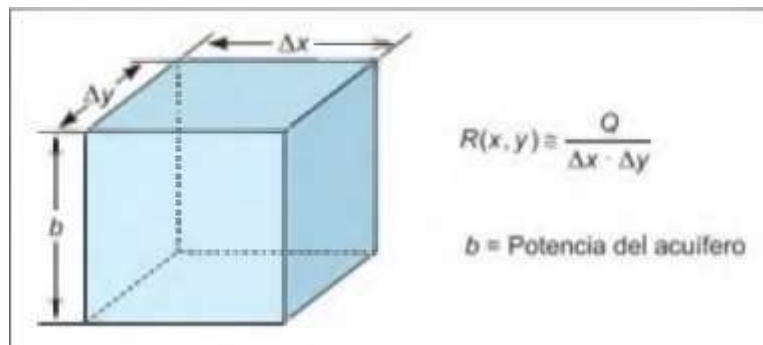


Figura 3.5. Esquema para la deducción de la ecuación de Poisson.

Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

Se considera una recarga $R(x, y)$ por unidad de área y unidad de tiempo. Aplicando condiciones de flujo estacionario:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x (b \Delta y) = \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y (b \Delta x) = R(x, y) \Delta x \Delta y$$

Aplicando Darcy con hipótesis de homogeneidad e isotropía:

$$k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$$

Y siendo:

$$T = k * b$$

Se obtiene la ecuación de Poisson:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -\frac{R(x, y)}{T}$$

En régimen permanente, presencia de fuentes y sumideros y permeabilidad homogénea e isotrópica. En esta ecuación se tiene:

- Si $R(x, y) = 0$, es coincidente con la ecuación de Laplace
- Si $R(x, y)$ es positiva = Recarga
- Si $R(x, y)$ es negativa = Bombeo

Todo lo dicho para la resolución de la ecuación de Laplace es válido para la de Poisson. Sin embargo, esta última es más realista y completa y se ajusta mejor a la mayoría de los problemas reales que suelen presentarse.

Establece de modo simplista que la suma de entradas y salidas de agua en un recinto acotado debe ser igual al bombeo o recarga que incida sobre tal recinto, siempre en condiciones de régimen permanente (no variación de los niveles piezométricos en el recinto) y de medio homogéneo e isótropo en cuanto a la permeabilidad.

Ecuación del flujo en régimen transitorio: En el régimen permanente se obtienen soluciones de equilibrio para un fenómeno concreto. No se trata de cómo ni cuándo se alcanza ese equilibrio, únicamente se calcula la solución de equilibrio. Si un sistema está en equilibrio, para cambiar esta situación se requieren ciertas acciones sobre el sistema, tales como bombeos o recargas.

El sistema evoluciona hasta alcanzar de nuevo la situación de equilibrio correspondiente; mientras esta nueva situación es alcanzada, se suceden un conjunto de situaciones a lo largo del tiempo, que es lo que se denomina régimen transitorio. Los niveles van variando y en consecuencia se va almacenando o desalmacenando agua en el recinto. En este caso, la ecuación de la continuidad, en régimen transitorio, se aplica al recinto según:

$$\text{Volumen saliente} = \text{Volumen entrante} - \text{Volumen desalmacenado}$$

(En un intervalo de tiempo Δt)

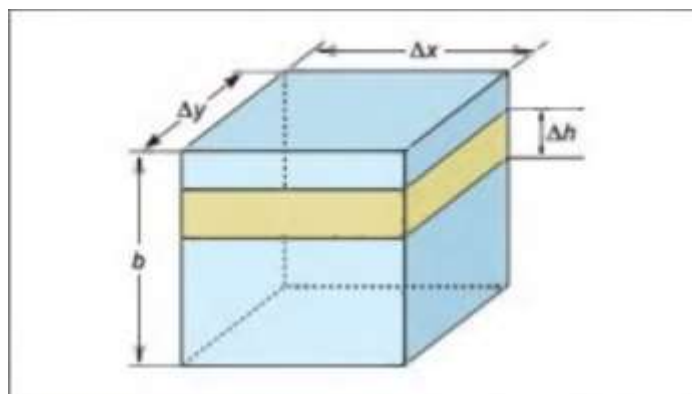


Figura 3.6. Esquema para la deducción de la ecuación general del flujo transitorio.

Fuente: Ingeniería Geológica. González de Vallejo, 2002

En el intervalo Δt , el nivel varía Δh , como indica la Figura 3.6. El volumen de roca vaciado vendrá dado por $\Delta h * \Delta x * \Delta y$, y el volumen de agua contenido en este volumen de roca vendrá dado por $S * \Delta h * \Delta x * \Delta y$. El volumen desalmacenado en el tiempo Δt será $S * \Delta h * \Delta x * \Delta y / \Delta t$. Introduciendo este término en la ecuación de la continuidad en presencia de fuentes y sumideros, es decir, incluyendo el término del volumen desalmacenado en la unidad de tiempo en el término de recargas, se tiene:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x (b \Delta y) + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y (b \Delta x) = R(x, y, t) \Delta x \Delta y - S \frac{\partial h}{\partial t} (\Delta x \Delta y)$$

Aplicando Darcy generalizado como en anteriores ecuaciones:

$$v_x = -k_{xx} * \frac{\partial h}{\partial x}; \quad v_y = -k_{yy} * \frac{\partial h}{\partial y}; \quad v_z = -k_{zz} * \frac{\partial h}{\partial z}$$

Y asumiendo una vez más condiciones de homogeneidad e isotropía ($k_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$), discretización cuadrada ($\Delta x = \Delta y$) y $T = k * b$, se obtiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R(x, y, t)}{T}$$

Ecuación general del flujo en régimen transitorio, presencia de fuentes y sumideros y permeabilidad homogénea e isotrópica. Los términos de esta ecuación tienen el siguiente significado:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} : \text{Suma de caudales entrantes por caras laterales}$$

$$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} : \text{Volúmenes desalmacenados en la unidad de tiempo}$$

$$\frac{R(x,y,t)}{T} : \text{Bombeos o recargas en la unidad de tiempo}$$

En definitiva, esta ecuación indica que el balance de caudales entrantes y salientes en un recinto por razones de gradientes piezométricos, más las recargas externas al sistema, como bombeos y recargas, debe ser igual a los caudales de llenado o vaciado del recinto.

Como se puede observar:

- Si $\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = 0$, se obtiene la ecuación de Poisson de régimen permanente con fuentes y sumideros.
- Si $\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = 0$ y $\frac{R(x,y,t)}{T} = 0$, se obtiene la ecuación de Laplace

La ecuación general del flujo y su resolución para cada caso concreto con sus adecuadas condiciones de contorno es de uso general en los problemas de hidrogeología e ingeniería geológica.

Capítulo 4

EL PROGRAMA MODFLOW

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.

Modflow es un programa tridimensional para agua subterránea el cual trabaja bajo una expresión de diferencias finitas de aproximación. Modflow fue desarrollado por el USGS de los Estados Unidos de América bajo el sistema de Fortran 88 y documentado en los años 1995 – 1996, el programa fue generado por un proceso matemático y matrices complejas bajo la ley de Darcy y sus resultados finales presentaban una calidad muy pobre. Posteriormente la Universidad de Waterloo logró codificar un módulo para una mejor calidad visual en los resultados el cual le dieron el nombre de Visual Modflow. Hoy en día se han estructurado diferentes módulos codificados para otras aplicaciones particulares y otras nuevas compatibilidades.

Modflow puede simular un fluido en estado transitorio y estacionario, combinando varias tipos de capas, así como tipo de acuíferos confinados y semiconfinados, también puede calcular el movimiento de una partícula, es decir modelos de transportes de contaminantes. El modelo puede requerir de varios parámetros, depende del cual sea su aplicación requiere datos como: pozos de extracción o de inyección, área de recarga, flujos y drenes, conductividad hidráulica, conductividad hidráulica vertical, topografía, flujos de entrada y salida, coeficiente de almacenamiento, condiciones de fronteras, coordenadas para capas horizontales, geometría del acuífero, etc.

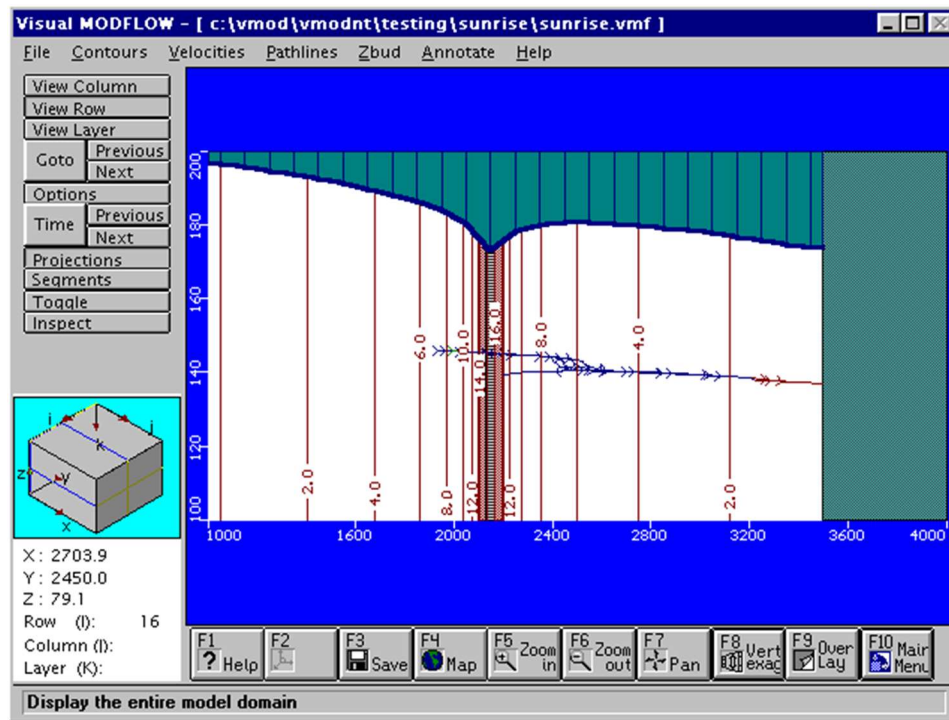


Figura 4.1. Visual Modflow 2011.1 User's Manual.

Los modelos son, por definición, aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural. Las suposiciones y las soluciones de compromiso debidas a las limitaciones en la capacidad de cómputo, la precisión limitada del proceso de solución, la escasez de fondos y la insuficiencia de los datos de entrada, pueden combinar los resultados y las predicciones.

Las limitaciones en Modflow se basan en que los datos de entrada afectan la precisión y aplicabilidad de los modelos. Una importante información pudiera ser la arquitectura del modelo: el tamaño de la malla y el número de capas. Los primeros modelos matemáticos estaban limitados por la capacidad de cómputo y la poca disponibilidad de información hidrogeológica; el tamaño de la malla era grueso y los datos eran limitados. Hoy en día, el tamaño de las celdas puede ser mucho más pequeño debido a que los sistemas de cómputo se encuentran muy avanzados tanto en su capacidad como en memoria.

Sin embargo, la información hidrogeológica no ha aumentado a la misma velocidad que la capacidad de simular la presencia y el movimiento del agua subterránea utilizando celdas muy pequeñas. Actualmente el tamaño de la celda está limitado más bien por el objetivo del modelo y los datos hidrogeológicos, y no por el tiempo de cómputo.

Los objetivos de un modelo matemático tomando en cuenta la conservación del acuífero son principalmente tres:

- 1) Implementar un modelo de simulación hidrodinámica del acuífero para hacer balances.
- 2) Elaborar escenarios de manejo del acuífero.
- 3) Hacer recomendaciones para la administración del agua subterránea, operando los escenarios de incremento paulatino de extracción.

Modflow resuelve las ecuaciones diferenciales parciales usando el método de diferencias finitas, donde cada celda de Modflow es un volumen unitario.

En general la ecuación de flujo de aguas subterráneas que emplea Modflow es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde: K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} = Valores de la conductividad hidráulica para los ejes coordenados x, y, y z (L/T).

h = Es la pérdida de carga hidráulica.

W = Flujo volumétrico por unidad de volumen representada como el suministro o descarga de agua, donde los valores negativos indican extracción de agua y los positivos inyección de agua (L^{-1}).

S_s = Almacenamiento específico del medio poroso (L^{-1}).

t = Tiempo (T).

Diferencias finitas: La forma de la diferencial parcial por diferencias finitas en un espacio discretizado del dominio del acuífero representado por filas, columnas y capas es:

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

Donde: $h_{i,j,k}^m$ = Pérdida de carga hidráulica en la celda i,j,k al paso del tiempo m .
 CV , CR y CC = Conductancia hidráulica, o un pedazo de conductancias entre los nodos i,j,k y un nodo vecino * $P_{i,j,k}$ es la suma de los coeficientes de la pérdida de carga de las fuentes y de las descargas.
 $Q_{i,j,k}$ = Suma de las constantes de los términos de las fuentes y las descargas, cuando $Q_{i,j,k} < 0.0$ es el flujo del sistema de agua subterránea (como el bombeo) y $Q_{i,j,k} > 0.0$ es el flujo en superficie (como la inyección).
 t^m = en el paso del tiempo m .

4.2. INTERFAZ DE COMUNICACIÓN CON MODFLOW: VISUAL MODFLOW PREMIUM V.4.2.

Cuando se va a crear un modelo, lo primero que se debe hacer es crear una carpeta para guardar la información de cada modelización. El programa genera más de 37 archivos de los cuales hace uso durante sucesivas modelizaciones del mismo escenario. Es importante crear una copia de la carpeta y trabajar con ella cada vez que se desee crear nuevos escenarios a partir de uno existente. De esta forma nos aseguramos de que siempre tendremos un archivo base al que recurrir (contenido en la carpeta inicial) para poder recuperar las simulaciones y los datos iniciales.

Los tipos de archivos que genera el programa se clasifican en archivos de *input* (introducción de datos en el modelo: geometría, parámetros físicos, parámetros químicos, tiempos...), de ejecución (*run*) y de *output* (resultados de la modelización). Una vez ejecutado el modelo, Visual Modflow Premium (VModP en adelante) nos permite visualizar cualquiera de estos archivos.



Figura 4.2. Pantalla acceso a input, run u output (Main menu).

4.2.1. INTRODUCCIÓN DE DATOS (INPUT).

Una vez indicada la ruta de acceso a la carpeta, el programa crea el archivo *input*. Lo primero que solicita es el tipo de simulación (flujo, flujo y transporte de sal, flujo en zona no saturada o transporte de contaminantes, unidades) y el tiempo de simulación real (Figura 4.3). Generalmente se escoge un tiempo más que suficiente para el problema que queramos solucionar, de forma que se pueda alcanzar el régimen estacionario. No obstante, el programa permite forzar el régimen estacionario y generar un único archivo temporal de resultados (Figura 4.4).

The screenshot shows a Windows-style dialog box titled "C:\Documents and Settings\usuario\Escritorio\borrar\proyecto.vmf". The dialog is divided into several sections:

- Project Information:** Includes a "Project Title" field with the text "Proyecto" and a "Description" field.
- Flow Simulation:** Contains a "Flow Type" section with radio buttons for "Saturated (Constant Density)" (selected), "Saturated (Variable Density)", "Variably Saturated", and "Vapor". It also has a "Numeric Engine" dropdown set to "USGS MODFLOW 2000 from WHI" and a "Simulation Type" dropdown set to "Groundwater flow".
- Transport Simulation:** Contains a "Transport" section with radio buttons for "No" and "Yes" (selected). It has a "Numeric Engine" dropdown set to "DoD MT3DMS v. 5.1 (Public Domair)" and a "Description" field with the text "DoD MT3DMS v. 5.1 (Public Domain)".
- Units:** A vertical list of dropdown menus for "Length" (m), "Time" (day), "Conductivity" (m/s), "Pumping Rate" (m³/d), "Recharge" (mm/yr), "Mass" (kg), and "Concentration" (mg/L).

At the bottom of the dialog are four buttons: "< Back", "Next >", "Cancel", and "Help".

Figura 4.3. Tipo de modelización y unidades.



Figura 4.4. Ventana para opciones de tiempo.

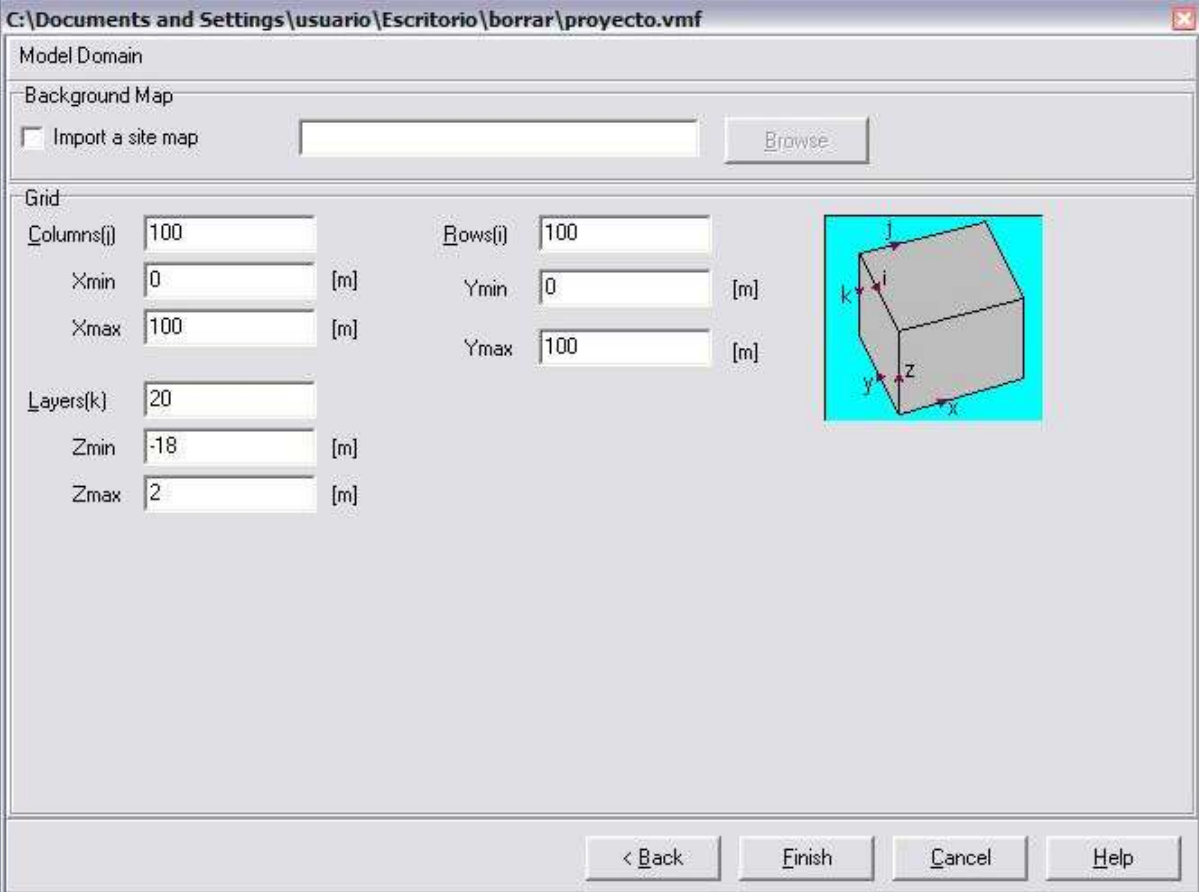
VModP ofrece la posibilidad de introducir parámetros hidrogeológicos en esta primera fase (Figura 4.5), aunque es recomendable hacerlo en la segunda fase del *input*.

Parameter Name	Value	Units
Kx	0.0001	m/s
Ky	0.0001	m/s
Kz	1E-5	m/s
Ss	1E-5	1/m
Sy	0.20	
Eff. Por.	0.15	
Tot. Por.	0.30	
Recharge	0	mm/yr
Evapotranspiration	0	mm/yr
Extinction Depth	0	m

Figura 4.5. Introducción de datos hidrogeológicos.

Para acabar con esta primera fase, el programa pide los datos geométricos del problema (Figura 4.6). En este punto se fija la extensión máxima en las tres direcciones espaciales y se establece el número de capas (dirección z), número de columnas (dirección x) y número de filas (dirección y).

Al reticular de esta manera, dejamos prefijada la malla y el número de celdas en que ha quedado dividido el dominio espacial. Existe la posibilidad de reticular con más celdas en la segunda fase del input, pero la extensión geométrica no podremos modificarla en adelante.



The image shows a screenshot of the 'Model Domain' dialog box in the Modflow software. The window title is 'C:\Documents and Settings\usuario\Escritorio\borrar\proyecto.vmf'. The dialog is divided into several sections:

- Background Map:** Includes a checkbox for 'Import a site map' and a 'Browse' button.
- Grid:** Contains input fields for grid dimensions and coordinates:
 - Columns(j):** 100
 - Rows(i):** 100
 - Xmin:** 0 [m]
 - Xmax:** 100 [m]
 - Ymin:** 0 [m]
 - Ymax:** 100 [m]
 - Layers(k):** 20
 - Zmin:** -18 [m]
 - Zmax:** 2 [m]

To the right of the grid parameters is a 3D diagram of a rectangular prism with axes labeled x, y, and z. The x-axis is horizontal, the y-axis is depth, and the z-axis is vertical. The prism is shaded to show its three-dimensional structure.

At the bottom of the dialog are four buttons: '< Back', 'Finish', 'Cancel', and 'Help'.

Figura 4.6. Datos del mallado.

Finalizada esta primera etapa, se despliega la pantalla de acceso a la segunda fase de introducción de datos. Para este proyecto se ha hecho uso de las ventanas de refinados de malla (para delimitar el espesor del muro pantalla), conductividad (para los valores de la conductividad hidráulica anisótropa), condiciones iniciales (piezometría), condiciones de contorno (establecimiento de un gradiente hidráulico), pozos de extracción y simulador de partículas. Las Figuras 4.7 a 4.13 muestran los detalles de estas ventanas.

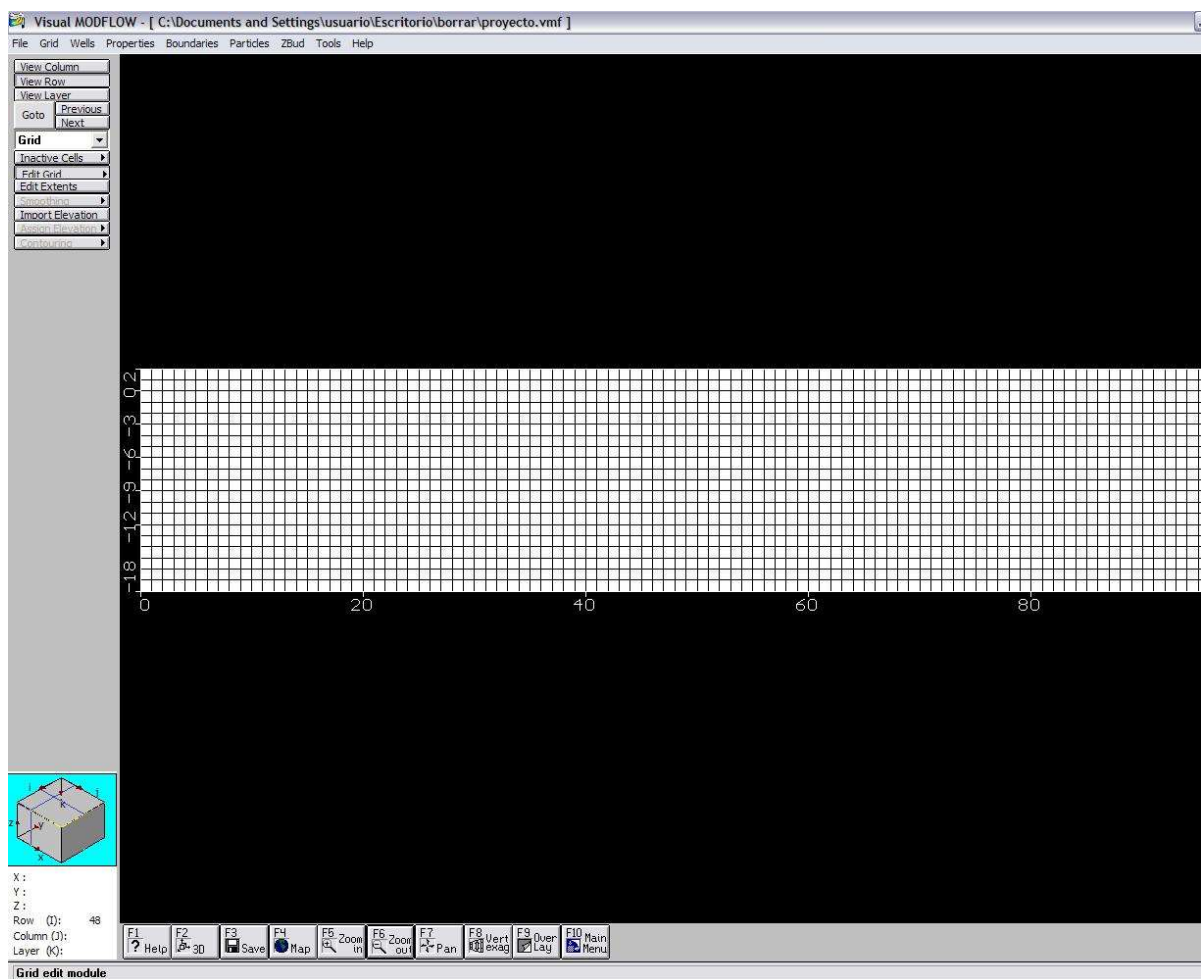


Figura 4.7. Pantalla de acceso a la introducción de datos.

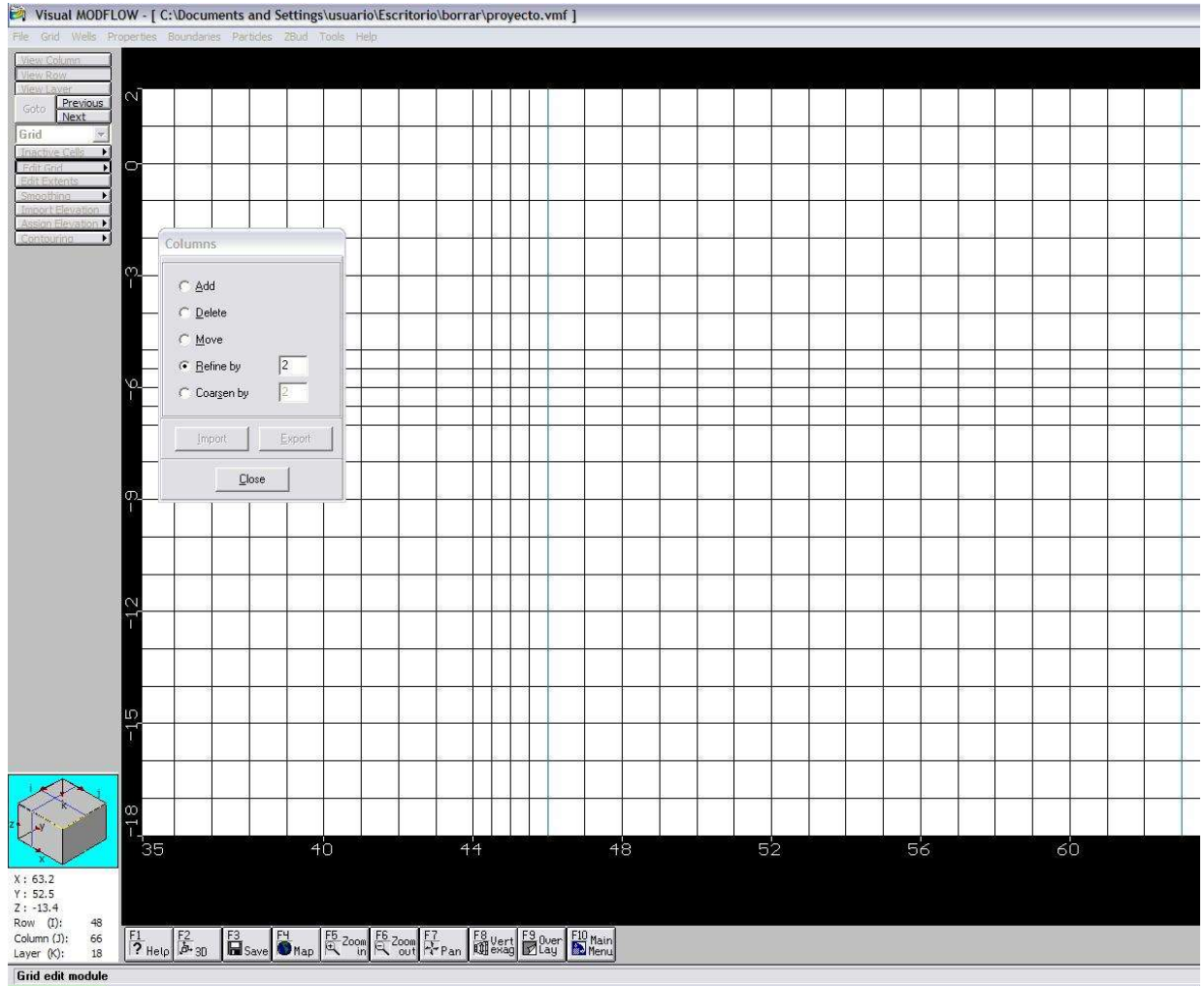


Figura 4.8. Refinado de la malla.

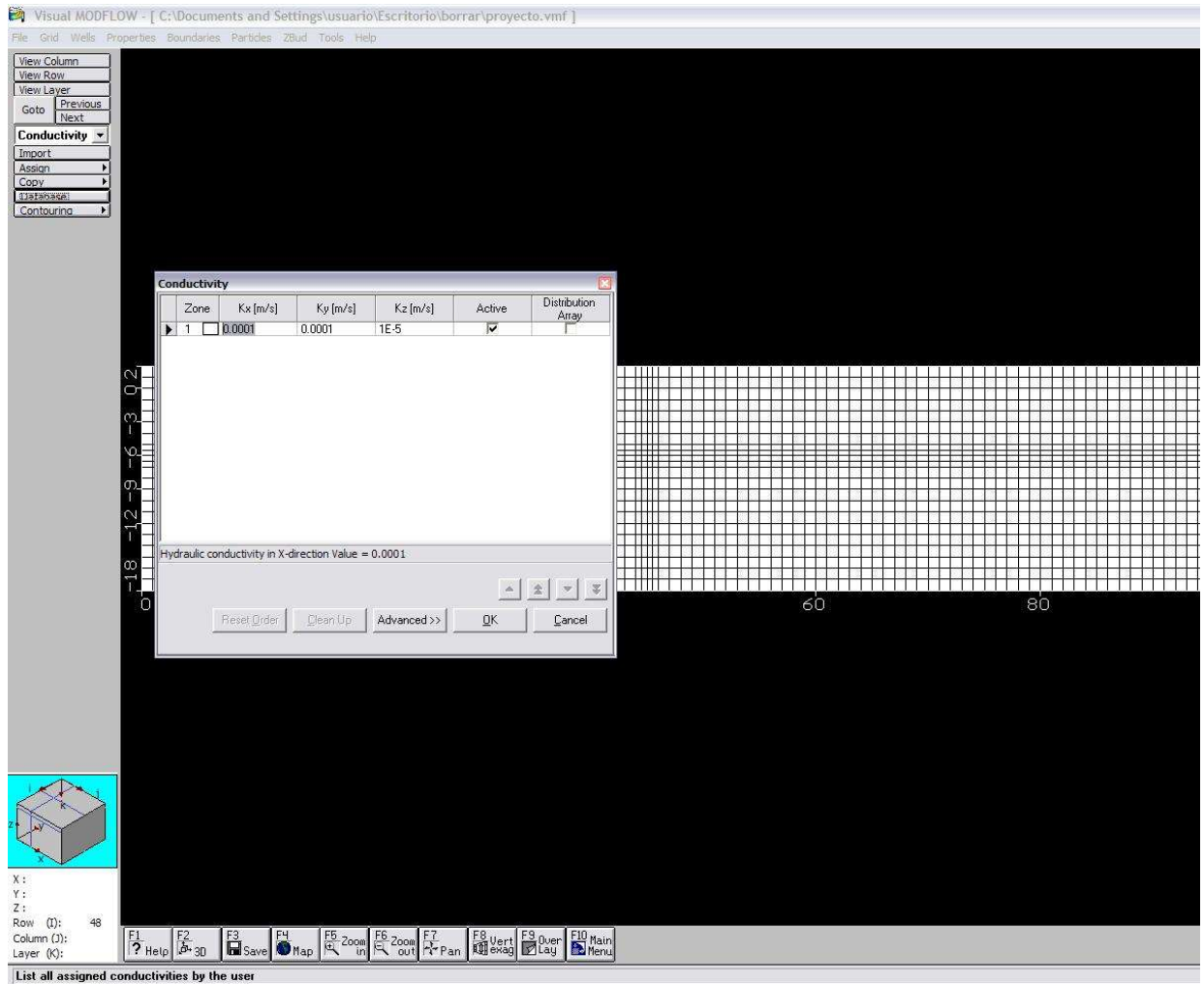


Figura 4.9. Valores de la conductividad hidráulica.

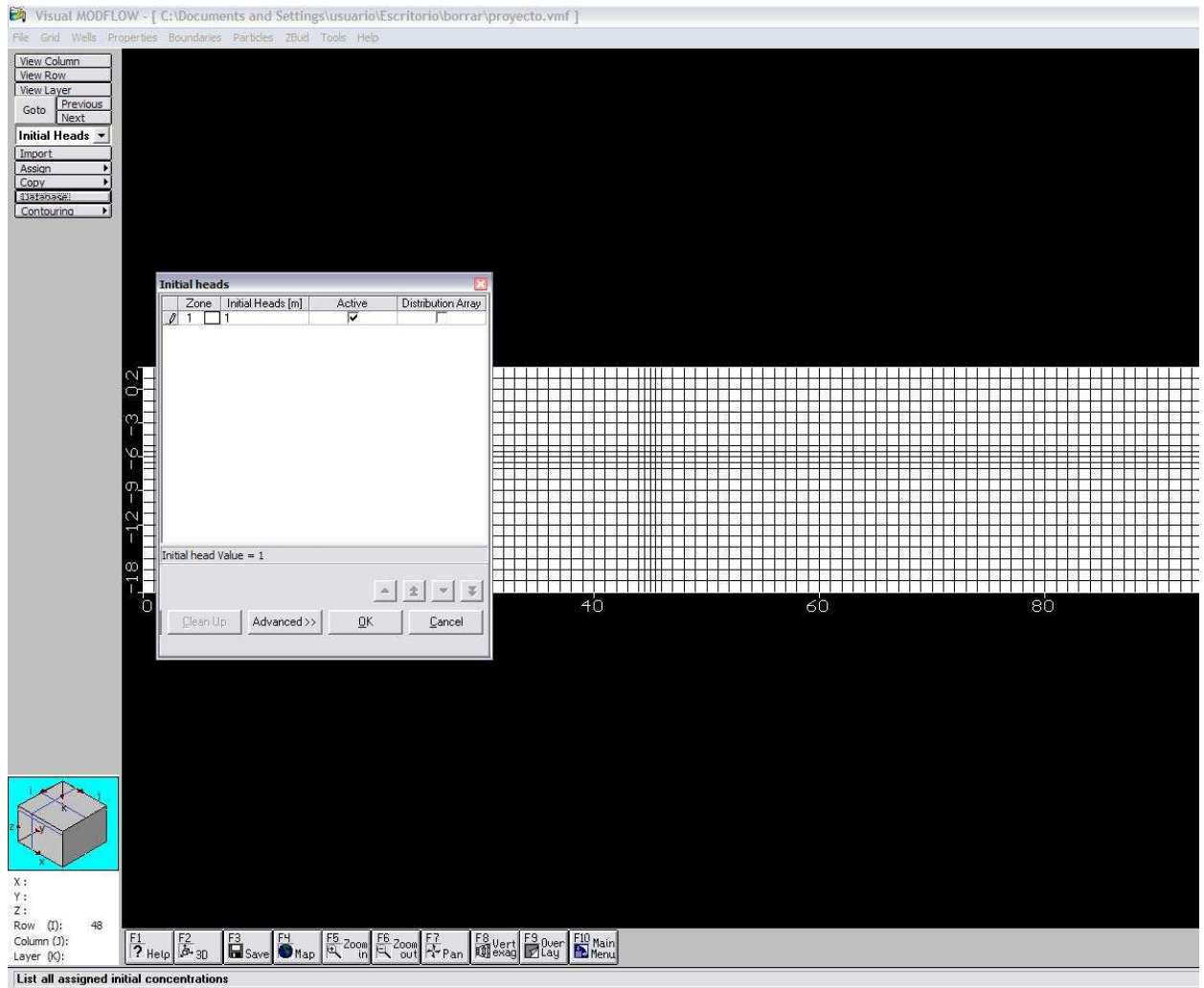


Figura 4.10. Condiciones iniciales de la piezometría.

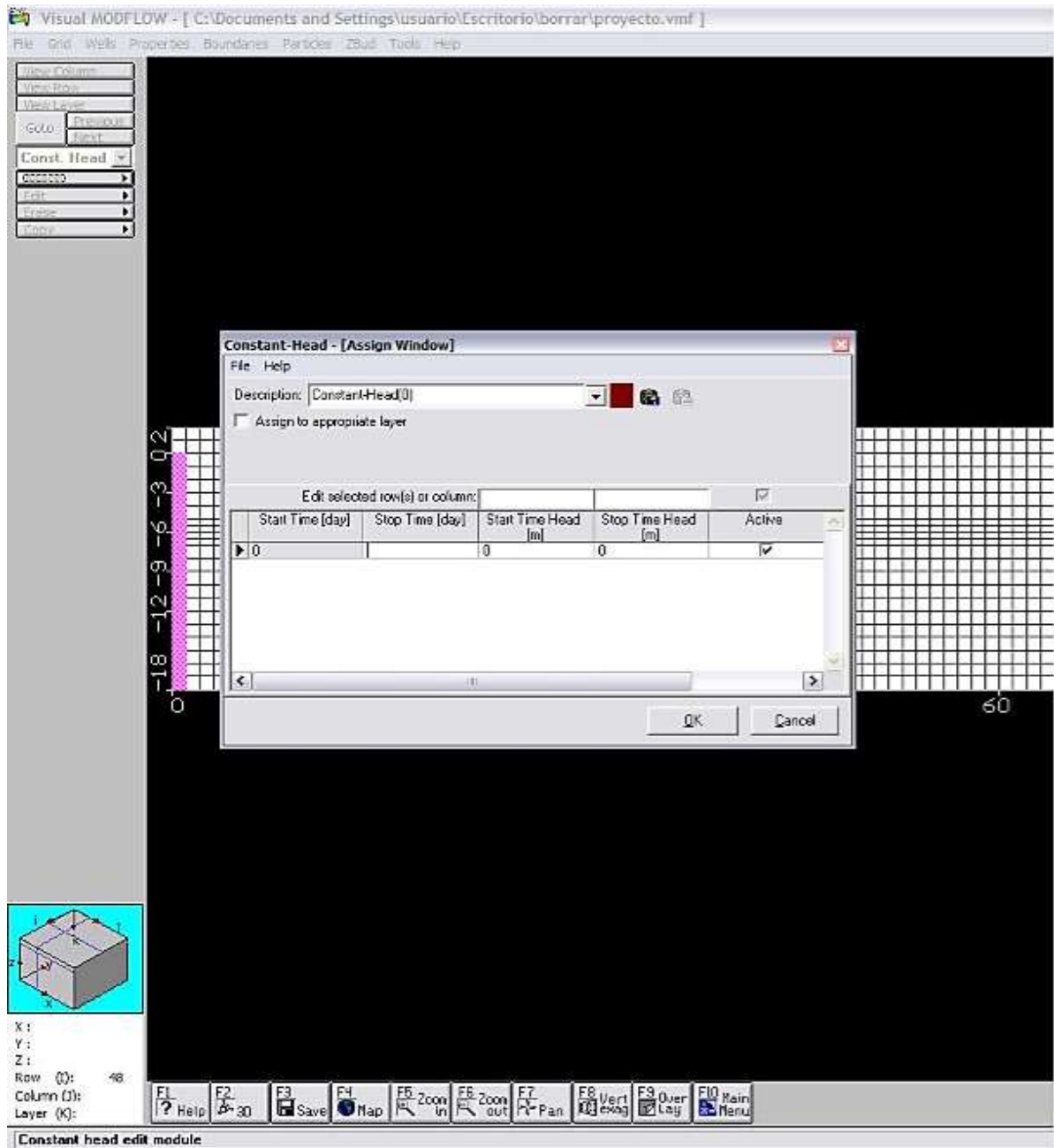


Figura 4.11. Condiciones de contorno para establecer el gradiente hidráulico.

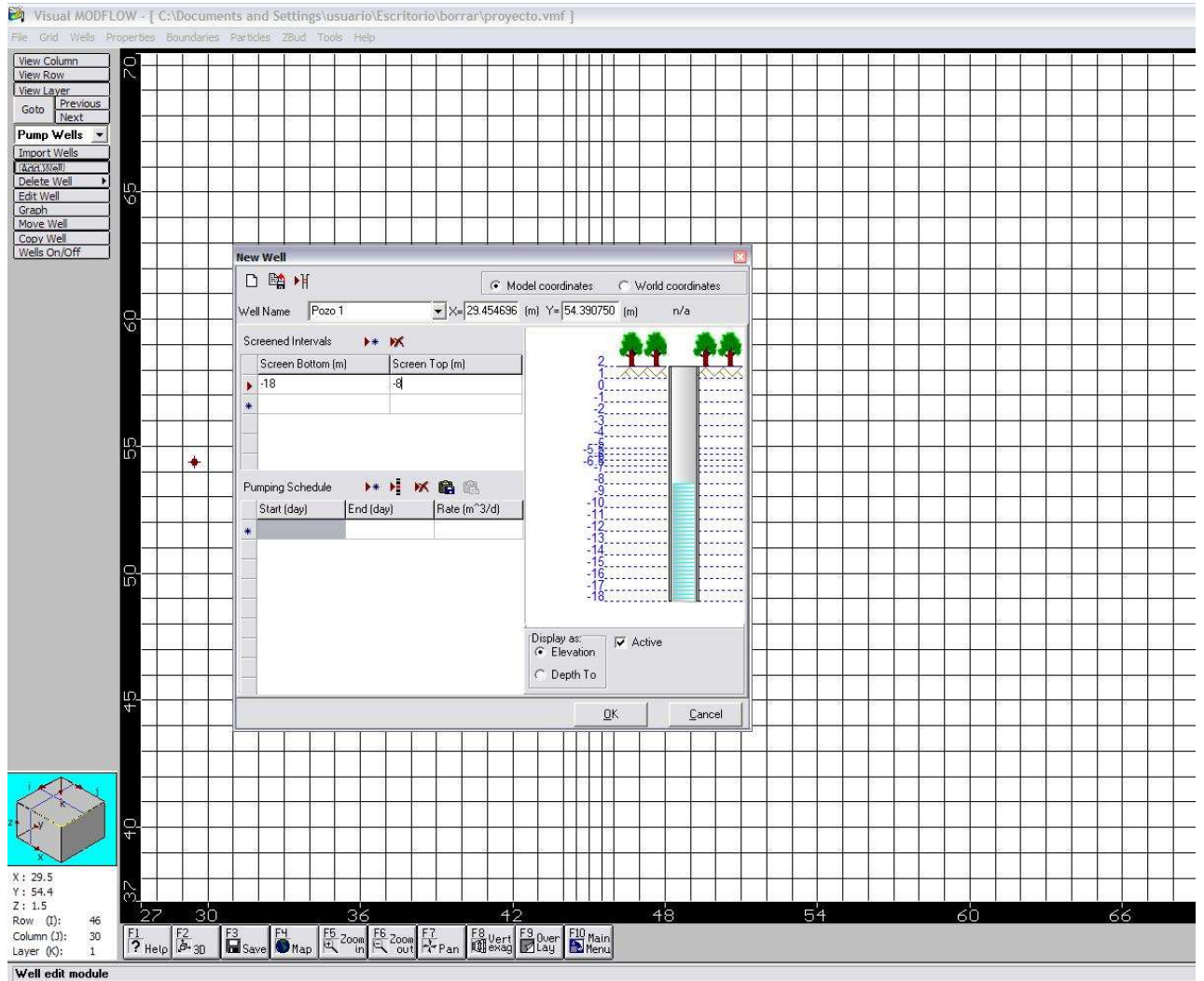


Figura 4.12. Pozos de extracción.

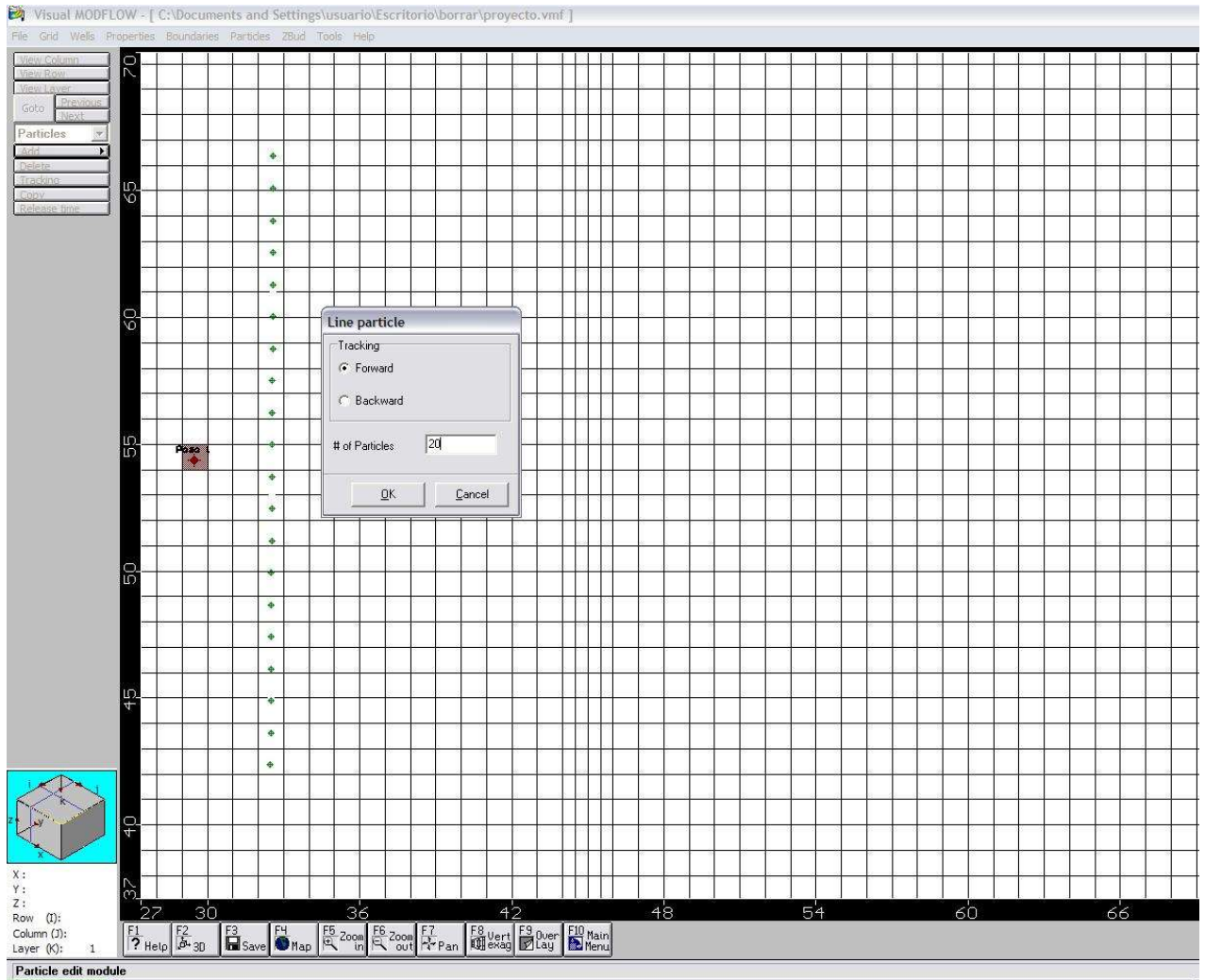


Figura 4.13. Simulación de partículas.

4.2.2. SIMULACIÓN (RUN).

En este apartado se le especifica al programa qué paquetes se van a ejecutar (Figura 4.14). En el caso estudiado únicamente se hará uso de Modflow (flujo de agua) y Modpath (simulador de partículas). Dentro del paquete Modflow se precisa concretar cuantos datos de salida queremos que se generen en el *output*. En general, se suele pedir que guarde información de cada uno de los *time steps* en los que se divide temporalmente el escenario (Figura 4.15). La definición de los intervalos de tiempo y de los pasos dentro de cada intervalo, *stress periods*, guarda relación con los cambios en las variables de contorno que generamos en el Input. Para el caso estudiado, estas variaciones vienen determinadas por los caudales de extracción.



Figura 4.14. Paquetes de ejecución, Modflow y Modpath.

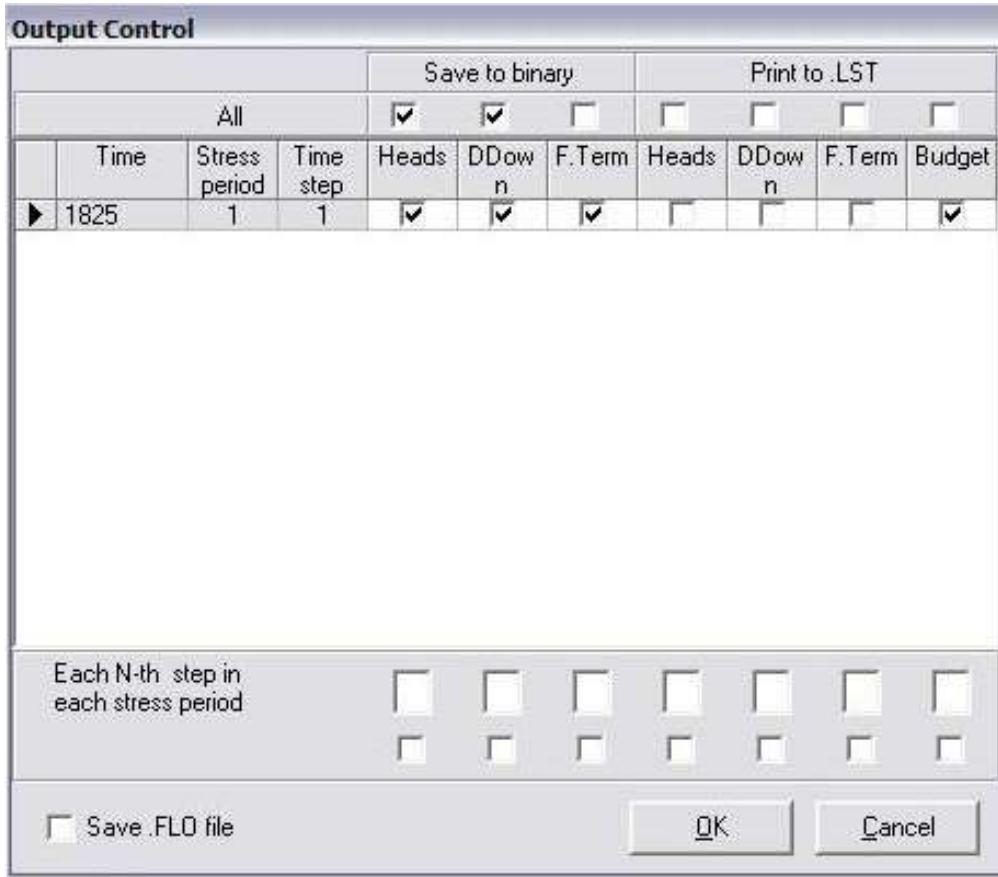


Figura 4.15. Time steps en los que se divide el escenario.

4.2.3. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS (OUTPUT).

La pantalla para la visualización de resultados es similar a la que se despliega en la segunda fase del *input*. Los resultados que se han empleado en este trabajo son los de piezometría, trayectoria de partículas y descenso piezométrico.

En las Figuras 4.16 y 4.17 se presentan las pestañas que hay que manejar para desplazarse por las distintas capas, filas y columnas y por los *time steps* generados, respectivamente. De esta manera se puede tener acceso a la información de los resultados en cualquier punto del dominio y para cualquier intervalo de tiempo. En el apartado de aplicaciones se presentan los resultados de los casos estudiados.

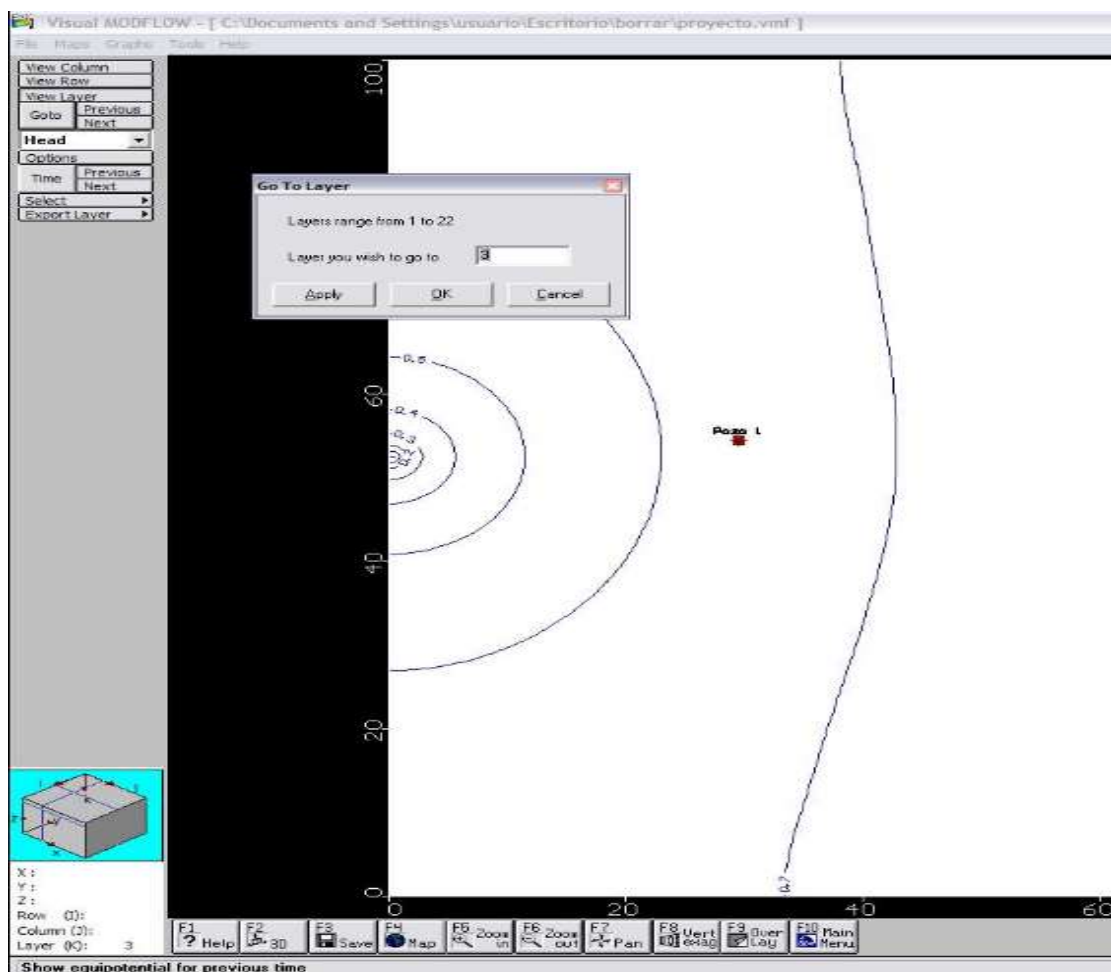


Figura 4.16. Desplazamiento por las distintas capas, filas y columnas.

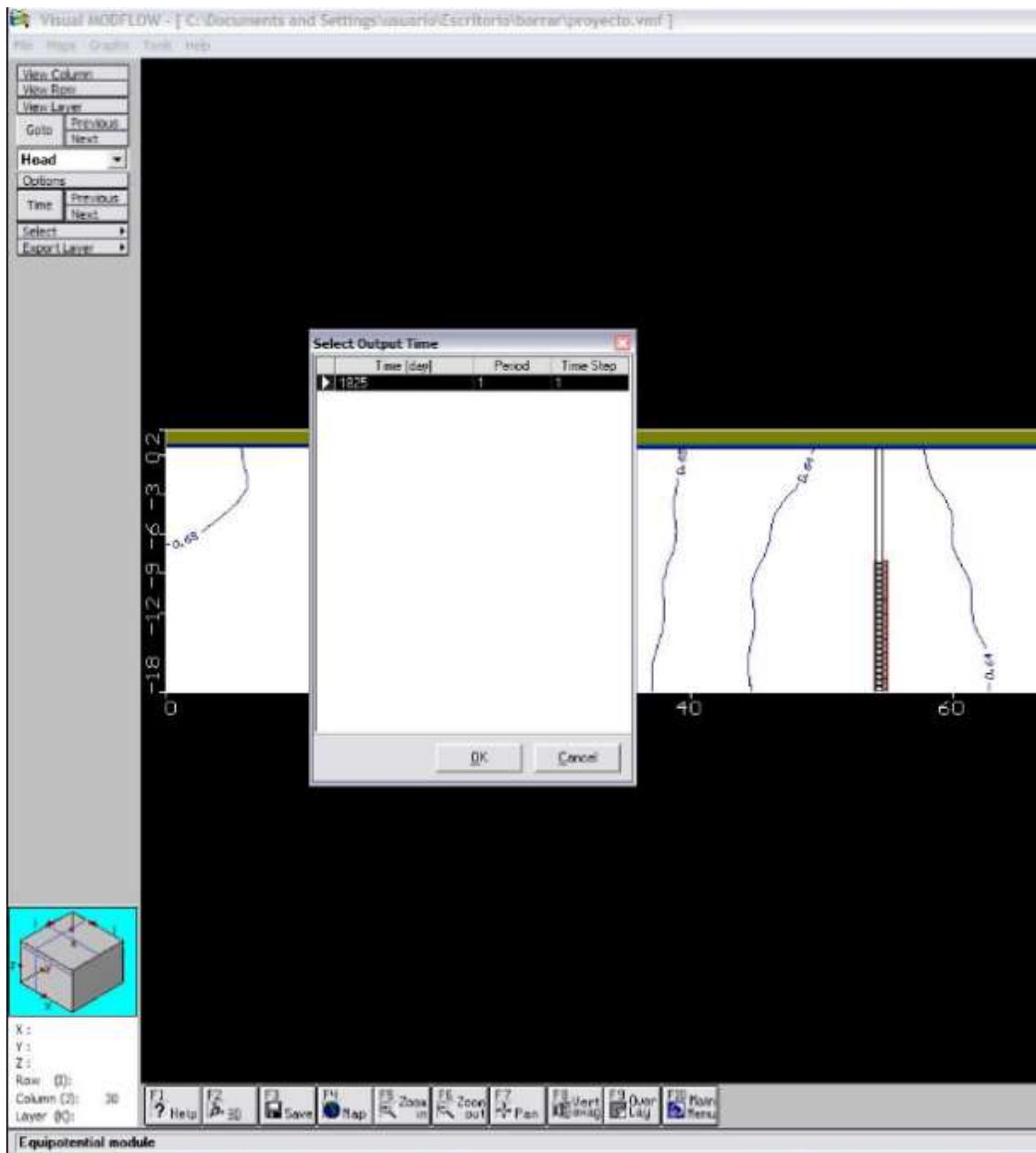


Figura 4.17. Desplazamiento por los time steps generados.

Capítulo 5

APLICACIONES

Se plantea un problema de abatimiento del nivel freático en acuífero libre. La formación consiste en un paquete de arenas finas algo limosas de 20 m de espesor y conductividad hidráulica 10^{-4} cm/seg. Para poder para poder realizar una excavación en seco se plantea como objetivo reducir el nivel freático hasta situarlo a 3 metros de la superficie del terreno en el interior de la parcela, consiguiendo un abatimiento medio de 2.5 m en el interior de la parcela. A continuación se describen los distintos pasos que se han llevado a cabo para la realización de esta primera situación en la que se comprueba el estado del terreno mediante una introducción de una línea de partículas:

- I. Descripción de datos del *input* en la primera fase: El flujo es transitorio y está situado en una zona saturada (sin transporte). La extensión del dominio es de $x = 20$ m, $y = 3$ m y $z = 15$ m, siendo la extensión de la malla de 100 filas, 100 columnas y 20 capas, habiendo un total de 200.000 celdas.

Esta fase permanece constante a lo largo de las sucesivas simulaciones.

- II. Descripción de datos del *input* en la segunda fase: La conductividad hidráulica se mantiene constante durante todo el proceso siendo los valores de $K_x = 10^{-4}$ cm/seg, $K_y = 10^{-4}$ cm/seg y $K_z = 10^{-5}$ cm/seg. Los bordes de la piezometría son constantes también durante todo el proceso siendo aguas arriba igual a 1 m y en aguas abajo igual a 0 m. La piezometría inicial es de 1 m. Además se ha añadido una línea de 10 partículas en el eje y , y otra línea de 20 partículas en el eje x para así poder realizar un seguimiento de su comportamiento una vez se ha iniciado el proceso. Las partículas son liberadas en el día 70.

- III. Descripción de datos del *running*: Se activa la opción de rewting que sirve para el remojado de las celdas que alguna vez durante el proceso se han secado. En el *output* se activan los datos de salida que se quieran obtener del programa y se activan las opciones de trabajo con Modflow y con Modpath.
- IV. Visualización de datos del *output*: En las figuras 5.1 y 5.2 se puede observar como la piezometría se ha reajustado y la dirección que toman las partículas hacia aguas abajo. El color verde indica que esas celdas están secas, por lo que en esa porción de suelo no habría agua.

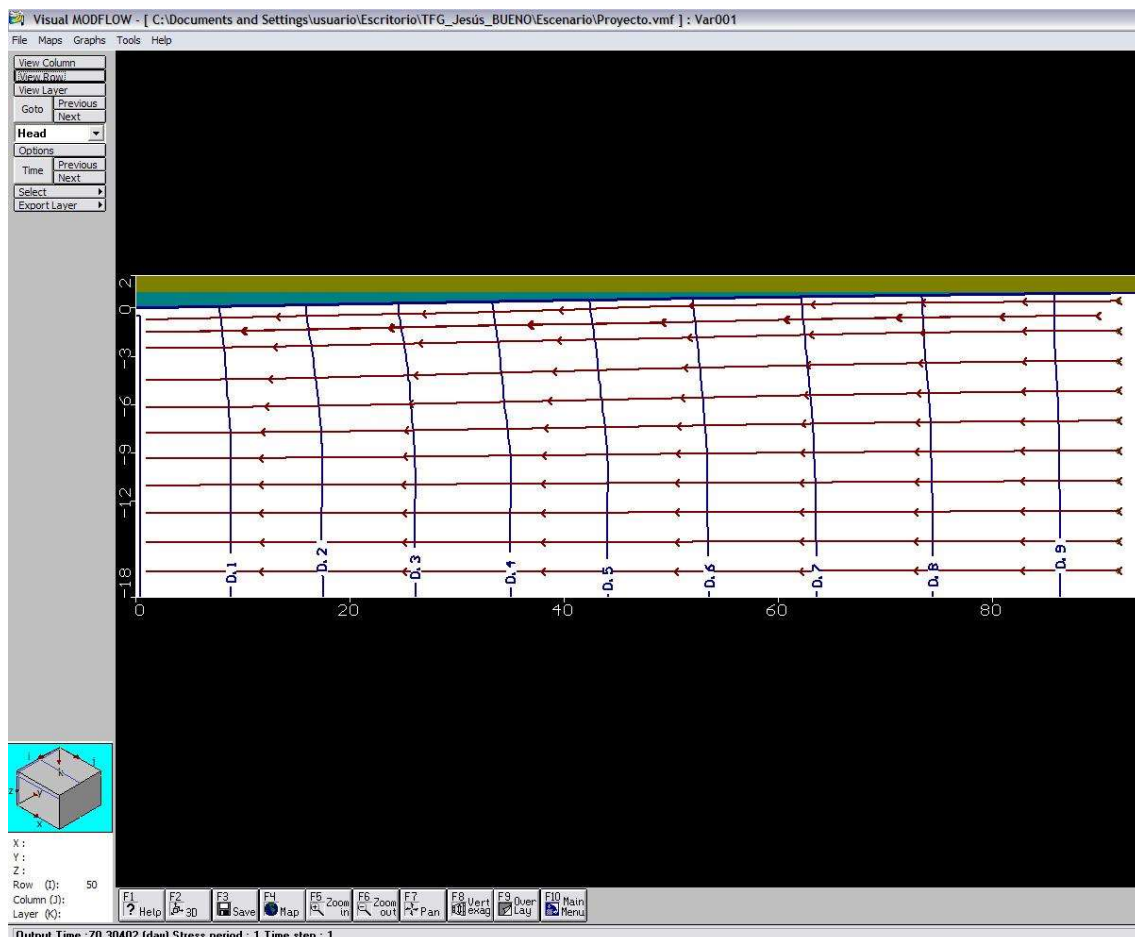


Figura 5.1. Partículas liberadas en el día 70. Vista en perfil.

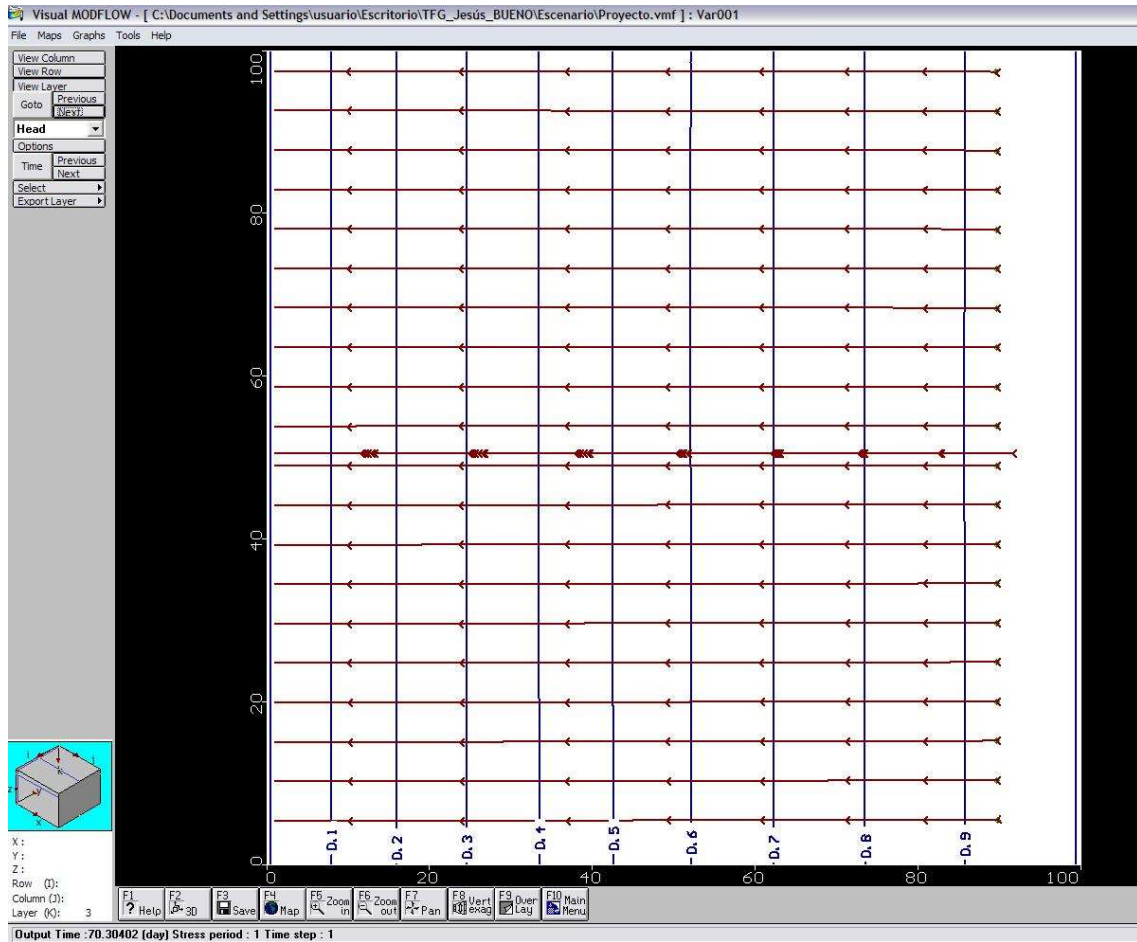


Figura 5.2. Partículas liberadas en el día 70. Vista en planta.

Como se puede observar en ambas figuras, la dirección de las partículas es hacia aguas abajo y como no existe ningún obstáculo y el terreno es uniforme tienen una trayectoria uniforme. Debido al gradiente hidráulico, la piezometría del terreno se reajusta y se observa como a lo largo de la parcela las curvas varían desde 0.9 m aguas arriba hasta la cota 0 en aguas abajo.

5.1. CONSTRUCCIÓN DE UNA PANTALLA.

En este apartado se describen los distintos pasos que se han llevado a cabo para la realización de esta segunda situación en la que se comprueba el estado del terreno mediante una introducción de una línea de partículas más un muro pantalla.

- I. Descripción de datos del *input* en la primera fase: El flujo es transitorio y está situado en una zona saturada (sin transporte). La extensión del dominio es de $x = 20$ m, $y = 3$ m y $z = 15$ m, siendo la extensión de la malla de 100 filas, 100 columnas y 20 capas, habiendo un total de 200.000 celdas.
Esta fase permanece constante a lo largo de las sucesivas simulaciones.

- II. Descripción de datos del *input* en la segunda fase: La conductividad hidráulica se mantiene constante durante todo el proceso siendo los valores de $K_x = 0.0001$, $K_y = 0.0001$ y $K_z = 0.00001$. Los bordes de la piezometría son constantes también durante todo el proceso siendo aguas arriba igual a 1 m y en aguas abajo igual a 0 m. La piezometría inicial es de 1 m. Se mantiene una línea de 10 partículas en el eje y , y otra línea de 20 partículas en el eje x para así poder realizar un seguimiento de su comportamiento una vez se ha iniciado el proceso. Las partículas son liberadas en el día 70. Además se ha añadido un muro pantalla de dimensiones 20 m de largo, 15 m de ancho, 4 m de profundidad llegando hasta la cota -2 m y 0.5 m de espesor. En el programa a los bordes del muro pantalla se les ha marcado con una conductividad hidráulica muy baja (10^{-10} cm/seg).

- III. Descripción de datos del *running*: Se activa la opción de rewrtting que sirve para el remojado de las celdas que alguna vez durante el proceso se han secado. En el *output* se activan los datos de salida que se quieran obtener del programa y se activan las opciones de trabajo con Modflow y con Modpath.

IV. Visualización de datos del *output*: En las figuras 5.3 y 5.4 se puede observar como la piezometría se ha reajustado. Se aprecia cómo ha variado la trayectoria de las partículas respecto al escenario anterior debido al muro pantalla que se ha construido. Unas partículas lo han esquivado lateralmente mientras que otras han pasado por debajo suya al no poder atravesarlo obviamente. El color verde indica que esas celdas están secas, por lo que en esa porción de suelo no habría agua.

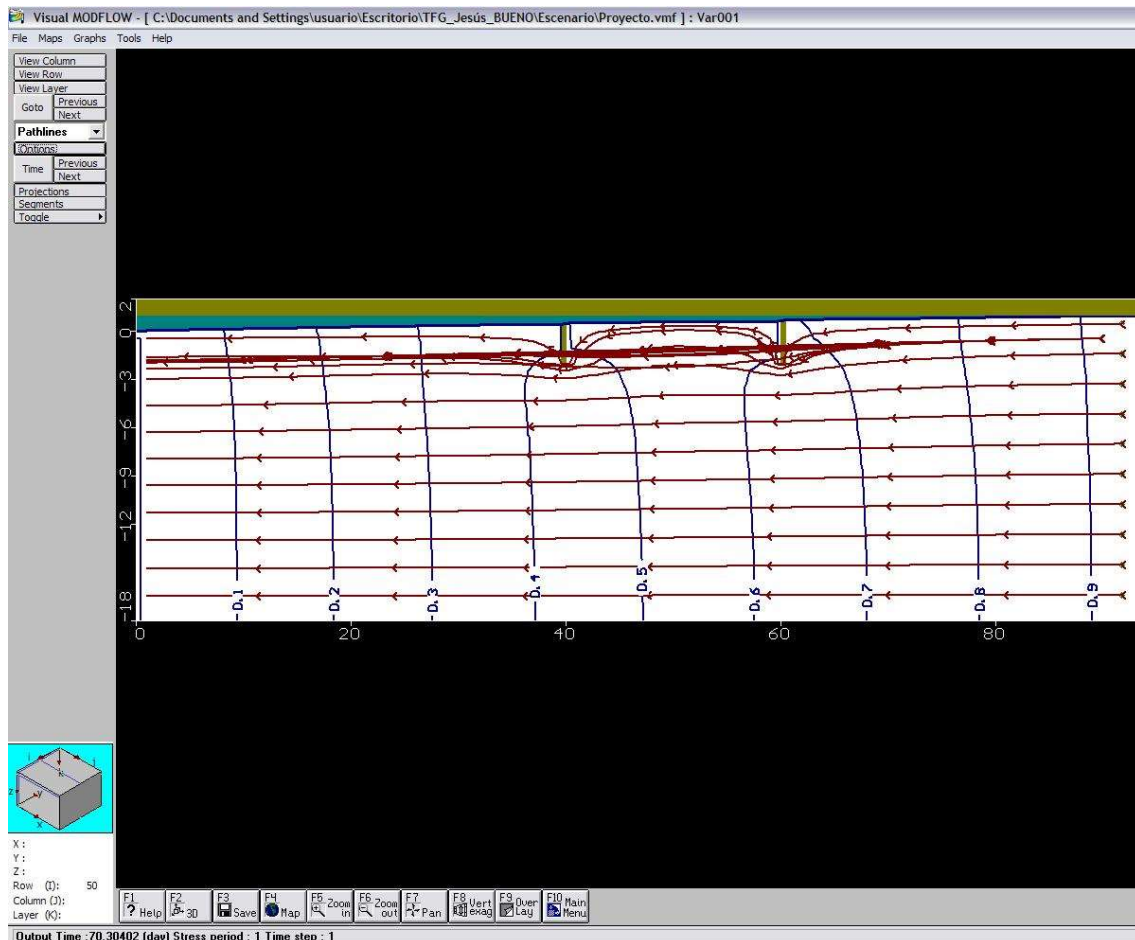


Figura 5.3. Partículas liberadas en el día 70 con un muro pantalla. Vista en perfil.

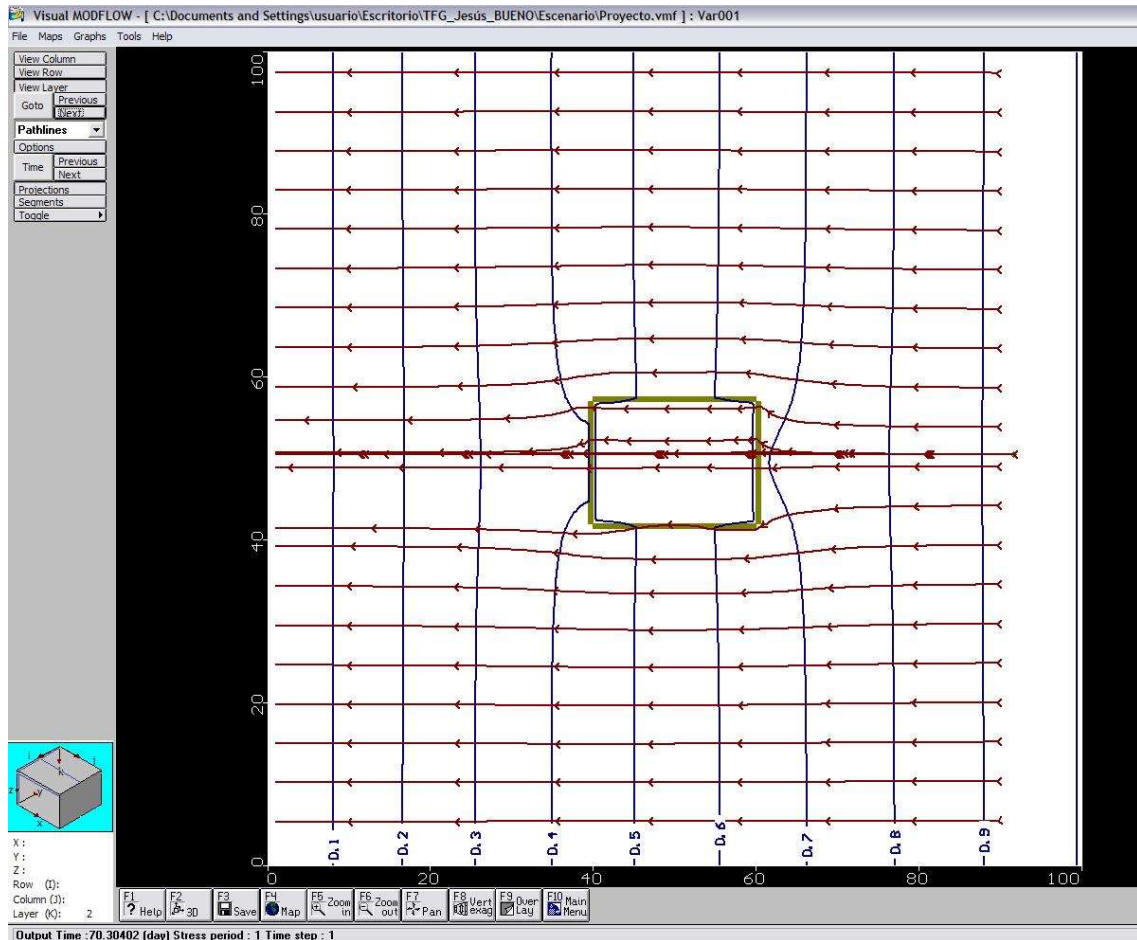


Figura 5.4. Partículas liberadas en el día 70 con un muro pantalla. Vista en planta.

Como se puede observar en ambas figuras, la dirección de las partículas es hacia aguas abajo y a diferencia del escenario anterior muchas partículas siguen su dirección de manera uniforme pero las que se cruzan con el muro pantalla la ven modificada ya que no pueden atravesarlo. Unas tienen que desplazarse hacia los laterales del muro, mientras que otras se desplazan por debajo del muro teniendo que superar estos muros dos veces. En la figura 5.5 se ha realizado un zoom para poder observar esto con más detalle. La piezometría del terreno se reajusta igual que en el primer escenario variando las curvas desde 0.9 m aguas arriba hasta la cota 0 en aguas abajo.

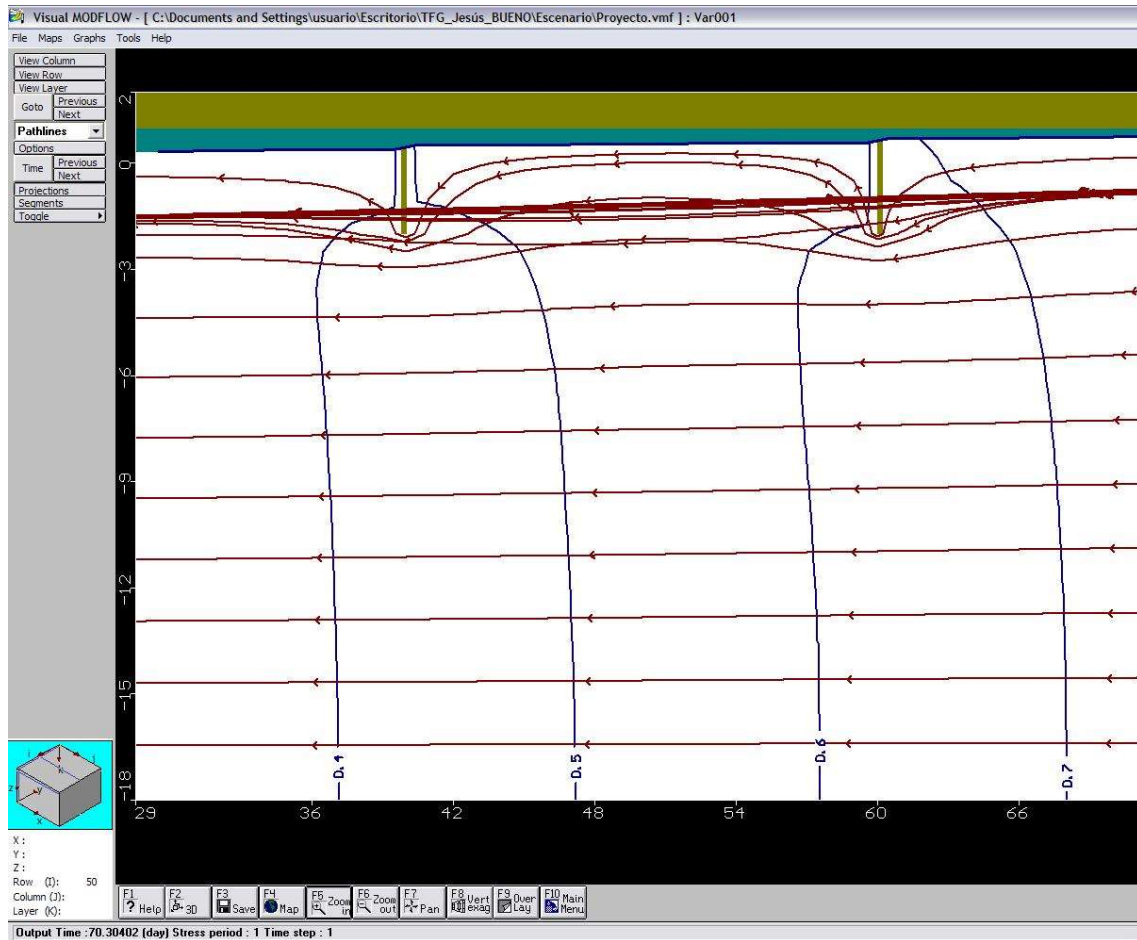


Figura 5.5. Partículas liberadas en el día 70 con un muro pantalla.
Vista en perfil ampliada.

5.2. OPTIMIZACIÓN DEL CAUDAL PARA EL CASO DE UN POZO.

En este nuevo caso se describen los distintos pasos que se han llevado a cabo para la realización de esta tercera situación en la que se ha añadido un pozo de extracción para empezar a rebajar el nivel freático. El pozo se coloca aguas arriba de la parcela a 5 m del muro pantalla. La línea de partículas ya se elimina debido a que ahora su trayectoria va a ser en dirección a la bomba.

- I. Descripción de datos del *input* en la primera fase: El flujo es transitorio y está situado en una zona saturada (sin transporte). La extensión del dominio es de $x = 20$ m, $y = 3$ m y $z = 15$ m, siendo la extensión de la malla de 100 filas, 100 columnas y 20 capas, habiendo un total de 200.000 celdas. La duración del bombeo es de 5 años.

Esta fase permanece constante a lo largo de las sucesivas simulaciones.

- II. Descripción de datos del *input* en la segunda fase: La conductividad hidráulica se mantiene constante durante todo el proceso siendo los valores de $K_x = 0.0001$, $K_y = 0.0001$ y $K_z = 0.00001$. Los bordes de la piezometría son constantes también durante todo el proceso siendo aguas arriba igual a 1 m y en aguas abajo igual a 0 m. La piezometría inicial es de 1 m. Se mantiene el muro pantalla de dimensiones 20 m de largo, 15 m de ancho, 4 m de profundidad llegando hasta la cota -2 m y 0.5 m de espesor. En el programa a los bordes del muro pantalla se les ha marcado con una conductividad hidráulica muy baja (10^{-10} cm/seg). Además se ha añadido un pozo de bombeo que succiona el fluido desde la cota -18 m hasta la cota -10 m donde se encuentra su rejilla.

- III. Descripción de datos del *running*: Se activa la opción de rewting que sirve para el remojado de las celdas que alguna vez durante el proceso se han secado. En el *output* se activan los datos de salida que se quieran obtener del programa y se activan las opciones de trabajo con Modflow. Esta vez no se activa la opción de Modpath debido a que ya no hay partículas.
- IV. Visualización de datos del *output*: En la figura 5.6 se observa la posición del pozo y sus características. En la figura 5.7 se puede divisar la variación de las líneas piezométricas como en el centro de la excavación las líneas llegan a estar a una cota mínima de -0.16 m. En la figura 5.8 se anotan las líneas de descenso y se aprecia como con las características que se le ha dado a la bomba se ha llegado a un descenso máximo de 2.2 m.

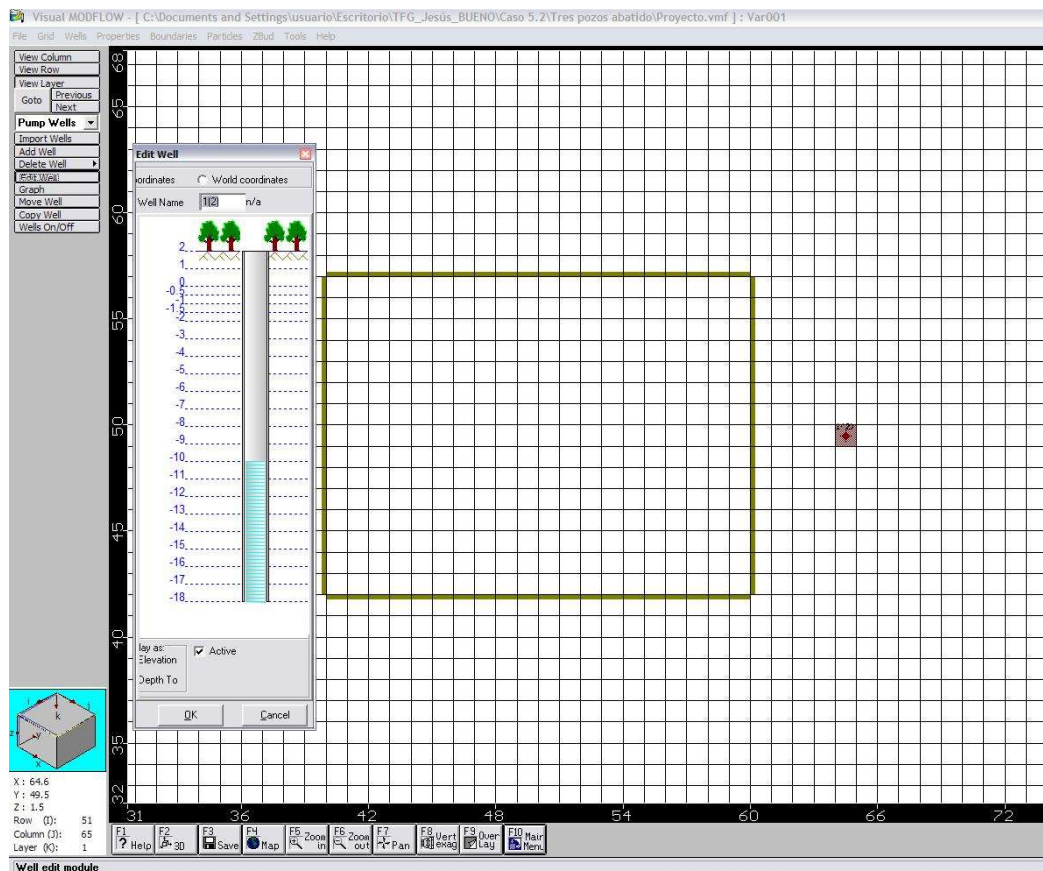


Figura 5.6. Posición y características de un pozo. Vista en planta.

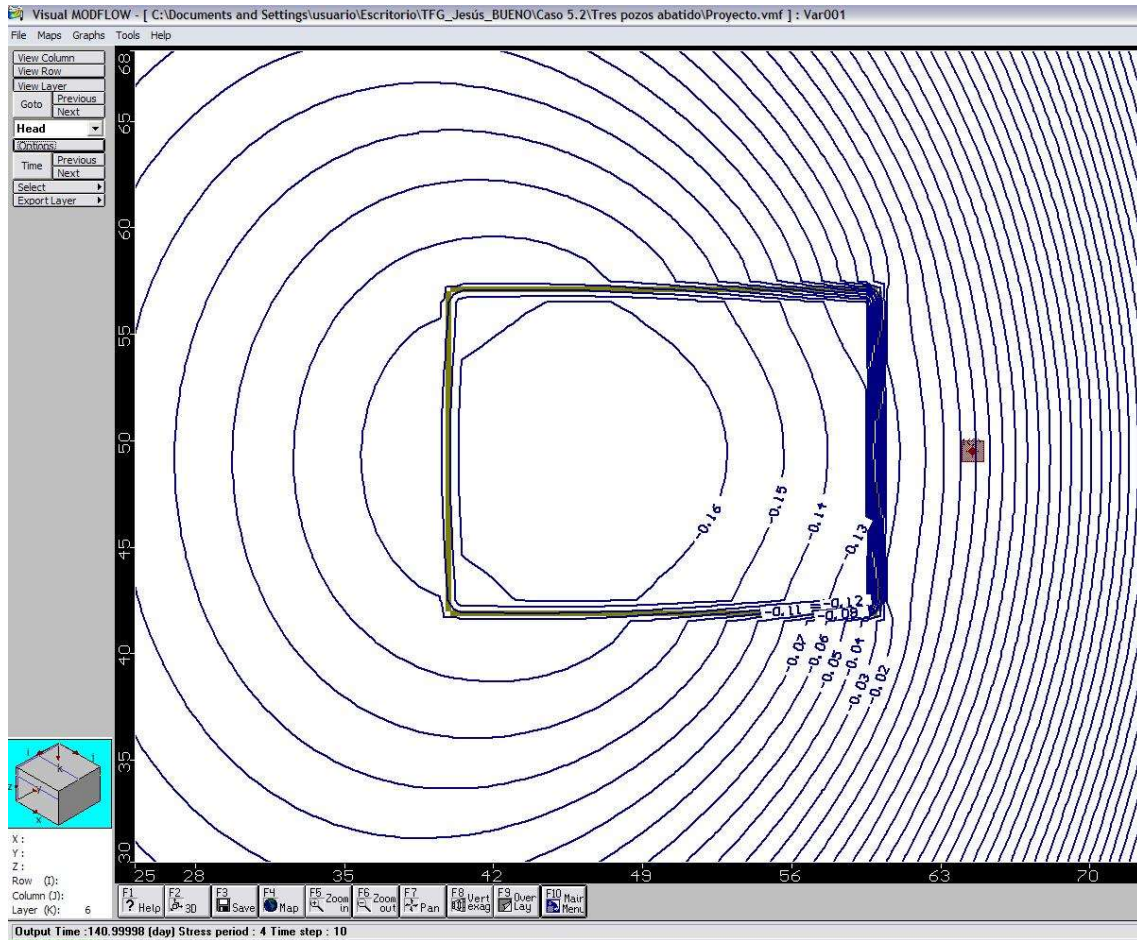


Figura 5.7. Líneas piezométricas rebajadas por un pozo. Vista en planta.

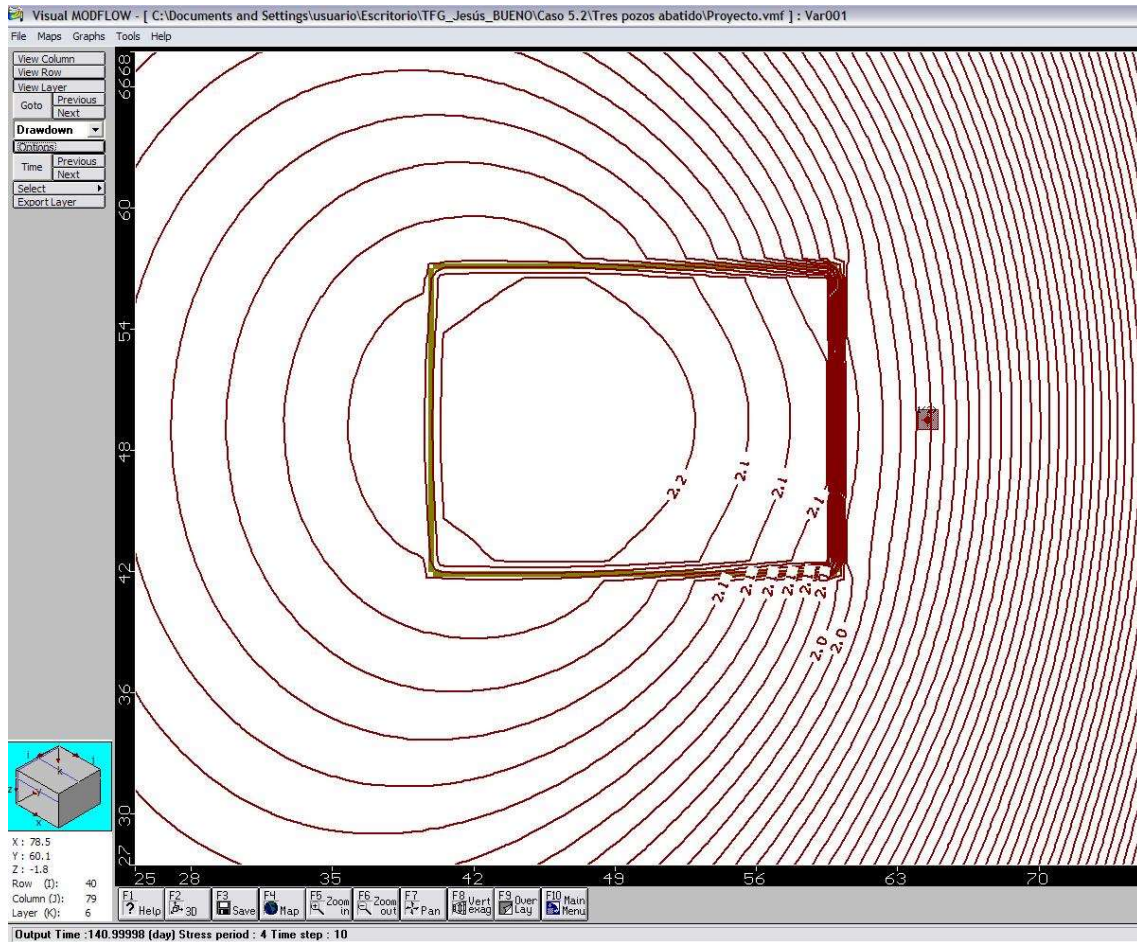


Figura 5.8. Descenso alcanzado por un pozo. Vista en planta.

Los caudales con los que se ha trabajado en este pozo y sus respectivos descensos logrados en el centro de la excavación se adjuntan en la siguiente tabla:

CAUDALES (EN L/S)	DESCENSO MEDIO EN LA PARCELA (EN METROS)
0	0.9
1	1.45
5	1.55
9	1.75
13	1.94
20	2.2

Estos valores de caudal se han tomado después de consultar distintas fuentes, por lo que son valores reales que se toman a diario. El motivo por el que no se puede seguir aumentando el caudal de extracción se debe a que la permeabilidad hidráulica no permite aportar la demanda de agua desde los pozos. Por lo que se ha llegado a un caudal optimizado para un pozo, y como no alcanza la profundidad necesaria para poder realizar el vaciado se precisa de al menos un pozo más.

5.3. OPTIMIZACIÓN DE LA POSICIÓN Y DEL CAUDAL PARA EL CASO DE DOS POZOS.

En este nuevo caso se describen los distintos pasos que se han llevado a cabo para la realización de esta cuarta situación en la que se han añadido dos pozos de extracción para bajar aún más el nivel freático ya que en la anterior situación no se había llegado al objetivo marcado. Se quiere optimizar la posición de los pozos colocándolos en dos posiciones, en la primera los pozos se colocan aguas arriba de la parcela a 5 m del muro pantalla, y en la segunda los pozos se colocan a mitad de la excavación uno a cada lado del muro pantalla y ambos a 5 m de éste. No hay línea de partículas.

- I. Descripción de datos del *input* en la primera fase: El flujo es transitorio y está situado en una zona saturada (sin transporte). La extensión del dominio es de $x = 20$ m, $y = 3$ m y $z = 15$ m, siendo la extensión de la malla de 100 filas, 100 columnas y 20 capas, habiendo un total de 200.000 celdas. La duración del bombeo es de 5 años.

Esta fase permanece constante a lo largo de las sucesivas simulaciones.

- II. Descripción de datos del *input* en la segunda fase: La conductividad hidráulica se mantiene constante durante todo el proceso siendo los valores de $K_x = 0.0001$, $K_y = 0.0001$ y $K_z = 0.00001$. Los bordes de la piezometría son constantes también durante todo el proceso siendo aguas arriba igual a 1 m y en aguas abajo igual a 0 m. La piezometría inicial es de 1 m. Se mantiene el muro pantalla de dimensiones 20 m de largo, 15 m de ancho, 4 m de profundidad llegando hasta la cota -2 m y 0.5 m de espesor. En el programa a los bordes del muro pantalla se les ha marcado con una conductividad hidráulica muy baja (10^{-10} cm/seg). Además se han añadido dos pozos de bombeo de idénticas características que succionan el fluido desde la cota -18 m hasta la cota -8 m donde se encuentra su rejilla.

III. Descripción de datos del *running*: Se activa la opción de *rewtting* que sirve para el remojado de las celdas que alguna vez durante el proceso se han secado. En el *output* se activan los datos de salida que se quieran obtener del programa y se activan las opciones de trabajo con Modflow. No se activa la opción de Modpath debido a que ya no hay partículas.

IV. Visualización de datos del *output*: En este apartado se diferencian fases:

4.1. Pozos colocados aguas arriba de la parcela a 5 m del muro pantalla.

En las figura 5.9 se observa la posición de los pozos y sus características. En la figura 5.10 se puede divisar la variación de las líneas piezométricas como en el centro de la excavación las líneas llegan a estar a una cota mínima de -0.4 metros. En la figura 5.11 se anotan las líneas de descenso y se aprecia como con las características que se le han dado a las bombas se ha llegado a un descenso máximo de 2.4 metros.

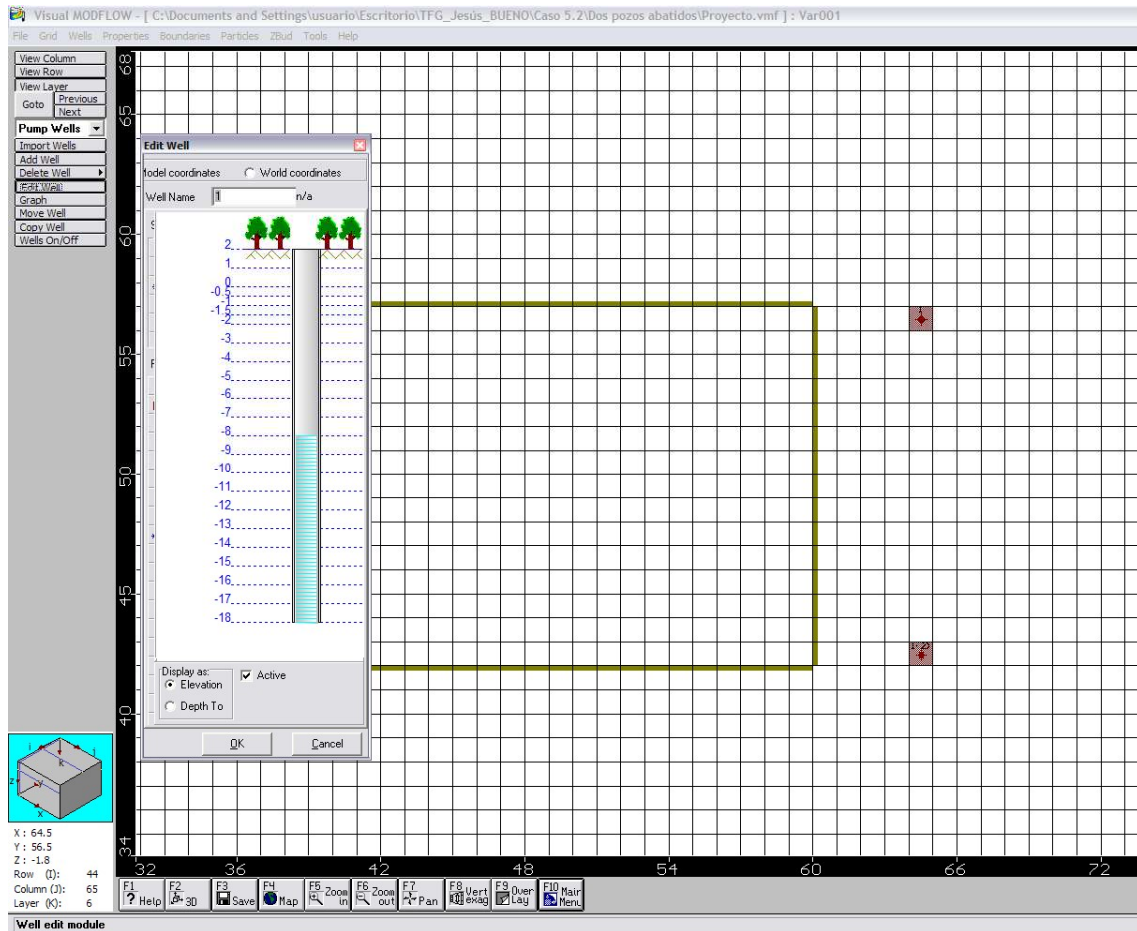


Figura 5.9. Posición y características de dos pozos situados aguas arriba.
Vista en planta.

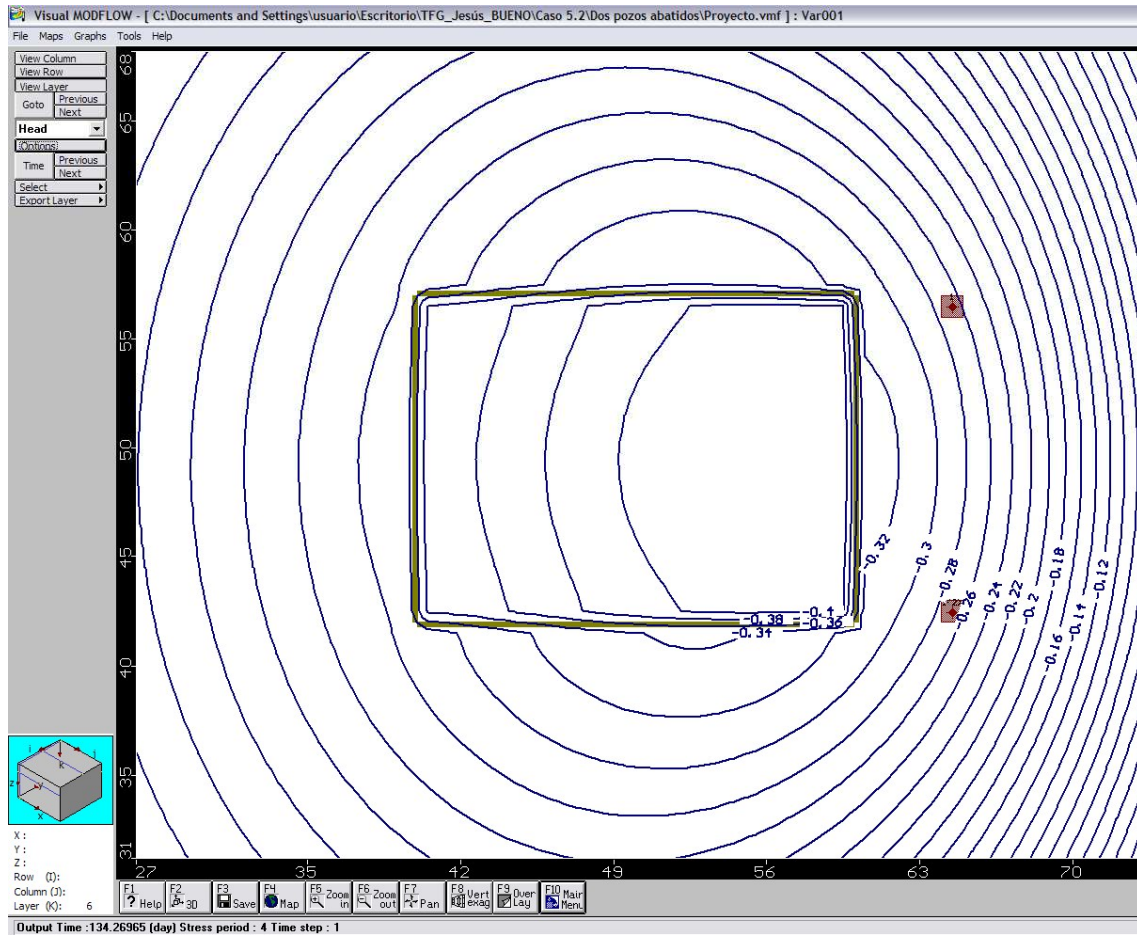


Figura 5.10. Líneas piezométricas rebajadas por dos pozos situados aguas arriba.
Vista en planta.

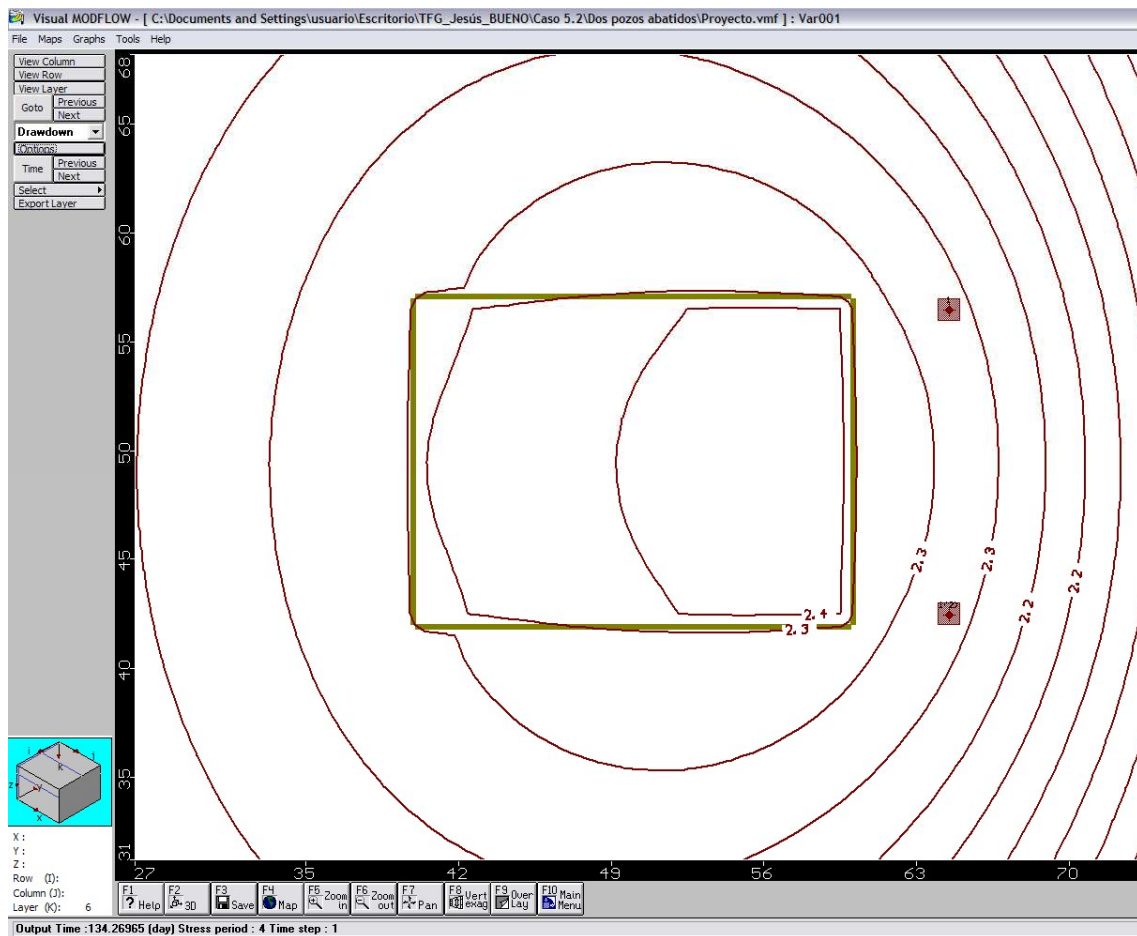


Figura 5.11. Descenso alcanzado por dos pozos situados aguas arriba.
Vista en planta.

Los caudales con los que se han trabajado en estos pozos y sus respectivos descensos logrados en el centro de la excavación se adjuntan en la siguiente tabla:

CAUDALES (EN L/S)	DESCENSO MEDIO EN LA PARCELA (EN METROS)
0	0.9
1	1.44
5	1.75
9	2.4

El motivo por el que no se puede seguir aumentando el caudal de extracción se debe a que la permeabilidad hidráulica no permite aportar la demanda de agua desde los pozos. Además se ha tenido que reducir el caudal de los pozos ya que se producían problemas de secado en las celdas de los pozos, lo que produce en la realidad una pérdida de rendimiento de éstos. Por lo que se ha llegado a un caudal optimizado para dos pozos, y como no alcanza la profundidad necesaria para poder realizar el vaciado se precisa de al menos un pozo más. A continuación se varía la posición de los pozos para ver cómo afecta a la piezometría y obtener qué posición es más efectiva.

4.2. Pozos colocados a mitad de la excavación uno a cada lado del muro pantalla y ambos a 5 m de éste. En las figura 5.12 se observa la posición de los pozos y sus características. En la figura 5.13 se puede divisar la variación de las líneas piezométricas como en el centro de la excavación las líneas llegan a estar a una cota mínima de -0.55 m. En la figura 5.14 se anotan las líneas de descenso y se aprecia como con las características que se le han dado a las bombas se ha llegado a un descenso máximo de 2.5 m.

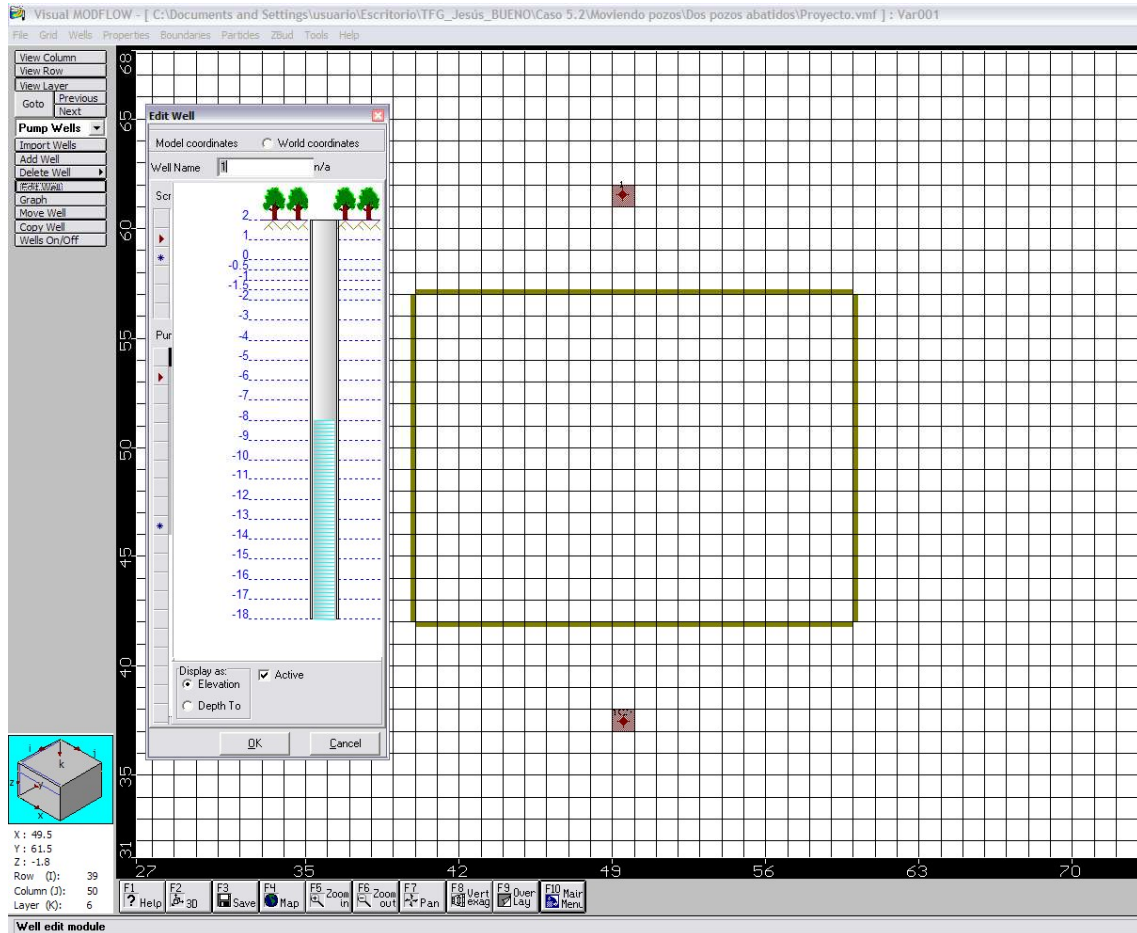


Figura 5.12. Posición y características de dos pozos situados a mitad de la excavación.
Vista en planta.

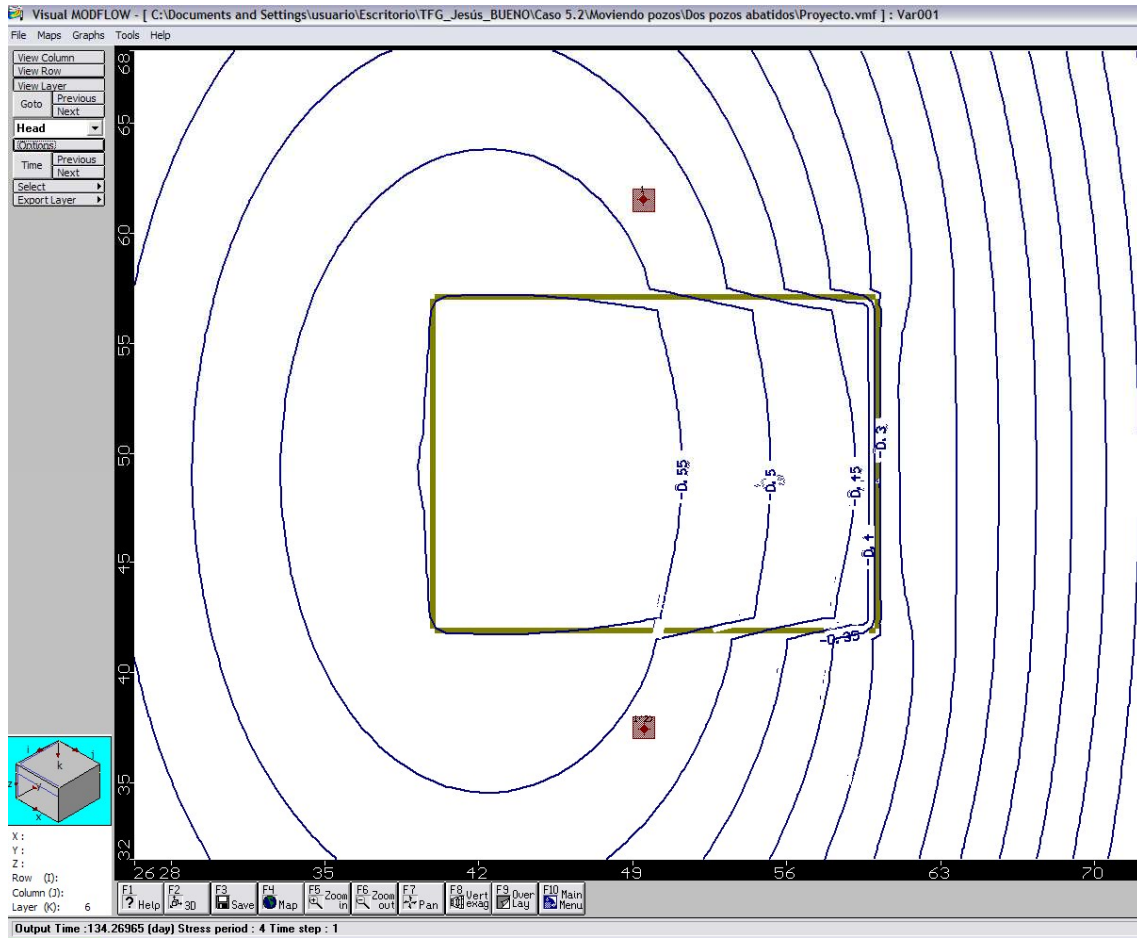


Figura 5.13. Líneas piezométricas rebajadas por dos pozos situados a mitad de la excavación. Vista en planta.

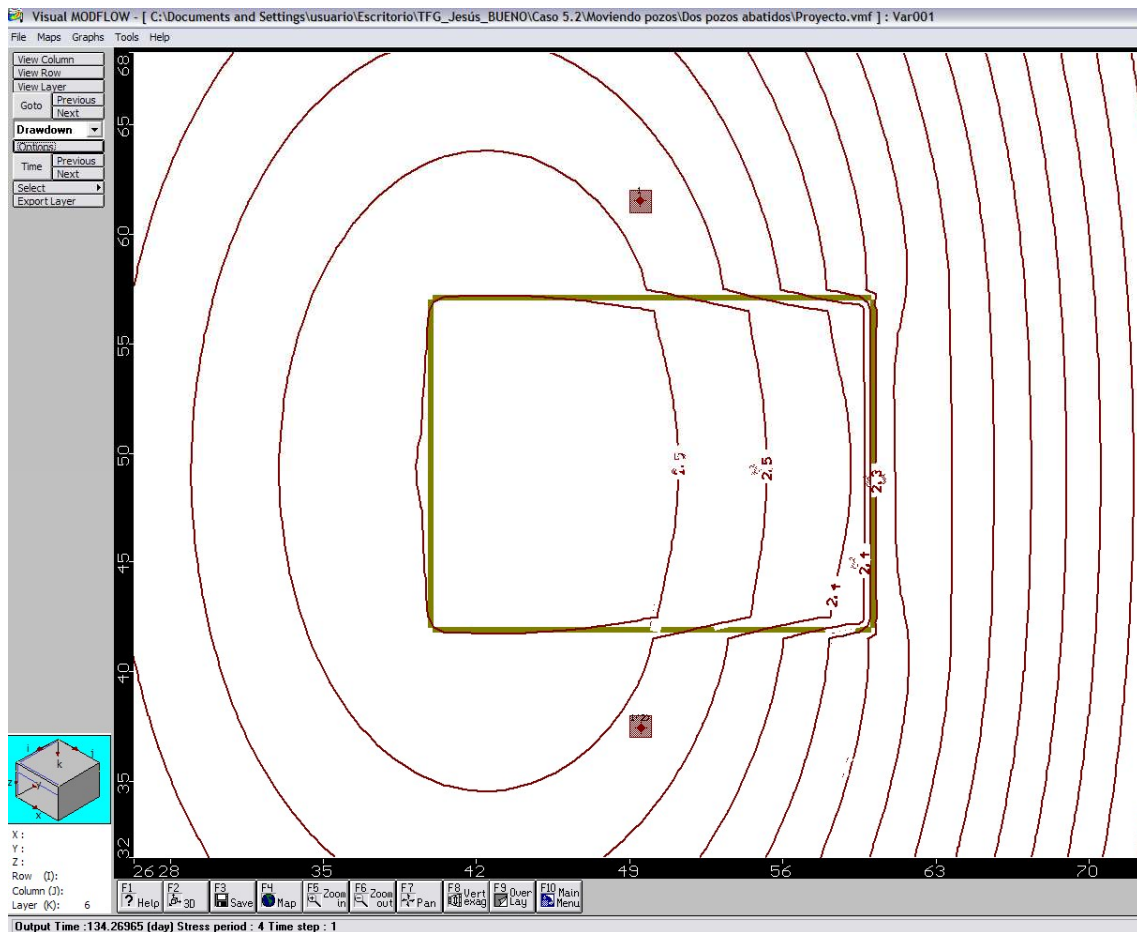


Figura 5.14. Descenso alcanzado por dos pozos situados a mitad de la excavación.
Vista en planta.

Los caudales con los que se han trabajado en estos pozos y sus respectivos descensos logrados en el centro de la excavación se adjuntan en la siguiente tabla:

CAUDALES (EN L/S)	DESCENSO MEDIO EN LA PARCELA (EN METROS)
0	0.9
1	1.5
5	1.85
9	2.5

El motivo por el que no se puede seguir aumentando el caudal de extracción se debe a que la permeabilidad hidráulica no permite aportar la demanda de agua desde los pozos. Además se ha tenido que reducir el caudal de los pozos ya que se producían problemas de secado en las celdas de los pozos, lo que produce en la realidad una pérdida de rendimiento de éstos. Por lo que se ha llegado a un caudal optimizado para dos pozos, y como no alcanza la profundidad necesaria para poder realizar el vaciado se precisa de al menos un pozo más.

5.4. OPTIMIZACIÓN DEL CAUDAL PARA EL CASO DE TRES POZOS.

En este nuevo caso se describen los distintos pasos que se han llevado a cabo para la realización de esta quinta situación en la que se han añadido tres pozos de extracción para bajar aún más el nivel freático ya que en la anterior situación no se había llegado al objetivo marcado. Se colocan dos pozos aguas arriba de la parcela a 5 m del muro pantalla y otro pozo aguas abajo a 5 m del muro. Esta disposición se debe claramente a que aguas arriba de la excavación va a haber que rebajar más el nivel freático que aguas abajo. No hay línea de partículas.

- I. Descripción de datos del *input* en la primera fase: El flujo es transitorio y está situado en una zona saturada (sin transporte). La extensión del dominio es de $x = 20$ m, $y = 3$ m y $z = 15$ m, siendo la extensión de la malla de 100 filas, 100 columnas y 20 capas, habiendo un total de 200.000 celdas. La duración del bombeo es de 5 años.

Esta fase permanece constante a lo largo de las sucesivas simulaciones.

- II. Descripción de datos del *input* en la segunda fase: La conductividad hidráulica se mantiene constante durante todo el proceso siendo los valores de $K_x = 0.0001$, $K_y = 0.0001$ y $K_z = 0.00001$. Los bordes de la piezometría son constantes también durante todo el proceso siendo aguas arriba igual a 1 m y en aguas abajo igual a 0 m. La piezometría inicial es de 1 m. Se mantiene el muro pantalla de dimensiones 20 m de largo, 15 m de ancho, 4 m de profundidad llegando hasta la cota -2 m y 0.5 m de espesor. En el programa a los bordes del muro pantalla se les ha marcado con una conductividad hidráulica muy baja (10^{-10} cm/seg). Además se han añadido tres pozos de bombeo de los cuales los dos que están situados aguas arriba de la excavación succionarán más caudal que el otro pozo situado aguas abajo.

El fluido lo succionan desde la cota -18 m hasta la cota -8 m donde se encuentra su rejilla.

- III. Descripción de datos del *running*: Se activa la opción de rewrtting que sirve para el remojado de las celdas que alguna vez durante el proceso se han secado. En el *output* se activan los datos de salida que se quieran obtener del programa y se activan las opciones de trabajo con Modflow. No se activa la opción de Modpath debido a que ya no hay partículas.

- IV. Visualización de datos del *output*: En la figura 5.15 se observa la posición de los pozos y sus características. En la figura 5.16 se puede divisar la variación de las líneas piezométricas como en el centro de la excavación las líneas llegan a estar a una cota mínima de -1.3 m. En la figura 5.17 se anotan las líneas de descenso y se aprecia como con las características que se le ha dado a la bomba se ha llegado a un descenso máximo de 3.3 m.

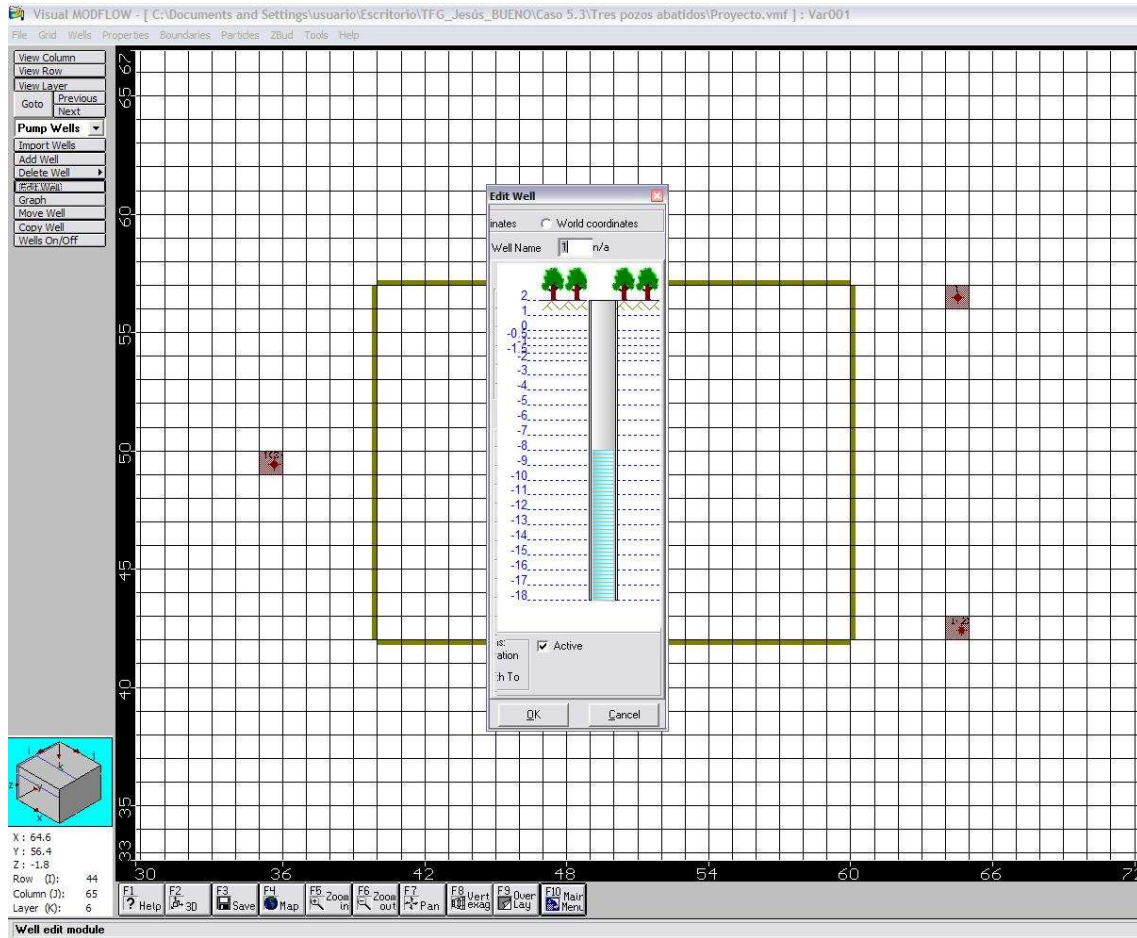


Figura 5.15. Posición y características de tres pozos. Vista en planta.

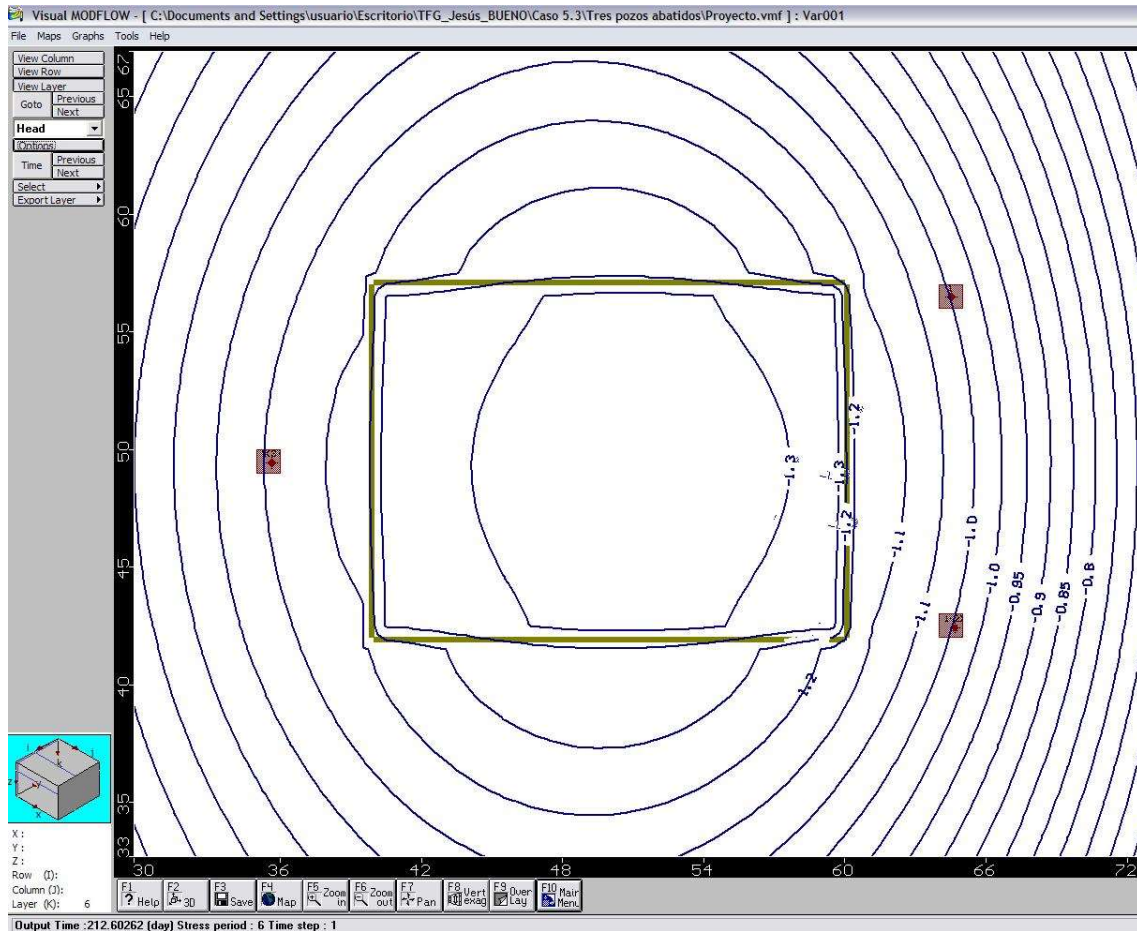


Figura 5.16. Líneas piezométricas rebajadas por tres pozos. Vista en planta.

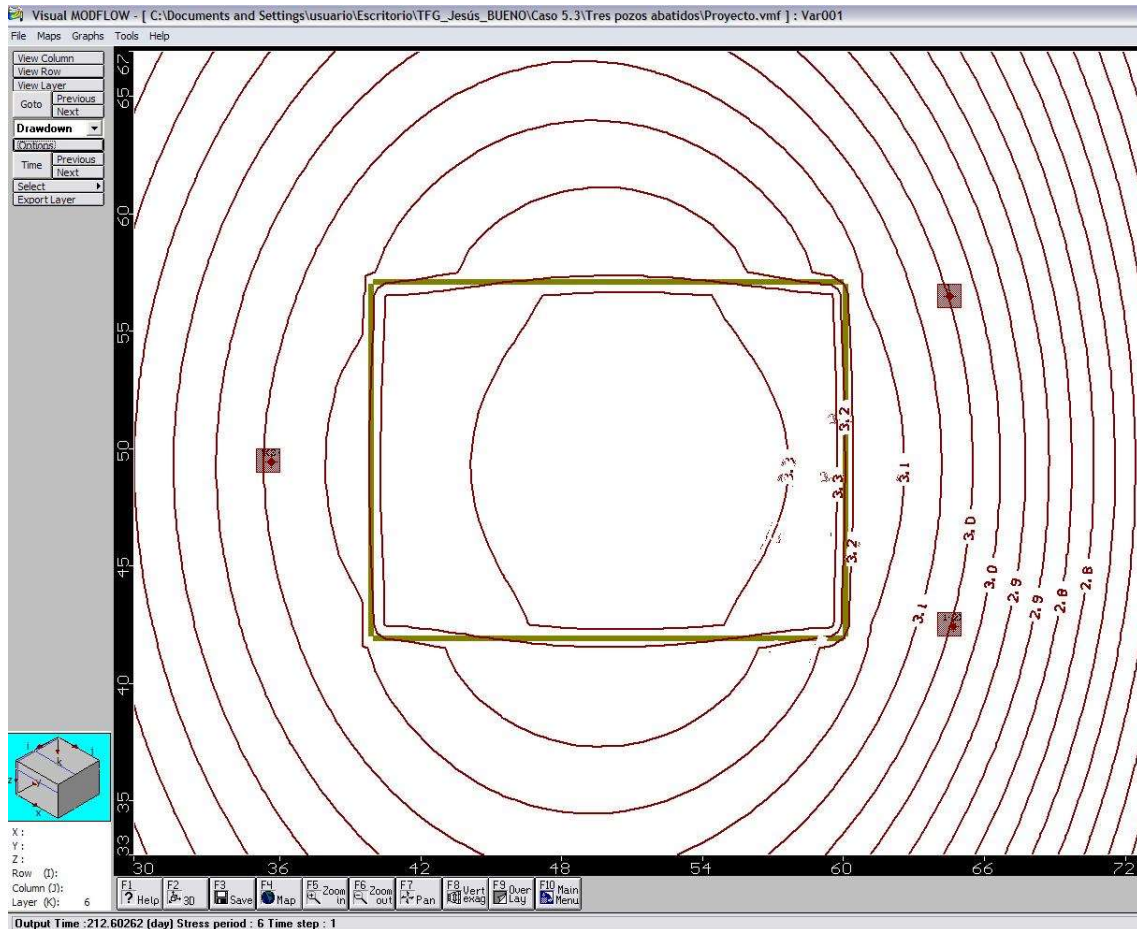


Figura 5.17. Descenso alcanzado por tres pozos. Vista en planta.

Con esta situación ya hemos llegado a nuestro objetivo de llegar hasta la cota de -1 m. Antes de llegar a este punto se realizaron varias pruebas para optimizar el caudal mínimo que tenían que succionar estas tres bombas para llegar al descenso deseado. A continuación se muestran los caudales con los que se han trabajado en estos pozos y sus respectivos descensos logrados en el centro de la excavación.

CAUDALES DE LOS DOS POZOS SITUADOS AGUAS ARRIBA (EN L/S)	CAUDAL DEL POZO SITUADO AGUAS ABAJO (EN L/S)	DESCENSO MEDIO EN LA PARCELA (EN METROS)
0	0	0.9
1	1	1.55
5	2	1.78
7	3	2.5
9	4	2.95
10	5	3.7

El descenso es demasiado, llega hasta los 3.7 m. Por lo que se disminuye el caudal en los pozos situados aguas arriba para optimizar el trabajo de las bombas. El caudal del pozo situado aguas abajo se mantiene constante.

CAUDALES DE LOS DOS POZOS SITUADOS AGUAS ARRIBA (EN L/S)	CAUDAL DEL POZO SITUADO AGUAS ABAJO (EN L/S)	DESCENSO MEDIO EN LA PARCELA (EN METROS)
0	0	0.9
1	1	1.55
5	2	1.78
6	3	2.45
7	4	2.75
9	5	3.5

El descenso es demasiado, llega hasta los 3.5 m. Por lo que se disminuye el caudal en los pozos situados aguas arriba para optimizar el trabajo de las bombas. El caudal del pozo situado aguas abajo se mantiene constante.

CAUDALES DE LOS DOS POZOS SITUADOS AGUAS ARRIBA (EN L/S)	CAUDAL DEL POZO SITUADO AGUAS ABAJO (EN L/S)	DESCENSO MEDIO EN LA PARCELA (EN METROS)
0	0	0.9
1	1	1.55
5	2	1.78
6	3	2.45
7	4	2.75
8	5	3.3

El descenso es el ideal, llega hasta los 3.3 m. La excavación llega hasta los 3 m pero se dejan esos 30 cm como factor de seguridad. Por lo que ya se ha llegado a una solución definitiva y óptima para este problema.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

Se ha creado un modelo numérico con Modflow para simular el abatimiento del nivel freático en el interior de una excavación. Para ello ha sido preciso el aprendizaje del entorno de ventanas de la interfaz Visual Modflow Premium V.4.2 para crear los archivos de Input, Run y Output.

Se ha realizado una revisión de los planteamientos teóricos de las ecuaciones de gobierno y de los parámetros físicos que define el flujo de agua para poder interpretar los resultados de las simulaciones. En concreto se pueden comentar dos casos:

- I) La interpretación de los motivos por los que los caudales no pueden ser superiores a un cierto valor debido a los valores de conductividad hidráulica del acuífero que regulan el caudal que entra en el pozo.
- II) La interpretación del movimiento del agua en el acuífero a través de la forma de las líneas isopiezas.

Las soluciones óptimas a las que se ha llegado son las siguientes:

- En el caso de un pozo, se consigue un descenso de 2.2 metros para un caudal de 20 litros/segundo, situando el pozo aguas arriba.
- Para el caso de dos pozos se consigue un descenso de 2.5 metros situando los dos pozos a ambos lados de la excavación para un caudal de 9 litros/segundo. Si los pozos se ubican aguas arriba con el mismo caudal, el descenso alcanzado es menor (en torno a los 10 centímetros).

- La solución propuesta consiste en tres pozos situados dos aguas arriba y otro aguas abajo, con caudales de 8 y 5 litros/segundo respectivamente. Se consigue un descenso medio en la parcela de 3.3 metros, por debajo de la base de la excavación (3 metros bajo la superficie del terreno).

Capítulo 7

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Langevin Ch. D., Barcjay W., Guo W. (2003). *Modflow – 2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model*. Tallahassee, Fl. USA.

Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. *Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea*. 1ª Edición. Barcelona, 2009.

González de Vallejo Luís, Ferrer Mercedes, Ortuño Luís, Oteo Carlos. *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson educación, 2002.

Berry Peter L, Reid David. *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill, 1993.

Visual Modflow 2011.1 User's Manual.

Cruces de Abia Joaquín. *Modelo Modflow*. Máster en ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2006/2007.