

# Introducción a Visual Modflow

## Conceptos básicos

**MODFLOW** es un programa gratuito desarrollado por el Servicio Geológico USA<sup>1</sup> para simular el flujo del agua subterránea, o más exactamente, la evolución de los niveles en las condiciones especificadas: bombeos, ríos, drenes, infiltración de las precipitaciones, etc.

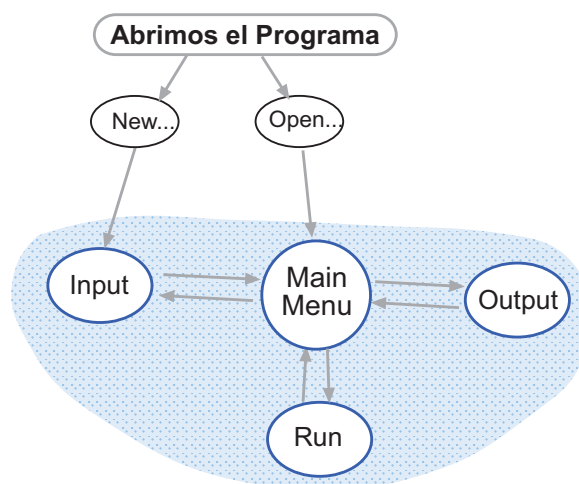
En su versión original y gratuita su utilización no es sencilla. En cambio, existen otras versiones que, utilizando el motor de cálculo original, le añaden una interfaz cómoda para el usuario, tanto para introducir las características del modelo como para observar al final los resultados. La más extendida es **Visual Modflow**<sup>2</sup>

**Visual Modflow** incluye además a **otros programas** que fueron creados como complementos de MODFLOW; utilizan la salida de MODFLOW y nos proporcionan los siguientes resultados: MODPATH describe la trayectoria descrita por las partículas de fluido que le hayamos indicado; ZONE BUDGET calcula el balance hídrico de cada zona que establezcamos dentro del modelo, MT3D calcula el transporte de solutos,....<sup>3</sup>

En **Visual Modflow** nos moveremos en tres escenarios distintos, que denominaremos *Secciones* :

- **Input**, para introducir datos: geometría del modelo, permeabilidades, caudales, etc.
- **Run**, para ejecutar el modelo
- **Output**, para observar los resultados de la ejecución

Para pasar de una *sección* a otra es necesario pasar por el **Menu Principal** (Main Menu), en el que, con alguna excepción, las únicas acciones que podemos ejecutar son: Guardar (Save), Salir del programa (eXit), o entrar en una de las tres *secciones* citadas arriba.



Cuando abrimos **Visual Modflow** disponemos de dos posibilidades:

- **Crear un modelo nuevo** (New...) Después de unos cuadros de datos generales, aparecemos directamente en la sección Input (si el modelo no existe es necesario asignarle geometría y propiedades)
- **Abrir uno ya existente** (Open...). En este caso aparecemos en el Menú Principal, donde podemos dirigirnos a cualquiera de las tres *secciones* indicadas arriba

En el **esquema general** de la página siguiente se intenta resumir la estructura de funcionamiento del programa. Puede utilizarse como el índice de un libro: a partir del esquema, buscar la página correspondiente con explicaciones sobre esa parte.

Este esquema, como el resto del documento, no incluye todas las posibilidades.

Estas notas son válidas hasta la versión 2011.1 (Build 4.6).

La versión actual (año 2014), denominada "Flex" es bastante diferente.

<sup>1</sup> <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2005/modflow2005.html>

<sup>2</sup> [http://www.swstechnology.com/spanish/software\\_product.php?ID=88](http://www.swstechnology.com/spanish/software_product.php?ID=88) . Este manual se hizo sobre la versión 4. Ignoro el número de versión actual. Existen la versión estándar, la Pro y la Premium

<sup>3</sup> Estos programas en su versión original también son gratuitos, los dos primeros del mismo USGS, el tercero no.

(Los números 1 4 6 Indican nº de página)

Botones arriba izquierda, siempre presentes

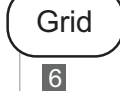
- View Row
- View Column
- View Layer
- Podemos ver el modelo en planta o en corte
- Goto Previous
- Goto Next
- Nos movemos de capa en capa, de fila en fila,...

- 1er Cuadro: unidades
- 2º Cuadro: Régimen variable/Permanente, valores generales de parámetros hidráulicos
- 3er Cuadro: Dimensiones del modelo

**Inicio**



- Inactive Cells
- Señalamos celdas que no usará el modelo
- Edit Grid, Smoothing
- Hacemos cambios en la cuadrícula
- Import Elevation
- Importamos la forma de la superficie del terreno, freática, etc.



- Add Well (Add Obs.)
- Añadir un pozo
- Delete Well (Delete Obs.)
- Borrar un pozo
- Edit Well (Edit Obs.)
- Cambiar algo en un pozo ya existente
- Move Well (Move Obs.)
- Mover un pozo



- Pumping Wells
- Pozos de bombeo
- Head Obs Wells
- Pozos para observación de niveles

- Asign
- Asignamos propiedades distintas de las generales a partes del modelo
- Copy
- Si las diferentes zonas establecidas para Conductividad coinciden con las zonas de almacenamiento, podemos copiar la distribución de zonas
- Database
- Tabla con todos los valores. Para comprobar o hacer cambios



- Conductivity
- Storage
- Datos de coef. almacenamiento y porosidad
- Initial Heads
- Niveles piezométricos iniciales

- Asign
- Asignar el borde elegido a determinadas celdas
- Edit : Hacer cambios
- Erase: Borrar, eliminar
- Copy: Copiar entre capas
- En Boundaries, estos botones pueden variar según tipo de límite (boundary) con el que estamos trabajando

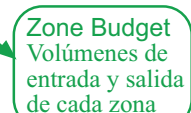
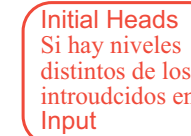
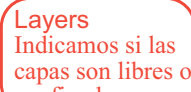
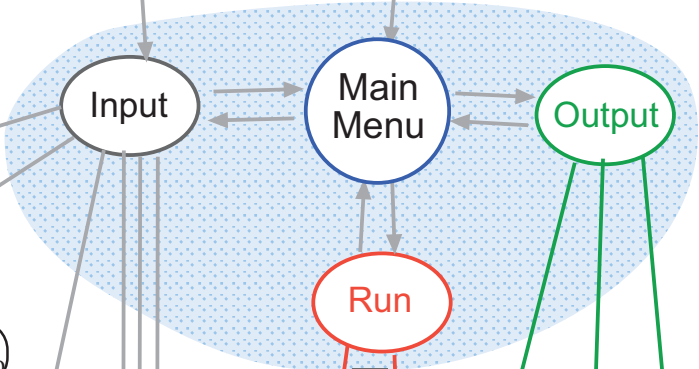


- Constant Head
- Nivel Constante
- River Río
- Drain Dren
- Etc etc.

- Add: Añadir partículas
- Delete: Eliminar partículas
- Tracking
- Invertir el sentido del trazado
- Copy: Copiar entre capas



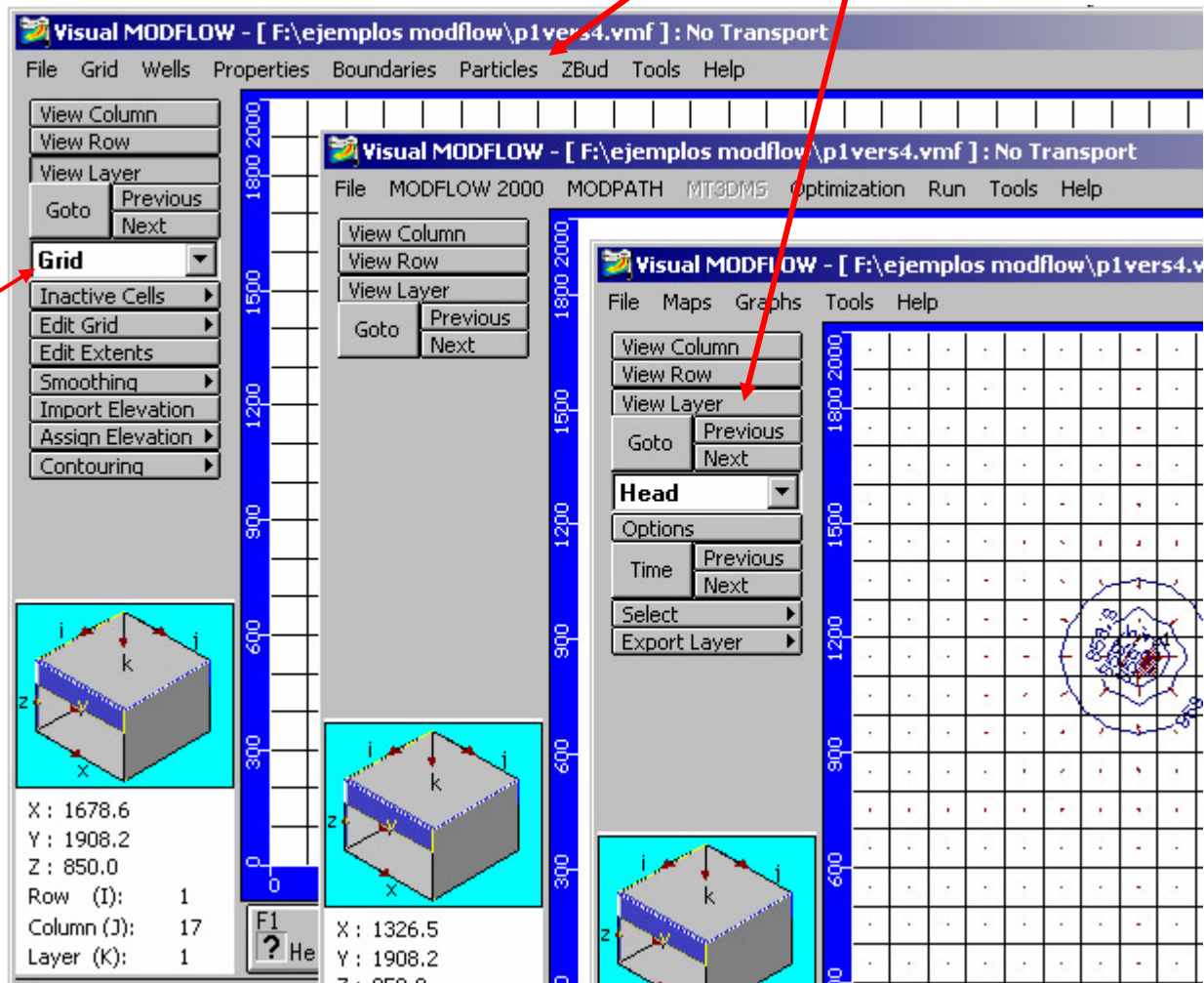
- Asign
- Asignamos límites a las zonas para balance
- Delete: Borrar, eliminar
- Copy: Copiar entre capas



**Botones abajo**

- Map
- Para importar un mapa de la zona
- Zoom in, Zoom out
- Acercar y volver a escala inicial
- Pan
- Para mover (cuando antes hemos hecho Zoom In)
- Vert exag
- (Exageración vertical)
- Para aumentar la escala vertical en corte
- Overlay
- Cuadro que controla que los niveles del dibujo sean visibles o no

Hemos denominado *secciones* a los tres escenarios principales entre los que se mueve el programa. Al pasar de uno a otro **cambia la barra de menús** superior. Efectivamente, en la figura siguiente podemos ver el diferente aspecto de los **menús** y **botones** en las *secciones* Input, Run y Output:



Dentro de cada uno de estas *secciones* nos moveremos entre diversas *áreas* de trabajo. Por ejemplo, en la sección Input podemos abrir el área Wells para introducir características de los pozos o el área Properties para indicar permeabilidades, porosidades, etc.

A su vez, dentro de cada *área* hay varias posibilidades: por ejemplo, dentro de Properties podemos elegir Conductivity (para datos de conductividad) o Storage (para datos de coeficiente de almacenamiento y porosidades).

Al cambiar de *área* de trabajo dentro la misma *sección* cambian solamente parte los botones de la izquierda (excepto los botones superiores View y Goto, que permanecen).

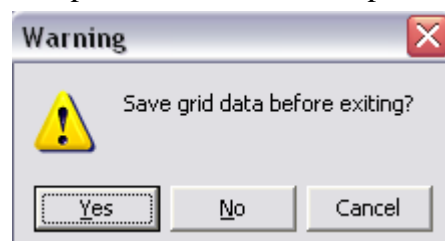
Para movernos dentro de la misma *sección* (por ejemplo, para pasar desde Wells>Pumping Wells a Properties>Storage), podemos hacerlo utilizando los menús de la barra superior y sus opciones respectivas o utilizando la ventana desplegable que aparece en el centro de los botones a la izquierda

En las tres *secciones* se mantiene la caja gris que se ve abajo a la izquierda. Nos indica la capa o fila o columna que estamos viendo. En el caso de las figuras de esta página nos indica que estamos viendo la capa superior (este ejemplo se compone de tres capas).

Debajo aparece: X, Y, Z... Row, Column, Layer. Esto nos indica la posición actual del cursor; si movemos el ratón, observamos que esos valores cambian adecuadamente.

**Visual Modflow**, al contrario que todos los demás programas, no dispone del precioso comando Deshacer (Undo, CONTROL-Z). Si hemos añadido un pozo, eliminado una capa o asignado unas permeabilidades, y deseamos deshacer lo realizado, no es posible por el procedimiento habitual, pero existe una solución simple: Al salir de una de las *áreas* de trabajo para pasar a otra, el programa siempre nos pregunta si queremos guardar el trabajo realizado:

Es suficiente decir No y se perderán todos los cambios realizados desde que entramos en ese *área* de trabajo.



## Pasos iniciales

Para crear un nuevo modelo, tras abrir el programa: File > New...

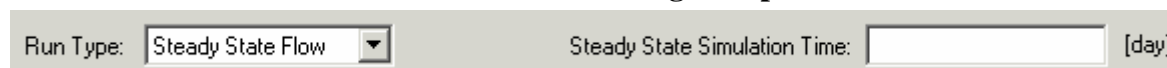
¡Atención! Crearlo dentro de una carpeta, pues si se crea, en "Mis Documentos" o en C:, aparecerán allí varias docenas de documentos que se generan en el momento de crear el modelo, difíciles de manejar.

Aparecen sucesivamente **tres cuadros** que conviene rellenar con atención: cambiar después algunos de los datos que se introducen allí puede ser difícil.

**Cuadro 1º.**- Nos ofrece **unidades** para todos los parámetros y variables. Por ejemplo, pueden cambiarse la conductividad hidráulica de m/seg a m/día y el caudal a litros/segundo, si esas son las unidades habituales de trabajo.

**Cuadro 2º.**- Asignamos aquí los **valores** más generalizados en el ámbito de nuestro modelo para los parámetros hidráulicos: conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, porosidades, ... Más adelante, asignaremos propiedades específicas a las partes del modelo que sean diferentes de esos valores generales.

En este mismo 2º cuadro hacemos la elección de **régimen permanente o variable**:



A la izquierda podemos cambiar Steady State (permanente) por Transient Flow (variable)

4

En el caso de elegir **permanente**, es necesario rellenar la casilla de la derecha (Steady State Simulation Time). El régimen permanente **no** depende del tiempo, y Modflow llegará a la misma solución final (los niveles alcanzados) independientemente del valor introducido ahí. No obstante, sí influirá en el volumen de agua que haya entrado por los límites del acuífero para alcanzar el equilibrio. Si no nos interesa este aspecto en Steady State Simulation Time escribimos: 1.

Lógicamente, para que el modelo pueda funcionar en régimen permanente (para que los niveles puedan estabilizarse) deben existir salidas y entradas de agua, por ejemplo: un pozo que bombea y un río del que se obtiene el agua. Si diseñamos un modelo solamente con pozos de bombeo, no funcionará en régimen permanente.

**Cuadro 3º.**- Se introducen las dimensiones físicas del modelo (por ej., 2000x3000 metros en planta, 30 metros en vertical, entre 810 y 840 metros de cota). No se puede especificar aquí el **tamaño de las celdas**; si le indicamos el tamaño total y el número de filas y columnas, el programa calcula el tamaño de celda.

Posteriormente se podrá cambiar la extensión del modelo (**Edit Extents**...) y, no tan sencillamente, la cota vertical de cada celda (vers. 3: **Edit Elevation**, vers. 4: **Assign Elevation**)

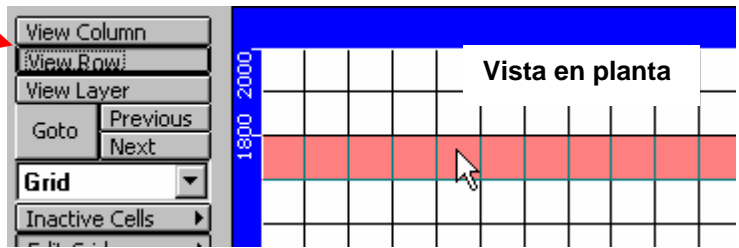
En este tercer cuadro puede importarse un mapa de la zona de estudio (arriba: Import a site map), aunque esto puede hacerse también desde la sección Input.

<sup>4</sup> En la versión 3 la elección permanente o variable no se ofrece aquí. En el momento de ejecutar el modelo aparecerá un pequeño cuadro con esta opción

## Planta o perfil

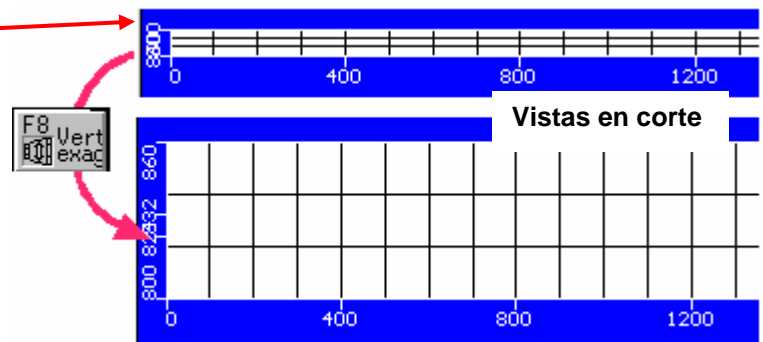
En cualquiera de las *secciones* o de sus respectivas *áreas* de trabajo, permanecen los botones de la parte de arriba:

Los tres primeros se utilizan para **ver el modelo en planta o en corte**: View Layer nos muestra cualquiera de las capas que forman el modelo, mientras que View Row o View Column nos permiten **ver el modelo en corte**, a lo largo de la fila o columna elegida.



Por ejemplo, si estamos viendo el modelo en planta, picamos el botón View Row y después sobre la cuadrícula del modelo en una de las filas (la de color salmón en la figura de arriba), aparecerá la vista en corte a lo largo de esa fila:

Como la escala horizontal y la vertical inicialmente son iguales, normalmente el corte se ve demasiado aplastado para apreciar nada. Picando abajo en el botón Vert exag, aumentamos la escala vertical (cambia el aspecto, no influye en el cálculo del modelo):



Goto Previous y Goto Next sirven para pasar de capa a capa (si estamos viendo en planta) o fila a fila si lo estamos viendo en corte a lo largo de las filas (y análogamente con las columnas).

## Introducción de un mapa de la zona

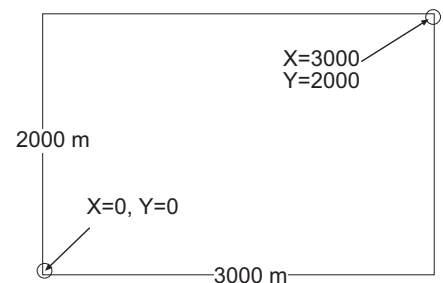
Para dibujar en Modflow los pozos, el río, los contactos geológicos, el depósito contaminante, etc. necesitamos ver en pantalla la situación real de estas cosas sobre el terreno. Lo más sencillo es calcar un croquis a partir de mapas reales topográficos o geológicos, escanear el croquis y guardarlo como BMP, JPG o TIF (formatos habituales de imágenes).

Para introducirlo en nuestro modelo, puede hacerse: a) en uno de los cuadros iniciales (donde se establecen el número de filas y columnas); b) ya dentro de la sección Input, picando en uno de los botones de abajo (F4 Map):



**Georeferencias:** Para que el mapa importado se coloque exactamente donde deseamos, debemos indicar a **Visual Modflow** las coordenadas de dos puntos. Es muy simple: picamos en el punto de coordenadas conocidas y aparece un cuadro en el que escribimos su X e Y, y lo mismo con el segundo punto.

Si, por ejemplo, estamos diseñando un modelo de 3000 x 2000 metros, y nuestro mapa rectangular efectivamente recoge esa misma zona, bastará con que piquemos en la esquina inferior izquierda y le asignemos las coordenadas X=0, Y=0, y después picamos en la esquina superior derecha y le asignamos X= 3000, Y=2000, como se indica en la figura adjunta:

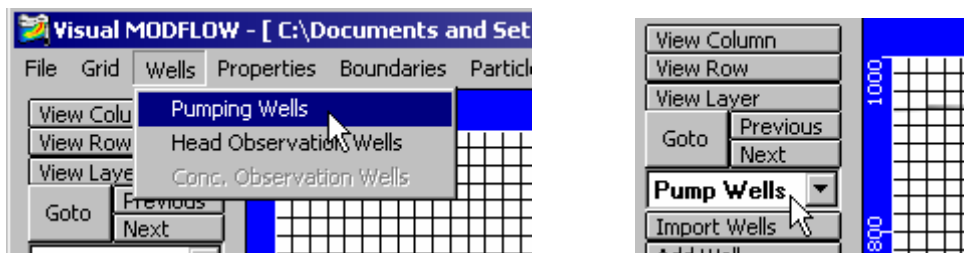


# Input

En esta *sección* se introducen y modifican todas las características del modelo: geometría (forma y capas del terreno, celdas para la modelización), propiedades hidráulicas, niveles iniciales del agua, captaciones (con sus características y caudales de bombeo), ríos, etc.

En el caso de un modelo nuevo, trabajamos aquí antes de ejecutarlo. Después de ver los resultados, volveremos a Input una y otra vez para modificar lo necesario hasta que el funcionamiento del modelo resulte aceptable.

Dentro de la *sección* Input, para pasar de un *área* de trabajo a otra, podemos utilizar los menús de la barra superior, o el menú desplegable que aparece a la izquierda de la pantalla. Por ejemplo, para introducir o modificar pozos de bombeo (pumping wells), en la primera figura hemos elegido dicha opción en el menú Wells, mientras que en la figura de la derecha hemos elegido **Pump Wells** en el menú desplegable:



## Input -> Grid (Cuadrícula)

### Edit Grid (Modificar la cuadrícula)

Aquí usaremos la vista en plano para añadir, eliminar o mover filas o columnas. Usaremos la vista en perfil para añadir, eliminar o mover contactos entre capas.

Si queremos añadir filas:

Aparece un cuadro que nos permite añadir filas (con un clic), moverlas o borrarlas. La opción Refine by 2 multiplica por 2 el número de filas en el intervalo que señalemos entre dos clics. Análogamente la opción Coarsen by 2 divide por 2 el número de filas en el intervalo indicado. (Por supuesto que el 2 se puede cambiar por otro número).

Si vemos el modelo en corte, podemos elegir Edit Layers (modificar las capas) y las mismas operaciones que indicábamos en el párrafo anterior podemos realizarlas aquí para los contactos entre capas.

Para que la transición del tamaño de una celda a la adyacente no sea tan brusco (por ejemplo, si hemos dividido una serie de filas a la mitad de su tamaño), podemos utilizar la opción (suavizado) que hace que el paso de celdas grandes a pequeñas se haga gradualmente (Si lo usamos demasiadas veces, acabarán siendo todas iguales!).

### Import Elevation (Importar superficies)

Mediante el botón podemos introducir la forma de la superficie del terreno o del contacto entre dos capas del modelo. Lo más cómodo es elaborar previamente un documento Excel con tres columnas: X, Y, Z. En las dos primeras columnas escribimos las coordenadas X, Y de situación del punto; en la 3ª columna la cota (topográfica o del contacto geológico). Con los puntos disponibles, **Visual Modflow** interpolará y generará una superficie continua para toda la extensión del modelo. (Ver **Anexo**, al final)

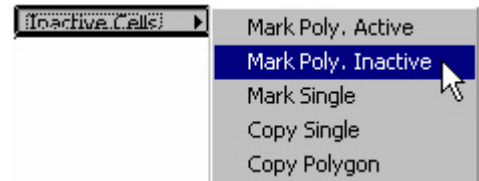
## Inactive Cells (celdas inactivas).

Sirve para marcar celdas que el modelo no va a considerar, no existen para el modelo.

Lo usual es utilizar la opción Mark Poly. Inactive (marcar polígono inactivo). Con sucesivos clics se recorre la periferia de la zona deseada, y al final se cierra con un clic del botón derecho

Mark Single (marcar una sola) señala celdas inactivas una a una.

Mark Poly. Active (marcar polígono activo) se utiliza para convertir de nuevo en activas celdas que habían sido establecidas como inactivas



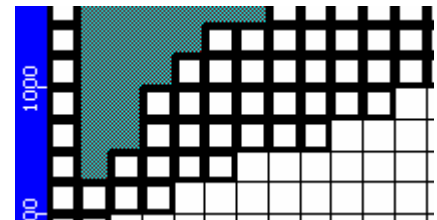
## Copiar las celdas inactivas en las otras capas

Si hay varias capas, y se han establecido celdas inactivas por ejemplo en la capa 1 (Layer 1), normalmente hay que clonar esas zonas inactivas a las otras capas; si un sistema acuífero se termina lateralmente, lo hará para todas las capas o estratos horizontales. Si la zona inactiva no es idéntica en todas las capas, posteriormente visitamos el resto de las capas y aumentamos o disminuimos la zona inactiva que acabamos de copiar y pegar.

Para copiar la zona inactiva desde una capa a las demás se usa la opción Copy Polygon: (aparece un cuadro): 1º marcamos un perímetro amplio que englobe la zona inactiva que deseamos copiar, después señalamos el resto de las capas, y OK.

NOTA: A veces, después de actuar sobre una zona de la cuadrícula, aparece remarcada, así :

No tiene ningún significado útil, si vamos a la capa siguiente, y volvemos a la que estábamos desaparecen esos cuadrados negros



## Input --> Wells (Pozos, sondeos)

Podemos utilizar dos tipos de pozos: de bombeo (Pumping wells) y de observación de niveles (Head observation levels), o sea: piezómetros.

### Add well, Edit Well (Añadir pozo, modificar pozo)



Menú Wells > Head observation well. Y en los botones de la izquierda: Add well para añadir un nuevo pozo, o Edit well para cambiar uno ya existente. En cualquier caso, aparece un cuadro con las características de la captación:

Es obligatorio asignarle un **nombre**, caudal y zona de rejilla

El caudal extraído hay que escribirlo **negativo**. Es muy simple asignar un **caudal variable**; en el esquema de la derecha se indica que se ha bombeado 5 días un caudal de 10 litros/seg, después estuvo 2 días parado, y finalmente se inyectó un caudal de 3,5 litros/seg durante los últimos 3 días

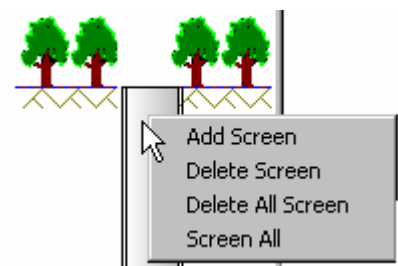
	Start (day)	End (day)	Rate (liter/s)
	0	5	-10
	5	7	0
▶	7	10	3.5

La zona o zonas de rejilla (o filtro) pueden indicarse escribiendo los metros exactos donde comienza y termina, o si la ubicación no ha de ser precisa, es más cómodo indicarlas con el ratón, así:

Picando en **Screened Intervals**  , el primer botón es para añadir rejilla, el segundo para quitarla.

Otro procedimiento es aplicar el botón derecho sobre el dibujo del pozo, y aparecen la opciones siguientes:

- Añadir rejilla (picar arriba y abajo del intervalo deseado)



- Eliminar rejilla
- Eliminar toda la rejilla
- Todo el pozo con rejilla

## Add Obs., Edit Obs. (Añadir o modificar pozo de observación)

Los pozos de observación son necesarios para calibrar el modelo. Para verificar que la geometría y los parámetros introducidos son correctos, que el funcionamiento del modelo refleja la realidad, debemos comparar la evolución de niveles calculada por Modflow y la evolución histórica de niveles que realmente sucedió en esa zona.

Su manejo es similar al de los pozos de bombeo: Menú Wells > Head observation well. Y en los botones de la izquierda: Add Obs. (para añadir un nuevo pozo de observación), Edit Obs. (para cambiar algo en uno ya existente).

Las diferencias respecto al pozo de bombeo son:

1ª. En lugar de rejilla aquí situamos una única ranura para medir el potencial hidráulico a esa profundidad exacta.

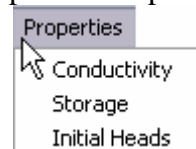
2ª. En lugar de especificar un caudal o caudales, aquí podemos indicar el nivel o niveles del piezómetro en los tiempos correspondientes (al menos un caudal es obligatorio en Pumping Well, aquí **no** es obligatorio indicar ningún nivel, si no introducimos ninguno, tomará el nivel inicial de la capa en la que está situado).

Además de la utilidad fundamental explicada en el primer párrafo, si no introducimos niveles reales históricos, un pozo de observación también es útil porque nos mostrará (tras la ejecución del modelo, en la Sección Output) un gráfico expresando cómo ha variado el nivel a lo largo del tiempo.

## Input --> Properties (Propiedades)

Los tres tipos de propiedades más importantes que se introducen aquí, aparecen al picar arriba en el menú Properties:

Conductividad, Almacenamiento y Niveles Iniciales



### Conductivity (Conductividad Hidráulica)

Comenzamos por la conductividad hidráulica. Asignamos los valores deseados a las capas o partes de alguna capa que tengan una conductividad diferente de los valores generales asignados en el cuadro que apareció en el momento de crear el modelo nuevo.

Vemos el modelo **en planta**, y nos situamos en la capa sobre la que necesitamos cambiar valores. Mediante el botón Assign podemos asignar valores de conductividad a una sola celda (Single), a un polígono que dibujaremos (Polygon), o a todo un rectángulo (Window).



Si queremos asignar un valor de conductividad a toda una capa del modelo, lo más cómodo es utilizar Assign > Window, y señalar un rectángulo que cubra todo el modelo. Si dibujamos un polígono, terminamos con un clic en el botón derecho.

Tanto si hemos señalado toda la extensión del modelo o si hemos marcado un polígono en una parte de él, aparece el siguiente cuadro:

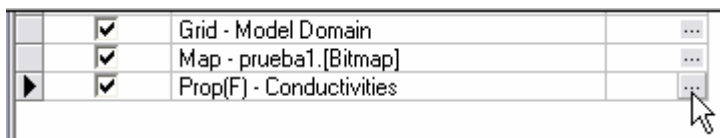
Si queremos asignar valores ya definidos para

Name	Value	Units	Description
Kx	8.64	[m/d]	Hydraulic conductivity in X-direction
Ky	8.64	[m/d]	Hydraulic conductivity in Y-direction
Kz	0.864	[m/d]	Hydraulic conductivity in Z-direction



otras partes del modelo, los buscamos en **Zone # 1**, si se trata de establecer nuevos valores, se pica en **New** y se escriben los valores de K en la columna Value. (Observamos que se pueden considerar valores distintos según x, y, z).

Si hemos importado un mapa, en el *área* Properties, no lo vemos, y es necesario verlo si queremos dibujar una zona de conductividad siguiendo un contacto geológico. Esto sucede porque si estamos introduciendo Conductividades, esa capa tiene colores opacos (blanco, azul, verde,... para las diversas propiedades asignadas). Si queremos poder observar el mapa de la zona, picamos abajo en el botón **F9 Overlay**, y allí aparecen todos los niveles del modelo; en el *Overlay* de Conductivity (o Storage, el que estemos usando) picamos a la derecha, sobre los tres puntos:



y en el cuadrado que aparece elegimos **Outline** (contornos) en vez de **Solid colors** (colores opacos).

## Storage (Almacenamiento)

En el menú **Properties >> Storage**, podemos introducir valores de coeficiente de almacenamiento y porosidades total y eficaz.

$S_s$  = *Specific Storage*. No es el conocido coeficiente de almacenamiento (en inglés, *Storativity*, **S**). El *Specific Storage* es igual al coeficiente de almacenamiento dividido por el espesor del acuífero:

$S_s = S / \text{espesor}$ . Como el coeficiente de almacenamiento es adimensional, las dimensiones de  $S_s$  resultan: 1/m.

$S_y$  = *Specific yield*, **Eff. Por.** = *Effective Porosity*. Se trata de conceptos equivalentes, pero no necesariamente de igual valor; habitualmente nos referimos a ambos en español como “porosidad eficaz”. *Specific yield* se refiere al **volumen** de agua obtenido por gravedad de un volumen de acuífero. *Effective Porosity* se refiere a la parte de una **sección** por la que puede circular el agua.

**Tot. Por.** se refiere, obviamente a la Porosidad Total.

En este *área* de trabajo, donde introducimos el almacenamiento, también podemos utilizar el botón **Assign** asignar propiedades a polígonos o rectángulos, pero lo normal es que las distintas zonas que hemos definido en el *área* de Conductividades correspondan a las diferentes unidades hidrogeológicas, y por tanto esas delimitaciones nos interesen también para asignar diferentes valores de almacenamiento.

Mediante el botón **Copy** trasparamos las delimitaciones geométricas que hicimos en conductividades a los almacenamientos. Después es suficiente picar en **Database** y aparecen todas las zonas delimitadas a las que podemos asignar valores de almacenamiento en caso de que difieran de los valores generales que aparecen en el cuadro:

Zone	$S_s$ [1/m]	$S_y$ []	Eff. Por. []	Tot. Por. []	Active	Distribution Array
1	1E-5	0.2	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	1E-5	0.2	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	1E-5	0.2	0.15	0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Initial Heads (Niveles Iniciales)

Nos permite asignar la superficie freática o piezométrica inicial. Seleccionando menú **Properties >> Initial Heads**, aparecen a la izquierda los botones necesarios:

**Assign > Single, Polygon, Window**. Lo más sencillo es la opción **Window**, con ella señalar toda

Name	Value	Units	Description
Initial Heads	640	[m]	Initial head

la extensión del modelo, y asignarle un valor. Igual que cuando asignábamos permeabilidades, vamos añadiendo diversas “zonas”, en el cuadro que aparece picamos en **New**, y en la nueva “zona” le indicamos su nivel (en la figura adjunta hemos asignado un nivel homogéneo de 640 metros a la capa seleccionada)

**Import.** Para importar una superficie elaborada previamente con la forma de la superficie freática o piezométrica. Es similar a los que hemos indicado para importar una superficie topográfica o para los contactos entre las capas (**Ver Anexo**).

**Copy.** Sirve para copiar los niveles de una capa a las otras.

Tanto si hemos asignado unos niveles homogéneos (superficie inicial plana), como si hemos importado una superficie cualquiera, eso corresponde solamente a la capa (**Layer**) en que estuviéramos situados. Si cada capa tuviera unos niveles iniciales diferentes, habría que repetir la operación (**Assign** o **Import**) en las otras capas. En cambio, si las diversas capas tienen los mismos niveles iniciales, es más rápido copiar los niveles desde la capa en que los hemos establecido hacia las demás.

## Input --> Boundaries (Límites o Bordes)

Con este nombre **Visual Modflow** se refiere a cualquier relación del modelo con el resto del mundo (excepto los pozos, que se tratan aparte). Los *boundaries* pueden estar situados:

- En la **periferia** del modelo: Si no especificamos lo contrario, los límites exteriores de nuestro modelo se comportarán como si el sistema acuífero estuviera encerrado en un enorme cajón de plástico, y eso no suele coincidir con la realidad .
- En el **interior** del modelo, algunas celdas representan algo ajeno al sistema acuífero como ríos, drenes horizontales, paredes impermeables,...
- En la **parte superior** del modelo: infiltración y evapotranspiración.

### Constant Head (Nivel constante)

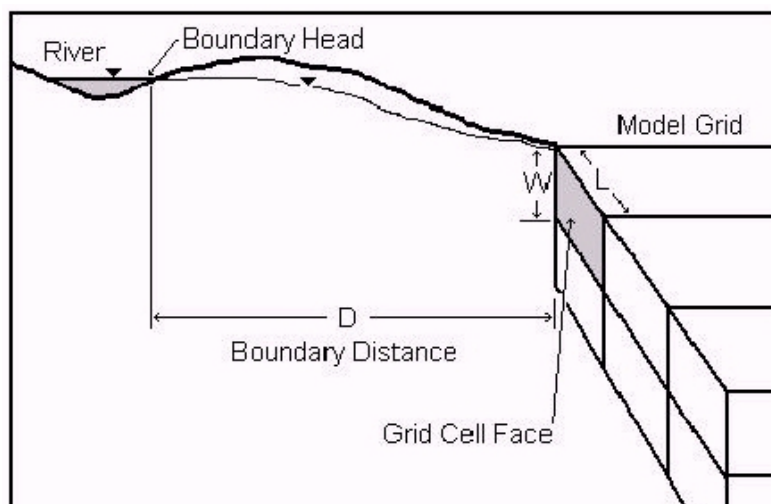
El nivel de la celda (normalmente una hilera de celdas) no variará suceda lo que suceda a su lado; funcionan como una fuente infinita de agua.

Esto simulará un río o lago cuyo nivel no variará aunque el acuífero saque de él (o le aporte) enormes cantidades de agua.

### General Head (Nivel general)

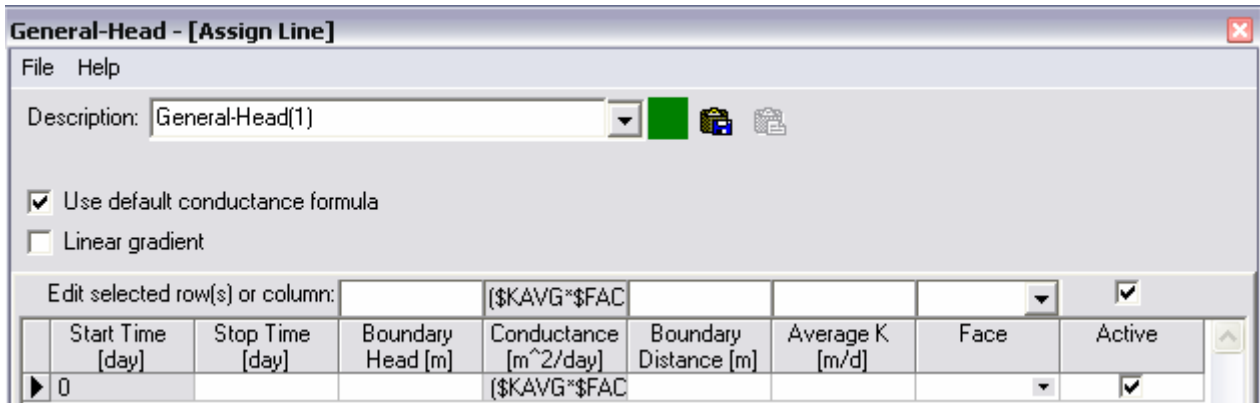
Normalmente se asigna a los límites exteriores del modelo para no tener que diseñarlo demasiado grande (para no incorporar al modelo toda la región en la que se encuentra la zona de interés). Si el área modelizada tiene 2000x3000 metros y no está encajada entre paredes impermeables, cuando los niveles oscilen dentro de ese área, se producirá un flujo de entrada o salida (de intercambio entre nuestro modelo de 2000x3000 metros y el resto de la región).

Para simular eso se supone un esquema como el del dibujo de la derecha (copiado del Help del programa), **Visual Modflow** supone que a una cierta distancia (**D**) existe una masa de agua (río o lago) con un cierto nivel constante (**Boundary Head**). Según el dibujo, habría un flujo desde el río (**River**) hasta las



primeras celdas del modelo, pero si los niveles en el modelo subieran por encima del nivel del río, el flujo sería al revés.

La idea es sencilla, pero lo que no parece sencillo es introducir los datos correctos en el modelo. Cuando introducimos una línea de General Head (botón Assign >> Line) aparece el cuadro siguiente:



Además de asignar los posibles valores de

Boundary Head = Nivel del supuesto río exterior al modelo

Boundary Distance (D) = Distancia desde dicho río hasta nuestro modelo

Average K = Conductividad Hidráulica media de los materiales entre el supuesto río y nuestro modelo.

Face = East/West, North/South, Top/Bottom: Según vemos la cuadrícula del modelo en la pantalla, East/West sería flujo de izquierda a derecha, North/South de arriba a abajo y Top/Bottom perpendicular a las capas.

Si está marcado en  Use default conductance formula, con los valores de D, K y la superficie lateral de las celdas a través de las que se producirá el posible flujo, Modflow calcula el parámetro Conductance (Si no está marcado, podemos introducir el valor deseado de Conductance). Cuando queramos cambiar esto (botón Edit) ya no aparecen esos tres parámetros, sino solamente la Conductance calculada por Modflow. Otra posibilidad es borrarlo (botón Erase) y hacerlo de nuevo.

Normalmente, se asignan unos valores posibles, y posteriormente se ajustan en el proceso de calibración del modelo.

Lógicamente, el *boundary* General Head puede utilizarse también para representar una masa de agua que exista realmente y que esté a una distancia conocida del modelo, que le cede o toma agua de ella, pero en ese caso los parámetros distancia, nivel del lago o río y permeabilidad de la zona intermedia serían más fáciles de asignar.

## River (Río)

Se dibuja una línea, y la hilera de celdas implicadas se comportan como un río que pierde o gana agua dependiendo del nivel del agua y de la permeabilidad del fondo del cauce. Modflow supone que **el flujo es solamente a través del fondo del cauce** y debemos indicarle la anchura del mismo (River Width) y (lo más problemático) el espesor (River Thickness) y conductividad hidráulica (Riverbed Kz) de los materiales que cubren el fondo.

Start Time [day]	Stop Time [day]	River Stage [m]	Riverbed Bottom [m]	Conductance [m <sup>2</sup> /day]	Riverbed Thickness [m]	Riverbed Kz [m/d]	River Width [m]
0				(\$RCHLNG*\$F			

## Stream (Corriente)

Utilizado para simular las relaciones de las aguas subterráneas con las corrientes de agua superficiales, funcionamiento similar al río. Complicado.

Start Time [day]	Stop Time [day]	Stage [m]	Streambed Top [m]	Streambed Bottom [m]	Width [m]	Segment In-flow [m <sup>3</sup> /day]	Streambed Conductance [m <sup>2</sup> /day]	Streambed Kz [m/d]
0							(\$RCHLNG*\$)	

## Drain (Dren)

Simula el comportamiento de un dren, que normalmente extrae agua del terreno, funcionando como una línea de nivel constante.

## Wall (Pared, muro o barrera)

Se utiliza para simular una pared vertical delgada y de baja permeabilidad, como las que pueden construirse para impedir el flujo horizontal del agua en casos de contaminación.

## Recharge, Evapotranspiration (Recarga, Evapotranspiración)

Estos dos límites del modelo actúan sobre la capa superior<sup>5</sup>, aportándole agua (Recarga) o quitándosela (Evapotranspiración). En ambos hay que especificar el intervalo de tiempo y la intensidad de la recarga o Evapotranspiración en mm/año o en las unidades elegidas al crear el modelo:

Start Time [day]	Stop Time [day]	Recharge [mm/yr]
0	730	120

Recarga:

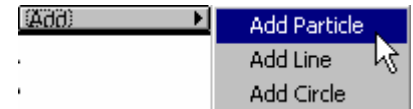
Start Time [day]	Stop Time [day]	Evapotranspiration [mm/yr]	Extinction Depth [m]
0	365	120	1.3

Evapotranspiración:

En el segundo caso, Extinction Depth se refiere a la profundidad hasta la que actúa la Evapotranspiración.

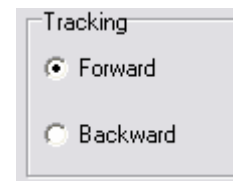
## Input > Particles

Los datos que introducimos aquí son necesarios para el funcionamiento de MODPATH. Ya indicamos en la Introducción que éste era un programa distinto de MODFLOW, desarrollado como complemento de éste para trazar las trayectorias descritas por las partículas del fluido que indiquemos previamente.



Para marcar algunos puntos del modelo como partículas cuya trayectoria nos interesa calcular, en los botones que aparecen a la izquierda elegimos Add > Add Particle (o Add Line o Add Circle). Aparece el cuadro siguiente:

Forward es para dibujar la trayectoria **comenzando** en el punto o puntos marcados como partículas. Backward es para marcar la trayectoria **que llega** al punto indicado. Aunque las partículas se hayan creado con una de los dos opciones, se pueden cambiar posteriormente mediante el botón **Tracking** de la izquierda. (Ver la figura correspondiente, unas páginas más adelante, en la sección Output > Pathlines)



Ahora picamos en los lugares deseados para marcar determinadas partículas de agua cuya trayectoria nos dibujará el programa. Si hemos elegido Add Particle marcamos una por una, si hemos elegido Add Line o Add Circle, dibujamos una línea o un círculo, y en el cuadro que aparece escribimos cuántas partículas deseamos que distribuya a lo largo de la línea que acabamos de trazar.

<sup>5</sup> La recarga puede asignarse a cualquier otra capa (esto se hará en la sección Run).

## Input > Zone Budget

Los datos que introducimos aquí son necesarios para el funcionamiento de ZONE BUDGET (balance de zonas).

Ya indicamos en la Introducción que éste era un programa distinto de MODFLOW, desarrollado como complemento de éste para calcular los balances entre las zonas que hayamos indicado, es decir los volúmenes de agua que pasan de unas zonas a otras.

Al picar sobre el menú Zbud, aparecen a la izquierda los botones pertinentes, que nos permiten definir las zonas entre las que deseamos establecer balances. Dichas zonas se definen del mismo modo que las propiedades (Conductividad,...), como ya hemos visto: Asignar ventana o asignar polígono. También existe la función Copy, que también hemos descrito, para copiar las zonas trazadas en una capa a otras capas.

## Run

Tras introducir todos los datos necesarios en Input, entramos en la sección Run para ejecutar el modelo.

En la versión 3, en este momento aparece un pequeño cuadro que nos pregunta si deseamos ejecutar el modelo en **régimen permanente o variable**.

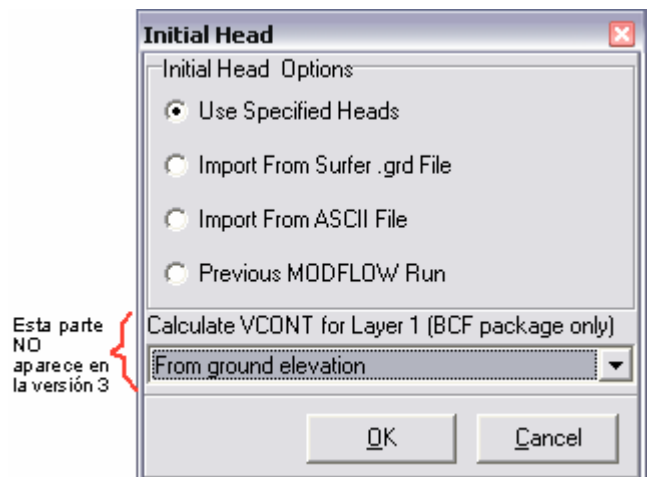
En la versión 4, este cuadro no aparece, pues en los cuadros iniciales ya habíamos especificado eso. No obstante, si queremos cambiar (algunos modelos pueden ejecutarse como permanente y como variable), en la versión 4: en el Main Menu, antes de entrar en la *sección* Run, picamos en Setup >Edit Engines y aparece un cuadro en el que podemos cambiar entre régimen permanente (steady) y variable (transient).

## Modflow2000

Picando en la opción MODFLOW2000 del menú superior, aparecen diversas opciones o ajustes previos a la ejecución del modelo<sup>6</sup>, entre las que destacamos las siguientes:

### Initial Heads (Niveles iniciales)

En la *Sección* Input ya indicamos los niveles iniciales. Aquí podemos mantenerlos, con la primera opción  Use Specified Heads (usar niveles especificados), importar una superficie (elaborada con *Surfer*) o utilizar como niveles iniciales los resultados de una ejecución anterior de Modflow.



### Layers (capas)

Aquí podemos indicar al programa si las diversas capas deben comportarse como acuíferos libres o confinados:

<sup>6</sup> Siguiendo la lógica del programa, parece que alguno de estos datos deberían introducirse en la sección Input

Layer Settings					
To assign multiple layers select appropriate rows by <Ctrl>- or <Shift> click on row indicator bar					
Layer	LAYCON		Interblock transmissivity		Layer type
1	01		00:Harmonic mean		1:Unconfined
2	02		00:Harmonic mean		2:Confined/Unconfined, variable S, constant T
3	03		00:Harmonic mean		3:Confined/Unconfined, variable S, T

**Visual Modflow** distingue cuatro tipos de capas:

**Tipo 0. Confinado.** Los valores de transmisividad y almacenamiento permanecen constantes durante la simulación

**Tipo 1. Libre.** Sólo elegible para la capa superior. El almacenamiento es constante, pero la Transmisividad varía al descender los niveles (lógicamente, ya que la T es el producto de la conductividad hidráulica por el espesor saturado del acuífero)

**Tipo 2. Confinado/Libre.** El almacenamiento adopta valores de acuífero confinado o libre, según evolucionen los niveles. En cambio, la Transmisividad permanece constante

**Tipo 3. Confinado/Libre.** (Las capas tienen este tipo si no lo cambiamos). Varía el almacenamiento como en el Tipo 2 y varía la Transmisividad como en el Tipo 1.

## Run

Dentro de la sección Run, picamos en la opción Run del menú superior; aparece un cuadro, y en él marcamos MODFLOW2000; además, si hemos introducido partículas, marcamos MODPATH; y si hemos señalado zonas para balance debemos marcar también ZoneBudget.

En cualquier caso, finalmente picamos el botón **Translate & Run** para ejecutar el programa.

Engines to Run		
Engine	Run	
MODFLOW 2000	<input checked="" type="checkbox"/>	
MODPATH	<input checked="" type="checkbox"/>	
ZoneBudget	<input checked="" type="checkbox"/>	
MT3DMS	<input type="checkbox"/>	

## Output

Es la sección final donde observamos los resultados de la ejecución del modelo. Como anteriormente, podemos observar el modelo en planta (en cualquiera de las capas) usando el botón View Layer, o en corte, utilizando los botones View Row o View Column.

Aquí es especialmente útil la herramienta Zoom In (Botones de la parte baja de la pantalla) para observar zonas concretas del modelo.

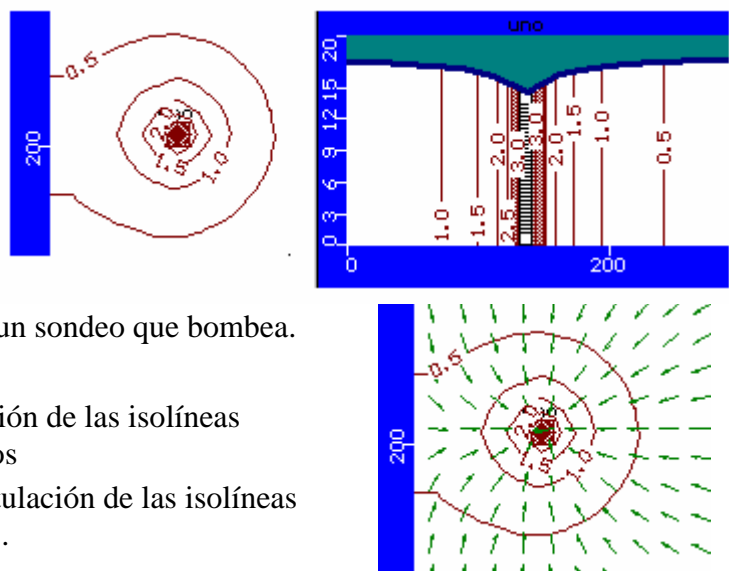
## Maps

### Contouring (Mapas o cortes con isolíneas)

Las líneas isopiezométricas o equipotenciales pueden verse en planta o en corte. En las dos figuras adjuntas se aprecian las isolíneas que representan los descensos alrededor de un sondeo que bombea. Puede elegirse :

Map > Contouring > Heads: la rotulación de las isolíneas representa los potenciales hidráulicos

Map > Contouring > Drawdown: la rotulación de las isolíneas representa los descensos producidos.



## Velocities (velocidades)

Aparecen vectores velocidad. Inicialmente su longitud es proporcional a la velocidad, por lo que la mayor parte de las flechas dibujadas no son más que puntos. Picando en el botón  hacemos que aparezcan todos los vectores velocidad de la misma longitud, indicando solamente la dirección del flujo.

## Pathlines (trayectorias)

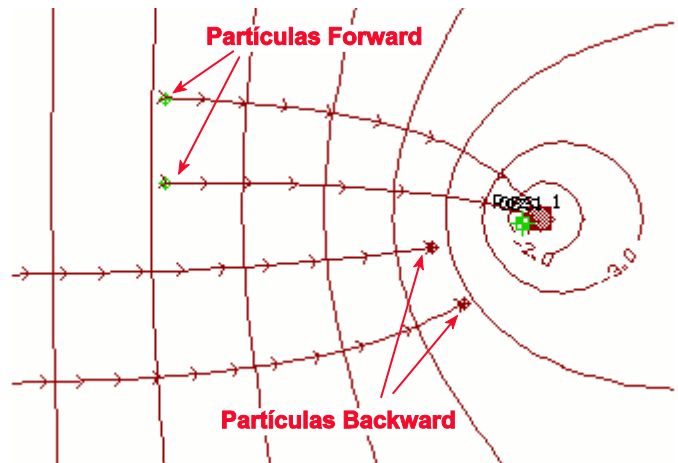
Solamente recogeremos estos resultados si en la sección Input habíamos incluido partículas (partícules), y posteriormente en la sección Run habíamos ejecutado el módulo Modpath.

En el menú Maps elegimos la opción Pathlines. Aparecen las trayectorias de las partículas que habíamos marcado. Si habíamos elegido Tracking Forward, aparece dibujada la trayectoria **desde** la partícula, si elegimos Tracking Backward aparecerá la trayectoria **hasta** la partícula.

En la figura adjunta se muestran ejemplos de ambas en el flujo hacia un pozo:

Si el modelo es de corta duración (unos días) es posible que las trayectorias dibujadas aparezcan como un punto, debido a que si las partículas se han desplazado unos pocos metros, eso puede que no se aprecie cuando en pantalla estamos viendo todo el modelo. A veces, utilizando el botón ZoomIn y proporcionando mucho aumento al dibujo, se llega a apreciar el recorrido efectuado por la partícula aunque sea relativamente pequeño.

En el botón Options, a la izquierda, aparecen opciones interesantes para el trazado de estas trayectorias. Por ejemplo, los picos de flecha que aparecen en las trayectorias, el programa los dibuja en tramos recorridos cada 500 días; esa cifra se puede cambiar en el cuadro de opciones citado.



## Zone Budget (balance de zonas)

Solamente recogeremos estos resultados si en la sección Input habíamos definido zonas, y posteriormente en la sección Run habíamos ejecutado el módulo ZoneBudget.

Menú Maps > Zone Budget, botón Zbud Budget. Aparece este cuadro con todos los datos de entradas y salidas.

Arriba, elegir la zona y el tiempo para los que se quiere ver el balance.

Zone Budget Output	
Stress Period: 4	Zone #: Zone 2
Time Step: 5	<input type="button" value="First Time"/>
Time (days): 500.66962	<input type="checkbox"/> Zone # linked to the pointer <input type="button" value="Last Time"/>
<b>Inflow</b>	<b>Outflow</b>
Storage = 0.00 m <sup>3</sup> /day	Storage = 0.02 m <sup>3</sup> /day
Constant Head = 0.00 m <sup>3</sup> /day	Constant Head = 0.00 m <sup>3</sup> /day
Wells = 0.00 m <sup>3</sup> /day	Wells = 0.00 m <sup>3</sup> /day
Drains = 0.00 m <sup>3</sup> /day	Drains = 0.00 m <sup>3</sup> /day
Recharge = 0.00 m <sup>3</sup> /day	Recharge = 0.00 m <sup>3</sup> /day
ET = 0.00 m <sup>3</sup> /day	ET = 0.00 m <sup>3</sup> /day
River Leakage = 0.00 m <sup>3</sup> /day	River Leakage = 0.00 m <sup>3</sup> /day
Stream Leakage = 0.00 m <sup>3</sup> /day	Stream Leakage = 0.00 m <sup>3</sup> /day
General-Head = 0.00 m <sup>3</sup> /day	General-Head = 0.00 m <sup>3</sup> /day
Zone 1 to 2 = 0.00 m <sup>3</sup> /day	Zone 2 to 1 = 12.91 m <sup>3</sup> /day
Zone 3 to 2 = 188.65 m <sup>3</sup> /day	Zone 2 to 3 = 0.07 m <sup>3</sup> /day
Zone 4 to 2 = 0.00 m <sup>3</sup> /day	Zone 2 to 4 = 175.65 m <sup>3</sup> /day
Total IN = 188.65 m <sup>3</sup> /day	Total OUT = 188.65 m <sup>3</sup> /day
<b>Difference</b>	
IN - OUT = 0.0038608 m <sup>3</sup> /day	
Percent Discrepancy = 0%	

*Quitar esa marca para poder elegir Zona*

*Entradas y Salidas para la Zona y el tiempo indicados arriba*

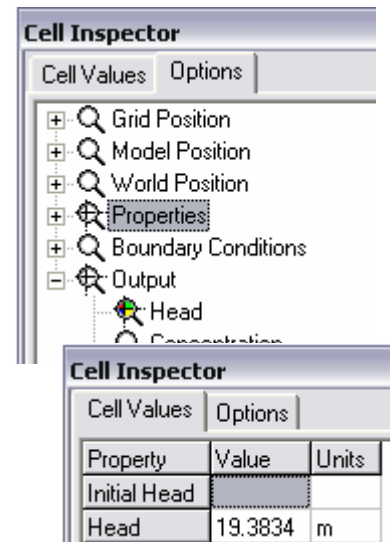
## Tools

### Cell Inspector

Esta sencilla herramienta nos permite comprobar cualquier característica del modelo al pasar el cursor sobre las celdas: permeabilidades, niveles, descensos, etc.

En la pestaña de la derecha **Options** elegimos lo que queremos inspeccionar: por ejemplo, a la derecha hemos seleccionado Head (nivel).

Si hemos elegido Head, al volver a la pestaña **Cell Values** nos muestra el valor del nivel en la celda donde esté situado el cursor.

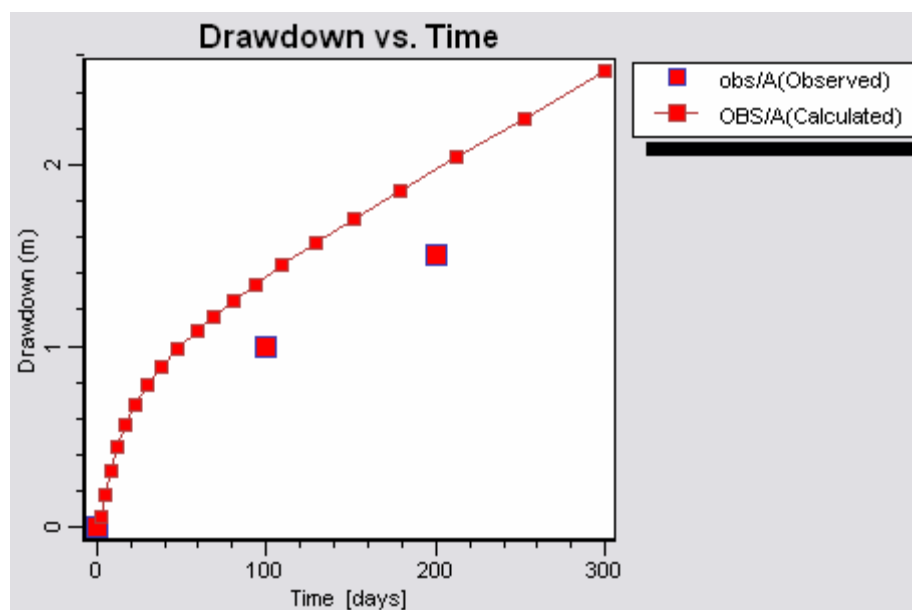


## Graphs

### Time Series

Si hemos introducido en el modelo un pozo de observación, podemos obtener el gráfico de la evolución con el tiempo del descenso (Drawdown) o del nivel (Head).

En el ejemplo del dibujo, en el pozo de observación habíamos introducido tres niveles medidos en la realidad, que aparecen en el gráfico como cuadros más grandes. Si el modelo ha calculado descensos superiores, quizá hayamos especificado una permeabilidad inferior a la real.





## Anexo 1. ¿Qué intervalos de tiempo considera Visual Modflow?

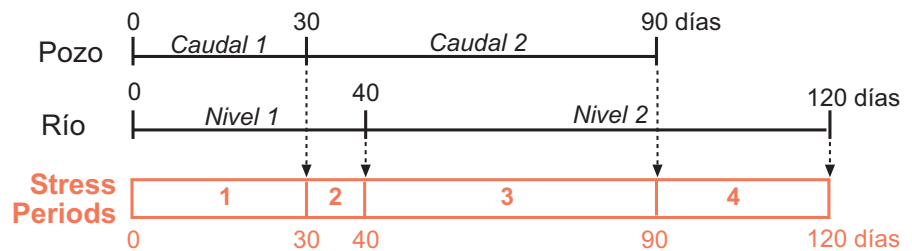
Modflow resuelve, para un incremento de tiempo, un enorme sistema de ecuaciones lineales, tomando como datos de partida los **niveles iniciales** del agua en cada celda, y siendo los resultados los **niveles finales** del agua en cada celda. Esos niveles finales los considera como niveles iniciales para el siguiente incremento de tiempo.

Los sucesivos incrementos de tiempo que adopta Modflow para efectuar su trabajo se denominan *Steps* (pasos). Veamos cómo los elige y cómo nosotros podemos influir en ello.

Si ejecutamos el modelo en régimen variable (*Transient Flow*), Modflow tiene en cuenta los tiempos que hayamos especificado en los diversos elementos (pozos, ríos, etc.).

Supongamos que en un modelo hemos introducido un pozo (*pumping well*) y un río (*Boundary > River*), y

que los tiempos especificados para uno y otro son los indicados en el esquema adjunto (en el pozo por cambio del caudal, en el río por variación del nivel). En este ejemplo, Modflow



distinguiría cuatro intervalos de tiempo en los que **ambas variables** (caudal del pozo y nivel del río) **permanecen constantes**. Estos intervalos se denominan *Stress Periods*.

Si el modelo incluye varios pozos, infiltración, evapotranspiración, ríos, drenes, etc., y los tiempos de cada uno de esos elementos no coinciden, el número de *Stress Periods* será muy grande.

Dentro de cada *Stress Period*, Modflow divide el tiempo en 10 pasos (*Time Steps*) Estos 10 pasos **no** son iguales, sino que cada uno de ellos es un 20% mayor que el anterior. ¿Para qué?: Por ejemplo, los efectos de un bombeo sobre los niveles en los primeros momentos son muy rápidos, después van ralentizándose, por eso conviene considerar al principio incrementos de tiempo menores y después progresivamente mayores.

Estos dos ajustes (10 pasos en cada *Stress Period* y un 20 % de aumento en cada paso) pueden cambiarse antes de ejecutar el modelo: Menu MODFLOW 2000 > Time Steps:

Period #	Start [day]	Stop [day]	Time steps	Multiplier	Steady state
1	0	1000	10	1.2	<input type="checkbox"/>

En la *Sección Output* y en régimen variable (*Transient Flow*), **Visual Modflow** nos muestra los resultados (por ejemplo, el mapa de descensos) para el primer *Step* del primer *Stress Period*.

Para visualizar los resultados de *steps* posteriores, picamos los botones Next / Previous. Si deseamos ir directo a un tiempo concreto, picamos en Time y aparece el cuadro que se muestra a la derecha :

Time	Previous
	Next

## Anexo 2. Trabajar con superficies no planas<sup>7</sup>

En modelos sencillos, la **superficie topográfica**, los **contactos geológicos entre capas** y las **superficies freática o piezométrica** se pueden considerar planos horizontales.

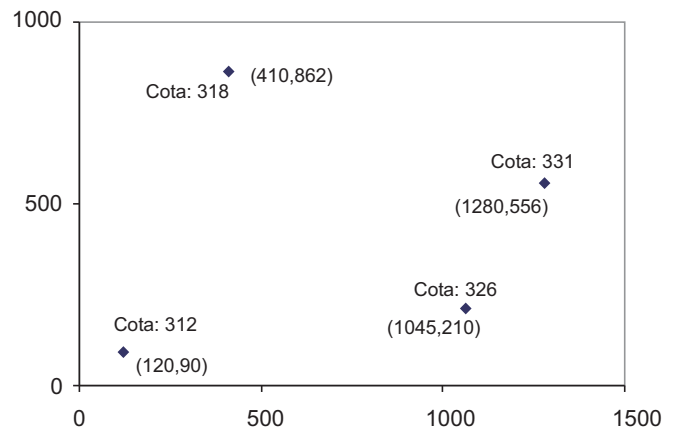
En muchos casos, esa simplificación no es suficiente: precisamos introducir una superficie irregular que represente la forma de un contacto entre capas, la superficie freática, etc.

En el caso de la topografía podremos disponer de tantos datos como queramos, bastará con tomar la cota de una serie de puntos del área modelizada. Pero si se trata de un contacto geológico, quizá en un área de varios km<sup>2</sup> dispongamos solamente de tres sondeos que han cortado ese contacto geológico. De este modo tendríamos de tres puntos, con sus coordenadas X,Y (obtenidas de la situación en el plano) y la Z (cota del contacto geológico, obtenida de los datos de la perforación). Análogamente, para establecer la superficie freática o piezométrica de un acuífero, dispondremos, en el mejor de los casos de unos pocos puntos en los que hemos medido la cota del agua dentro de perforaciones.

Supongamos que hemos elaborado un modelo de 1500x1000 metros, y con dos capas entre 300 y 350 metros de cota; disponemos de la cota del contacto entre las dos capas en cuatro puntos:

Medimos sus coordenadas (X,Y) en las coordenadas del modelo. Creamos un archivo Excel con tres columnas:

	A	B	C
1	120	90	312
2	410	862	318
3	1280	556	331
4	1045	210	326



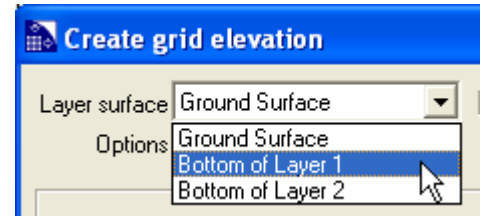
En cada línea, se define un punto: coordenadas X, Y, Z respectivamente en la 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup> columnas.

Guardamos el documento Excel.

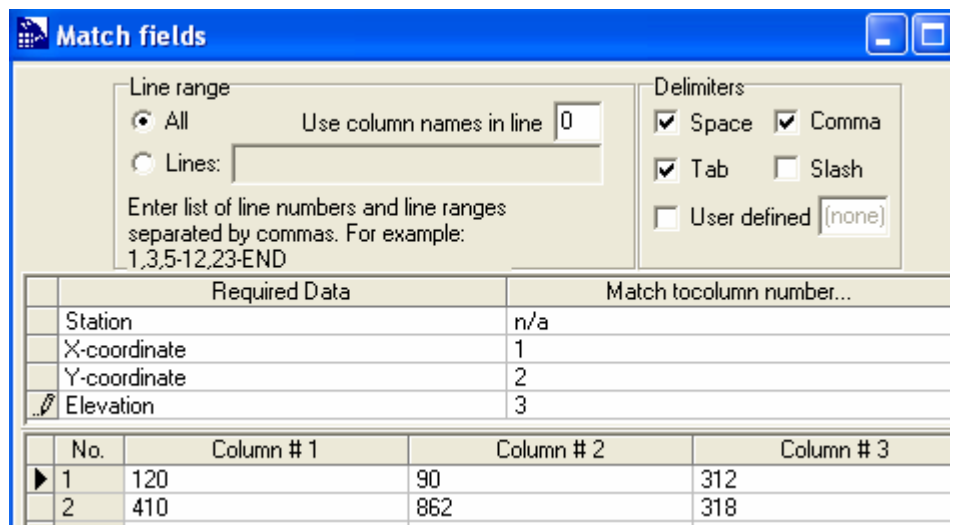
En Input > Properties, picamos el botón

En el cuadro que aparece elegimos Bottom of Layer 1 (base de la 1<sup>a</sup> capa):

Debajo, en Options, elegimos Import data, y debajo, en Data source, picamos en la carpeta amarilla:



Aparece el siguiente cuadro, en el que hemos tenido que escribir 1, 2, 3 para indicar a Modflow que la coordenada X se encuentra en la columna 1, la Y en la 2 y la Z en la columna 3. Picamos en Next, luego en Finish .

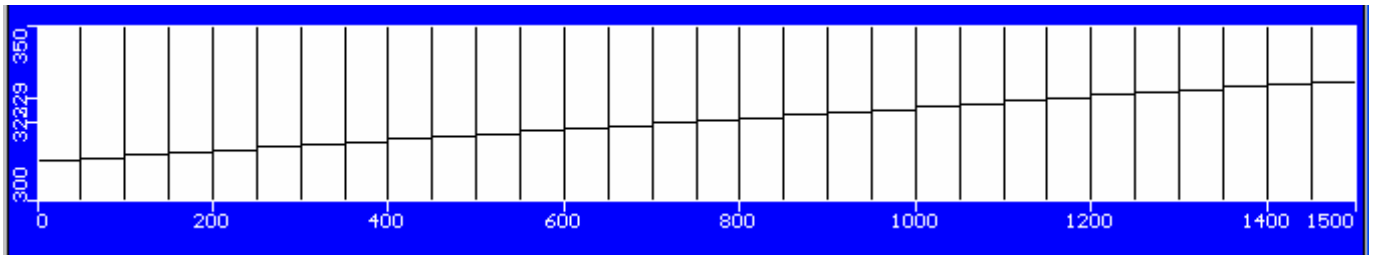


<sup>7</sup> Lo descrito en este Anexo **no** existe en la versión 3 de **Visual Modflow**. Es esa versión para importar superficies hay que elaborarlas en SURFER (otro programa) e importarlas desde **Visual Modflow**. Es muy sencillo.

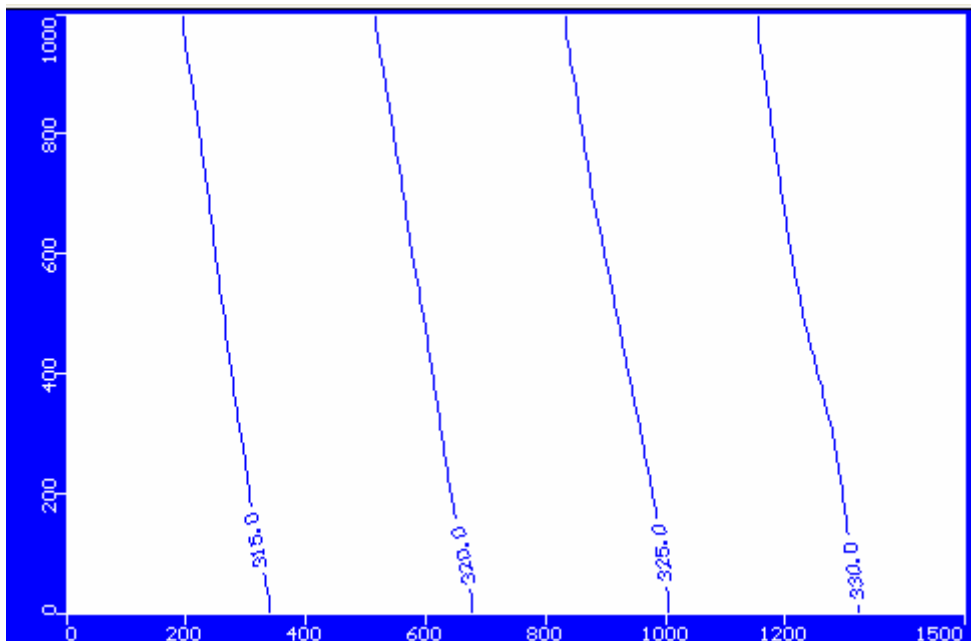
Finalmente, otro cuadro; elegimos coordenadas del modelo y le informamos que están en metros, OK, OK:

Co-ordinate system	Plane units	Elevation units
<input type="radio"/> World	<input type="radio"/> Meters	<input checked="" type="radio"/> Meters
<input checked="" type="radio"/> Model	<input type="radio"/> Feet	<input type="radio"/> Feet
<input type="radio"/> Geographic	<input type="radio"/> UTM	
<input type="radio"/> User defined		

A partir de esos 4 puntos, **Visual Modflow** interpolará una superficie continua en toda la extensión del modelo. Observando el modelo a lo largo de una fila, podemos comprobar que efectivamente ha importado la superficie:



Aquí vemos la superficie completa<sup>8</sup>:



Para introducir una **superficie freática**, el proceso es muy similar.

En Properties > Inicial head, elegimos el botón Import. En el siguiente cuadro, picamos Browse... y elegimos el archivo Excel que hayamos preparado. Después de indicarle (escribiendo 1, 2, 3) en qué columnas están las X, Y, Z, en el último cuadro (Interpolation Options), picamos en Interpolate... y finalmente Next y Finish.

<sup>8</sup> La geometría de los contactos normalmente no se muestra. Para observar esto, hay que picar abajo en el botón Overlay, y seleccionar C(l) Bottom Elev.; también hemos quitado la marca de Grid - Gridlines para que no aparezca la cuadrícula