

CI66J

**CI66J/CI71T
MODELACION NUMERICA DE AGUAS
SUBTERRANEAS**

**TEMA 4
IMPLEMENTACION DE UN MODELO DE AGUAS
SUBTERRANEAS EN VISUAL MODFLOW
OTOÑO 2006**



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL



RESUMEN

- ☒ **Introducción**
- ☒ **Método de Jenkins**
- ☒ **Solución de Hunt**
- ☒ **Modflow**
- ☒ **Ejercicio**

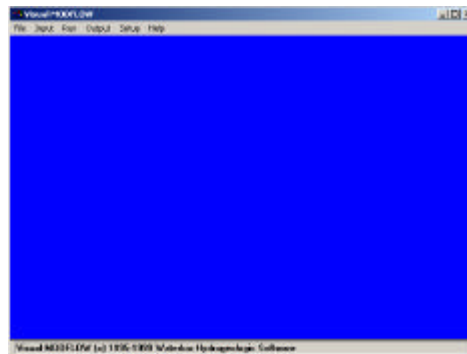
RESUMEN

- ☑ **Introducción**
- ☑ **Método de Jenkins**
- ☑ **Solución de Hunt**
- ☑ **Modflow**
- ☑ **Ejercicio**

MODFLOW

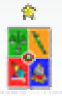
Modelo Visual MODFLOW

El modelo de flujo de aguas subterráneas (MODFLOW) desarrollado por el U.S. Geological Survey (USGS) es un programa computacional para simular características comunes en sistemas de aguas subterráneas.

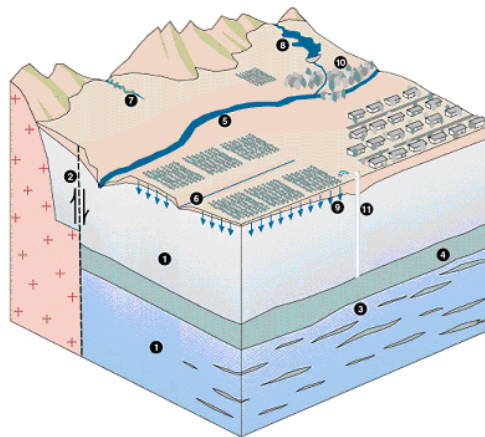


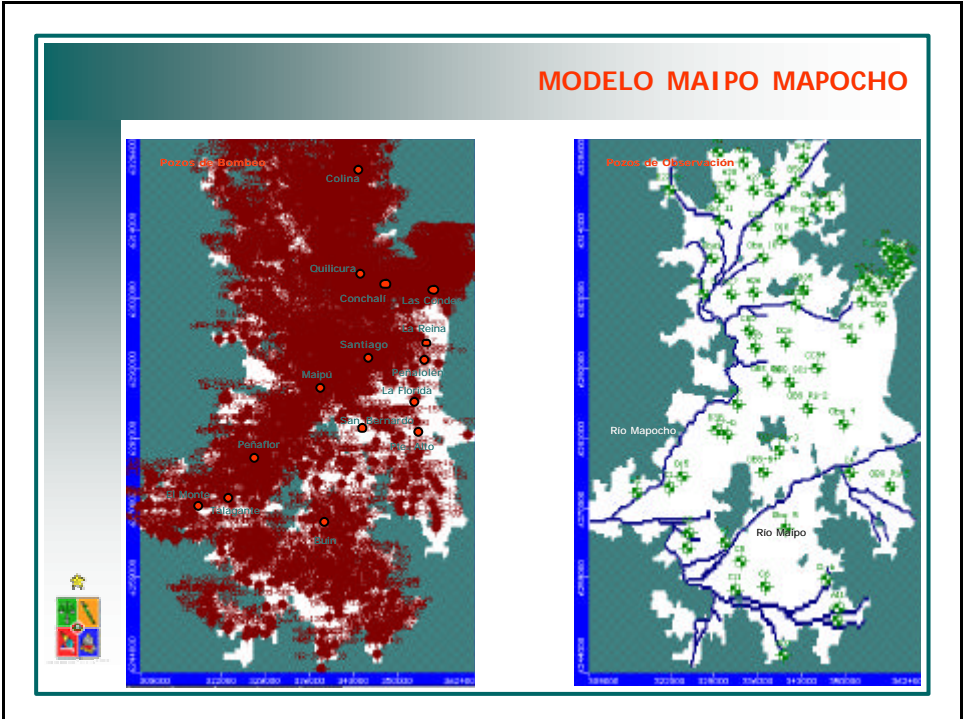
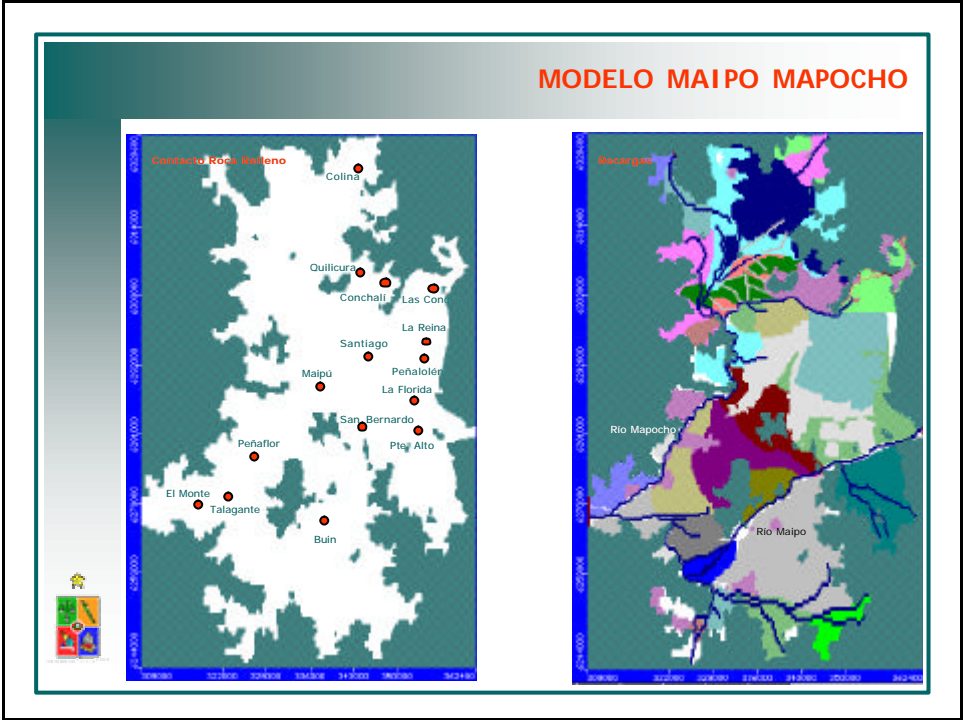
La popularidad de este programa se atribuye a:

- ✓ El método de **diferencias finitas** usado por MODFLOW es relativamente fácil de entender y aplicar a una gran variedad de condiciones del mundo real.
- ✓ MODFLOW puede aplicarse como un modelo unidimensional, **bidimensional**, o cuasi o totalmente tridimensional.
- ✓ El diseño del programa MODFLOW permite que **nuevas características** de la simulación sean agregadas con la relativa facilidad.
- ✓ Una amplia variedad de programas están disponibles para leer los datos de salida desde MODFLOW y **presentar gráficamente los resultados del modelo** de formas que se entienden fácilmente.
- ✓ MODFLOW ha sido aceptado en muchos casos de la corte en los Estados Unidos como una **herramienta legítima para el análisis de sistemas de agua subterránea**.

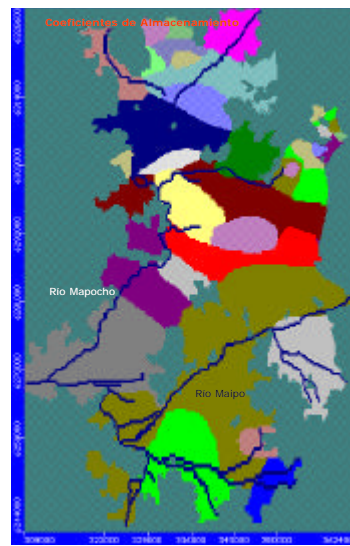
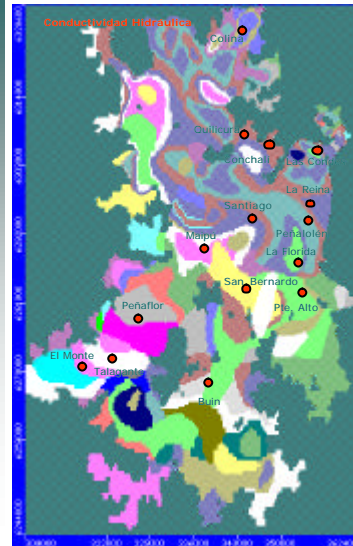


Características de un Sistema Acuífero que Puede ser Simulado por MODFLOW





MODELO MAIPO MAPOCHO



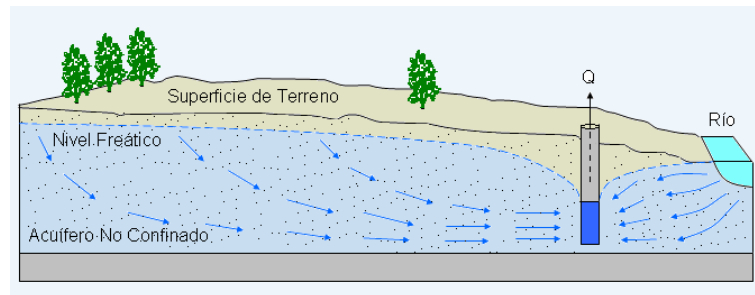
RESUMEN

- ☑ **Introducción**
- ☑ **Método de Jenkins**
- ☑ **Solución de Hunt**
- ☑ **Modflow**
- ☑ **Ejercicio**

INTERFERENCIA

ENFOQUE GENERAL

Interferencia entre pozos de bombeo y cursos superficiales.



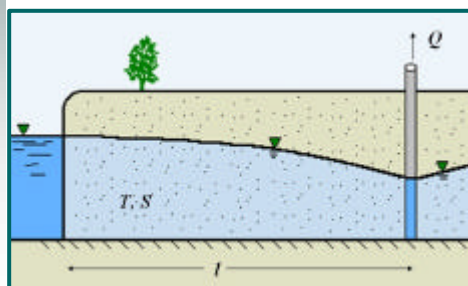
Metodologías existentes: simples, pero poco realistas (Jenkins). Problema mundial, no sólo Chile.

INTERFERENCIA

SOLUCION DE JENKINS

Solución de Jenkins (1941)

$$\frac{q}{Q} = f(S, T, l, t)$$



Cauce penetra completamente el acuífero.

Conexión hidráulica perfecta entre el río y el acuífero

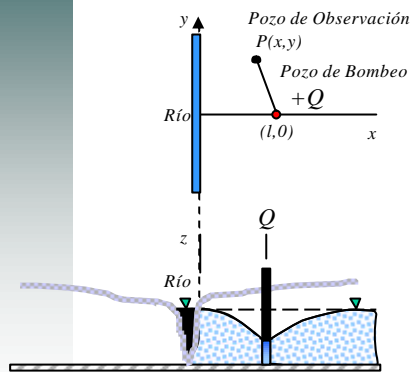


Sobreestimación del caudal de interferencia.

INTERFERENCIA

SOLUCION DE JENKINS

Theis (1941)



Descenso se calcula utilizando la expresión de Theis.

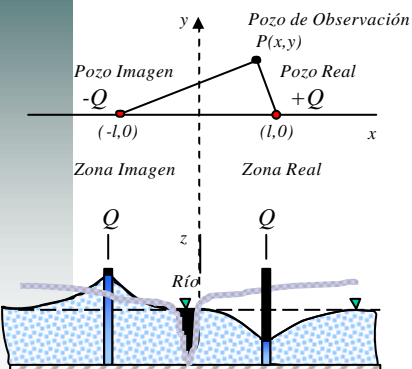
$$s(r, t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W\left(\frac{r^2}{4 \cdot T \cdot t / S}\right)$$

Utiliza el método de las imágenes.

INTERFERENCIA

SOLUCION DE JENKINS

Theis (1941)



Zona Real: Pozo de Bombeo.

Zona Imagen: Pozo de Inyección.

El descenso neto está dado por la superposición de las soluciones.

$$s(r, t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \left[W\left(\frac{(l-x)^2 + y^2}{4 \cdot T \cdot t / S}\right) - W\left(\frac{(l+x)^2 + y^2}{4 \cdot T \cdot t / S}\right) \right]$$

$$q = \int_{y=-\infty}^{y=+\infty} K \cdot b \cdot \left. \frac{\partial s}{\partial x} \right|_{x=0} dy \quad \frac{q}{Q} = \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{S \cdot l^2}{4 \cdot T \cdot t}}\right)$$

Darcy

Glover y Balmer
(1954)

INTERFERENCIA

SOLUCION DE JENKINS

Jenkins (1968) hace uso de la metodología de Theis (1941) y define el factor sdf (stream depletion factor o factor de vaciamiento del río).

$$sdf = \frac{l^2 \cdot S}{T}$$

Se define como el tiempo en el cual el volumen de vaciamiento del río alcanza el 28% del total de volumen bombeado

$$\frac{q}{Q} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{S \cdot l^2}{4 \cdot T \cdot t}} \right)$$

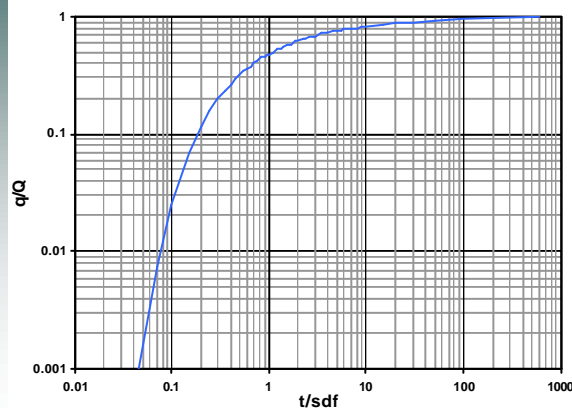
$$\frac{q}{Q} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{sdf}{4 \cdot t}} \right)$$

El factor sdf entrega información sobre la respuesta del acuífero ante la presencia de un cauce superficial.

INTERFERENCIA

SOLUCION DE JENKINS

Método de Jenkins



$$Q, T, S, l$$

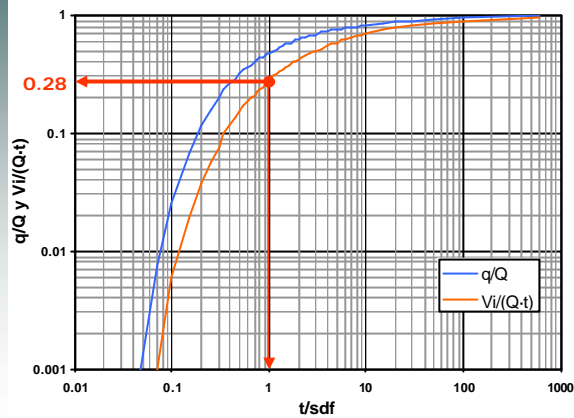
$$sdf = \frac{l^2 \cdot S}{T} \text{ y } t$$

$$q$$

INTERFERENCIA

SOLUCION DE JENKINS

Método de Jenkins



$$V(t) = \int_0^t q(t) \cdot dt$$

$$t = sdf$$



$$V_i / V_t = 0,28$$

INTERFERENCIA

SOLUCION DE JENKINS

El factor sdf (stream depletion factor o factor de vaciamiento del río) describe la conexión hidráulica entre el curso de agua y el acuífero.

$$sdf = \frac{l^2 \cdot S}{T}$$

Para $sdf \leq 100$ días el sistema acuífero se afecta en forma más rápida debido a la operación de pozo.

Para $sdf > 100$ días la conexión entre el sistema acuífero y el curso de agua es más débil.

INTERFERENCIA

SOLUCION DE JENKINS

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Fácil manejo gráfico.• Requiere poca información.	<ul style="list-style-type: none">• Desconocimiento de sus hipótesis y suposiciones.• Sistema poco real.• Utiliza sólo información del acuífero.• Sobrestima el q/Q y subestima los descensos en el acuífero adyacente.

El desconocimiento de otros métodos lo convierte en la herramienta más utilizada en el mundo para determinar el caudal de vaciamiento del río.

RESUMEN

- ☑ Introducción
- ☑ Método de Jenkins
- ☑ **Solución de Hunt**
- ☑ Modflow
- ☑ Ejercicio

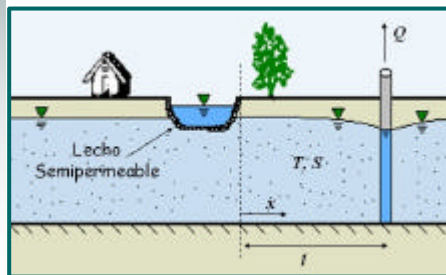
INTERFERENCIA

SOLUCION DE HUNT

Solución de Hunt (1999)

$$\frac{q}{Q} = f(S, T, l, t, \lambda)$$

$$\lambda = K' \cdot \frac{w}{m'}$$

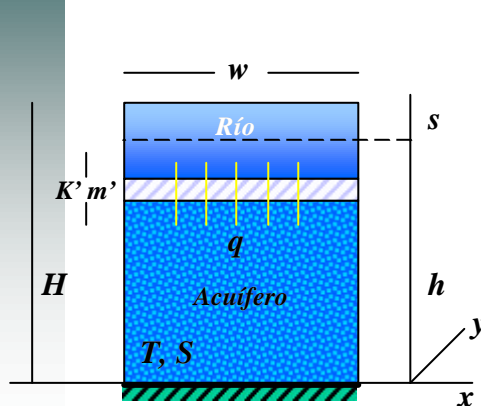


- Cauce penetra parcialmente el acuífero.
- Conexión hidráulica imperfecta entre el río y el acuífero debido a una capa de menor permeabilidad en el lecho del río.
- Problema más parecido a un caso real.
- Dificultad para estimar conductancia λ

INTERFERENCIA

SOLUCION DE HUNT

El río es simulado utilizando la ley de Darcy



$$dq = K' \cdot i \cdot d\Omega \quad \left\{ \begin{array}{l} i = \frac{H-h}{m'} \\ d\Omega = w \cdot dy \end{array} \right.$$

$$\frac{dq}{dy} = K' \cdot \frac{H-h}{m'} \cdot w$$

$$\frac{dq}{dy} = \lambda \cdot (H-h)$$

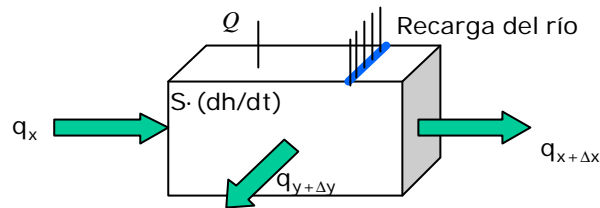
$$\lambda = K' \cdot \frac{w}{m'}$$

INTERFERENCIA

SOLUCION DE HUNT

La ecuación diferencial que describe las variaciones de flujo en el agua subterránea está dado por la siguiente expresión.

$$T \cdot \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) - Q \cdot \delta(x-l) \cdot \delta(y) + \lambda \cdot (H-h) \cdot \delta(x) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$



La ecuación de flujo en el agua subterránea puede ser escrita en función de los descensos.

$$s = H - h$$

INTERFERENCIA

SOLUCION DE HUNT

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene una expresión para los descensos en el acuífero.

$$s(x, y, t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \left[W \left(\frac{(l-x)^2 + y^2}{4 \cdot T \cdot t / S} \right) - \int_0^\infty e^{-\theta} \cdot W \left(\frac{(l+|x| + 2 \cdot T \cdot \theta / \lambda)^2 + y^2}{4 \cdot T \cdot t / S} \right) d\theta \right]$$

El vaciamiento del río producto de la extracción del Q del pozo está dado por la siguiente expresión

$$q(t) = I \cdot \int_{-\infty}^{\infty} (H - h) dy = I \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s(x=0, y, t) dy$$

INTERFERENCIA

SOLUCION DE HUNT

Finalmente la tasa de caudal de extracción del pozo que proviene del río

$$\frac{q}{Q} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{S \cdot l^2}{4 \cdot T \cdot t}} \right) - \exp \left(\frac{\lambda^2 \cdot t}{4 \cdot S \cdot T} + \frac{\lambda \cdot l}{2 \cdot T} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\lambda^2 \cdot t}{4 \cdot S \cdot T}} + \sqrt{\frac{S \cdot l^2}{4 \cdot T \cdot t}} \right)$$

Se define el parámetro adimensional sbf como el "streambed factor" o "factor del lecho del río"

$$sbf = \frac{\lambda \cdot l}{T}$$

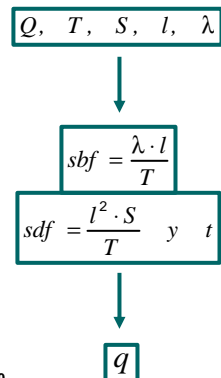
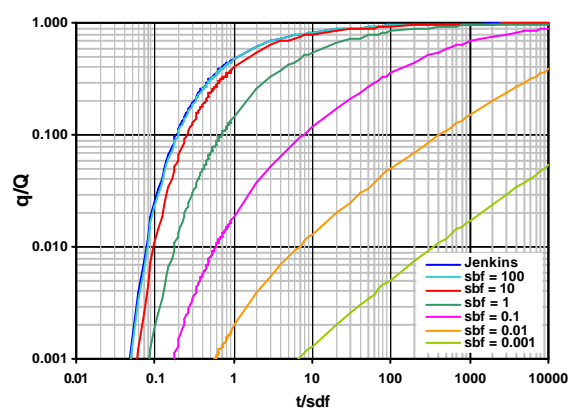
Es posible escribir la solución en términos de sdf y sbf

$$\frac{q}{Q} = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{sdf}{4 \cdot t}} \right) - \exp \left(\frac{sbf^2 \cdot t}{4 \cdot sdf} + \frac{sbf}{2} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{sbf^2 \cdot t}{4 \cdot sdf}} + \sqrt{\frac{sdf}{4 \cdot t}} \right)$$

INTERFERENCIA

SOLUCION DE HUNT

Método de Hunt.



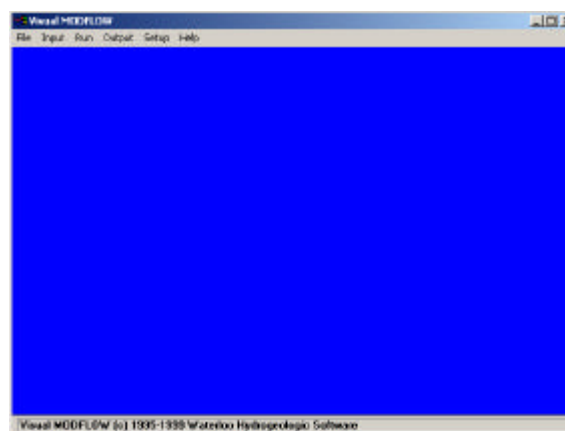
RESUMEN

- ✓ Introducción
- ✓ Método de Jenkins
- ✓ Solución de Hunt
- ✓ **Modflow**
- ✓ Ejercicio

MODFLOW

Modelo Visual MODFLOW

Ventana y Menú Principales de Visual MODFLOW

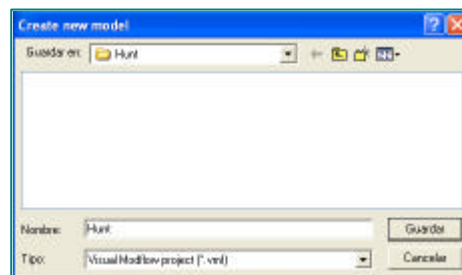


ETAPA 1: Crear el Modelo de Flujo

Paso 1: Ir al menú "File" y hacer click en "New".

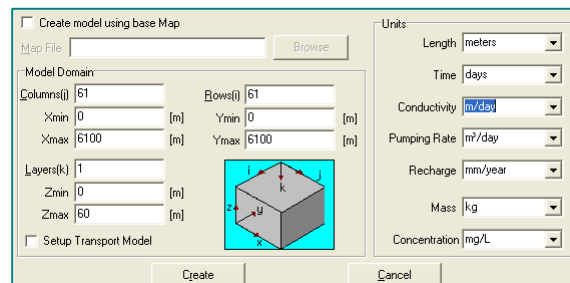
File Input Run Output Setup Help

Se despliega la ventana "Create new model". En ella se nombra el archivo Hunt, que automáticamente toma la extensión .vmf.



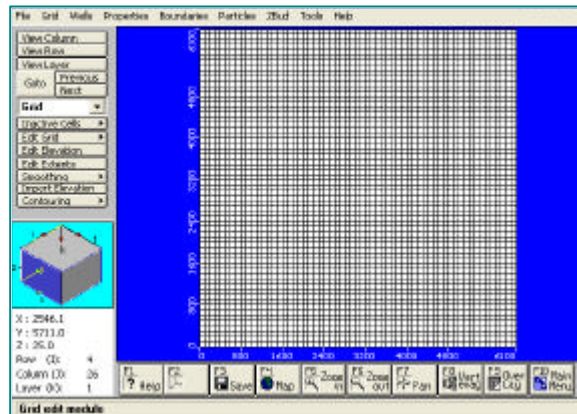
ETAPA 1: Crear el Modelo de Flujo

Paso 2: Posteriormente aparece una ventana que permite definir el dominio del acuífero, la discretización horizontal y vertical. Además se definen las unidades a usar en el modelo de simulación.



ETAPA 1: Crear el Modelo de Flujo

Entonces se despliega en la ventana principal el acuífero a estudiar con la grilla que se definió en el paso 2.



ETAPA 2: Definir Atributos del Acuífero

Paso 3: Ir al menú y hacer Click en "Properties" y seleccionar "Conductivity"

File Grid Wells Properties Boundaries Particles ZBud Tools Help

Se despliega una nueva ventana con las propiedades hidrogeológicas del acuífero, "Default Property Values". En esta se deben ingresar los siguientes valores:

Default Property Values	
Kx [mD]	20.00
Ky [mD]	20.00
Kz [mD]	0
Sx [1/m]	0.005
Sy [-]	0.15
SP Por [-]	0.15
Tot Por [-]	0.2
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Help"/>	

ETAPA 3: Definir Atributos del Río

Paso 4: Ir al menú y hacer Click en "Properties" y seleccionar "Boundaries"

File Grid Wells Properties Boundaries Particles ZBud Tools Help

Paso 5: Ir a "Assign" y selecciona "Line".

ETAPA 3: Definir Atributos del Río

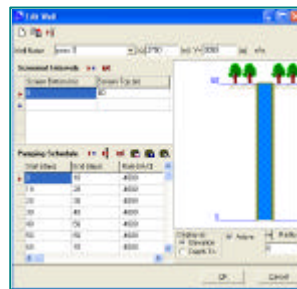
Paso 5: Ir a "Assign" y selecciona "Line".

ETAPA 4: Insertar un Pozo y sus Atributos

Paso 6: Ir al menú y hacer Click en el botón “Wells” y seleccionar la condición “Pumping Wells”.

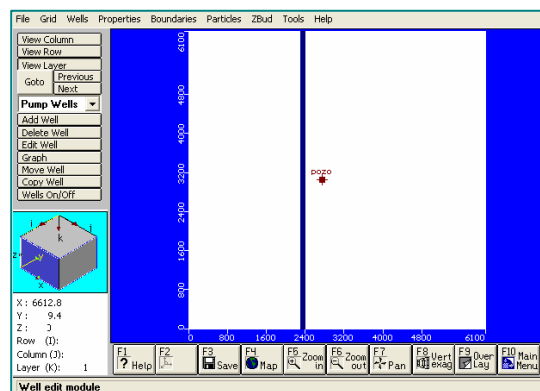
File Grid Wells Properties Boundaries Particles ZBud Tools Help

Para agregar el pozo se debe ir a la opción “Add Well” y luego presionar en la posición en que se ubica el pozo.



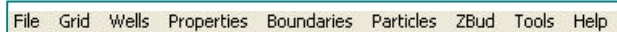
ETAPA 4: Insertar un Pozo y sus Atributos

Queda definido el pozo de extracción a una distancia de 400 m del río, cumpliendo la condición de bombeo constante en el tiempo a una tasa de 4000 m³/día.



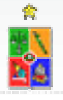
ETAPA 5: Definir Zonas de Balance

Para saber cuanto del caudal extraído por el pozo proviene desde el río, es necesario definir zonas de balances de masa.

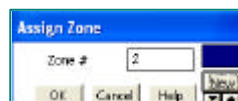


Paso 7: Ir al menú y hacer Click en "ZBud".

Paso 8: Para agregar la zona de balance se debe ir a la opción "Assign" y luego seleccionar "Single" y se despliega la ventana "Assign Zone". Aparece por defecto la zona 1 definida de color blanco, que corresponde a todo el acuífero.

**ETAPA 5: Definir Zonas de Balance**

Paso 9: Dentro de la ventana "Assign Zone" ir a la opción "New" y se crea una zona 2 de color azul.



Paso 10: Pintar la zona 2 sobre la zona asignada al río.

Dos zonas:

- La zona blanca representa los recursos del acuífero
- La zona azul representa los recursos del río.

Paso 11: Volver al menú principal para resolver el problema numéricamente



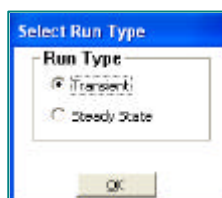
ETAPA 6: Resolución del Modelo Numérico

Paso 12: Ir al menú principal y seleccionar la opción "Run".

File Input Run Output Setup Help

Se despliega la ventana "Select Run Type".

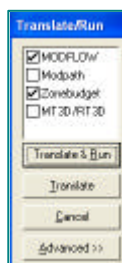
Paso 13: Seleccionar la opción "Transient".

**ETAPA 6: Resolución del Modelo Numérico**

Aparece una nueva pantalla, en que se definen las condiciones de ejecución del programa.

File MODFLOW MODPATH MT3DMS PEST Run Help

Paso 14: Ir al menú, seleccionar "Run". Se despliega la ventana "Translate/Run".

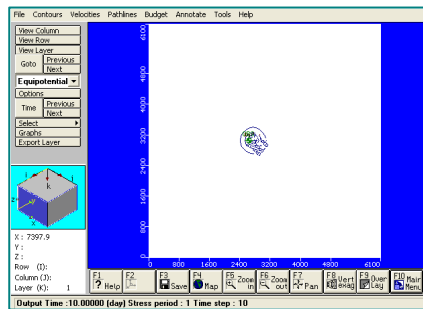


ETAPA 7: Obtener Resultados

Paso 15: Ir al menú principal y seleccionar la opción "Output"

File Input Run Output Setup Help

Se despliega la pantalla principal con información gráfica de los contornos equipotenciales para el primer periodo de stress considerado.

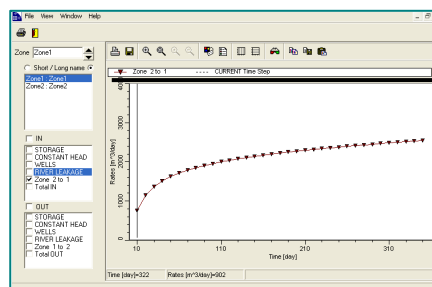


ETAPA 7: Obtener Resultados

Paso 16: Ir al menú principal, seleccionar la opción "Budget" y hacer click en "Flow Budget Graphs"

File Contours Velocities Pathlines Budget Annotate Tools Help

Paso 17: Seleccionar la ventana "Time Series".



RESUMEN

- ✓ **Introducción**
- ✓ **Método de Jenkins**
- ✓ **Solución de Hunt**
- ✓ **Modflow**
- ✓ **Ejercicio**

EJERCICIO

Reproducir Hipótesis de Jenkins

GEOMETRIA

Columns [61], Xmin [0 m], Xmax [6100 m].

Rows [61], Ymin [0 m], Ymax [6100 m].

Layers [1], Zmin [0 m], Zmax [50 m].

PROPIEDADES DEL ACUIFERO

$K_x = K_y = K_z$ [m/d] = 20

S_s [1/m] = 0.003

S_y [-] = 0.15

Eff. Por. [-] = 0.15

Tot. Por. [-] = 0.2

RIO = CONDICION DE BORDE CONSTANTE = 50 m

POZO A 400 m DEL RIO, $Q = -4000 \text{ m}^3/\text{día}$ EN 360 días



Objetivo: Gráfico $q(t)/Q$ y $s(t)$ vs tiempo, para distintos valores de K (2 ; 20 y 200 m/día). Comentar