SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VI CONGRESO NACIONAL

# MODELO NO LINEAL DE ELEMENTOS FINITOS ISOPARAMETRICOS EN SISTEMAS DE AGUAS SUBTERRANEAS

## PLANTEAMIENTO Y VALIDACION PARA UN CASO REAL

Guillermo Cabrera F. (1)

Juan Antonio Durán G. (2)

RESUMEN

Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos isoparamétricos con el fin de simular el comportamiento no lineal de sistemas de aguas subterráneas no confinados, para ser aplicado al caso de la cuenca Chacabuco - Polpaico sometida actualmente a una intensa explotación por bombeo desde pozos.

Se ha utilizado el método residual de Galerkin en la aproximación de elemento finitos y el método de Newton-Raphson para resolver el sistema de ecuaciones no lineales resultante. La integración en el tiempo se efectúa mediante un esquema de diferencias hacia atrás.

La validación de las soluciones numéricas entregadas por el modelo se realizó simulando un caso teórico de solución conocida.

La aplicación del modelo a la cuenca Chacabuco - Polpaico ha permitido calibrarlo para condiciones permanentes, reproduciendo la posición de los niveles estáticos mediante un ajuste de parámetros (coeficiente de permeabilidad). En una etapa posterior de este estudio se aplicará a condiciones impermanentes, para finalmente procesarlo bajo distintas reglas de explotación y así definir un uso más racional del recurso subterráneo en la cuenca.

---

(1) Ingeniero Civil, Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile.

(2) Ayudante de Investigación del Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile.

## INTRODUCCION

La explotación de los recursos de aguas subterráneas en áreas ubicadas al Norte de Santiago es en la actualidad intensa debido a la escasez de los recursos superficiales, provenientes principalmente de las lluvias que se producen en invierno.

De especial importancia es la situación en que se encuentra la cuenca del Estero Chacabuco (Cuenca Chacabuco - Polpaico) en donde las necesidades de agua, fundamentalmente ligadas a la agricultura, han ido aumentando. Según esto, y a pesar de disponer de recursos que se obtienen de trasvases desde el río Aconcagua a través del Canal Chacabuco - Polpaico, los recursos subterráneos se hacen insuficientes para suplir las demandas.

Dichos recursos están sufriendo en la actualidad una sobreexplotación, manifestada en el hecho que durante los últimos 15 años los niveles de aguas subterráneas han estado bajando sostenidamente a un promedio de 0,6 m/año. Con ello, el volumen de almacenamiento de las napas ha disminuido ostensiblemente (Orphanópoulos y Cabrera, 1982). A pesar de ésto, se ha seguido construyendo nuevos pozos profundos de explotación, lo que puede conducir en un futuro cercano a un daño irreparable en esta fuente de recursos.

Debido a lo anterior, el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile en conjunto con investigadores de la Universidad de Humboldt, California, y de la Universidad de California, Los Angeles, y bajo el patrocinio de la Dirección General de Aguas del MOP, ha emprendido un proyecto de investigación aplicada cuyo objetivo último es definir reglas racionales de explotación del recurso subterráneo, que permitan detener el proceso de agotamiento de la napa y conduzcan a una adecuada repartición de los caudales bombeados. Dentro de este proyecto se ha planteado el desarrollo de modelos matemáticos de optimización y simulación que utilizados en conjunto sean aplicados a la zona de interés.



El presente trabajo se refiere al modelo de simulación del sistema de aguas subterráneas, para el que se ha supuesto un comportamiento no lineal, por la existencia de napas libres que en este último tiempo han aumentado considerablemente por los descensos del nivel subterráneo como consecuencia de la sobreexplotación.

En el modelo de simulación se ha utilizado la técnica numérica de elementos finitos en conjunto con el método residual de Galerkin. El modelo considera elementos cuadriláteros isoparamétricos con funciones de aproximación de primero, segundo y tercer grado y se ha recurrido al método de Newton-Raphson para resolver el sistema de ecuaciones no-lineales resultante. La integración en el tiempo se efectúa mediante un esquema implícito de diferencias hacia atrás.

## JUSTIFICACION DEL MODELO ADOPTADO

El uso de modelos de simulación de elementos finitos en sistemas reales de aguas subterráneas ha permitido obtener en nuestro país, resultados satisfactorios cuando la suposición de comportamiento lineal de estos sistemas, ligada a la existencia de napas confinadas, resulta válida. Es así como mediante la utilización de mallas de elementos triangulares y funciones lineales de aproximación (Cabrera y Azzari, 1979) o de elementos isoparamétricos y funciones hasta de tercer grado (Cabrera y Menchaca, 1981), pudo representarse la evolución a lo largo del timpo de los niveles piezométricos de aguas subterráneas por efecto de distintas reglas de explotación del recurso.

La aplicación del método a sistemas no-lineales, sin embargo, se ha restringido a casos teóricos para representar el comportamiento de la superficie libre a lo largo del tiempo cuando sobre ella incide una recarga debida a infiltración (Cabrera y Matthey, 1981). En ese trabajo, se incorporó la variable tiempo a la discretización de elementos finitos, utilizándose elementos triangulares de espacio y tiempo con funciones de aproximación lineales dentro de cada uno de ellos, recurriéndose al método de New

ton-Raphson para linealizar el sistema de ecuaciones resultante.

Los sistemas de aguas subterráneas reales que se caracterizan por la existencia predominante de napas libres y semiconfinadas tienen un comportamiento no-lineal, especialmente cuando los niveles de la napa sufren importantes variaciones por efectos de bombeo sostenido desde pozos o por recargas localizadas desde cauces superficiales o zonas de riego. En esos casos resulta atractivo tomar en cuenta la no-linealidad del sistema en la simulación numérica, y en el caso específico de la aplicación del método de elementos finitos considerar por una parte, el uso de elementos cuadriláteros isoparamétricos para conseguir una mayor flexibilidad en la representación de contornos sinuosos y disminuir el número de elementos, y por otra, trabajar con funciones de aproximación de primer, segundo y tercer grado para mejorar la exactitud de las soluciones.

## MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

La ecuación diferencial que gobierna el flujo en un sistema no confinado de aguas subterráneas es la siguiente :

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\, h \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\, h \frac{\partial h}{\partial y}\right) + Q - S_y \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \qquad (1)$$

en que h es el potencial hidráulico o nivel piezométrico (L), K es el coeficiente de permeabilidad (L/T), $S_y$ es la porosidad efectiva del acuífero y Q engloba las recargas y descargas de la napa (L/T).

Suponiendo la región en estudio compuesta de M elementos y N nudos, puede considerarse a la solución para el potencial hidráulico de la forma :

$$\bar{h}(x,y,t) = \sum_{i=1}^{N} c_i(t)\, v_i(x,y) \qquad (2)$$

donde $v_i(x,y)$ son componentes de un sistema de funciones básicas predeterminadas, linealmente independientes, y $c_i(t)$ son coeficientes indeterminados con los que se evalúa la solución en los N nudos de la malla.



De acuerdo al método residual de Galerkin, $\bar{h}(x,y,t)$ será solución de (1) sólo si $L(\bar{h}) = 0$, lo que equivale a la condición de ortogonalidad de $L(\bar{h})$ respecto a todas las funciones básicas $v_i(x,y)$, lo que se expresa como :

$$\iint_D L\left[\bar{h}(x,y,t)\right] v_i(x,y)\, dxdy = 0 \qquad (3)$$

en que D es el dominio espacial e $i = 1,2 \ldots N$.

Luego de dividir la región de escurrimiento en elementos cuadriláteros isoparamétricos y considerar las funciones básicas $v_i(x,y)$ hasta de tercer grado que se hacen 1,0 en el nudo i y 0 en el resto de los nudos, se recurre a una transformación de coordenadas $(\xi, \eta)$ para cada elemento, que permite su transformación en un cuadrado de lados de longitud 2,0 cuyo centro de gravedad coincide con el nuevo origen de coordenadas. Así, de aplicar la condición de ortogonalidad señalada en (3) y efectuar los desarrollos algebraicos, la expresión general del residuo correspondiente al nudo i, en un elemento e compuesto de $N^e$ nudos, es la siguiente :

$$R_i^e = -\sum_{k=1}^{N^e}\sum_{j=1}^{N^e} c_j\, c_k\, (a_i^e)_{kj} - \sum_{j=1}^{N^e} p_{ij}^e \frac{\partial c_j}{\partial t} + f_i^e \qquad (4)$$

en donde :

$$(a_i^e)_{kj} = K^e \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1} v_j \left(\frac{\partial v_i}{\partial x}\frac{\partial v_k}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y}\frac{\partial v_k}{\partial y}\right) \det[J]\, d\xi d\eta \qquad (5a)$$

$$p_{ij}^e = S_y \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1} v_i\, v_j \det[J]\, d\xi d\eta \qquad (5b)$$

$$f_i^e = \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1} I^e \, v_i \, \det[J] \, d\xi d\eta + \int_{-1}^{1} v_i \, q \, ds - Q_i \qquad (5c)$$

En las relaciones anteriores los coeficientes de permeabilidad $K^e$ y porosidad efectiva $S_y^e$ se suponen constantes dentro del elemento. Por otra parte, $I^e$ representa una tasa de infiltración por unidad de área, q una recarga por unidad de longitud a lo largo del lado s donde se ubica el nudo i, y $Q_i$ un caudal de descarga desde el nudo i; la matriz [J] (2 x 2) incluye los coeficientes necesarios para la transformación de coordenadas.

Puesto que en la ecuación (4) se tiene derivadas respecto al tiempo, se requiere efectuar una discretización de esta variable, lo que en este caso se consigue mediante la aplicación de un esquema de diferencias hacia atrás. Con ello la expresión del residuo correspondiente a un tiempo t puede escribirse así :

$$R_i^e = - \sum_{k=1}^{N^e} \sum_{j=1}^{N^e} c_j^t \, c_k^t \, (a_i^e)_{kj} - \frac{1}{\Delta T} \sum_{j=1}^{N^e} p_{ij}^e \, c_j^t + \frac{1}{\Delta T} \sum_{j=1}^{N^e} p_{ij}^e \, c_j^{t-1} + f_i^e \qquad (6)$$

en que $\Delta T$ es el intervalo de tiempo entre dos estados sucesivos del sistema.

La condición de que el residuo sea nulo para todo el dominio equivale a considerar la suma de todos los $R_n^m$, vale decir :

$$R_n = \sum_{m=1}^{M} R_n^m = 0 \qquad (n = 1,2,\ldots.N) \qquad (7)$$

que para este caso corresponde a un sistema de N ecuaciones no-lineales de segundo grado cuyas N incógnitas son los coeficientes indeterminados $c_i$ de (2) que representan el potencial hidráulico en cada nudo de la malla. Para su resolución se aplica el método de Newton-Raphson.



Si se elige una solución inicial arbitraria $\vec{c}_0$, el sistema de ecuaciones puede escribirse en notación vectorial como

$$\vec{R}(\vec{c}_0 + \vec{\Delta c}) = \vec{0} \qquad (8)$$

Expandiendo (8) en serie de Taylor y despreciando los términos de segundo orden y superiores, se obtiene un sistema de ecuaciones para $\vec{\Delta c}$ donde la ecuación correspondiente al nudo i es:

$$R_i(\vec{c}_0) + \left.\frac{\partial R_i}{\partial c_1}\right|_{\vec{c}_0} \Delta c_1 + \left.\frac{\partial R_i}{\partial c_2}\right|_{\vec{c}_0} \Delta c_2 + \ldots + \left.\frac{\partial R_i}{\partial c_N}\right|_{\vec{c}_0} \Delta c_N = 0 \qquad (9)$$

La solución de este sistema de ecuaciones permite evaluar $\vec{\Delta c}_0$, que es usado para corregir $\vec{c}_0$. El nuevo vector $\vec{c}_1 = \vec{c}_0 + \vec{\Delta c}_0$ reemplaza a $\vec{c}_0$ en (9) para la segunda iteración. Este proceso iterativo finaliza cuando el máximo valor $\Delta c_n$ calculado es menor o igual que un error admisible preestablecido.

A fin de aplicar este procedimiento, debe conocerse las condiciones iniciales de antemano, vale decir la posición de la superficie libre. De esta menra, el sistema de ecuaciones resultante se resuelve para cada intervalo de tiempo mediante el método de eliminación de Gauss, especialmente adaptado para el caso en que las matrices de coeficientes son bandeadas, con un importante número de elementos nulos (Cabrera y Matthey, 1981).

Sobre la base de la formulación teórica descrita se confeccionó un programa de computación en lenguaje FORTRAN IV-G, que permite calcular la evolución de los niveles de aguas subterráneas conocidos los coeficientes de permeabilidad y porosidad efectiva, recargas y descargas sobre áreas, longitudinales o puntuales, además de las condiciones de borde e iniciales. En la Figura 1 se muestra un diagrama de bloques con los procedimientos más importantes del cálculo.

VALIDACION DEL MODELO

La validación del modelo se obtuvo de su comparación con una solución numérica simplificada para el caso de un sistema acuífero limitado por dos cauces superficiales sobre el que incide una recarga por infiltración. Esta solución, que utiliza elementos finitos unidimensionales y diferencias finitas para la integración en el tiempo, fue comparada satisfactoriamente con la solución analítica a este problema y con otras soluciones numéricas (Cabrera y Matthey, 1983).

La Figura 2 muestra un esquema del sistema analizado, de la malla de elementos finitos, y un gráfico con los resultados de la evolución de la superficie libre a lo largo del tiempo. En el gráfico de dicha figura, puede apreciarse la similitud entre ambas soluciones. Debe señalarse el hecho que con la malla bidimensional de elementos finitos utilizada se obtuvo valores del potencial idénticos para nudos que tenían iguales abscisas, lo que también es indicativo de la bondad del modelo.

CASO DE ESTUDIO

Descripción de la zona

La cuenca Chacabuco - Polpaico corresponde a la hoya hidrográfica del estero Chacabuco, con sus afluentes principales, los esteros Santa Margarita, Quilapilún y Peldehue (Figura 3). Aparece limitada al Norte y al Sur por los cordones de Chacabuco y El Manzano, respectivamente, y al Oriente por los contrafuertes de la Cordillera de Los Andes. Los sectores bajos forman una planicie suave entre Chacabuco y Polpaico con pendientes entre 3% y 0,4%.

La zona está clasificada como templado-cálida con estación seca prolongada; la precipitación media anual es de 310 mm. La temperatura promedio anual varía entre 16°C y 18°C. La vegetación natural es pobre, compuesta por matorrales, espinos y pastizales estacionales.



Siendo la actividad económica más importante de la cuenca la agricultura, sus recursos superficiales son muy reducidos y no constituyen una fuente apropiada para el riego. Por ello, el regadío se efectúa principalmente con aguas subterráneas y con recursos provenientes de trasvases desde el río Aconcagua a través del Canal Chacabuco - Polpaico.

El Canal Chacabuco - Polpaico aporta en promedio un caudal de 1,1 $m^3/s$ a la cuenca, y su ramal más importante alcanza el embalse Huechún de 30 millones de $m^3$, donde los recursos son regulados para el riego de la parte inferior del área.

Se ha reconocido un total del orden de 120 pozos profundos perforados de los cuales alrededor de 70 se encuentran en funcionamiento, alcanzando densidades cercanas a 1 pozo/$Km^2$ en zonas de intensa explotación.

Hidrogeología

La cuenca Chacabuco - Polpaico se caracteriza por contener rellenos sedimentarios que en la mayor parte deben su origen a corrientes de barro ocurridas durante el Cuaternario. Por este motivo se presenta muy heterogéneo, tanto vertical como horizontalmente, definiendo una estratigrafía de variada granulometría y albergando algunas capas que constituyen acuíferos. La potencia del relleno alcanza los 70 m aproximadamente en los sectores altos, mientras que en las partes bajas sobrepasaría los 150 m. Todo lo anterior contribuye a que las formaciones acuíferas presenten permeabilidades variables que van desde $3 \times 10^{-3}$ m/s en los sectores medio y bajo de la cuenca, hasta extremos del orden de $10^{-6}$ m/s en áreas con predominio de arcillas como en las vecindades del Estero Peldehue, por ejemplo.

En relación a los niveles de aguas subterráneas, los efectos de la gran sequía de 1968 quedaron reflejados claramente en la profundización que experimentaron, situación producida en la mayoría de las cuencas de la zona central de nuestro país. Adicio -

nalmente, en esta cuenca en particular a partir de 1975, y como consecuencia de la intensa explotación, se ha constatado un descenso casi sistemático de los niveles. Se ha verificado en la zonas altas de la cuenca las mayores variaciones que en ciertos puntos alcanzan los 18 m, mientras que cerca de la salida dichas variaciones históricas no superan los 4 m.

El sostenido descenso de los niveles por la descontrolada explotación ha provocado que las napas, inicialmente confinadas en su mayor parte, se comporten actualmente como libres, quedando así subordinadas en mayor medida a la explotación de que son objeto más que a la influencia de recargas y descargas naturales.

Malla de Elementos y Parámetros del Modelo

Sobre la base de antecedentes topográficos e hidrológicos se definió la malla de elementos de la Figura 4, intentando representar las zonas de contacto reca-relleno como bordes impermeables, los cauces naturales que infiltran a la napa y los canales principales de riego como lados de elementos, los pozos de bombeo como nudos del sistema, y al Embalse Huechún como un elemento de recarga. Con todo esto la malla de elementos quedó formada por 88 elementos y 240 nudos.

Utilizando los resultados de pruebas de bombeo de gasto variable y constante se evaluó las permeabilidades de las formaciones acuíferas, a partir de lo cual se asignó un valor único a cada elemento de la malla. Se consideró condiciones de borde de potencial hidráulico conocido en las zonas de entrada y salida naturales (Esteros Santa Margarita, Chacabuco, Quilapilún y Polpaico), basándose en registros de niveles de la napa en pozos y norias de la zona, y condiciones de borde de recarga directa a la napa utilizando información de pérdidas del Canal Chacabuco - Polpaico (Valdés y Pérez, 1974) y de filtraciones del Embalse Huechún (Orphannópoulos y Cabrera, 1982).



Validación del Modelo en Régimen Permanente

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a la primera etapa de la validación, en la cual se operó el modelo para una situación permanente. En esta etapa se intentó representar los niveles estáticos medidos mediante un ajuste de parámetros, considerando únicamente las recargas más importantes a la napa desde el Embalse Huechún y el Canal Chacabuco - Polpaico en su recorrido por el Estero Santa Margarita, como acciones externas.

Puesto que para esta etapa de la validación no se consideró bombeo desde pozos, se eligió el mes de Mayo para este propósito ya que la explotación de aguas subterráneas en la zona se reduce ese mes a niveles mínimos. Por otra parte, en Mayo de 1971 el control de niveles estáticos fue muy completo en la zona, por lo cual se utilizó esa fecha definitivamente para este proceso de validación.

Considerando los antecedentes señalados se operó el modelo en condiciones permanentes y mediante un proceso iterativo se consiguió reproducir los niveles haciendo variar las permeabilidades de cada elemento. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla N° 1 para distintos pozos de la zona. En esa tabla puede apreciarse el grado de ajuste alcanzado con la variación de parámetros al comparar estos resultados con los inicialmente simulados.

Las variaciones de permeabilidad sin embargo, resultaron altas, especialmente en el sector alto vecino al Estero Santa Margarita donde la permeabilidad debió variarse hasta en más de un orden de magnitud para conseguir una razonable aproximación de los niveles. En otras áreas por otro lado, las variaciones fueron mínimas, como ocurrió en la parte baja de la cuenca, cercana a la localidad de Polpaico.

Debe señalarse que al utilizar un error admisible de 0,10 m en la solución del sistema de ecuaciones no lineales, se requirió únicamente de 3 iteraciones para conseguir la convergencia

del proceso.

TABLA 1. VALIDACION DEL MODELO EN REGIMEN PERMANENTE

(NIVELES DE LA NAPA DE MAYO DE 1971)

| Pozo N° | MEDIDO (m.s.n.m) | SIMULADOS (m.s.n.m) | | DIFER. c/r MEDIDO (m) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | SIMULAC. 1 | SIMUL. FINAL | SIM. 1 | SIM. FINAL |
| 2 | 670,6 | 678,0 | 670,5 | 7,4 | - 0,1 |
| 3 | 671,5 | 675,8 | 671,3 | 4,3 | - 0,2 |
| 10 | 640,0 | 642,4 | 640,7 | 2,4 | 0,7 |
| 23 | 711,0 | 710,0 | 711,5 | - 1,0 | 0,5 |
| 24 | 704,8 | 700,5 | 703,8 | 4,3 | - 1,0 |
| 37 | 590,7 | 593,6 | 590,3 | 2,9 | - 0,4 |
| 51 | 547,0 | 545,6 | 547,7 | - 1,4 | 0,7 |
| 52 | 546,6 | 544,9 | 547,3 | - 1,7 | 0,7 |
| 55 | 544,3 | 542,0 | 544,3 | - 2,3 | 0,0 |
| 56 | 542,8 | 540,9 | 542,3 | - 1,9 | - 0,5 |
| 59 | 540,9 | 538,6 | 541,0 | - 2,3 | 0,1 |
| 64 | 531,7 | 529,8 | 532,0 | - 1,9 | 0,3 |
| 69 | 527,8 | 528,4 | 527,1 | 0,6 | - 0,7 |
| 73 | 527,8 | 529,8 | 527,5 | 2,0 | - 0,3 |
| 82 | 521,2 | 523,0 | 521,9 | 1,8 | 0,7 |
| 88 | 518,0 | 519,8 | 518,5 | 1,8 | 0,5 |
| 102 | 521,6 | 522,9 | 521,9 | 1,3 | 0,3 |
| 109 | 650,0 | 621,8 | 651,1 | - 28,2 | 1,1 |
| G1 | 790,0 | 735,0 | 789,2 | - 65,0 | - 0,8 |

## Etapas Futuras

Aprovechando los resultados de un modelo de recarga actualmente en operación para esta cuenca, se completará la validación del modelo de simulación operándolo en régimen impermanente, con la incorporación de la información del bombeo desde pozos obtenida de encuestas realizadas en terreno. En este proceso se espera modificar sólo levemente los valores de los parámetros ya ajustados puesto que modelos de este tipo son fundamentalmente poco sensibles a variaciones en el coeficiente de almacenamiento o porosidad efectiva para napas libres (Mc Elwer y Yukler, 1978). Más aún, de la operación de este modelo pudo verificarse su limitada sensibilidad ante variaciones en las recargas desde fuentes superficiales.



Completada la etapa de validación se pretende operarlo para distintas relgas de explotación y utilizarlo en conjunto con un modelo de optimización no lineal actualmente en desarrollo, para definir políticas racionales de explotación en la zona de estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS


- Cabrera G. y Azzari S., 1979. Modelo de elementos finitos para simular el comportamiento de sistemas de aguas subterráneas. Aplicación al caso de la cuenca del río Putaendo. Soc. Chilena de Ing. Hidráulica, IV Coloquio Nacional.
- Cabrera G. y Matthey G., 1981. Modelo de elementos finitos de escurrimientos no confinados impermanentes. Soc. Chilena de Ing. Hidráulica, V Congreso Nacional.
- Cabrera G. y Matthey G., 1983. Space-and-time finite element model for two-stream unconfined aquifer systems. Enviado a Journal of Hydrology.
- Cabrera G. y Menchaca E., 1981. Simulación de sistemas de aguas subterráneas sometidos a explotación por bombeo. Soc. Chilena de Ing. Hidráulica, V Congreso Nacional.
- Mc Elwer C.D. y Yukler M.A., 1978. Sensitivity of groundwater models with respect to variations in transmissivity and storage. Water Resources Research, 14(3).
- Orphanópoulos D. y Cabrera G., 1982. Técnicas isotópicas en estudios hidrogeológicos. Aplicación a la cuenca Chacabuco-Polpaico. Centro de Recursos Hidráulicos, Univ. de Chile.
- Valdés C. y Pérez C., 1974. Estudio de la capacidad y de las condiciones de funcionamiento del canal Chacabuco-Polpaico. Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas.

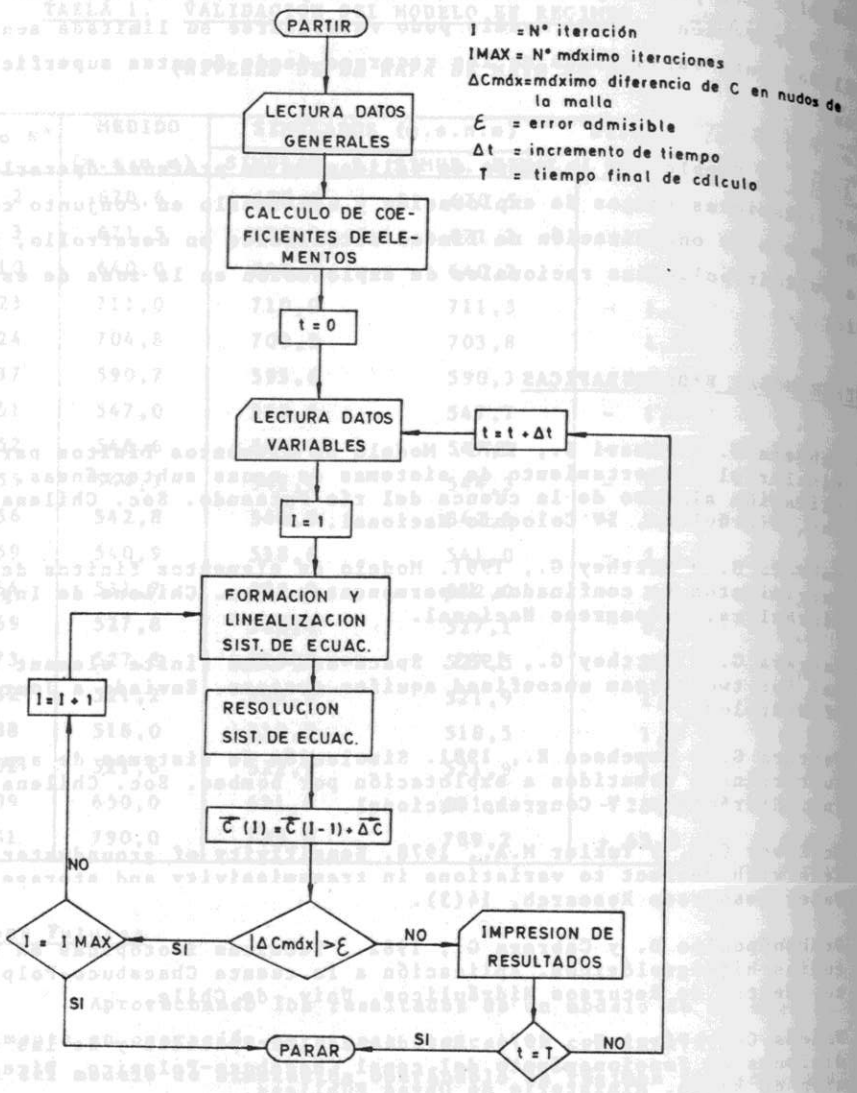



FIG. 1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MODELO



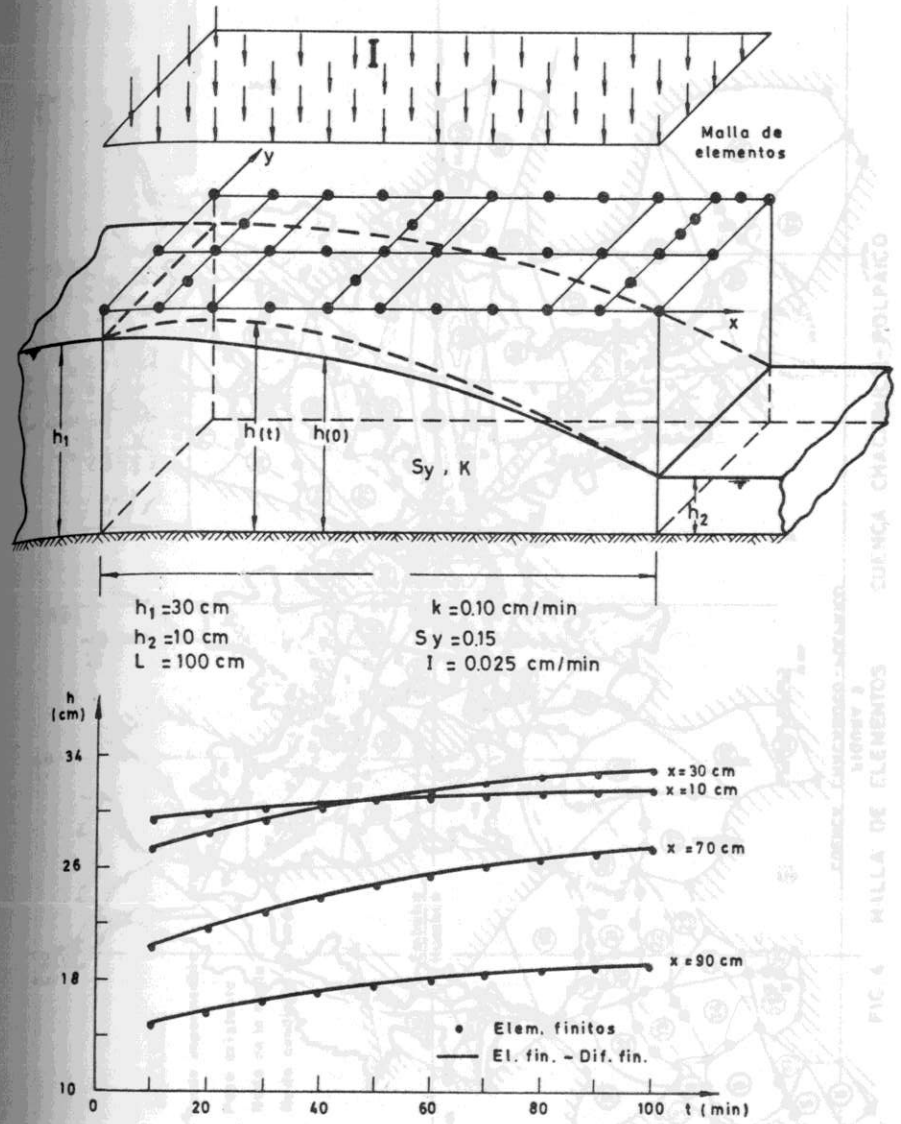
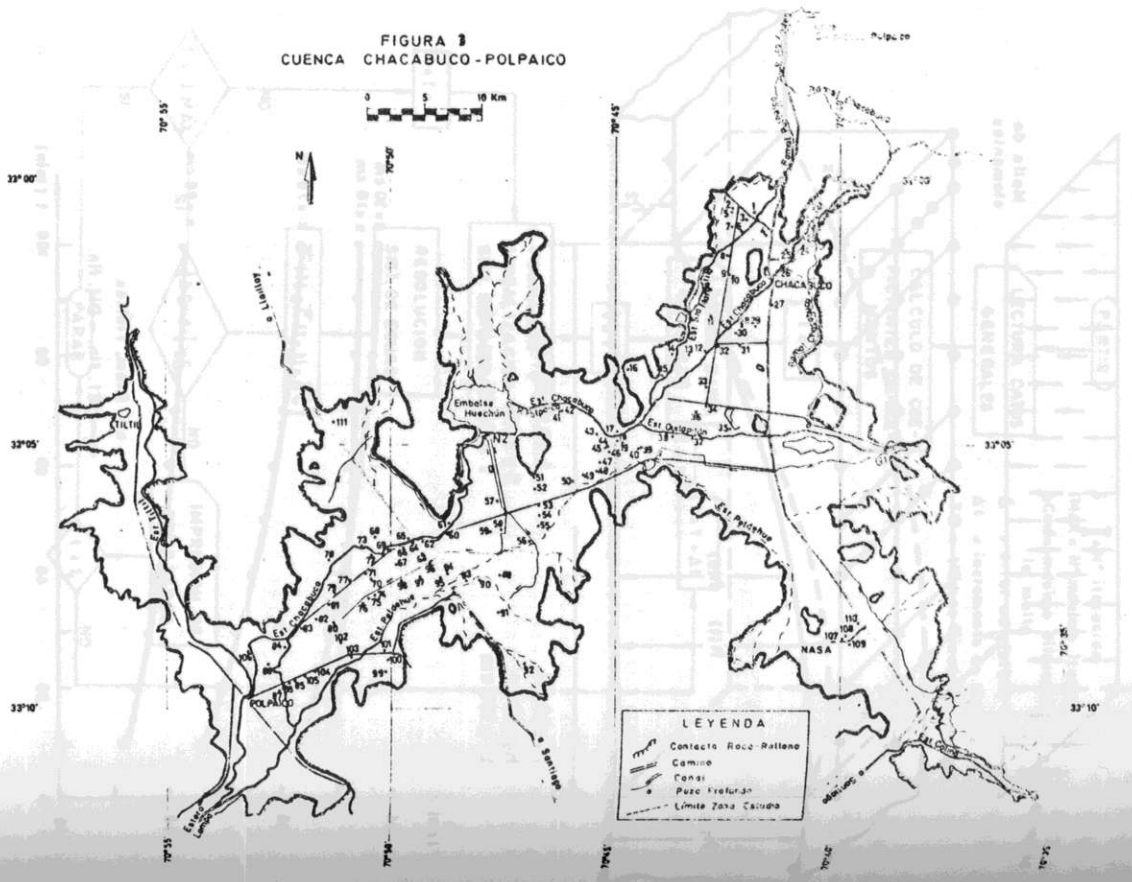



FIG. 2 VALIDACION DEL MODELO

FIGURA 3
CUENCA CHACABUCO - POLPAICO





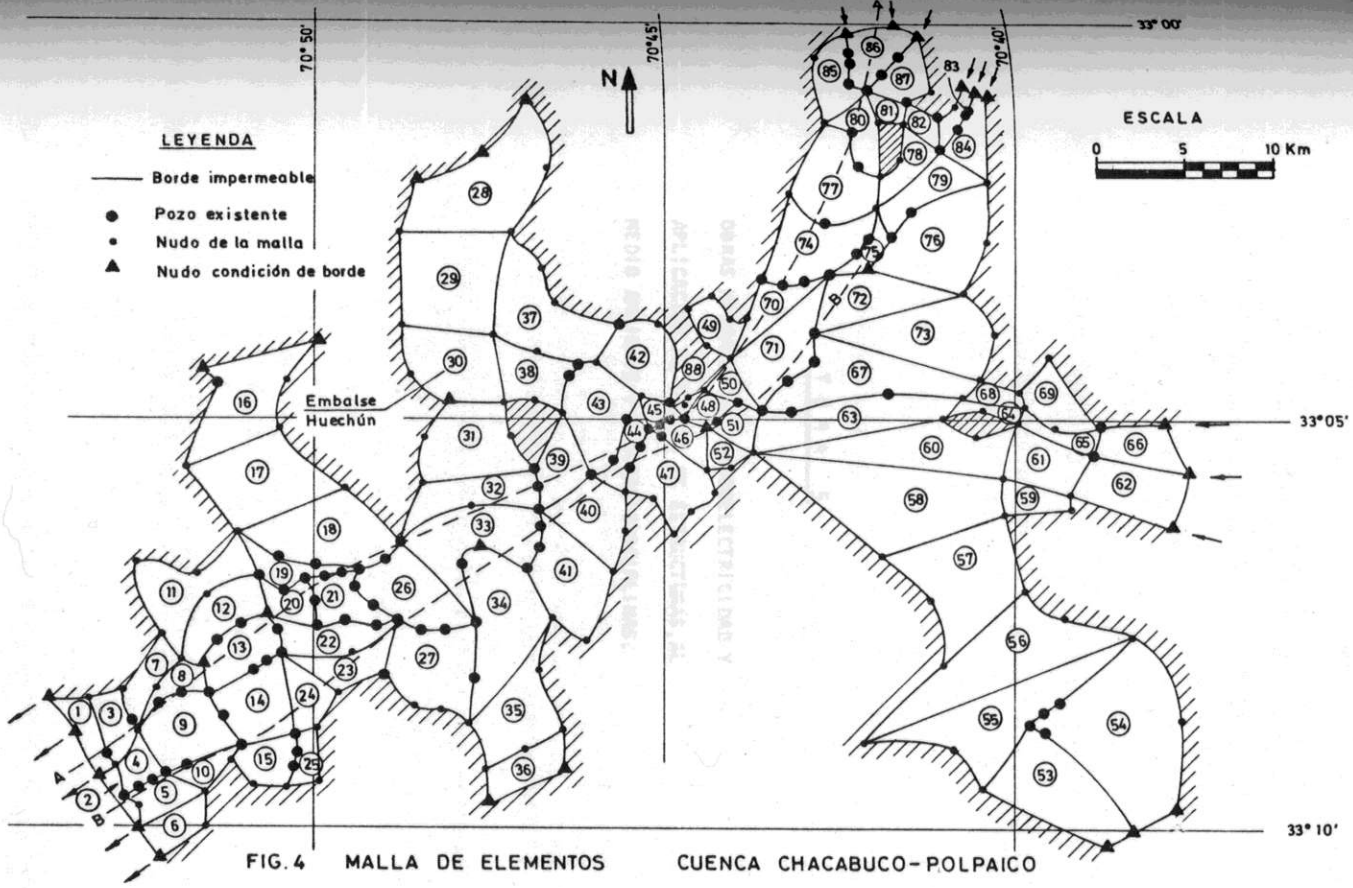




FIG. 4 MALLA DE ELEMENTOS CUENCA CHACABUCO-POLPAICO