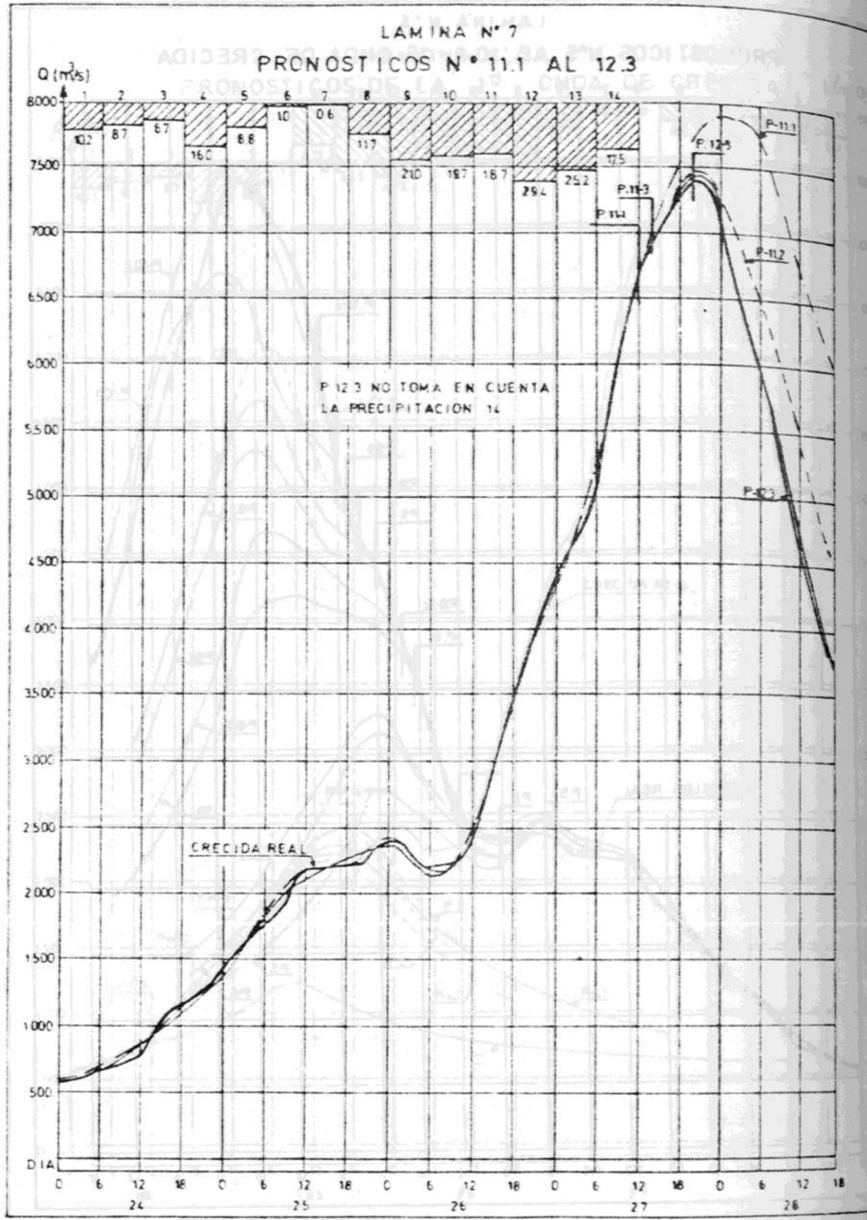

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
VII CONGRESO NACIONAL

MODELO MATEMATICO PARA LA IDENTIFICACION DE PARAMETROS EN SISTEMAS DE AGUAS SUBTERRANEAS

Guillermo Cabrera Fajardo (1)
Félix Orlando Pérez Soto (2)

RESUMEN

Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos isoparamétricos mediante el cual se efectúa el ajuste automático de parámetros elásticos de acuíferos confinados (transmisibilidad y almacenamiento) en el proceso de calibración de modelos de simulación. Para ello se plantea una función objetivo MINMAX correspondiente a la minimización de la máxima diferencia en valor absoluto entre el potencial hidráulico simulado y el observado en un número limitado de nudos de la malla de elementos. Las restricciones son el cumplimiento de la ecuación de respuesta dinámica linealizada y límites superiores e inferiores para los parámetros dentro de cada elemento. La linealización de la ecuación de respuesta se obtiene de un desarrollo en serie de Taylor en torno a los valores del potencial hidráulico y de los coeficientes elásticos.

El modelo probado para casos de solución analítica conocida, muestra resultados satisfactorios que señalan su potencialidad para extender su uso a modelos de sistemas reales.

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

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

INTRODUCCION

El estudio de modelos de simulación matemática para describir el comportamiento de sistemas de aguas subterráneas reales ha recibido una enorme atención en los últimos años, habiéndose desarrollado técnicas que en cuanto a validez y sofisticación abarcan un amplio espectro. No obstante lo anterior, una de las deficiencias que presentan esos modelos es que nunca se dispone de una ajustada estimación de los valores de las constantes elásticas que caracterizan el sistema acuífero en toda el área modelada de modo que se hace necesario realizar un proceso de ajuste de parámetros a fin de verificar que el modelo efectivamente representa el sistema estudiado. Dicho ajuste de parámetros se efectúa mediante métodos de prueba y error en que debe repetirse la simulación numerosas veces hasta conseguir con las variaciones arbitrarias de los parámetros, que los niveles freáticos o piezométricos simulados se asemejen a los medidos en algunos puntos del área de estudio.

A raíz de lo anterior, ha surgido el interés por resolver el problema de identificación de parámetros para hacer más eficiente el proceso general de simulación. En este trabajo se ha desarrollado un modelo matemático mediante el cual se efectúa el ajuste automático de parámetros de acuíferos confinados (transmisibilidad y almacenamiento). Para ello se plantea una función objetivo del tipo Minmax correspondiente a la minimización de la máxima diferencia en módulo entre el potencial hidráulico calculado y su valor conocido en un número limitado de puntos donde se tiene observaciones a lo largo del tiempo. Por otra parte, las restricciones se refieren al cumplimiento de la ecuación de respuesta dinámica linealizada y a límites superiores e inferiores de los parámetros. El modelo que representa el sistema se desarrolló considerando elementos finitos isoparamétricos.

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación que desarrolla el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile para el cual ha recibido financiamiento del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico.

ENFOQUES DEL PROBLEMA

Desde el punto de vista físico-matemático puede decirse que el problema inverso de determinación de los parámetros elásticos en un sistema de aguas subterráneas está mal planteado, puesto que en general la solución no es única. En efecto, para una determinación única de estos parámetros donde se tiene medidas del nivel piezométrico en función del tiempo, dichas medidas deben abarcar todos los puntos del dominio, situación que resulta imposible conseguir en un caso real. Para el caso en que las medidas disponibles abarcan un número limitado de puntos, que es la situación típica, se ha demostrado la existencia de este problema intrínseco de no unicidad (Chavent, 1974).

Existen dos formas para enforcar el problema inverso de identificación de parámetros. La primera de ellas, que corresponde al denominado método directo, requiere conocer a lo largo del tiempo el potencial y sus derivadas en toda la región de flujo, de modo que a partir de las condiciones de borde y de datos de caudales conocidos, se obtiene una solución directa de la ecuación de respuesta. Por otra parte, en la segunda forma de solución, el número de puntos dentro del área de estudio donde se conoce el potencial hidráulico es reducido y se debe recurrir a métodos iterativos que emplean algoritmos de optimización (Yeh, 1985).

Si las variaciones del potencial y sus derivadas se conocen en toda la región del flujo y si los errores en las medidas del potencial son despreciables, la ecuación de respuesta original se transforma en una ecuación diferencial parcial de primer orden que es lineal, del tipo hiperbólico, cuyas incógnitas son los parámetros desconocidos, y que puede resolverse en forma directa. Cuando el número de observaciones es reducido, se debe realizar previamente interpolaciones hasta completar la información requerida. La mala aproximación de los valores que esta interpolación tenga se propaga a la ecuación de respuesta y de esta forma pueden generar múltiples errores en el resultado final de asignación de valores a los parámetros. En este sentido es necesario recordar que el coeficiente de transmisibilidad es especialmente sensible a pequeñas variaciones en los niveles piezométricos.

En cuanto a los métodos indirectos, en que el número de observaciones es limitado, el criterio generalmente usado es el de minimización de la diferencia entre el potencial calculado y el observado, lo que se establece a través de una función que puede ser del tipo directo, mínimos cuadrados, o de otra forma. La ventaja principal de este método es que resulta aplicable a casos reales en que se utiliza la información disponible de datos medidos, mientras que la desventaja está en que la minimización es casi siempre no lineal y no convexa. Los algoritmos de optimización usados para la minimización parten de un conjunto de estimaciones iniciales de los parámetros, mejorando en un proceso iterativo hasta que la respuesta del modelo da resultados lo suficientemente cercanos a los datos medidos.

En la literatura existen diversos ejemplos del uso de técnicas de programación matemática utilizadas para resolver el problema inverso de identificación de parámetros. Entre otros pueden mencionarse procedimientos de búsqueda de gradientes (Janhs, 1966), de programación lineal (Slater y Durrer, 1971), programación cuadrática (Yeh, 1975), método de Newton - Raphson (Neuman y Yakowitz, 1979), etc.

MODELO MATEMATICO

El modelo que aquí se presenta está planteado sobre la base de un enfoque indirecto. En este caso la predicción o identificación de los parámetros elásticos del sistema acuífero (coeficiente de transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento), queda estructurada en torno a dos modelos principales : un modelo de optimización y un modelo de simulación. En el primero de ellos se plantea una función objetivo formada a partir de las diferencias entre el potencial hidráulico, como variable, y un conjunto de observaciones de dicho potencial, teniendo como restricciones las ecuaciones de respuesta del sistema y límites superiores e inferiores para los parámetros a determinar. En el modelo de simulación se resuelve directamente las ecuaciones de respuesta del sistema a partir de los valores de los parámetros obtenidos del modelo de optimización para así obtener el potencial hidráulico, el que se compara según algún criterio con el conjunto de observaciones de dicho potencial. De esta forma se conoce el grado de representatividad que caracteriza a los parámetros calculados.

El modelo es aplicable a un sistema acuífero confinado en que la ecuación de flujo en régimen impermanente es :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T\frac{\partial h}{\partial y}\right) - Q = S\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1)$$

en la cual h = potencial hidráulico (L); Q representa las fuentes puntuales de descarga del acuífero (L^3/T); T es el coeficiente de transmisibilidad (L^2/T) y S el coeficiente de almacenamiento.

La ecuación (1) puede transformarse en un sistema de ecuaciones diferenciales en el tiempo discretizándola espacialmente mediante el uso de elementos finitos isoparamétricos de acuerdo con el método residual de Galerkin.

Las ecuaciones así obtenidas escritas en forma matricial conforman las ecuaciones de respuesta del sistema acuífero (2)

$$A(\underline{p})\dot{\underline{h}} + B(\underline{p})\underline{h} + \underline{g} = \underline{0} \qquad (2)$$

en donde $\underline{h}$ y $\underline{p}$ son los vectores de las variables de estado (potencial hidráulico) y parámetros del sistema, respectivamente. Las matrices de coeficientes A y B son ahora funciones de los parámetros desconocidos y $\underline{g}$ es un vector que contiene los términos correspondientes a las acciones externas sobre el sistema (caudales, infiltración, etc.).

El modelo de optimización queda constituido entonces de la siguiente forma :

$$\text{Problema A :} \quad \min_{\underline{p}} \max_{l} |\underline{h}_l - \underline{h}_l^{obs}| \qquad l \in \Gamma \tag{3a}$$

$$\text{sujeto a :} \quad A(\underline{p})\dot{\underline{h}} + B(\underline{p})\underline{h} + \underline{g} = \underline{0} \tag{3b}$$

$$\underline{p}_{min} \leq \underline{p} \leq \underline{p}_{max} \tag{3c}$$

en donde Γ es un conjunto que define la ubicación en el espacio y el tiempo de las observaciones $\underline{h}_l^{obs}$; $\underline{p}_{max}$ y $\underline{p}_{min}$ son valores máximos y mínimos para los parámetros.

La función objetivo puede transformarse en la forma típica de un problema de programación lineal introduciendo una variable adicional μ que debe minimizarse, y agregando un nuevo conjunto de restricciones del tipo $|\underline{h}_l - \underline{h}_l^{obs}| \leq \mu$. Sin embargo, este último es un problema de programación no-convexo debido a la dependencia no-lineal de las ecuaciones de respuesta sobre las variables de estado y los parámetros del problema, los que aparecen multiplicándose. A fin de transformar el modelo de optimización no-convexo en un problema de programación lineal se aplica el método de Newton-Raphson.

Para obtener las ecuaciones de respuesta linealizadas del problema, primero se discretiza las ecuaciones dinámicas de respuesta con un esquema implícito de diferencias finitas hacia atrás, usando un incremento de tiempo Δt. Las ecuaciones resultantes son :

$$A(\underline{p})\left\{\frac{\underline{h}_n - \underline{h}_{n-1}}{\Delta t}\right\} + B(\underline{p})\underline{h}_n + \underline{g}_n = \underline{0}\ , \qquad n = 1,\ldots, T^* \tag{4}$$

donde T^* es la duración del período de muestreo y $\underline{h}_0$ es el vector de condiciones iniciales del potencial hidráulico en el sistema.

Si se tiene estimaciones iniciales de las variables de estado $\underline{h}^1$ y de los parámetros desconocidos $\underline{p}^1$, entonces las ecuaciones linealizadas se obtienen expandiendo la ecuación (4) en torno a estas estimaciones con una serie de Taylor generalizada y truncando los términos de segundo orden y superiores

$$A(\underline{p}^1)\left\{\frac{\underline{h}_n^2 - \underline{h}_{n-1}^2}{\Delta t}\right\} + B(\underline{p}^1)\underline{h}_n^1 + \underline{g}_n + \sum_{j=1}^{m}\left\{\left.\frac{\partial A}{\partial p_j}\right|_1\left(\frac{\underline{h}_n^1 - \underline{h}_{n-1}^1}{\Delta t}\right) + \right.$$

$$\left.\left.\frac{\partial B}{\partial p_j}\right|_1 \underline{h}_n^1\right\}(p_j^2 - p_j^1) + \left\{\frac{A(\underline{p}^1)}{\Delta t} + B(\underline{p}^1)\right\}(\underline{h}_n^2 - \underline{h}_n^1) -$$

$$\frac{A(\underline{p}^1)}{\Delta t}(\underline{h}_n^2 - \underline{h}_n^1) = \underline{0} \qquad n = 1,2,\ldots,T^* \tag{5}$$

donde se supone que existen m parámetros desconocidos y $\frac{\partial A}{\partial p_j}$ es la derivada de la matriz A con respecto al parámetro p_j.

Si la ecuación (5) se plantea para los n períodos de tiempo, entonces las ecuaciones de respuesta linealizadas pueden escribirse compactamente como :

$$G\underline{x} = \underline{b} \tag{6}$$

en donde la matriz G de coeficientes está compuesta de los valores conocidos de los parámetros y de las variables dependientes y $\underline{b}$ es un vector que es función de las acciones externas al sistema acuífero que lo afectan, y de las condiciones de borde. El vector $\underline{x}$ contiene las variables de estado y los parámetros para todos los períodos de tiempo, es decir :

$$\underline{x} = (h_0^2, h_1^2, \ldots, h_n^2, \underline{p}^2)^T \tag{7}$$

Finalmente el modelo de optimización queda constituido de la siguiente forma :

Problema B :

$$\min_{\underline{p}} \mu \tag{8a}$$

sujeto a :

$$|h_l - h_l^{obs}| \leq \mu \qquad l \in \Gamma \tag{8b}$$

$$G\underline{x} = \underline{b} \tag{8c}$$

$$\underline{p}_{min} \leq p \leq \underline{p}_{max} \tag{8d}$$

El ciclo básico del algoritmo de identificación es entonces el siguiente :

i) Obtener estimaciones iniciales de los valores de los parámetros y variables de estado del sistema.

ii) Generar las ecuaciones de respuesta linealizadas de la ecuación (5) y plantear el problema de optimización (Problema B).

iii) Resolver el problema de optimización mediante programación lineal (algoritmo Simplex).

iv) Efectuar la simulación directa (ecuación (4)) a partir de los parámetros obtenidos del modelo de optimización y confrontarlos con los valores observados del potencial usando el criterio siguiente :

$$\varepsilon = \sum_{l \in \Gamma} (h_l - h_l^{obs})^2 \tag{9}$$

v) Si este criterio es menor que un valor preestablecido ε_0, detenerse; en caso contrario volver a ii).

VALIDACION TEORICA Y ANALISIS DE SENSIBILIDAD

El sistema usado para la validación teórica del modelo de identificación corresponde a un acuífero confinado, isotrópico, homogéneo y semi-infinito en el cual se tiene un nivel piezométrico constante debido a la presencia de un cuerpo de agua en un extremo ($x = 0$). Súbitamente ese nivel sube en H_0 ($t = 0$) y esa perturbación se propaga por el sistema ($x > 0$, $t > 0$). Si el coeficiente de transmisibilidad del acuífero es T y el de almacenamiento S, el nivel piezométrico perturbado por sobre su posición inicial constante puede calcularse como (Carslaw y Jaeger, 1959) :

$$h(x,t) = H_0 \operatorname{erfc} \{x/2\sqrt{T \cdot t/S}\} \tag{10}$$

en que erfc es la función de error complementario.

Para la implementación del modelo se utilizó una malla de elementos finitos isoparamétricos en planta con 3 cuadriláteros de lados cúbicos conformando un total de 20 nudos (Figura 1). Las condiciones de borde en el extremo de aguas abajo se han considerado variables de acuerdo al valor que a esa distancia del origen entrega la solución analítica. El incremento de tiempo adoptado es de 100 seg y el largo total del sistema 27 m.

A fin de efectuar comparaciones y realizar el análisis de sensibilidad se consideró tres situaciones para la relación entre la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento $D = T/S$, cuales fueron 10, 50 y 100 m^2/s.

Con el objeto de probar la validez del modelo de simulación, se procesó este inicialmente para las tres condiciones de D impuestas y sus resultados se compararon con la solución analítica. En la Tabla 1 se muestra esta comparación para el caso de $D = 50$ m^2/s con $t = 100$ (s) y 200 (s), suponiendo $H_0 = 1.0$ m. En ella se observa que la diferencia es menor de un

1.5% en todos los casos, observándose que esta diferencia es más acentuada para t = 100 s y en los nudos centrales del sistema para ambos intervalos de tiempo.

TABLA 1. SOLUCION ANALITICA Y VALORES SIMULADOS D = 50 m^2/s

Nudo	t = 100 s analítico (m)	t = 100 s simulado (m)	t = 100 s dif. (%)	t = 200 s analítico (m)	t = 200 s simulado (m)	t = 200 s dif. (%)
3-4	0.976	0.973	0.3	0.983	0.983	0
5-6	0.952	0.945	0.7	0.966	0.966	0
7-8	0.928	0.918	1.1	0.949	0.949	0
9-10	0.905	0.892	1.4	0.932	0.932	0
11-12	0.881	0.868	1.5	0.915	0.916	0.1
13-14	0.857	0.846	1.3	0.899	0.899	0
15-16	0.834	0.825	1.1	0.882	0.882	0
17-18	0.810	0.805	0.6	0.865	0.805	0

La validación del modelo de identificación de parámetros y su análisis de sensibilidad se realizó considerando tres casos, cada uno con distinto número de puntos con observación del potencial. Además, se tomó en cuenta diferentes estimaciones iniciales, tanto de los parámetros como de los potenciales y diferentes valores del parámetro a identificar. En lo que sigue se resumen los resultados obtenidos para esos tres casos.

Caso 1. Se utilizan ocho nudos con observaciones del potencial, los que quedan incorporados en la función objetivo del modelo de optimización. Estos nudos son los indicados en la Figura 1 con los números 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18. Las tres situaciones consideradas son las que se indican en la Figura 2 correspondientes a diferentes valores del parámetro homogéneo D a identificar. En esa figura se aprecia la evolución del criterio de suma de diferencias cuadradas (ε) hasta que es menor que un valor $\varepsilon_0 = 5 \times 10^{-5}$ (m), lográndose la convergencia en las tres situaciones en menos de 8 iteraciones inclusive. Sin embargo, en forma global el caso D = 50 m^2/s es el que mejor se comporta. Los límites impuestos tanto a T como a S son : 0.001 (inferior) y 0.05 (superior) para los casos de D = 10 y D = 50 y de 0.001 (inferior) y 0.1 (superior) para D = 100. En los tres casos los parámetros obtenidos finalmente concuerdan con los valores correctos salvo diferencias de 10% para el caso D = 10 m^2/s.

Para apreciar la evolución del potencial en el transcurso de las iteraciones, en la Figura 3 se presentan los valores de éste correspondientes a los nudos 9 y 10 (x = 12 m) para el tiempo t = 100 (s). En los tres casos la convergencia es prácticamente completa verificándose el buen ajuste efectuado por el modelo de optimización.

En este primer caso, es decir con 8 nudos con observación de potencial, el modelo se comporta eficientemente ya que la información disponible cubre casi completamente el sistema acuífero por lo que para la identificación desde el punto de vista del algoritmo es una ventaja. Sin embargo, en los casos prácticos esta situación no es la corriente teniéndose en general escasa información del potencial en proporción al total de puntos discretizados de la malla de un modelo de simulación tradicional. En los dos casos siguientes se aborda esta situación al reducirse el número de nudos con observación disponible de manera de que cubran menos de un 20% del total de nudos.

Caso 2. Se consideran 4 nudos con observación de potencial, cuales son los números 6, 10, 14 y 18. Se consideró dos situaciones. La primera corresponde a identificar un parámetro homogéneo de 50 m^2/s y la segunda para un valor de 10 m^2/s. Sin embargo, para esta última, al partir de estimaciones iniciales demasiado alejadas de la situación real la convergencia si bien fue rápida junto con una buena exactitud en los potenciales alcanzados, los parámetros obtenidos fueron bastante diferentes al valor correcto (Figuras 4 y 5). En esto influye la poca sensibilidad del potencial en relación a los parámetros elásticos en un acuífero confinado. Los límites impuestos a los parámetros fueron 0.001 (inferior) y 0.05 (superior) tanto para T como para S. Otro efecto observado es que como en todo algoritmo de programación lineal tipo SIMPLEX la búsqueda del óptimo se va realizando por los vértices del espacio factible, de ahí resulta que la convergencia en cuanto a los parámetros haya empeorado para el caso de D = 10 m^2/s, cuyo valor no corresponde a bordes o vértices factibles del espacio de soluciones.

Caso 3. Se consideró sólo 2 nudos con observación de potencial indicados por los números 8 y 14. Se probó también dos situaciones, correspondientes a valores de D = 50 m^2/s y D = 10 m^2/s. Los resultados de la aplicación del criterio de suma de diferencias cuadradas (ε) indican que para la primera situación la convergencia es rápida (5 iteraciones). Los valores finales del parámetro a determinar son los correctos en dos de los casos tratados y resultaron con una diferencia del 16% en el tercero. En cuanto al caso de D = 10 m^2/s la convergencia fue más lenta y la identificación del parámetro fue mucho más inexacta (50% de diferencia). Esto puede deberse a las mismas consideraciones hechas en el caso 2. En cuanto al potencial simulado en cada iteración pudo observarse que la convergencia es buena, llegándose al término de las iteraciones a los valores correctos en todos los casos probados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del presente trabajo pueden extraerse las siguientes conclusiones :

a) El planteamiento y resolución del problema inverso de identificación de parámetros en sistemas de aguas subterráneas, estudiados mediante modelos de simulación, es conveniente enfocarlo mediante métodos indirectos, aplicables al caso real en que el número de observaciones del nivel piezométrico es limitado.

b) A partir de estimaciones iniciales de los parámetros y variables de estado del sistema, y luego de linealizar las ecuaciones de respuesta, la resolución del problema de minimizar las diferencias entre potenciales calculados y observados se plantea empleando programación lineal, y luego se aplica el modelo de simulación con los parámetros óptimos calculados para verificar los potenciales. En el caso de la validación teórica, los valores del potencial obtenidos de la solución analítica, del modelo de simulación de elementos finitos isoparamétricos y del modelo de identificación con un número apreciable de observaciones son muy parecidos, salvo diferencias que pueden alcanzar hasta un 7%, dependiendo del valor del parámetro D = T/S, el cual varía desde 10 m^2/s hasta 100 m^2/s.

c) Es importante partir con estimaciones de las variables de estado (parámetros y potenciales), que sean lo más cercanas a los valores verdaderos, ya que de esto depende en gran medida, que se verifique efectivamente la convergencia y que sea alcanzada rápidamente. Esto sugiere que debe efectuarse previamente a la aplicación de un modelo de identificación una cuidadosa elección tanto de los valores iniciales para los parámetros, como de los valores que tendría o debiera tener la distribución del potencial en el sistema para las condiciones dadas por la situación real.

El modelo presentado en este trabajo, pretende usarse en la identificación de parámetros de un sistema real de aguas subterráneas, cual es el de la cuenca Chacabuco-Polpaico, en la que se ha desarrollado un modelo de simulación de elementos finitos de las mismas características.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Carslaw H.S. y J.C. Jaeger, 1959. Conduction of Heat in Solids. 2ª edición, Oxford Univ. Press, London.

Chavent G., 1974. Identification of Parameters in Distributed

Systems. ASME, United Engineering Center, New York, 31-48.

Jahns H.O., 1966. A rapid method for obtaining a two-dimensional reservoir description from well pressure response data. Soc. Pet. Eng. J. Vol 6 N° 4, 315-327.

Neuman S.P. y S. Yakowitz, 1979. A statistical approach to the inverse problem of aquifer hydrology. 1. Theory. Water Resourc. Research. Vol 15 N° 4, 845-860.

Slater G.E. y E.J. Durrer, 1971. Adjustment of reservoir simulation models to match field performance. Soc. Pet. Eng. J. Vol 11 N° 3, 295-305.

Yeh W. W-G., 1975. Aquifer parameter identification. J. Hydraulic Div. Am. Soc. Civ. Eng. Vol 101, 1197-1209.

Yeh W. W-G., 1985. Review of parameter identification procedures in Groundwater Hydrology : The inverse problem. Enviado a Water Resources Research.

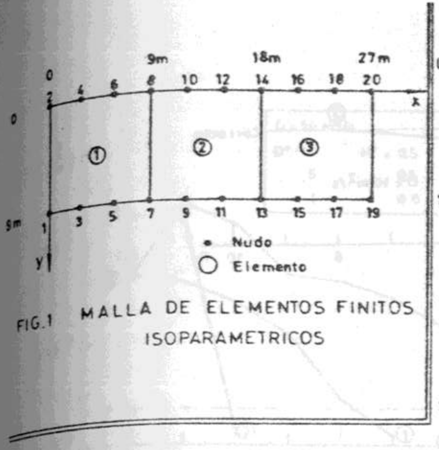

FIG.1 MALLA DE ELEMENTOS FINITOS ISOPARAMETRICOS

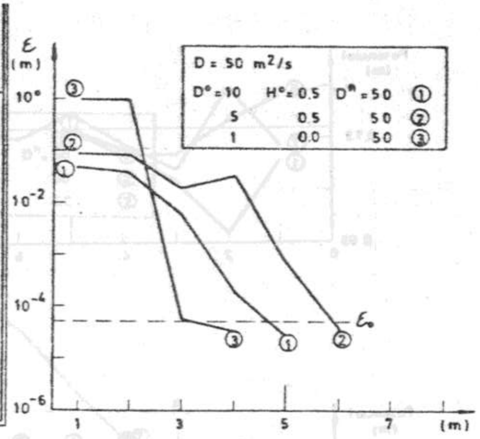

FIG. 2a

D° = Estimación del parámetro a identificar (D)
H° = Estimación inicial del potencial en todos los nudos
Dⁿ = Valor obtenido al final de las iteraciones

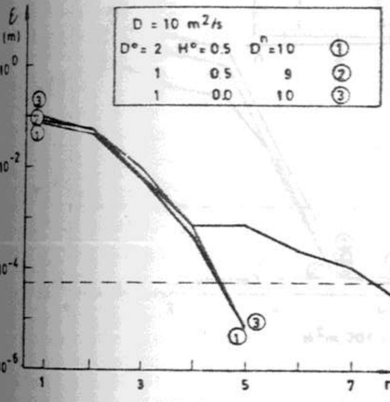

FIG. 2b

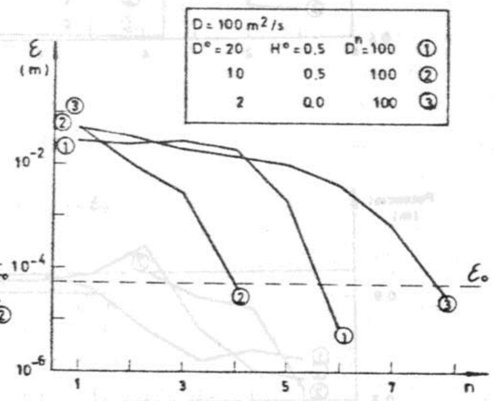

FIG. 2c

FIG.2 CASO 1 OCHO PUNTOS CON OBSERVACION DE POTENCIAL

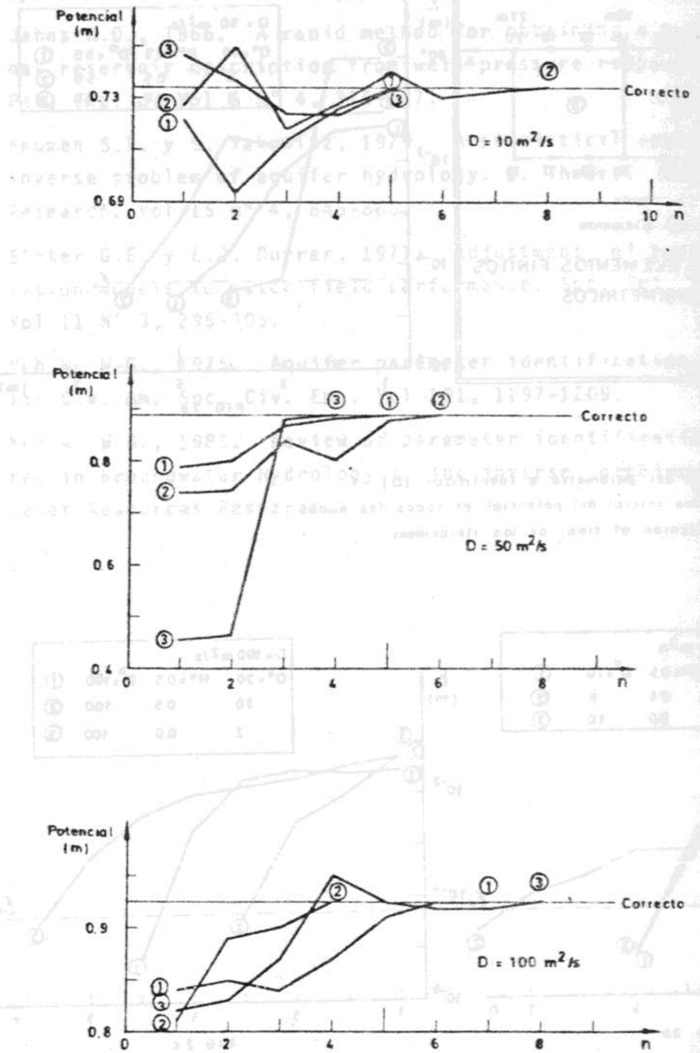

FIG. 3 CASO 1 POTENCIAL SIMULADO EN CADA ITERACION EN

X = 12 m t=100 s

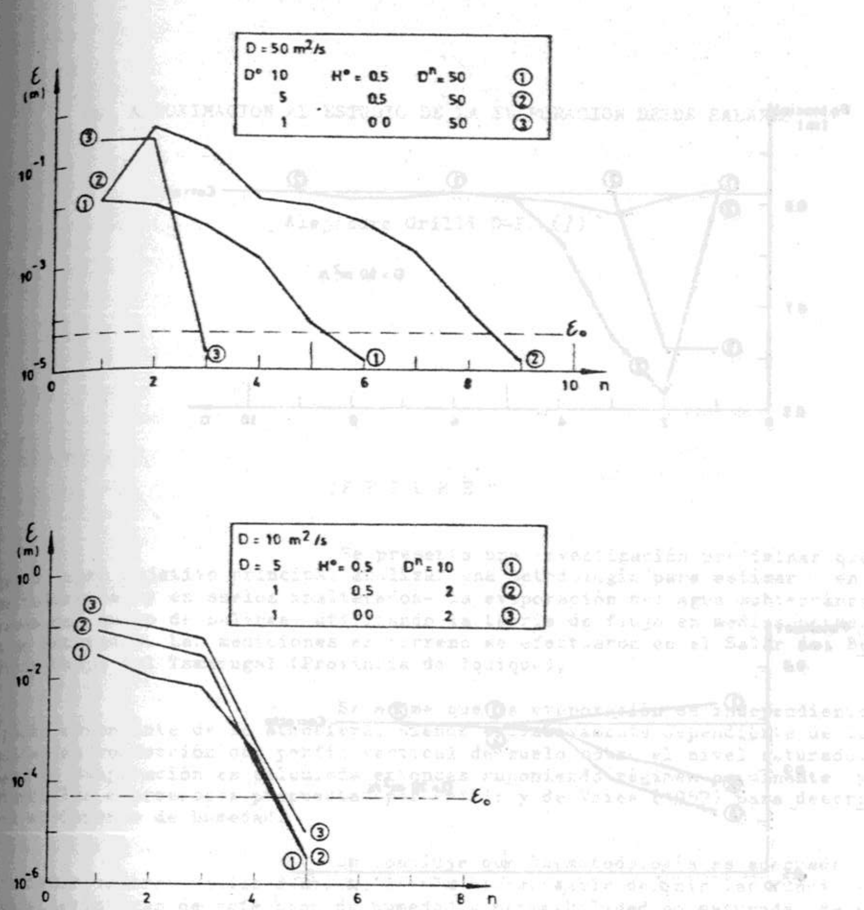

FIG. 4 CASO 2 CUATRO PUNTOS CON OBSERVACION DE POTENCIAL

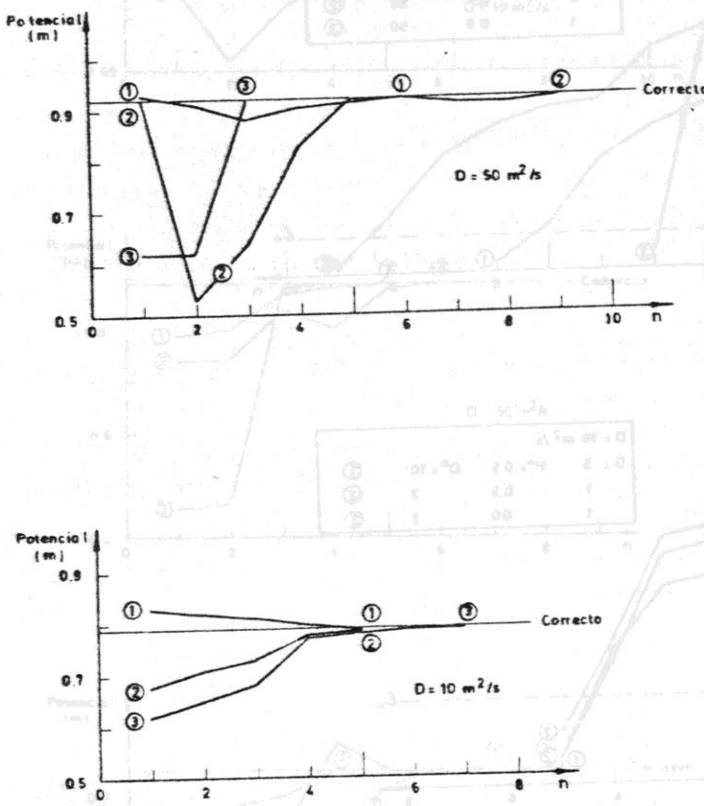

FIG 5 CASO 2 POTENCIAL SIMULADO EN CADA ITERACION EN X= 9 m t =100s

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VII CONGRESO NACIONAL

UNA APROXIMACION AL ESTUDIO DE LA EVAPORACION DESDE SALARES

Alejandro Grilli D-F. (1)

R E S U M E N

Se presenta una investigación preliminar que ha tenido como objetivo principal analizar una metodología para estimar en forma indirecta -y en suelos inalterados- la evaporación del agua subterránea a través del suelo de salares, utilizando la teoría de flujo en medios permeables no saturados. Las mediciones en terreno se efectuaron en el Salar de Bellavista-Pampa del Tamarugal (Provincia de Iquique).

Se asume que la evaporación es independiente del poder evaporante de la atmósfera, siendo exclusivamente dependiente de la capacidad de conducción del perfil vertical de suelo sobre el nivel saturado. La tasa de evaporación es calculada entonces suponiendo régimen permanente y aceptando las expresiones propuestas por Philip y de Vries (1957) para describir el movimiento de humedad.

Se concluye que la metodología es adecuada para estimar valores medios diarios, siendo recomendable definir las funciones características de retención de humedad y permeabilidad no saturada de los suelos involucrados, a partir de mediciones en terreno. Como resultados preliminares se obtienen tasas de evaporación de 0,44 y 0,60 mm/dia, para profundidades del nivel freático de 1,50 y 1,00 m, los cuales son consistentes con las mediciones lisimétricas de Toro (1967) realizados en la zona de Pintados (Pampa del Tamarugal).

(1) : Ingeniero Civil. Dirección General de Aguas.