

8. ESPILDORA, B.

: "Estimación de curvas de intensidad-duración-frecuencia mediante coeficientes generalizados", Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, 1er. Coloquio Nacional, Stgo., 1971.

9. ARRETZ, ALBERTO

: "Método de Grunsky para el cálculo de crecidas", Revista Chilena de Ingeniería Nº 2, Stgo., 1943.

10. TAYLOR, S y ASHCROFT, G.

: "Physical Edaphology", W.H.Freeman, San Francisco, 1972.

IV COLOQUIO NACIONAL

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA SIMULAREL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS DE AGUAS SUETERRANEAS.APLICACION AL CASO DE LA CUENCA DEL RIO PUTAENDO

Guillermo Cabrera Fajardo (1)

Sergio Azzari Maldonado (2)

RESUMEN

Se ha desarrollado un modelo de simulación basado en la técnica numérica de elementos finitos y en el método residual de Galerkin para representar el comportamiento transiente de un sistema de aguas subterráneas en el cual se producen recargas variables por efecto de precipitaciones, excesos de riego e infiltración desde un cauce superficial, y descargas variables debidas al bombeo desde pozos.

Los resultados preliminares obtenidos de su aplicación al caso de la cuenca del río Putaendo indican un buen ajuste entre los niveles de aguas subterráneas simulados y los niveles medidos en pozos de bombeo para el período de calibración.

Este trabajo forma parte de un estudio actualmente en desarrollo en el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile, cuyo objetivo central es la formulación de una metodología que permita optimizar el aprovechamiento de aguas subterráneas en una cuenca sometida a explotación.

(1) Profesor e Investigador, Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Obras Civiles, Universidad de Chile.

(2) Ayudante de Investigación, Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Obras Civiles, Universidad de Chile.

La explotación de los recursos hídricos de una cuenca destinados a suplir las demandas de los diferentes usuarios a menudo lleva asociado el uso conjunto de recursos superficiales y subterráneos.

En áreas de la Zona Central de nuestro país, en que parte importante del recurso se destina al riego, la disponibilidad de agua en los cauces superficiales se hace insuficiente en períodos de máximo consumo para suplir las demandas, incluso en cuencas con respaldo nival en que los caudales máximos en los ríos ocurren durante el verano. Debido a ello, en ciertos casos los recursos de aguas subterráneas se explotan hasta niveles peligrosos para conseguir seguridades altas de riego, y en otros no se utilizan importantes áreas agrícolas que podrían aprovecharse si las aguas subterráneas se sometieran a una explotación más intensiva.

El objetivo fundamental del presente estudio es la formulación de una metodología que permita optimizar el aprovechamiento del recurso de aguas subterráneas en un sistema acuífero parcialmente explotado. Para ello se ha planteado la formulación de un modelo de simulación del comportamiento del sistema acuífero, que operado conjuntamente con un modelo de optimización, permita definir una solución de costo mínimo para ubicar nuevos pozos o baterías de pozos determinando las reglas de explotación más adecuadas.

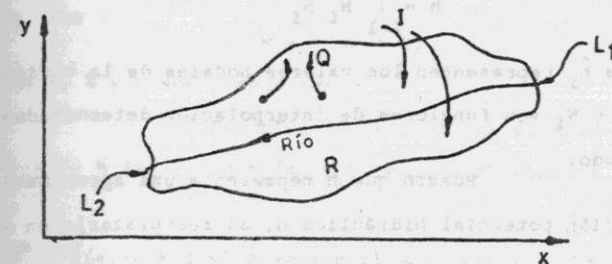
El presente trabajo incluye únicamente la formulación del modelo de simulación y su aplicación al sistema de aguas subterráneas del valle principal del río Putaendo entre Resguardo Los Patos y su confluencia con el Aconcagua.

El modelo de simulación está basado en la técnica numérica de elementos finitos en conjunto con el método residual de Galerkin. Se han utilizado elementos triangulares para representar el sistema acuífero y funciones de aproximación lineal de los niveles de la napa dentro de cada elemento.

La evolución de los niveles con el transcurso del tiempo se ha determinado haciendo uso de un esquema implícito de diferencia hacia atrás.

2.- FORMULACION DEL MODELO DE SIMULACION MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

El sistema físico analizado se ha representado esquemáticamente en la Figura 1 y corresponde a una cuenca de aguas subterráneas en la que se producen recargas variables por efecto de precipitaciones, derrames de riego e infiltración desde el río y descargas variables debido al bombeo desde pozos.



ESQUEMA DEL SISTEMA ANALIZADO

FIG. 1

La ecuación diferencial que define el escu-
rimiento de aguas subterráneas en condiciones impermanentes para este sistema puede expresarse como

$$L(h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) - (Q-I) - S_y \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

sujeta a las condiciones iniciales y de borde

$$h(x, y, 0) = H_0(x, y, 0) \quad \text{en } L_1 \text{ y } L_2 \quad (2a)$$

$$h(x, y, t) = H(x, y, t) \quad \text{en } L_1 \text{ y } L_2 \quad (2b)$$

en que h es el potencial hidráulico o altura del nivel freático con respecto a un plano horizontal de referencia; H_0 y H son valores conocidos del potencial hidráulico; T_{xx} y T_{yy} son los valores del coeficiente de transmisibilidad en las direcciones x e y , respectivamente; S_y es el coeficiente de rendimiento específico equivalente al coeficiente de almacenamiento en el caso de napas no confinadas; I es la recarga por infiltración de

4.44 precipitaciones, derrames de riego y percolación desde el río; y Q es la descarga originada por la extracción desde pozos de bombeo.

La resolución de la ecuación diferencial que rige el escurrimiento se ha planteado en base al método de los promedios ponderados. Para ello, debe inicialmente representarse la variable de estado h por una función de aproximación \hat{h} .

Si se divide la región R en una malla de m elementos triangulares en la que existen n nudos, la función de aproximación \hat{h} puede expresarse en general como :

$$\hat{h} = \sum_{i=1}^n N_i \hat{h}_i \quad (3)$$

en que los \hat{h}_i representan los valores nodales de la variable de estado y N_i son funciones de interpolación determinadas para cada nudo.

Puesto que h representa una aproximación de la función potencial hidráulico h, al reemplazarla en (1) se tendrá

$$L(\hat{h}) = r \neq 0 \quad (4)$$

donde r es el residuo o error cometido en la aproximación de h.

Para minimizar este error, se eligen n funciones de ponderación W_i , linealmente independientes, de modo que se cumpla

$$\int_R [L(\hat{h})] W_i dR = 0 \quad (i=1,2,3\dots n) \quad (5)$$

en que R es el dominio de solución.

De acuerdo al método de Galerkin, que es el más utilizado con la técnica numérica de elementos finitos, las funciones de ponderación corresponden a las funciones de interpolación N_i determinadas para cada nudo.

Según esto, la expresión general del método residual de Galerkin es la siguiente (K. Huehner, 1975)

$$\int_R L(\hat{h}) N_i dR = 0 \quad (i=1,2,3\dots n) \quad (6)$$

que es equivalente a la condición de ortogonalidad de la expresión $L(\hat{h})$ respecto a todas las funciones básicas N_i en la región R.

Para cada elemento de R puede plantearse una relación semejante a (6) del tipo

$$J^e = \int_{R^e} L(\hat{h}^e) N_i^e dR^e \quad (7)$$

Combinando las relaciones obtenidas para todos los elementos de la malla se obtiene un sistema de n ecuaciones lineales con n incógnitas que corresponden a los valores del potencial hidráulico en cada uno de los nudos.

Eligiendo una función de aproximación lineal para el potencial hidráulico, dentro de un elemento triangular e compuesto por nudos i, j, k dicha función puede expresarse como :

$$\hat{h}^e = A + Bx + Cy \quad (8)$$

en que A, B y C son constantes.

Reemplazando en (8) los valores de $\hat{h}_i(x_i, y_i)$, $\hat{h}_j(x_j, y_j)$ y $\hat{h}_k(x_k, y_k)$ resulta finalmente

$$\hat{h}^e = [(a_i + b_i x + c_i y) (a_j + b_j x + c_j y) (a_k + b_k x + c_k y)] \begin{Bmatrix} \hat{h}_i \\ \hat{h}_j \\ \hat{h}_k \end{Bmatrix} \quad (9)$$

o su equivalente

$$\hat{h}^e = [N_i \ N_j \ N_k] \begin{Bmatrix} \hat{h}_i \\ \hat{h}_j \\ \hat{h}_k \end{Bmatrix} \quad (10)$$

donde

$$a_i = (x_k y_j - x_j y_k) / 2\Delta; \quad a_j = (x_i y_k - x_k y_i) / 2\Delta; \quad a_k = (x_j y_i - x_i y_j) / 2\Delta \quad (11a)$$

$$b_i = (y_k - y_j) / 2\Delta; \quad b_j = (y_i - y_k) / 2\Delta; \quad b_k = (y_j - y_i) / 2\Delta \quad (11b)$$

$$c_i = (x_j - x_k) / 2\Delta; \quad c_j = (x_k - x_i) / 2\Delta; \quad c_k = (x_i - x_j) / 2\Delta \quad (11c)$$

en que Δ es el área del elemento triangular.

Si $T_{xx} = T_{yy} = T$ dentro del elemento e, según las ecuaciones (1) y (7) para el nudo i se tiene

$$J_i^e = \iiint \left[T \frac{\partial^2 \hat{h}^e}{\partial x^2} + T \frac{\partial^2 \hat{h}^e}{\partial y^2} - (Q^e - I^e) - S_y \frac{\partial \hat{h}^e}{\partial t} \right] N_i dxdy \quad (12)$$

Integrando por partes los términos que contienen derivadas parciales de segundo orden se obtiene

$$J_i^e = \iint (T \frac{\partial h^e}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + T \frac{\partial h^e}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y}) dx dy - \int_{L^e} (T \frac{\partial h^e}{\partial x} N_i l_x + T \frac{\partial h^e}{\partial y} N_i l_y) dL^e + \iint N_i (Q^e - I^e) dx dy + \iint N_i S_y \frac{\partial h^e}{\partial t} dx dy \quad (13)$$

donde L^e es el contorno exterior del elemento e y l_x, l_y son las componentes de un vector unitario normal al contorno L^e en las direcciones x e y , respectivamente.

Evaluando las derivadas en las expresiones (9) y (10) y reemplazándolas en (13) resulta

$$J_i^e = \iint T [b_i b_i \quad b_i b_j \quad b_i b_k] \begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \\ h_k \end{Bmatrix} dx dy + \iint T [c_i c_i \quad c_i c_j \quad c_i c_k] \begin{Bmatrix} \dot{h}_i \\ \dot{h}_j \\ \dot{h}_k \end{Bmatrix} dx dy + \iint N_i Q^e dx dy - \iint N_i I^e dx dy + \iint S_y [N_i N_i \quad N_i N_j \quad N_i N_k] \begin{Bmatrix} \frac{\partial h_i}{\partial t} \\ \frac{\partial h_j}{\partial t} \\ \frac{\partial h_k}{\partial t} \end{Bmatrix} dx dy - \int_{L^e} T N_i \left(\frac{\partial h^e}{\partial x} l_x + \frac{\partial h^e}{\partial y} l_y \right) dL^e \quad (14)$$

Puesto que el último término de la ecuación anterior corresponde al caudal de salida por unidad de longitud en el lado externo de e , deberá ser nulo en todos los elementos interiores de la malla al anularse con los términos de lados comunes en elementos adyacentes. Sin embargo, si en el contorno exterior de la región R existe un caudal q de descarga por unidad de longitud y el elemento e se ubica sobre ese borde, se cumple:

$$\int_{L^e} T N_i \left(\frac{\partial h^e}{\partial x} l_x + \frac{\partial h^e}{\partial y} l_y \right) dL^e = - \int_{L^e} N_i q dL^e \quad (15)$$

en que dicho término desaparece en el caso que no exista flujo a través de L^e o cuando la condición de borde sobre L^e se plantea en términos de un potencial hidráulico conocido como ocurre en el caso estudiado.

Debido a que el valor de Q^e dimensionalmente correspondería al caudal de descarga en el elemento e por unidad área, si desde el nudo i se extrajera Q_i el término correspondiente al caudal de descarga sería simplemente

$$\iint N_i Q^e dx dy = \frac{Q_i}{\Delta} \iint dx dy = Q_i \quad (16)$$

en que N_i evaluado en (x_i, y_i) es igual a 1.0.

En base a las mismas consideraciones pueden evaluarse los términos J_j^e y J_k^e . De esta forma la relación (7) para el elemento e sería

$$J^e = \begin{Bmatrix} J_i^e \\ J_j^e \\ J_k^e \end{Bmatrix} = TA \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_j b_i + c_j c_i & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ b_k b_i + c_k c_i & b_k b_j + c_k c_j & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \\ h_k \end{Bmatrix} + S_y \iint \begin{bmatrix} N_i N_i & N_i N_j & N_i N_k \\ N_j N_i & N_j N_j & N_j N_k \\ N_k N_i & N_k N_j & N_k N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial h_i}{\partial t} \\ \frac{\partial h_j}{\partial t} \\ \frac{\partial h_k}{\partial t} \end{Bmatrix} dx dy + \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_j \\ Q_k \end{Bmatrix} + I^e \iint \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{bmatrix} dx dy \quad (17)$$

donde I^e es la tasa neta de infiltración sobre el elemento e .

Combinando las relaciones (17) de todos los elementos de la malla se obtiene el sistema de ecuaciones final. En general la ecuación correspondiente al nudo i queda expresada por

$$\sum_{e=1}^m J_i^e = 0 \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (18)$$

Adoptando nomenclatura matricial, el sistema de n ecuaciones sería el siguiente

$$[R] \{\dot{h}\} + [P] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} + (F) = 0 \quad (19)$$

$$r_{ij} = T\Delta(b_i b_j + c_i c_j) \quad (20a)$$

$$p_{ij} = S_y \iint N_i N_j \, dx dy \quad (20b)$$

$$f_i = Q_i - I^e \iint N_i \, dx dy \quad (20c)$$

Debido a que en la ecuación matricial (19) se tienen derivadas $(\partial \hat{h} / \partial t)$, es necesario dividir el tiempo en intervalos discretos y resolver el sistema de ecuaciones para cada uno de estos intervalos en forma independiente. Mediante la utilización de un esquema numérico de diferencia hacia atrás es posible obtener la solución de la ecuación matricial en el instante t^{l+1} a partir de valores conocidos del potencial hidráulico en t^l . Dicho esquema es de la siguiente forma:

$$[R](\hat{h})^{l+1} + [P] \left(\frac{(\hat{h})^{l+1} - (\hat{h})^l}{t^{l+1} - t^l} \right) + (F)^{l+1} = 0 \quad (21)$$

en que los coeficientes de las matrices $[R]$ y $[P]$ permanecen invariables con el transcurso del tiempo ya que dependen exclusivamente de las coordenadas de la malla de elementos.

A fin de establecer las condiciones iniciales del proceso se resuelve la ecuación

$$[R](\hat{h}) = 0 \quad (22)$$

considerando como condiciones de borde el potencial hidráulico en la mayor cantidad de puntos en que es conocido para $t = 0$.

Determinando la condición de partida, la ecuación matricial a resolver en cualquier instante de tiempo es la siguiente:

$$([R] + [P]/\Delta t)(\hat{h})^{l+1} = ([P]/\Delta t)(\hat{h})^l - (F)^{l+1} \quad (23)$$

en que Δt representa la diferencia $(t^{l+1} - t^l)$.

3.- APLICACION AL CASO DEL VALLE DEL RIO PUTAENDO

3.1 Descripción de la zona

La cuenca del río Putaendo, afluente del Aconcagua, se ubica entre los $32^{\circ}15'$ y $32^{\circ}43'$ latitud Sur ocupando un área total de aproximadamente 1.300 km^2 (Figura 2).

El río Putaendo se forma por la confluencia del río Rocín y el estero Chalaco en el lugar denominado Resguardo Los Patos a 1180 m.s.n.m. El río Rocín nace cerca del límite con Argentina y recibe aportes de algunos ríos de cordillera entre los que se destaca el río Hidalgo.

El valle principal de la cuenca se ubica entre Resguardo Los Patos y la confluencia con el río Aconcagua aguas abajo de la ciudad de San Felipe, alcanzando una longitud de 36 km con un ancho promedio de unos 3 km . En este valle existe un potente relleno en el que predominan los sedimentos fluviales desde aguas arriba de la localidad de Putaendo hasta la desembocadura. La presencia de material morrénico en las cercanías de Resguardo Los Patos es indicativo de la influencia de las glaciaciones en la conformación del valle.

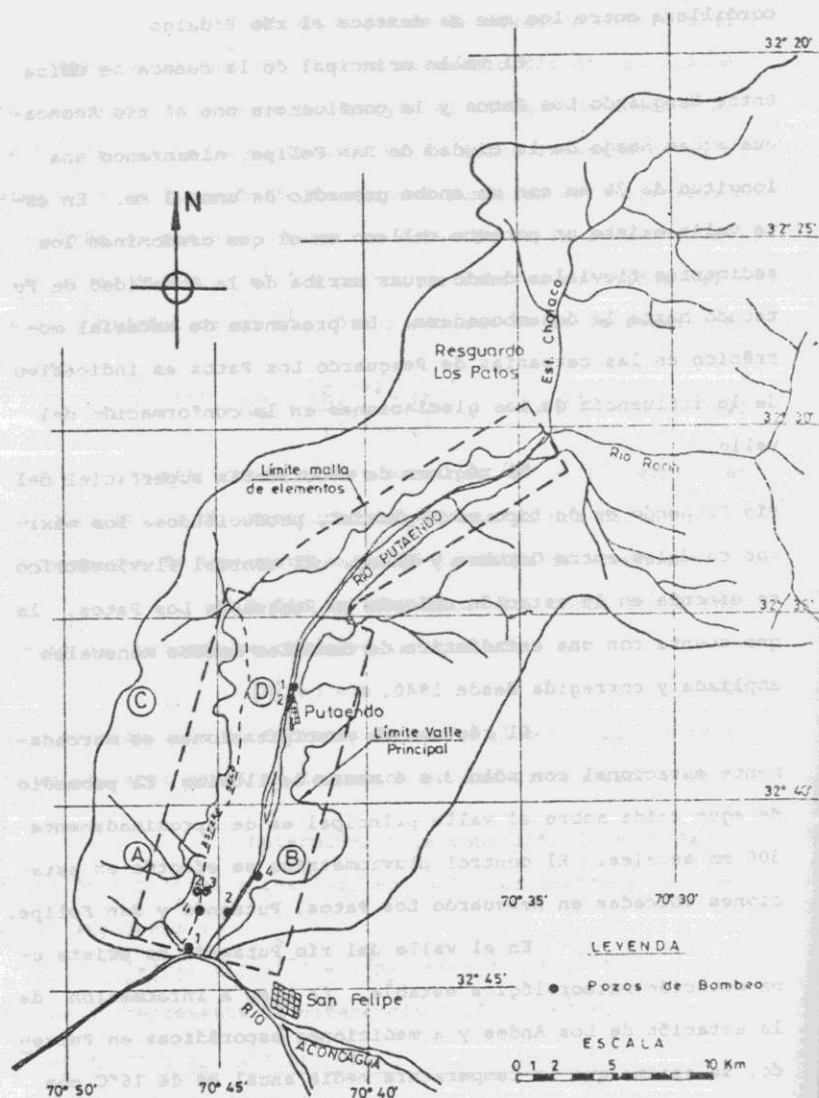
El régimen de escorrentía superficial del río Putaendo es de tipo nivo-pluvial, produciéndose los máximos caudales entre Octubre y Enero. El control fluviométrico se efectúa en la estación ubicada en Resguardo Los Patos, la que cuenta con una estadística de caudales medios mensuales ampliada y corregida desde 1940.

El régimen de precipitaciones es marcadamente estacional con sólo 3 a 4 meses de lluvias. El promedio de agua caída sobre el valle principal es de aproximadamente 300 mm anuales. El control pluviométrico se efectúa en estaciones ubicadas en Resguardo Los Patos, Putaendo y San Felipe.

En el valle del río Putaendo no existe una estación meteorológica estable. En base a información de la estación de Los Andes y a mediciones esporádicas en Putaendo, se estima que la temperatura media anual es de 16°C con máximos y mínimos mensuales de 22°C y 9°C en Enero y Junio, respectivamente.

FIGURA 2

CUENCA DEL RIO PUTAENDO



Para aplicar el modelo de simulación al sistema de aguas subterráneas del valle principal del río Putaendo, fue necesario evaluar inicialmente los parámetros que se requieren para operarlo.

Dado que en este valle existen solamente 8 pozos perforados con información, los coeficientes de transmisibilidad se estimaron a partir de resultados de pruebas de bombeo en algunos de estos pozos y fundamentalmente de acuerdo a valores determinados en estudios anteriores (A.Hojas, 1971). El coeficiente de almacenamiento o porosidad efectiva se estimó en 0.15 para todo el valle dado la presencia de material fino en la mayor parte de los estratos atravesados por los pozos de bombeo.

Para calcular la infiltración a la napa desde el lecho del río se utilizaron los resultados obtenidos de 7 experiencias de pérdidas y recuperaciones realizadas aguas abajo de Resguardo Los Patos entre 1946 y 1949 por la Dirección de Riego. En base a estos valores se ajustó la siguiente relación para las pérdidas en el río.

$$Q_{\text{perd}} = 0.075 Q_{\text{RLP}}^{1.420} \quad (\text{m}^3/\text{seg}) \quad (24)$$

en que Q_{RLP} es el caudal en m^3/seg medido en la estación fluviométrica Resguardo Los Patos. Con esta relación fue posible generar la estadística de pérdidas por infiltración en el río a partir de los registros de caudales medios mensuales en Resguardo Los Patos. Estas pérdidas se supusieron distribuidas linealmente a lo largo del río de manera que en el sector de la desembocadura se hicieran nulas.

A fin de determinar la infiltración proveniente de sectores de riego se procedió a efectuar un balance entre necesidades de agua de cultivos y disponibilidades. Para esto, se determinaron inicialmente las áreas regadas y la distribución de cultivos en dichas áreas en base a los valores estimados por Rendel, Palmer y Tritton (1967).

La distribución de áreas de riego por canal se determinó en base a los Fotomosaicos de Hidrología disponibles en IREN.

La evapotranspiración potencial de cultivos se calculó siguiendo el método de Blaney y Criddle modificado propuesto por J. Doorembos y W. Pruitt (1976). En este método, el poder evaporante de la atmósfera calculado siguiendo el procedimiento tradicional se afecta por un coeficiente que depende de las condiciones promedio de nubosidad, humedad relativa y velocidad del viento imperantes en el período considerado, con lo que se obtiene lo que se ha llamado la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia. La evapotranspiración potencial de cada cultivo en particular se obtiene de multiplicar este valor de referencia por coeficientes de cultivo diferentes que dependen de la época de siembra, ritmo de desarrollo de la planta y longitud del período vegetativo.

Para el cálculo de las tasas de riego se adoptó como criterio general el siguiente (G. Pulido, 1974)

$$TR_B = 1,25 TR_P \quad (25a)$$

$$TR_P = 1,43 ETP \quad (25b)$$

en que TR_B representa la tasa de riego a nivel de bocanoma, TR_P la tasa de riego a nivel predial y ETP la evapotranspiración potencial del cultivo en el mes considerado.

El criterio adoptado para la repartición de aguas para riego se basó en suponer como caudal disponible en cada mes a la diferencia entre el caudal medido en la estación fluviométrica Resguardo Los Patos y las pérdidas determinadas según la relación (24). El caudal resultante se repartió desde aguas arriba de manera de suplir el 100% de la demanda en cada entrega.

Una vez repartida el agua para riego, se supuso que las pérdidas se producían en las mismas áreas regadas, las que por lo tanto representaban las superficies de recarga a la napa por efecto del riego. En aquellos meses en

que había precipitaciones sobre el valle, el caudal total disponible para riego se supuso igual al captado por los canales más el aporte de la precipitación sobre esta zona.

La recarga a la napa desde superficies de secano, en las cuales se desarrollan casi exclusivamente pastos naturales, se calculó mes a mes en base a un balance entre precipitaciones y evapotranspiración potencial, esta última calculada de la misma forma que en el caso de áreas de riego.

Para la determinación del aporte proveniente del flujo superficial de la cuenca intermedia a la napa subterránea, se calculó inicialmente el déficit de escorrentía anual en base al método propuesto por L. Turc (B. Espíldora y otros autores, 1975), y a partir de esto la escorrentía superficial anual. Esta escorrentía se repartió mensualmente utilizando una distribución semejante a la de la precipitación en cada año. La recarga a la napa en cada mes se calculó mediante la relación (24) de pérdidas en el río, distribuyéndola uniformemente a lo largo de él.

El aporte directo a la napa subterránea por efecto de la precipitación sobre la cuenca intermedia se estimó en base al déficit de escorrentía anual repartido mensualmente de acuerdo a la distribución de precipitaciones. Los valores mensuales del déficit de escorrentía permitieron calcular la precipitación útil, o cantidad de agua de lluvias retenida en las capas superficiales del subsuelo, utilizando la curva propuesta por Blaney, linealizada (G. Pulido, 1974). La recarga directa a la napa se calculó como la diferencia entre el déficit de escorrentía y la precipitación útil. Este caudal se repartió uniformemente a lo largo del contorno exterior del valle.

Dado que en el sector de entrada, vecino a Resguardo Los Patos, el valle principal se presenta angosto y con el basamento rocoso superficial, la condición de borde de aguas arriba se planteó en términos de un nivel freático superficial, supuestamente conocido.

les de la napa están notablemente influenciados por el flujo subterráneo del río Aconcagua, se supuso la existencia de un gradiente natural, normal a la dirección del río Putaendo, igual al gradiente longitudinal de la napa subterránea del río Aconcagua, el que se determinó en base a información de sondajes ubicados desde San Felipe hacia aguas abajo. En base a dicho gradiente y al limnigrama de niveles freáticos del pozo 33°40' - 71°40' Al ubicado a la salida del valle, se estableció la condición de borde de aguas abajo.

3.3 Calibración del modelo

Analizando los distintos parámetros necesarios para la operación del modelo de simulación, se verificó que los niveles freáticos medidos en pozos de bombeo eran los más restrictivos en cuanto a su período de medición. En efecto, entre 1969 y 1976 se dispone de información de niveles casi continua en 6 de los 8 pozos de bombeo existentes, mientras que en los otros 2 se tiene sólo a partir de 1974.

Debido a que en el año 1970 la información de niveles aparece más completa, se eligió ese año para proceder a calibrar el modelo.

En la Tabla 1 se incluyen los distintos tipos de área existentes en la cuenca del río Putaendo desde Resguardo Los Patos hacia aguas abajo. La Tabla 2 muestra la distribución de cultivos en áreas de riego del valle principal.

En base a la distribución de cultivos y a la información meteorológica de la estación de Los Andes se calculó la evapotranspiración potencial mensual de cada uno de ellos utilizando la metodología descrita en el punto anterior. Estos valores fueron ponderados según el área de riego ocupada por cada cultivo y se han incluido en la Tabla 3 como evapotranspiración potencial mensual promedio de áreas de riego. En esta misma tabla aparece la evapotranspiración poten-

cial mensual desde áreas de secano junto a las tasas de riego necesarias en bocatoma. 4.55

La Tabla 4 incluye valores de recarga a la napa determinados para 1970 a partir de los balances hídricos simplificados para los distintos tipos de infiltración. Esta recarga aparece en términos globales en dicha tabla y ha sido distribuida en el valle de acuerdo a lo indicado en el punto precedente.

T A B L A 1

TIPOS DE SUPERFICIE EN LA CUENCA DEL RIO PUTAENDO

(Aguas abajo de Resguardo Los Patos)

Tipo	Superficie (Hás)
Riego	5150
Secano	4075
Cuenca aportante	35398
Otras áreas	1957
Total	46580

T A B L A 2

DISTRIBUCION DE CULTIVOS EN AREAS DE RIEGO

Cultivo	Superficie (Hás)
Trigo	2000
Mafz	1300
Frutales	500
Viñas	100
Hortal. y Cult. Indust.	450
Forrajeras	800
Total	5150

EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL Y TASAS DE RIFGO EN BOCATOMA

(m³/ha/mes)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETPR	1610	1465	1012	400	291	270	467	760	1000	816	851	1487
ETPS	1619	1349	1311	1046	900	757	793	889	1012	1246	1401	1506
T.deR.	2882	2622	1811	716	521	483	836	1360	1760	1460	1523	2662

ETPR : Evapotranspiración potencial en áreas de riego

ETPS : Evapotranspiración potencial en áreas de secano

T A B L A 4

CAUDALES DE RECARGA A LA NAPA (m³/seg)

1970

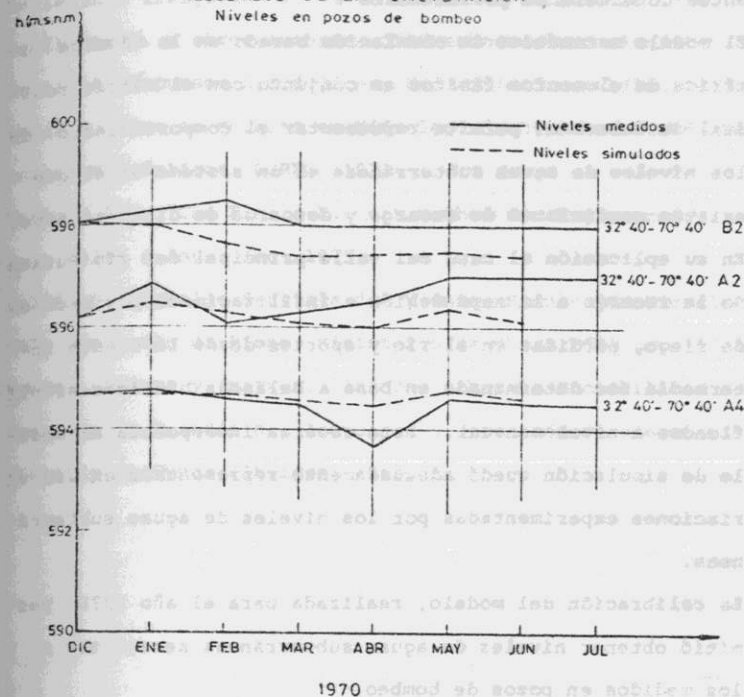
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RIO	.46	.08	.03	.01	0.07	.04	0.10	0.32	0.34	1.01	2.97	2.10
RIEGO	.01	.00	.00	.07	2.11	.44	2.55	0.97	0.77	1.51	1.32	2.30
SECANO	.00	.00	.00	.00	1.17	.00	1.49	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00
CUENCA	.00	.00	.00	.00	10.20	.00	12.98	0.00	1.24	0.02	0.00	0.00
TOTAL	.49	.08	.03	.08	13.55	.48	17.12	1.29	2.49	2.54	4.29	4.40

Para implementar el modelo de simulación se generó en forma automática una malla compuesta de 644 elementos triangulares y 362 nudos que abarcan el valle principal del río Putaendo desde Resguardo Los Patos. El contorno exterior aparece esquematizado en la Figura 2.

El modelo de simulación fue calibrado para los 6 primeros meses de 1970 en base a un análisis de sensibilidad de parámetros, de manera de representar con él los niveles medidos en pozos de bombeo. Para conseguir esto fue necesario modificar algunos de estos parámetros siendo la transmisibilidad el más importante. En efecto, para conseguir una calibración razonable se modificó la distribución de transmisibilidades en el sector bajo del valle, desplazando las áreas de mayor transmisibilidad hacia el sector donde se ubica el Estero Seco.

En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos con el modelo de simulación junto a los niveles medidos en los pozos 32°40' - 70°40' A2, 32°40' - 70°40' A4 y 32°40' - 70°40' B2.

FIGURA 3
RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN
Niveles en pozos de bombeo



Es necesario indicar que en el caso específico del río Putaendo la existencia de información de niveles de aguas subterráneas sólo en la zona comprendida entre la localidad de Putaendo y la desembocadura sería un elemento restrictivo del modelo, debido a que no hay posibilidad de verificar si los niveles simulados aguas arriba de este pueblo corresponden a los reales. Sin embargo, apreciaciones cualitativas basadas en información de algunos sondeos construidos aguas arriba de Putaendo permiten establecer que los niveles simulados serían semejantes a los reales.

Del presente trabajo, que forma parte de un estudio conducente a la formulación de una metodología para optimizar el aprovechamiento de aguas subterráneas en un sistema acuífero parcialmente explotado, pueden extraerse las siguientes conclusiones preliminares :

- a) El modelo matemático de simulación basado en la técnica numérica de elementos finitos en conjunto con el método residual de Galerkin, permite representar el comportamiento de los niveles de aguas subterráneas en un sistema en el que existen condiciones de recarga y descarga de distinto tipo.
- b) En su aplicación al caso del valle principal del río Putaendo la recarga a la napa debida a infiltraciones por excesos de riego, pérdidas en el río y aportes desde la cuenca intermedia fue determinada en base a balances hídricos simplificados a nivel mensual. Esta recarga incorporada al modelo de simulación quedó adecuadamente representada en las variaciones experimentadas por los niveles de aguas subterráneas.
- c) La calibración del modelo, realizada para el año 1970, permitió obtener niveles de aguas subterráneas semejantes a los medidos en pozos de bombeo.
- d) Para conseguir una adecuada representación de los niveles medidos mediante el modelo, se efectuó un análisis de sensibilidad de parámetros entre los cuales la transmisibilidad resultó el más importante en las zonas vecinas a la desembocadura del río Putaendo.
- e) Aunque aguas arriba de la localidad de Putaendo no se dispone de información de niveles medidos en pozos de bombeo, consideraciones cualitativas permiten establecer que los niveles simulados serían semejantes a los reales.

Una vez validado el modelo de simulación, en la etapa siguiente del presente estudio, e implementado el modelo de optimización, la operación conjunta de ambos permitirá esta-

blecer las reglas de explotación para un aprovechamiento racional del recurso de aguas subterráneas.

5.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Doorembos J. y W.O. Pruitt. "Les Besoins en Eau des Cultures". Bulletin d'Irrigation et de Drainage 24. FAO, Roma. 1976.
- Espíldora B. y otros autores. "Elementos de Hidrología". Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile. 1975.
- Hojas A. "Uso de Modelos en Hidrología". Departamento de Recursos Hidráulicos, CORFO. 1971.
- Huebner K.H. "The Finite Element Method for Engineers". John Wiley & Sons, Inc. 1975.
- Pulido G. "Embalse Puntilla del Viento. Simulación Hidrológica". Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas. 1974.
- Rendel, Palmer y Tritton. "Informe sobre la Factibilidad del Proyecto de Regadío del Aconcagua". Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas. 1967.