

Análisis estocástico de variables hidrometeorológicas para la estimación de recarga de acuíferos

M. Paris⁽¹⁾, M. D'Elia⁽¹⁾, M. Pérez⁽¹⁾ y O. Tujchneider^(1,2)

(1) Grupo de Investigaciones Geohidrológicas. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Universidad Nacional del Litoral. Ciudad Universitaria. Casilla de Correo 217-(3000) Santa Fe-Argentina
E-mail: mparis@fich1.unl.edu.ar

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

RESUMEN

Las incertidumbres generadas en la estimación de la recarga hacen que comúnmente a esta variable se la considere como otro parámetro del modelo, sin contemplar la naturaleza aleatoria de la misma. El objetivo de este trabajo es presentar una propuesta metodológica para la cuantificación de la recarga natural de acuíferos, a partir de información generalmente disponible del sistema, que tenga en cuenta la estructura estocástica de las variables hidrometeorológicas que intervienen en su estimación. A fin de obtener los valores mensuales de recarga, en el intervalo de simulación en régimen transitorio se realizó: el pronóstico de las series temporales de precipitación y temperatura y un balance hídrico simplificado, utilizando Thornthwaite-Matter y Curva Número para la estimación de la evapotranspiración potencial y escurrimiento superficial respectivamente. Estas estimaciones de la recarga sirvieron para implementar una nueva modelación matemática del sistema con mejores resultados durante la etapa de validación. El área de aplicación es la Ciudad de Esperanza (Santa Fe, Argentina) que desde 1997 es objeto de estudio del Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas-Universidad Nacional del Litoral). Estas investigaciones han permitido establecer las principales características del sistema hidrogeológico involucrado que sustenta el desarrollo socio-económico de la región.

Palabras clave: Esperanza (Argentina), estocástica, modelación, pronóstico, recarga

Stochastic analysis of hydrometeorological variables to groundwater recharge estimation

ABSTRACT

The generated uncertainties in the recharge estimation often lead to consider this variable as another model parameter without considering its random nature. The purpose of this work is to present an approach to quantify the aquifer natural recharge, with the common available data of the system which considered the stochastic structure of the hydrometeorological variables related to the recharge estimation. In order to obtain recharge monthly values, into the simulation interval during the transient stage, it was done: the precipitation and temperature temporal series forecast and a simplify water balance by using Thornthwaite-Matter and Number Curve to estimate potential evapotranspiration and surface flow, respectively. These recharge estimations have been useful to implement a new mathematical modelling of the system which yield better results during the validation stage. The area of application is Esperanza (Santa Fe, Argentina), which is subject of study by the Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral) since 1997. These researches have allowed to define the main characteristics of the hydrogeological system that supports the regional socio-economic development.

Key words: Esperanza (Argentine), forecast, modeling, recharge, stochastic

Introducción

Desde 1997 la ciudad de Esperanza (Provincia de Santa Fe, Argentina) (Fig.1) es objeto de estudios encarados por el Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas-Universidad Nacional del Litoral). Los resultados de estas investigaciones (Filí y Tujchneider,

1977; Paris *et al.*, 1999; Tujchneider *et al.*, 2000) han permitido establecer las principales características cuali-cuantitativas del sistema hidrogeológico involucrado, como así también en algunos aspectos de la componente socioeconómica de esta región, que sustenta su desarrollo en la explotación de las aguas subterráneas.

Esperanza está ubicada en la llanura chaco-pam-

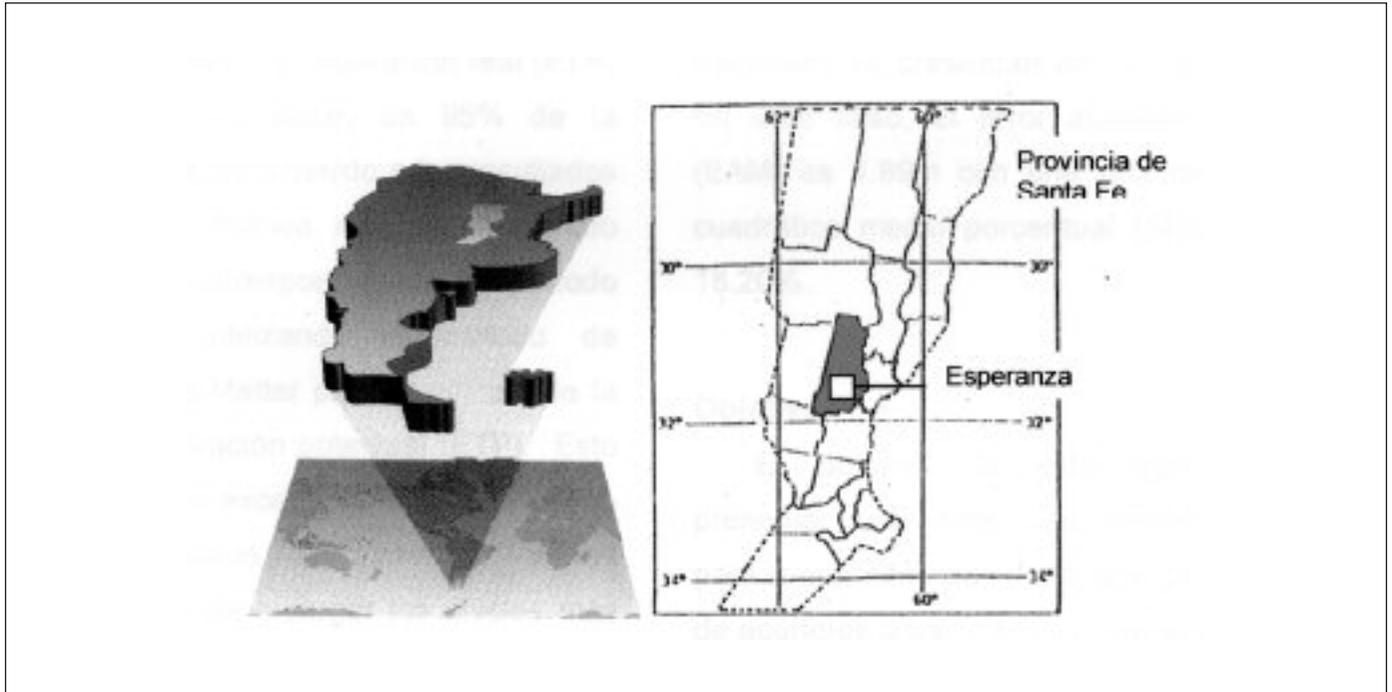


Fig.1. Área de estudio
Fig.1. Studied area

peana la cual está definida superficialmente por suaves pendientes y aspecto monótono donde los reservorios de agua dulce se corresponden con geformas superficiales que favorecen la infiltración y el almacenamiento de agua meteórica.

Los suelos son de tipo argiudol con un horizonte B2t que contiene un porcentaje de arcillas expansibles cercano al 60% que puede dificultar la infiltración de agua, aunque su propiedad de expansible da lugar a la formación de grietas durante períodos secos, que pueden constituir vías de ingreso preferenciales al subsuelo (De Petre *et al.*, 1977; INTA, 1991).

En profundidad, los sistemas geohidrológicos tienen comportamiento de multiunidad con relaciones hidráulicas particularmente complejas. El acuífero en explotación es semiconfinado, con un espesor promedio en el área de 24 m y está alojado en las arenas de la "Formación Puelche" o arenas puelches y mantiene vinculación hidráulica con un acuífero freático de bajo rendimiento situado en limos y arcillas de depósitos pampeanos.

La precipitación anual (P) es de 930mm y la evapotranspiración real (ETR) de 890mm, es decir, un 95% de la precipitación, de acuerdo a los resultados del balance hídrico modular elaborado con datos correspondientes al período 1941-1970, utilizando el método de Thornthwaite-Matter para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP). Esto da lugar a

un exceso de 40mm en el año de los cuales 24 mm/año tienen probabilidad de recargar los niveles más profundos del suelo. Es importante señalar aquí que, para otros períodos analizados, los excesos son nulos, situación físicamente y razonablemente improbable dado el aumento de los niveles piezométricos regionalmente constatados.

A partir de la formulación del modelo conceptual que describe el funcionamiento del sistema acuífero se realizó la modelación matemática hidrogeológica utilizando el código Visual Modflow v.2.7.1. (Guiguer y Franz, 1998) considerando esta estimación de recarga constante. Mediciones de campo en Marzo de 1999 han permitido calibrar el modelo cuyos resultados se presentan en la Figura 2a. Los resultados de la simulación con recarga constante para diciembre de 2001 (otro período de medición) se presentan en la Figura 2b. En este caso, el error absoluto medio (EAM) es 1.89m con una raíz del error cuadrático medio porcentual (SRMS) de 18.20%.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es presentar una propuesta metodológica para la cuantificación de la recarga natural de acuíferos a partir de la información que generalmente se dispone del sistema (meteorológica,

edáfica, topográfica, etc.) que, además, tenga en cuenta la estructura estocástica de las variables hidrometeorológicas que intervienen en su estimación: precipitación y temperatura. Los valores obtenidos han servido para implementar una nueva modelación matemática del sistema cuyos resultados han sido validados con mediciones de campo.

Metodología y datos

En forma simplificada el balance de agua para el área de estudio puede expresarse de la siguiente manera (Fig. 3):

$$P - ETR - ESC = PERC \quad (1)$$

en donde:

- P: precipitación
- ETR: evapotranspiración real
- ESC: escurrimiento superficial
- PERC: percolación adoptando como hipótesis que las entradas y salidas subterráneas horizontales se compensan.

En este balance hídrico simplificado, PERC es la entrada al ambiente subterráneo luego de atravesar los horizontes del suelo (a partir de la infiltración I en la superficie del suelo) para formar la denominada Recarga en Tránsito (RT), es decir aquella con posibilidad real de alcanzar la zona saturada como recarga (R):

$$PERC = RT \quad (2)$$

$$P - ETR - ESC = RT \quad (3)$$

Para este balance se dispone de los siguientes registros pluviométricos y térmicos correspondientes a la Estación Experimental INTA Rafaela ubicada en la misma región hidrometeorológica:

- Precipitaciones mensuales (período 1902-1992).
- Temperaturas medias mensuales (período 1936-1991).

El análisis estocástico de las series temporales de precipitación y temperatura se realizó mediante la interpretación de gráficos de evolución temporal y comportamiento temporal medio, funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial, periodograma y periodograma integrado. Ello permitió evaluar la homogeneidad de las series, caracterizar su estacionalidad, identificar la estructura autorregresiva y estacional de las mismas y ajustar los parámetros de modelos ARIMA (Box y Jenkins, 1976; Arensburg y Seoane, 2001; Seoane y Arensburg, 1995) con fines de obtener el pronóstico de dichas variables en el período de interés a paso mensual.

Posteriormente con el balance hídrico seriado a paso mensual se calculó la ETR por el método de Thornthwaite-Matter mediante el empleo del programa BH-GIG (Paris y D'Elía, 2001, inédito). Para ello se adoptaron valores de almacenamiento máximo y mínimo, en función del equivalente de humedad para el tipo de suelo mayoritariamente presente en el área.

El valor de escurrimiento se estimó por el método del Número de Curva (CN) ponderado en función del porcentaje de área de cada unidad de suelo, pendiente y uso de la tierra, para la condición hidrológica promedio (condición II), utilizando los valores de precipitación mensual.

De este modo fue posible contar con un valor de RT a paso mensual. Es decir, una estimación de la recarga que considera su variabilidad temporal sobre la base de la información disponible y métodos sencillos.

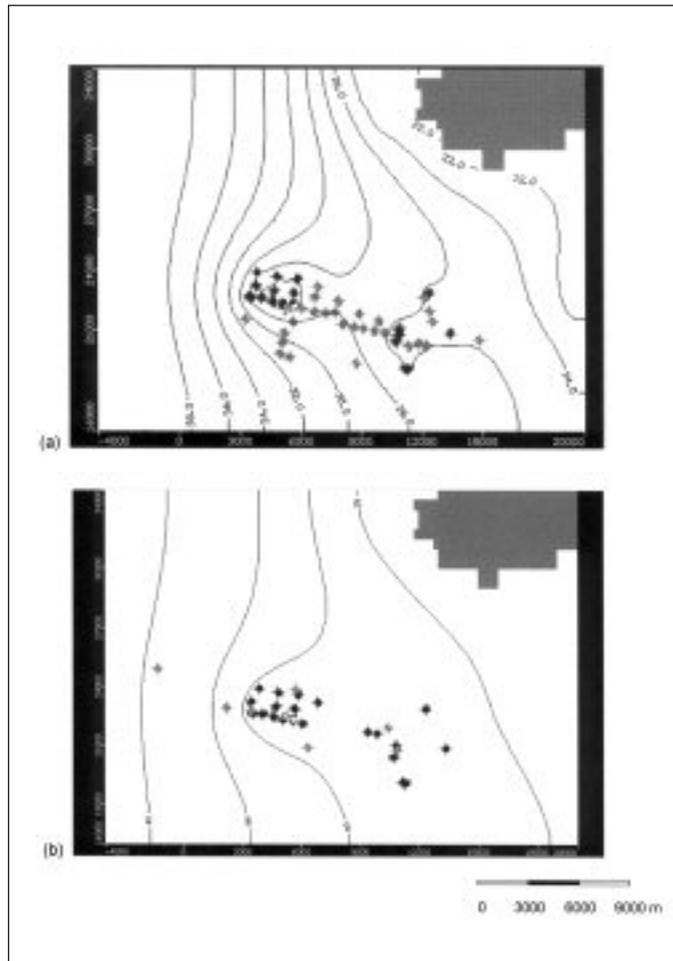


Fig. 2. Modelación con recarga constante. (a) Niveles modelados, Marzo 1999 (b) Niveles simulados, diciembre 2001
 Fig. 2. Modeling with constant Recharge. (a) Modeling heads, March 1999 (b) Simulated heads, december 2001

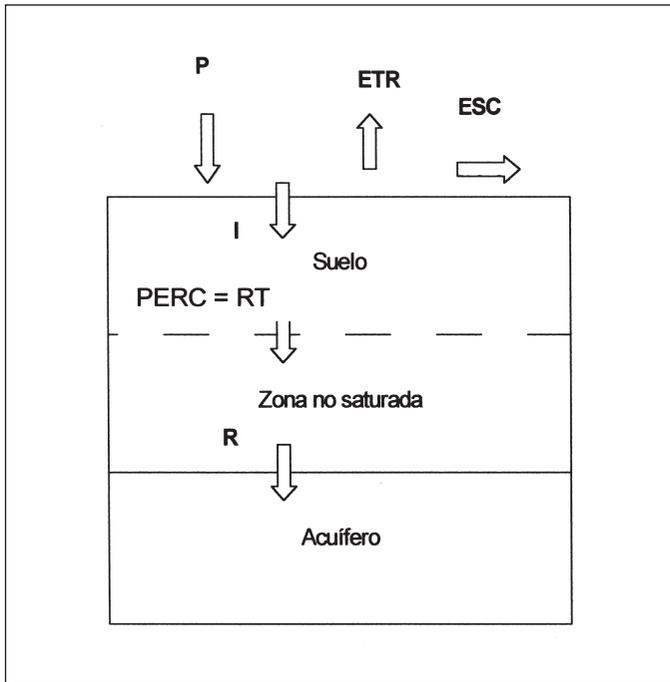


Fig. 3. Esquema conceptual de funcionamiento del sistema
 Fig. 3. Conceptual scheme of the system behaviour

Estos resultados fueron utilizados en la nueva modelación matemática del sistema acuífero donde las mediciones de nivel piezométrico utilizadas en las etapas de calibración y validación corresponden a tareas de campo efectuadas en marzo de 1999 y diciembre del 2001, respectivamente.

Resultados

La Figura 4 muestra la distribución anual de la precipitación y temperatura media mensual en la estación Rafaela. En ella se observa un marcado régimen estacional.

La Figura 5 presenta la evolución temporal de la precipitación anual y la temperatura media mensual en el período analizado. Se evidencia una leve tendencia ascendente en las precipitaciones (Fig. 5a). Esta no-homogeneidad condiciona la representatividad de los valores medios y precisamente justifica la necesidad de adecuar el cálculo de la recarga con el balance hídrico. En el caso de la temperatura se observa una oscilación entorno al valor medio prácticamente constante (Fig. 5b).

Por otra parte, los periodogramas integrados (Fig. 6) ponen en evidencia la presencia de componentes determinísticas en la estructura temporal de las series de precipitación y temperatura mensual.

Asimismo, los periodogramas relacionan esta componente determinística con funciones de tipo armónico. Sin embargo, el intento de eliminarlas por análisis de Fourier no aporta conclusiones adecuadas, ya que si bien se identifican algunas frecuencias significativas y con justificación física (como la relacionada al comportamiento estacional anual) el periodograma integrado de la serie filtrada resultante se mantiene fuera de la banda de confianza (Fig. 7). Por esta razón se continúa el análisis con las series originales sin ningún filtrado, pero utilizando un modelo que contemple la no estacionariedad de los valores medios, como es el caso de los MA (Moving Average).

La Figura 8 presenta los autocorrelogramas de las series de precipitación y temperatura mensual (en vista ampliada para los primeros intervalos).

Estos autocorrelogramas reflejan el comportamiento estacional de la variable, la amortiguación en términos de autocorrelación con el aumento del paso de tiempo (lag) y el cambio significativo de signo de la función. Estas consideraciones justifican el empleo de modelos autorregresivos ARIMA estacionales con parámetros (p,d,q); (P,D,Q). Las funciones de autocorrelación parcial (Fig. 9) permiten identificar la estructura del modelo AR, es decir, orienta en la selección del parámetro.

De acuerdo con ello fueron ajustados modelos ARMA estacional de parámetros:

$$\begin{aligned} p = P = q = Q = 1 \\ d = D = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

para precipitación y temperatura.

Se señala que este modelo ARMA (d = D = 0) es el que mejor ajuste presenta frente a otras alternativas testeadas, fundamentalmente con modelos ARIMA (dada la tendencia no estacionaria de las series) y a la vez es más parsimonioso (menor número de parámetros).

Los residuos obtenidos a partir de los retropronósticos de precipitación mensual y temperatura media mensual con los modelos ARMA propuestos se mantienen dentro de las respectivas bandas de confianza. Esto último plantea la incorrelatividad interna de la serie de valores garantizando su aleatoriedad (característica de los residuos) con media nula, por lo que estos modelos se adoptan para realizar pronóstico.

La Figura 10 muestra las series de precipitación y temperatura mensual observadas y pronosticadas hasta diciembre de 2002 (fecha de los datos de campo utilizados en la validación) para la estación Rafaela.

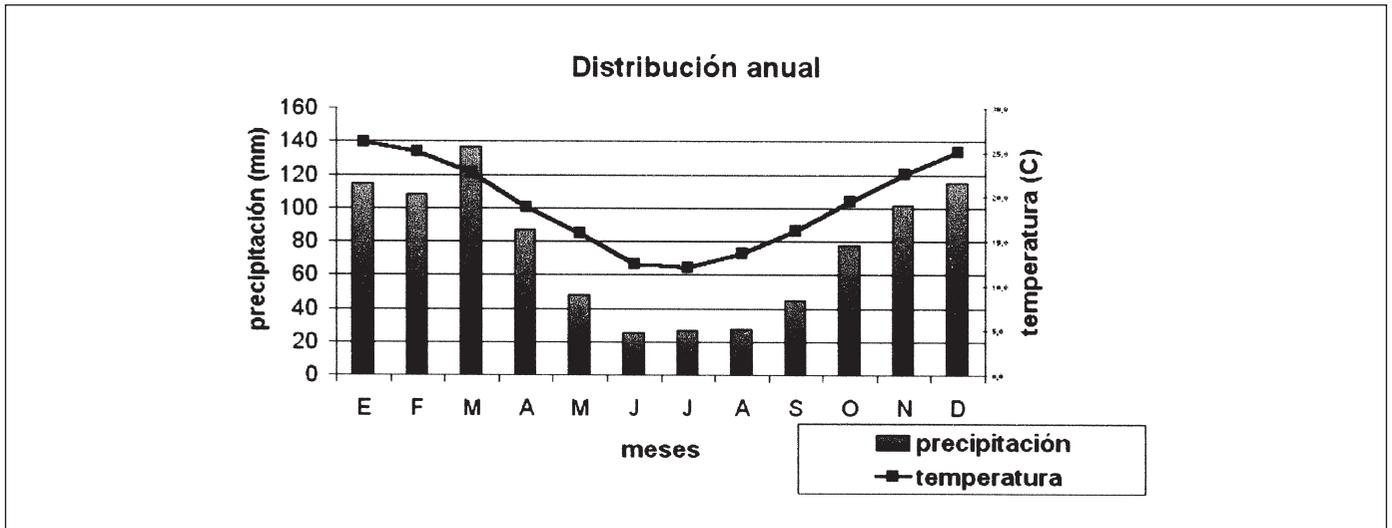


Fig. 4. Distribución anual. Precipitación y temperatura media mensual
 Fig. 4. Annual distribution of monthly precipitation and temperature

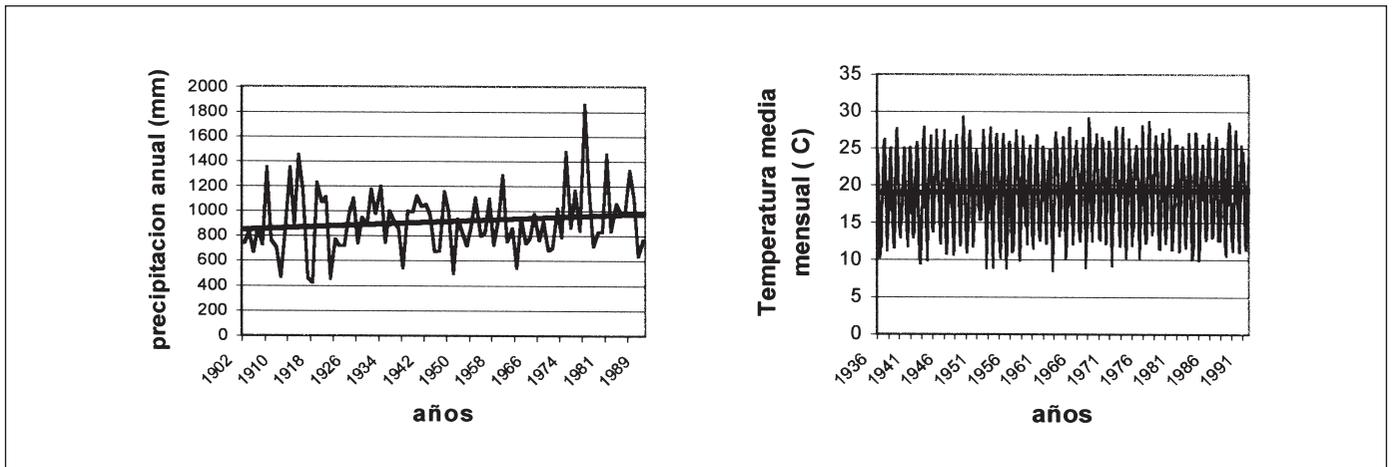


Fig. 5. Evolución temporal. (a) precipitación (b) temperatura
 Fig. 5. Temporal evolution. (a) precipitation (b) temperature

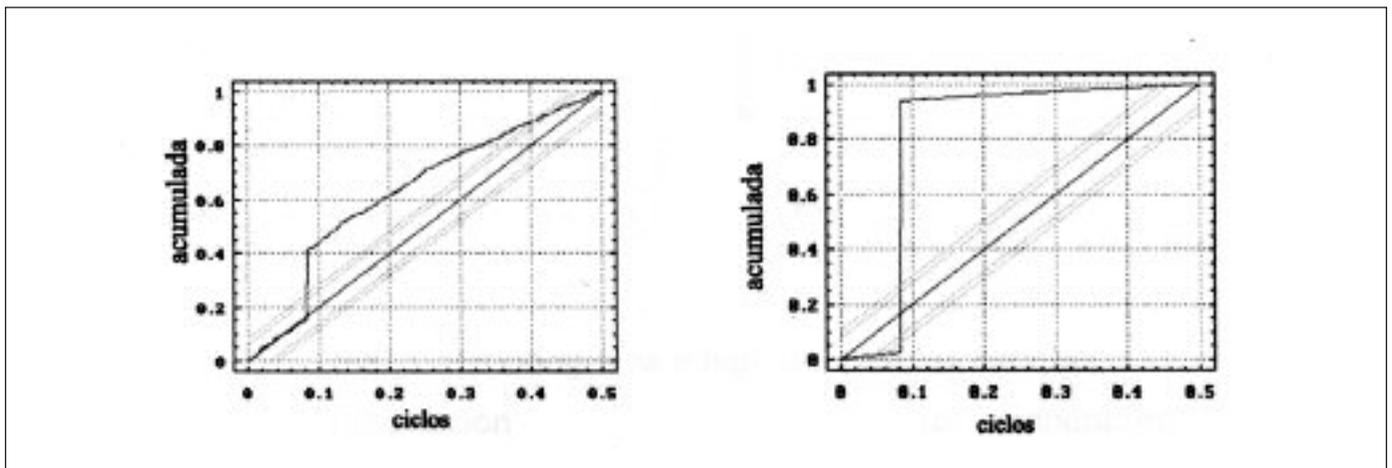


Fig. 6. Periodograma integrado. (a) precipitación (b) temperatura
 Fig. 6. Integrated periodogram. (a) precipitation (b) temperature

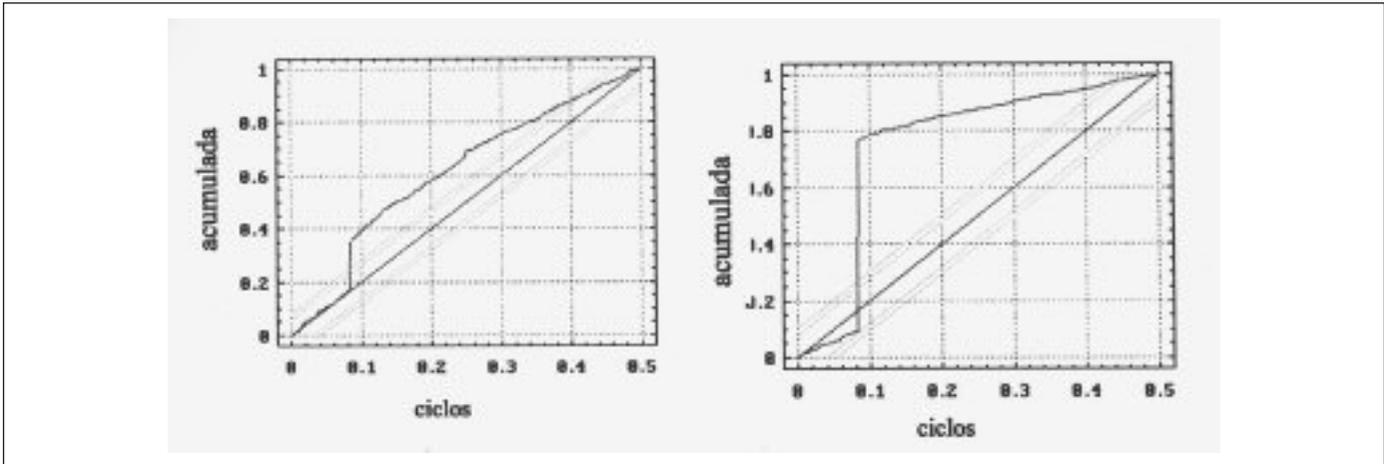


Fig. 7. Periodograma integrado - Series filtradas. (a) precipitación (b) temperatura
Fig. 7. Integrated periodogram - Filtered Series. (a) precipitation (b) temperature

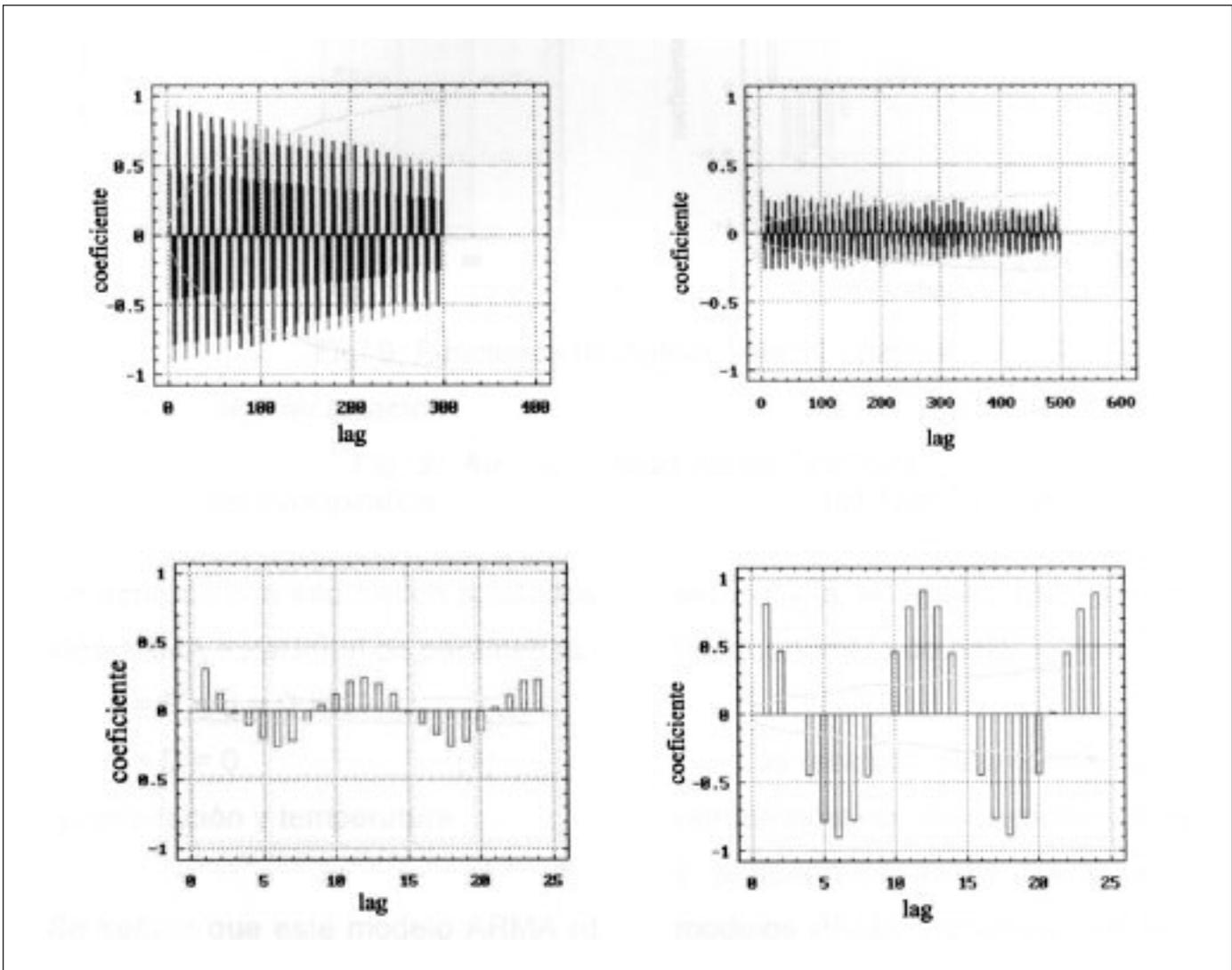


Fig. 8. Autocorrelogramas. (a) precipitación (b) temperatura
Fig. 8. Autocorrelograms. (a) precipitation (b) temperature

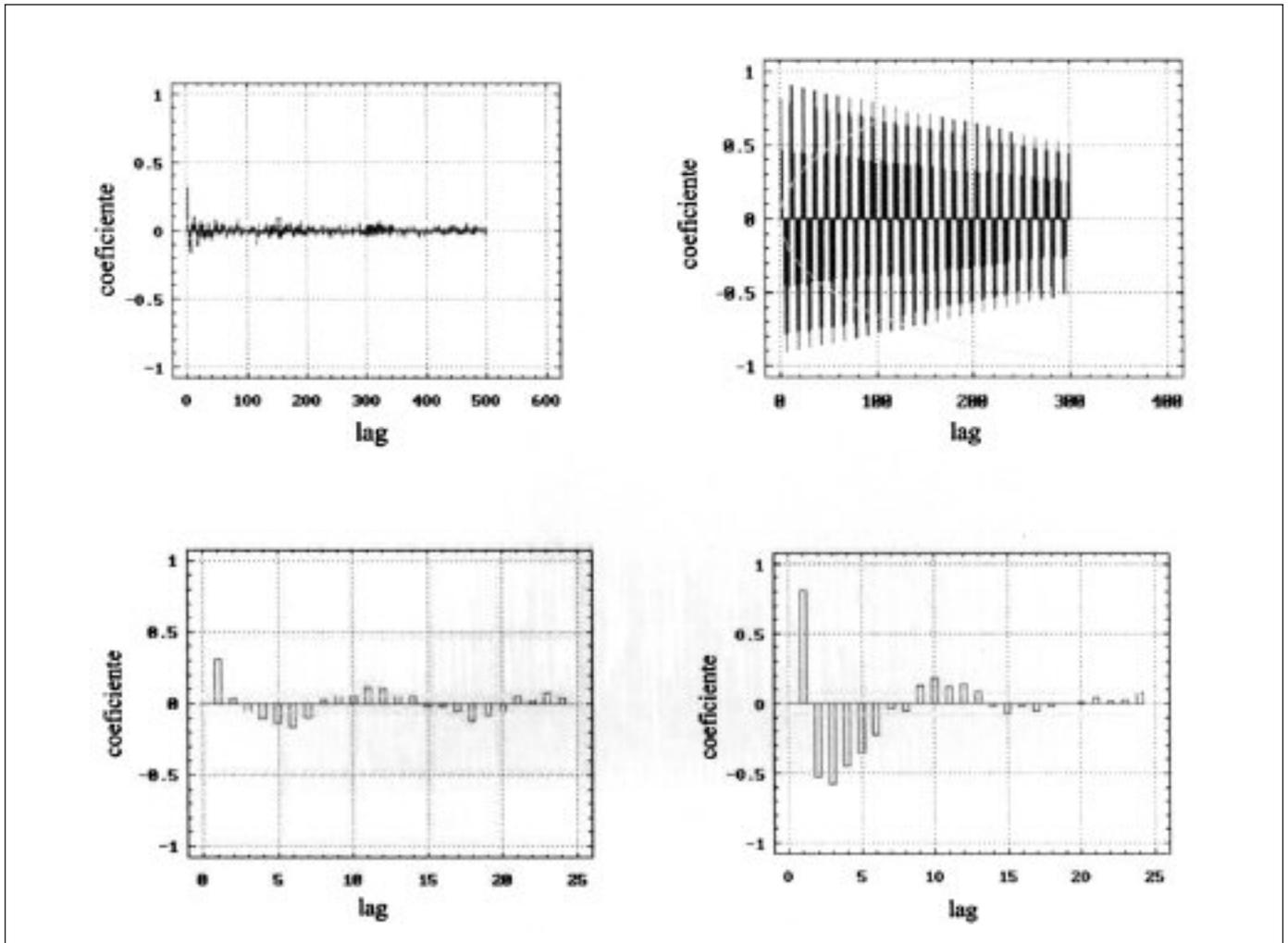


Fig. 9. Funciones de autocorrelación parcial. (a) precipitación (b) temperatura
 Fig. 9. Autocorrelation partial functions. (a) precipitation (b) temperature

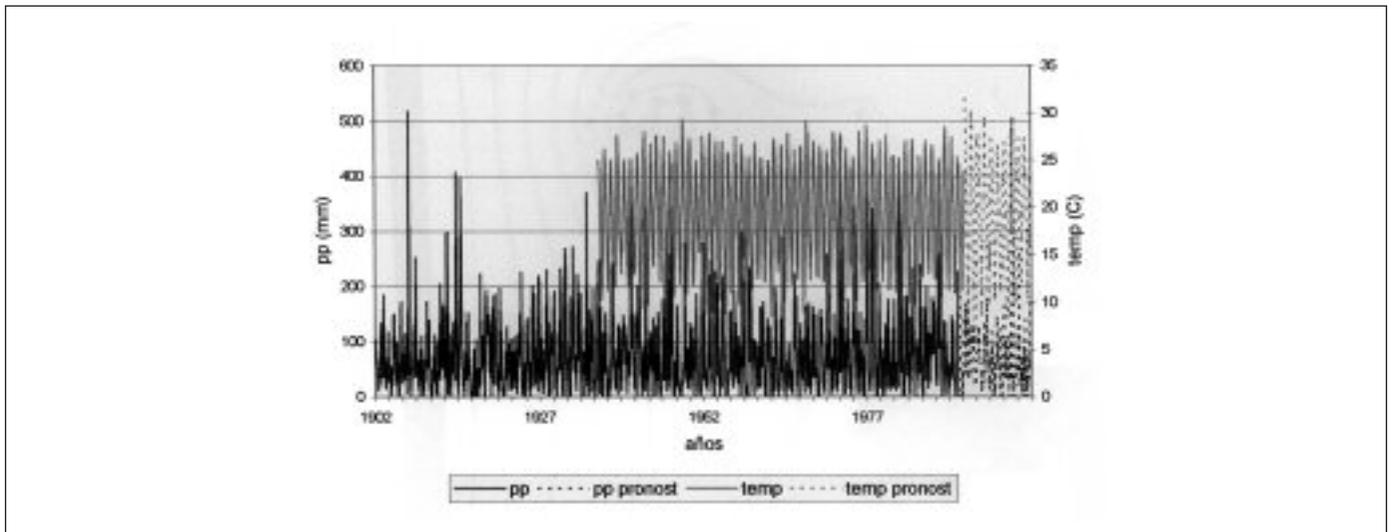


Fig. 10. Series de precipitación y temperatura mensual (observada y pronosticada)
 Fig. 10. Precipitation and temperature series (observed and forecasted)

Finalmente, con estas series se realizó el balance hídrico seriado utilizando un paso mensual que cubre el período 1936-2001 del cual se obtuvieron:

- un valor de recarga media (calculada como promedio de los valores estimados mensualmente con el balance) de 28mm/a con el que se realizó la nueva modelación matemática del sistema que fuera calibrada con datos de campo para marzo de 1999 (Fig. 10a).
- valores de recarga a paso mensual para el período marzo 1999 - diciembre 2001 que se emplearon en la simulación en régimen transitorio para formular la prognosis evolución de niveles piezométricos en este lapso de tiempo. La Figura 11b muestra la superficie piezométrica pronosticada con un error absoluto medio (EAM) de 0.78m y raíz del error cuadrático medio porcentual (SRMS) de 8.8 %.

Conclusiones

El análisis de la evolución temporal de las variables hidrometeorológicas que intervienen en la estimación de la recarga evidencia un paulatino aumento de las precipitaciones. Esta leve tendencia ascendente condiciona la representatividad de los valores medios y justifica precisamente la necesidad de adecuar la estimación de recarga que generalmente se asume constante a partir de un balance hídrico modular.

De acuerdo con esta propuesta metodológica:

- pronóstico de las series de precipitación y temperatura, a partir del análisis de su estructura estocástica
- planteo de un balance hídrico simplificado como el indicado en la ecuación (3)
- cálculo a paso mensual de evapotranspiración potencial (y real) utilizando el método de Thornthwaite-Matter
- cálculo del escurrimiento superficial a partir de precipitaciones mensuales con el método del Número de Curva fue posible estimar la recarga natural del acuífero teniendo en cuenta así su variabilidad temporal.

En primer lugar, con estas estimaciones mensuales de recarga y sobre la base de investigaciones antecedentes, se implementó una nueva modelación matemática del sistema en la cual la asignación de la variable recarga surgió de efectuar el promedio de los valores calculados mensualmente con el balance seriado.

Posteriormente, en la simulación se consideraron los valores mensuales aportados por el balance hídrico seriado, contemplando de este modo la variación temporal de la recarga. Esto permitió formular la

prognosis de evolución de la superficie potenciométrica que fuera validada en este trabajo con mediciones de campo de niveles piezométricos.

Los resultados obtenidos en la etapa de validación de esta nueva modelación matemática del sistema (Fig. 11) muestran una notable disminución de los errores (EAM y SRMS) (Tabla 1).

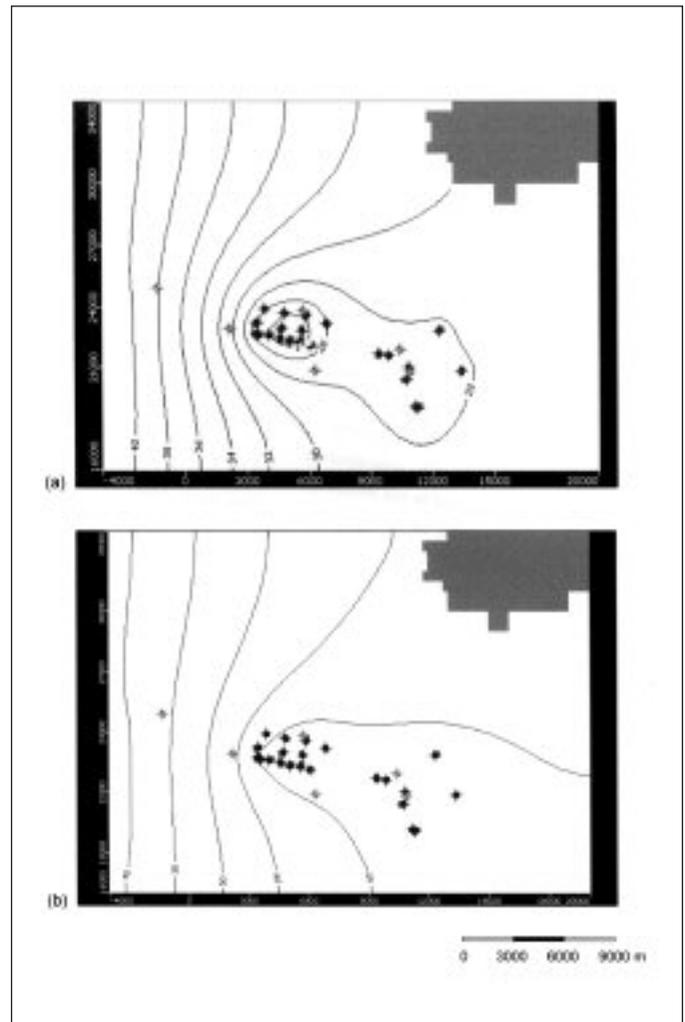


Fig. 11. Modelación con recarga variable. (a) niveles modelados, marzo 1999 (b) niveles simulados, diciembre 2001

Fig. 11. Modeling with variable Recharge. (a) modeling levels, march 1999 (b) simulated levels, december 2001

Modelo	Error absoluto medio (m) EAM	Raíz del error cuadrático medio (%) SRMS
Recarga constante	1.89	18.20
Recarga variable	0.78	8.80

Tabla 1. Errores en la modelación matemática
Table 1. Mathematical modeling errors

Por lo tanto esta propuesta metodológica se considera adecuada para la estimación de la recarga natural de acuíferos debido a que la misma tiene en cuenta su condición de variable en la modelación matemática del sistema acuífero en estudio, utilizando información que generalmente está disponible y métodos sencillos.

Otros métodos para filtrar las componentes determinísticas presentes en las series de precipitación y temperatura, selección de otros parámetros de los modelos estocásticos y nuevas mediciones de campo (perfiles de humedad, niveles, escurrimiento, precipitaciones, temperaturas, etc.) serán considerados en próximas etapas de investigación para mejorar esta propuesta metodológica.

Referencias

- Arensburg, I. y Seoane, R. 2001. Transfer function applied to water table. *2001 Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology*. Cancún, México. 6 al 12 de septiembre de 2001.
- Box, G. y Jenkins, G. 1976. *Time Series Análisis, Forecasting and Control*.
- De Petre Antonio, A., Espino, L.M., Seveso, M.A. y Perman, S. 1977. *Carta de Suelos del Departamento Las Colonias*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Provincia de Santa Fe.
- Filí, M. y Tujchneider, O. 1977. Características geohidrológicas del subsuelo de la Provincia de Santa Fe (Argentina). *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral* (8) 105-113.
- Guiguer Nilson y Thomas Franz. 1998. *Visual Modflow, User's manual*. Waterloo hydrogeologic.
- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. 1991. *Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3160-26 y 25. Esperanza-Pilar*.
- Paris, M., Tujchneider, O., D'Elía, M. y Pérez, M. 1999. Hidrogeología Urbana: Protección de pozos de abastecimiento en la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Hidrología Subterránea. *Revista del Instituto Superior de Correlación Geológica - CONICET. Serie correlación geológica* (13) 153-160.
- Seoane, R. y Arensburg, I. 1995. Análisis de Series Temporales de Niveles Freáticos. *Revista del Instituto Superior de Correlación Geológica - CONICET. Serie correlación geológica* (11) 81-89.
- Tujchneider, O.C., Paris, M., D'Elía, M., Pérez, M. y Filí, M. 2000. Modelo de Gestión de los Recursos Hídricos Subterráneos en el Centro-Oeste de la Provincia de Santa Fe-Argentina. *I Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas. Fortaleza, Brasil*.

Recibido: Enero 2003
Aceptado: Junio 2003