

PRESIDENCIA DE LA NACION  
SECRETARIA DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE HUMANO  
INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNICA HIDRICAS

*"Estudio de la superficie freática y de la vulnerabilidad a la  
contaminación de las fuentes de aguas subterráneas en una zona  
piloto del conglomerado bonaerense"*

....

Informe final de beca

Ilana V. Arensburg

Ezeiza  
Septiembre 1996

PRESIDENCIA DE LA NACION  
SECRETARIA DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE HUMANO  
INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNICA HIDRICAS

*"Estudio de la superficie freática y de la vulnerabilidad a la  
contaminación de las fuentes de aguas subterráneas en una zona  
piloto del conglomerado bonaerense"*

....

Informe final de beca

Ilana V. Arensburg

Ezeiza  
Septiembre 1996

AUTORIDADES

SECRETARIA DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE HUMANO  
Ing. María Julia ALSOGARAY

INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNICA HIDRICAS  
Presidente Dr. Mario DE MARCO NAON

GERENCIA DE CIENCIA Y TECNICA  
Ing. Raúl LOPARDO

GRUPO DE TRABAJO HIDROLOGIA EZEIZA  
Lic. Oscar A. CORIALE

El presente informe se realiza como parte del plan de beca otorgado por el INCyTH, durante el año 1994 y 1995, dentro del proyecto 3.33, "Estudio de la superficie freática y de la vulnerabilidad de las fuentes de agua subterránea en una zona piloto del conglomerado urbano bonaerense", dirigido por Lic. Adolfo Fernández.

Consta de dos partes:

Parte 1:

**Análisis de series temporales de niveles freáticos**

Parte 2:

**Estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de las fuentes de agua subterránea en una zona piloto del gran Buenos Aires**

## INDICE

	<i>pag.</i>
Parte 1: <u>Análisis de series temporales de niveles freáticos</u>	7
1      Introducción .....	8
2.      Modelo general univariado .....	9
Formulación del modelo .....	9
Función de autocorrelación simple y parcial .....	10
2.1.    Información básica .....	12
2.1.1.  Identificación del modelo .....	13
2.1.2.  Estimación de parámetros .....	15
2.1.3.  Verificación del modelo .....	16
2.1.4.  Sobreajuste .....	17
2.1.5.  Pronóstico .....	19
2.2.    Valores promedio (dos días) .....	20
2.2.1.  Identificación del modelo .....	20
2.2.2.  Estimación de parámetros .....	21
2.2.3.  Verificación del modelo .....	21
2.2.4.  Sobreajuste .....	22
2.2.5.  Pronóstico .....	23
2.3.    Valores promedio (cuatro días) .....	24
2.3.1.  Identificación del modelo .....	24
2.3.2.  Estimación de parámetros .....	25
2.3.3.  Verificación del modelo .....	25
2.3.4.  Sobreajuste .....	26
2.3.5.  Pronóstico .....	27
2.4.    Conclusiones .....	28

3.	Modelo de función de transferencia .....	29
	Formulación del modelo .....	29
	Función de covarianzas cruzadas y correlación cruzada .....	30
	Ganancia .....	30
3.1.	Información básica .....	31
3.1.1.	Estimación de la función de correlación cruzada..	31
3.1.2.	Identificación de la función de transferencia ...	33
3.1.3.	Estimación de la función de transferencia .....	34
3.1.4.	Pronóstico .....	35
3.2.	Conclusiones .....	35
4.	Conclusiones finales .....	37
5.	Referencias Bibliográficas .....	38

	<u>Parte 2: Estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de las fuentes de agua subterránea en una zona piloto del gran Buenos Aires</u> .....	39
--	---	----

1.	Introducción.....	40
2.	Características del área .....	41
3.	Vulnerabilidad .....	41
3.1.	Métodos y técnicas de valoración de la vulnerabilidad.....	41
3.2.	Análisis de los parámetros involucrados en el área de estudio.....	42
3.2.1.	Grado de confinamiento .....	43
3.2.2.	Litología predominante de los estratos suprayacentes al acuífero Puelche .....	44
3.2.3.	Espesor de la zona no saturada.....	44

3.3.	Esquema de clasificación .....	45
4.	Conclusiones .....	47
5.	Referencias bibliográficas .....	48
	Anexo: Publicaciones externas .....	50

Parte 1

Análisis de series temporales de niveles freáticos

## 1. Introducción

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de una aplicación de la metodología de análisis de series temporales, para la predicción de la variable nivel freático, y discutir las posibilidades de utilizar modelos lineales de variada complejidad para obtener pronósticos a distintos adelantos de tiempo.

El trabajo desarrolla la aplicación de la técnica que incluye: la identificación de la estructura temporal, la estimación de los parámetros y la verificación de distintos modelos lineales univariados. El análisis de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial muestra la posibilidad de utilizar modelos Autorregresivo-Integrado-Promedio-Móvil (ARIMA) para representar la serie temporal de niveles freáticos diarios. Estos modelos son utilizados para definir los niveles mínimos predictivos que permitirán la comparación con estimaciones obtenidas aplicando modelos de transferencia precipitación-nivel freático.

El método utilizado, propuesto por Box y Jenkins(1976), ha tenido una amplia difusión en Hidrología para la representación matemática de procesos físicos, en este sentido se pueden citar la comparación entre un modelo determinístico complejo con una función de transferencia precipitación-caudal, Kitanidis y Bras(1980). En el tema específico de este trabajo se puede citar a Viswanathan (1984) que propone modelos de transformación precipitación variación del nivel freático, mediante regresiones dinámicas y Calderón Loaiza y Bermoudes(1994) que utilizan análisis de series de tiempo para estimar la misma variable.

Se procede, siguiendo la metodología propuesta por Box y Jenkins para análisis de series de tiempo, mediante dos etapas sucesivas:

- . Análisis univariado, utilizando como información los datos de la serie temporal nivel freático, suponiendo constantes el resto de los factores para las condiciones futuras.

- . Estimación de la función de transferencia, que permite evaluar la respuesta dinámica entre las variables, considerando como variable explicativa a la precipitación y como variable respuesta al nivel freático.

Para cada una de ellas se realiza:

- . Formulación del modelo.
- . Identificación de un modelo a partir de la serie temporal observada.
- . Verificación mediante el análisis de los residuos.
- . Sobreajuste.
- . Predicción.

## 2. Modelo general univariado

### Formulación del modelo

Los modelos denominados Autorregresivo-Integrado-Promedio-Móvil (ARIMA) son una forma de describir series estacionarias o que pueden ser convertidas en estacionarias mediante diferenciación.

Se define un modelo ARIMA  $(p, d, q)$  con la siguiente ecuación:

$$w_t = \phi_1 w_{t-1} + \dots + \phi_p w_{t-p} + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \dots - \theta_q u_{t-q} \quad (1)$$

donde  $w_t$  es la serie original diferenciada  $d$  veces,  $u_t$  variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas,  $\phi_t$  parámetros autoregresivos y  $\theta_t$  parámetros de promedios móviles.

Mediante el estudio de la estructura temporal de las observaciones se desea prever la evolución propia del sistema en su comportamiento futuro.

Se cuenta con una serie observada de  $n$  datos ordenados temporalmente:  $y_1, \dots, y_t, \dots, y_n$ . Este conjunto de  $y_t$ , constituye la variable aleatoria ordenada para  $t = 1, \dots, k, \dots, n$ , días consecutivos.

Una de las formas matemática más sencilla es la relación entre  $y_t$  con  $y_{t-1}$ , es decir un modelo autoregresivo de primer orden, ARIMA(1, 0, 0):

$$y_t = C + \phi y_{t-1} + \xi_t \quad (2)$$

donde:  $C$  y  $\phi$ : parámetros a determinar.

.  $C$ : media del proceso temporal y  $\phi < 1$

.  $y_t$ : observación del nivel freático en el tiempo  $t$

.  $y_{t-1}$ : observación del nivel freático en un tiempo anterior a  $t$

.  $\xi_t$ : ruido blanco

Se supone para  $\xi_t$ :

- . Esperanza,  $E(\xi_t) = 0$ , distribución normal independiente de  $y_{t-k}$
- . Varianza,  $Var(\xi_t) = \sigma^2$ , constante
- . Covarianza,  $Cov(\xi_t, \xi_{t-k}) = 0$

## Función de autocorrelación simple y parcial

Para la etapa de identificación del modelo es necesario estimar la función de autocorrelación simple y la función de autocorrelación parcial. A continuación se enuncian estas funciones (Box y Jenkins 1976; Peña Sánchez de Rivera, D.1989).

Si en (1),  $c = 0$ , y  $m$  es la variación del nivel freático para el intervalo de tiempo considerado, para  $t = 1$ :

$$Y_1 = \phi m + \xi_1 \quad (3)$$

luego para  $t = 2$ :

$$Y_2 = \phi^2 m + \phi \xi_1 + \xi_2 \quad (4)$$

y en general, para cualquier valor de  $t$ :

$$Y_t = \phi^t m + \sum_{i=0}^{t-1} \phi^i \xi_{t-i} \quad (5)$$

donde:  $E(y_t) = \phi^t m$ , para  $|\phi| < 1$ , cuando  $t \rightarrow \infty$ ,  $\phi^t \rightarrow 0$ .

Se supone que la dependencia entre dos observaciones varía de acuerdo con el intervalo de tiempo entre ellas, no del tiempo al origen, es decir que la relación entre la covarianza de las observaciones es:

$$\text{Cov}(y_1, y_{1+k}) = \text{Cov}(y_t, y_{t+k}) = \gamma_k \quad (6)$$

donde:  $\gamma_k = \sigma^2$  para  $k = 0$

A partir de (5) y (6) podemos definir la **función de autocorrelación simple** (fas):

$$\phi_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} = \phi \frac{\gamma_{k-1}}{\gamma_0} = \phi \phi_{k-1} \quad \text{ó} \quad \phi_k = \phi^k \quad (7)$$

$\phi_k$  varia entre 0 y 1, cuando  $k \rightarrow \infty$ ,  $\phi_k \rightarrow 0$ , cuando  $k \rightarrow 0$ ,  $\phi_k \rightarrow 1$ .

Para  $k = 1, \dots, p$ , se obtiene un sistema de ecuaciones que

relaciona las  $p$  primeras autocorrelaciones con los parámetros del proceso  $(\phi)$ , matricialmente se define con la ecuación de Yule-Walker:

$$\Phi = R \cdot \phi \quad \Rightarrow \quad \phi = R^{-1} \Phi \quad (8)$$

con la cual se calculan los  $p$  parámetros  $\phi_k$ .

Determinar el orden de un proceso autorregresivo a partir de las funciones de autocorrelación es difícil, no presenta rasgos identificables con el *orden del proceso*, para esto se introduce la **función de autocorrelación parcial** (fap), consiste en la representación de los coeficientes de autocorrelación parcial en función del retardo. Se consideran los efectos directos de observaciones separadas por  $1, \dots, p$ , retardos mientras que los efectos directos de los  $p+1$  retardos son nulos.

El coeficiente de autocorrelación parcial de orden  $k$  es una medida de la relación lineal entre las observaciones separadas  $k$  períodos, independientemente de los valores intermedios.

Si  $\phi_{kj}$  es el  $j$ -ésimo coeficiente en un proceso autoregresivo de orden  $k$ ,  $\phi_{kk}$  es el último coeficiente y es función del retardo  $k$ .  $\phi_{kk}$  es llamada función de autocorrelación parcial.

Sea:

$$\bar{y}_t = \phi_1 \bar{y}_{t-1} + \dots + \phi_k \bar{y}_{t-k+1} + u_t \quad (9)$$

donde:  $\bar{y}_t = y_t - \mu$

$\mu$ : media estadística de la población de observaciones del nivel freático

$u_t$ : variable que comprende la parte no común con  $\bar{y}_{t-1}, \dots, \bar{y}_{t-k+1}$

Eliminando de  $\bar{y}_{t-k}$  el efecto de  $\bar{y}_{t-1}, \dots, \bar{y}_{t-k+1}$  :

$$\bar{y}_{t-k} = v_1 \bar{y}_{t-1} + \dots + v_{k-1} \bar{y}_{t-k} + v_t \quad (10)$$

donde:  $v_t$ : variable que comprende la parte no común con las observaciones intermedias.

El coeficiente de correlación simple entre  $u_t$  y  $v_t$  es el coeficiente de autocorrelación parcial de orden  $k$ ,  $\phi_{kk}$ .

Un proceso autorregresivo, ARIMA (P,d,q) tiene los  $p$  primeros coeficientes de autocorrelación parcial distintos de cero, el numero de coeficientes distintos de cero indica el orden  $p$  del modelo.

## 2.1. Información básica

En este estudio se utilizó la serie de niveles freáticos observados del freátigrafo instalado en la localidad de Ezeiza, cuenca del río Matanza ( $34^{\circ}48'S$ ,  $58^{\circ}32'O$ ). Esta localidad se encuentra en una zona de clima subhúmedo-húmedo, con excesos hídricos superiores a 150 mm anuales. La fuente de agua subterránea es un acuífero complejo integrado por: Sección Puelche constituida por las arenas homónimas; Epipelche por el Pampeano, limos loessoides con intercalaciones arenosas, y la capa freática de textura arena fina.

La serie temporal usada para la identificación del modelo corresponde a los datos diarios del período, marzo 1992 a febrero 1993 y para la predicción, marzo 1993 a febrero 1994.

En la Figura 1 se observa el comportamiento del nivel freático, el mismo es irregular con una variación que es función de la cota anterior al evento pluviométrico y del volumen e intensidad de la precipitación.

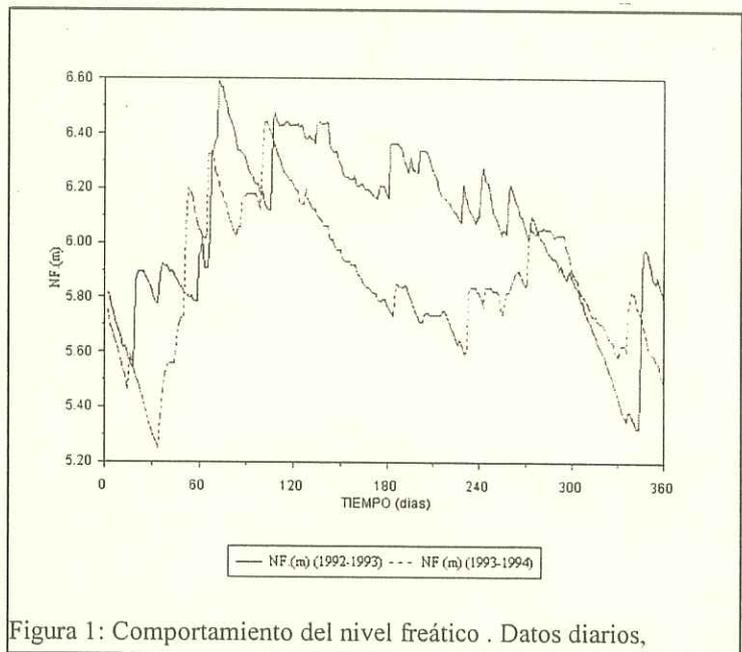


Figura 1: Comportamiento del nivel freático . Datos diarios,

### 2.1.1. Identificación del modelo

En esta etapa se determinan los ordenes  $p$ ,  $d$ ,  $q$  utilizando la función de autocorrelación simple (fas) y la función de autocorrelación parcial (fap).

Para convertir la serie temporal generada por el proceso en estacionaria se define la transformación a aplicar; se determina del gráfico de la serie y de su fas, el número de diferencias ( $d$ ), normalmente una o dos, que deben aplicarse. Si la fas no se amortigua es necesario diferenciar nuevamente.

La Figura 2 muestra la fas de la serie, se observa un decrecimiento no exponencial, que puede caracterizar a las series no estacionarias. La fas no muestra un decaimiento significativo a retardos altos, es necesario diferenciar para obtener un proceso estacionario. En consecuencia,  $w_t = y_t - y_{t-d}$  es el proceso integrado de orden  $d$ . A continuación se aplica un método para determinar si la serie estacionaria, tiene media distinta de cero, si  $\bar{w}_t \geq 2s_{\bar{w}}$  se incluye como parámetro a estimar.

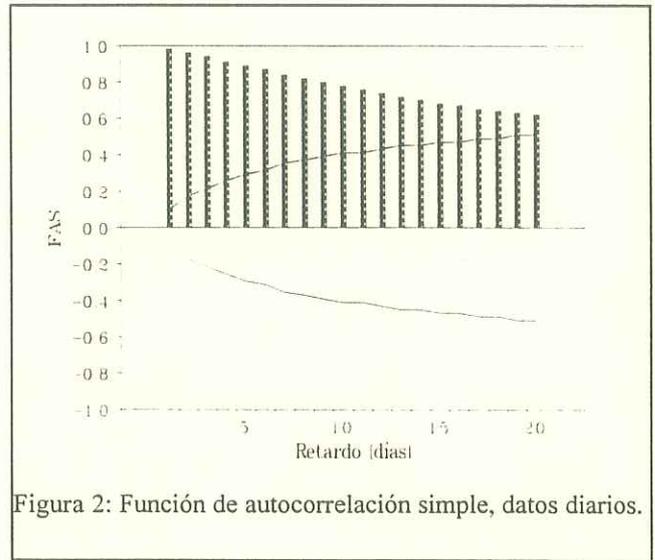


Figura 2: Función de autocorrelación simple, datos diarios.

Se determina si la serie estacionaria,  $w_t$  tiene media distinta de cero mediante:

$$\bar{w}_t = \frac{\sum_{t=1}^T w_t}{T} \quad (11)$$

donde:  $\bar{w}_t$ : media muestral

$T$ : número de sumandos

con una desviación típica estimada:

$$s_{\bar{w}} = \frac{s_w}{T^{1/2}} (1 + 2r_1 + \dots + 2r_k)^{1/2} \quad (12)$$

donde:  $s_w$  es la desviación típica de  $w_t$ , suponiendo que los  $k$

primeros coeficientes de autocorrelación,  $r_k$ , son significativos. La estimación de los  $k$  coeficientes se hace mediante:

$$r_k = \frac{\sum_{t=d+sD+1}^{T-k} (w_t - \bar{w})(w_{t+k} - \bar{w})}{\sum_{t=d+sD+1}^T (w_t - \bar{w})^2} \quad (13)$$

Si la transformación generada para el modelo es correcta se debe poder determinar que la varianza estimada de la serie sin diferenciar,  $s_w^2$  es constante y menor que  $s_y^2$ . Si  $\bar{w}_t \geq 2s_{\bar{w}}$  se admite que la media es distinta de cero y se incluye como parámetro a estimar.

Se diferencia dos veces y se toma como orden de diferenciación aquel de menor  $s_{\bar{w}}$ .

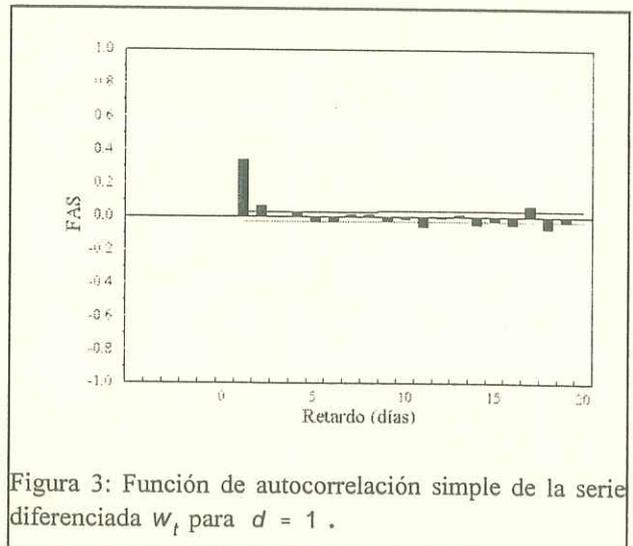
Orden de diferencia ( $h$ )	$d = 1$	$d = 2$
$\bar{w}_t$	-0,00098	-0,00180
$T$	362	361
$s_w$	0,03605	0,05897
$s_{\bar{w}}$	0,00568	0,00930

Tabla 1

De los resultados de la Tabla 1 se desprende que  $\bar{w}_t \geq 2s_{\bar{w}}$  por lo cual  $\bar{w}_t$  no se incluye como parámetro a determinar.

Los desvíos obtenidos al diferenciar para  $d = 1$  y  $d = 2$  y la gráfica de la función de autocorrelación simple para  $d = 1$ , que se muestra en la Figura 3, indican que el orden a diferenciar en el modelo es uno.

Para determinar los ordenes  $p$  y  $q$  del modelo, se consideran como coeficientes de autocorrelación significativos, los  $r_k$  que superan las bandas de confianza definidas por



$\pm 2(T)^{1/2}$  o por un intervalo de confianza para  $r_k$  condicionado a que los coeficientes  $\varrho_1, \dots, \varrho_{k-1}$  son no nulos y los siguientes  $\varrho_k, \varrho_{k+1}$  idénticamente cero. Estos intervalos, crecen con el retardo y son los utilizados para probar si los coeficientes son o no significativamente distintos de cero, basandose en la siguiente ecuación para la estimación de la varianza:

$$\text{Var}(r_k) = \frac{1 + 2 \sum_{i=1}^p \varrho_i^2}{T}, \quad k > p \quad (14)$$

En la Figura 4 se observa que solo para el primer retardo,  $\phi_1$  supera el intervalo de confianza definido con:

$$\text{Var}(\phi_k) = \frac{1}{T}, \quad k > p + 1 \quad (15)$$

Para determinar el orden  $p$  del modelo, se consideran los coeficientes de autocorrelación parcial, significativos mayores que el intervalo de confianza; se infiere que solo  $\phi_1$  es significativamente distinto de cero y los siguientes  $\phi_2, \dots, \phi_{20}$  pueden ser considerados nulos. En consecuencia, la componente autorregresiva debe ser de orden uno y el modelo propuesto es ARIMA (1,1,0).

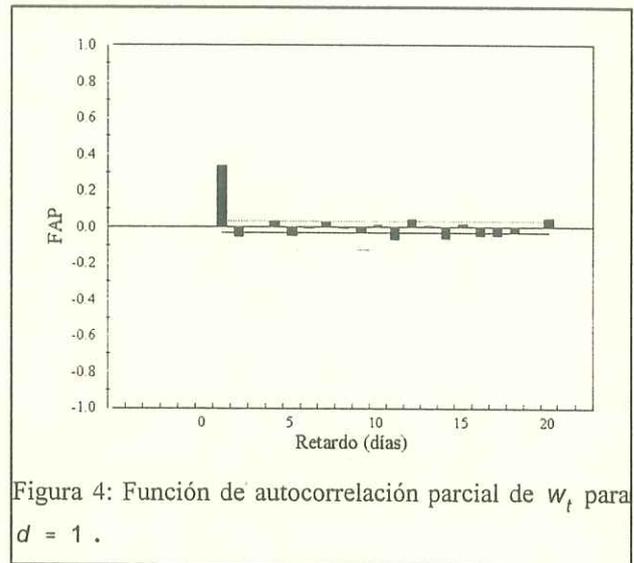


Figura 4: Función de autocorrelación parcial de  $w_t$  para  $d = 1$ .

Para determinar el orden  $p$  del modelo, se consideran los coeficientes de autocorrelación parcial, significativos mayores que el intervalo de confianza; se infiere que solo  $\phi_1$  es significativamente distinto de cero y los siguientes  $\phi_2, \dots, \phi_{20}$  pueden ser considerados nulos. En consecuencia, la componente autorregresiva debe ser de orden uno y el modelo propuesto es ARIMA (1,1,0).

$$y_t = y_{t-1} + \phi_1 y_{t-1} - \phi_1 y_{t-2} + \xi_t \quad (16)$$

### 2.1.2. Estimación de parámetros

El modelo propuesto se representa con la siguiente ecuación: donde: S S R: suma de cuadrados de los residuos

M S R: media de la suma de cuadrados de los residuos.

Modelo	Parámetros		$S_{param.}$	Tendencia	$S_{ten}$	S S R	M S R
(1,1,0)	$\phi_1$	0,3771	0,0438	-0,0013	0,0250	0,8345	0,0023

Por la condición de estacionaridad se deben cumplir:  $-1 < \phi_1 < 1$   
 y  $\phi_k = \phi_1 \phi_{k-1} \quad k > 0$

### 2.1.3. Verificación del modelo

En esta etapa se estudia la presencia de estructura de correlación en la serie de los residuos,  $\hat{a}_t$ , generados por el modelo.

Una serie de residuos independientes para distintos retardos indica el correcto ajuste del modelo si verifica los siguientes supuestos:

- . Falta de correlación entre los residuos
- . Distribución Normal con  $E(a_t) = 0$  y varianza constante  $\sigma_a^2$ .

Si los residuos son independientes y tienen distribución normal los coeficientes de la función de autocorrelación simple,  $r_{a_k}$ , se comportan como variables aleatorias con media cero, varianza asintótica  $1/T$  y distribución normal.

La verificación se realiza sobre la fas y la fap de los residuos. La fas de los residuos se calcula mediante:

$$r_{a_k} = \frac{\sum_{i=1}^{T-k} (a_i - \bar{a})(a_{i+k} - \bar{a})}{\sum_{i=1}^T (a_i - \bar{a})^2} \quad (17)$$

La prueba consiste en que los  $r_{a_k}$  no superen los límites del intervalo de confianza.

En las Figuras 5 y 6 se observa que los valores de los coeficientes no son significativamente distintos de

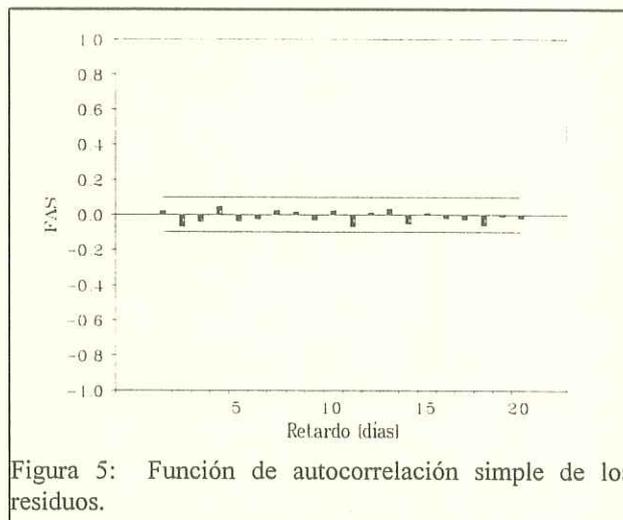


Figura 5: Función de autocorrelación simple de los residuos.

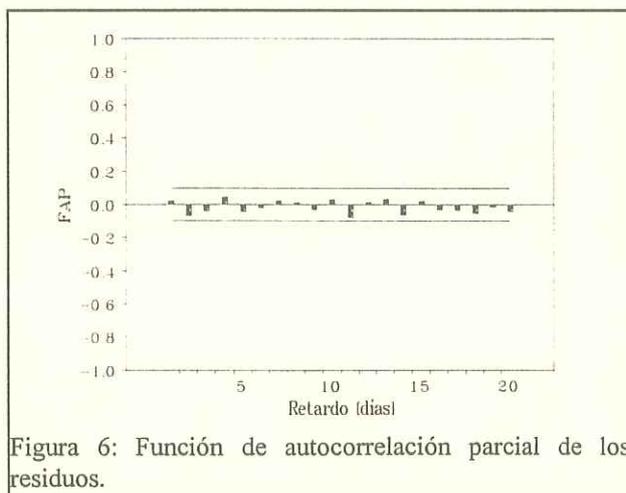


Figura 6: Función de autocorrelación parcial de los residuos.

cero pues no superan el intervalo de confianza respectivo a cada coeficiente de correlación. En consecuencia se aceptan los supuestos: los errores no son significativamente distintos de cero y no presentan estructura AR ni MA.

### 2.1.4. Sobreajuste

Consiste en ajustar modelos de estructura más compleja y contrastar el grado de significación estadística de los parámetros a incorporar. Si alguno de los parámetros es significativo, entonces se efectúa la verificación sobre el modelo asociado.

Modelo ARIMA (2, 1, 0)

$$y_t = y_{t-1} + \phi_1 y_{t-1} - \phi_1 y_{t-2} + \phi_2 y_{t-2} + \phi_2 y_{t-3} + \xi_t \quad (18)$$

se debe cumplir: .  $\phi_1 + \phi_2 < 1$

.  $\phi_2 - \phi_1 < 1$

.  $-1 < \phi_2 < 1$

Modelo ARIMA (1, 1, 1)

$$y_t = y_{t-1} + \phi_1 y_{t-1} - \phi_1 y_{t-2} + \xi_t - \theta_1 \xi_{t-1} \quad (19)$$

Modelo ARIMA (1, 1, 2)

$$y_t = y_{t-1} + \phi_1 y_{t-1} - \phi_1 y_{t-2} + \xi_t - \theta_1 \xi_t + \xi_t - \theta_2 \xi_{t-2} \quad (20)$$

se debe cumplir:  $\theta_1 + \theta_2 < 1$

$\theta_1 - \theta_2 < 1$

Modelo ARIMA	Parámetros		$S_{param.}$	Tendencia	$S_{ten}$	S S R	M S R
(1, 1, 0)	$\phi_1$	0,3771	0,0438	-0,0013	0,0250	0,8345	0,0000
(2, 1, 0)	$\phi_1$	0,4020	0,0476	-0,0013	0,0250	0,8236	0,0023
	$\phi_2$	0,0700	0,0476				
(1, 1, 1)	$\phi_1$	0,2098	0,1399	-0,0017	0,0029	0,8262	0,0023
	$\theta_1$	-0,1466	0,1418				
(1, 1, 2)	$\phi_1$	-0,4856	0,4243	0,0029	0,0050	0,8240	0,0023
	$\theta_1$	-0,8886	0,4174				
	$\theta_2$	-0,2817	0,1513				

Tabla 2

Test de hipótesis para los parámetros involucrados en el modelo:

$$H_0 : \text{parám}_n = 0$$

$$H_a : \text{parám}_n \neq 0$$

$$T = \frac{(\text{parám}_n - 0)}{S_{\text{param}}} \quad (21)$$

Con un nivel de significación de 0.05,  $z_{\alpha/2} = 1,96$ , si  $|T| < z_{\alpha/2}$  no se rechaza la hipótesis nula,  $H_0$ , y el parámetro no es significativamente distinto de cero.

Modelo ARIMA	(1,1,0)	(2,1,0)		(1,1,1)		(1,1,2)		
Parámetro	$\phi_1$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_1$	$\theta_1$	$\phi_1$	$\theta_1$	$\theta_2$
T	8,769	8,445	1,470	1,490	1,039	1,144	2,128	1,862

Tabla 3

De los resultados presentados en la Tabla 3 se infiere que  $\phi_2$  o  $\psi_n$  no son significativamente distintos de cero, por lo que es innecesario introducir un segundo parámetro en el modelo .

El modelo univariado más adecuado para estos datos es ARIMA (1,1,0) .

### 2.1.5. Pronóstico

Esta etapa consiste en la estimación de predicciones a distintos adelantos  $n$ ,  $\hat{y}_{t+n}$ , y su contraste con las observaciones del período comprendido entre marzo de 1993 y febrero de 1994. La estimación de las predicciones se realiza mediante:

$$\hat{y}_{t+n} = \hat{y}_{t+n-1} + \phi_1 \hat{y}_{t+n-1} - \phi_1 \hat{y}_{t+n-2} + \xi_{t+n} \quad (22)$$

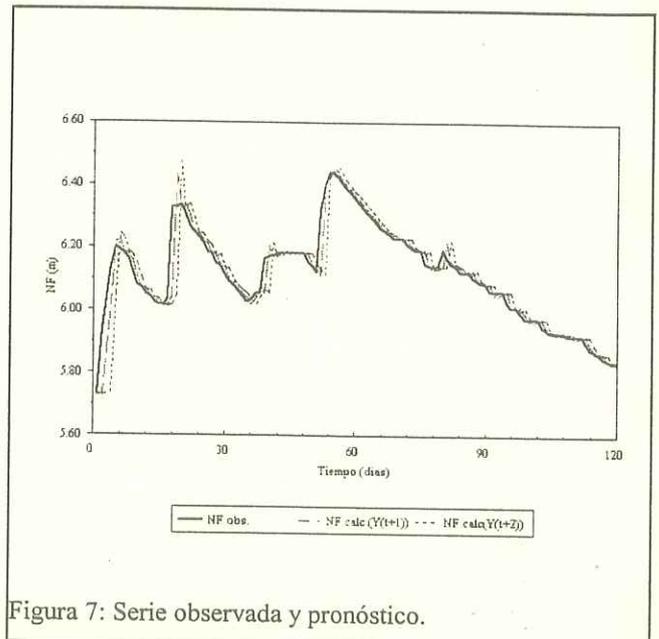
donde:  $n = 1, \dots, 5$  adelanto en días con que se pronostica.

Las expresiones que se utilizan para evaluar los errores de predicción estimados son: Raíz del error cuadrático medio (RECM), Error relativo (ER) y Error absoluto (EA). En la Tabla 4 se presentan los resultados de las expresiones para cinco adelantos.

Adelanto $n$	Error: $e_t = y_t - \hat{y}_t$ (m)		RECM =	ER =	EA =
	Máximo	Media	$\left[ \frac{\sum_1^t (y_t - \hat{y}_t)^2}{T} \right]^{1/2}$	$\left[ \frac{\sum_1^t (y_t - \hat{y}_t)}{T} \right] / \bar{y}$	$\left[ \frac{\sum_1^t  y_t - \hat{y}_t }{T} \right] / \bar{y}$
1	0,2820	-0,0005	0,0340	-0,0001	0,0027
2	0,4070	-0,0011	0,0565	-0,0002	0,0054
3	0,4671	-0,0016	0,0754	-0,0003	0,0080
4	0,4720	-0,0021	0,0909	-0,0004	0,0103
5	0,4680	-0,0026	0,1032	-0,0004	0,0612

Tabla 4

El análisis de los errores muestra un aumento significativo para el error máximo en las predicciones a uno y dos días. Los otros estadísticos se incrementan a mayor adelanto. El aumento en los errores a partir del segundo adelanto, se puede observar en la Figura 7 e indica la importancia de estudiar otros modelos predictivos utilizando valores promedios que permiten suavizar los máximos de la serie.



## 2.2. Valores promedio ( dos días)

Los datos corresponden a una serie calculada, de  $n$  valores ordenados:  $z_2, z_4, \dots, z_t, \dots, z_n$ . El conjunto de  $z_t$ , constituye la variable aleatoria ordenada para  $t = 2, \dots, t, \dots, n$ , valores promedio de dos días.

### 2.2.1. Identificación del modelo

En la Figura 8 se observa la función de autocorrelación simple que muestra un decrecimiento no exponencial, se infiere que la serie  $z_t$  es no estacionaria.

Se transforma en estacionario con un proceso integrado de orden  $d$ ,  $\hat{v}_t = z_t - z_{t-d}$ . Se aplica para la identificación el metodo utilizado en el caso anterior.

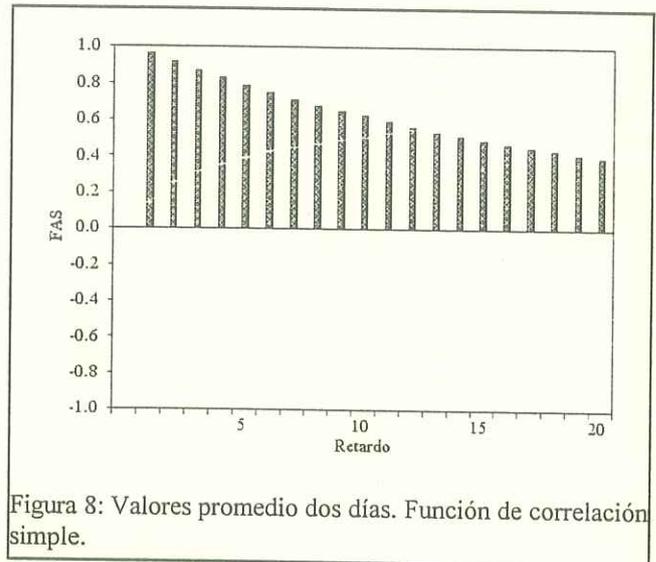


Figura 8: Valores promedio dos días. Función de correlación simple.

Orden de diferencia	$d = 1$	$d = 2$
$\bar{v}_t$	-0,00098	-0,004164
$T$	186	185
$s_v$	0,03605	0,0889
$s_{\bar{v}}$	0,00568	0,01132

Tabla 5

De los resultados de la Tabla 5 y de la interpretación de la Figura 9 surge que el orden a diferenciar es uno y el modelo seleccionado es un ARIMA(1,1,0).

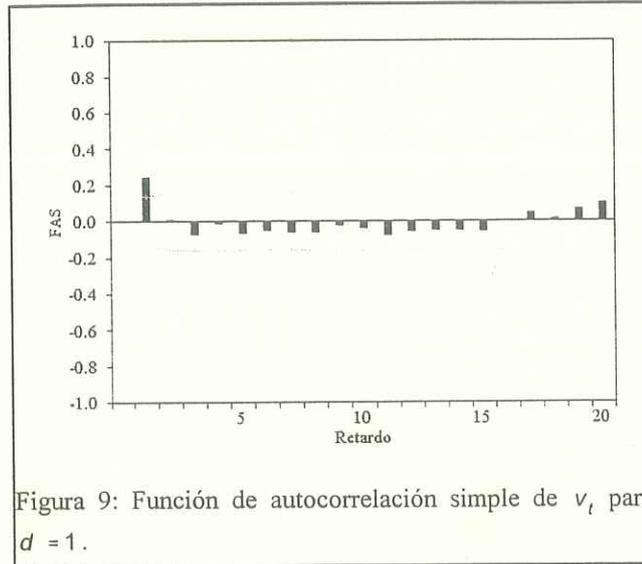


Figura 9: Función de autocorrelación simple de  $v_t$  para  $d = 1$ .

### 2.2.2. Estimación de parámetros

El modelo propuesto se representa con la siguiente ecuación:

$$z_t = z_{t-1} - \phi_1 z_{t-1} - \phi_1 z_{t-2} + \xi_t \quad (23)$$

Modelo ARIMA	Parámetros		$S_{param.}$	Tendencia	$S_{ten}$	S S R	M S R
(1, 1, 0)	$\phi_1$	0,2416	0,0726	-0,0005	-0,0057	1,0623	0,0059

### 2.2.3. Verificación

La verificación se realiza mediante la interpretación de la fas y la fap de los residuos en forma conjunta.

En las Figuras 10 y 11 se observa que los coeficientes de ambas funciones se encuentran comprendidos dentro de los intervalos de confianza y que no presentan estructuras. se aceptan los supuestos:

- Los residuos no

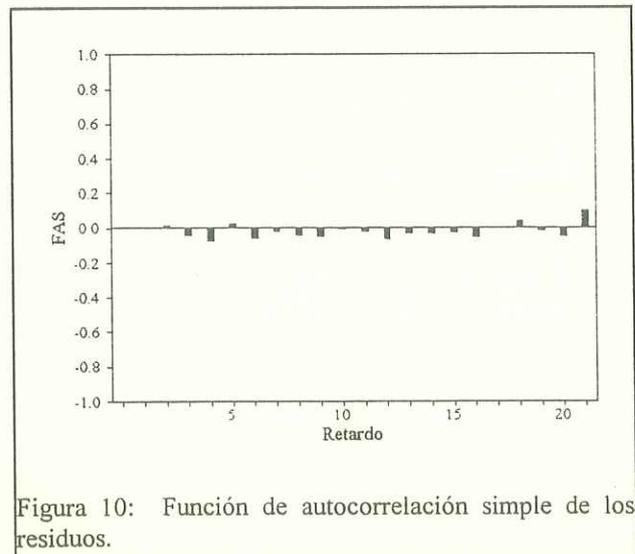


Figura 10: Función de autocorrelación simple de los residuos.

son significativamente distintos de cero.

- Existe independencia entre los mismos.

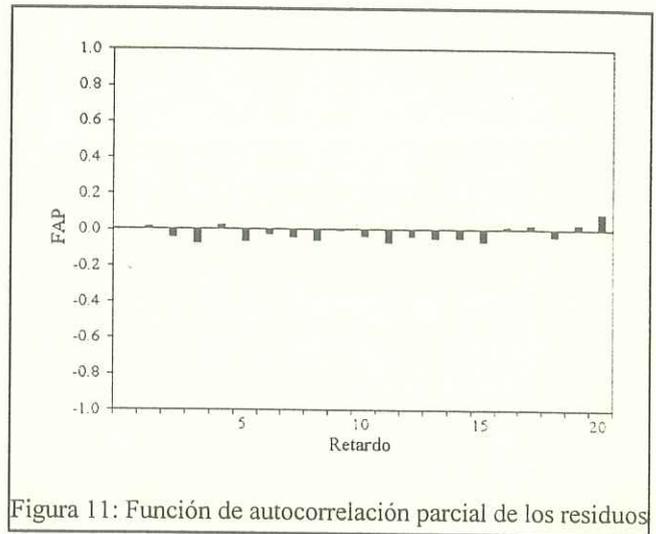


Figura 11: Función de autocorrelación parcial de los residuos

#### 2.2.4. Sobreajuste

El sobreajuste se realiza sobre los siguientes modelos:

ARIMA (2, 1, 0)

$$z_t = z_{t-1} + \phi_1 z_{t-1} - \phi_1 z_{t-2} + \phi_2 z_{t-2} - \phi_2 z_{t-3} + \xi_t \quad (24)$$

ARIMA (1, 1, 1)

$$z_t = z_{t-1} + \phi_1 z_{t-1} - \phi_1 z_{t-2} + \xi_t - \theta_1 \xi_{t-1} \quad (25)$$

Modelo ARIMA	parámetro		$S_{param.}$	tendencia	$S_{len}$	S S R	M S R
(1, 1, 0)	$\phi_1$	0,2416	0,0726	-0,0005	0,0067	1,0623	0,0059
(2, 1, 0)	$\phi_1$	0,2551	0,0751	-0,0006	0,0068	1,0575	0,0061
	$\phi_2$	-0,0568	0,075				
(1, 1, 1)	$\phi_1$	0,098	0,3003	-0,0006	0,0065	1,0602	0,0060
	$\theta_1$	0,1537	0,2995				

Tabla 6

El test para parámetros se plantea igual que en (21). A nivel de significancia,  $\alpha=0.05$ ,  $z_{\alpha/2} = 1,96$ , si  $|T| < z_{\alpha/2}$  se acepta la hipótesis nula,  $H_0$ , y el parámetro no es significativamente distinto de cero.

Modelo ARIMA	(1,1,0)	(2,1,0)		(1,1,1)	
Parámetro	$\phi_1$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_1$	$\theta_1$
$ T $	3,327	3,396	-0,756	0,326	0,513

Tabla 7

De los resultados presentados en la Tabla 7 se infiere que  $\phi_2$  o  $\theta_1$  no es significativamente distintos de cero, por lo que es innecesario introducir un segundo parámetro en el modelo.

El modelo univariado más adecuado para estos datos es ARIMA (1,1,0).

### 2.2.5. Pronóstico

Los errores en los pronósticos son estimados por diferencia entre los valores observados cada dos días y las predicciones para el mismo intervalo de tiempo.

Adelanto	Error $e_t = z_t - \hat{z}_t$ (m)		RECM = $\frac{1}{n} \sum_1^t (z_t - \hat{z}_t)^2$	ER = $\frac{1}{n} \sum_1^t (z_t - \hat{z}_t) / \bar{z}$	EA = $\frac{1}{n} \sum_1^t  z_t - \hat{z}_t  / \bar{z}$
	Máximo	Media			
1 (días)	0,1570	-0,0005	0,0133	-0,0001	0,0014
2 (4días)	0,2973	-0,0009	0,0538	-0,0002	0,0051
3 (6días)	0,4306	-0,0025	0,0888	-0,0004	0,0099
4 (8días)	0,4451	-0,0038	0,1128	-0,0007	0,0140
5 (10días)	0,6664	-0,0031	0,1425	-0,0009	0,0183

Tabla 8

De los resultados presentados en la Tabla 8 y su comparación con la Tabla 4 se infiere que, en general, para la misma cantidad de días con que se pronostica, los valores de los estadísticos de los errores disminuyen al utilizar valores promedio.

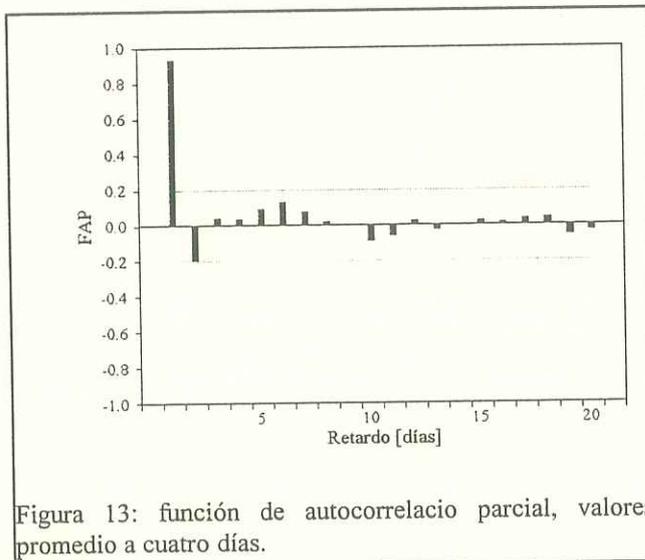
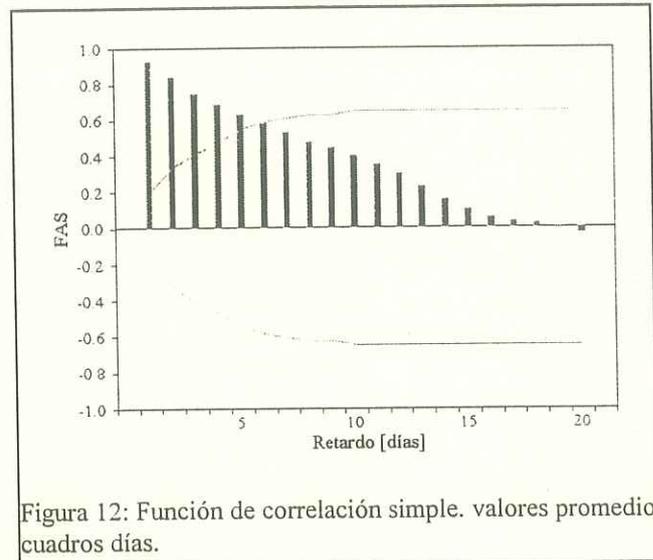
### 2.3. Valores promedio (cuatro días)

Los datos son definidos de forma tal que el conjunto de  $z_t$ , valores promedio de cuatro días constituye la serie para  $t = 4, \dots, t, \dots, n$ .

#### 2.3.1. Identificación del modelo

La Figura 12 muestra la fase de la serie, se observa un decrecimiento de tipo exponencial, se considera que la serie es estacionaria y consecuentemente no es necesario diferenciar. Como  $\bar{z}_t > 2s_z$  se admite que la media es distinta de cero y se incluye como parámetro a estimar.

En la Figura 13 se puede observar que solo el primero y el segundo coeficiente de



autocorrelación parcial son significativamente distintos de cero y los siguientes pueden ser considerados nulos. La componente autorregresiva es de orden dos y por lo tanto el modelo propuesto es ARIMA (2,0,0).

### 2.3.2. Estimación de parámetros

La ecuación que representa un modelo ARIMA (2,0,0) es:

$$z_t = \phi_1(z_{t-1} - C) + \phi_2(z_{t-2} - C) + C + \xi_t \quad (26)$$

Modelo ARIMA	Parámetro		$S_{param.}$	C	$S_c$	S S R	M S R
(2,0,0)	$\phi_1$	1,1677	0,1073	6,0210	0,1445	1,0573	0,0123
	$\phi_2$	0,2330	0,1038				

La región admisible para los parámetros del modelo ARIMA (2,0,0) es la que cumple con:  $-1 < \phi_2 < 1$ ,  $\phi_1 + \phi_2 < 1$  y  $\phi_2 - \phi_1 < 1$ .

### 2.3.3. Verificación

De las Figuras 14 y 15, al ser superada la banda de confianza para los retardos menores de 15 en la fas y en la fap de los residuos, se admite que se cumple el supuesto: los residuos no son significativamente distintos de cero.

La independencia entre los residuos para cualquier

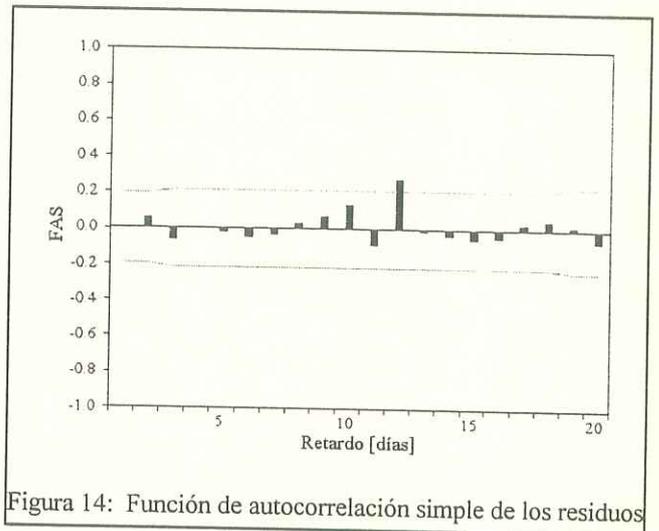


Figura 14: Función de autocorrelación simple de los residuos

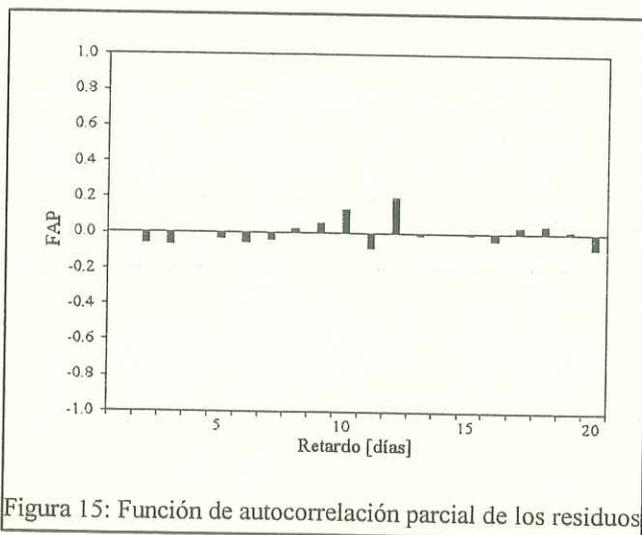


Figura 15: Función de autocorrelación parcial de los residuos

retardo, queda evidenciada por la falta de estructura que presenta la función de autocorrelación simple y parcial de los mismos.

### 2.3.4. Sobreajuste

Se realiza sobre:

Modelo ARIMA (1,0,0)

$$z_t = \phi_1(z_{t-1} - C) + C + \xi_t \quad (27)$$

Modelo ARIMA (3,0,0)

$$z_t = \phi_1(z_{t-1} - C) + \phi_2(z_{t-2} - C) + \phi_3(z_{t-3} - C) + C + \xi_t \quad (28)$$

Modelo ARIMA	parámetro		$S_{param.}$	C	$S_C$	S S R	M S R
(1,0,0)	$\phi_1$	0,9661	0,0284	5,8945	0,1250	1,1323	0,0128
(2,0,0)	$\phi_1$	1,1677	0,1037	6,021	0,1445	1,0573	0,0123
	$\phi_2$	-0,2330	0,1038				
(1,0,1)	$\phi_1$	0,09478	0,0364			1,0736	0,0123
	$\theta_1$	-0,2381	0,1075				
(3,0,0)	$\phi_1$	1,1742	0,1055			1,0438	0,0124
	$\phi_2$	-0,2985	0,1599				
	$\phi_3$	0,0605	0,1042				

Tabla 9

El test para parámetros se plantea igual que en los casos anteriores.

Model o ARIMA	(1,0,0)	(2,0,0)		(1,0,1)		(3,0,0)		
Parámetro	$\phi_1$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_1$	$\psi_1$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$
T	34,02	11,26	2,25	26,04	-2,21	11,13	0,19	0,58

Tabla 10

De los resultados presentados en la Tabla 10 se infiere que  $\theta_1$  es significativamente distinto de cero, pero no cumple con la región admisible dada por  $-1 < \phi_1 < 1$  y  $-1 < \theta_1 < 1$  para un modelo ARIMA (1,d,1) por lo que este modelo no es adecuado.

El modelo univariado seleccionado para estos valores es ARIMA (2,0,0).

### 2.3.5. Pronóstico

Los errores en los pronósticos son estimados de la misma forma que en los casos anteriores.

Adelanto	Error $e_t = z_t - \hat{z}_t$		RECM	ER	EA
	Máximo	Media			
1 (4días)	0,3101	-0,01276	0,0749	-0,00218	0,00957
2 (8días)	0,3742	-0,026	0,1239	-0,0044	0,01675
3 (12días)	0,5209	-0,03167	0,1513	-0,00627	0,02144
4 (16días)	0,4181	-0,0457	0,1735	-0,00781	0,02463
5 (20días)	0,556	-0,0527	0,1969	-0,009	0,02724

Tabla 11

De los resultados presentados en la Tabla 11 y de su comparación con las Tablas 4 y 8 se deduce, que en general, para la misma cantidad de días con que se pronostica, los estadísticos de los errores disminuyen al utilizar valores promedio a cuatro días, en relación al adelanto. Otros experimentos realizados con modelos para valores promedio mayores muestran un aumento significativo en los estadísticos de los errores.

## 2.4. Conclusiones

Los resultados presentados son útiles en la definición de modelos univariados y en la selección de las estructuras adecuadas para la predicción de niveles freáticos, a nivel diario, para distintos adelantos.

En consecuencia, la estimación de los estadísticos de los errores permitió delimitar el campo de aplicación de estructuras univariadas y avanzar en la definición de elementos (error cuadrático medio y error máximo) necesarios para la contrastación con modelos más complejos.

Los valores de los estadísticos, para distintos niveles de agregación, permiten tener una idea de la utilidad práctica de dos posibilidades predictivas: predicción puntual y de persistencia de la serie a un nivel determinado.

### 3. Modelo de función de transferencia Formulación del modelo

Los modelos denominados de función de transferencia, autoregresivo de promedios móviles con variable exógeno, (ARMAX) consisten en una relación lineal entre dos series temporales estacionarias o que pueden ser convertidas en estacionarias, que se puede expresar como:

$$Y_t = \tilde{Y}_t + N_t \quad (29)$$

donde:  $Y_t$ : variable respuesta

$\tilde{Y}_t$ : respuesta explicada por las  $X_{t-k}$

$N_t$ : respuesta no explicada o proceso de inercia

$$Y_t = C_0 + v_0 X_t + v_1 X_{t-1} + \dots + v_i X_{t-i} + e_t \quad (30)$$

si en la ecuación (30) se introduce el orden  $b$ , de desplazamiento entre la serie de entrada y salida, se obtiene la expresión:

$$Y_t = C_0 + v_0 X_{t-b} + v_1 X_{t-b-1} + \dots + v_i X_{t-b-i} + e_t \quad (31)$$

empleando el operador de retardo  $B$ :

$$Y_t = C_0 + v(B) X_{t-b} + e_t \quad (32)$$

donde:  $v(B) = (v_0 + v_1 B + v_2 B^2 + \dots + v_n B^n +)$  es llamada respuesta a impulsos del sistema.

Si  $Y_t$  y  $X_t$  son estandarizadas, restando sus medias,  
 $Y_t - \bar{Y} = y_t$  y  $X_t - \bar{X} = x_t$ , la ecuación toma la forma:

$$y_t - \delta_1 y_{t-1} \dots - \delta_r y_{t-r} = \omega_0 x_{t-b} - \omega_1 x_{t-b-1} \dots - \omega_s x_{t-b-s} \quad (33)$$

y

$$v(B) = \frac{\omega_s(B)}{\delta_r(B)} B^b \quad (34)$$

Con estas dos últimas ecuaciones se define un modelo ARMAX ( $s$ ,  $r$ ,  $b$ ), que tiene los primeros  $b$  coeficientes no significativos, los siguientes, hasta  $b + s$ , son significativos y sin forma fija de variación y decrecen a partir de  $b + s + 1$ .

$$Y_t = \theta_0 + \omega(B) X_{t-b} + e_t \quad (35)$$

dónde:  $\theta_0$  es una constante que representa  $\bar{Y}$ ,  $\bar{X}$  y  $\delta(B)$ .

### Función de covarianzas cruzadas y correlación cruzada.

Bajo el supuesto que ambas variables son estacionarias, con media  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  y varianza constante,  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ , para las respectivas variables  $X_t$  e  $Y_t$ , y además tienen distribución normal, se define la función covarianza cruzada entre  $X_t$  e  $Y_t$  en el retardo  $k$  como:

$$Y_{xy}(k) = E \left[ (X_t - \mu_x) (Y_t - \mu_y) \right] \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (36)$$

$X_t$  influye linealmente sobre  $Y_t$  cuando existe algún valor  $Y_{xy}(k)$  no nulo para  $k > 0$ . Ambos procesos son conjuntamente estacionarios si la covarianza cruzada depende solo de  $k$  y no del instante considerado.

Se define:

$$\rho_{xy}(k) = \frac{Y_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad k = 0 \pm 1 \pm 2 \pm \dots \quad (37)$$

como coeficiente de correlación cruzada para el retardo  $k$ , esta función es la estandarización de  $Y_{xy}(k)$  y en consecuencia tiene propiedades análogas. La función definida no es simétrica con respecto al origen, para  $k > 0$  mide la relación causal de  $X_t$  hacia  $Y_t$ .

### Ganancia.

Se define como el valor límite de la respuesta,  $Y_t$ , cuando la variable explicativa  $X_t$ , experimenta un incremento unitario sostenido, es decir un escalón unitario. El valor límite es la suma de los coeficientes  $v_k$ . Conocido el modelo de función de transferencia la ganancia se calcula como (Box y Jenkins 1976; Peña Sánchez de Rivera, D.1989):

$$G = \sum_{i=0}^k v_k = \frac{\omega_0 - \omega_1 - \dots - \omega_s}{1 - \delta_1 - \dots - \delta_r} \quad (38)$$

Es una propiedad importante del sistema. Su estimación se asocia con el grado de significación que tiene introducir la variable exógena al modelo.

### 3.1. Información básica

En la Figura 16 se puede observar que la distribución temporal de los volúmenes de precipitación a lo largo del año es irregular, siendo la estación más lluviosa el verano y el invierno la más seca.

En la Figura 17 se observa que el comportamiento del nivel freático como respuesta a los eventos de lluvia es irregular, depende del volumen, de la intensidad de la precipitación y de la cota anterior al evento pluviométrico.

El tiempo de respuesta varía entre dos y once horas, dependiendo de la profundidad del nivel freático en el momento que se inicia la precipitación y de la intensidad de la misma.

El tiempo total que tarda el nivel freático en llegar a un máximo, luego de iniciado el evento está en relación inversa con la intensidad de la lluvia más que con la variación de la cota.

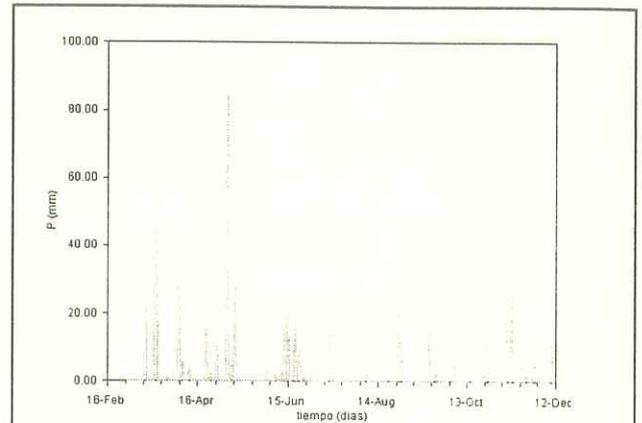


Figura 16: Volumen precipitado (febrero - diciembre 1992)

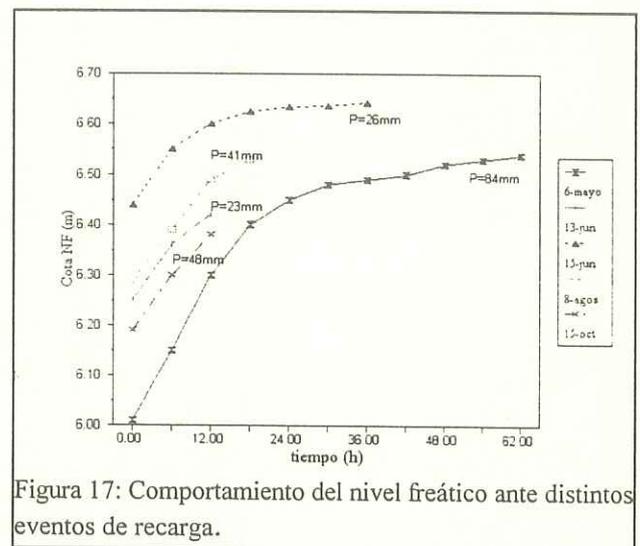


Figura 17: Comportamiento del nivel freático ante distintos eventos de recarga.

#### 3.1.1. Estimación de la función de correlación cruzada

La estimación de esta función se realiza mediante:

$$r_{xy}(k) = \frac{c_{xy}(k)}{s_x s_y} \quad k = 0 \pm 1 \pm 2 \pm \dots \quad (39)$$

donde:

$$c_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (40)$$

es la función de covarianza cruzada estimada y  $n$  es la cantidad de pares de observaciones  $(X_t, Y_t)$ .

La Figura 18 muestra la correlación cruzada estimada entre la precipitación y los datos diarios de nivel freático. Una primera interpretación de la función de correlación cruzada entre la precipitación y el nivel freático permite inferir que no se observa una asociación **lineal**, en este nivel de agregación .

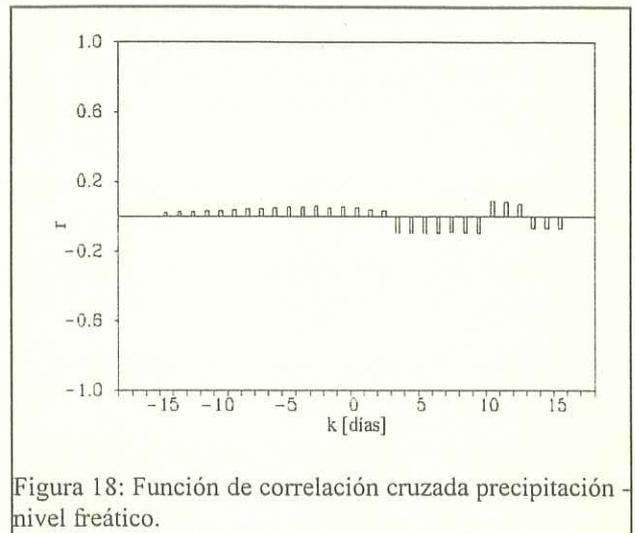


Figura 18: Función de correlación cruzada precipitación - nivel freático.

#### Precipitación - errores del modelo autorregresivo de nivel freático ARIMA (1, 1, 0)

Una forma alternativa de estimación de la función de correlación cruzada consiste en estudiar la relación entre la precipitación y los residuos del nivel freático. Esta alternativa es usada cuando una o ambas variables presentan estructura de autocorrelación, pudiendo producir dificultades en el análisis de la correlación entre las variables (Granger, 1969).

En la Figura 19 se observa que la función de correlación cruzada estimada no es simétrica alrededor del cero, que es significativamente distinta de cero para  $k = 0, 1$ . Este resultado permite inferir un modelo ARMAX (0, 1, 1) que incluye la variable precipitación como un indicador del error en la predicción con un modelo ARIMA (1, 1, 0).

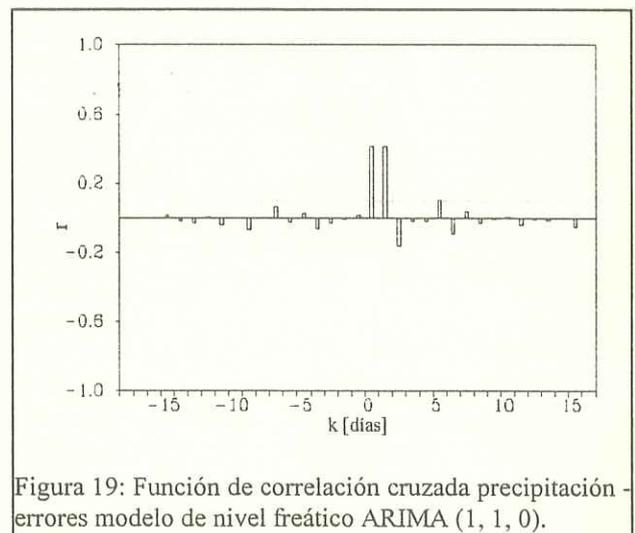


Figura 19: Función de correlación cruzada precipitación - errores modelo de nivel freático ARIMA (1, 1, 0).

La Figura 20 muestra el resultado obtenido de realizar la correlación cruzada entre el logaritmo natural de la precipitación y los errores del modelo autorregresivo de nivel freático ARIMA (1, 1, 0). Se observa que no presenta simetría alrededor del cero y que es significativa para  $k = 0,1$ . Este resultado permite inferir un modelo ARMAX (0, 1, 1) en el cual la variable de entrada, precipitación, es no lineal, y actúa como un indicador del error en la predicción del modelo ARIMA (1, 1, 0).

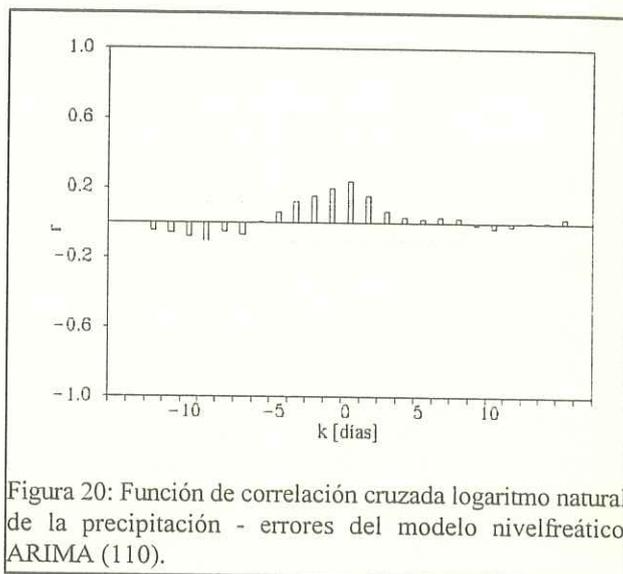


Figura 20: Función de correlación cruzada logaritmo natural de la precipitación - errores del modelo nivelfreático ARIMA (110).

### 3.1.2. Identificación de la función de transferencia entre Precipitación - errores del modelo autoregresivo de nivel freático ARIMA (1, 1, 0)

El objetivo específico de esta etapa es definir los ordenes  $b, s$  y  $r$ , operadores de la función de transferencia entre la precipitación y los errores del modelo ARIMA (1, 1, 0) y hacer una estimación inicial de los parámetros  $\delta$  y  $\omega$ .

Se realiza una estimación de la respuesta a impulsos mediante el cálculo de los  $v_k$  de la ecuación (34), se obtienen las siguientes soluciones:

$$v_k = r_{\alpha\beta}(K) * \frac{s_\beta}{s_\alpha} \quad (41)$$

donde:

$$v_k = 0$$

$$k < b$$

$$v_k = \delta_1 v_{k-1} + \dots + \delta_a v_{k-a} + \omega_{k-b}$$

$$k = b, b+1, \dots, b+s$$

$$v_k = \delta_1 v_{k-1} + \dots + \delta_a v_{k-a}$$

$$k > b+s$$

por lo tanto con:  $v_0 = 0$ ,  $v_1 = \omega_0$ ,  $v_2 = \delta_1 v_1 - \omega_1$ ,

$v_3 = \delta_1 v_2 + \delta_2 v_1$  y  $v_4 = \delta_1 v_3 + \delta_2 v_2$  se estiman los parámetros  $\delta_1, \delta_2, \omega_0$  y  $\omega_1$  de forma preliminar.

### 3.1.3. Estimación

Se obtiene mediante sucesivas iteraciones una estimación condicional de los parámetros con la mínima suma de cuadrados de los residuos.

El modelo planteado es :

$$\Delta_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} x_{t-b} + \frac{a_t}{\phi(B)} \quad (42)$$

para los ordenes del modelo:

$$\Delta_t = \frac{(U_0 + U_1 B^1) x_{t-1}}{1 - S_1 B} + \frac{a_t}{1 - \phi_1} \quad (43)$$

siendo:

$$\Delta_t = (S_1 + \phi_1) \xi_{t-1} - S_1 \phi_1 \xi_{t-2} + U_0 x_{t-1} + (U_1 - U_0 \phi_1) x_{t-2} - U_1 \phi_1 x_{t-3} + a_t - S_1 a_{t-1}$$

donde:  $\xi_{t-k}$  es la serie de errores estimados mediante la diferencia entre las observaciones de nivel freático,  $y_{t-k}$ , y los valores estimados,  $\hat{y}_{t-k}$ , mediante el modelo ARIMA (1, 1, 0) aplicando la ecuación (22) a los datos del periodo comprendido entre marzo 1993 y febrero de 1994.

Los parámetros obtenidos mediante las iteraciones son:

Modelo	Parámetros	
ARMAX (1,1,0)	$\phi_1$	-0,2095
	$U_0$	0,0020
	$U_1$	0,0027
	$S_1$	0,3768

Con los parámetros estimados se calcula la ganancia, de acuerdo con la ecuación (38) para un modelo ARMAX (0, 1, 1):

$$\hat{G} = \frac{U_0 + U_1}{1 - S_1}, \text{ el resultado obtenido es } 0.0034.$$

### 3.1.4. Pronóstico

Los errores en los pronósticos son estimados por diferencia entre los valores de nivel freático observados a nivel diario y las predicciones, del mismo, obtenidas mediante:

$$\hat{y}_{t+n} = \hat{y}_{(ARIMA\ 110)\ t+n} + \Delta_{t+n} \quad (44)$$

para el período comprendido entre marzo de 1993 y febrero de 1994 para un adelanto  $n = 1, \dots, 3$ .

Adelanto	Error $e = y_t - \hat{y}_t$ (m)		RECM	ER	EA
	Máximo	Media			
1	0,2820	-0,0080	0,0514	-0,0014	0,0026
2	0,4083	-0,0042	0,0699	-0,0061	0,0021
3	0,4670	-0,0083	0,0835	-0,0074	0,008

Tabla 13

De los resultados presentados en la Tabla 13 y su comparación con la Tabla 4 se infiere que para pronósticos a nivel diario no hay una disminución significativa en los estadísticos de los errores que justifique, en este caso, introducir la variable precipitación para mejorar la calidad de los pronósticos.

### 3.2. Conclusiones

El bajo grado de significación que presentan los estadísticos de correlación cruzada y ganancia coinciden con la ausencia de una mejora en la estimación de los pronósticos con el modelo de función de transferencia lineal. Se puede esperar que mediante un análisis que permita incorporar el grado de no linealidad en la relación entre las variables, se mejore la respuesta del modelo para este nivel de complejidad.

Otro aspecto que debe ser considerado en la explicación del

impacto de la precipitación sobre la predicción de los niveles freáticos son las características hidrológicas, morfológicas y geohidrológicas del lugar donde se realiza la medición, dado que se trata de una zona de transición, no de recarga directa y actúan otras variables en el balance hídrico.

#### 4. Conclusiones

Los resultados del análisis de series temporales aplicado a niveles freáticos, en escala diaria, muestran la posibilidad de su utilización para la predicción con diferentes adelantos de tiempo.

La estimación de los estadísticos de los errores permite delimitar el campo de aplicación de estructuras univariadas y avanzar en la definición de elementos (error cuadrático medio y error máximo) necesarios para la contrastación con modelos más complejos. Es decir que con estos modelos se fija un umbral de la capacidad predictiva, el cual debe ser mejorado por soluciones más complejas.

El análisis de los resultados obtenidos con la función de transferencia precipitación errores de nivel freático muestra una capacidad predictiva semejante a la obtenida con modelos univariados.

En consecuencia, es necesario avanzar en la identificación de una posible función de transferencia no lineal, realizar otras aplicaciones en lugares de la cuenca con distintas características geohidrológicas para estudiar el efecto de la precipitación como variable explicativa en un contexto más amplio e introducir otras variables que influyen en el balance hídrico.

## 5. Referencias bibliográficas

Box, G.E.P. y G.M. Jenkins, Time Series Analysis, Forecasting and Control. Holden Day. 1976.

Calderón Loaiza, J.I. y O.N. Bermoudes, Aplicación del análisis de series de tiempo en Hidrogeología. II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. 43-55. Tomo . Chile, 1994.

Granger, C.W.J., Prediction with a generalized cost of error function, Oper.Res.Q. 20, 199-207.1969.

Kitanidis, P.K. y R.L. Bras, Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model. 1. Analysis of uncertainty. Water Resources Research, 16(6), 1025-1033. 1980.

Kitanidis, P.K. y R.L. Bras, Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model. 2. Applications and results. Water Resources Research, 16(6), 1034-1044. 1980.

McLeod A.I., K.W. Hipel y W. Lennon, Advances in Box-Jenkins Modeling 2. Applications. Water Resources Research, 13(3), 577-586.1977.

Peña Sanchez de Rivera, D., Estadística modelos y métodos (2), Modelos lineales y series temporales. 1989.

Viswanathan, M.N., Recharge Characteristics of an Unconfined Aquifer from the Rainfall-Water Table Relationship. Journal of Hydrology, Volumen 70, N°1-4 1984.

Parte 2

Estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de las fuentes  
de agua subterránea en una zona piloto del gran Buenos Aires

## 1. Introducción

La programación y optimización del uso de fuentes de agua subterránea requiere de un sistema para la prevención de su deterioro. La evaluación de la vulnerabilidad de estas fuentes, frente al ingreso de sustancias contaminantes, es una de las bases imprescindibles para el aprovechamiento sustentable de este recurso.

El presente trabajo consiste en una actualización del informe de beca "Estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de Las fuentes de aguas subterráneas en el Area Metropolitana. Mapa de Vulnerabilidad", 1993. En ambos casos se toman como antecedentes mapas de vulnerabilidad hechos en distintas partes del mundo, con diferentes objetivos y escalas de trabajo: Albinet, M. y Margat, J. [1]; Foster, S. [9]; Civita, M. [5].

El objeto del trabajo es experimentar y mejorar criterios de cuantificación de parámetros de vulnerabilidad para el sistema acuífero Puelche que puedan ser aplicados al conglomerado metropolitano de la ciudad de Buenos Aires y continuar con las tareas desarrolladas en el informe de beca anterior [3].

Se trabaja sobre la misma zona piloto, un sector del Area Metropolitana donde la densidad de perfiles es satisfactoria y donde se sospechan problemas de contaminación del recurso hídrico subterráneo.

La caracterización hidrogeológica y la determinación de los factores utilizados para el cálculo de la vulnerabilidad, se realiza en base a 85 perfiles cuya localización figura en el informe de beca previo [3].

## 2. Características del área

La zona seleccionada corresponde a un sector, localizado al sur del Conurbano Bonaerense, que abarca parcialmente los partidos de Almirante Brown, Lomas de Zamora y Lanús, con una superficie aproximada de 160 km<sup>2</sup> (Figura 1).

Sus características, climáticas, morfológicas, geológicas, e hidrogeológicas se encuentran descritas en el informe antes citado [3].

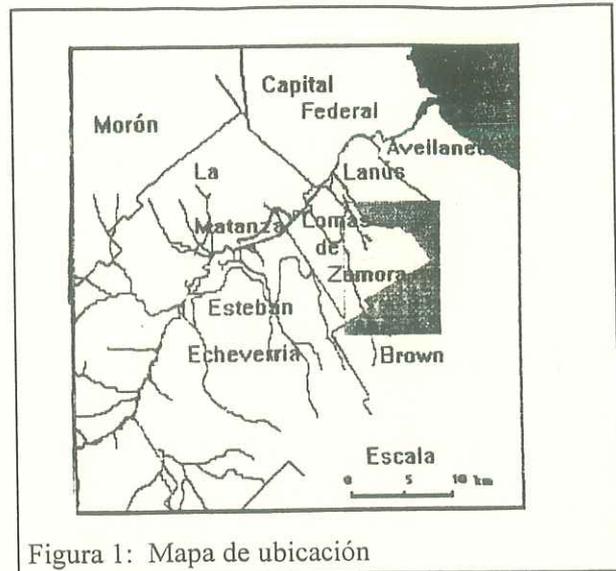


Figura 1: Mapa de ubicación

## 3. Vulnerabilidad

La contaminación de las aguas subterráneas está condicionada por la fuente contaminante y por los procesos físico - químicos que regulan el transporte de las sustancias contaminantes. Los procesos físicos están directamente relacionados con las características hidrogeológicas propias del acuífero. El término vulnerabilidad sintetiza aquellas características del sistema acuífero relacionadas con los fenómenos físico-químicos que rigen la contaminación del agua subterránea.

Los mapas de vulnerabilidad son función de las distintas características físicas de cada región y su entorno. El número de parámetros utilizados para representar las características de interés depende del autor y están asociados con:

- a) Las características de la zona no saturada.
- b) La profundidad y morfología de la zona saturada.
- c) La dirección y velocidad de flujo del sistema acuífero.
- d) El clima, como medida de la recarga subterránea.

La evaluación de la vulnerabilidad debe ser considerada caso por caso; por lo que su estimación puede ser valorada adecuadamente en áreas reducidas.

### 3.1. Métodos y técnicas de valoración de la vulnerabilidad

Los métodos y técnicas de valoración de la vulnerabilidad varían de acuerdo a la fisiografía, cantidad y calidad de los datos y del propósito del estudio. De acuerdo con el propósito del estudio se subdividen en: universal (Albinet, M., Margat, J. [1]) y local para un ambiente fisiográfico definido (Breeuwsma, A., van Duijvenbooden, W [4]).

Existen distintas técnicas que se pueden agrupar como:

. Complejo hidrogeológico por superposición de cartografía temática.

. Sistema paramétrico que incluye:

. Sistema de matrices para uso local.  
. Sistema de clases, es una modificación del primer método para un contaminante universal. Dentro de este sistema el método DIOS (Foster, S. [9]) es el más conocido.

. Modelos de ponderación: difieren con los sistemas paramétricos en que además de considerar el valor del parámetro, permite adjudicar un peso distinto a cada uno de ellos. Un ejemplo de estos es el sistema DRASTIC desarrollado para la EPA (Aller et al [2]).

La elección de uno de estos métodos requiere de un análisis de la relación entre el denominador de escala del mapa, la densidad de puntos de información y el número de datos por punto (Civita, M. [5]). Para mapas con denominador de escala bajo y con alta densidad de puntos se usa el método de los modelos de ponderación. Para mapas con alto denominador de escala y con densidad de puntos moderada se recomienda el método de complejo hidrogeológico y para situaciones intermedias el método paramétrico.

El relieve también juega un rol importante en la elección del método. En regiones planas, con buena densidad de datos y con bajo denominador de escala, es adecuado usar el sistema paramétrico.

Dado que la zona de trabajo se encuentra en zona de llanura y que la información disponible no es suficiente para aplicar un modelo de ponderación, se considera adecuado seguir usando el método paramétrico propuesto por Foster, S [9], intentando un mejor ajuste de los parámetros involucrados a las condiciones del lugar.

### 3.2. Análisis de los parámetros involucrados en el área de estudio

Las diferentes categorías de vulnerabilidad en el área que nos ocupa son valoradas en base a tres parámetros:

- Grado de confinamiento.
- Litología predominante por encima del acuífero Puelche.
- Espesor de la zona no saturada.

Los dos primeros, son elementos descriptores invariables para la escala de tiempo considerada, son parámetros estables e intrínsecos del sistema acuífero.

El espesor de la zona no saturada es un factor dinámico, función de las variaciones meteorológicas del lugar y de factores antrópicos.

No se consideran los parámetros que, a la escala del trabajo, presentan una distribución homogénea en el área de estudio: recarga, pendiente topográfica, diseño y densidad de la red de drenaje. Tampoco se consideran las variables relacionadas con la localización, tamaño y tipo de contaminantes, pues este sistema considera un hipotético contaminante universal.

Durante el transcurso del trabajo se paso por distintas etapas, se realizaron distintos esquemas de clasificación (Tablas 1, 2 3) que se analizan en los siguientes párrafos.

### 3.2.1. Grado de confinamiento

En el informe de beca anterior [3] (Tabla 1) se consideró al acuífero Puelche como semiconfinado con un índice único para toda el área, no se tuvo en cuenta el efecto de las discontinuidades litológicas sobre este parámetro ni el comportamiento hidrodinámico.

Para reducir los errores que involucra la primera de estas simplificaciones, se evaluó este parámetro de acuerdo a la presencia, al tipo y ubicación del acuitardo, adjudicando a cada clase los siguientes índices [8] (Tabla 2):

**0.40: Semiconfinado.** Se consideran dentro de esta clase, los perfiles en los que se observa presencia de la variedad más arcillosa en la base del Pampeano que, formando lentes de espesores que varían de 1m a 8m, actúa como capa acuitarda.

**0.60: Libre cubierto.** Se incluyen dentro de esta clase aquellos perfiles en los que se observa la presencia de "tosca" (mantos lentiformes, nódulos o concreciones calcáreas) en los niveles medio y superior del Pampeano y cuyos niveles piezométricos se encuentren por debajo del piso de tosca.

**1.00: Libre.** Se incluyen en esta clase aquellos perfiles en los que no se observan los niveles con "tosca" ni arcilla propias de la base del Pampeano.

En el momento de realizar este informe se considera que esta también es una simplificación, ya que no toma en cuenta la componente hidrodinámica en zonas con sobre-explotación, condición frecuente en áreas urbanas como la considerada, por lo que se realiza una nueva aproximación al problema:

En todos los casos en que el nivel de agua se encuentra por arriba del techo del acuífero Puelche se lo trata como **Semiconfinado**, con un índice de **0.40**.

Para los casos con sobre-explotación, en que el nivel piezométrico se encuentra por debajo del techo de las Puelches se consideran las siguientes categorías:

**Libre cubierto**, con índice **0.60**, para aquellos perfiles en los que se observa la presencia de "tosca" (mantos, nódulos o concreciones calcáreas) y/o arcilla en los distintos niveles del Pampeano.

**Libre**, con índice **1.00**, para aquellos perfiles en los que no se observan los niveles con "tosca" ni con arcilla.

### 3.2.2. Litología predominante de los estratos suprayacente al acuífero Puelche

En el informe de beca anterior [3], la litología de esta zona se diferenció en tres tipos de acuerdo a su efecto como atenuadores y/o barreras de accesibilidad hidráulica, adjudicando los siguientes índices (Tabla 1):

**0.60:** Con predominio de arena. Comprende los sectores donde predominan los depósitos posteriores a los pampeanos, restringidos a las depresiones topográficas con escaso desarrollo areal

**0.50:** Con predominio de loess, limo, y/o arena arcillosa. Comprende los sectores donde predominan los depósitos del Pampeano integrados por loess, limo, limo arenoso arcilloso y arena arcillosa, con una granulometría media de limo grueso, muy friable y escasamente sementados por  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

**0.40:** Con predominio de tosca y/o arcilla. Comprende los sectores donde predominan los depósitos del Pampeano muy sementados con  $\text{CO}_3\text{Ca}$  y la variedad más arcillosa del Pampeano, ligeramente compacta, muy plástica y más restringida arealmente. Esta última variedad, donde se encuentra presente, actúa como estrato confinante del subacuífero Puelche.

Para el segundo esquema se consideró [8](Tabla 2):

**0.60: Con predominio de arena.** Comprende los sectores donde predominan los depósitos posteriores a los Pampeanos, restringidos a las depresiones topográficas. La atenuación y/o el efecto como barreras de accesibilidad hidráulica ante el predominio de arena es despreciable.

**0.50: Sin predominio de arena.** Incluyendo en esta clase aquellas litologías en las que hay predominio de loes, limo, arena arcillosa, tosca y/o arcilla correspondiendo con aquellos sectores donde los depósitos del Pampeano se encuentran bien desarrollados. La atenuación y/o el efecto como barreras de accesibilidad hidráulica ante cualquiera de estas litologías debe ser tenido en cuenta.

En este momento se considera acertado seguir trabajando con la segunda clasificación del parámetro litología predominante suprayacente al acuífero Puelche.

### 3.2.3. Espesor de la zona no saturada

Por su posición entre la superficie y el nivel freático, representa la primera defensa natural contra la contaminación, donde actúan con mayor fuerza los procesos físico-químicos de retención y atenuación en el flujo de las sustancias contaminantes.

A diferencia del resto de los parámetros, no es una característica intrínseca del sistema acuífero. Se trata de una variable dependiente de las condiciones meteorológicas y de explotación del lugar.

Se consideraron cuatro intervalos, de acuerdo a los espesores observados y su efecto cómo retardador, adjudicando los siguientes índices :

- 0.95: espesor menor de 2 m.
- 0.90: espesor entre 2 y 5 m.
- 0.80: espesor entre 5 y 10 m.
- 0.70: espesor entre 10 y 20 m.
- 0.50: mayor de 20 m.

Se agrega el intervalo de índice 0.50 para aquellos casos en que las condiciones de extracción generan un descenso superior al considerado en las clasificaciones anteriores.

### 3.3. Esquema de clasificación

Se presentan los tres esquemas de clasificación, de acuerdo con las apreciaciones hechas en los párrafos anteriores, con los resultados de su valoración.

Con los índices y los rangos cuantitativos definidos en la modificación del esquema de clasificación de Foster, se valora cualitativamente según clases, la vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero subterráneo (Tabla 1, 2 y 3).

		ESPESOR ZONA NO SATURADA (m)			
		< 5 m	5-10 m	10-20 m	
		INDICES	0.90	0.80	0.70
LITOLOGÍA PREDOMINANTE ZONA SATURADA	Arena	0.60	Alta	Moderada alta	
	Loess, limos, arcillas arenosas y arenas arcillosas	0.50	Moderada alta		Moderada Baja
	Arcilla y/o tosca y sedimentos con tosca	0.40	Moderada baja		Baja

Tabla 1

		ESPESOR ZONA NO SATURADA		< 2 m	2-5 m	5-10 m	10-20 m
		CONFINAMIENTO	INDICES	0.95	0.90	0.80	0.70
Con pre- dominio de arenas	0.60	Libre	1.00	Alta		Moderada alta	
		Cubierto	0.60	Moderada baja		Baja	
		Semiconfinado	0.40	Baja			
Sin pre- dominio de arena	0.50	Libre	1.00	Moderada alta			M. baja
		Cubierto	0.60	Baja			
		Semiconfinado	0.40				

Tabla 2

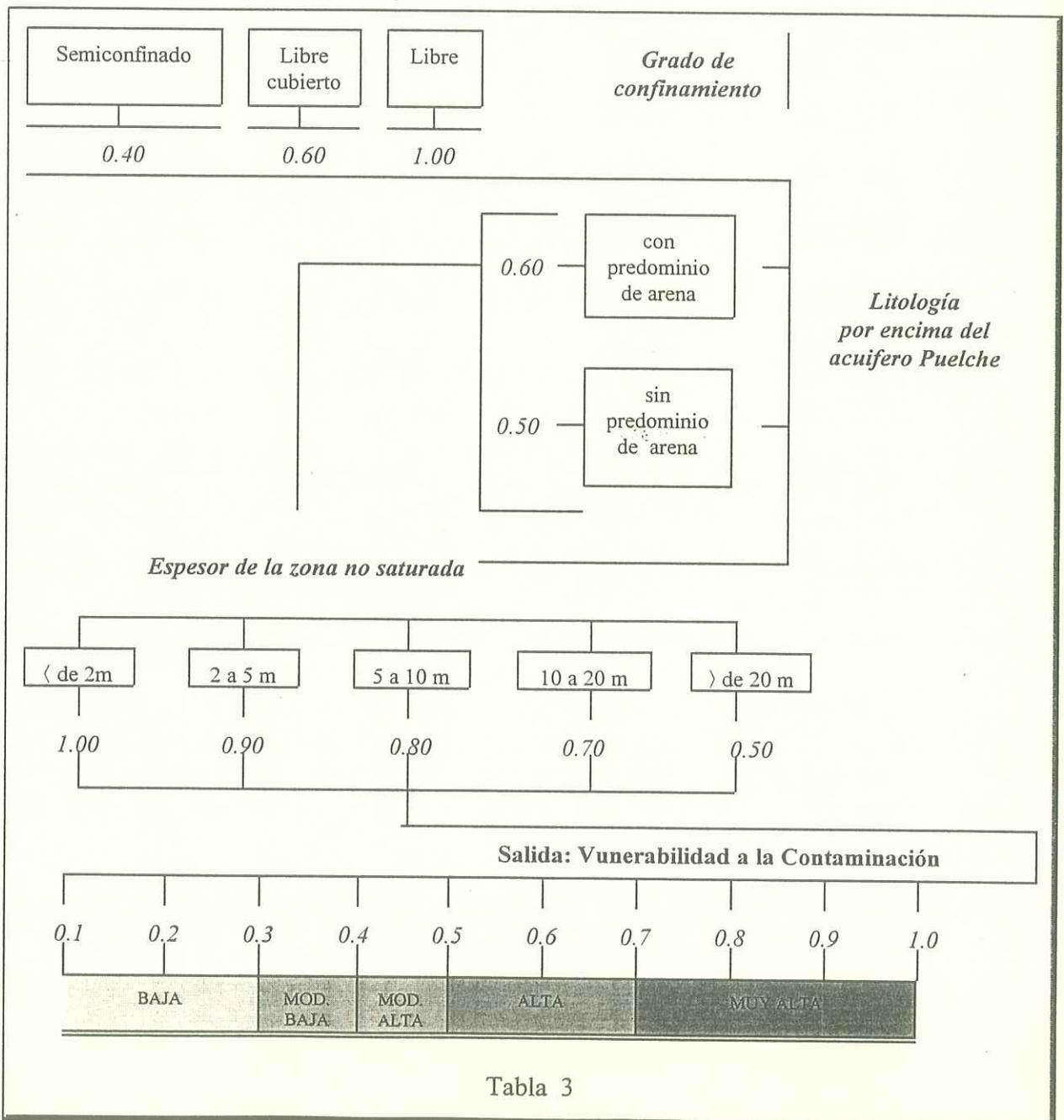


Tabla 3

#### 4. Conclusiones

Una política de preservación de las aguas subterráneas requiere del uso de los mapas de vulnerabilidad, sin descartar la necesidad de controlar la contaminación y proteger los acuíferos en todos los sectores.

El grado de vulnerabilidad a la contaminación está determinado por las condiciones hidrogeológicas, de explotación y del período climático, independientemente del sistema de valoración utilizado.

En el Conurbano Bonaerense gran parte de la provisión pública de agua subterránea proviene de las Arenas Puelches. Su condición de acuífero complejo multiunitario y el tipo de recarga autóctona, con aporte lateral no significativo, determinan que las consideraciones para evaluar su vulnerabilidad sean hechas para el sistema acuífero en su totalidad.

Para valorar la vulnerabilidad se sugiere considerar :

- El grado de confinamiento como función de las características litológicas y de las condiciones hidrodinámicas del sistema.
- El contenido de la fracción arena por encima del acuífero Puelche para definir el grado de accesibilidad hidráulica de la solución.
- El espesor de la zona no saturada en períodos de excesos hídricos, como política preservacionista.

Los criterios de indexación deben ser seleccionados para cada caso dependiendo de su escala y localización.

Los sistemas de clasificación de la vulnerabilidad que consideran un hipotético contaminante universal son muy recomendables para una primera etapa de reconocimiento. Para etapas posteriores, de mayor detalle, se deberán considerar las características de la carga: tipo, intensidad, duración, concentración y localización del contaminante.

## 5. Referencias bibliográficas

- [1] - ALBINET, M., MARGAT, J. "Cartographie de la Vulnérabilité a la Pollution des Nappes d'eau Souterraine", Bulletin du B.R.G.M. (deuxieme serie), Section III, N°4, 1970.
- [2] - ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., PETTY, R.J., HACKETT, G. "DRASTIC: a Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hidrogeologic Settings". U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600/2-87-036.
- [3] - ARENSBURG, I. "Estudio de la Vulnerabilidad a la Contaminación de las Fuentes de Aguas Subterranas en el Area Metropolitana. Mapa de Vulnerabilidad", Informe Final de Beca, I.N.C.y T.H., 1993.
- [4] - BREEUWSMA, A., van DUIJVENBOODEN, W. "Mapping of Groundwater Vulnerability to Pollutants in The Netherlands", In Vulnerability of Soil and Groundwater to pollutants, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague Proceedings and Information N 38, 1987.
- [5] - CIVITA, M. "La Valutazione della Vulnerabilita` degli Acquiferi all' Inquinamento (Assessment of aquifer vulnerability to contamination). Proc.1st Conv.Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Techologie e Obiettivi", Manaro sul Panaro, v.3,p.39-86, 1990.
- [6] - DE SMEDT, P. et al. "Groundwater Vulnerability Maps" Aua N°5. Gran Bretaña, 1987.
- [7] - ENGELEN, G. B. "Vulnerability and Restoration Aspects of Groundwater Systems in Unconsolidated Terrains in The Netherlands", Hydrogeology in the Service of Man, Memoires of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists, Volume XVIII, part 3, Cambridge, 1985.
- [8] - FERNANDEZ, A., ARENSBURG, I. "Grados de Vulnerabilidad del Sistema Acuifero del Gran Buenos Aires". II Congreso Latinoamericano de Hidrogeología Subterránea, Santiago, Chile, 1994.
- [9] - FOSTER, S. "Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability Pollution Risk and Protection Strategy" Proc Intl Conf "Vulnerability of soil and Groundwater to Pollutants" Noordwijk, The Netherlands, 1987.
- [10] - MUÑOZ, S., LAONGEVIN, C. "Carte de Vulnérabilité, Multicritères, Assiste. Guatemala" Hidrogeologie, N°1, 1991.
- [11] - ROUX, J., "Controle et Protection de la Qualite des Eaux Souterraines", Hydrogéologie, N°1, 1988.
- [12] - SUBIRANA, J., CASAS, A. "Groundwater Vulnerability to Pollutants map of the Low Llobregat Valley (Barcelona, Spain). Work Method and Evolution Study of the Gravel-Pit Exploitations" 1986.

[13] - VIERHUFF, H. "Classification of Groundwater Resources for Regional Planning with Regard to their Vulnrability to Pollution", Quality of Groundwater, Proceedings of an International Symposium, Studies in Environmental Science, Volume 17, The Netherlands, 1981.

A n e x o

II CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA  
Santiago de Chile, 7 al 11 de Noviembre de 1994

GRADOS DE VULNERABILIDAD  
DEL SISTEMA ACUIFERO DEL GRAN BUENOS AIRES.  
CRITERIOS PARA SU DETERMINACIÓN

ADOLFO EDUARDO FERNÁNDEZ, Lic. en geología (UNLP) \*  
ILANA VERA ARENSBURG, Lic. en geología (UBA) \*  
\* Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas - ARGENTINA

RESUMEN

Se describen y analizan las diferentes etapas para la obtención de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en una zona piloto del Gran Buenos Aires.

La zona elegida está localizada en el sur-oeste del Conurbano Bonaerense e incluye, parcialmente, los partidos de Almirante Brown, Lomas de Zamora y Lanús.

El trabajo presenta los criterios utilizados para la selección y cuantificación de los tres parámetros considerados y los cuadros con el esquema adoptado. Se muestra el mapa de la zona estudiada con sus diferentes grados de vulnerabilidad, así como los mapas preliminares utilizados para su elaboración.

ABSTRACT

Different stages to obtain a vulnerability map to groundwater pollution in a pilot zone of Great Buenos Aires are described and analyzed.

The selected zone is located in the south-west of the Buenos Aires city suburbs including, partially, the districts of Almirante Brown, Lomas de Zamora and Lanús.

The work includes the criteria used to select and quantify the three considered parameters as well as tables with the adopted classification scheme. The studied zone map with its different levels of vulnerability and its preliminary maps are presented.

## I. INTRODUCCIÓN.

La programación y optimización del uso de fuentes de agua subterránea requiere de un sistema para la prevención de su deterioro. La evaluación de la vulnerabilidad de estas fuentes, frente al ingreso de sustancias contaminantes, es una tecnología poco desarrollada en Latinoamérica.

Los mapas de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea son una de las bases imprescindibles para el aprovechamiento sustentable de este recurso.

El presente trabajo tiene como objetivos generales :

*Adquirir experiencia y fomentar la formación de recursos humanos especializados en estas actividades, recién iniciadas en latinoamérica.*

Y como objetivos específicos:

*Experimentar criterios de cuantificación de parámetros de vulnerabilidad que puedan ser aplicados a todo el conglomerado metropolitano de la ciudad de Buenos Aires, identificando las dificultades para su determinación.*

Ambos objetivos pretenden brindar a las autoridades pertinentes herramientas útiles para asegurar el aprovechamiento sustentable del recurso hídrico subterráneo en este conglomerado urbano de, aproximadamente, siete millones de habitantes.

El trabajo está fundamentado en antecedentes de dos tipos:

Trabajos que describen los procesos de contaminación y los factores que rigen a los mismos, en sistemas acuíferos semejantes al que nos ocupa.

Mapas de vulnerabilidad hechos en distintas partes del mundo, con diferentes objetivos y escalas de trabajo.

La caracterización hidrogeológica y la determinación de los factores utilizados para el cálculo de la vulnerabilidad, se obtuvieron en base a 85 perfiles de perforaciones realizados por la ex-empresa estatal Obras Sanitarias de la Nación para abastecimiento humano.

Se eligió como zona piloto un sector del Arena Metropolitana donde la densidad de perfiles fuera lo más homogénea posible y donde se sospecharan problemas de contaminación del recurso hídrico subterráneo.

## 2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA.

La zona elegida corresponde a un sector, localizado al sur del Conurbano Bonaerense, que abarca parcialmente los partidos de Almirante Brown, Lomas de Zamora y Lanús, con una superficie aproximada de 160km<sup>2</sup> (Figura 1), equivalente a un 4 % del total del gran Buenos Aires.

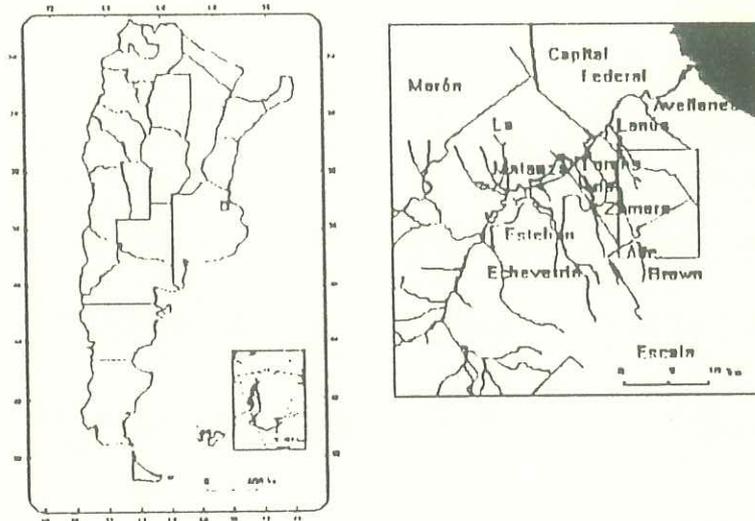


FIGURA 1: Ubicación Relativa de la Zona.

El área se encuentra comprendida en una zona de clima subhúmedo-húmedo, de excesos hídricos superiores a los 150mm anuales, dentro de la provincia de Buenos Aires.

Sus caracteres morfológicos son los propios de un ambiente de llanura, encubiertos y modificados por la urbanización, con escasas pendientes. Posee una red de drenaje dendrítica integrada, alterada por las canalizaciones de los cursos de agua.

Presenta tres unidades geomorfológicas: terraza alta, terraza baja y plano aluvial. La superficie de terraza alta es suavemente ondulada con escasa pendiente. Corresponde a las zonas de recarga del nivel freático.

La planicie aluvial es muy estrecha y plana, con un drenaje reducido. La napa freática se encuentra próxima a la superficie. Corresponde a las zonas de descarga de la napa.

### 3. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.

El agua subterránea utilizada en el Gran Buenos Aires proviene, en su mayor parte, del Sistema Acuífero Epiparaniano, integrado por dos secciones hidrogeológicas, vinculadas al ciclo hidrológico actual:

#### Sección Epipelche:

Directamente relacionada con los factores meteorológicos e hidrológicos superficiales. Está integrada, generalmente, por dos unidades acuíferas:

Capa freática: Constituye el acceso de la recarga al sistema. Determina el desarrollo de la zona no saturada y es la más próxima a las fuentes de contaminación. Presenta notorias variaciones areales en su litología y calidad. Pese a la contaminación bacteriológica que se manifiesta en toda su extensión, es frecuentemente utilizada como fuente de suministro, para asentamientos de sectores sociales carenciados.

Pampeano: Limos loessoides pardos, con intercalaciones arenosas y/o calcáreas. En su base suele aparecer un horizonte arcillo-limoso gris verdoso claro, de comportamiento acuitardo, que lo separa de la Sección Puelches. Su rendimiento específico y la calidad de sus aguas determinan que, en algunas ocasiones, sea utilizado, con los riesgos que ello implica, como la fuente de abastecimiento domiciliario sin abastecimiento público.

#### Sección Puelche :

Acuífero semiconfinado, conformado por arenas cuarzosas con un espesor del orden de los 27m. Constituye la fuente de agua subterránea para abastecimiento público y el origen principal de agua en zonas residenciales y fabriles sin servicio público.

Las unidades de conductividad hidráulica privilegiada del Epiparaniano están separadas por capas menos permeables que actúan como acuitardos del sistema. Dichas heterogeneidades son importantes por el control que ejercen sobre la migración de las sustancias contaminantes.

El tipo de recarga autóctona, con aporte lateral no significativo, la condición de sistema acuífero complejo multiunitario y las características de su aprovechamiento determinan que las consideraciones relacionadas con los procesos de contaminación deban ser hechas para todo el sistema en su conjunto.

### 4. VULNERABILIDAD.

La contaminación de las aguas subterráneas está condicionada por la fuente contaminante y por los procesos físico - químicos que regulan el transporte de las

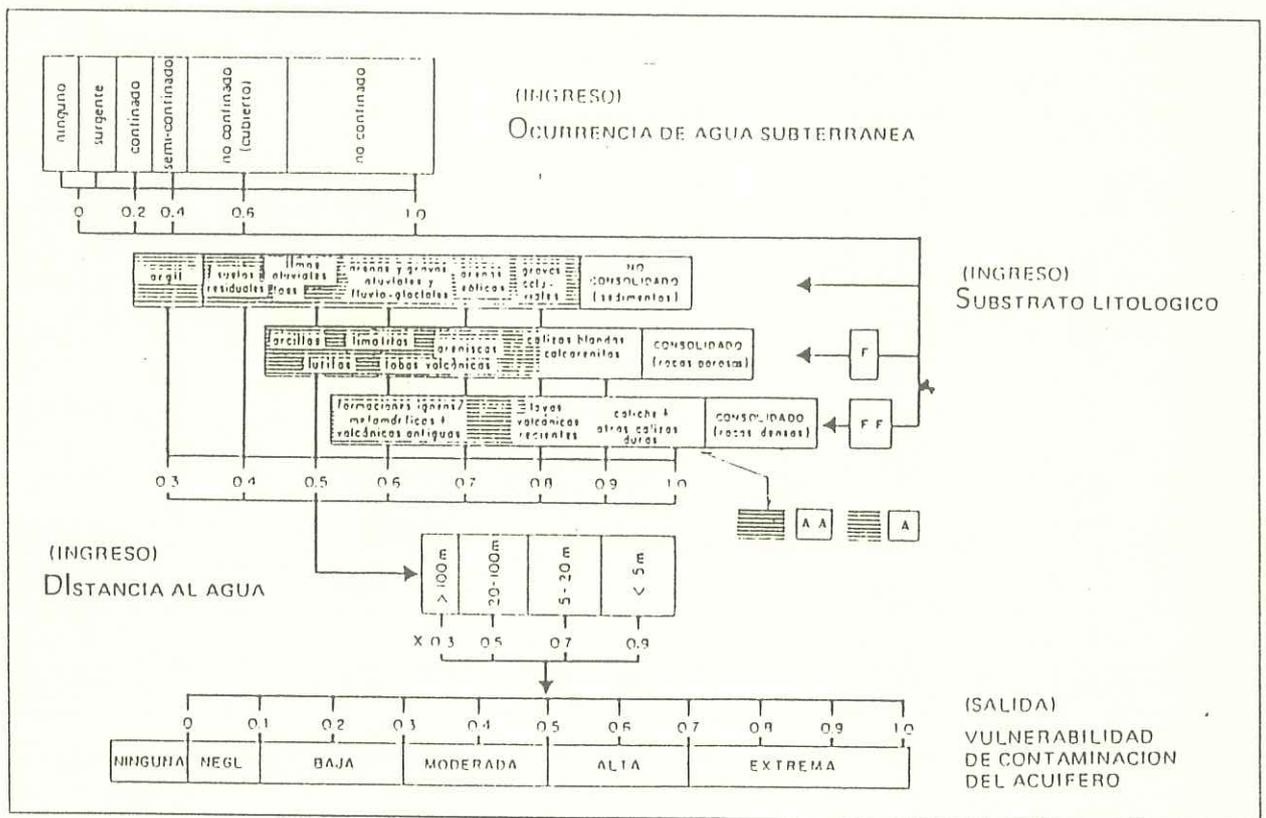
sustancias contaminantes. Estos procesos están directamente relacionados con las características hidrogeológicas propias del acuífero.

El término vulnerabilidad sintetiza aquéllas características del sistema acuífero relacionadas con los fenómenos que rigen la contaminación del agua subterránea.

#### 4.1. Análisis de los parámetros de vulnerabilidad en el área de estudio.

Para el esquema de clasificación propuesto se adoptaron, aunque ajustadas a las particulares características geohidrológicas de la zona de interés, los criterios propuestos por Foster, S. [7] (Cuadro 1).

CUADRO 1: Sistema para la Evaluación del Índice de Vulnerabilidad del Acuífero (Foster, S. 1987).



Las diferentes categorías de vulnerabilidad en el área que nos ocupa fueron establecidas en base a tres parámetros:

- Grado de confinamiento.
- Litología característica de la sección Epipelche.
- Espesor de la zona no saturada.

Los dos primeros son elementos invariables para la escala de tiempo considerada; pueden ser considerados parámetros estables e intrínsecos del sistema acuífero.

El espesor de la zona no saturada, en cambio, es función de las variaciones meteorológicas del lugar, modificadoras del nivel freático.

No fueron considerados los parámetros que, a la escala del trabajo, presentan una distribución homogénea en el área de estudio: pendiente topográfica, diseño y densidad de la red de drenaje. Tampoco se consideraron las variables relacionadas con la localización, tamaño y tipo de contaminantes.

#### 4.1.1. Grado de confinamiento.

Se evaluó de acuerdo a la presencia, al tipo y ubicación del acuitardo, adjudicándose a cada clase los siguientes índices:

##### 0.40 - Semiconfinado:

Se consideran dentro de esta clase los perfiles en los que se observó la presencia de la variedad más arcillosa en la base del Pampeano. Restringida arealmente, actúa como capa acuitardo formando lentes de espesores que varían entre 1m y 8m.

##### 0.60 - Libre cubierto:

Se incluyen dentro de esta clase aquellos perfiles en los que se observó la presencia de "tosca" (mantos lentiformes, nódulos o concreciones calcáreas) en los niveles medio y superior del Pampeano.

##### 1.00 - Libre:

Contiene aquellos perfiles en los que no se observan capas con "tosca" ni las arcillas propias de la base del Pampeano.

#### 4.1.2. Litología de los estratos suprayacentes al acuífero Puelche.

La dispersión, fenómeno predominante en la zona saturada, juntamente con la adsorción-desorción, se encuentran condicionadas por el predominio de un tipo litológico. La zona queda dividida en dos clases:

##### 0.60 - Con predominio de arena:

Comprende los sectores donde predominan los depósitos posteriores a los Pampeanos, restringidos a las depresiones topográficas. Con el predominio de arena, disminuyen los efectos de atenuación y/o barreras de accesibilidad hidráulica.

#### 0.50 - Sin predominio de arena:

Se incluyen en esta clase aquellas litologías en las que hay predominio de loees, limos, arenas arcillosas, toscas y/o arcillas correspondiendo a aquellos sectores donde los depósitos del Pampeano se encuentran bien desarrollados. La atenuación y/o el efecto como barreras de accesibilidad hidráulica deben ser tenidas en cuenta con cualquiera de estas litologías.

#### 4.1.3. Espesor de la zona no saturada.

Por su posición entre la superficie y el nivel freático, representa la primera defensa natural contra la contaminación, donde actúan con mayor fuerza los procesos físico-químicos de retención y atenuación en el flujo de las sustancias contaminantes.

A diferencia del resto de los parámetros, no es una característica intrínseca del sistema acuífero. Se trata de una variable dependiente de las condiciones meteorológicas del lugar.

Se consideraron cuatro intervalos, de acuerdo a su efecto como retardador, adjudicando los siguientes índices a cada uno de los intervalos.

0.90: Menor de 5 m.

0.80: Entre 5 y 10 m.

0.70: Entre 10 y 20 m.

0.50: Mayor de 20 m.

Con los tres parámetros definidos y multiplicando entre sí los índices adjudicados, se obtuvieron los índices de vulnerabilidad final (Cuadro 2).

CUADRO 2: INDICES DE VULNERABILIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO

		ESPESOR NO SATURADO		< 5	5-10	10-20	>20
		CONFINAMIENTO	INDICES	0.90	0.80	0.70	0.50
Con predominio de Arena	0.60	Libre	1.00	0.54	0.48	0.42	0.30
		Cubierto	0.60	0.32	0.30	0.25	0.18
		Semiconfinado	0.40	0.22	0.19	0.16	0.12
Sin predominio de Arena	0.50	Libre	1.00	0.45	0.40	0.35	0.25
		Cubierto	0.60	0.27	0.24	0.21	0.15
		Semiconfinado	0.40	0.18	0.16	0.14	0.10

Con estos índices y los rangos cuantitativos resultantes de la modificación del esquema de clasificación de Foster [7], se definen cualitativamente los grados de vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero subterráneo del área de estudio (Cuadro 3).

CUADRO 3: GRADOS DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

		ESPESOR NO SATURADO	< 5	5-10	10-20	>20	
		CONFINAMIENTO	INDICES	0.90	0.80	0.70	0.50
Con pre-dominio de Arena	0.60	Libre	1.00	Alta	Mode	Alta.	M.B.
		Cubierto	0.60	Mode	Baja	Baja	Baja
		Semiconfinado	0.40	Baja	Baja	Baja	Baja
Sin pre-dominio de Arena	0.50	Libre	1.00	Mode	Alta	M.B.	Baja
		Cubierto	0.60	Baja	Baja	Baja	Baja
		Semiconfinado	0.40	Baja	Baja	Baja	Baja

#### 4.2. Mapa de vulnerabilidad.

Para obtener el mapa de vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero (figura 5) se realizaron previamente, los mapas correspondientes a cada uno de los parámetros considerados. El procesamiento gráfico y topológico de la información se llevó a cabo utilizando paquetes de programas de origen comercial y académico.

Utilizando Surfer V 4.11 (Golden Software Inc.) se construyó, para cada parámetro considerado, una matriz a partir de los índices adjudicados a cada pozo. La misma fue procesada con Idrisi V4 (IDRISI-Clark University - Graduate School of Geography). Con este programa se definieron los intervalos de clase para cada parámetro.

##### 4.2.1. Grado de Confinamiento:

En este mapa se representaron las tres clases definidas para este parámetro (figura 2).

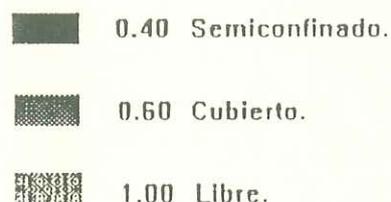
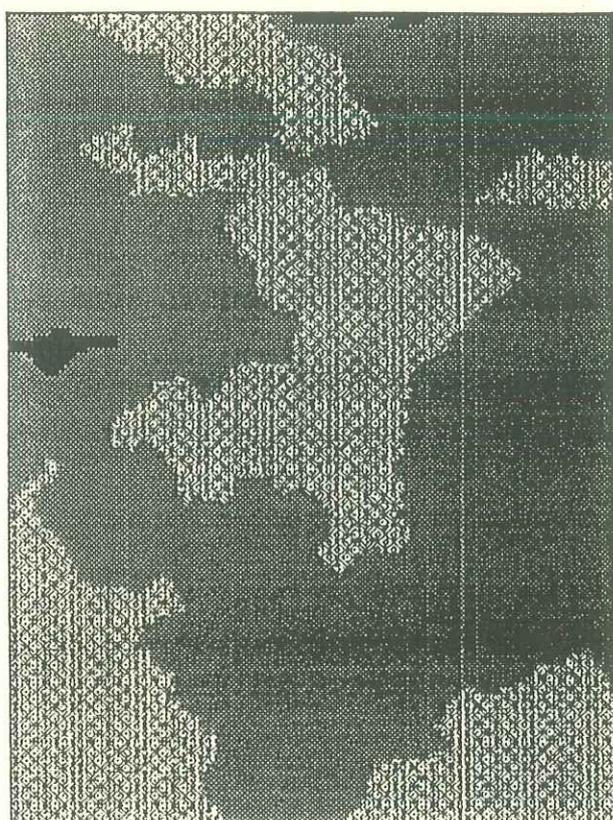


FIGURA 2: Indices de Grados de Confinamiento.

La zona con lentes arcillosos, correspondiente a la clase *Semiconfinado* se encuentra restringida a dos pequeñas manchas, al norte y en el borde occidental del mapa.

La clase *Libre cubierto*, determinada por la presencia de "tosca" en los depósitos Pampeanos, se encuentra ocupando casi la mitad de la zona estudiada.

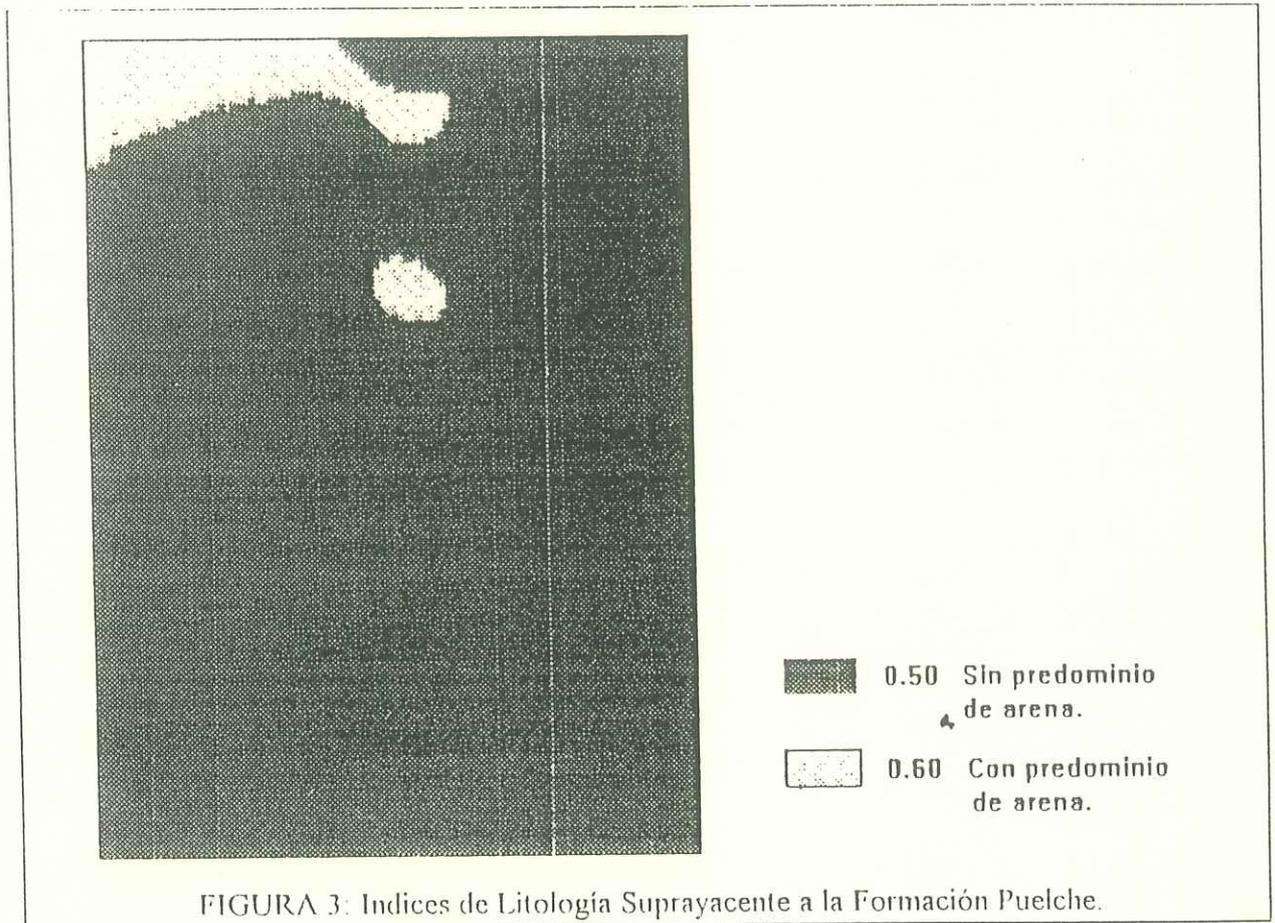
La zona sin anisotropías que dificulten la infiltración vertical, característica de la clase *Libre*, se distribuye en manchones que ocupan el resto de la zona.

#### 4.2.2. Litología suprayacente a la Formación Puelche.

En este mapa se representan los dos tipos litológicos definidos en base a la presencia o ausencia de los depósitos arenosos post-pampeanos. (figura 3):

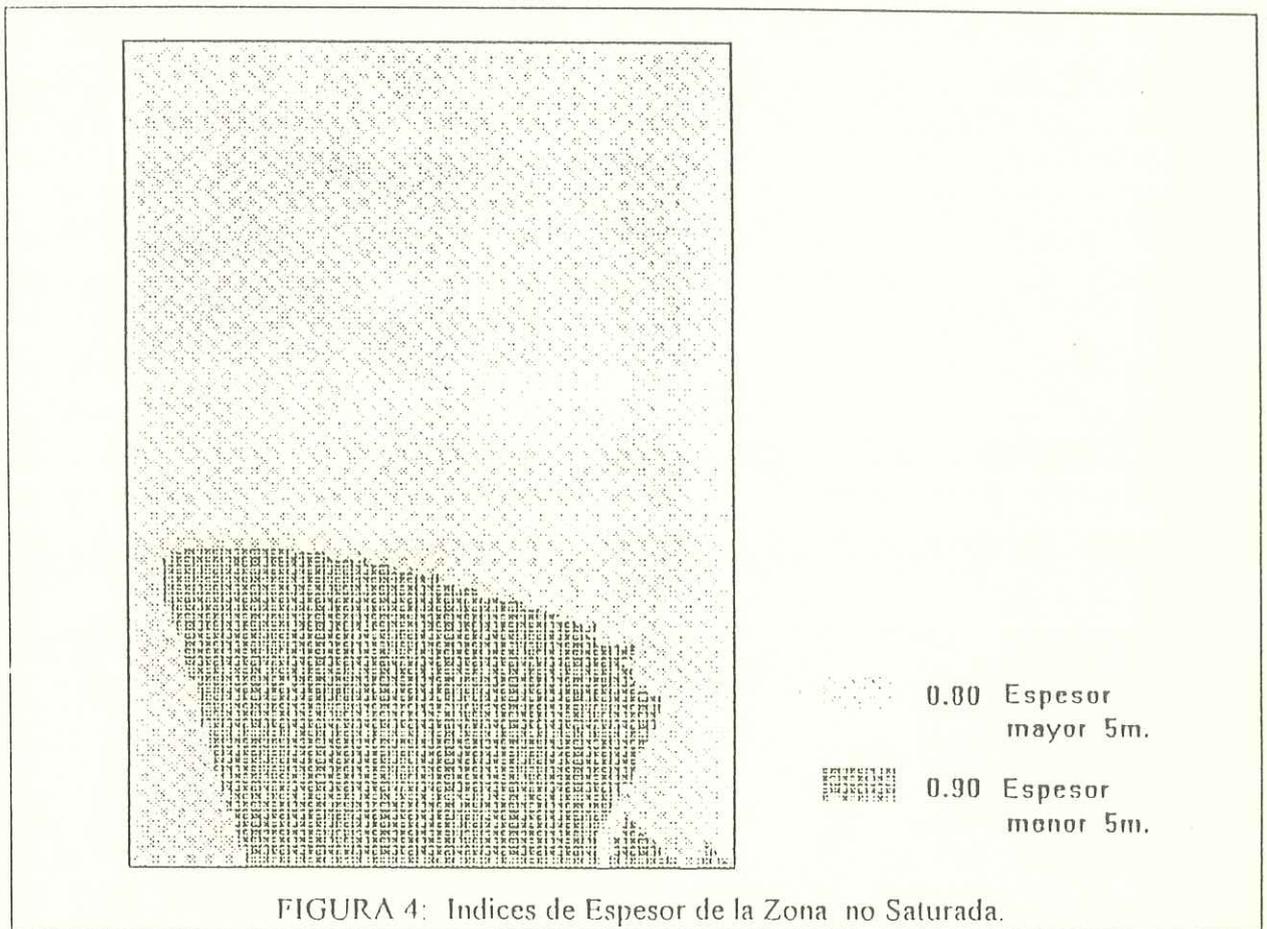
El desarrollo areal predominante corresponde a la clase Sin predominio de arena.

La clase Con predominio de arena se caracteriza por un desarrollo areal restringido a franjas erosionadas del Pampeano, en el sector noroeste del mapa, jurisdicción del partido de Lanus.



#### 4.2.3. Índices de Espesor de la Zona no Saturada.

En la figura 4 puede observarse una buena diferenciación entre las dos zonas con diferentes índices, el alto valor de los mismos no llega a evidenciarse en el mapa de vulnerabilidad (figura 5).



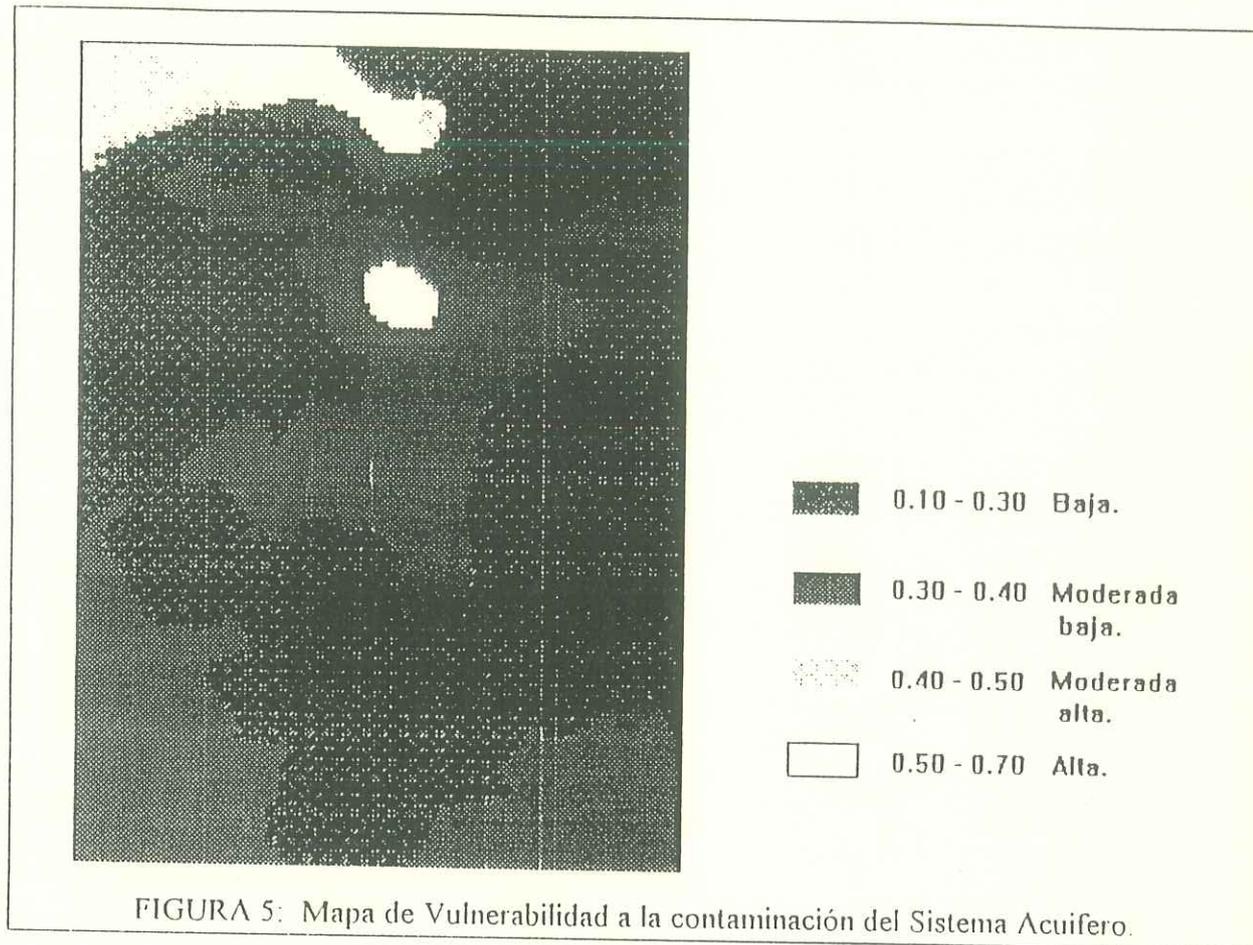
#### 4.2.4. Mapa de Vulnerabilidad.

Este mapa (figura 5) es resultado del producto de las imágenes correspondientes a cada uno de los parámetros considerados.

Se observa un predominio areal de las zonas con vulnerabilidad Alta a Moderada Alta, en el sector correspondiente al partido de Lanus.

La zona correspondiente al partido de Alte Brown muestra un predominio de vulnerabilidad Moderada-Baja.

El área correspondiente al partido de Lomas de Zamora presenta vulnerabilidad entre Moderada-Alta y Moderada-Baja.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El espesor de la zona no saturada no es un parámetro estable; se comporta como una variable temporal, dependiente de los cambios meteorológicos.

Las características hidrogeológicas y el tipo de período climático (déficit o excesos hídricos) determinan el grado de vulnerabilidad a la contaminación de una región.

Las dos últimas décadas, con su notorio aumento de excesos hídricos, elevaron los tipos de vulnerabilidad por disminución del espesor de la zona no saturada.

Para la cuantificación de los índices de este vector deberá considerarse, muy

especialmente, si la medición de los niveles freáticos fue realizada en períodos de déficit o excesos hídricos.

Como margen de seguridad sería aconsejable tomar los niveles de máxima (período de excesos hídricos) para la indización del mismo.

El tipo de recarga, autóctona, con aporte lateral no significativo, y la condición de acuífero complejo multiunitario determinaron que, aunque la provisión pública provenga del Acuífero Puelches, la clasificación de vulnerabilidad fuera realizada sobre el Sistema Acuífero Epiparaniano en su totalidad.

Para las zonas con Vulnerabilidad Alta y Moderada Alta se recomienda la ejecución de monitoreo de calidad y niveles del agua subterránea.

Los tipos de Vulnerabilidad Moderada y Moderada Baja no aseguran la ausencia de problemas de contaminación. El riesgo de contaminación es función de la actividad que la genera: movilidad del contaminante y tipo de fuente de contaminación (difusa o puntual).

La clasificación propuesta y utilizada en el presente trabajo, que considera un hipotético "contaminante universal" de baja movilidad y persistencia, depositado por encima de la superficie frática, debe ser utilizada en la etapa de reconocimiento. La realización de mapas de riesgo de contaminación, para condiciones reales, constituye una etapa posterior de la investigación en la que deberán ser considerados, fundamentalmente, los aspectos de la carga : *tipo de contaminante, localización, modo de disposición, intensidad y duración de la misma.*

Deberá desarrollarse un mayor control sobre los derrames de contaminantes industriales y de aquéllos propios de una estructura urbana como la del área en estudio.

Una política de preservación de las aguas subterráneas debe requerir el uso de los mapas de vulnerabilidad, como paso previo para el control de la contaminación y protección de los sectores críticos.

**Agradecimiento:** Al Lic. Alberto Kerfeld por su excelente disposición para la consulta sobre niveles freáticos históricos.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1] -ALBINET, M., MARGAT, J. "Cartographie de la Vulnérabilité a la pollution des nappes deau souterraine", Bulletin du B.R.G.M. (deuxieme serie), Section III, N°4, 1970.
- 2] -ARENSBURG, Ilana Vera. "Estudio de la Vulnerabilidad a la Contaminación de las Fuentes de Aguas Subterraneeas en el Area Metropolitana. Mapa de Vulnerabilidad", INCyTH - Informe final de beca, 1993.
- 3] -DE SMEDT, P. et al. "Groundwater Vulnerability Maps" Aqua N°5. Gran Bretaña, 1987.
- 4] -EASNE. "Contribución al Estudio Geohidrológico del Noreste de la Provincia de Buenos Aires", C.F.I., Serie Técnica N°24, La Plata 1973.
- 5] -ENGELEN, G. B. "Vulnerability and Restoration Aspeccts of Groundwater Systems in Unconsolidated Terrains in The Netherlands", Hydrogeology in the Service of Man, Memoires of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists, Volume XVIII, part3, Cambridge, 1985.
- 6] -FOSTER, S. "Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability Pollution Risk and Protectio Strategy" Proc Intl Conf "Vulnerability of soil and Groundwater to Pollutants" Noordwijk, The Netherlands, 1987.
- 7] -GALABOV, M. "La Migration Souterraine des PolluantsChimiques et Radioactifs et le cas particulier dun Milieu très Peu Perméable", Hidrogéologie, N°1, 1989.
- 8] -GONZALEZ BONORINO, F. "Mineralogía de las Fracciones Arcilla y Limo del Pampeano en el Area de la Ciudad de Buenos Aires y su Significado Estratigráfico y Sedimentológico" R.A.G.A., Tomo XX, N°1, Buenos Aires, 1965.
- 9] -OUDE MUNNINK, J., GEIRNAERT, W. "GIS Assisted Design of a Monitoring Network for Non-point Groundwater Pollution in the Province of North-Holland, the Netherlands" Hidrogéologie, N°1, 1991.
- 10] -SUBSECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE "Evaluación ambiental de los Recursos Hídricos del Sistema Metropolitano Bonaerense", Ministerio de Salud Pública y Medio Ambiente, 1983.
- 11] -VIERHUFF, H. "Classification of Groundwater Resources for Regional Planning with Regard to their Vulnrability to Pollution", Quality of Groundwater, Proceedings of an International Symposium, Studies in Environmental Science, Volume 17, The Netherlands, 1981.

II SEMINARIO HISPANO - ARGENTINO  
SOBRE TEMAS ACTUALES DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA

ANALISIS DE SERIES TEMPORALES DE NIVELES FREATICOS

Rafael Seoane

Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas, Consejo  
Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

Ilana Arensburg

Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas.

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es presentar una aplicación completa de la técnica de análisis de series temporales a niveles freáticos observados a nivel diario y estudiar la capacidad predictiva de modelos univariados con distinta estructura.

El modelo univariado utilizado es el denominado Autorregresivo-Integrado-Promedio-Móvil (ARIMA) y se presentan las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial estimadas, un estudio de la significación de los parámetros de los modelos seleccionados y la verificación de los ajustes obtenidos.

Los resultados consisten en un análisis de la variación de la estructura de los modelos univariados de acuerdo con el nivel de agregación de la información y un estudio de la capacidad predictiva de las alternativas, realizado a partir de los estadísticos de los errores de pronóstico observados para distintos adelantos de tiempo.

## 1. Introducción.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de una aplicación de la metodología de análisis de series temporales, para la predicción de la variable nivel freático, y discutir las posibilidades de utilizar modelos lineales de variada complejidad para obtener pronósticos a distintos adelantos de tiempo.

El trabajo desarrolla la aplicación de la técnica que incluye: la identificación de la estructura temporal, la estimación de los parámetros y la verificación de distintos modelos lineales univariados. El análisis de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial muestra la posibilidad de utilizar modelos Autorregresivo-Integrado-Promedio-Móvil (ARIMA) para representar la serie temporal de niveles freáticos diarios. Estos modelos son utilizados para definir los niveles mínimos predictivos que permitirán la comparación con estimaciones obtenidas aplicando modelos de transferencia precipitación-nivel freático.

## 2. Marco teórico.

La importancia de la definición de los modelos básicos para la simulación y predicción de variables con una estructura de correlación, se fundamenta en la necesidad de contar con modelos univariados para cumplir los siguientes objetivos: estudiar la capacidad predictiva de estructuras simples y avanzar en la definición de una relación matemática de transferencia entre las variables precipitación puntual y nivel freático.

El método utilizado, propuesto por Box y Jenkins (1976), ha tenido una amplia difusión en Hidrología para la representación matemática de procesos físicos. En el tema específico de este trabajo se puede citar a Viswanathan (1984) que propone modelos de transformación precipitación variación del nivel freático, mediante regresiones dinámicas y Calderón Loaiza y Bermudes (1994) que utilizan análisis de series de tiempo para estimar la misma variable.

## 3. Metodología.

### 3.1. Modelo paramétrico lineal.

Los modelos denominados Autorregresivo-Integrado-Promedio-Móvil (ARIMA) son una forma de describir series estacionarias o que pueden ser convertidas en estacionarias mediante diferenciación.

Se define un modelo ARIMA (p,d,q) con la siguiente ecuación:

$$w_t = \phi_1 w_{t-1} + \dots + \phi_p w_{t-p} + u_t - \theta_1 u_{t-1} - \dots - \theta_q u_{t-q} \quad (1)$$

donde:  $w_t$  es la serie original diferenciada  $d$  veces,  $u_t$  variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas,  $\phi_i$  parámetros autoregresivos y  $\theta_i$  parámetros de promedios móviles.

### 3.2. Información básica.

En este estudio se utilizó la serie de niveles freáticos observados del freátigrafo instalado en la localidad de Ezeiza, cuenca del río Matanza (34°48'S, 58°32'O). Esta localidad se encuentra en una zona de clima subhúmedo-húmedo, con excesos hídricos superiores a 150 mm anuales. La fuente de agua subterránea es un acuífero complejo integrado por: Sección Puelche constituida por las arenas homónimas y la Sección Epipelche por el Pampeano, limos loessoides con intercalaciones arenosas, y la capa freática de textura arena fina.

La serie temporal usada para la identificación y estimación de los parámetros del modelo corresponde a los datos diarios del período marzo 1992 - febrero 1993 y para la predicción, marzo 1993 - febrero 1994. En la figura 1 se observa el comportamiento del nivel freático, su variación es función de la cota anterior al evento pluviométrico y del volumen e intensidad de la precipitación.

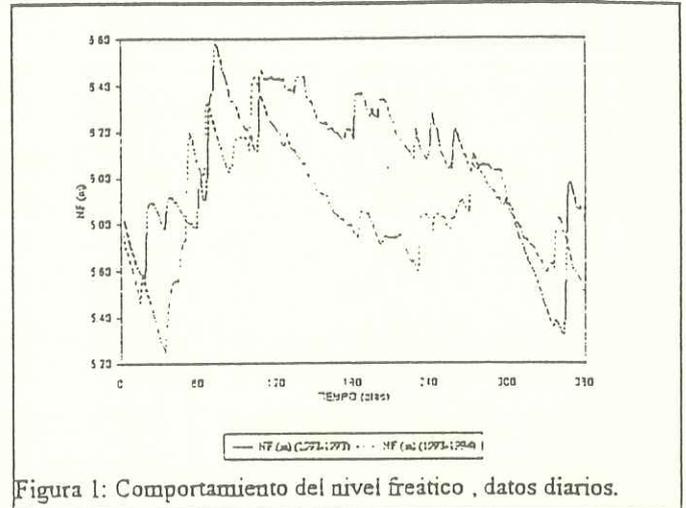


Figura 1: Comportamiento del nivel freático, datos diarios.

Identificación del modelo. En esta etapa se determinan los ordenes  $p$ ,  $d$ ,  $q$  utilizando la función de autocorrelación simple (fas) y la función de autocorrelación parcial (fap).

La figura 2 muestra la fas de la serie, se observa un decrecimiento no exponencial, poco significativo a retardos altos, que puede caracterizar a las series no estacionarias. Se diferencia para obtener un proceso estacionario, entonces  $w_t = y_t - y_{t-d}$  es el proceso integrado de orden  $d = 1$ . A continuación se aplica un método para determinar si la serie estacionaria tiene media distinta de cero, si  $\bar{w}_t \geq 2s_w$  se incluye como parámetro a estimar. Si la varianza estimada,  $s_w^2$ , es constante y menor que  $s_y^2$  de la serie sin diferenciar, se puede inferir que la transformación es correcta. La prueba consiste en diferenciar dos veces y usar como orden el de menor  $s_w$ .

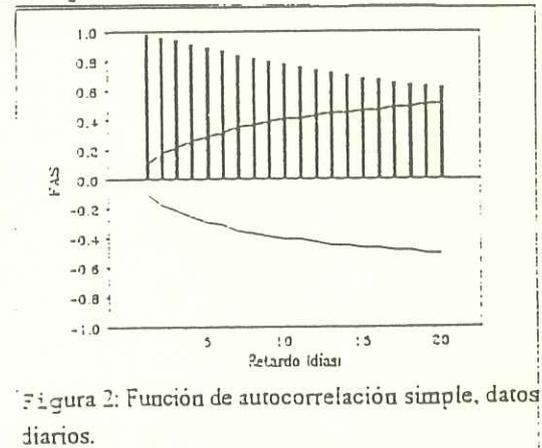


Figura 2: Función de autocorrelación simple, datos diarios.

Orden	$\bar{w}_t$	$s_w$	$s_w$
$d = 1$	-0,00098	0,03605	0,0057
$d = 2$	-0,00180	0,05900	0,0093

Tabla 1

De los resultados presentados en la Tabla 1 se infiere que  $\bar{w}_t$  no se incluye como parámetro a estimar. Los desvíos estandar obtenidos al diferenciar para  $d = 1$  y  $d = 2$  y la

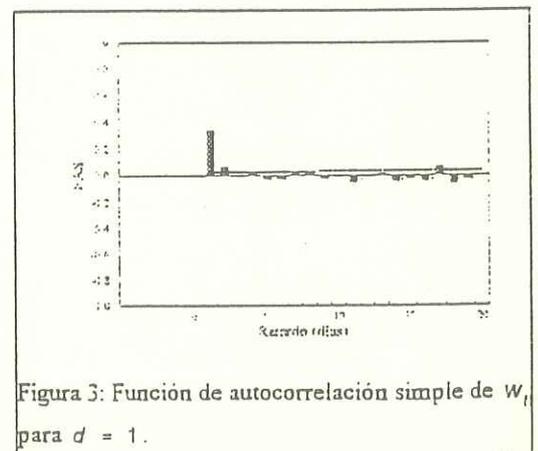


Figura 3: Función de autocorrelación simple de  $w_t$  para  $d = 1$ .

forma de la fas que se muestra en la figura 3, indican que  $d = 1$ . Para determinar el orden  $p$  del modelo, se consideran los coeficientes de autocorrelación parcial, significativos mayores que el intervalo de confianza y se infiere que la componente autorregresiva es de orden uno, el modelo propuesto es un ARIMA (1,1,0).

Estimación de parámetros. El modelo propuesto se representa con la ecuación:  $y_t = y_{t-1} + \phi_1 y_{t-1} - \phi_1 y_{t-2} + \epsilon_t$  (2)

Modelo	Parámetros	$S_{param.}$	Tendencia	$S_{10n}$	S S R	M S R	
(1,1,0)	$\phi_1$	0,3771	0,0438	-0,0013	0,0250	0,8345	0,0023

donde: S S R suma de cuadrados de los residuos y M S R media de suma de cuadrados.

Verificación del modelo. En esta etapa se estudia la presencia de estructura de correlación en la serie de los residuos,  $\epsilon_t$ , del modelo. Una serie de residuos independientes para distintos retardos, es una indicación del ajuste del modelo.

En la figura 4 se observa la falta de estructura de los residuos.

Pronóstico. Las predicciones  $\hat{y}_{t+n}$ , a distintos adelantos  $n$ , se contrastan con las observaciones.

En la tabla 2 se presentan los resultados de las expresiones para evaluar los errores estimados para cinco adelantos.

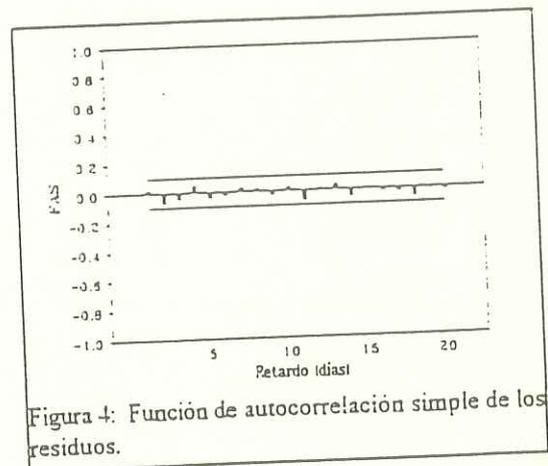


Figura 4: Función de autocorrelación simple de los residuos.

Adelanto	Error $\epsilon_t = y_t - \hat{y}_t$ (m)		RECM = $\left[ \sum_1^t (y_t - \hat{y}_t)^2 / n \right]^{1/2}$	ER = $\left[ \sum_1^t (y_t - \hat{y}_t) / n \right] / \bar{y}$	EA = $\left[ \sum_1^t y_t - \hat{y}_t / n \right] / \bar{y}$
	Máximo	Media			
1	0,2920	-0,0005	0,0340	-0,0001	0,0027
2	0,4070	-0,0011	0,0565	-0,0002	0,0054
3	0,4671	-0,0016	0,0754	-0,0003	0,0080
4	0,4720	-0,0021	0,0909	-0,0004	0,0103
5	0,4630	-0,0026	0,1032	-0,0004	0,0612

Tabla 2

El análisis de los errores muestra un aumento significativo para el error máximo en las predicciones a uno y dos días. Los otros estadísticos se incrementan, como es esperable, a mayor adelanto. El aumento en los errores a partir del segundo adelanto, se puede observar en la figura 5, indica la importancia de estudiar

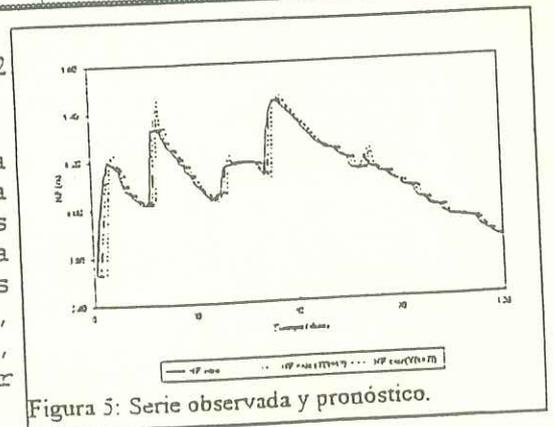


Figura 5: Serie observada y pronóstico.

otros modelos predictivos utilizando valores promedios que permiten suavizar los máximos.

3.3. Valores promedio ( dos días). Los datos son una serie promedio calculada, de n valores ordenados:  $z_2, z_4, \dots, z_t, \dots, z_n$  promedio de dos días para  $t = 2, \dots, t, \dots, n$ .

Identificación del modelo. Se aplica la prueba de identificación ya usada. La forma de la fas muestra un decrecimiento no exponencial, se infiere que la serie  $z_t$  es no estacionaria y se transforma en un proceso integrado  $v_t = z_t - z_{t-d}$  de orden  $d = 1$ . El modelo seleccionado es un ARIMA (1,1,0) para la estimación de parámetros y su verificación se procede igual que en el caso anterior.

Pronóstico. Los errores en los pronósticos son estimados por diferencia entre los valores observados cada dos días y las predicciones para el mismo intervalo de tiempo.

Adelanto	Error $e_t = z_t - \hat{z}_t$ (m)		RECM = $\left[ \frac{\sum_1^t (z_t - \hat{z}_t)^2}{n} \right]^{1/2}$	ER = $\left[ \frac{\sum_1^t (z_t - \hat{z}_t)}{n} \right] / \bar{z}$	EA = $\left[ \frac{\sum_1^t z_t - \hat{z}_t}{n} \right] / \bar{z}$
	Máximo	Media			
1 (2días)	0,1570	-0,0005	0,0133	-0,0001	0,0014
2 (4días)	0,2973	-0,0009	0,0538	-0,0002	0,0051
3 (6días)	0,4306	-0,0025	0,0883	-0,0004	0,0099
4 (8días)	0,4451	-0,0038	0,1123	-0,0007	0,0140

Tabla 3

De los resultados presentados en la tabla 3 y su comparación con la tabla 2 surge que, en general, para la misma cantidad de días con que se pronostica, los valores de los estadísticos de los errores disminuyen al utilizar promedios.

3.4. Valores promedio (cuatro días). Los datos son definidos de forma tal que el conjunto de  $z_t$ , valores promedio de cuatro días constituye la serie para  $t = 4, \dots, t, \dots, n$ .

Identificación del modelo. La figura 6 muestra la fas de la serie, se observa un decrecimiento de tipo exponencial, por lo tanto se puede considerar que la serie es estacionaria. No es necesario diferenciar y como  $\bar{z}_t > 2s_z$ , la media se incluye como parámetro a estimar.

En la figura 7 el primero y el segundo coeficiente de autocorrelación parcial son significativamente distintos de cero y los siguientes

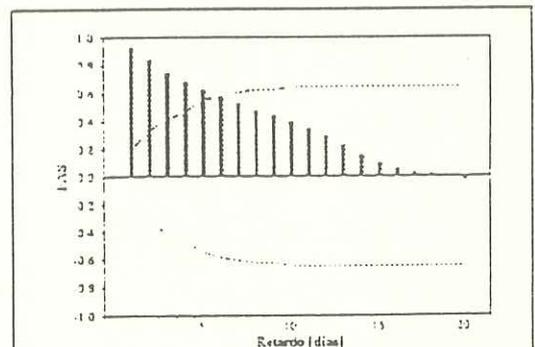


Figura 6: Función de correlación simple. valor promedio a cuatro días.

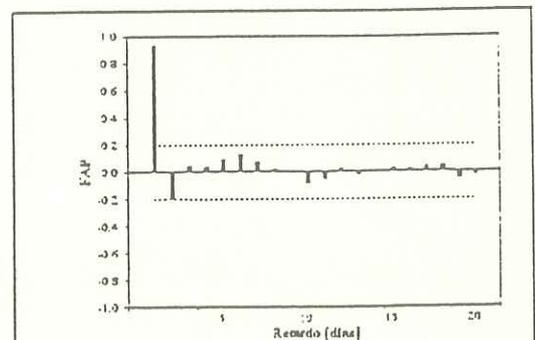


Figura 7: función de autocorrelación parcial. valor promedio a cuatro días.

pueden ser considerados nulos. La componente autoregresiva debe ser de orden dos, el modelo propuesto es ARIMA (2,0,0).

La estimación de parámetros y la verificación se realiza con la metodología usada anteriormente.

Pronóstico. Los errores en los pronósticos son estimados de la misma forma que en el caso anterior.

Adelanto	Error $e_t = z_t - \hat{z}_t$		RECM	ER	EA
	Máximo	Media			
1(4días)	0,3101	-0,0127	0,0749	-0,0022	0,00957
2(8días)	0,3742	-0,0261	0,1239	-0,0044	0,01675

Tabla 4

De los resultados presentados en la tabla 4 y de su comparación con la tablas 2 y 3 se infiere, que en general, para la misma cantidad de días con que se pronostica, los estadísticos de los errores disminuyen al utilizar valores promediados a cuatro días, en relación al adelanto. Otros experimentos realizados con modelos para adelantos mayores muestran un aumento significativo en los estadísticos de los errores.

#### 4. Conclusiones.

Los resultados presentados son útiles en la definición de modelos univariados y en la selección de las estructuras adecuadas para la predicción de niveles freáticos, a nivel diario, para distintos adelantos.

La estimación de los estadísticos de los errores permitió delimitar el campo de aplicación de estructuras univariadas y avanzar en la definición de elementos (error cuadrático medio y error máximo) necesarios para la contrastación con modelos más complejos.

Los valores de los estadísticos, para distintos niveles de agregación, permiten tener una idea de la utilidad práctica de las posibilidades predictivas: predicción puntual y de persistencia de la serie a un nivel determinado.

El análisis de los errores permiten orientar la definición de las escalas de agregación de las variables de entrada y salida necesarias para definir la estructura de la función de transferencia precipitación puntual -nivel freático.

Nota: Este trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto: Estudio de la superficie freática en una zona piloto del conglomerado bonaerense, cuyo responsable es el Licenciado Adolfo Fernández, sus comentarios y sugerencias son reconocidos por los autores.

#### 5. Referencias bibliográficas seleccionadas.

- . Box, G.E.P. y G.M. Jenkins, Time Series Analysis, Forecasting and Control. Holden Day. 1976.
- . Calderón Loaiza, J.I. y O.N. Bermoudes, Aplicación del análisis de series de tiempo en Hidrogeología. II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. 43-55. Tomo II. Chile, 1994.
- . Viswanathan, M.N., Recharge Characteristics of an Unconfined Aquifer from the Rainfall-Water Table Relationship. Journal of Hidrology, Volumen 70, N°1-4 1984.

