

## **RELACION ENTRE LOS EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMATICA Y LAS ALTURAS HIDROMETRICAS REGISTRADAS EN PUERTO PARANA, ARGENTINA**

Susana B. VANLESBERG

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral  
Santa Fe, Argentina

En este trabajo se aplican técnicas estadísticas con el fin de poder establecer posibles vinculaciones entre los efectos de la variabilidad climática y las variables hidrológicas que se analicen con algún fin determinado. Es decir, contando con información histórica de fluctuaciones climáticas se tratará de decir cuanto de la variación futura de la variable de interés es posible pronosticar de manera adecuada.

El motivo del presente análisis se fundamenta en la necesidad de contar con adecuados modelos de pronósticos de alturas hidrométricas sobre el curso del Río Paraná con adelanto de un mes como mínimo. Esto se debe a que cuando sea otorgada la concesión de la Hidrovía Paraná - Paraguay, se exigirá que en condiciones de aguas bajas (la que corresponde al 75% , es decir que posee un 75% de probabilidad de ser superada ) se garanticen 12 pies de calado.

Con esta exigencia quien resulte ser el adjudicatario deberá conocer con determinado adelanto y si es posible con una determinada seguridad las condiciones del río en cuanto a niveles, para poder tomar las medidas correspondientes y con suficiente tiempo para poder ejecutarlas.

Este estudio debería ser realizado en todas las estaciones hidrométricas ubicadas sobre el curso del Río Paraná y en aquellas en donde exista suficiente información, pero dado lo corto del tiempo disponible es que se desarrollará el análisis en Puerto Paraná. El motivo de la elección de Paraná y no Santa Fe, es que la primera se encuentra ubicada directamente sobre el curso del Paraná.

Se trabajó con la serie de alturas medias mensuales desde 1949 a 1994; la serie completa se extiende desde 1905 a 1995, pero para poder contrastarla con la serie de anomalías del Pacífico. Esta serie original fue transformada en anomalías , quitándole el valor medio y expresado en términos de su desvío estándar. Se comparó esta serie de anomalías con las series de los índices del Océano Pacífico: temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región Niño3 y con el índice de oscilación del Sur (IOS).

La justificación de por qué trabajar con alturas hidrométricas y no caudales es que se puede considerar a la primera como una variable integradora, no generadora, ya que depende no solamente del caudal sino también de las condiciones del canal (rugosidad lateral y de fondo) las cuales suelen variar de evento a evento o de año a año y además es la medida que se toma directamente sobre el curso de agua con el menor error.

Se realizó la correlación cruzada entre las series de anomalías de alturas y del índice IOS y las TSM. El motivo de esto es determinar el desfase o rezago entre ambas. En el caso de las TSM el rezago fue de tres meses obteniéndose un coeficiente de correlación máximo a los tres meses igual a 0.3570. Este valor positivo estaría indicando una relación directa entre este índice y las alturas, es decir con anomalías positivas de TSM se dan anomalías positivas de alturas, correspondiendo esto a eventos Niño. Basado en este resultado se rezagaron los valores de TSM 1, 2 .... 6 meses con el fin de seleccionar luego el conjunto óptimo de variables independientes.

En el caso de IOS se obtuvieron valores siempre negativos lo cual estaría indicando relación inversa entre anomalías de este índice y las de alturas. El valor máximo se obtuvo para un rezago de seis meses con un valor de  $r$  de -0.23. Esta relación inversa indicaría que para valores de IOS altos corresponderían anomalías negativas en alturas y a la inversa. También en este caso se rezagaron los valores del índice 1, 2,..... hasta 7 meses para obtener luego el conjunto óptimo de variables independientes.

Se utilizó el procedimiento step-wise de selección del conjunto óptimo de variables independientes. Basado en el resultado arrojado por el método del paso anterior se aplicó un modelo de regresión múltiple. Se probaron varios modelos, primero utilizando cada índice con diferentes rezagos, y luego combinando ambos índices.

Primer modelo aplicado: Se utilizaron como variables independientes IOS al tiempo t, IOS rezagado 4 y 7 meses . Por lo tanto la expresión del modelo de predicción sería:

$$y = - 0.028107 - 0.138952 * IOS_t - 0.0109456 * IOS_{t-4} - 0.111171 * IOS_{t-7}$$

El valor del coeficiente de correlación múltiple obtenido fue de 0.30. Se observan en la Tabla 1 los valores de t y p. Estos valores son : t se obtiene de dividir cada coeficiente de regresión por su error estandar; asociado con este valor existe un valor de p esto indica la probabilidad que un valor mayor de t, en valor absoluto, pueda ocurrir si no existiera la contribución marginal de la variable en cuestión. Cuando este nivel es bajo significa que la variable brinda información suficiente e importante para la predicción.

Segundo modelo aplicado: En este caso se consideraron como variables independientes las seleccionadas por step-wise para TSM. Fueron los correspondientes a un rezago de uno y seis meses. En este caso el coeficiente de correlación múltiple obtenido fue de 0.40. La expresión del modelo es la siguiente:

$$y = + 0.011424 + 0.221931 * TSM_{t-1} + 0.215363 * TSM_{t-6}$$

Se muestran también en la Tabla 1 los valores de t y p, de esto se deduce que son altamente significativos los valores de los coeficientes de regresión para las variables consideradas no así para el caso de la ordenada .

Tercer modelo aplicado: En este caso se adoptaron valores de ambos índices como variables independientes: TSM rezagado uno y seis meses e IOS al tiempo t , y cuatro y siete meses hacia atrás, obteniéndose lo siguiente:

$$y = 0.252014 * TSM_{t-1} + 0.161391 * TSM_{t-3} + 0.02852 * IOS_t - 0.007810 * IOS_{t-4} - 0.070615 * IOS_{t-7}$$

En este caso el valor de r es 0.40, y el resumen se muestra en la Tabla 1.

## CONCLUSIONES

Con el fin de validar los resultados del modelo se efectuó un test de frecuencias de chi-cuadrado para verificar la validez de los modelos encontrados para realizar pronósticos . En este test se comparan los valores observados con los esperados , siendo éstos los calculados a través de la expresión del modelo en cada caso. Se aceptó la hipótesis propuesta de que las diferencias son debidas al azar, para un nivel de significación de 5%.

Se muestran además para el segundo modelo solamente, la distribución de los valores observados y los pronosticados a través del modelo, y se aprecia que la distribución es semejante, lo cual llevaría a pensar que es posible realizar pronóstico de alturas hidrométricas en puerto Paraná a través de esta expresión. Restan por hacer más verificaciones , pero en principio puede concluirse que se encuentra relación entre la variabilidad climática registrada en la zona del Pacífico Tropical y el comportamiento de la variable analizada.

Se intentará posteriormente realizar este mismo trabajo con un nivel de agregación mayor a un mes, bimestral , trimestral , etc. , siempre tratando de lograr el mejor modelo de pronóstico de alturas con suficiente adelanto.

Análisis similar se realizó para los tres modelos presentados, pero sólo se muestran los resultados del segundo modelo en la Figura 1.

Tabla 1.- Valores de t y p, obtenidos para los modelos desarrollados

|                         | BETA  | Error Estandar de BETA | B     | Error Estandar de B | t(539) | p-level |
|-------------------------|-------|------------------------|-------|---------------------|--------|---------|
| <b>Modelo 1 N = 543</b> |       |                        |       |                     |        |         |
| Intercepción            |       |                        | -.028 | .041                | -0.682 |         |
| F                       | -.120 | .050                   | -.109 | .045                | -2.396 |         |
| B                       | -.153 | .044                   | -.138 | .039                | -3.483 |         |
| I                       | -.122 | .047                   | -.111 | .043                | -2.573 |         |
| <b>Modelo 2 N = 546</b> |       |                        |       |                     |        |         |
| Intercepción            |       |                        | .011  | .039                | .290   | .771    |
| H                       | .215  | .046                   | .215  | .046                | 4.665  | .000    |
| C                       | .221  | .046                   | .221  | .046                | 4.803  | .000    |
| <b>Modelo 3 N = 543</b> |       |                        |       |                     |        |         |
| B                       | .253  | .057                   | .252  | .057                | 4.41   | .783    |
| C                       | .162  | .062                   | .161  | .062                | 2.58   | .000    |
| D                       | .031  | .053                   | .028  | .048                | .59    | .010    |
| E                       | -.008 | .053                   | -.007 | .048                | -.15   | .552    |
| F                       | -.077 | .051                   | -.070 | .046                | -1.50  | .873    |

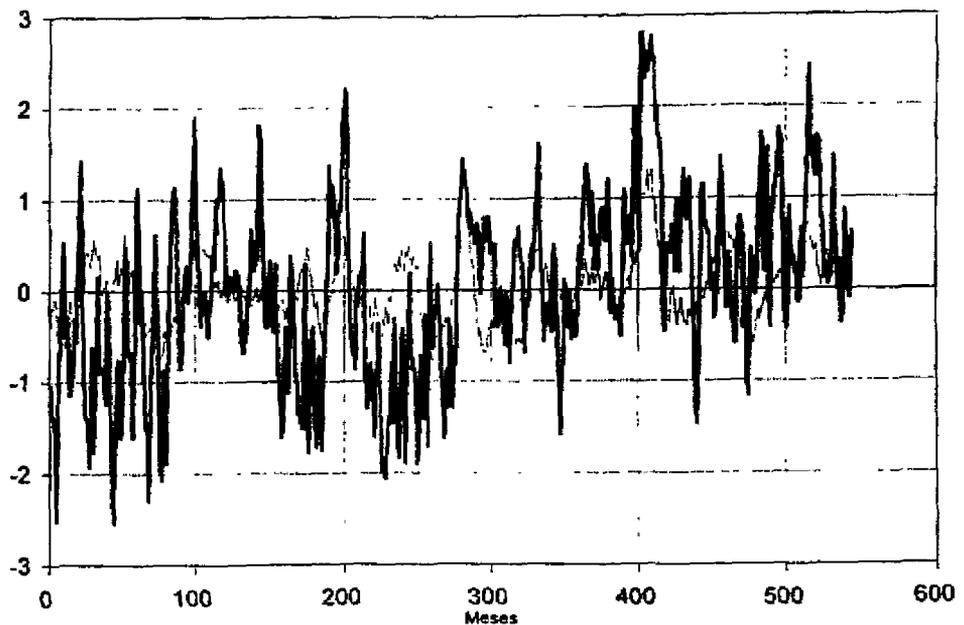


Figura 1.- Distribución de los valores observados y pronosticados para el segundo modelo (ver texto para detalles del modelo).

## **INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LAS RELACIONES ENTRE LOS CICLOS DEL ENOS Y LA TEMPERATURA MEDIA EN LA ARGENTINA**

Daniel A. VILA  
Servicio Meteorológico Nacional  
Buenos Aires, Argentina

La posibilidad de predecir la variabilidad estacional e interanual en los procesos hidrológicos es de fundamental importancia en la planificación de los recursos hídricos. Dicha posibilidad esta relacionada con el conocimiento de las perturbaciones en la circulación general de la atmósfera en dicha escala de tiempo. La mayor fuente de variabilidad en la circulación atmosférica se encuentra asociada al fenómeno conocido como El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) el cual afecta a vastas regiones del planeta.

En el presente trabajo se realiza una introducción al estudio de la variabilidad estacional e interanual del campo de la temperatura media en la República Argentina y su relación con la temperatura superficial de Océano Pacífico Ecuatorial.

La temperatura es un parámetro importante en el monitoreo de los regímenes hídricos y en las evolución de los sistemas agronómicos. Esta variable tiene una directa influencia en la evaporación y la evapotranspiración, como así también el derretimiento de nieve. Todos estos procesos son importantes en diferentes regiones del país.

La llanura pampeana, de muy escasa pendiente, sufre cíclicamente períodos secos y húmedos, provocando estos últimos serios anegamientos en vastas zonas de la región centro-este del país. El mecanismo de la evaporación es el más eficiente para evacuar el agua de las zonas inundadas dado que el escurrimiento superficial es muy lento en toda la zona. Aquí se encuentra el polo de desarrollo agrícola-ganadero más importante del país. Sobre el oeste del país se encuentra la Cordillera de los Andes. Los ríos que nacen en la misma son de régimen nival y sobre los mismos se encuentran importantes emprendimientos hidroeléctricos. La posibilidad de predecir las anomalías de temperatura para las estaciones de primavera y verano se verá reflejada en un mayor o menor derretimiento de la nieve acumulada en el invierno, y por lo tanto, un mayor o menor caudal en la estación estival.

Como una introducción al estudio de la problemática de la predicción climática de la temperatura se seleccionó la variable temperatura media mensual. El período de estudio fue de treinta y tres años entre 1961 y 1993 para las estaciones pertenecientes a la red del Servicio Meteorológico Nacional. De toda la información disponible se seleccionaron aquellas estaciones que cumplieran con los siguientes requisitos: 1) por lo menos 9 meses de datos por cada año de información. 2) si en algún mes no se disponía del dato de temperatura media mensual, el mismo fue rellenado con el valor medio para dicho mes. En el caso de que dichos faltantes superaran los tres datos para un determinado mes en los treinta y tres años considerados (10%), o más de doce en total para una estación en particular, la misma fue descartada.

Luego de realizar dicha selección se conformó una base de datos de cincuenta estaciones, cuya ubicación se puede visualizar en la Figura 1. La mayoría de las ellas se encuentran en la zona central del país.

Para cada una de las estaciones seleccionadas se calcularon los promedios trimestrales de temperatura media para los trimestres de enero-febrero-marzo (EFM), abril-mayo-junio (AMJ), julio-agosto-setiembre (JAS) y octubre-noviembre-diciembre (OND). Luego se computaron las anomalías normalizadas (en adelante AN) para cada uno de estos períodos, considerando el valor medio trimestral y el desvío estandar para el período 1961-1990.

Una metodología similar se siguió para el cálculo de las anomalías normalizadas trimestrales del índice Niño3. En este caso los valores medios trimestrales y los desvíos estandar se calcularon en base al período 1951-1980.

A partir de la información generada, se establecieron correlaciones simples entre las anomalías trimestrales normalizadas del índice Niño3 como variables predictoras y las anomalías trimestrales normalizadas de la temperatura

media para cada una de las estaciones seleccionadas como predictandos. En un primer momento se establecieron dichas regresiones lineales para instantes de tiempo simultáneos, para luego extender la metodología con rezagos de 3, 6 y 9 meses entre los predictores y los predictandos respectivamente. De cada una de las correlaciones realizadas se obtuvo un valor de coeficiente de correlación entre el valor observado del predictando y el modelo lineal propuesto. La significancia estadística de dichos coeficientes fue testeada a través de un test F de Snedecor al 95% de confianza. Como resultado de dicho análisis se obtuvieron una mayor cantidad de coeficientes de correlación estadísticamente significativos para las siguientes regresiones:

ESQUEMA 1: Predictor: AN Niño3 EFM

Predictando: AN Temp. Media EFM

ESQUEMA 2: Predictor: AN Niño3 EFM

Predictando: AN Temp. Media JAS

En la Figura 2 se muestran los resultados de los coeficientes de correlación obtenidos para cada uno de los análisis precedentes. Es de destacar que para el Esquema 1 la relación es directa (pendiente de la recta de regresión positiva), mientras que para el Esquema 2 la correlación entre el predictor y los predictandos es inversa (pendiente negativa).

Para validar los resultados obtenidos se realizó una validación cruzada, ya que se disponía de un período muy corto (treinta y tres años) como para realizar un modelo y luego verificarlo con una serie independiente.

Los resultados de la validación cruzada se pueden visualizar a través del skill local. Este procedimiento divide a la serie en terciles: por encima de lo normal, normal y por debajo de lo normal. Luego se considera un acierto en el pronóstico si el mismo coincide con el tercil de la observación. Para que el mismo sea significativo, este debe superar la chance del azar (33%). A partir de esta metodología se produjeron los skills locales para las cincuenta estaciones obteniéndose, para el primer esquema, quince estaciones cuyo skill era estadísticamente significativo al 90%. Los valores obtenidos fueron superiores al 42% y menores al 49%. Dichas estaciones coinciden aproximadamente con la zona geográfica donde los coeficientes de regresión son estadísticamente significativos (Figura 2, izquierda). En cambio, para el segundo esquema solamente cinco estaciones superan el 90% de significancia estadística.

Debido a que la provincia de Buenos Aires ha mostrado valores estadísticamente significativos en ambos esquemas, y el uso potencial de un pronóstico climático en dicha región del país, se realizó un análisis más detallado en la elección de los predictores y los predictandos para estudiar la sensibilidad del modelo. Así también se extendieron las correlaciones a rezagos de 1 a 18 meses.

Para la generación de los predictores se tomaron promedios móviles de tres meses del índice Niño3 a los cuales se les calculó las anomalías normalizadas de acuerdo a los criterios expresados en la primera parte. De esta manera de obtuvieron doce predictores a saber: Anomalías normalizadas del índice Niño3 de DEF, EFM, FMA, MAM, AMJ, MJJ, JJA, JAS, ASO, SON, OND y NDE.

De similar manera se generaron los predictandos para catorce estaciones ubicadas en las provincias de Buenos Aires, sur de Córdoba, sur de Santa Fe, sur de Entre Ríos y este de La Pampa. Las mismas pueden visualizarse en la Figura 3. Los resultados de dichas regresiones para los predictores de Febrero-Abril (FMA) y Abril-unio (AMJ) para la estación Mar del Plata Aero, se muestran en la Tabla 1.

Es de destacar que las regresiones significativas son todas inversas. Luego de obtener las rectas de regresión para cada modelo, con aquellos que resultaron estadísticamente significativos, se realizó una validación cruzada. En la Figura 4 se muestra el resultado de dicha validación para la estación Mar del Plata Aero utilizando como variable predictora las AN Niño3 de AMJ y como variable predictando las AN temperatura media de MJJ.

## CONCLUSIONES

En la primera parte del trabajo, en la cual se consideró a toda la República Argentina, se puede concluir que el Esquema 1 posee una mayor habilidad que el Esquema 2. Es de destacar que el Esquema 1 no puede considerarse como herramienta de pronóstico ya que tanto el predictor como los predictandos se miden en forma simultánea en el tiempo. No obstante, es posible obtener pronósticos operativos del índice Niño3 con hasta 18 meses de anticipación. El

hecho de utilizar valores pronosticados en el modelo en vez de valores observados, atentará contra la bondad de modelo con respecto al esquema original considerado.

En el Esquema 2, si bien puede considerarse como modelo de pronóstico, la señal reflejada en el campo de los predictandos es de menor intensidad que para la regresión considerada anteriormente. En ambos casos la significancia estadística queda restringida a ciertas regiones geográficas que pueden visualizarse en la Figura 2.

Con respecto a la segunda parte del trabajo desarrollado, en la cual se tomó una subregión centrada en la llanura pampeana, se puede concluir que el modelo FMA-predictor posee dos máximos de significancia estadística. El primero de ellos durante el invierno austral del año en curso, y un segundo máximo, de mayor significancia que el primero, en el otoño e invierno del año siguiente. Este máximo se repite en el esquema AMJ-predictor.

En cuanto a las estrategias futuras para seguir desarrollando aplicaciones prácticas del pronóstico climático estacional e interanual se enumeran algunas posibles líneas de investigación:

- realizar una validación del modelo propuesto con el agregado de series de datos más largas;
- repetir la experiencia considerando los años caracterizados como Niño (fase cálida del ENOS) y los años Niña (fase fría);
- incluir en los posibles predictores otras regiones del Océano Pacífico y del Océano Atlántico, como así también el estado de la variable en instantes de tiempo anteriores;
- utilizar el Análisis de Correlación Canónica (CCA) combinado con Funciones Ortogonales Empíricas (EOF);
- repetir el estudio para otras variables de interés: temperaturas máximas y mínimas, frecuencia de días con temperatura mayor/menor que cierto umbral, frecuencia de días con precipitación, etc;
- seguir interactuando con investigadores del país y del extranjero, en especial del Uruguay y el sur de Brasil, para diseñar futuras estrategias a desarrollar en el conocimiento del tema.

Tabla 1.- Coeficientes de correlación obtenidos para la Estación Mar del Plata Aero para diferentes esquemas de regresión lineal simple

| Predictandos | Predictor: FMA | Predictor: AMJ |
|--------------|----------------|----------------|
| MAM          | 0.08           | --             |
| AMJ          | 0.06           | --             |
| MJJ          | 0.25           | 0.03           |
| JJA          | 0.20           | 0.01           |
| JAS          | 0.37           | 0.16           |
| ASO          | 0.02           | 0.09           |
| SON          | 0.10           | 0.06           |
| OND          | 0.01           | 0.03           |
| NDE          | 0.15           | 0.09           |
| DEF          | 0.05           | 0.03           |
| EFM          | 0.11           | 0.14           |
| FMA          | 0.16           | 0.21           |
| MAM          | 0.02           | 0.12           |
| AMJ          | 0.20           | 0.24           |
| MJJ          | 0.25           | 0.30           |
| JJA          | 0.20           | 0.01           |
| JAS          | 0.15           | 0.22           |

Nota: los coeficientes sombreados tienen significancia estadística al 95 %

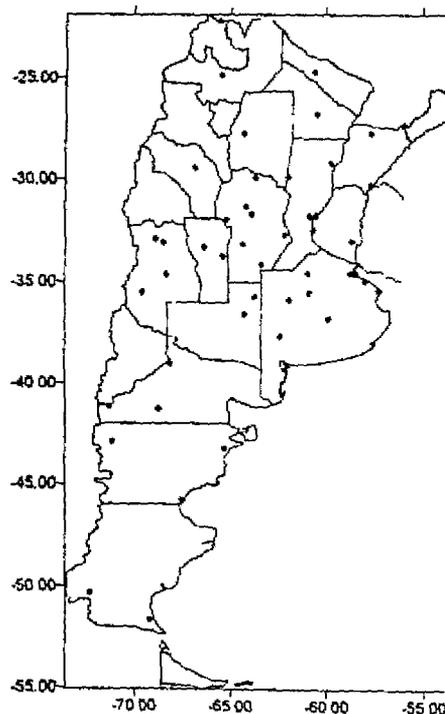


Figura 1.- Localización de las 50 estaciones meteorológicas seleccionadas para el presente estudio.

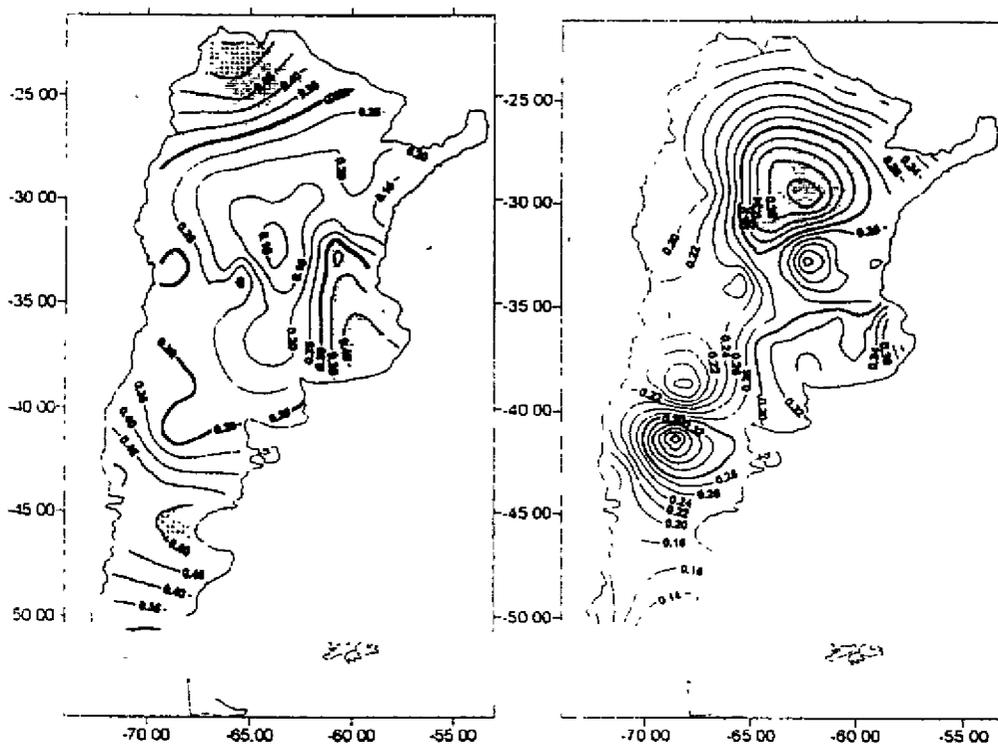


Figura 2.- Correlación entre las anomalías del trimestre Enero-Marzo del Niño3 y las anomalías de la temperatura media del trimestre Enero-Marzo (izquierda) y Julio-Setiembre (derecha). Las zonas sombreadas corresponden a correlaciones estadísticamente significativas al 95%.

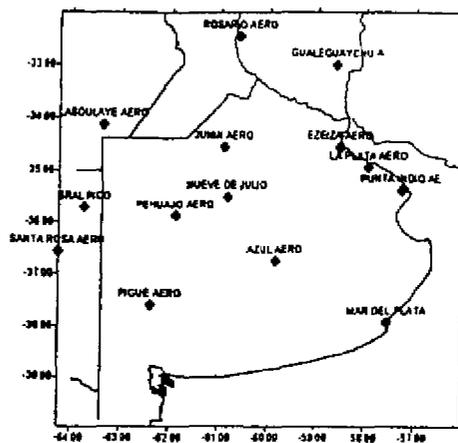


Figura 3.- Localización de las 14 estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio regional

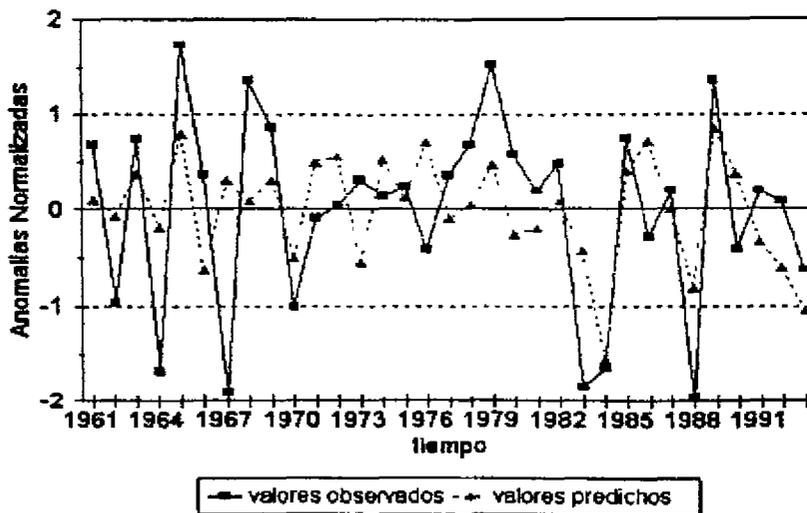


Figura 4.- Resultado de la validación cruzada al pronosticar las anomalías de la temperatura del trimestre Mayo-Julio en la estación Mar del Plata Aero, en función de las anomalías del Niño3 en el trimestre Abril-Junio.