Análisis de la influencia del ENSO en el Valle del Yaqui (Sonora, México) mediante modelos de regresión dinámica y múltiple

Isidro Roberto Cruz Medina*
Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero 818 Sur, Col. Centro, Ciudad Obregón, Sonora, México, CP: 85000

Recibido 30 Diciembre 2005, revisado 11 Septiembre 2006, aceptado 8 Noviembre 2006

Analysis of ENSO influence in the Yaqui Valley (Sonora, México) with dynamic and multiple regression models

Abstract

Modeling and forecasting of rainfall is of great importance because it helps to estimate water availability and planning diverse human activities like agriculture. To estimate annual rainfall and monthly temperatures it is common to use probability distributions like the Normal, Lognormal, Gamma and Gumbel distributions. Although these probability distributions have provided the useful forecast predictions needed in planning, these models do not take in consideration the possible influence of the Central Pacific Ocean-atmosphere anomalous oscillations in temperatures that have been called the "El Niño" or ENSO (El Niño Southern Oscillation) event. In this paper, this influence is analyzed with correlation analysis, multiple regression methods and transfer functions or dynamic regression, it was found that at a national level there is an small increment in rainfall after a strong "El Niño" event, in contrast, in the Valle del Yaqui the annual rainfall decreases after the occurrence of a strong "El Niño". The annual mean of minimum monthly temperatures increases lightly in "El Niño" years and decreases in "La Niña" years.

Keywords: ENSO indexes, ENOS, nonparametric methods, transfer functions, dynamic regression

Introducción

Invariablemente cada año, se observan condiciones climáticas extremas en varias partes del mundo, con sequías en algunas regiones e inundaciones en otras latitudes. En algunas regiones, estas condiciones extremas se han asociado con el calentamiento anormal de la superficie del mar en el Océano Pacífico central, fenómeno que se ha bautizado con el nombre de "El Niño" y con el enfriamiento de esta misma superficie, fenómeno conocido con el nombre de "La Niña" (Glantz, 1996). Las siglas en inglés para estos fenómenos son ENSO (El Niño Southern Oscillation) y en español ENOS. En las dos últimas décadas se ha estudiado intensamente este fenómeno y se ha establecido una conexión entre la temperatura superficial del agua en el Pacífico central (comúnmente denotada por SST, por sus siglas en inglés) y la circulación extratropical del aire a gran escala. Gershunov y Barnett (1998) trataron de identificar la influencia del ENSO en las temperaturas y precipitaciones extremas en los Estados Unidos de Norteamérica, Rasmusson y Carpenter (1983) estudiaron las relaciones entre el ENSO y la lluvia en la India y Sri Lanka. En el 2003, la revista Geofísica Internacional dedicó un número especial a los efectos de este fenómeno en

* Autor para correspondencia
E-mail: rcruz@itson.mx; Fax: +52 644 4100910

México, en donde, Lavín et al (2003) analizan las anomalías en la SST en el golfo de California y Urbán et al (2003), Palomares et al (2003) y Muhlia et al (2003) entre otros autores analizan los impactos biológicos de "El Niño" y "La Niña". Magaña et al (2003) analizan el impacto de "El Niño" en la precipitación en México con mapas de las anomalías en los años de "El Niño" y de "La Niña" obtenidos mediante Kriging, una de las técnicas de interpolación geoestadística (Goovaerts, 1997), las anomalías observadas varían de -5 a 5 mm, cantidad muy pequeña comparada con las precipitaciones anuales de la República Mexicana.

En Sonora, Salinas y Lluch (2003), encontraron un incremento del rendimiento del trigo sembrado en invierno en años de "El Niño" y decrementos en años de "la Niña" sin reportar el efecto de estos fenómenos en las precipitaciones y temperaturas, si estas variables climáticas son afectadas significativamente por el ENSO, este fenómeno debe tomarse en cuenta para obtener predicciones confiables. Este estudio tiene el propósito de determinar si las precipitaciones, las temperaturas y las escorrentías que alimentan al Valle del Yaqui en el sur de Sonora, México, están relacionadas con los índices utilizadas para caracterizar los fenómenos atmosféricos de "El Niño" y "La Niña" (fenómenos ENSO). Cuando la relación entre estas variables hidrológicas y los índices que caracterizan al ENSO es estadísticamente significativa, se analiza la conveniencia de utilizar mezclas de modelos para incrementar la precisión en el pronóstico de la precipitación, temperatura y escorrentía.

Área de estudio

El Valle del Yaqui (Fig. 1), con una población cercana al medio millón de habitantes y un total de 255,000 ha de riego, es una de las zonas agrícolas más importantes de México (INIFAP, 2001). Su sistema de tres presas: "La Angostura", "El Novillo" y "Oviachic" tienen una capacidad útil de 5900 $10^6 m^3$, INIFAP (2001). Los cultivos más importantes, han sido el trigo, algodonero, soya, cártamo y maíz. En la última década por problemas económicos y de sequía, el padrón de cultivos se ha modificado y se ha incrementado la superficie sembrada con hortalizas, sin embargo, el cultivo más importante sigue siendo el trigo con una superficie de siembra usualmente mayor a las 150 000 ha, y un rendimiento promedio de 6 ton/ha. En el año 2003 este valle, que hace dos décadas fue un emporio agrícola, estuvo en crisis con menos de 40 000 ha de trigo y sus presas literalmente vacías debido a la falta de aplicación de una regla de operación que tome en consideración las condiciones de continuidad (Labadie, 2004).

Material y métodos

Para analizar la influencia del ENSO se utilizarán las variables climáticas: máxima mensual, máxima promedio mensual, mínima mensual y mínima promedio mensual de las temperaturas y la precipitación del periodo 1941-2001 en ocho estaciones del Valle del Yaqui proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua y el Servicio Meteorológico Nacional (http: //smn.cna.gob.mx/SMN.html). El estudio inicia con la selección y descripción estadística de las variables e índices que tratan de caracterizar la intensidad del ENSO. Enseguida, se describen y aplican métodos estadísticos (correlaciones paramétricas y no paramétricas y regresiones múltiples y dinámicas) para determinar si existe una relación significativa (α=0.05) entre las variables mencionadas y las variables e índices que tratan de caracterizar la intensidad del ENSO. Al final, se trata de incrementar el ajuste de los modelos probabilísticos utilizados para modelar la precipitación por medio de una mezcla de modelos.

Índices y variables para caracterizar al fenómeno ENSO

Para caracterizar al fenómeno ENSO se han utilizado las presiones atmosféricas medias mensuales a nivel del mar entre Darwin (PD) y Tahití (PT) y la temperatura promedio de la superficie del mar (SST) en ciertas regiones del Pacífico. Por medio de estas variables se han definido diversos índices: (1) El índice SOI (índice de oscilación del sur) I_1 (Bureau of Meteorology, 2004), definido como la diferencia estandarizada (ver Tabla 1) entre las presiones atmosféricas PD y PT. (2) El SOI estandarizado con el método

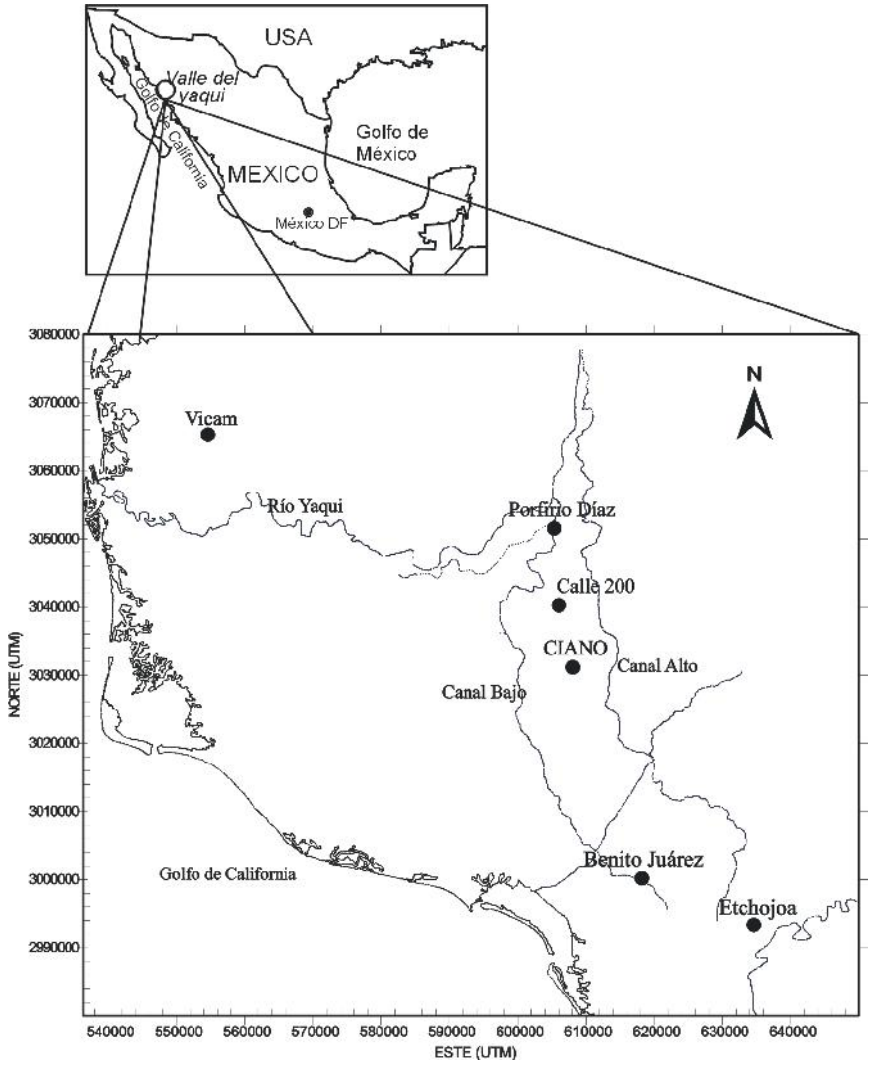


Fig. 1. Localización del Valle del Yaqui en Sonora, México.

descrito por Ropelewsky y Jones (1987), que se denotará por I_2, publicado por Climatic Research Unit (2004) de la University of East Anglia. (3) El índice bivariado de Smith y Sardeshmukh (2000), denominado I_b, que es una combinación del índice anterior con el promedio de la SST sobre la región 5N-5S y 170W a 120W. Este índice se puede consultar en el CDC (Climatic Diagnostics Center) de la NOAA (2004a). (4) El índice multivariado MEI de Wolter y Timlin (1993, 1998), I_m, definido como el componente principal de la matriz de covarianzas de las siguientes variables del Pacífico tropical: presión a nivel del mar, las componentes zonal y meridional del viento, la SST, la temperatura del aire en la superficie del mar y la fracción total de nubosidad. Estas variables se encuentran disponibles en el CDC de la NOAA (2004b). Los valores extremos de estos índices indican los años que se pueden clasificar como años "El Niño" o como años "La Niña". Sin

embargo, como los índices son continuos, el punto de corte de las clasificaciones es subjetivo. Por esta razón, se seleccionaron dos clasificaciones: la proporcionada por Wolter y Timlin (1998) para los años más fuertes de "El Niño" (1957, 1965, 1972, 1982, 1986, 1991, 1997) y de "La Niña" (1954, 1964, 1970, 1973,1975, 1988 y 1998) y la obtenida por el índice de la Agencia Meteorológica de Japón (AMJ) y publicada por el Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies (2004) de la Universidad Estatal de Florida.

Metodología

Por medio de un análisis de correlación se seleccionará un índice para caracterizar al ENSO. Para determinar si existe una relación estadísticamente significativa, entre este índice y las variables climáticas, se utilizarán análisis de correlación y regresión cuando las autocorre-laciones de estas variables no resulten significativas, porque autocorrelaciones significativas pueden generar relaciones espurias en los análisis de regresión y correlación. Estos errores se evitarán utilizando regresiones dinámicas o funciones de transferencia (Box y Jenkins, 1976). Pankratz (1991), en sus recomendaciones para la construcción de modelos de regresión dinámica, indica que la significancia de las autocorrelaciones define los análisis posteriores. Para determinar la significancia de las autocorrelaciones se obtendrán las funciones de autocorrelación (FA) de las variables en estudio con el paquete estadístico Minitab® (2003) que proporciona los límites de significancia para las correlaciones individuales y la estadística de Ljung y Box (1978), que se utiliza para probar la hipótesis nula de que todas las autocorrelaciones con desfasamientos de 1 a k son iguales a cero.

Los modelos de regresión múltiple y de regresión dinámica, incluirán índices desfasados porque podría suceder que la ocurrencia del ENSO en el Pacífico central influya en la precipitación de años futuros en México. Como es posible también, que el efecto del fenómeno ENSO se manifieste en las variables climáticas sólo en los años de "El Niño" y de "La Niña" bien definidos, se efectuarán comparaciones de los promedios anuales de las variables en estudio en cada estación por medio de análisis de varianza (ANDEVA) con las clasificaciones de "años normales", años de "El Niño" y años de "La Niña" utilizando las clasificaciones proporcionadas por la AMJ y la de Wolter y Timlin (1998) para los fenómenos más fuertes. Aunque es conocido que el ANDEVA es robusto cuando la variable de respuesta no se ajusta a la distribución normal (Box y Watson, 1962, Khury y Good, 1977), se efectuó también ANDEVA no paramétrico con un factor de clasificación (prueba de Kruskal y Wallis para la comparación de medianas) siguiendo la metodología presentada por Hollander y Wolfe (1999) para obtener una estimación más confiable de la significancia del modelo. El ajuste de las distribuciones de probabilidad se obtendrán por máxima verosimilitud con el paquete Expert Fit® (2002).

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de los índices SOI y de las presiones en Tahití y Darwin.

Variable	Media	S	Q1	Mediana	Q3
I_1	-0.504	7.141	-5.715	-0.887	4.467
I_2	-0.158	0.746	-0.712	-0.217	0.362
I_b	0.095	0.694	-0.336	0.054	0.654
I_m	0.027	0.807	-0.527	0.041	0.628
P_D	1009.900	0.700	1009.500	1009.800	1010.300
P_T	1012.600	0.500	1012.200	1012.600	1013.000

S representa a la desviación estándar y Q1 y Q3 al primer y tercer cuartil.

Resultados y discusión

La Tabla 1 presenta las estadísticas descriptivas de los índices y variables arriba mencionados. La correlación entre los SOI mensuales I_1 e I_2 es cercana a uno, este valor indica que los espacios vectoriales generados por estos índices prácticamente coinciden y que resulta indistinta la selección de cualquiera de ellos (en los análisis posteriores se utiliza al índice I_2). Esta correlación indica también que la estandarización de las diferencias de presiones atmosféricas propuestas por Ropelewsky y Jones (1987) no modifica significativamente al índice I_2 con respecto al índice I_1.

El signo de las correlaciones indica que I_1 e I_2 coinciden en general en signo y que tienen signo contrario a I_m. Por ejemplo en un año fuerte de "El Niño" como 1982, I_1= -13.05, I_2= -1.45 e I_m= 1.07 y en un año fuerte de "La Niña" como 1975, I_1= 13.60, I_1=1.32 e I_m= -1.27.

Las presiones de Darwin y Tahití explican el 82.50% de la variabilidad del índice I_1 (que equivale a una correlación de r= 0.908 entre este índice y la "mejor" combinación lineal de las presiones), el 83% del índice I_2, el 71.8% del índice I_b y el 51.3% del índice multivariado I_m (este valor relativamente bajo es explicable debido a que en la construcción de este índice intervienen tres variables adicionales).

Los índices I_1 e I_2 muestran autocorrelaciones de 0.67 para un desfase de un mes, valor que disminuye gradualmente a 0.38 para un desfase de seis meses. En la Fig. 1 se presenta la función de autocorrelación (FA) para el índice I_2 con sus límites del 95% de confianza. La Fig. 3 sugiere la afirmación común de que el fenómeno ENSO ocurre con periodo aproximado de cinco años (observe las autocorrelaciones positivas de 50 a 60 meses, aunque no significativas a un nivel α del 5%). Es interesante notar que la FA de los índices anuales no presenta autocorrelaciones significativas. El índice bivariado I_b muestra una autocorrelación de 0.87 para un desfase de un mes que disminuye gradualmente a 0.06 para un periodo de doce meses. El índice multivariado presenta una autocorrelación de 0.96 para un desfase de un mes que disminuye gradualmente a 0.12 para un periodo de doce meses. En las presiones atmosféricas de Darwin y Tahití se pueden identificar autocorrelaciones con ciclos de doce meses, coincidentes con el ciclo anual de las presiones atmosféricas.

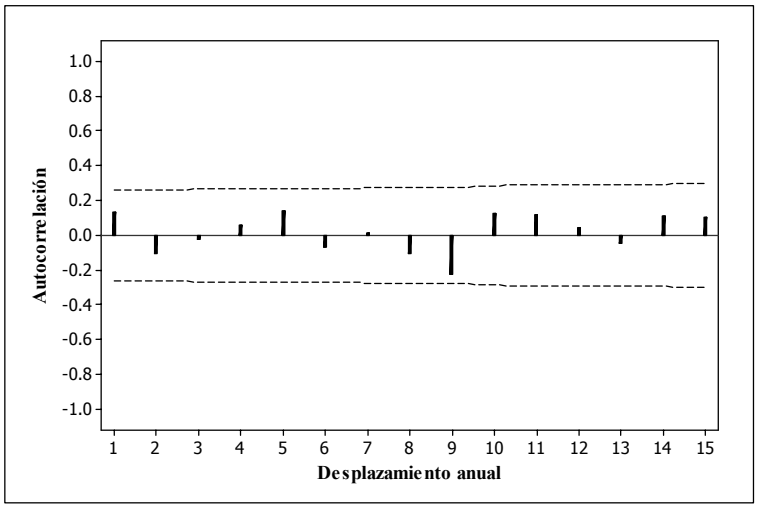


Fig. 2. Función de autocorrelación para la precipitación promedio anual de México con límites de confianza del 95% para la autocorrelación.

a) Análisis estadístico de la relación ENSO-variables climáticas regionales

Autocorrelaciones no significativas

En este caso se justifica la utilización de correlaciones (paramétricas y no paramétricas) y de modelos de regresión múltiple para analizar e interpretar la dependencia entre las variables climáticas y el índice I_2 que se eligió para caracterizar al ENSO. Es interesante observar que la precipitación media anual de México, las precipitaciones medias anuales y las escorrentías que alimentan al Valle del Yaqui y las medias de los índices anuales no tienen autocorrelaciones significativas ($\alpha = 0.05$). La Fig. 2 muestra la FA de la precipitación promedio anual de México con los límites de confianza del 95% para la autocorrelación. Los modelos de regresión múltiple incluyen índices desfasados como se menciona en métodos.

$$Y = C + B_0 I + B_1 I_{-1} + B_2 I_{-2} + B_3 I_{-3} + B_4 I_{-4} + \varepsilon \qquad (1)$$

donde:
Y: variable climática que se trata de explicar
C: ordenada al origen del modelo
I_{-k}: índice que caracteriza al ENSO con un desfasamiento de k = 0, 1,…,4 años
B_k: coeficiente de regresión del índice I_{-k}
ε: variable aleatoria independiente

Autocorrelaciones significativas

Para este caso, que ocurrió con los índices y variables climáticas mensuales (la Fig. 3 muestra las autocorrelaciones del índice mensual I_2), se utilizará el modelo de regresión dinámica RD (2), las variables climáticas y los índices representan promedios mensuales, y la variable aleatoria representada por N (conocida también como perturbación o ruido estocástico) está autocorrelacionada.

$$Y= C+A_1M_1+A_2M_2+...+A_{12}M_{12}+B_0I+B_1I_{-1}+ B_2I_{-2}+...+B_{18}I_{-18}+N \qquad (2)$$

donde:
Y: variable climática mensual que se trata de explicar.
C: ordenada al origen del modelo.
M_i:variable indicadora del mes i para i =1, 2,..., 12.
A_i: coeficiente de regresión de la variable indicadora del mes M_i para i =1, 2,..., 12
B_k: coeficiente de regresión del índice I_{-k}
I_{-k}: índice mensual que caracteriza al ENSO con un desfasamiento de k = 0, 1, 2,..., 18 meses.
$(A_1M_1+A_2M_2+...+A_{12}M_{12}+B_0I+B_1I_{-1}+B_2I_{-2}+...+B_{18}I_{-18})$:

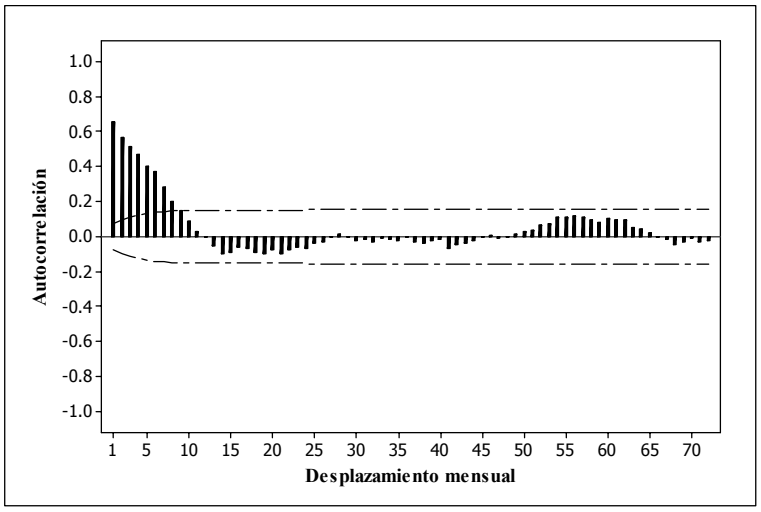


Fig. 3. Función de autocorrelación para el índice I_2 mensual con límites de confianza del 95% para la autocorrelación.

Tabla 2. Estadísticas de las precipitaciones anuales (mm) de siete estaciones del sur de Sonora y de las escorrentías en la presa de "La Angostura".

Estación	Media	S	Q1	Mediana	Q3
Obregón	377.1	127.4	292.0	357.8	462.3
Calle 200	284.1	112.9	196.2	270.7	368.8
CIANO	305.7	125.4	207.7	284.7	408.1
Vicam	309.3	99.9	223.5	320.0	386.4
Villa Juárez	253.6	140.2	152.4	222.0	332.0
Porfirio Díaz	361.1	158.6	262.2	358.4	466.3
Etchojoa	272.1	117.3	185.5	251.5	331.5
E4P12	266.1	141.4	182.7	232.5	303.5
Escorrentías en la presa de La Angostura en $10^6 m^3$					
1º Semestre	201	235	41	90	324
2º Semestre	322	177	192	296	431
Anual	524	260	331	459	738

S representa a la desviación estándar y Q1 y Q3 al primer y tercer cuartil.

Tabla 3. Coeficientes de determinación R^2 de las regresiones múltiples entre la precipitación y los índices SOI con y sin desfasamientos de uno a cuatro años.

Indice :	I_m		I_b		I_2	
Estación :	R^2 (%)	Valor P[1]	R^2 (%)	Valor P	R^2 (%)	Valor P
Obregón	0.0	1.00	1.3	0.95	1.1	0.96
Calle 200	7.7	0.50	11.5	0.31	9.5	0.40
CIANO	6.8	0.57	8.7	0.46	6.8	0.57
Vicam	3.9	0.76	5.8	0.62	6.3	0.59
V. Juárez	4.9	0.63	10.0	0.30	10.6	0.28
P. Díaz	17.3	0.22	12.1	0.39	10.9	0.44
Etchojoa	4.8	0.53	5.3	0.43	4.6	0.47
E4P12	3.2	0.81	4.3	0.73	3.8	0.76

P[1] Valor p de la regresión múltiple.

es la función de transferencia con dos componentes, el primero con las variables indicadoras para los meses (incluidos debido a la gran variabilidad mensual de las variables climáticas) y el segundo con los índices ENSO con desfasamientos de 1 a 18 meses para incluir el posible efecto del ENSO en las variables climáticas mensuales en meses posteriores. Antes de ajustar el modelo RD, Pankratz (1991) recomienda ajustar modelos ARIMA (autoregressive integrated moving average) tanto para la variable Y como para el índice I, con el propósito dual de tener un modelo de pronóstico para Y (cuando el modelo de regresión dinámica no sea adecuado) y para establecer un modelo base para comparar el modelo RD (2). Los modelos ARIMA y los modelos de regresión dinámica se obtuvieron por medio de los paquetes estadísticos MINITAB® (Minitab Inc., 2003) y SAS® (SAS Institute Inc., 1999).

Relación precipitación promedio de México-fenómeno ENSO

La falta de significancia de las autocorrelaciones (α=0.05), justifica el uso de modelos de regresión múltiple, con la precipitación como variable dependiente y el índice anual I^2 sin y con desfasamientos de uno a cuatro años como variables independientes. El análisis de regresión mostró una relación estadísticamente significativa (valor p=0.024) entre la precipitación y el índice I_2 desfasado un año (I_{2_1}). La ecuación de regresión simple con este índice $Y = 767 - 29.8\ I_{2_1}$, muestra

que la precipitación nacional promedio se incrementa al año de que ocurre el fenómeno de "El Niño" y se reduce un año después de que ocurre "La Niña" (en años de "El Niño" el valor del índice I_2 es negativo). Por ejemplo, un año después de un evento fuerte de "El Niño" con un I_{2_1}= -1.45 (como el de 1982), se espera un incremento de la precipitación de 43 mm. Sin embargo, el coeficiente de determinación R^2= 0.085 indica que este modelo explica solamente el 8.5% de la variabilidad total de la precipitación y por este motivo la ecuación es poco útil en términos de pronóstico. Esta conclusión se fortalece por la diferencia de 56 mm (significativa al 7% con una prueba t de Student) entre las medias de las precipitaciones un año después de un año fuerte de "El Niño" (821 mm) y la precipitación media después de un año "normal" (765 mm) con la clasificación de Wolter y Timlin (1998). Debido a la gran variación en altitudes y latitudes de la República Mexicana, es posible que el efecto del ENSO cambie en diferentes regiones de México y que los diversos efectos se contrarresten en un análisis de la precipitación promedio como el presentado. Por esta razón, es necesario un análisis regional del efecto del ENSO, a continuación se presenta el análisis de las precipitaciones y temperaturas del Valle del Yaqui, Sonora.

Relación precipitación-fenómeno ENSO en el Valle del Yaqui

Las estadísticas descriptivas de las estaciones estudiadas: Ciudad Obregón, Calle 200, CIANO, Vícam, Villa Juárez, Porfirio Díaz, Etchojoa y E4P12, se presentan en el Tabla 2. Los coeficientes de correlación entre las precipitaciones anuales de las estaciones Ciudad Obregón, Calle 200, CIANO y Etchojoa, son mayores a 0.62. Los coeficientes de correlación entre las precipitaciones anuales de Villa Juárez y Porfirio Díaz con las estaciones anteriores varía de 0.50 a 0.69 y el coeficiente de correlación entre estas últimas dos estaciones es de 0.35 lo cual muestra que estas son las estaciones que más difieren en su patrón de precipitaciones.

El análisis de las FA de las precipitaciones anuales del Valle del Yaqui indicó que estas variables no están autocorrelacionadas, por lo que se justifica, el uso de regresiones múltiples entre las precipitaciones regionales y los índices anuales I_2 sin y con desfasamientos de uno a cuatro años, los resultados no muestran una relación lineal a un α=0.05 (Tabla 3).

Los ANDEVA con la clasificación de la AMJ indican que no existen diferencias significativas entre las precipitaciones anuales de los "años normales", años de "El Niño" y años de "La Niña". Sin embargo, si en el ANDEVA se utilizan únicamente dos clases (años "normales" y de "La Niña") para los eventos fuertes dados por Wolter y Timlin (1998), se encuentra que en todas las estaciones las precipitaciones en los años de "La Niña" disminuyen, pero esta disminución es significativa (α=0.05) sólo en las estaciones Calle 200 y Etchojoa. La Tabla 4 muestra los ANDEVA paramétricos y no paramétricos (prueba de Kruskal y Wallis); obsérvese que los valores "p" son similares para los dos análisis, sin embargo, por la asimetría de las precipitaciones (Fig. 6) el valor p dado por la prueba de Kruskal-Wallis es más confiable.

Debido a que la mayoría de las precipitaciones en el Valle del Yaqui se presentan en dos estaciones, la cálida de julio a octubre durante el llamado "Monzón Mexicano" (Douglas et al., 1993), y la fría, de noviembre a mayo, las precipitaciones anuales se dividieron para su análisis en dos semestres: enero-junio y julio-diciembre. Las precipitaciones en los dos semestres disminuyen en todas las estaciones en los años fuertes de "La Niña" y, como en el caso de la precipitación anual, sólo en dos estaciones la disminución del segundo semestre es estadísticamente significativa (α=0.05). Es interesante observar que un año después que se presenta "La Niña", en todas las estaciones disminuyen las precipitaciones del primer semestre y se incrementan las precipitaciones del segundo semestre, sin embargo, estos cambios no son significativos.

La Tabla 5 muestra que en los años de "El Niño", en todas las estaciones las precipitaciones del primer semestre disminuyen, sin embargo, esta disminución no es significativa (disminución promedio de 8.68 mm en las medianas). El incremento de las precipitaciones en el segundo semestre sí fue significativo en las estaciones de la Calle 200 y Villa Juárez (incremento promedio de

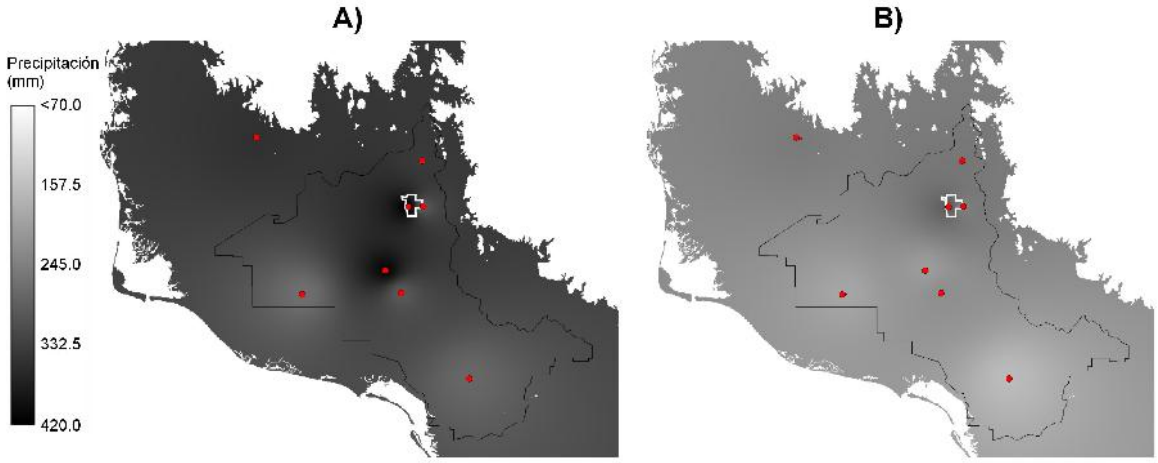


Fig. 4. Precipitaciones en el Valle del Yaqui para (A) años fuertes de "El Niño" y (B) años "Normales" (los puntos rojos representan las estaciones meteorológicas).

Tabla 4. Medianas de las precipitaciones anuales en años "Normales" y en años de "La Niña".

Estación	Precipitación (mm) Años "Normales"	Precipitación (mm) Años de "La Niña"	Valor p ANDEVA[1]	Valor p K-W[2]
Obregón	392.2	295.1	0.119	0.113
Calle 200	302.0	183.9	0.029*	0.024*
CIANO	321.7	219.2	0.094	0.092
Vicam	320.0	249.3	0.148	0.139
V. Juárez	269.9	166.5	0.097	0.050*
P. Díaz	364.2	336.3	0.780	0.817
Etchojoa	284.8	194.6	0.043*	0.025*
E4P12	234.3	212.5	0.200	0.269

[1] Valor p del análisis de varianza paramétrico (suponiendo normalidad)
[2] Valor p para el análisis de varianza no paramétrico (Prueba de Kruskall-Wallis)

108 mm en las medianas). La Fig. 4 muestra la variación espacial y la gran diferencia entre las precipitaciones en (a) años fuertes de "El Niño" y en (b) años "normales". En esta figura, elaborada con el paquete IDRISI® (Clark Labs, 2003), se utilizó una interpolación de las precipitaciones inversamente proporcional al cuadrado de las distancias entre estaciones. La Tabla 6 muestra que en un año después de un año fuerte de "El Niño", las precipitaciones del primer semestre se incrementan significativamente (incremento promedio de 50 mm en las medianas), en contraste, las precipitaciones del segundo semestre disminuyen en todas las estaciones con excepción de la estación Porfirio Díaz (disminución promedio de 72 mm en las medianas).

Relación escorrentía-fenómeno ENSO

Desde un punto de vista agrícola, las precipitaciones en el Valle del Yaqui son importantes, pero aún son más importantes las escorrentías que alimentan a las presas que irrigan el valle. En esta sección se analiza el efecto del ENSO en las escorrentías captadas en la presa "La Angostura", que es una de las tres primeras presas construidas por la Comisión Nacional de Irrigación.

Tabla 5. Medianas de las precipitaciones semestrales en años "Normales" y en años fuertes de "El Niño".

	Precipitación primer semestre (mm)			Precipitación segundo semestre (mm)		
Estación	Normales[1]	El Niño	Valor p[2]	Normales	El Niño	Valor p[2]
Obregón	26	15	0.337	291	420	0.092
Calle 200	22	19	0.547	204	407	0.009
CIANO	24	11	0.243	243	293	0.154
Vicam	21	18	0.482	251	352	0.145
V. Juárez	19	9	0.271	163	277	0.025
P. Díaz	28	20	0.682	256	340	0.633
Etchojoa	24	12	0.135	224	295	0.098
E4P12	17	10	0.460	192	266	0.145

[1]Años normales y años de "La Niña"
[2]Valor p para el análisis de varianza no paramétrico (Prueba de Kruskall-Wallis)

Tabla 6. Medianas de las precipitaciones semestrales un año después de un año fuerte de "El Niño".

	Precipitación primer semestre (mm)			Precipitación segundo semestre (mm)		
Estación	Normales[1]	El Niño	Valor p[2]	Normales	El Niño	Valor p[2]
Obregón	23	80	0.092	328	246	0.169
Calle 200	17	65	0.098	248	104	0.071
CIANO	14	62	0.040	253	210	0.517
Vicam	16	76	0.042	307	142	0.027
V. Juárez	12	60	0.028	207	75	0.028
P. Díaz	18	57	0.195	281	386	0.585
Etchojoa	21	69	0.126	228	188	0.971
E4P12	12	59	0.258	200	176	0.547

[1]Años normales y años de "La Niña"
[2]Valor p para el análisis de varianza no paramétrico (Prueba de Kruskall-Wallis)

Esta presa está construida sobre el río Bavispe que es un afluente del río Yaqui. La cuenca de drenaje de esta presa tiene una superficie de 19 292 Km2 con una escorrentía media anual de 523 $10^6 m^3$. Las escorrentías anuales que se analizan y cuyas estadísticas descriptivas se presentan al final la Tabla 2, fueron proporcionadas por el Distrito de Riego No. 41 de la Comisión Nacional del Agua y corresponden al periodo 1942-2000.

Como las autocorrelaciones de las escorrentías anuales no resultaron significativas, se utilizan modelos de regresión múltiple. Los análisis muestran una relación estadísticamente significativa entre la escorrentía y el índice I_2 desfasado un año (I_{2_1}). Al agrupar a la escorrentía anual en dos periodos: enero-junio y julio-diciembre, se encontró que únicamente la escorrentía del primer semestre está relacionada con I_2. Debido al sesgo positivo de la distribución de la escorrentía para el primer periodo, la ecuación de regresión se ajustó con los logaritmos de la escorrentía Y_L, la ecuación con el índice significativo I_{2_1} (valor p=0.015 con una R^2= 9.9 %) es $Y_L = 4.54 - 0.528\ I_{2_1}$. Esta ecuación muestra que la escorrentía en el primer periodo se incrementa un año después de que ocurre el fenómeno de "El Niño" (lo que sugiere que las precipitaciones en el área de captación de la presa se incrementan en el segundo periodo de un año fuerte de "El Niño" en forma similar a la observada en el Valle del Yaqui, Tabla 5) y disminuye un año después de que ocurre "La Niña". Por ejemplo, el pronóstico para la escorrentía de un año después de un año normal es de $\hat{Y} = e^{4.54} = 93.68\ 10^6 m^3$ (la mediana de la escorrentía del primer periodo 90.4 $10^6 m^3$ y la escorrentía media para el mismo periodo es de 201.1 $10^6 m^3$). El pronóstico de la escorrentía para un año después de que ocurre un evento fuerte

de "El Niño" como el de 1982 (I_{2_1} = -1.45) es de $\hat{Y}= e^{5.306} = 201.5\ 10^6 m^3$, con un intervalo de confianza del 95% de 17.5 a 2,325 $10^6 m^3$, este intervalo es demasiado amplio como consecuencia de que el modelo solo explica el 9.9% de la variabilidad total de la variable transformada.

Relación temperatura-fenómeno ENSO

La Fig. 5 permite observar el patrón típico de las temperaturas en el Valle del Yaqui, durante los meses de junio a septiembre son comunes temperaturas máximas mensuales mayores a 40° C y temperaturas mínimas mensuales menores a 5° C en los meses de diciembre a febrero. Observe que la variabilidad anual de las temperaturas mínimas (rango de 20° c) es mayor a la variabilidad de las temperaturas máximas (rango de 15° C).

Los índices y variables climáticas mensuales presentan autocorrelaciones significativas (la Fig. 3 muestra las autocorrelaciones del índice mensual I_2) por lo que se utilizarán modelos de regresión dinámica (RD). Siguiendo las recomendaciones de Pankratz (1991), el modelo RD se ajustó por etapas para evaluar la importancia de sus componentes. El primer modelo (de referencia o base) incluyó únicamente a la media general. El segundo modelo incluyó a variables indicadoras para los meses, para explicar el ciclo anual de las temperaturas, este modelo redujo en más del 50% la desviación estándar del primer modelo en la mayoría de las estaciones (Tabla 7). Sin embargo, como este modelo no eliminó las autocorrelaciones de los residuales, se ajustaron modelos ARIMA con variables indicadoras para los meses (en cada estación y para cada variable), estos modelos sí eliminaron las autocorrelaciones como se observa en la Tabla 7, aunque la reducción de la desviación estándar es pequeña. Con la notación usual (p,d,q)x(P,D,Q)S (Box y Jenkins 1976) los modelos seleccionados con más frecuencia son: (2,0,1)x(1,0,0)12, (1,0,1)x(1,0,0)12 y (1,0,1). Finalmente, se ajustaron las regresiones dinámicas que incluyeron a las variables indicadoras para los meses y a los índices I_2 con y sin desfasamientos de uno a 18 meses. La inclusión de los índices I_2 no redujo significativamente a las desviaciones estándar de los modelos ARIMA (las reducciones fueron menores a una centésima). Estos resultados indican que la mayor parte de la dispersión de las temperaturas es explicada por la variabilidad entre meses y que las autocorrelaciones son explicadas por los modelos ARIMA, los modelos de referencia son útiles, porque puede suceder como en este trabajo, que los modelos de regresión dinámica, con su mayor grado de complejidad, no mejoran significativamente el ajuste de modelos mas simples al evaluarlos por medio de la desviación estándar residual de la variable climática de respuesta. Estos resultados indican que no existe relación entre las temperaturas mensuales y el índice que caracteriza al ENSO, únicamente en dos estaciones: Vicam y Obregón, resultaron significativas las relaciones con el índice I_{2_12}, esporádicamente resultaron significativos otros índice desfasados como el I_{2_2} e I_{2_4}.

Aunque el efecto ENSO en las temperaturas mensuales no fue perceptible, puede suceder que el efecto se manifieste en periodos de tiempo mayores. Por esta razón, se efectuó un análisis de correlaciones entre los índices ENSO y los promedios anuales de las temperaturas mínimas (máximas) mensuales, los promedios de las temperaturas mínimas de enero a abril (que es la época fría en el Valle del Yaqui), los promedios de las temperaturas máximas de junio a septiembre (que es la época calurosa en el Valle del Yaqui). En cinco estaciones (que no incluyen Obregón, Porfirio Díaz y E4P12) se encontraron correlaciones significativas entre los promedios de las temperaturas mínimas anuales y del periodo enero-abril y el índice multivariado I_m sin y con desfasamiento de un año (las máximas correlaciones ocurrieron con el índice I_m). Se calcularon los coeficientes de correlación no paramétricos ρ de Spearman y el coeficiente τ de Kendall para tener un valor conservativo de la significancia de la relación (con la correlación de Pearson, que supone normalidad, las significancias fueron mayores). Las definiciones y propiedades de estos coeficientes se pueden consultar en Conover (1999). Posteriormente, con fines de predicción, se ajustaron regresiones múltiples entre los promedios de las temperaturas mínimas descritas como variables dependientes y con los índices I_m sin y con desfasamiento de un año como variables independientes. En la Tabla 8 se observa que en

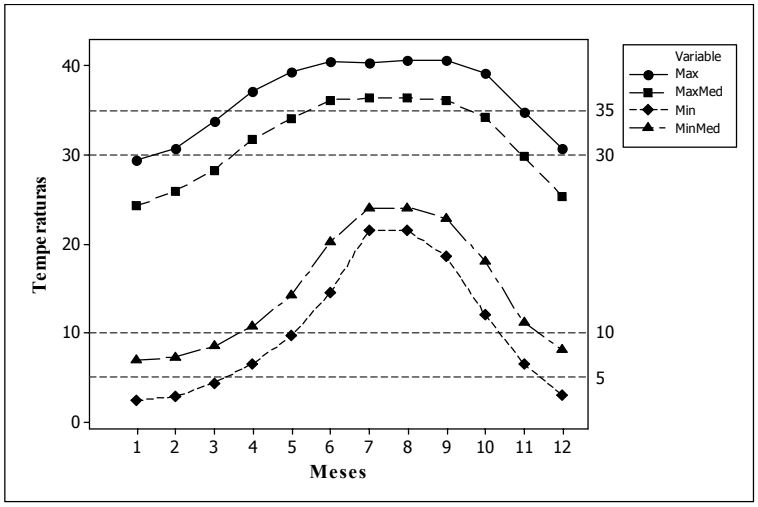


Fig. 5. Temperaturas máximas y mínimas de la estación Etchojoa (Max: Promedio de las temperaturas máximas absolutas mensuales; Maxmed: Promedio de las temperaturas máximas promedio mensuales; Min: Promedio de las temperaturas mínimas absolutas mensuales; Minmed: Promedio de las temperaturas mínimas promedio mensuales).

Tabla 7. Desviaciones estándar de los modelos para analizar la dependencia de la temperatura mensual con el índice I_2. (Mx: Temperatura máxima mensual, Mm: Temperatura promedio máxima mensual, Mn: Temperatura mínima mensual, Nm: Temperatura promedio mínima mensual).

Estación	Etchojoa				CIANO			
Modelo/Temperatura	Mx	Mm	Mn	Nm	Mx	Mm	Mn	Nm
Media[1]	4.81	4.97	7.42	6.82	4.70	4.84	7.23	8.15
Un factor[2]	2.42	2.23	2.71	1.99	1.72	1.41	1.82	5.22
ARIMA y un factor[3]	2.05[A]	1.62[A]	2.22[B]	1.35[A]	1.63[C]	1.29[C]	1.73[C]	5.14[C]
Estación	Obregón				Vicam			
Media	4.84	5.10	6.34	6.16	4.32	5.05	7.56	7.41
Un factor	1.93	1.59	1.85	1.49	2.06	1.93	2.18	1.70
ARIMA y un factor	1.72[D]	1.40[C]	1.78[C]	1.38[C]	1.97[D]	1.86[D]	2.05[C]	1.48[E]

[1]Modelo solo con la media general, [2]Modelo con los meses como factor de clasificación
[3]Modelo ARIMA con variables indicadoras para los meses.
[A]ARIMA $(2,0,1)x(1,0,0)_{12}$, [B]ARIMA$(1,0,1)x(1,0,1)_{12}$, [C]ARIMA(1,0,1).
[D]ARIMA$(1,0,1)x(1,0,0)_{12}$, [E]ARIMA(2,0,1).

cinco estaciones las regresiones múltiples resultaron significativas (en cuatro de ellas altamente significativas, con valores $p \leq 0.01$), sin embargo, los coeficientes de determinación R^2 no son suficientemente grandes como para proporcionar pronósticos confiables.

Los signos de los índices indican que en años de "El Niño" las temperaturas mínimas se incrementan y que disminuyen en años de "La Niña". Para ilustrar este incremento, supongamos que el año anterior fue un año de "El Niño" con $I_m = 1.2$ y que el presente año es un año fuerte de "El Niño"

Tabla 8. Regresiones múltiples del promedio anual de las temperaturas mínimas mensuales con el índice multivariado I_m.

Estación	R^2	Valor P	Coeficientes		
			Ordenada	I_m	$I_{m\ 1}$
Obregón	0.6	0.916	12.8	0.030	-0.086
Calle 200	21.9	0.025	10.9	0.573	0.251
CIANO	35.6	0.002	10.7	0.488	0.221
Vicam	31.3	0.004	9.2	0.530	0.266
V. Juárez	35.7	0.001	10.5	0.579	0.384
P. Díaz	10.7	0.244	12.6	0.461	-0.779
Etchojoa	19.0	0.007	10.7	0.420	0.448
E4P12	3.0	0.631	10.6	0.201	-0.076

Tabla 9. Percentiles para los modelos de predicción de anual de lluvia en Vícam.

Modelo/Percentil	0.10	0.25	0.50	0.75	0.90
General[1]	189.5	236.9	298.5	369.8	443.0
Después de "año normal" [2]	212.7	257.8	315.2	380.4	446.2
Después de "El Niño" [3]	125.1	164.2	216.5	279.0	344.5

[1] Distribuciones Gamma con β= 32.637 y δ=9.477
[2] Distribuciones Gamma con β= 26.245 y δ=12.341
[3] Distribución lognormal con β= 5.352 y δ=0.383

con un I_m =1.5. Con esta información y la de la Tabla 8, en el CIANO se puede esperar un incremento de un grado Celsius (0.49x1.5 + 0.22x1.2 = 0.999) en el promedio de las temperaturas mínimas mensuales.

b) Uso potencial de la relación ENSO-variables climáticas regionales

Si la relación ENSO-precipitación es significativa, es posible incrementar el ajuste en la modelación de las precipitaciones y, por consiguiente, el incremento de la precisión en los pronósticos de lluvia. El mejoramiento del ajuste se logra al identificar que el modelo adecuado, cuando se ha determinado la influencia del ENSO en la precipitación, es una mezcla de funciones de probabilidad. Una mezcla de modelos, (Titterington, 1985), *G(x)* tiene la forma:

$$G(x)=\Sigma_{j=1}^{k}\pi_j F(x,\theta_j),\pi_j>0,\ \Sigma_{j=1}^{k}\pi_j=1 \qquad (3)$$

donde, *F(x, θj)* es la distribución de probabilidad elegida (gamma, lognormal, etc.), el subíndice j del parámetro, indica que el modelo puede ser diferente para los años "normales", años de "El Niño" o años después de "El Niño" etc. Si la precipitación está relacionada con los índices del año anterior la construcción de modelos es sencilla, por ejemplo, en las estaciones Villa Juárez y Vícam se tendrán dos componentes diferentes: un componente cuando el año anterior haya sido un año fuerte de "El Niño" y otro componente cuando el año anterior haya sido un "año normal" (ver Tabla 6). La utilización de la información que proporcionan las Tablas 4 y 5 requiere del conocimiento de los índices del año en curso y aunque Cane y Zebiak (1985), y Barnett et al (1993) mencionan que la predicción del fenómeno ENSO puede efectuarse hasta con 18 meses de anticipación, aún no es posible un pronóstico de la intensidad del fenómeno que permita la aplicación de una mezcla de modelos.

Si la relación ENSO-precipitación y las autocorrelaciones no son significativas, se justifica el cálculo de una distribución de probabilidad

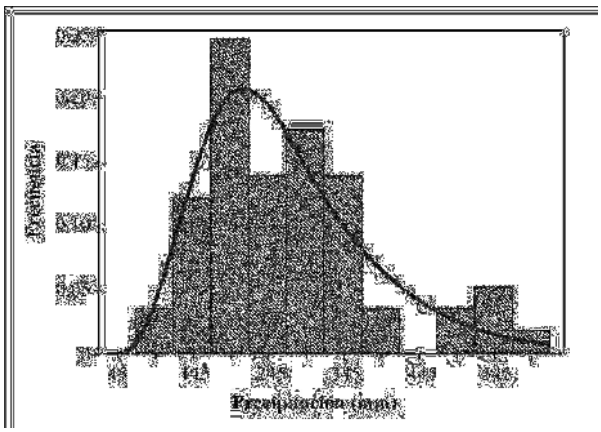


Fig. 6. Histograma y distribución lognormal (β=5.518 y δ=0.422) ajustada por máxima verosimilitud a las precipitaciones de Etchojoa.

anual. Las distribuciones de la precipitación anual en estas estaciones, como es común en las regiones desérticas, tiene asimetría positiva como lo muestra la Fig. 6 con el histograma de las precipitaciones en Etchojoa y la distribución lognormal (con función de densidad $f_1(x)$) con parámetros de escala β= 5.518 y de forma δ=0.422. Esta distribución, ajustada por máxima verosimilitud, proporciona una media de 272.36 mm y una mediana de 249.51 (observe la cercanía de estos valores a los valores muestrales de la Tabla 2):

$$f_1(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\delta^2}} Exp\left\{\frac{-[\ln x - \beta]^2}{2\delta^2}\right\} \quad ,0 < x \qquad (4)$$

$f_1(x)$= 0, de otro modo

La Tabla 9, muestra la gran diferencia que se puede obtener en los pronósticos de lluvia para Vícam al utilizar la información del año anterior (si fue año "normal" o año fuerte de "El Niño") cuando la precipitación está relacionada significativamente con el ENSO. Si no se toma en consideración el año anterior la distribución de mejor ajuste (con el criterio de la χ^2) es una Gamma $f_2(x)$ con parámetros de escala β= 32.637 y de forma δ= 9.477. Considerando el año anterior, si es año "normal" se ajusta una Gamma con parámetros de escala β= 26.245 y de forma δ = 12.341 y, si el año anterior fue un año fuerte de "El Niño" se ajusta una distribución lognormal con parámetros de escala β = 5.352 y de forma δ= 0.383:

$$f_2(x) = \frac{x^{\delta-1}}{\beta^{\delta}\,\Gamma(\delta)} Exp\left\{-x/\beta\right\} \ , \ 0 < x \qquad (5)$$

$f_2(x)$= 0 de otro modo

Es necesario, sin embargo, tomar con precaución las estimaciones con el modelo ajustado para un año después de "El Niño" (Tabla 9), ya que según Wolter y Timlin (1998), solo han ocurrido siete eventos fuertes de "El Niño" después de 1950 y el modelo mencionado se ajustó con solo 6 observaciones. Este problema puede ser común al aplicar la metodología descrita, ya que en la

mayoría de las estaciones climatológicas de la República Mexicana la información disponible de precipitación no supera los cincuenta años de registros (IMTA, 2000).

Conclusiones

Al analizar los índices más comunes para caracterizar al ENSO, se concluye que debido a que las correlaciones de los diferentes índices analizados son cercanas a uno, cualquiera de ellos se puede utilizar para analizar la relación del ENSO con las variables climáticas regionales.

La precipitación promedio anual de la República Mexicana está relacionada significativamente con el índice ENSO I_2 con desfase de un año. El modelo de regresión ajustado indica que la precipitación promedio anual se incrementa en 43 mm., después de que ocurre un año fuerte de "El Niño". Debido a la gran diferencia en altitudes y latitudes de la República Mexicana, es posible que el efecto del ENSO sea diferente en diferentes regiones de México y que estas diferencias se contrarresten en un análisis global. Por esta razón se recomienda un análisis regional del efecto de este fenómeno. En particular, en el Valle del Yaqui, Son., las precipitaciones anuales se incrementan cuando se presenta un año fuerte de "El Niño" y disminuyen al año siguiente de que ocurre este fenómeno (aunque en el primer semestre hay un incremento que es confirmado por el análisis de las escorrentías de la presa de "La Angostura"). Las regresiones dinámicas, utilizadas en el análisis de las temperaturas mensuales del Valle del Yaqui que presentan autocorrelaciones significativas, indican que no existe relación entre las temperaturas y los índices SOI mensuales, sin embargo, sí existe relación significativa entre el promedio anual de las temperaturas mínimas mensuales y los promedios de las medias mensuales de los mínimos diarios de enero a abril y el índice multivariado I_m. Las regresiones múltiples con este índice permiten estimar que en un año fuerte de "El Niño", el promedio de las temperaturas mínimas mensuales se incrementa un grado Celsius, sin embargo, la precisión de estos pronósticos es baja debido a que los modelos explican menos del 40% de la varianza de estas temperaturas.

Cuando la precipitación está relacionada con los índices ENSO con o sin desfase, como sucedió en algunas estaciones, se puede incrementar la precisión en los pronósticos de las precipitaciones mediante una mezcla de dos modelos. Utilizando un componente (función de probabilidad) cuando en el año anterior se presenta un año fuerte de "El Niño" y otro componente cuando el año anterior es un "año normal". Los modelos ajustados indican que las precipitaciones esperadas después de un año fuerte son menores a las esperadas después de un año "normal", sin embargo, debido a que las series de datos disponibles en general son cortas, es conveniente tomar con precaución estos pronósticos.

Bibliografía

Barnett, T.P., 1995. Monte Carlo climate forecasting. Journal of Climate, 8: 1005–1022.

Box, G.E.P. y Jenkins, G.M..1976. Time series analysis forecasting and control. Holden-Day. Oakland California. 575 pp.

Box, G.E.P. y Watson, G.S., 1962. Robustness to non-normality of regression tests. Biometrika, 49: 93-106.

Bureau of Meteorology, 2004. SOI Archives 1876 to present. Commonwealth of Australia. (http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml).

Cane, M.A. y Zebiak, S.E., 1985. A theory for El Niño and the Southern Oscillation. Science, 228: 1085–1087.

Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies, 2004. ENSO Index According to JMA SSTA (1868-present). Florida State University, Estados Unidos. (http://www.coaps.fsu.edu/ ~legler/jma_index1.shtml)

Climate Research Unit. 2004. Index of ftp Data. University of East Anglia. Norwich U. K. http://www.cru.uea.ac.uk/ftpdata/soi.dat.

NOAA, 2004a. Multivariate ENSO Index. CLIMATIC DIAGNOSTICS CENTER. National Oceanic and Atmospheric Administration. Boulder Colorado. Estados Unidos. (http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/)

NOAA, 2004b. Bivariate ENSO Time Series. CLIMAT DIAGNOSTICS CENTER. National Oceanic and Atmospheric Administration. Boulder Colorado. Estados Unidos.(http://www.cdc.noaa.gov/people/cathy. smith/best/)

Conover, W.J., 1999. Practical nonparametric statistics. John Wiley & Sons. 3rd. 584 pp.

de la Peña, I., 1997. Disponibilidad hidráulica superficial y subterránea de la cuenca hidrológica del Río Yaqui, Sonora, en el marco de una explotación agrícola. Comisión Nacional del Agua, México.

Douglas, W.M., Maddox, R.A. y Howard, K., 1993. The Mexican monsoon. American Meteorological Society, 6: 1665-1677.

EXPERTFIT, 2002. User's Guide. Averill M. Law & Associates. Tucson AZ. 142 pp.

Gershunov, A. y Barnett, T.P., 1998. ENSO influence on intraseasonal extreme rainfall and temperature frequencies in the contiguous United States: observations and model results. Journal of Climate,11: 1575-1586.

Glantz, M.K., 1996. Currents of change: El Niño's impact on climate and society. Cambridge University Press. 194 pp.

Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press. 483 pp.

Hollander, M. y Wolfe, A.W., 1999. Nonparametric statistical methods. John Wiley & Sons 2nd Edition. 787 pp.

Clark Labs, 2004. IDRISI KILIMANJARO Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs, Clark University, Worcester MA. Estados Unidos. 320 pp.

IMTA, 2000. Extractor rápido de información climatológica ERIC-II. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México DF.

INIFAP, 2001. Guía técnica para los cultivos del área de influencia del campo experimental del Valle del Yaqui. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. SAGARPA. 282 pp.

Khuri, A.I. y Good, I.J., 1977. The distribution of quadratic forms in non-normal variables and an application to the variance ratio. Journal of the Royal Statistical Society B, 39: 217-221.

Labadie, J.W., 2004. Optimal operation of multireservoir systems: State of the art review. Journal of Water Resources Planning and Management, 130: 93-111.

Lavín, M.F., Palacios, E. y Cabrera, C., 2003. Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. Geofísica Internacional, 42: 363-375.

Ljung, G.M. y Box, G.E.P., 1978. On a measure of lack of fit in time series models. Biometrika, 65: 297-303.

Magaña, V.O., Vázquez, J.L., Pérez, J.L. y Pérez, J.B., 2003. Impact of El Niño on precipitation in México. Geofísica Internacional, 42: 313-330.

MINITAB Inc., 2003. Meet MINITABAS/STAT Release 14, State College, PA. Minitab Inc. 106 pp.

Muhlia-Melo, A., Klimley, P., González-Armas, R., Jorgensen, S., Trasviñacastro, A., Rodríguez-Romero J. y Amador Buenrostro, A. 2003. Pelagic fish assemblages at the Espíritu Santo seamount in the Gulf of California during El Niño 1997-1998 and non-El Niño conditions. Geofísica Internacional, 42: 473-481.

Palacios, T.G.F., 1999. Análisis del funcionamiento del sistema de presas del Río Yaqui Sonora, mediante un modelo de simulación con movimiento de embalse. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Sonora, México. 121 pp.

Palomares-García, R., Martínez-López, A., De Silva-Dávila, R., Funesrodríguez, R., Carballido-Carranza, M.A., Avendaño-Ibarra, R., Hinojosamedina, A. y López-Ibarra, G. A. 2003. Biological effects of El Niño 1997-98 on a shallow subtropical ecosystem: Bahía Magdalena, México. Geofísica Internacional, 42: 447-453.

Pankratz, A. 1991. Forecasting with dynamic regression models. John Wiley & Sons. 386 pp.

Rasmusson, E.M. y Carpenter, T. H., 1983. The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over India and Sri Lanka. Monthly Weather Review, 111: 517-528.

Ropelewski, C.F. y Jones, P.D., 1987. An extension of the Tahiti-Darwin southern oscillation index. Monthly Weather Review, 115: 2161-2165.

Salinas, Z.C.A. y Lluch, D.B., 2003. Relationship between ENSO and winter-wheat yields in Sonora, México. Geofísica Internacional, 42: 341-350.

SAS Institute Inc., 1999. SAS/STAT User's Guide, Version 8, Cary, NC: SAS Institute Inc. 652 pp.

Smith, C.A. y Sardeshmukh, P., 2000. The effect of ENSO on the intraseasonal variance of surface temperature in winter. International Journal of Climatology, 20: 1543-1557.

Titterington, D.M., Smith, A.F.M. y Makov, U.E., 1985. Statistical Analysis of Finite Mixture Distributions. John Wiley. 243 pp.

Urbán, J.R., Gómez, A. y Ludwing, S., 2003. Abundance and mortality of gray whales at Laguna San Ignacio, México, during the 1997-1998 El Niño and the 1998 La Niña. Geofísica Internacional, 42: 439-446.

Wolter, K. y Timlin, M.S., 1993. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. Proceedings of the 17th Climate Diagnostics Workshop (1993). NOAA/N MC/CAC, NSSL, Oklahoma Climatology Survey, CIMMS, School of Meteorology (University of Oklahoma), Norman, Estados Unidos. pp 52-57.

Wolter, K. y Timlin, M.S., 1998. Measuring the strength of ENSO - How Does 1997/98 Rank?. Weather, 53: 315-324.