

Modulación multidecenal de la lluvia invernal en el noroeste de Baja California

Multidecadal variation of winter rainfall in northwestern Baja California

Sergio Reyes-Coca^{1*}
Ricardo Troncoso-Gaytán²

¹ CICESE
Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada, C.P. 22860, Baja California, México
*E-mail: sreyes@cicese.mx

² Centro Regional de Investigación Pesquera
Km 95.7 Carretera Tijuana-Ensenada
El Sauzal de Rodríguez, C.P. 22760,
Baja California, México

Recibido en septiembre de 2002; aceptado en marzo de 2003

Resumen

Se examinaron algunas características climáticas relativas a la precipitación sobre el noroeste de Baja California (México) en relación con la variabilidad interanual, decenal y multidecenal de algunos índices del Océano Pacífico. El análisis se basa en valores anuales de 1900 a 2001 de datos de precipitación invernal (de noviembre a abril) en Ensenada, Baja California, región climatológicamente representativa del noroeste de Baja California. También se examinan el Índice de la Oscilación del Sur (IOS) y la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP). Los resultados se obtuvieron de análisis estadísticos y ondulares de los datos de precipitación invernal. La evolución tiempo-frecuencia de los datos muestra una asociación cercana con las señales interanual (2–7 años), decenal (10–20 años) y multianual (20–70 años) presentes en el IOS y la ODP. Es interesante notar que el periodo multidecenal de sequías en el noroeste de Baja California (1941/1942 a 1976/77) coincide con valores negativos de la ODP (caracterizada por aguas marinas superficiales frías frente a Norteamérica) y frecuentes eventos de La Niña, mientras que condiciones lluviosas (1977/1978 a 1998/1999) coinciden con valores positivos de la ODP (caracterizada por aguas marinas superficiales cálidas frente a Norteamérica) y frecuentes e intensos eventos El Niño. Finalmente, un escenario futuro, derivado del análisis ondicular, muestra la posibilidad de un periodo decenal seco para el noroeste de Baja California de 1999 a 2015, aproximadamente.

Palabras clave: lluvia invernal, Índice de Oscilación del Sur, Oscilación Decenal del Pacífico, sequía, análisis ondicular.

Abstract

Some climatic features regarding the precipitation over northwestern Baja California (Mexico) were examined relative to the interannual, decadal and multidecadal variability of some Pacific indexes. The analysis is based on annual values from 1900 to 2001 of the winter (November through April) rainfall data for Ensenada, Baja California, which is climatologically representative of northwestern Baja California. The Southern Oscillation Index (SOI) and Pacific Decadal Oscillation (PDO) were also examined. The results are derived from statistical and wavelet analysis of the rainfall data. The time-frequency evolution of the data shows close association with the interannual (2–7 years), decadal (10–20 years) and multidecadal (20–70 years) signals of the SOI and PDO. It is interesting to note that the multidecadal period of drought in northwestern Baja California (1941/1942 to 1976/1977) coincides with negative PDO values (characterized by cold sea surface waters off North America) and frequent La Niña events, whereas decadal rainy conditions (1977/1978 to 1998/1999) coincide with positive PDO values (characterized by warm sea surface waters off North America) and frequent and intense El Niño events. Finally, a future scenario, derived from the wavelet analysis, shows the possibility of a dry decadal period for northwestern Baja California from 1999 to 2015, approximately.

Key words: winter rainfall, Southern Oscillation Index, Pacific Decadal Oscillation, drought, wavelet analysis.

Introducción

Muchos de los fenómenos meteorológicos y climáticos que se observan en Baja California, tales como lluvias, sequías, ondas de calor, Santanas, etc., están altamente influenciados y controlados, pero no necesariamente producidos, por el irregular fenómeno tropical de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). Cuando ocurre un evento cálido del ENOS (conocido como El Niño), se tiene una mayor probabilidad de lluvias e incluso de inundaciones en Baja California durante el invierno (Reyes y Rojo, 1985; Minnich *et al.*, 2000) y aumenta la probabilidad de un número mayor que el normal de huracanes frente al suroeste de México durante el verano (Reyes y Mejía-Trejo, 1991). Por el contrario, cuando se genera un evento frío del ENOS (conocido como La Niña, el otro extremo del ciclo) se tienen grandes posibilidades de un incremento en el número de huracanes en el Atlántico (Goldenberg *et al.*, 2001; Reyes y Troncoso, 1999), así como de sequías y pocas lluvias en la región occidental de Norteamérica (Kiladis y Diaz, 1989; McCabe y Dettinger, 1999).

Las escalas de tiempo del fenómeno ENOS son del orden de 2 a 7 años, siendo ésta la señal natural de mayor importancia que regula las condiciones climáticas en gran parte del mundo (Meyers *et al.*, 1999, y las citas ahí presentadas). Sin embargo, cuando el ciclo ENOS es neutro, como ha sido el caso durante los últimos años (1999–2001), otros fenómenos, principalmente oceánicos con escalas de tiempo mayores por ejemplo de varias décadas, son los que pueden ejercer control sobre las condiciones del clima. Este es el caso de la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP), que probablemente es el segundo mecanismo en importancia que regula el clima en la región del Pacífico Norte. Ambos fenómenos, ENOS y ODP, parecen ser los principales moduladores del clima en la región de Norteamérica (Mantua *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997). La ODP se caracteriza por una alternancia del signo en el campo de anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM), entre el Pacífico Norte occidental y oriental (Minobe, 1997, 1999). Los resultados aquí mostrados y los estudios de otros investigadores (McFarlane *et al.*, 2000, y otros presentados en la red mundial) sugieren que la ODP ha llegado al fin de un ciclo positivo (tal vez en 1999), iniciando un nuevo ciclo negativo en el que se podrían observar, durante los siguientes 15 a 20 años, condiciones predominantemente frías sobre el Pacífico nororiental (americano) y cálidas sobre el Pacífico noroccidental (asiático). Se han identificado otros momentos de transición para la ODP durante el siglo pasado, a mediados de los años veinte, principios de los cuarenta y mediados de los setenta (Chao *et al.*, 2000; Gedalof y Smith, 2001). Asimismo, se ha observado que los cambios en la presión atmosférica superficial corresponden a cambios en la temperatura superficial del mar, de tal manera que una fase positiva de la ODP coincide con aguas cálidas en el Pacífico americano y condiciones de presión atmosférica baja, y viceversa, una fase negativa de la ODP coincide con aguas frías en el Pacífico americano y condiciones de presión atmosférica alta (Gershunov y Barnett, 1998).

Introduction

Many of the meteorological and climatic phenomena observed in Baja California (Mexico), such as rainfall, drought, heat waves, Santa Ana winds, etc., are highly influenced and controlled, though not necessarily produced, by the irregular tropical phenomenon of El Niño/Southern Oscillation (ENSO). When a warm ENSO event occurs (known as El Niño), the probability of rainfall and even flooding in Baja California increases during winter (Reyes and Rojo, 1985; Minnich *et al.*, 2000), and the possibility of more than the normal number of hurricanes off southwestern Mexico increases during summer (Reyes and Mejía-Trejo, 1991). On the other hand, when a cold ENSO event occurs (known as La Niña, the other extreme of the cycle), there is a greater probability of an increased number of hurricanes in the Atlantic (Goldenberg *et al.*, 2001; Reyes and Troncoso, 1999), as well as of drought and scant rainfall in the western region of North America (Kiladis and Diaz, 1989; McCabe and Dettinger, 1999).

The time scales for the ENSO phenomenon are between 2 and 7 years. It is the most important natural event that regulates the climate in a large part of the world (Meyers *et al.*, 1999, and references therein); however, when the ENSO event is neutral, as has been the case in the past few years (1999–2001), other longer time scale oceanic phenomena (e.g., several decades) can control the climatic conditions. This is the case of the Pacific Decadal Oscillation (PDO), which is probably the second most important mechanism regulating the climate in the North Pacific region. Both phenomena (ENSO and PDO) seem to be the main regulators of the climate in North America (Mantua *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997). The PDO alternates the signal of the sea surface temperature (SST) anomaly field between the western and eastern North Pacific (Minobe, 1997, 1999). The results presented herein and those reported by other authors (McFarlane *et al.*, 2000, and others worldwide) suggest that PDO has reached the end of a positive cycle (maybe in 1999) and has initiated a new negative cycle, which in the next 15 to 20 years could lead to predominantly cold conditions over the northeastern Pacific (American) and warm conditions over the northwestern Pacific (Asian). Other regime shifts have been recorded for PDO in the mid-1920s, early 1940s and mid-1970s (Chao *et al.*, 2000; Gedalof and Smith, 2001). Likewise, changes in surface atmospheric pressure have been related to changes in SST; hence, a positive phase of PDO coincides with warm waters of the American Pacific and low atmospheric pressure conditions, whereas a negative phase coincides with cold waters of the American Pacific and high atmospheric pressure conditions (Gershunov and Barnett, 1998).

Global temperature has increased approximately 0.5°C during the past 50 years (Angell, 1999). This increase has been mainly associated with two causes: a change in climate apparently due to environmental pollution (anthropogenic effect), and an oscillation of the Earth's climatic system (natural effect) (Folland *et al.*, 1998). Considering only the anthropogenic hypothesis, then a continued increase in global temperature is

Además, se sabe que la temperatura global se ha incrementado aproximadamente 0.5°C durante los últimos 50 años (Angell, 1999). Este aumento se ha asociado principalmente a dos causas, por un lado, a un cambio climático aparentemente inducido por la contaminación ambiental humana (efecto antropogénico) y por el otro, a una oscilación propia del sistema climático terrestre (efecto natural) (Folland *et al.*, 1998). Si sólo se considera la hipótesis antropogénica, entonces se podría esperar un continuado incremento en la temperatura global. Sin embargo, también se deben considerar las variaciones climáticas naturales, particularmente las observadas en los océanos, de tal manera que la tendencia positiva al incremento de la temperatura global se puede atenuar o incluso revertir si los procesos naturales así lo favorecen.

En este trabajo se presenta un análisis de la variación multidecenal de la lluvia en Ensenada, Baja California. En la siguiente sección se presentan los datos utilizados y se describe brevemente el método del análisis ondicular y la forma en que se reconstruyen las señales decenales y multidecenales de la lluvia. En la tercera sección se presentan los principales resultados, haciendo énfasis en las oscilaciones decenales, multidecenales e interanuales que existen en la lluvia en la región noroeste de Baja California y su asociación con las señales del Índice de la Oscilación del Sur (IOS) y de la ODP. Finalmente, en la última sección se discuten los resultados, comparándolos con resultados similares y haciendo énfasis en los escenarios futuros que se podrían observar para las lluvias en la región noroeste de Baja California.

Materiales y métodos

Datos

La información usada en este estudio se basa en los datos mensuales de precipitación en las ciudades de Ensenada, Baja California (México), y San Diego, California (EUA), el IOS y la ODP. Los datos de San Diego se obtuvieron del National Weather Service de San Diego, a través de su página electrónica (<http://nimbo.wrh.noaa.gov/Sandiego/archivesan.html>) y comprenden el periodo de 1900 a 2001 de forma continua. Los datos del IOS fueron obtenidos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), en Colorado, via internet, gracias al apoyo del Dr. Henry Díaz, y comprenden el periodo de 1900 a 1952; los datos posteriores también fueron obtenidos de la página electrónica de la NOAA (<http://www.cdc.noaa.gov/%7Ekew/MEI/#outlook>). Los datos de la ODP provienen de la Universidad de Washington, a través de su página electrónica (ftp://ftp.atmos.washington.edu/mantua/pnw_impacts/INDICES/PDO.latest). Finalmente, los datos de precipitación en Ensenada fueron proporcionados por la Gerencia Estatal de Mexicali de la Comisión Nacional del Agua; éstos corresponden al periodo de 1894 a 2001, pero presentan algunos vacíos, principalmente durante el periodo de 1911 a 1947, durante y después de la Revolución Mexicana. De la serie original, se tienen dos intervalos (1911–20 y 1945–

to be expected; however, other natural climatic variations need to be considered, especially those observed over the oceans, so that the increasing trend in global temperature can abate or revert in response to natural processes.

An analysis of the multidecadal rainfall variation in Ensenada, Baja California, is presented in this study. The data used are given in the following section, together with a brief description of the wavelet analysis method and the way the decadal and multidecadal rainfall signals are reconstructed. The main results are presented in the third section, with emphasis on the decadal, multidecadal and interannual oscillations of the precipitation in northwestern Baja California, which are associated with signals from the Southern Oscillation Index (SOI) and PDO. In the last section, the results are discussed and compared with similar results, and future scenarios are proposed for the rainfall in northwestern Baja California.

Material and methods

Data

The information used herein is based on monthly rainfall data for the cities of Ensenada, in Baja California (Mexico), and San Diego, in California (USA), and on SOI and PDO. The California data were obtained from the website of the San Diego National Weather Service (<http://nimbo.wrh.noaa.gov/Sandiego/archivesan.html>) and cover a continuous period from 1900 to 2001. The SOI data were obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in Colorado, via internet, thanks to the help of Dr. Henry Díaz, and cover the period from 1900 to 1952; subsequent data were also obtained from NOAA's website (<http://www.cdc.noaa.gov/%7Ekew/MEI/#outlook>). The PDO data were obtained from the University of Washington's website (ftp://ftp.atmos.washington.edu/mantua/pnw_impacts/INDICES/PDO.latest).

The Ensenada rainfall data were provided by the Gerencia Estatal de Mexicali of the Comisión Nacional del Agua. They correspond to the period from 1894 to 2001, but there are many gaps in the data, mainly for the period from 1911 to 1947, during and after the Mexican Revolution. There are no data for the periods from 1911 to 1920 and from 1945 to 1947, and gaps for several months between 1921 and 1945 (Reyes *et al.*, 1990). In order to have a complete and reliable 100-year data set, Ensenada's rainfall had to be partially reconstructed, using for this the San Diego information, as there are many similarities between both climates. Statistical and spectral comparisons were made between the data for the 1948–2001 period. The main statistics are given in table 1, and the Fourier spectra and coherence of the Ensenada and San Diego rainfall for that period are presented in figure 1.

These results indicate that the Ensenada and San Diego data were homogeneous (i.e., their statistical moments are similar and there is a difference of less than 10% in their annual means). Following usual climatological and

47) sin datos y varios vacíos mensuales intercalados en el intervalo de 1921 a 1945 (Reyes *et al.*, 1990). Con el fin de tener una serie completa y confiable de 100 años, se tuvo que reconstruir parcialmente la lluvia en Ensenada. Para esto, se utilizó la información de San Diego, que tiene muchas similitudes con el clima de Ensenada. Lo primero fue hacer comparaciones estadísticas y espectrales entre ambos conjuntos de datos para el periodo coincidente, de 1948 a 2001. En la tabla 1 se presentan las estadísticas principales, y en la figura 1 los espectros de Fourier y la coherencia de la precipitación en Ensenada y San Diego, para dicho periodo.

De estos resultados se tiene que los datos de Ensenada y San Diego son homogéneos (es decir, sus momentos estadísticos son similares y tienen una diferencia menor al 10% en sus medias anuales), por lo que siguiendo procedimientos usuales en climatología e hidrología (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1982) se procedió a dividir los valores de la lluvia de San Diego por el factor de 0.95 (correlación lineal entre ambas series) para reconstruir los datos faltantes de Ensenada. Una vez formada la serie completa de datos mensuales de precipitación de 1900 a 2001, se calcularon los valores anuales de lluvia acumulada durante cada invierno (fig. 2).

Análisis ondicular

El análisis ondicular se ha vuelto muy popular para la extracción de información de series de tiempo. En nuestro caso utilizamos la ondícula de Morlet, que es una onda plana modulada con una Gaussiana (Lau y Weng, 1995) y tiene una representación satisfactoria en el dominio de Fourier, de acuerdo con la frecuencia de la ondícula (figura 4 de Kumar y Foufoula-Georgiou, 1997). La ondícula es expandida desde una escala mínima equivalente a la frecuencia de Nyquist (frecuencia máxima) hasta la escala máxima permitida por la

Tabla 1. Estadísticas comparativas entre los datos mensuales de precipitación de Ensenada y San Diego, para el periodo de 1948–2001. Se calcularon las estadísticas de invierno por ser ésta la estación más lluviosa de ambos sitios.

Table 1. Comparative statistics between the monthly San Diego and Ensenada rainfall data, for the 1948–2001 period. The winter statistics were calculated because this is the most rainy season in both locations.

Estación	San Diego	Ensenada
Media de invierno	240 mm	260 mm
Media anual	273 mm	285 mm
Desviación estándar de invierno	104 mm	128 mm
Desviación estándar anual	113 mm	127 mm

hydrological procedures (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1982), the San Diego rainfall values were divided by 0.95 (linear correlation between both series) to reconstruct the missing Ensenada data. With the complete set of monthly rainfall data for 1900 to 2001, the annual rainfall values were then calculated for each winter (fig. 2).

Wavelet analysis

Wavelet analysis has become a popular tool to obtain time-series information. In this study, the Morlet wavelet was used, which is a Gaussian-modulated flat wave (Lau and Weng, 1995) and has a satisfactory representation in the Fourier domain, according to the wavelet frequency (figure 4 in Kumar and Foufoula-Georgiou, 1997). The wavelet is expanded from a minimum scale equivalent to the Nyquist frequency (maximum frequency) to the maximum scale allowed by the length of the time series (minimum frequency). Each wavelet expansion, with the associated frequency change, is convoluted with

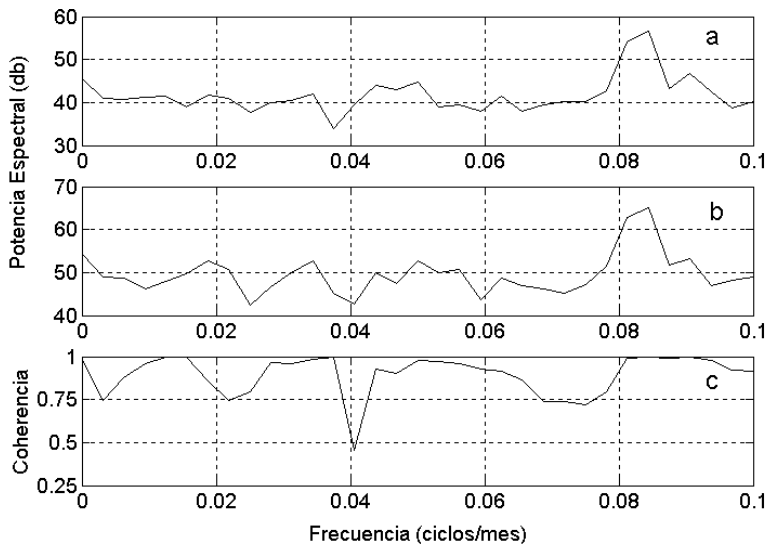


Figura 1. Espectros de Fourier de las series de datos de precipitación mensual de 1948 a 2001 en San Diego (a) y Ensenada (b), y coherencia entre ambos espectros (c).

Figure 1. Fourier spectra of the monthly rainfall data series from 1948 to 2001 for San Diego (a) and Ensenada (b), and coherence between both spectra (c).

longitud de la serie de tiempo (frecuencia mínima). Cada dilatación de la ondícula, con el cambio de frecuencia asociado, es convolucionada con la serie de tiempo. De tal manera que, si hacemos M dilataciones de la ondícula dentro del rango de las frecuencias señaladas, obtendremos una matriz de $N \times M$, que representa la transformada ondicular, donde N es la longitud de la serie de tiempo. Se puede mostrar que el módulo de la transformada ondicular para todas las escalas m en un momento dado $n \in N$, es una estimación del espectro de Fourier local y puede ser comparado contra un ruido rojo a algún nivel de significancia. Estas relaciones son aprovechadas en el método de Torrence y Compo (1998) para marcar valores de la transformada ondicular que difieren significativamente de un ruido rojo. Dado que la ondícula empleada (Morlet) posee la propiedad que deseamos sea revelada a partir de la serie de tiempo (definición en el dominio de las frecuencias), un análisis con esta ondícula puede revelar la estructura tiempo-frecuencia contenida en la serie, incluyendo tanto oscilaciones estacionarias, como modulaciones en frecuencia y amplitud (Kumar y Foufoula-Georgiou, 1997; Lau y Weng, 1995).

El método es relativamente fácil de aplicar y es posible extraer la variabilidad entre escalas definidas de la ondícula de Morlet, que corresponden a periodos de Fourier equivalentes. La relación entre escalas de la ondícula de Morlet y las frecuencias o longitudes de onda de Fourier es explorada en detalle en Meyers *et al.* (1993). Sumando y escalando adecuadamente entre las convoluciones correspondientes a las escalas m_i y $m_s \in M$ de la ondícula (ecuación 29 de Torrence y Compo, 1998), se obtiene una serie cuya variación puede ser atribuida a las frecuencias o periodos de Fourier correspondientes a las escalas de dilatación m_i y m_s . Es decir, se puede reconstruir una serie de tiempo similarmente a la que se obtiene al aplicar un filtro pasa banda entre las frecuencias de Fourier equivalentes a las escalas de la ondícula. Es importante señalar que, dada la longitud finita de la serie analizada, al ir dilatando las ondículas, éstas van introduciendo una deformación al convolucionarlas desde los extremos de la serie. Este efecto deformante se marca como líneas exponenciales que van de las altas a las bajas frecuencias en ambos lados del espectro ondicular.

Resultados

Al aplicar el análisis ondicular de Morlet a las series de tiempo de lluvia invernal (lluvia acumulada de noviembre a abril) en Ensenada se pueden detectar algunas características importantes que dan idea del comportamiento oscilatorio del clima en diferentes intervalos durante el siglo pasado (fig. 3). Las áreas marcadas entre líneas punteadas son distintas de un ruido rojo al 5% de significancia. Se notan dos áreas significativas en las escalas de alrededor de 40 y 15 años, particularmente después de 1940. También se observan áreas aisladas significativas en la banda de actividad de ENOS (2 a 7 años). Se puede notar que las oscilaciones multidecenales (~40 años) significativas (al 5%) se localizan en la segunda

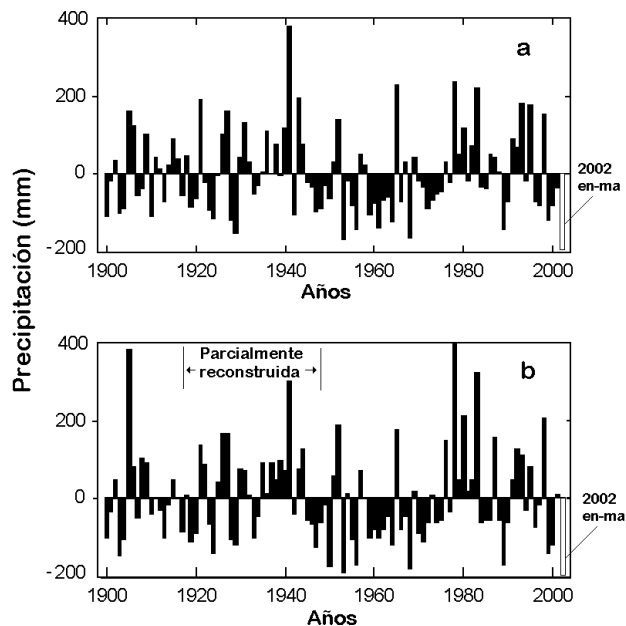


Figura 2. Anomalías de la precipitación invernal (noviembre a abril) en las ciudades de San Diego (a) y Ensenada (b). Las anomalías son las desviaciones del valor promedio invernal. El periodo de 1911 a 1947 fue parcialmente reconstruido para los datos de Ensenada, tomando como base las estadísticas de la tabla I. Las unidades son en milímetros.

Figure 2. Anomalies of winter rainfall (November to April) in the cities of San Diego (a) and Ensenada (b). The anomalies are the deviations of the mean winter value. The period from 1911 to 1947 was partially reconstructed for the Ensenada data, based on the statistics presented in table 1. The units are given in millimeters.

the time-series. Hence, if M wavelet expansions are made within the indicated frequency range, a $N \times M$ matrix will be obtained, which represents the wavelet transform, where N is the length of the time series. It can be shown that the wavelet transform module for all the m scales in a given moment $n \in N$, is an estimate of the local Fourier spectrum and can be compared against a red noise at a significance level. These relations are taken advantage of in Torrence and Compo's (1998) method to determine wavelet transform values that differ significantly from a red noise. Given that the wavelet used (Morlet) has the property that we want to obtain from the time series (definition in the frequency domain), an analysis with this wavelet can reveal the time-frequency structure contained in the series, including stationary oscillations, as well as variations in frequency and amplitude (Kumar and Foufoula-Georgiou, 1997; Lau and Weng, 1995).

The method is relatively easy to apply and it is possible to determine the variability among scales defined by the Morlet wavelet, which correspond to equivalent Fourier periods. The relation between Morlet wavelet scales and Fourier frequencies and wavelengths is explored in detail by Meyers *et al.* (1993). With the appropriate addition and scaling between the corresponding convolutions at the wavelet scales m_i and $m_s \in M$ (equation 29 in Torrence and Compo, 1998), a series is

mitad del siglo pasado (desde fines de los 1940). El hecho de que esta señal se encuentre dentro del área de influencia deformante de los extremos de la serie, introduce incertidumbre precisamente en su forma, mas probablemente no en su existencia dado que la señal es significativa (5%) en el espectro ondicular. Las oscilaciones decenales (~15 años) significativas se localizan principalmente en el periodo de 1965 a 1995, mientras que las oscilaciones interanuales (2–7 años) significativas se localizan a principios y fines del siglo XX, dejando un periodo centrado a mitad del siglo (de los años cuarenta a los setenta) sin oscilaciones ENOS significativas.

Las señales reconstruidas que presentan una variación multidecenal, ~40 años, y decenal, ~15 años, así como la correspondiente a la variabilidad del ENOS, se muestran en la figura 4. Ya que la señal reconstruida de ~40 años aparece similar a un armónico simple, asumimos que la incertidumbre en su forma, introducida por el análisis, es tolerable en cuanto a la proyección de un escenario probable. También se muestran, para las variaciones decenales, los modelos armónicos ajustados y su proyección hasta el año 2050. Dada la complejidad de la señal del ENOS, esta variabilidad difícilmente puede ser proyectada, aunque es necesario hacer notar que la amplitud de esta variabilidad es tan importante como la de las variaciones decenales. La suma de las contribuciones de las variabilidades decenal y multidecenal, esto es, excluyendo la variabilidad debida a ENOS, se muestra en la figura 5. A partir de estos resultados se pudo sugerir que la temporada invernal

obtained whose variation can be attributed to the Fourier frequencies and periods corresponding to the m_i and m_s scales. That is, a time series can be reconstructed similar to that obtained when a band-pass filter is applied to the Fourier frequencies equivalent to the wavelet scale. It is important to note that given the finite length of the series analyzed, as the wavelets expand they introduce a distortion because they are convoluted from the ends of the series. This distortion appears as exponential lines that go from the high to the low frequencies at both ends of the wavelet spectrum.

Results

The Morlet wavelet analysis applied to the Ensenada winter rainfall (rain accumulated from November to April) time series revealed some important characteristics that indicate the variable behaviour of the climate at different periods during the 20th century (fig. 3). The areas indicated by dotted lines in figure 3 are different to a red noise at 5% significance. Two significant areas are observed in the scales of about 40 and 15 years, especially after 1940. Significant isolated areas are also observed in the ENSO band of activity (2–7 years). The significant (5%) multidecadal oscillations (~40 years) occurred in the second half of the century (as of the late 1940s). The fact that this signal is found within the distortion area of the time series' extremes, introduces uncertainty in its shape but not in its existence, because the signal is significant (5%) in the wavelet spectrum. Significant decadal (~15 years) oscillations are found primarily in the 1965–1995 period, while significant interannual (2–7 years) oscillations occur at the beginning and end of the 20th century, leaving a period in the middle of the century (from the 1940s to the 1970s) with no significant ENSO variations.

Figure 4 shows the reconstructed signals associated with the multidecadal variation (~40 years), the decadal variation (~15 years), and the ENSO variability. As the reconstructed multidecadal signal resembles a simple harmonics, we assume that the uncertainty in its shape, introduced by the analysis, is acceptable relative to the projection of a probable scenario. The fitted harmonic models for the decadal variations and their projection to the year 2050 are also shown. Given the complexity of the ENSO signal, this variability is difficult to predict, even though the amplitude of this variation is as important as that of the decadal variations. The sum of the contributions of the decadal and multidecadal variations, excluding the variability due to ENSO, is shown in figure 5. Based on these results, we predict a deficit rainfall for the 2001/2002 winter season (November to April) (Reyes and Troncoso, 2001); more importantly, a future scenario indicates the possibility of a dry period extending to 2015. As the harmonic fits were not objectively optimized and the ~40-year signal is probably deformed, the dates and periods presented should be interpreted with care. Furthermore, the decadal oscillations may not continue with the same characteristics and behaviour as those

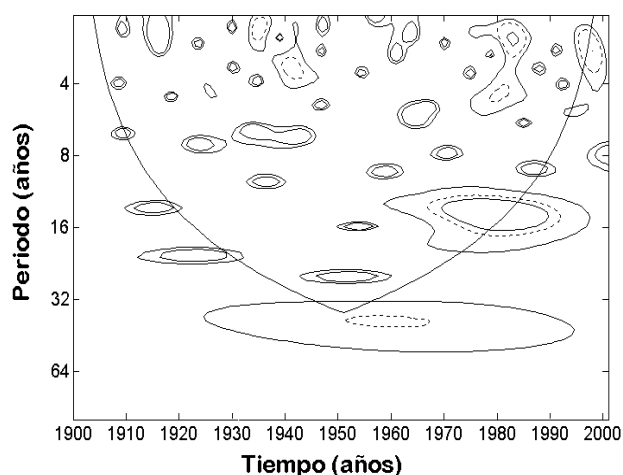


Figura 3. Espectro de potencia ondicular de la lluvia invernal en Ensenada. En el eje horizontal se indica el tiempo, mientras que en el eje vertical se indica el periodo representativo del espectro ondicular. Las líneas punteadas representan las oscilaciones significativas al 5 % y las líneas exponenciales convergentes hacia el centro de la gráfica marcan la región de influencia de los extremos de la serie en los que los resultados están deformados.

Figure 3. Wavelet spectrum of the Ensenada winter rainfall. The horizontal axis indicates time, whereas the vertical axis indicates the representative period of the wavelet spectrum. The dotted lines represent significant oscillations (5%) and the exponential lines that converge towards the center indicate the region of influence of the series' extremes in which the results are distorted.

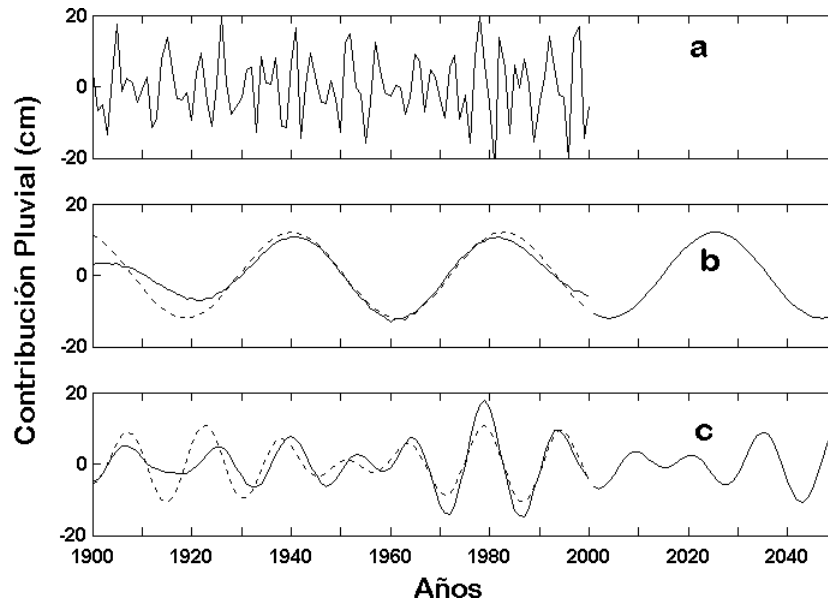


Figura 4. Señales reconstruidas a partir del modelo de análisis ondicular. (a) Señal asociada al Índice de Oscilación del Sur (2–7 años). (b) Señal asociada a las oscilaciones multidecenales (~40 años). (c) Señal asociada a las oscilaciones decenales (~15 años).
Figure 4. Reconstructed signals from the wavelet analysis model. (a) Signal associated with the Southern Oscillation Index (2–7 years). (b) Signal associated with the multidecadal oscillations (~40 years). (c) Signal associated with the decadal oscillations (~15 years).

(noviembre a abril) de 2001/2002 presentaría un déficit en la precipitación (Reyes y Troncoso, 2001). Quizás lo más importante es que, a partir de estos resultados, se puede proponer un escenario futuro en el que una posible sequía se extendería hasta cerca de 2015. Dado que los ajustes de los modelos armónicos no han sido objetivamente optimizados, aunado al hecho de que la señal de ~40 años esté probablemente deformada, las fechas y periodos presentados deben interpretarse con cautela. Además, no se puede asegurar que las oscilaciones decenales continúen con las mismas características y comportamiento observados en el siglo XX, por lo que la intensidad de los valores también debe interpretarse con cuidado.

Sin embargo, estos resultados apoyan la hipótesis de que un cambio climático ocurrió ya en el Pacífico Norte, tal como aparentemente ocurrió con la ODP (McFarlane *et al.*, 2000, y otros presentados en la red mundial). Esta oscilación bien podría estar modulando la lluvia en el noroeste de México, así como otros parámetros climáticos e incluso fenómenos como el ENOS, como será discutido en la siguiente sección.

Discusión

Los escenarios obtenidos al aplicar el análisis ondicular a los datos de la lluvia invernal en Ensenada, sugieren que se ha iniciado un periodo de sequías a partir de fines del siglo pasado (desde 1999) y que podría continuar hasta 2015, aproximadamente. Es decir, a partir de este siglo XXI podríamos estar entrando en un nuevo ciclo de sequías para la región noroeste de Baja California. Además, se podría esperar que el probable cambio de fase en la ODP en 1999 coincida con un incremento en la intensidad y la formación de eventos fríos del ciclo ENOS

observed in the 20th century, so the intensity of the values should also be interpreted with caution.

These results, however, support the hypothesis that a climatic change occurred in the North Pacific, as apparently also occurred with PDO (McFarlane *et al.*, 2000, and others worldwide). This oscillation may well be regulating the rainfall in northwestern Mexico, as well as other climatic parameters

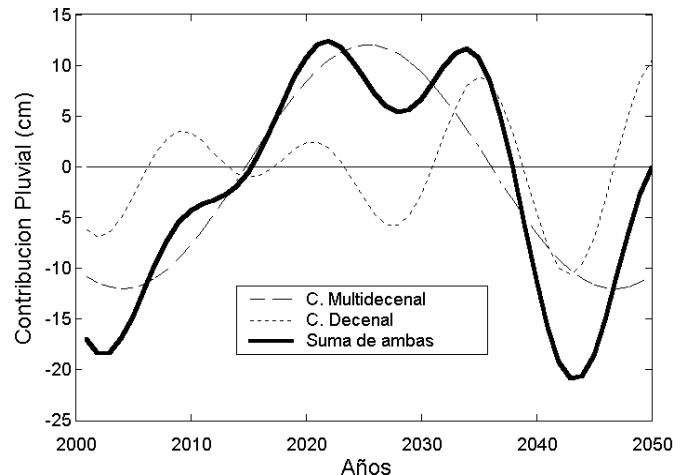


Figura 5. Escenarios esperados para el periodo 2000–2050 de las componentes decenal (~15 años) y multidecenal (~40 años) de la lluvia en Ensenada. Para obtener este pronóstico no se consideró la señal del ENOS. Las amplitudes están en unidades de centímetros.

Figure 5. Future scenarios for the 2000–2050 period of the decadal (~15 years) and multidecadal (~40 years) components of the Ensenada rainfall. The ENSO signal was not considered in these predictions. The amplitudes are given in centimeters.

(La Niña), similar a lo observado durante el periodo de 1941 a 1975 (fig. 6). Quizás este fenómeno de la ODP en todo el Pacífico Norte, superpuesto al fenómeno ENOS, localizado principalmente en la región del Pacífico tropical, podría estar contribuyendo a inhibir y debilitar los eventos cálidos de El Niño, pues mientras el Pacífico oriental se mantenga con temperaturas bajas, no habrá suficiente energía calorífica para un El Niño intenso. Además de lo anterior, cuando se tienen “condiciones neutras o normales”, la variabilidad del estado del tiempo día con día y semana a semana también aumenta en nuestra región. Esto se puede explicar si recordamos que las corrientes de aire de la alta atmósfera (la corriente de chorro), que conducen los frentes meteorológicos y las tormentas de invierno, no tienen una dirección preferida durante condiciones neutras del ENOS en la atmósfera. En cambio, durante los eventos de El Niño, la corriente de chorro se desplaza muy al sur, trayendo las tormentas a Baja California. Por el contrario, durante los eventos de La Niña, ocurre que la corriente de chorro se encuentra preferentemente desplazada hacia el norte, propiciando una zona de bloqueo y reduciendo, por lo tanto, la entrada de tormentas y lluvias a nuestra península (Brito-Castillo *et al.*, 2002).

A largo plazo se puede decir que si bien nos encontrábamos en una fase de lluvias relativamente abundantes, probablemente iniciada en 1977 y que nos sorprendió con las desastrosas lluvias del invierno de 1977/1978, ésta debió llegar a su fin a fines del siglo pasado, para iniciarse una fase de relativa sequía. Como soporte a esta conclusión, en la figura 6 se muestran los ciclos multidecenales para la lluvia en Ensenada y las correspondientes series en sus fases positiva y negativa del índice de ODP y del IOS. Los máximos y mínimos se corresponden aproximadamente y el periodo de sequía de 1941 a 1976 muestra valores predominantemente negativos tanto para la lluvia como para la ODP. De 1977 a 1998 se observa la cresta de la onda, que coincide con frecuentes e intensos eventos El Niño (valores muy negativos del IOS) que dejaron conjuntamente lluvias abundantes en la región de estudio. A partir de esa fecha posiblemente se ha iniciado, una temporada donde dominarán de nuevo los valores por debajo del normal.

Como se dijo más arriba, estos saltos climáticos que corresponden a cambios más o menos abruptos hacia intervalos de tiempo con dominancia de anomalías de un signo a otro, han sido claramente identificados en el clima del Pacífico nororiental en otros estudios (Chao *et al.*, 2000; Gedalof y Smith, 2001) y se manifiestan en diversos elementos del clima, afectando entre otras, a la lluvia en la región noroeste de Baja California. En particular, consideramos que durante el lustro de 2000 a 2005 se deberá confirmar la ocurrencia de un ‘salto climático’, similar a los observados en el invierno de 1940/1941 (de fase cálida a fría en la ODP) y el de 1976/1977 (de fase fría a cálida), por lo que podremos observar una tendencia negativa de la temperatura del aire y del mar, lo que podría afectar significativamente los diferentes componentes del clima como son el campo de presión atmosférica y la precipitación en toda la región de estudio. Estas oscilaciones multidecenales en el mar

and even phenomena, such as ENSO, as will be discussed in the following section.

Discussion

The scenarios derived from the wavelet analysis, applied to the Ensenada winter rainfall data, suggest the onset of a dry period at the end of the last century (in 1999) that could continue until 2015, approximately. That is, the 21st century could be marking the beginning of a new cycle of drought for northwestern Baja California. In addition, the probable change in phase of PDO in 1999 can be expected to coincide with an increase in the intensity and formation of cold La Niña events of the ENSO cycle, similar to those observed during the period from 1941 to 1975 (fig. 6). Perhaps this PDO phenomenon, throughout the North Pacific, superposed to the ENSO phenomenon, mainly in the tropical Pacific, could be contributing to inhibit or weaken the warm El Niño events, because while low temperatures prevail in the eastern Pacific, there will not be sufficient calorific energy for an intense El Niño to occur. Also, under neutral or normal conditions, the daily and weekly variability of the climate increases in the region. This can be explained by the jet stream flows in the upper atmosphere that regulate the meteorological fronts and winter storms, which do

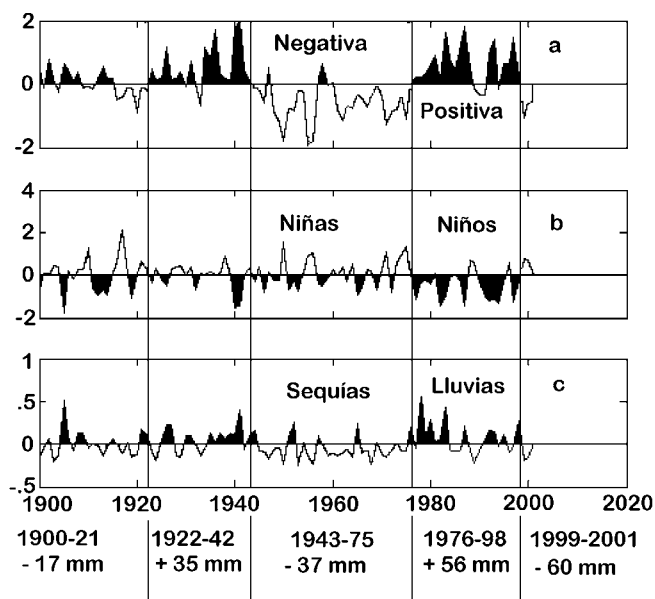


Figura 6. Comportamiento interanual y decadal de las series de tiempo estandarizadas de (a) la Oscilación Decenal del Pacífico, (b) el Índice de la Oscilación del Sur y (c) la lluvia invernal en Ensenada. En la parte inferior de la figura se muestran los periodos en que se observaron condiciones de lluvias abundantes y de sequías, con los correspondientes valores medios de la anomalía de lluvia.

Figure 6. Interannual and decadal behaviour of the standardized time series of (a) the Pacific Decadal Oscillation, (b) the Southern Oscillation Index and (c) the winter rainfall in Ensenada. The periods of abundant rainfall and drought are indicated in the lower part of the figure, together with the corresponding mean rainfall anomaly values.

y en la atmósfera pueden ser clasificadas como naturales, al igual que la irregular oscilación multianual mar-atmósfera del ciclo ENOS. Resta preguntarnos si estos ciclos y sus interrelaciones se mantendrán en el futuro cercano, a pesar de la actividad humana, o si el efecto antropogénico será lo suficientemente intenso para modificar los patrones naturales del clima.

Las variaciones de la temperatura del mar y del campo de presión atmosférica tienen un fuerte impacto en el comportamiento de la corriente de chorro y en la trayectoria e intensidad de las tormentas extratropicales que afectan el oeste de Norteamérica durante el invierno. Se podría favorecer que, durante la fase fría de la ODP, la corriente de chorro se vea desplazada al norte, desviando las tormentas extratropicales invernales al norte de California, incrementando las posibilidades de sequías y lluvias escasas en Baja California, como se observó recurrentemente durante el periodo de principios de los años cuarenta hasta mediados de los setenta (Namias, 1978, 1983).

Los resultados de los análisis efectuados y la necesaria probabilidad de la recurrencia de un régimen similar al de 1941 a 1976, nos permiten plantear los siguientes escenarios.

Si la ODP en efecto ha cambiado de la fase cálida (de 1977 a 1998) a una fase fría (a partir de 1999) se podría esperar que continúe el periodo de sequías para Baja California y el sur de California hasta mediados de la década de 2010. Además, sería de esperarse que este cambio de fase en la ODP traiga asociado un incremento en la formación e intensidad de los eventos La Niña, similarmente a lo observado durante el periodo de 1941 a 1976. Gershunov y Barnett (1998) han sugerido que cuando la ODP está en su fase negativa (fría), los Niños son menos y de menor magnitud, mientras que en la fase positiva (cálida) de la ODP, las Niñas son más débiles e infrecuentes. Si el próximo El Niño, que se espera para el invierno de 2002/2003, es débil o moderado (Climate Diagnostic Center, 2002) podría traer poco alivio a la presente sequía (1999–2001). Tendremos que esperar varios años más para verificar, primero, que el salto climático ya ocurrió y, segundo, que éste trae asociado un periodo de sequías en nuestra región al inhibir la formación de eventos El Niño a favor de eventos La Niña dentro del ciclo ENOS. Mientras ocurría la revisión y publicación del presente artículo concluyeron las temporadas de lluvia 2001/2002 y 2002/2003; en la primera se observó una precipitación récord muy por debajo de la normal, mientras que en la segunda, incluso en condiciones cálidas de El Niño, la precipitación sólo estuvo ligeramente por encima de la normal. Todo esto coincide con los escenarios propuestos en este trabajo.

Referencias

- Angell, J.K. (1999). Comparison of surface and tropospheric trends estimated from a 63-station radiosonde network 1958–1998. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 2761–2764.
- Brito-Castillo, L., Leyva-Contreras, A., Douglas, A.V. and Lluch-Belda, D. (2002). Pacific Decadal Oscillation and the filled

not have a preferred direction during neutral ENSO conditions; however, during El Niño events, the jet stream dips way to the south, bringing storms to Baja California, whereas during La Niña events, the jet stream moves to the north, creating a zone that obstructs the arrival of storms and rainfall to the Baja California peninsula (Brito-Castillo *et al.*, 2002).

Even though a period of relatively abundant rainfall began in 1977, with the disastrous rains of the winter of 1977/1978, it should have come to an end at the close of the 20th century, to be followed by a relatively dry period. To support this conclusion, the multidecadal Ensenada rainfall cycles and the corresponding negative and positive PDO and SOI are shown in figure 6. The maxima and minima are approximately coincident, and the dry period from 1941 to 1976 shows predominantly negative values for both rainfall and PDO. The wave's crest is observed from 1977 to 1998, coinciding with frequent and intense El Niño events (very negative SOI values), which left abundant rainfall in the study area. A period dominated once again by lower than normal values possibly began in 1998.

These climatic changes, which correspond to more or less abrupt shifts to time intervals dominated by positive or negative anomalies, have been clearly identified in the climate of the northeastern Pacific (Chao *et al.*, 2000; Gedalof and Smith, 2001), and are apparent in several climatic elements, affecting, among others, the rainfall in northwestern Baja California. In particular, during the period from 2000 to 2005, the occurrence of a climatic jump should be confirmed, similar to that observed in the winters of 1940/1941 (from warm to cold phase in PDO) and 1976/1977 (from cold to warm phase); air and sea temperature will present a negative trend, which could significantly effect different climatic components, such as atmospheric pressure and rainfall, throughout the study area. These multidecadal oscillations in the sea and atmosphere can be classified as natural, as can the irregular multiannual sea-atmosphere variation of the ENSO cycle. The question is whether these cycles and their interrelation will continue in the near future, despite human activity, or whether the anthropogenic effect will be sufficiently intense to modify the natural climatic patterns.

Variations in sea temperature and atmospheric pressure strongly influence the behaviour of the jet stream, as well as the path and intensity of extratropical storms that affect western North America in winter. During the cold PDO phase, the jet stream may move northwards, diverting the extratropical winter storms to the north of California and increasing the possibility of drought and scant rainfall in Baja California, as occurred repeatedly during the period from the early 1940s to the mid-1970s (Namias, 1978, 1983).

The results derived from the analyses and the certain probability of the recurrence of a similar regime to that of 1941–1976, allows us to propose the following scenarios. If PDO has in fact switched from a warm (1977–1998) to a cold phase, the dry period in Baja California and southern California can be expected to continue until 2010. This change

- capacity of dams on the rivers of the Gulf of California continental watershed. *Atmósfera*, 15: 121–137.
- Chao, Y., Ghil, M. and McWilliams, C. (2000). Pacific interdecadal variability in this century's sea surface Temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 2261–2264.
- Climate Diagnostic Center (2002). ENSO Diagnostic Discussion. May 9. [Http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/).
- Folland, C.K., Sexton, D.M.H., Karoly, D.J., Johnson, C.E., Rowell, D.P. and Parker, D.E. (1998). Influences of anthropogenic and oceanic forcing on recent climatic change. *Geophys. Res. Lett.*, 25: 353–356.
- Gedalof, Z. and Smith, J.D. (2001). Interdecadal climate variability and regime-scale shifts in Pacific North America. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 1515–1518.
- Gershunov, A. and T.P. Barnett (1998). Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 2715–2726.
- Goldenberg, S.B., Landsea, C.W., Mestas-Nunez, A.M. and Gray, W.M. (2001). The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 293: 474–479.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas (1982). Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotécnica A.1.6. Análisis Estadístico. Comisión Federal de Electricidad, México, 110 pp.
- Kiladis, G.N. and Diaz, H.F. (1989). Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J. Climate*, 2: 1069–1090.
- Kumar, P. and Foufoula-Georgiou, E. (1997). Wavelet applications in Geophysics: A review. *Rev. Geophys.*, 35: 385–412.
- Lau, K.M. and Weng, H. (1995). Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 76: 2391–2402.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M. and Francis, R.C. (1997). A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78: 1069–1079.
- McCabe, G.J. and Dettinger, M.D. (1999). Decadal variations in the strength of ENSO teleconnections with precipitation in the western United States. *Int. J. Climatol.*, 19: 1399–1410.
- McFarlane, G.A., King, J.R. and Beamish, R.J. (2000). Have there been recent changes in climate? Ask the fish. *Prog. Oceanogr.*, 47: 147–169.
- Meyers, S.D., Kelly, B.G. and O'Brien, J.J. (1993). An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: With application to the dispersion of Yanai waves. *Mon. Weather Rev.*, 121: 2858–2866.
- Meyers S.D., O'Brien, J.J. and Thelin, E. (1999). Reconstruction of monthly SST in the tropical Pacific Ocean during 1868–1993 using adaptive climate basis functions. *Mon. Weather Rev.*, 127: 1599–1612.
- Minnich, R.A., Franco-Vizcaino, E. and Dezzanni, R.J. (2000). The El Niño/Southern Oscillation and precipitation variability in Baja California, Mexico. *Atmósfera* 13: 1–20.
- Minobe, S. (1997). A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, 24: 683–686.
- in phase will also be associated with an increase in the formation and intensity of La Niña events, similar to that observed from 1941 to 1976. Gershunov and Barnett (1998) reported that when the negative (cold) PDO phase occurs, there are fewer and weaker El Niños, whereas when the positive (warm) PDO phase occurs, there are fewer and weaker La Niñas. If the next El Niño that is expected for the winter of 2002/2003 is weak or moderate (Climate Diagnostic Center, 2002), there could be little respite from the present drought conditions (1999–2001). We shall have to wait several years more to verify whether the climatic jump occurred and whether it is associated with a dry period by favouring the formation of La Niña rather than El Niño events in the region within an ENSO cycle. While this article was under review and publication, the 2001/2002 and 2002/2003 winter seasons were over, the first one with a record precipitation much below normal, while in the second one, even under warm El Niño conditions, the precipitation was slightly above normal. All of this coincides with the scenarios proposed in this work.

English translation by Christine Harris.

-
- Minobe, S. (1999). Resonance in bidecennial and pentadecennial climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 855–858.
- Namias, J. (1978). Recent drought in California and western Europe. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16: 435–458.
- Namias, J. (1983). Some causes of United States drought. *J. Climate Appl. Meteorol.*, 22: 30–39.
- Reyes, S. y Rojo, P. (1985). Variabilidad de la precipitación en la península de Baja California. *Rev. Geofis.*, 22/23:111–128.
- Reyes, S. and Mejia-Trejo, A. (1991). Tropical perturbations in the eastern Pacific and the precipitation field over northwestern Mexico in relation to ENSO phenomenon. *Int. J. Climatol.*, 11: 515–528.
- Reyes, S. y Troncoso, R. (1999). El impacto del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en la generación de ciclones tropicales alrededor de México. *Rev. Ciencia y Mar*, 5: 3–22.
- Reyes, S. y Troncoso, R. (2001). Frío, Sequías y Poca Lluvia. *Semanario Zeta*, Dic. 28–Ene. 3, 2002, pp.12-A/12-B.
- Reyes, S., Miranda, F. y García, J. (1990). Climatología de la Región Noroeste de México. Parte I. Precipitación. Reporte Técnico CIOFIT9001, CICESE, Ensenada, B.C., México, 170 pp.
- Torrence, C. and Compo, G.P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 61–78.
- Zhang, Y., Wallace, J.M. and Battisti, D.S. (1997). ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *J. Climate*, 10: 1004–1020.