



EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR Y SUS EFECTOS EN LA PRECIPITACIÓN EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NAZAS

EFFECTS OF THE EL NIÑO SOUTHERN OSCILLATION ON PRECIPITATION IN THE UPPER NAZAS RIVER WATERSHED

Julián Cerano-Paredes¹; José Villanueva-Díaz¹; Ricardo D. Valdez-Cepeda²; José Guadalupe Arreola-Ávila³; Vicenta Constante-García¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. km 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento, C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango. MÉXICO. Correo-e: cerano.julian@inifap.gob.mx (¹Autor para correspondencia).

²Centro Regional Universitario Centro Norte, Universidad Autónoma Chapingo. Apdo. Postal 196. Calle Cruz del Sur Núm. 100, Col. Constelación. C. P. 98085, Zacatecas, Zac. MÉXICO.

³Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Domicilio conocido. C. P. 35230. Bermejillo, Durango. MÉXICO.

RESUMEN

Con el objetivo de conocer el impacto de El Niño Oscilación del Sur en la parte alta del Nazas, se relacionaron las series de precipitación reconstruida y los índices de El Niño 3.4. Para tal efecto, se utilizaron gráficos de resolución anual y sus espectros potenciales de ondeleta. Los resultados indican que durante los últimos 100 años El Niño ha influido de manera significativa ($P < 0.05$) la variabilidad de la precipitación, durante el periodo 1900-1950 a frecuencias de 1 a 14 años, de 1970 a 1974 a frecuencias de 5 a 6 años y durante el periodo 1986-2000 a frecuencias de 1 a 2 y 6 a 8 años. Los periodos secos y húmedos registrados en la parte alta de la cuenca del Río Nazas durante el periodo de 1900-2000, han sido influidos por la presencia de este fenómeno, tanto en su fase cálida (El Niño) como en su fase fría (La Niña).

Recibido: 14 de septiembre, 2010
Aceptado: 23 de mayo, 2011
doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.076
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE:
ENSO, variabilidad de la precipitación, sequía, sociedad, Comarca Lagunera.

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the impact of the El Niño Southern Oscillation on the upper Nazas River watershed by correlating a reconstructed precipitation series with El Niño region 3.4 indices. For this purpose, annual resolution graphs and wavelet analysis were used. Results show that for the last 100 years El Niño has significantly ($P < 0.05$) influenced precipitation variability, at frequencies of 1 to 14 years for the period 1900 to 1950, 5 to 6 years from 1970 to 1974, and 1 to 2 and 6 to 8 years from 1986 to 2000. The intensity of the dry and wet spells recorded in the upper Nazas River watershed from 1900 to 2000 were influenced by the warm (El Niño) and cold (La Niña) phases of the El Niño Southern Oscillation.

KEY WORDS: ENSO, precipitation variability, drought, society, Comarca Lagunera

INTRODUCCIÓN

Los episodios Cálido/El Niño y Frío/La Niña forman parte de un ciclo conocido como El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). El Niño y La Niña son los ejemplos más evidentes de la variabilidad climática global siendo parte fundamental de un vasto y complejo sistema de fluctuaciones climáticas, con un intervalo medio de duración de cuatro años y un rango de 2 a 7 años (Trenberth, 1997).

En los últimos decenios se ha encontrado que gran parte de las fluctuaciones en la variabilidad climática está altamente relacionada con el fenómeno de ENSO (Díaz y Markgraf, 1992). En México, la variabilidad que el clima

INTRODUCTION

Warm and cold episodes (El Niño and La Niña, respectively) are part of a cycle known as the El Niño Southern Oscillation (ENSO). El Niño and La Niña are the most obvious examples of global climate variability, being a fundamental part of a vast and complex system of climate fluctuations, with a mean duration of four years and a range of 2 to 7 years (Trenberth, 1997).

In recent decades it has been found that a large part of the fluctuations in climate variability is highly related to the ENSO phenomenon (Díaz and Markgraf, 1992). In Mexico, the variability in weather from year to year is largely determined by the occurrence of ENSO (Magaña

presenta año con año está en gran medida determinado por la ocurrencia del fenómeno ENSO (Magaña *et al.*, 1999).

Estudios dendrocronológicos han demostrado que la variabilidad de la precipitación en el norte de México y suroeste de los Estados Unidos de América está ligada de manera significativa con el fenómeno del ENSO (Stahle y Cleaveland, 1993; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2007, 2009; Cerano *et al.*, 2009).

En el norte de México, el ENSO en su fase cálida (El Niño) se asocia a condiciones de alta precipitación en el invierno; mientras que el ENSO en su fase fría (La Niña) tiende a favorecer la presencia de inviernos más secos, propiciando fuertes sequías (Magaña *et al.*, 2003; Caso *et al.*, 2007).

El Río Nazas forma parte de la Región Hidrológica 36 (RH 36) una de las 37 regiones hidrológicas de México y a su vez una de las tres regiones endorreicas del norte de México (SARH, 1970; INEGI, 1980; Loyer *et al.*, 1993). En el centro de la RH 36 se localiza la Comarca Lagunera, una importante región agrícola dedicada en un principio a la producción del algodón y reemplazada en los años 1980 por la producción de forrajes (esencialmente alfalfa de alto rendimiento). La superficie de riego de 160,000 ha depende de los escurrimientos procedentes de la cuenca alta del Río Nazas que nace en la Sierra Madre Occidental y que escurre a través del Río Nazas con un volumen anual de $10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (Descroix *et al.*, 1997).

El Río Nazas, fuente de vida para la Comarca Lagunera, ha presentado una gran variabilidad en los escurrimientos en los últimos cincuenta años, propiciando fuertes impactos en la población desde el punto de vista económico, político y social. Ante tal situación, los objetivos del presente trabajo fueron: 1) conocer el impacto del ENSO sobre la variabilidad de la precipitación en la parte alta de la cuenca del Nazas, en una escala de tiempo extensa, 2) determinar en qué años este fenómeno ha tenido un impacto significativo y 3) las periodicidades con que se registran, eventos que repercuten de manera directa en la disponibilidad de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la Sierra Madre Occidental en la parte alta de la Cuenca del Río Nazas, en el sitio denominado Ciénega de la Vaca, municipio de Tepehuanes, Durango (Figura 1).

El clima del área es templado subhúmedo con una precipitación total anual de 470 a 500 mm. La precipitación alcanza su nivel máximo en el verano con 369 mm (junio a septiembre), que representa un 78.5 % de la lluvia

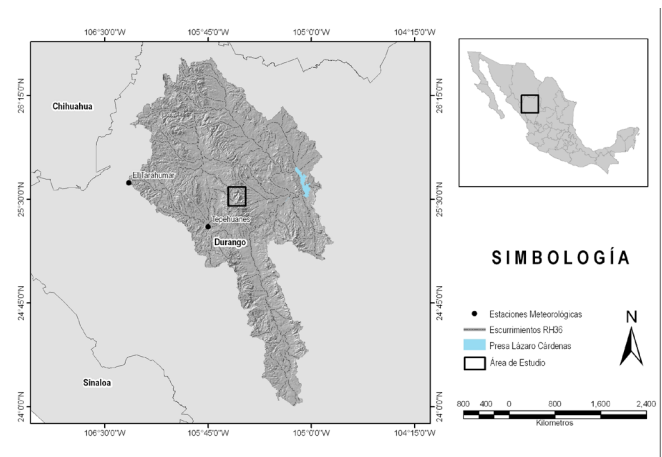


FIGURA 1. Localización geográfica del área de estudio, parte alta de la cuenca del Río Nazas y las estaciones meteorológicas empleadas para la caracterización climática.

FIGURE 1. Geographic location of study area, upper Nazas River watershed and weather stations used for climate characterization.

et al., 1999). Dendrochronological studies have shown that precipitation variability in northern Mexico and the southwestern United States is significantly linked with the ENSO phenomenon (Stahle and Cleaveland, 1993; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2007, 2009; Cerano *et al.*, 2009).

In northern Mexico, ENSO in its warm phase (El Niño) is associated with high rainfall conditions in the winter, while its cold phase (La Niña) tends to favor drier winters, leading to severe droughts (Magaña *et al.*, 2003; Caso *et al.*, 2007).

The Nazas River is part of Hydrological Region 36 (HR 36), one of 37 hydrological regions in Mexico and also one of three endorheic regions in northern Mexico (SARH, 1970; INEGI, 1980; Loyer *et al.*, 1993). In the center of HR 36 is the Comarca Lagunera (Laguna region), an important agricultural region which was originally dedicated to cotton production but later supplanted by fodder production (mainly high-yield alfalfa) in the 1980s. The irrigated area, encompassing 160,000 h, depends on runoff from the upper Nazas River watershed which rises in the Sierra Madre Occidental and drains through the Nazas River with an annual volume of $10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{year}^{-1}$ (Descroix *et al.*, 1997).

The Nazas River, source of life for the Comarca Lagunera, has presented a great variability in runoff in the last fifty years, leading to significant impacts on the population from an economic, political and social point of view. Against this background, the objectives of this study were: 1) determine the impact of ENSO on precipitation variability in the upper Nazas River watershed, over a large time scale, 2) ascertain in what years this phenomenon has had a significant impact, and 3) determine the frequency with which events that have a direct effect on water availability are recorded.

total anual. La temperatura media anual es de 10 °C. La mayor temperatura media mensual (30 °C), se registra en los meses de mayo y junio y la menor (-0.6 °C) en enero (IMTA, 2000).

Series utilizadas

Con base en técnicas dendrocronológicas estándar, los crecimientos anuales de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, se emplearon para reconstruir la variabilidad de la precipitación en la parte alta de la cuenca del Río Nazas para los pasados 410 años. Dicha especie es sensible a los cambios ambientales y, por lo tanto, con excelente potencial para reconstruir series paleoclimáticas (Stahle *et al.*, 1998). La serie reconstruida de la variabilidad de la precipitación se empleó para analizar la influencia del ENSO en esta región del norte de México.

El fenómeno ENSO, además del componente oceánico (El Niño y La Niña), involucra a un componente atmosférico, medido por el Índice de Oscilación del Sur. El índice del ENSO se obtiene de la diferencia de presión entre Darwin (Australia), normalmente con presión más baja, y Tahití, normalmente con presión más alta. Esta especie de sube y baja en la presión, con períodos de dos a cuatro años, se denominó Oscilación de Sur. La diferencia entre la presión de ambos puntos se conoce como Índice de Oscilación de Sur (Fein y Stephens, 1987). Debido a la gran extensión del Océano Pacífico, la comunidad científica internacional lo ha dividido para su estudio y vigilancia, en cuatro regiones: Niño 1.2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4 (Trenberth, 1997; Magaña *et al.*, 1999).

Para analizar el impacto de ENSO en la variabilidad hidroclimática de la parte alta de la cuenca del Río Nazas, se relacionó la precipitación reconstruida y los índices del Niño 3.4 mediante el programa MATLAB 6.5 (MathWorks, 2002). Para tal efecto, se utilizaron gráficos de resolución anual y sus espectros potenciales de ondeleta.

La serie de precipitación reconstruida se extiende para el período 1599-2008 (410 años); sin embargo, para este análisis sólo se empleó el período común con el índice ENSO 3.4 que comprende el período de 1894-2008 (115 años).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Niño Oscilación del Sur

La precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del Río Nazas y el índice ENSO 3.4 (enero-marzo), estimativo de la variabilidad del ENSO para los últimos 115 años (1894-2008), muestran una buena relación (Figura 2).

El índice ENSO 3.4 representa con sus valores mayores a la fase cálida del ENSO (El Niño) y con los

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study area is located in the Sierra Madre Occidental in the upper Nazas River watershed, at a place called Ciénega de la Vaca in the municipality of Tepehuanes, Durango (Figure 1).

The area's climate is sub-humid temperate with total annual precipitation from 470 to 500 mm. Precipitation is highest in the summer with 369 mm (June to September), representing 78.5 % of total annual rainfall. The average annual temperature is 10 °C. The highest average monthly temperature (30 °C) occurs in May and June and the lowest (-0.6 °C) in January (IMTA, 2000).

Series Used

Based on standard dendrochronological techniques, annual growth rates of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco were used to reconstruct precipitation variability in the upper Nazas River watershed for the past 410 years. This species is sensitive to environmental changes and is therefore very useful for reconstructing paleoclimate series (Stahle *et al.*, 1998). The reconstructed series of precipitation variability was used to analyze the influence of ENSO on this region in northern Mexico.

The ENSO phenomenon, in addition to the ocean component (El Niño and La Niña), involves an atmospheric component, measured by the Southern Oscillation Index. The ENSO index is obtained from the pressure difference between Darwin, Australia, usually with lower pressure, and Tahiti, usually with higher pressure. This kind of rise and fall in pressure, with periods lasting from two to four years, is called the Southern Oscillation. The pressure difference between the two points is known as the Southern Oscillation Index. Due to the vastness of the Pacific Ocean, the international scientific community has divided it for study and monitoring purposes into four regions: Niño 1.2, Niño 3, Niño 4 and Niño 3.4 (Trenberth 1997; Magaña *et al.*, 1999).

To analyze the impact of ENSO on hydroclimatic variability in the upper Nazas River watershed, the reconstructed precipitation was correlated with the Niño 3.4 indices using MATLAB 6.5 software (MathWorks, 2002). To this end, annual resolution graphs and their potential wavelet spectra were used.

The reconstructed precipitation series encompasses the period from 1599-2008 (410 years), but for this analysis only the joint period with the ENSO 3.4 index, which covers the period from 1894-2008 (115 years), was used.

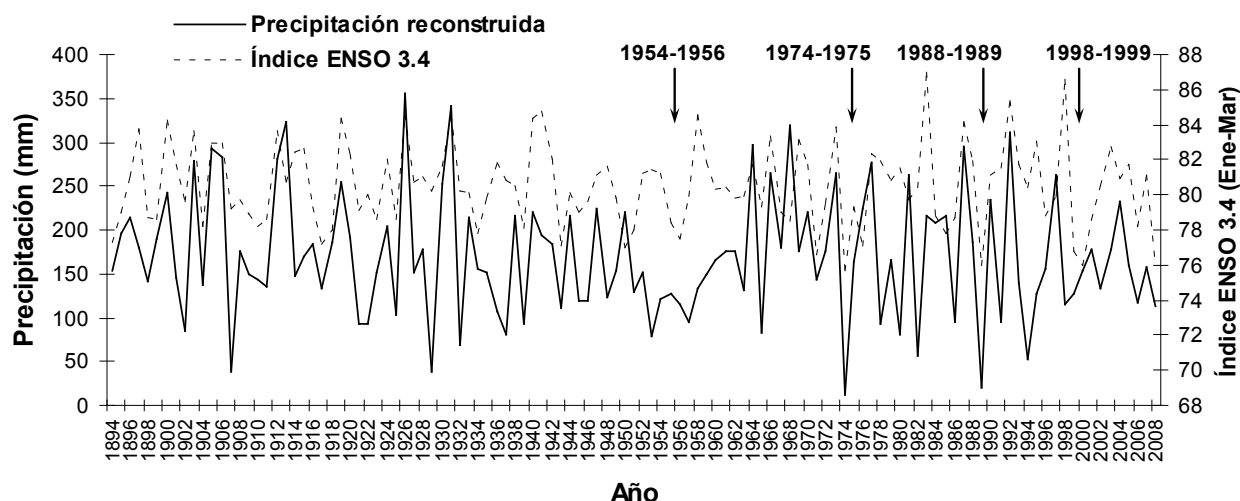


FIGURA 2. Relación entre la precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del Río Nazas y eventos extremos de El Niño y La Niña.
FIGURE 2. Relationship between reconstructed precipitation for the upper Nazas River watershed and extreme El Niño and La Niña events.

valores menores a la fase fría del ENSO (La Niña). Lo anterior permite determinar que la parte alta de la cuenca del Río Nazas se vio afectada por una disminución en la precipitación a consecuencia de los efectos de La Niña, lo que propició las intensas sequías, trayendo como consecuencia, bajos volúmenes almacenados en las presas, con un impacto directo en la superficie cultivada en la Comarca Lagunera.

Análisis Espectral

Mediante el análisis espectral de coherencia de ondeletas se analizó la influencia del ENSO sobre la precipitación para la parte alta de la cuenca del Río Nazas, al asociar la serie de precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4 (Figura 3).

El espectro de ondeleta para la precipitación reconstruida (Figura 3a) muestra áreas significativas ($P < 0.05$) que corresponden a periodos bianuales (1905, 1932, 1988-1990), tetra-anales (1928-1932, 1974-1976 y 1990-1998) y de 6 a 8 años (1905-1930). Mientras que el espectro de ondeleta de ENSO (Figura 3b) permite apreciar su ciclicidad irregular de 2 a 7 años para los periodos 1912-1922, 1936-1940, 1942-1960, 1968-1975 y 1978-2000. Estos resultados son difícilmente interpretados en el contexto de asociación entre ambas variables; aunque las áreas significativas ya señaladas indican periodos de sequías o húmedos y de ocurrencia o ausencia de ENSO.

La asociación entre ambas variables y las situaciones implicadas pueden identificarse mediante el análisis de coherencia de ondeletas (Figura 4). Áreas significativas de coherencia entre precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4 se aprecian para el periodo de 1900 a 2000 a frecuencias de 1 a 30 años.

RESULTS AND DISCUSSION

El Niño Southern Oscillation

The reconstructed precipitation for the upper Nazas River watershed and the ENSO 3.4 index (January-March), an estimate of ENSO variability for the last 115 years (1894-2008), shows a good relationship (Figure 2).

The ENSO 3.4 index represents the ENSO warm phase (El Niño) with its higher values and the ENSO cold phase (La Niña) with its lower values. This establishes that the upper Nazas River watershed was affected by a decrease in precipitation due to the effects of La Niña, which led to severe droughts, resulting in low water volumes stored in dams, with a direct impact on farmlands in the Comarca Lagunera.

Spectral Analysis

Using spectral analysis of wavelet coherence, the influence of ENSO on precipitation in the upper Nazas River watershed was analyzed by correlating the reconstructed precipitation series with the ENSO 3.4 index (Figure 3).

The wavelet spectrum for the reconstructed precipitation (Figure 3a) shows significant ($P < 0.05$) areas corresponding to two-year (1905, 1932, 1988-1990), four-year (1928-1932, 1974-1976 and 1990-1998), and 6- to 8-year (1905-1930) periods, while the ENSO wavelet spectrum (Figure 3b) allows one to appreciate its irregular cyclicity of 2 to 7 years for the periods 1912-1922, 1936-1940, 1942-1960, 1968-1975 and 1978-2000. These results are difficult to interpret in the context of association between these two variables, although the significant areas

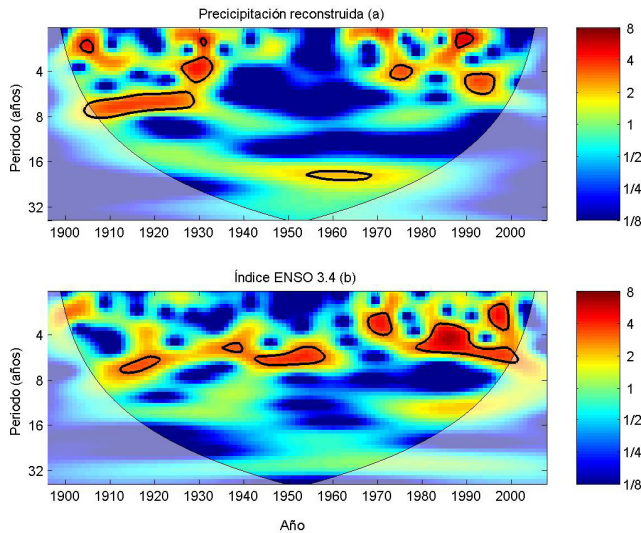


FIGURA 3. Espectros potenciales de ondeleta a nivel anual de la precipitación reconstruida a) y el índice ENSO 3.4, b) Las manchas rojas delimitadas por línea negra son periodos con frecuencias significativas ($P < 0.05$)

FIGURE 3. Potential wavelet spectra at an annual level of reconstructed precipitation a) and the ENSO 3.4 index, b) The red spots bounded by a black line are periods with significant frequencies.

Este análisis permite discutir y soportar los siguientes cuestionamientos: 1) ¿Influye el fenómeno ENSO sobre la variabilidad de la precipitación en la parte alta de la cuenca del Río Nazas?, 2) ¿En qué años? y 3) ¿Con qué periodicidad?

En la Figura 4 las manchas rojas delimitadas por una línea negra indican la presencia de una relación significativa ($P < 0.05$) entre ambas variables. Las flechas horizontales hacia la derecha indican que ambos fenómenos están en fase (que su relación es positiva); caso contrario, cuando las flechas se localizan hacia la izquierda sugieren antifase o relación negativa. Las flechas que se presentan en forma vertical indican que los fenómenos están desfasados.

Es notable la coherencia significativa entre precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4 durante el periodo 1900-1950 a frecuencias de 1 a 14 años, en especial cuando ambos fenómenos coinciden en fase, así como durante el período 1986-2000 a frecuencias de 1 a 2 y 6 a 8 años. Los periodos secos y húmedos ocurridos en la parte alta de la cuenca del Río Nazas de 1900 a 1950 y de 1986 a 2000 han sido influidos de manera significativa por la ocurrencia de ENSO, en periodos de 1 a 14 y 6 a 8 años, respectivamente.

De 1970 a 1974, las frecuencias de 5 a 6 años son significativas cuando ambas variables están entrando en fase. Para este periodo, el ENSO influyó de manera significativa a frecuencias de 5 a 6 años. En el período de 1951 a 1969 no se aprecia una asociación significativa ($P > 0.05$).

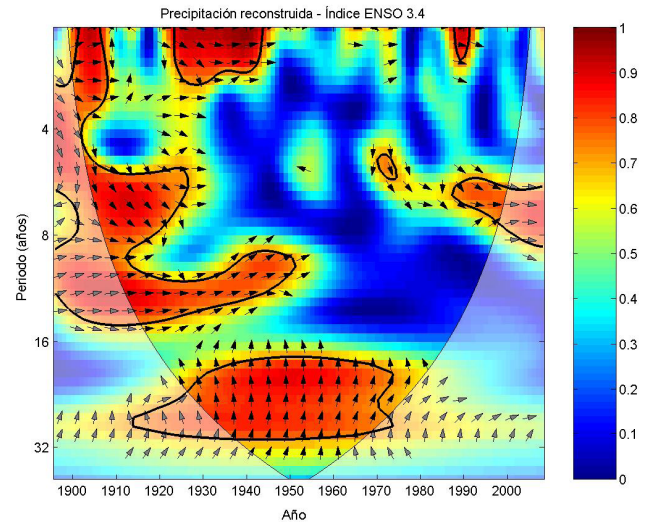


FIGURA 4. Dominio de coherencia de ondeleta entre la precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4.

FIGURE 4. Wavelet coherence domain between the reconstructed precipitation and the ENSO 3.4 index.

already identified indicate dry or wet spells and occurrence or absence of ENSO.

The association between these two variables and the situations involved can be identified through wavelet coherence analysis (Figure 4). Significant areas of coherence between reconstructed precipitation and the ENSO 3.4 index were found for the period from 1900 to 2000 at frequencies of 1 to 30 years.

This analysis allows addressing the following questions: 1) Does the ENSO phenomenon influence precipitation variability in the upper Nazas River watershed?, 2) In what years? and 3) How often?

In Figure 4 the red spots bounded by a black line indicate the presence of a significant ($P < 0.05$) relationship between the two variables. The horizontal arrows pointing to the right indicate that both phenomena are in phase (that their relationship is positive); on the contrary, the arrows pointing to the left suggest antiphase or a negative relationship. The vertical arrows indicate that the phenomena are out of phase.

The significant coherence between reconstructed precipitation and the ENSO 3.4 index is notable during the period 1900-1950 at frequencies of 1 to 14, especially when both phenomena coincide in phase, and during the period 1986-2000 at frequencies of 1 to 2 and 6 to 8 years. Dry and wet spells that occurred in the upper Nazas River watershed from 1900 to 1950 and from 1986 to 2000 were significantly influenced by the occurrence of ENSO, in periods of 1 to 2 and 6 to 8 years, respectively.

Entre los eventos más intensos de La Niña que en los últimos años han disminuido la precipitación en la parte alta de la Cuenca del Río Nazas, sobresalen los ocurridos en los años 1954-1956, 1974-1975, 1988-1989 y 1998-1999 (Figuras 2 y 5). De igual manera, las precipitaciones mayores en los últimos cinco decenios (1950-2000) se atribuyen a eventos del ENSO en su fase calida, específicamente aquellos registrados en los años 1968, 1973, 1977, 1981, 1987, 1992 y 1997 (Figura 5).

Descroix *et al.* (1997) señalan que la ubicación de la Región Hidrológica 36, cerca del litoral Pacífico del continente americano, la hace susceptible a la influencia del ENSO. En los últimos 50 años se identificaron periodos calificados como fríos, tales como: 1950, 1954-1956, 1974-1975, 1984-1985 y 1998-1999, años clasificados como de escasa precipitación y, por ende, con impacto negativo en los niveles de las presas.

La influencia de La Niña sobre la variabilidad de la precipitación parece casi opuesta a lo observado durante El Niño, aunque es importante señalar, los patrones en las anomalías no siempre son exactamente inversos, no siempre se producen incrementos o disminuciones significativas en la precipitación (Magaña *et al.*, 1999).

From 1970 to 1974, the frequencies of 5 to 6 years are significant when both variables are entering in phase. For this period, ENSO significantly influenced frequencies of 5 to 6 years. In the period from 1951 to 1969, there was no significant ($P < 0.05$) association.

Among the most intense La Niña events in recent years that decreased precipitation in the upper Nazas River watershed were those that occurred in the years 1954-1956, 1974-1975, 1988-1989 and 1998-1999 (Figures 2 and 5). Similarly, the periods of highest rainfall in the last half of the 20th century (1950-2000) were attributed to warm-phase ENSO events, specifically those recorded in the years 1968, 1973, 1977, 1981, 1987, 1992 and 1997 (Figure 5).

Descroix *et al.* (1977) note that the proximity of Hydrological Region 36 to the Pacific coast of the Americas makes it susceptible to the influence of ENSO. Certain periods over the last 50 years have been identified as being cold, such as 1950, 1954-1956, 1974-1975, 1984-1985 and 1998-1999, years classified as having low rainfall and hence a negative impact on dam levels.

The influence of La Niña on precipitation variability seems almost opposite to that observed during El Niño,

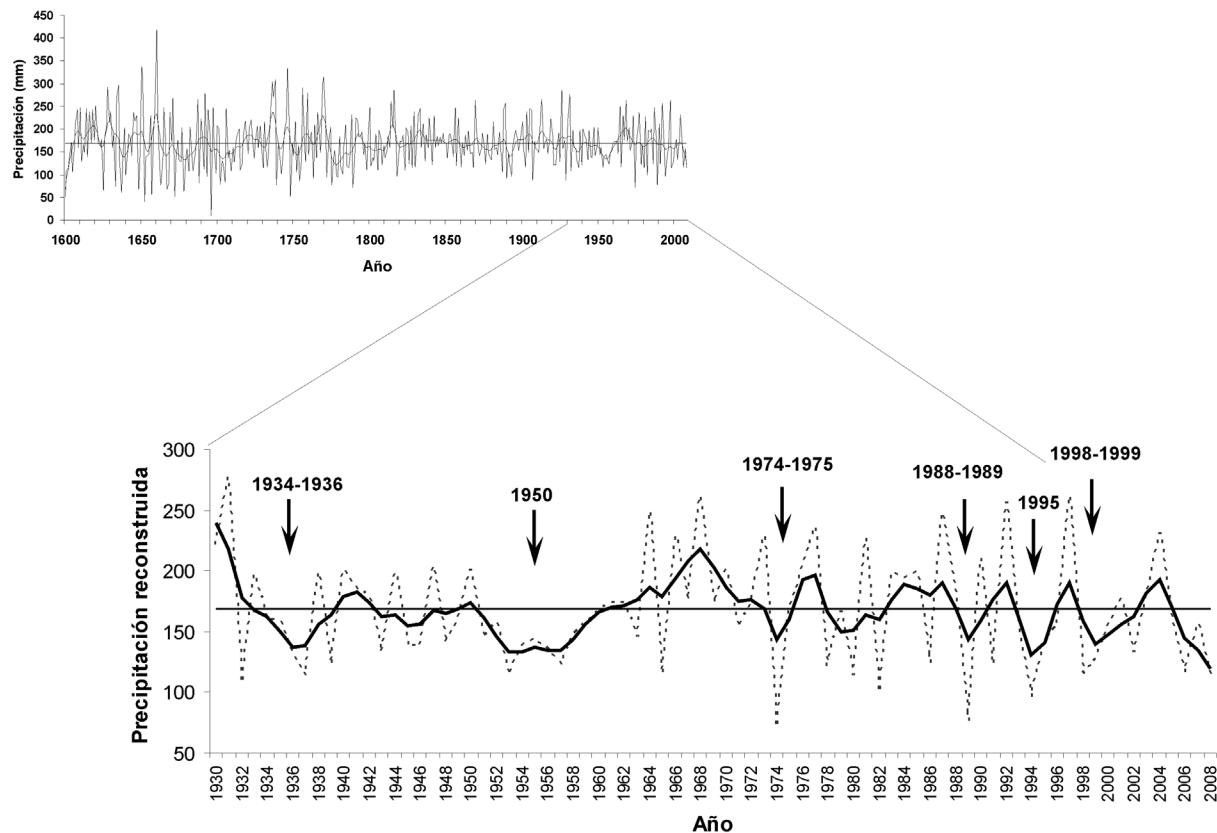


FIGURA 5. Años de ocurrencia de La Niña con un impacto negativo en la precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del Río Nazas en los últimos 70 años.

FIGURE 5. Years of La Niña occurrence with a negative impact on the reconstructed precipitation for the upper Nazas River watershed in the last 70 years.

Por ejemplo, durante el período 1993-1996 se presentó una fuerte sequía en el norte de México, lo anterior a consecuencia de un evento El Niño (1993-1994), que registró un déficit del 40 a 50 % de la pluviometría en la RH 36 (un incremento no significativo en la lluvia), prolongando a una intensa sequía a consecuencia del evento La Niña en 1995-1996, los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango perdieron de 10 a 25 % de su ganado vacuno; ello explica por qué el nivel de la presa "Lázaro Cárdenas" (almacenamiento de los escurrimientos de la parte alta de cuenca del Nazas) en junio de 1996 registró el menor en su historia y la superficie irrigada en la Comarca Lagunera se redujo a la mitad para el ciclo agrícola de 1996 (Descroix *et al.*, 1997 y Trenberth, 1997).

La precipitación en la parte alta de la cuenca disminuyó significativamente para los periodos 1974-1975 y 1988-1989. La reducción en el primer periodo fue la más intensa en los últimos 250 años (Figura 5). El periodo 1954-1956, por su duración, se considera como uno de los eventos La Niña con mayores impactos en la precipitación (Figura 5). De acuerdo a los registros de la NOAA del período 1950 a 1991, los eventos La Niña de mayor duración se registraron en los años 1954-1956 y 1974-1975 (Figuras 2 y 5).

Trenberth (1997) señala que, en el decenio de 1950, la presencia de dos de los eventos más intensos del ENSO en su fase fría, 1950-1951 y 1954-1956, fueron eventos que propiciaron importantes reducciones en precipitación en esta parte del norte de México que, influyeron en la variabilidad de la precipitación, pero no de manera significativa.

Con base en el análisis de coherencia de ondeletas, el periodo de 1951 a 1969 no indica una asociación significativa ($P > 0.05$) entre ambas variables, esto no implica que en el decenio de 1950 no se hayan registrado eventos del ENSO. Una explicación a lo anterior es que el efecto de dicho fenómeno en modular la precipitación de la década de 1950, no influyó de manera significativa para esta parte de la cuenca; no obstante, es un periodo que representa la sequía más importante de los pasados 400 años para esta región del norte de México, por el extenso periodo (16 años) con precipitaciones menores a la media.

Durante el decenio de 1950 se registraron cinco importantes eventos del ENSO, tres eventos El Niño (1951-1952, 1953, 1957-1958) y dos eventos La Niña (1950-1951, 1954-1956) (Trenberth, 1997 y Magaña *et al.*, 1999). La combinación de esta variabilidad del ENSO pudo haber propiciado todo un decenio de precipitaciones muy por debajo de la media. Aunque estos eventos no representaron un incremento o decremento significativo, la combinación de ambos fenómenos propició la sequía más intensa de los pasados 400 años para la parte alta de la cuenca del Nazas, con intensas repercusiones

although it is important to point out that patterns in the anomalies are not always exactly the reverse, as significant increases or decreases in rainfall are not always produced (Magaña *et al.*, 1999).

For example, during the period 1993-1996 there was a severe drought in northern Mexico due to an El Niño event (1993-1994), during which time a 40 to 50 % rainfall deficit was recorded in HR 36 (a non-significant increase in rain). The drought was prolonged and became even more severe as a result of a La Niña event in 1995-96, during which time the states of Chihuahua, Coahuila and Durango lost from 10 to 25 % of their cattle. This explains why the water level in the Lazaro Cardenas dam (storage of runoffs from the upper Nazas River watershed) in June 1996 reached the lowest level in its history and the irrigated area in the Comarca Lagunera was reduced by half for the 1996 agricultural cycle (Descroix *et al.*, 1997 and Trenberth, 1997).

Precipitation in the upper watershed decreased significantly for the periods 1974-1975 and 1988-1989. The reduction in the first period was the most dramatic in the last 250 years (Figure 5). The period 1954-1956, for its duration, is regarded as one of the La Niña events with major impacts on precipitation (Figure 5). According to NOASS (National Oceanic and Atmospheric Administration) records for the period 1950 to 1991, the longest La Niña events were recorded in the years 1954-1956 and 1974-1975 (Figures 2 and 5).

Trenberth (1977) notes that in the 1950s the occurrence of two of the most intense ENSO events in its cold phase, in 1950-1951 and 1954-1956, led to significant rainfall reductions in this part of northern Mexico and influenced precipitation variability, but not significantly.

Based on the wavelet coherence analysis, the period from 1951 to 1969 does not show a significant ($P > 0.05$) association between the two variables; this does not imply that in the 1950s no ENSO events were recorded. One explanation for this is that the effect of this phenomenon in modulating precipitation in the 1950s did not significantly affect this part of the watershed; however, it is a period which includes the most significant drought of the past 400 years for this region of northern Mexico, due to the long period (16 years) with lower than average rainfall.

During the 1950s there were five major ENSO events, three El Niño events (1951-1952, 1953, 1957-1958) and two La Niña ones (1950-1951, 1954-1956) (Trenberth, 1997 and Magaña *et al.*, 1999). This ENSO combination may have led to a full decade of rainfall well below average. Although these events did not account for a significant increase or decrease, the combination of these two phenomena led to the worst drought of the past 400 years in the upper Nazas watershed, with strong repercussions

en la sociedad de la Comarca Lagunera. Florescano y Swan (1995) señalan los años 1953, 1956 y 1957 con sequía severa y los ubican entre los siete años con menor precipitación en el siglo XX.

Las sequías de 1956 y 1957 ocasionaron desempleo y migración, así como movilizaciones campesinas. La sequía de 1956, afectó a más de 60,000 campesinos en el norte de México, lo que favoreció la emigración. El grado de afectación de esta sequía tuvo un impacto grave particularmente en la Comarca Lagunera al verse paralizadas las labores agrícolas ante la escasez de agua. En 1957, la sequía se agudizó y se extendió al centro de México e incrementó el desempleo y la emigración. Derivado de esta anomalía climática, en la Comarca Lagunera tuvo lugar una de las luchas campesinas más sobresalientes que se extendió hasta principio de los años 1960 (Florescano, 1980).

CONCLUSIONES

La precipitación en la parte alta de la cuenca del Río Nazas es modulada por ENSO, tanto en su fase fría al provocar intensas sequías, como en su fase cálida al propiciar incrementos importantes en la pluviometría de la región. La fase fría de ENSO provocó una disminución de la precipitación en los períodos 1974-1975 y 1988-1989, a un nivel sin precedente en los últimos 250 años. De igual manera, la fase cálida de ENSO ha propiciado, de manera reciente, incrementos importantes en la precipitación en los años 1987, 1992 y 1997.

El análisis espectral de coherencia de ondeletas, para las variables precipitación reconstruida e índices del ENSO 3.4 en los últimos 100 años (1900-2000), indicó que durante el período de 1900-1950, el ENSO influyó de forma significativa ($P < 0.05$) sobre la variabilidad de la precipitación a frecuencias de 1 a 14 años y de 1986-2000 a frecuencias en los rangos de 1 a 2 y de 6 a 8 años.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento otorgado por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático (IAI), a través del proyecto CRN # 2047 Documentación, Entendimiento y Proyección de los Cambios en el Ciclo Hidrológico en la Cordillera Americana, a su vez financiado por el US/National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

LITERATURA CITADA

CASO, M.; GONZÁLEZ-ABRAHAM, C.; EZCURRA, E. 2007. Divergent ecological effects of oceanographic anomalies on terrestrial ecosystems of the Mexican Pacific coast. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 104: 10530-10535 pp.

on society in the Comarca Lagunera. Florescano and Swan (1995) note that the years 1953, 1956 and 1957 experienced severe drought and are among the seven years with the lowest precipitation in the twentieth century.

The droughts of 1956 and 1957 led to unemployment, migration and peasant movements. The 1956 drought affected more than 60,000 peasants in northern Mexico, resulting in emigration. The degree of damage caused by this drought had a particularly serious impact on the Comarca Lagunera by paralyzing farming due to water scarcity. In 1957, the drought worsened and spread to central Mexico, thereby increasing unemployment and emigration. As a result of this climatic anomaly, a peasant struggle occurred in the Comarca Lagunera that lasted until the early 1960s (Florescano, 1980).

CONCLUSIONS

Precipitation in the upper Nazas River watershed is modulated by ENSO, both in its cold phase by causing severe droughts and in its warm phase by resulting in significant rainfall increases in the region. The ENSO cold phase caused a decrease in precipitation in the periods 1974-1975 and 1988-1989, to a level unprecedented in the last 250 years. Similarly, the ENSO warm phase has recently led to significant rainfall increases, specifically in the years 1987, 1992 and 1997.

Spectral analysis of wavelet coherence, for the reconstructed precipitation variables and ENSO 3.4 indices in the last 100 years (1900-2000), indicated that during the period from 1900-1950 ENSO significantly ($P < 0.05$) influenced precipitation variability at frequencies of 1 to 14 years, and from 1986-2000 at frequencies in the ranges of 1 to 2 and 6 to 8 years.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was made possible thanks to funding provided by the Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), through project CRN # 2047 entitled Documenting, Understanding and Projecting Changes in the Hydrological Cycle in the American Cordillera, which was in turn funded by the U.S. National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

End of English Version

CERANO-PAREDES, J.; VILLANUEVA-DÍAZ, J.; FULÉ, P. Z.; ARREOLA-ÁVILA, J. G.; SÁNCHEZ-COHEN, I.; VALDEZ-CEPEDA, R. D. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 15 (2): 27-44 pp.

CLEAVELAND, M. K.; STAHL, D. W.; THERRELL, M. D.;

- VILLANUEVA-DÍAZ, J.; BURNS, B. T. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388 pp.
- DESCROIX, L.; NOUVELOT, J. F.; ESTRADA, J. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. Folleto Científico No. 8. INIFAP-ORSTOM. 52 pp.
- DÍAZ, H. F.; MARKGRAF, V. 1992. *El Niño. Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge Univ. Press. 476 pp.
- FEIN, J. S.; STEPHENS, P. L. 1987. *Monsoons*. Wiley-Interscience Publication, New York. 632 pp.
- FLORESCANO, E. M. 1980. Análisis Histórico de las Sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México. 123 pp.
- FLORESCANO, E.; SWAN, S. 1995. Breve Historia de la Sequía en México. Universidad Veracruzana. México. 246 pp.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. *Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC)*. Software. Jiutepec, Morelos, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1980. Serie de mapas de hidrología superficial, escala 1:250000. Aguascalientes. México.
- LOYER, J. Y.; ESTRADA, J.; JASSO, R.; MORENO, L. (Ed). 1993. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36. Ediciones INIFAP CENID RASPA y el ORTSOM. Gómez Palacio Durango, México. 367 pp.
- MAGAÑA, V.; PÉREZ, J. L.; VÁZQUEZ, J. L.; CARRIZOSA, E.; PÉREZ, J. 1999. Los Impactos del Niño en México. Editado por V. Magaña. Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D. F. 229 pp.
- MAGAÑA, V.; VÁZQUEZ, J. L.; PÉREZ, J. L.; PÉREZ, J. B. 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42: 313-330 pp.
- MATHWORKS. 2002. Software matemático. MATLAB Versión 6.5.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1970. *Boletín Hidrológico Número 35*. Tomos I y II. México D. F.
- STAHLE, D. W.; CLEVELAND, M. K. 1993. Southern Oscillation extremes reconstructed from tree-rings of the Sierra Madre Occidental and Southern Great Plains. *Journal of Climate* 6: 129-140 pp.
- STAHLE, D. W.; D'ARRIGO, KRUSIC, P. J.; CLEVELAND, M. K.; COOK, E. R.; ALLAN, R. J.; COLE, J. E.; DUNBAR, R. B.; THERRELL, M. D.; GAY, D. A.; MOORE, M. D.; STOKES, M. A.; BURNS, B. T.; VILLANUEVA-DIAZ, J.; THOMPSON, L. G. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(10): 2137-2152 pp.
- TRENBERTH, K. E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78. 2771-2777 pp.
- VILLANUEVA-DÍAZ, J.; STAHLE, D. W.; LUCKMAN, B. H.; CERANO-PAREDES, J.; THERRELL, M. D.; CLEVELAND, M. K. 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climate Change* 83: 117-131 pp.
- VILLANUEVA-DÍAZ, J.; FULÉ, P. Z.; CERANO-PAREDES, J.; ESTRADA-AVALOS, J.; SÁNCHEZ-COHEN, I. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Ciencia Forestal en México* 34 (105): 37-69 pp.