

**TELECONEXIONES DE ÍNDICES OCÉANO-ATMOSFÉRICOS DE
EL NIÑO/OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) A LAS ANOMALÍAS DE
PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN MÉXICO**

RAFAEL LOYO MELCHOR

TESIS

Presentada como requisito parcial obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

PROGRAMA DE GRADUADOS



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Marzo 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**“TELECONEXIONES DE ÍNDICES OCÉANO-ATMOSFÉRICOS DE EL
NIÑO/OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) A LAS ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN Y
TEMPERATURA EN MÉXICO”**

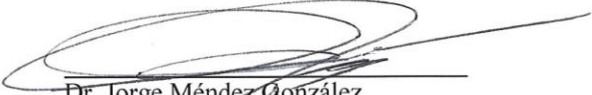
T E S I S

RAFAEL LOYO MELCHOR

**Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y Aprobada como
requisito parcial para optar al grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
COMITÉ PARTICULAR**

Asesor Principal:

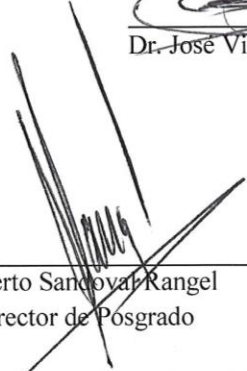

Dr. Jorge Méndez González

Asesor:


Dr. Alejandro Zarate Lupercio

Asesor:


Dr. José Villanueva Díaz


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Subdirector de Posgrado

Saltillo, Coahuila, México, Marzo 2015

AGRADECIMIENTOS

Al Pueblo Mexicano

Que en su trabajo y esfuerzo diario proporciona noblemente las condiciones materiales y económicas para que personas como yo continuemos preparándonos académicamente. Y para el cual, asumo conscientemente el compromiso adquirido al pertenecer a la clase profesionista mexicana de emplear el conociendo desarrollado siempre en beneficio de las generaciones presentes y futuras.

Y a todos los maestros, familiares, amigos e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación

DEDICATORIAS

A mi Madre

Por todo, desde donde estés, esto y mucho más por siempre...

COMPENDIO

TELECONEXIONES DE ÍNDICES OCÉANO-ATMOSFÉRICOS DE EL NIÑO/OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) A LAS ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN MÉXICO

POR

RAFAEL LOYO MELCHOR

TESIS

Presentada como requisito parcial obtener el grado de:

MAESTRIA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DICIEMBRE, 2014

Dr. Jorge Méndez González – Asesor principal

Palabras clave / Teleconexiones / Anomalías / ENOS / Precipitación / Temperatura

Se ha documentado que el comportamiento de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical (variabilidad interna climática) puede afectar la circulación general de la atmósfera a corto y largo plazo, en especial cuando actúan conjuntamente componentes océano-atmosféricos. Un claro ejemplo de ello es el fenómeno El

Niño/Oscilación del Sur (ENOS), el cual se caracteriza por presentar un calentamiento (El Niño) o bien un enfriamiento (La Niña) en la temperatura superficial del Océano Pacífico Ecuatorial Central, ocurriendo entre 2 a 7 años con una duración aproximada de 9 a 18 meses, siendo un modulador climático dominante en la región tropical y subtropical de América, incluso a escala global, manifestando un impacto considerable en diversos sectores productivos de cada país, con pérdidas eventuales de más de 2000 millones USD\$. Por lo cual, es de suma importancia desarrollar investigaciones que determinen posibles conexiones entre la variabilidad climática regional y el comportamiento del ENOS.

Esta investigación tiene como objetivos: 1) evaluar teleconexiones climáticas, (correlaciones existentes en tiempo y espacio de anomalías a gran escala separadas entre sí geográficamente) entre anomalías de precipitación (PP), temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN), con dos índices climáticos del ENOS: el Oceanic Niño Index (ONI) y el Trans Niño Index, empleado correlación de Pearson, “r” ($p \leq 0.10$) desde cero (A0) hasta dos años (A2), determinando ocurrencia e intensidad, a escala mensual, anual y espacial (1950 - 2011), analizando 581 estaciones climatológicas (*Ec*) distribuidas en todo México; y 2) analizar el comportamiento histórico de teleconectividad ONI y TNI con PP, TMAX y TMIN en dos periodos: PI (1951 - 1980) y PII (1981 - 2010). Los resultados demuestran mayor ocurrencia de teleconexión en A0 (16.26 % *Ec*) para el ONI, y en A2 (17.64 % *Ec*) para el TNI, incluyendo PP, TMAX y TMIN. Teleconectividad en PP: ONI > TNI (con 2.76 % de *Ec*), en TMIN: TNI > ONI (3.43 % de *Ec*), manifestándose con correlación positiva/negativa ($0.20 > |r| < 0.50$) durante invierno/verano, en el centro-oeste y

noroeste del país/centro, noreste y Golfo de México, respectivamente. Se observan cambios importantes en los últimos años (1981 - 2010) en el número de *Ec* con correlación significativa ($p \leq 0.10$) entre ONI y TNI y algunas variables climáticas, pero también en el grado de teleconectividad, lo anterior sugiere mejores pronósticos climáticos futuros en México utilizando el ONI y TNI.

COMPENDIUM

**TELECONNECTIOS OF OCEAN-ATMOSPHERIC EL NIÑO SOUTHERN
OSCILLATION (ENSO) INDICES TO PRECIPITATION AND TEMPERATURE
ANOMALIES IN MEXICO**

BY

RAFAEL LOYO MELCHOR

TESIS

Presentada como requisito parcial obtener el grado de:

MAESTRIA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DICIEMBRE, 2014

Dr. Jorge Méndez González – Asesor principal

Key words / Teleconnections / Anomalies / ENSO / Precipitation / Temperature

It has been documented that the behavior of sea surface temperature in the tropical Pacific (climate internal variability) can affect the general circulation of the atmosphere in the short and long term, especially when acting together ocean-

atmospheric components. A clear example is El Niño / Southern Oscillation (ENSO), which is characterized by a warm (El Niño) or cooling (La Niña) in the surface temperature of Central Equatorial Pacific Ocean, occurring between 2-7 years with approximately 9 to 18 months, being a key modulator in the climate in tropical and subtropical regions, even globally, manifesting a significant impact on various productive sectors of each country, with possible loss of more than \$ 2 billion USD. Therefore, it is important to develop research to determine possible connections between regional climate variability and ENSO behavior.

The objectives of this research are: 1) To assess climatic teleconnections (correlations in time and space of anomalies separated geographically in big scale) between precipitation anomalies (PP), maximum temperature (TMAX) and minimum temperature (TMIN), with two ENSO climate indices, ONI and TNI, using Pearson correlation analysis “r” ($p \leq 0.10$) employing two correlation lags (A1-A2) from the actual year (A0) up to two years to determine occurrence and intensity, on a monthly, annual and spatial scale (1950 - 2011) considering 581 weather stations (Ec) distributed throughout Mexico. 2) To analyze the historical behavior of teleconnectivity to ONI and TNI with PP, TMAX and TMIN in two periods: PI (1951 - 1980) y PII (1981 - 2010). The results show higher occurrence of teleconnection in A0 (16.26 % Ec) for ONI, in regard to TNI, A2 (17.64 % Ec), including PP, TMAX y TMIN. Teleconnectivity to PP: ONI > TNI (with 2.76 % Ec), respecting TMIN: TNI > ONI (3.43 % Ec) manifesting positive/negative correlation ($0.20 > |r| < 0.50$) during winter/summer, in the center-west and northwest/central, northeastern and Gulf of Mexico, respectively. Significant changes were observed in recent years (1981 - 2010) respecting Ec with significant

correlations ($p \leq 0.10$) among ONI and TNI and some climatic variables, but also to the level of teleconnectivity, this suggests better future climate forecasts in Mexico using ONI and TNI.

INDICE

INDICE	XI
INDICE DE CUADROS.....	XIII
INDICE DE FIGURAS.....	XIV
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	3
Hipótesis de trabajo.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (descripción).....	4
Descripción y distribución geográfica de las regiones de El Niño/Oscilación del Sur.....	6
Descripción de los Índices Oceánicos-atmosféricos ENOS más comunes.....	7
Estudios relacionados con El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).....	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
Descripción físico-climática del área de estudio.....	13
Fuente de datos.....	13
Procedimientos y análisis estadístico.....	15
a) Ordenamiento y estandarización de la información.....	15
b) Evaluación de la ocurrencia temporal y espacial de la teleconectividad del ONI y TNI a las variables climáticas.....	16
c) Evaluación de intensidad de la teleconectividad entre el ONI y TNI a las variables climáticas.....	16
d) Evaluación histórica de la teleconectividad en ocurrencia e intensidad del ONI y TNI a las variables climáticas.....	17
IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
Teleconectividad del ONI a PP, TMAX y TMIN en México: escala temporal y espacial.....	18
Teleconectividad del TNI a PP, TMAX y TMIN en México: escala temporal y espacial.....	20
Intensidad de la teleconectividad entre ONI y TNI a variables climáticas.....	24

Teleconectividad histórica del ONI y TNI a PP, TMAX y TMIN en México.....	26
V. CONCLUSIONES	28
VI. RESUMEN	29
VII. REFERENCIAS	33

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Coordenadas geográficas de las regiones del ENOS	7
Cuadro 2. Comparación de medias de “ <i>r</i> ” entre Oceanic Niño Índice y Trans Niño Index a precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en México (1940 - 2011)..	25
Cuadro 3. Comparación de medias de “ <i>r</i> ” entre Oceanic Niño Índice y Trans Niño Index a precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en México, en dos periodos de tiempo	27

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Condiciones océano-atmosféricas del ENOS	5
Figura 2. Distribución de las regiones ENOS	6
Figura 3. Distribución geográfica de 581 estaciones climatológicas utilizadas en este estudio.	14
Figura 4. Comportamiento promedio anual del Oceanic Niño Index (ONI) y Trans Niño Index (TNI). Ambos índices normalizados (1950 - 2013).....	15
Figura 5. Porcentaje de estaciones climatológicas con correlación estadísticamente significativa ($p \leq 0.10$ y $-1 \leq r \leq 1$) a escala anual (barras) y mensual (líneas), entre ONI (izquierda) y TNI (derecha) con precipitación (PP), temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN).....	21
Figura 6. Porcentaje de estaciones con correlación positiva y negativa (barras) del ONI y TNI con precipitación (A - E), temperatura máxima (B - F), temperatura mínima (CD - G) y número de eventos cálidos y fríos registrados de 1950 - 2013 (líneas).....	22
Figura 7. Patrones geográficos de correlación ($p \leq 0.10$) del Oceanic Niño Index (ONI) a precipitación (A), temperatura máxima (B) y mínima (C) en México, periodo 1950 - 2011.....	23
Figura 8. Patrones geográficos de correlación ($p \leq 0.10$) del Trans Niño Index (TNI) a precipitación (A), temperatura máxima (B) y mínima (C) en México, periodo 1950 - 2011.....	24

I. INTRODUCCIÓN

El clima es un recurso natural de gran complejidad, representa la respuesta a constantes interacciones entre la atmósfera, océanos, capas de hielo polar, continentes y vida en el planeta (Conde, 2006). Históricamente, el clima ha manifestado cambios a lo largo y ancho del planeta (Buendía, 2012) razón por la cual se han desarrollado diversos enfoques de estudio a fin de documentar las numerosas inconsistencias climáticas (Jáuregui, 1997). En la actualidad estos cambios pueden ser evaluados mediante el estudio de la variabilidad climática, denotando así las variaciones del estado medio del clima a escalas espaciales y temporales (IPCC, 2007; García-Páez y Cruz-Medina, 2009), bajo este contexto, se ha documentado que el comportamiento de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical (variabilidad interna) puede afectar la circulación general de la atmósfera a corto y largo plazo, en especial cuando actúan conjuntamente componentes océano-atmosféricos (Birk *et al.*, 2010). Un claro ejemplo de ello es el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) el cual se caracteriza por presentar un calentamiento (El Niño) o bien un enfriamiento (La Niña) en la temperatura superficial del Océano Pacífico Ecuatorial Central (Santos, 2006), ocurriendo entre 2 a 7 años (De la Lanza y Galindo, 1989; Pereyra *et al.*, 1994; Hanley *et al.*, 2003; Cane, 2005; Santos, 2006) con una duración aproximada de 9 a 18 meses (Guevara, 2008), cuya ocurrencia se ha manifestado en la historia del planeta desde hace 130, 000 años (Hughen *et al.*, 1999; Tudhope *et al.*, 2001) incluso, Huber y Caballero (2003) lo datan hacia la época del Eoceno.

Importante precedente para esta investigación son los estudios que han determinado que a partir de mediados de la década de los 70's han existido cambios en eventos ENOS, con una tendencia a mayores episodios Niño, lo que coincide en apariencia con un incremento en la temperatura global (Fedorov y Philander, 2000; Folland *et al.*, 2001; Tsonis *et al.*, 2003; Jones y Mann, 2004), otros investigadores han tratado de dilucidar si el comportamiento del ENOS moderno está influenciado por el calentamiento global antropogénico o tan solo sigue su evolución climática natural (Gergis y Fowler, 2005).

Magaña y Ambrizzi (2005) se refieren al ENOS como un importante modulador del clima en la región tropical y subtropical en América, no obstante, la literatura lo ha llegado a describir como un modo dominante de variabilidad climática (Davey *et al.*, 2014) con afectación a escala global (Hernández, 2002; Magaña *et al.*, 2003; Gergis y Fowler, 2005) lo que tiene un efecto significativo en diversos sectores productivos de cada país, con pérdidas eventuales de más de 2000 millones USD\$ (Delgadillo *et al.*, 1999). Es por ello que en los últimos años la comunidad científica ha profundizado aún más en el estudio del ENOS, con especial interés en la determinación de teleconexiones climáticas, definidas como las correlaciones existentes en tiempo y espacio de anomalías a gran escala separadas entre sí geográficamente (Glantz *et al.*, 1991), pero también para mejorar las predicciones de modelos climáticos existentes.

Objetivos

1. Evaluar las teleconexiones climáticas entre anomalías de precipitación (PP), temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN), con dos índices climáticos del ENOS: el Oceanic Nino Index (ONI) y el Trans Nino evaluar desde cero (A0) hasta dos años (A2), determinando ocurrencia e intensidad, a escala mensual, anual y espacial (1950 - 2011).

2. Evaluar el comportamiento histórico de teleconectividad ONI y TNI con PP, TMAX y TMIN en dos periodos: PI (1951 - 1980) y PII (1981 - 2010) en cuanto a ocurrencia e intensidad de teleconexión.

Hipótesis de trabajo

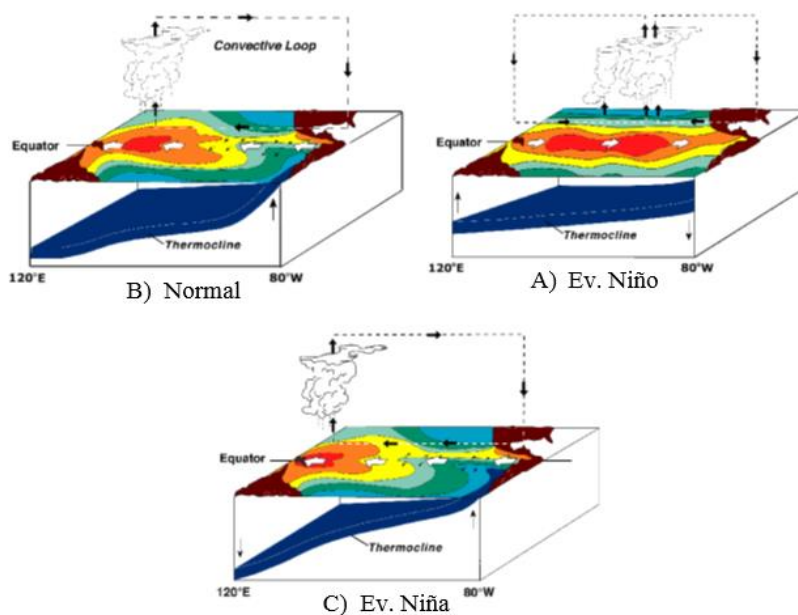
La hipótesis establece teleconexiones climáticas geográficamente consistentes en signo de correlación, misma magnitud temporal y espacial.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (descripción)

El fenómeno ENOS manifiesta su ocurrencia geográfica sobre el Océano Pacífico Ecuatorial Central (Santos, 2006) y se constituye como una interacción oceánico-atmosférica en la cual confluyen diversos factores como la intensidad y dirección de los vientos alisios, la temperatura superficial del mar, presión atmosférica superficial, temperatura del aire, pluviosidad y nivel del mar (Castillo-Briceño *et al.*, 2004). En condiciones normales (sin evento ENOS) los vientos alisios soplan desde dos regiones de alta presión ubicadas en el borde oriental del Pacífico (una frente a Chile en el hemisferio Sur y otra en la Costa Occidental de Norte América en el hemisferio Norte) en dirección hacia la región de baja presión ubicada en el borde occidental del Pacífico en la zona de Australia (Bjerknes, 1966) empujando con ello las aguas costeras hacia el Pacífico Occidental siendo remplazadas por aguas superficiales frías y ricas en nutrientes conocidas como surgencias, ocasionando con esto que la termoclina cercana a la costa del Pacífico oriental tropical sea muy somera y fría y en el extremo occidental profunda y caliente. (Mann y Lazier, 1996; Glantz, 2001). Ante la presencia de un evento Niño (fase caliente) los patrones en la presión se invierten, disminuyendo en la zona del Pacífico Oriental y aumentando en la zona occidental, trayendo consigo un debilitamiento anómalo e inversión en la dirección de los vientos alisios, ocasionando una onda interna Kelvin en la zona del Pacífico Occidental que viaja por el ecuador hacia el Pacífico Oriental Tropical hundiéndose la termoclina calentando las aguas del

Pacífico Ecuatorial Tropical y las aguas costeras frente a Ecuador y Perú. Ante un evento Niña (fase fría) el patrón de dirección de los vientos alisios se restablece a condiciones normales pero acompañados de aumentos en velocidad de circulación en dirección al Pacífico Occidental, disminuyendo la temperatura superficial del mar en la zona del Pacífico Oriental, con ello aumentan las surgencias y la termoclina se hace somera, presentándose un comportamiento inverso en el Pacífico Occidental (Glantz, 2001). (Figura 1).



Dónde: A) condiciones normales, B) evento Niño/fase cálida y C) evento Niña/fase fría; área en color rojo = área cálida, área de color azul = área fría, esquema de nubes = zona de precipitaciones, flechas negras = dirección de la circulación convectiva, flechas blancas = dirección de masas de agua por los vientos alisios. (Imagen tomada del portal http://www.pmel.noaa.gov/tao/el_nino/nino_normal.html).

Figura 1. Condiciones océano-atmosféricas del ENOS

Descripción y distribución geográfica de las regiones de El Niño/Oscilación del Sur

Para un mejor estudio y monitoreo de la actividad de ENOS, el Océano Pacífico Ecuatorial oriental, central y occidental es comúnmente seccionado en 4 regiones: las regiones 4 y 3 se encuentran ubicadas en la zona del Pacífico Occidental y se caracterizan por presentar las máximas anomalías de temperatura superficial del mar, la región 3.4 se considera una subregión comprendida entre las regiones Niño 4 y 3 y representa un buen indicador de la correlación entre la temperatura superficial del mar y el índice de Oscilación del Sur. En cuanto a la región 1+2 se incluyen las costas de Perú y Ecuador, incluidas las islas Galápagos y representa un buen indicador de los cambios inducidos por el Niño en los patrones de variabilidad de la costa del Pacífico ecuatorial (Jiménez, 2008). La ubicación de dichas regiones se especifica esquemáticamente en la Figura 2 y las coordenadas geográficas en el Cuadro 1.

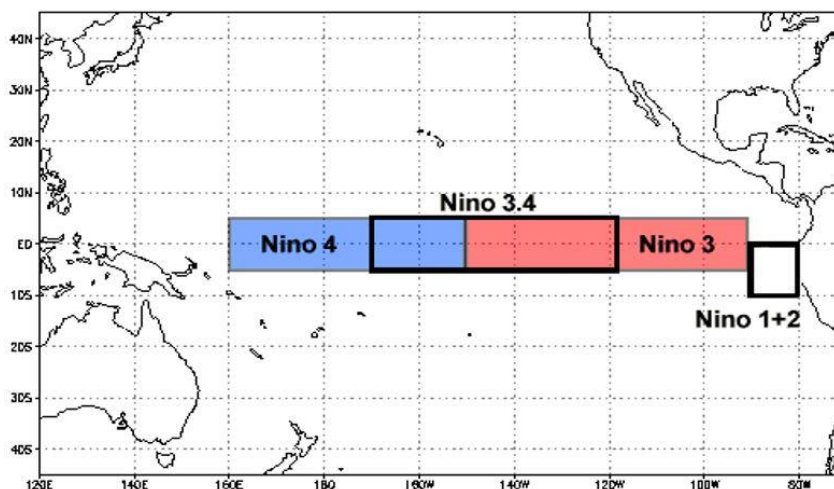


Figura 2. Distribución de las regiones ENOS

Cuadro 1. Coordenadas geográficas de las regiones del ENOS

Región	Latitud	Longitud
Región Niño 1+2 (N1+2)	0° a 10° S	80°W a 90°W
Región Niño 3 (N3)	5°N a 5° S	90°W a 150°W
Región Niño 4 (N4)	5°N a 5° S	120°W a 170°W
Región Niño 3.4 (N.,4)	5°N a 5° S	160°W a 150°W

Descripción de los Índices Oceánicos-atmosféricos ENOS más comunes

Con el fin de identificar y conceptualizar cuantitativamente el comportamiento del ENOS en sus dos fases (cálida y fría) en la literatura se describen índices basados en anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) como en diferencia de presión atmosférica sobre el Océano Pacífico (Guevara, 2008).

Algunos Índices Oceánicos basados en la TSM son:

1. **El Criterio del Servicio Meteorológico del Japón (JMA, Japan Meteorological Agency).** Emplea el índice Niño 3 (o índice JMA) calculado mediante el promedio móvil de las anomalías de la temperatura superficial del mar (ATSM, referidas al período 1971/2000), de cinco meses consecutivos en la región Niño 3. Un Niño o Niña ocurre cuando hay una secuencia de al menos 6 índices mensuales Niño 3, cada uno con valor igual o mayor que 0.5 °C (igual o menor que -0.5 °C) en la región Niño 3 del Pacífico ecuatorial (5° N a 5° S y 90°W a 150°W).

2. El criterio de Trenberth (1997). Emplea el índice Niño 3.4, referido a la región Niño 3.4 (5° N a 5° S y 120°W a 170°W). Este índice es la media móvil de 5 meses de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar, en relación con la media del período 1950-1979. Un evento Niño ocurre cuando hay una secuencia de al menos 6 índices, cada uno con valor mayor o igual que 0.4° C (y una Niña, menor o igual que -0.4°C).

3. El Oceanic Niño Index (ONI). Criterio del Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) es conocido corrientemente como El Niño oceánico y se obtiene mediante el promedio móvil de la anomalía de la temperatura de la superficie del mar, en relación con el período de referencia 1971-2000, con tres meses sucesivos: la anomalía del mes, la anomalía del mes que le antecede y la del mes que le sigue, en la región Niño 3.4 (5° N a 5° S y 120°W a 170°W). Un evento Niño será la secuencia en la región Niño 3.4 de al menos 5 ONI, cada uno con magnitud mayor o igual que 0.5 °C. Un evento Niña será la secuencia de al menos 5 ONI cada uno con magnitud igual o menor que -0.5°C.

4. El Trans Niño Index (TNI) de Trenberth y Stepaniak. Es la diferencia entre los índices mensuales normalizados Niño 1+2 y Niño 4, y esta diferencia suavizada (s) con media móvil de 5 meses, y luego, normalizada (n) con la desviación estándar anual de las serie de esas diferencias tomando como período de referencia 1950/1979. Habrá un evento Niño, si hay una secuencia de al menos 6 TNI cada uno con valores

igual o mayor que 0.4°C ; y un evento Niña, si hay una secuencia de al menos 6 TNI, cada uno con valores igual o menor que -0.4°C).

Algunos índices oceánicos basados en la diferencia de presión atmosférica sobre el Océano Pacífico son:

1. El índice de la Oscilación del Sur (IOS). El Niño y la Niña ocurren en conexión con un sube y baja de presión atmosférica en el océano Pacífico tropical Occidental y el Pacífico tropical oriental (Bjerknes, 1969). Se encuentra definida como la fluctuación interanual irregular de gran escala que refleja un intercambio de masa atmosférica entre la baja presión atmosférica ecuatorial de Indonesia y el anticiclón subtropical del Pacífico del Sur- este (Treberth, 1997). Este índice es el más empleado y conocido en la identificación de El Niño y La Niña, siendo definido como la diferencia de presión atmosférica (al nivel del mar) estandarizada entre la estación Papeete, Taití ($17^{\circ}35\text{S}-149^{\circ}37\text{W}$), en la Polinesia Francesa y la estación de Darwin ($12^{\circ}26\text{S}-130^{\circ}52\text{E}$), en Australia. Con base al SOI en la literatura se describen tres criterios de aplicación:

- a) **El IOS NOAA.** Contiene doble estandarización. El índice es la estandarización de la diferencia de anomalía mensual estandarizada, de la presión atmosférica reducida al nivel del mar, en Taití y Darwin.
- b) **El índice IOS de Troup.** Es la diferencia de anomalía mensual de la presión atmosférica reducida al nivel del mar, en Taití y Darwin, estandarizada con la desviación estándar de esa diferencia.

- c) **El índice IOS de Trenberth.** Es la diferencia de anomalía mensual estandarizada de la presión atmosférica reducida al nivel del mar, en Taití y Darwin, empleando la desviación estándar, no de las series mensuales, sino de las series anuales de estas localidades.

Estudios relacionados con El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)

Ropelewski y Halpert (1986) con el objetivo de identificar los patrones típicos de asociación de precipitación y temperatura al ENOS para Norte América, estructuraron mapas de vectores empleando análisis armónico tomando como referencia el ENOS 1982-1983, reportando precipitaciones por arriba de lo normal de octubre a marzo para el sureste de E.U y norte de México, y de abril a octubre para la parte oeste de E.U. En cuanto a temperatura, zonas de Alaska y el oeste de Canadá experimentan anomalías positivas de diciembre a marzo, caso contrario para la región sureste de E.U cercana al Golfo de México, donde se registran anomalías negativas de octubre a marzo.

Salinas *et al.* (1998), estudiaron las condiciones de aridez del noroeste mexicano correlacionando el Índice de Cobertura Árida Anual (ICAA) con la temperatura superficial del mar (TSM) en el área de la corriente de California, con el fenómeno ENOS utilizando el índice de Oscilación de Sur (IOS) y con el Índice del Pacífico de Norteamérica (PNA por sus siglas en ingles), concluyendo que el fenómeno IOS explica el 17 % de la variabilidad climática del objeto de estudio, en cuya fase negativa (Niño) el ICAA tiende a disminuir, y ante una fase positiva (Niña) este tiende a aumentar.

Magaña (2003), evaluó el impacto del ENSO sobre la precipitación en México, utilizando capas meteorológicas integradas por información media mensual de diversas variables climatológicas (viento, presión atmosférica, temperatura sobre el nivel del mar) estructuradas bajo el periodo de 1958-1999, empleando análisis de interpolación con el método de krigado y creando capas con diversos patrones de composición, teniendo en cuenta la información de 6 eventos niño y niña para el invierno y para el verano (1965, 1972, 1982, 1986, 1991 y 1997), concluyendo que durante inviernos El Niño (La Niña), la precipitación aumenta (disminuye) en el noroeste de México, mientras que disminuye (aumenta) en el Istmo de Tehuantepec.

Tiscareño *et al.* (2003) realizaron un estudio encaminado a conocer la influencia del ENSO respecto a la producción de cultivos agrícolas básicos mediante el empleo de un modelo de simulación, tomando en cuenta información climatológica de 275 estaciones distribuidas en el territorio mexicano y el índice de temperatura TAI (Thermal Anomaly Index) desarrollado por la Agencia Meteorológica de Japón para clasificar los episodios del ENSO, (cuyos criterios para definir episodios Niño y Niña son muy similares al TNI), y concluyeron que las regiones áridas y semiáridas son predispuestas a presentar incrementos en la temperatura durante todas las estaciones ya se presentaran episodios Niño o Niña.

Méndez *et al.* (2007) evaluaron la teleconectividad espacial y temporal del Índice Multivariado del ENOS (MEI por sus siglas en inglés) a las anomalías de precipitación y temperatura máxima y mínima en México, reportando importantes teleconexiones de diciembre a febrero en regiones áridas y semiáridas del noreste de

México, concluyendo que el MEI presenta una considerable influencia en el clima a escalas regionales.

Kennedy *et al.* (2009) Investigaron las características climáticas a gran escala que afectan a la variabilidad hidrológica interanual de arroyos que desembocan en Lago Upper Klamath en Oregon, EE.UU. Con el objetivo de reducir la incertidumbre al evaluar las predicciones sobre el caudal estacional, se analizaron las teleconexiones de 6 índices climáticos, entre ellos el TNI, siendo este el único índice que mostro correlaciones estadísticamente significativas a la fase cálida (1978-a la fecha) de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) específicamente a finales de otoño e inicio de invierno, reflejándose con mayor precipitación en este periodo.

Birk *et al.* (2010) examinaron registros históricos de temperatura y precipitación en la región del Medio Oeste de los EUA con el propósito de determinar si la variabilidad interdecadal asociada con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) modula la variabilidad interanual de los climas de esta región asociados con el ENSO, encontrando variabilidades significativas asociadas al ENSO en series temporales de 3 a 7 años e interdecadales entre 12 y 15 años, esto lleva a la conclusión de que el ENSO tiene diferentes niveles de incidencia a lo largo del tiempo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción físico-climática del área de estudio

El presente estudio se desarrolló para toda la República Mexicana, ubicada en su totalidad en el hemisferio norte (Figura 3), con una extensión territorial de 1, 964, 375 km² (INEGI, 2009). Gran parte del país presenta clima monzónico, lluvias en verano, invierno relativamente seco, las fluctuaciones en precipitación y temperatura se asocian a frentes fríos provenientes del norte durante el invierno y a la presencia de huracanes durante el verano (Magaña *et al.*, 2003), influyendo también la vertiente del Atlántico, más húmeda que la del Pacífico a consecuencia de los vientos alisios (Rzedowski, 2006). La precipitación contrasta desde 100 mm al noroeste y noreste del país, hasta 4000 mm en el sureste y costa sur del Pacífico (INEGI, 1994). Las temperaturas medias oscilan desde 32 °C hasta por debajo de 10 °C, sin embargo el 93 % del territorio nacional se encuentra en el rango medio de 10 y 26 °C (Magaña *et al.*, 2003).

Fuente de datos

Los datos de precipitación y temperatura fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, y corresponden a información diaria de más de 5000 estaciones climatológicas (*Ec*); en promedio, las series anuales inician desde 1940 y finalizan en 2011. La selección y evaluación de *Ec*, se sujetó a los criterios de calidad

recomendados para estudios climáticos (Alexander *et al.*, 2006; IPCC, 2007): como longitud de registro ≥ 50 años, contenido de más de 80 % de información, consistencia anual e interanual y homogeneidad de las series, lo que generó como resultado la selección de 581 estaciones distribuidas razonablemente por todo el país (Figura 3).

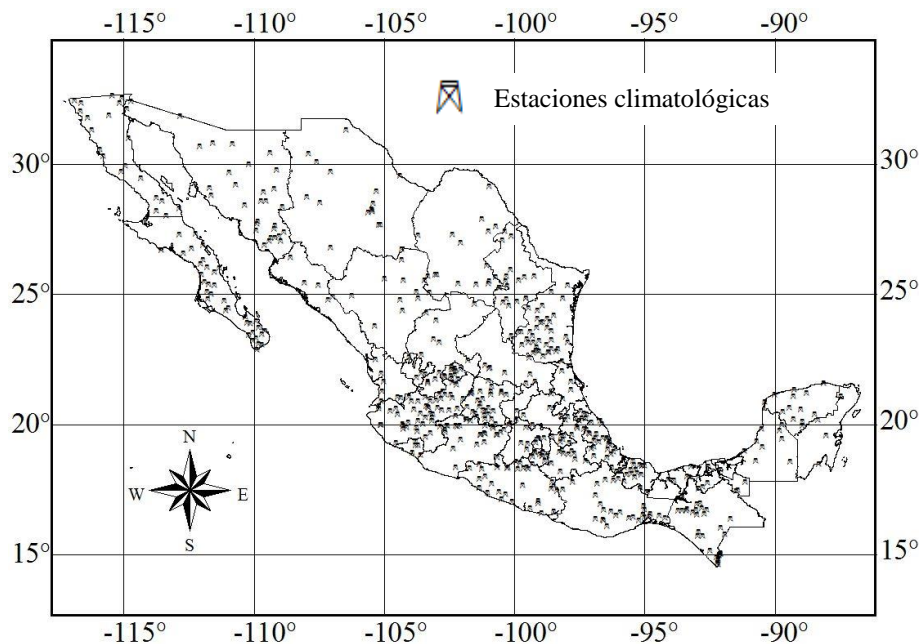


Figura 3. Distribución geográfica de 581 estaciones climatológicas utilizadas en este estudio.

Para este estudio, la caracterización del fenómeno ENOS se realizó con base a los índices climáticos ONI y TNI, el primero es descrito por Rifakis *et al.* (2005) como la anomalía promedio trimestral de la temperatura superficial del mar (en lo sucesivo SST, por sus siglas en inglés) para la región El Niño 3.4 al considerar como referencia el periodo 1971-2000 (Guevara, 2008). El segundo (TNI) es definido como la diferencia normalizada de SST entre en Niño 1+2 y Niño 4 (Trenberth y Stepaniak, 2001) donde el periodo de referencia es 1950-1979 (Guevara, 2008). Las series de tiempo de los índices

climáticos ONI y TNI fueron obtenidos de: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>, donde valores positivos definen fases cálidas (\geq a $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el ONI y \geq a $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el TNI) y valores negativos denotan fases frías (\geq a $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el ONI y \geq a $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el TNI); indicado por líneas continuas que superan la parte sombreada en Figura 4A y 4B.

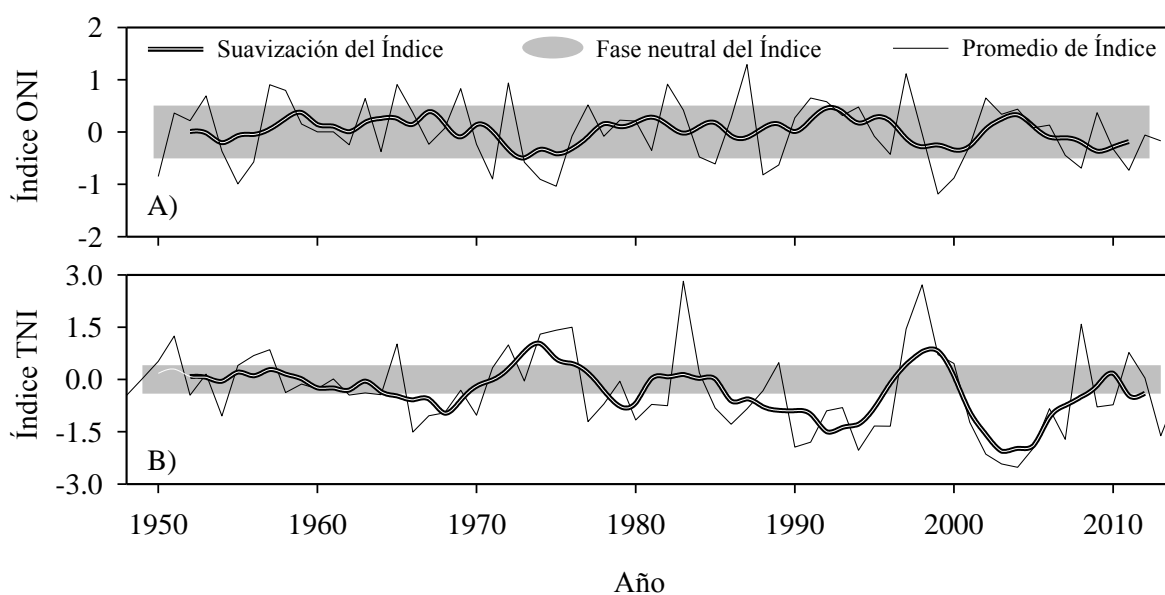


Figura 4. Comportamiento promedio anual del Oceanic Niño Index (ONI) y Trans Niño Index (TNI). Ambos índices normalizados (1950 - 2013).

Procedimientos y análisis estadístico

a) Ordenamiento y estandarización de la información

Una vez seleccionadas las *Ec* acorde a los criterios indicados, los datos fueron ordenados mediante macros en Excel, posteriormente en SAS (Statistical

Analysis System) v. 9.0, se obtuvieron las anomalías estandarizadas de precipitación (PP), temperatura máxima (TMAX) y temperatura mínima (TMIN) como lo han sugerido Pavia *et al.* (2006) acorde a la siguiente expresión: $\alpha = [x - \mu(x)]/\sigma(x)$, donde: x es la temperatura/precipitación del mes, $\mu(x)$ es su valor climatológico promedio, y $\sigma(x)$ es su desviación estándar.

b) Evaluación de la ocurrencia temporal y espacial de la teleconectividad del ONI y TNI a las variables climáticas

La teleconexión del ONI y TNI sobre anomalías de PP, TMAX y TMIN se evaluó aplicando correlación de Pearson “ r ” a un nivel de significancia del 90 %, a escala mensual (Méndez *et al.*, 2007; Kennedy *et al.*, 2009), además, se realizaron retardos de correlación (lags) a uno (A1) y dos años (A2) con el propósito de identificar la influencia anual/temporal anterior a los episodios ENOS; estos análisis se realizaron en SAS v. 9.0. Para determinar los patrones geográficos de las teleconexiones del ONI y TNI a PP, TMAX y TMIN se realizaron interpolaciones de “ r ” mediante ArcView 3.2, utilizando el método de IDW (Inverse Distance Weighted) conservando el valor y signo de “ r ” y asignando “0” a la correlación no significativa al nivel establecido ($p \geq 0.10$).

c) Evaluación de intensidad de la teleconectividad entre el ONI y TNI a las variables climáticas

Con el objetivo evaluar la intensidad de la teleconectividad del ONI y TNI a variables climáticas, los valores de $|r|$ con ($p < 0.10$) de cada variable climática (sin importar el mes), fueron sometidos a la prueba no paramétrica de KS ($\alpha = 0.05$)

(Kruskal-Wallis, 1952) comparando cada índice con respecto a cada variable (PP, TMAX y TMIN).

d) Evaluación histórica de la teleconectividad en ocurrencia e intensidad del ONI y TNI a las variables climáticas

Trenberth (1990) y Trenberth y Hurrell, (1994) documentaron un cambio en el régimen climático ocurrido en el invierno del '77 en el Océano Pacífico, manifestándose con un incremento de SST (Graham, 1994) trayendo consigo consecuencias climáticas de largo alcance (Steven y Mantua, 2000). Con el objetivo de evaluar posibles modificaciones en la ocurrencia e intensidad de teleconexión del ONI y TNI vs PP, TMAX y TMIN antes y después de este cambio de régimen, se obtuvo una muestra aleatoria de 10 % del total de *Ec*; después, los datos fueron separados en dos periodos de tiempo: PI: 1951 - 1980 y PII: 1981 - 2010, aplicando los procedimientos estadísticos indicados en los incisos anteriores.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Teleconectividad del ONI a PP, TMAX y TMIN en México: escala temporal y espacial

La media porcentual de estaciones climatológicas con teleconectividad estadísticamente significativa ($p \leq 0.10$ y $-1 \leq r \leq 1$) desde A0 hasta A2 en las tres variables climáticas (PP, TMAX y TMIN) oscila de 12.71 a 13.21 % del total de Ec (línea negra, Figura 5A- 5C) con r de 0.20 a 0.50. La teleconectividad actual (A0) del ONI a PP presenta el mayor porcentaje de Ec con correlación estadísticamente significativa (16.72 % del total) (barra oscura, Figura 5A), reportándose de noviembre a enero la teleconectividad más importante (Figura 5D) promediando 22.43 %, en cuyo periodo la teleconectividad es positiva (84.46 % de Ec ; $p \leq 0.10$) (Figura 6A), influyendo con aumento/disminución de PP ante episodios cálidos/fríos del ONI, especialmente en el centro-oeste y noroeste del país (Figura 7A). Ropelewski y Halpert (1986) coinciden con este hallazgo al demostrar que el periodo de octubre a marzo está altamente asociado a episodios ENOS, modificando la precipitación en el norte de México y sureste de E.U. Salinas *et al.* (1998), usando el índice de cobertura árida anual, reportan lluvia por arriba de lo normal para el noroeste de México durante fases cálidas del ENOS. Magaña *et al.* (2003) y Escobar *et al.* (2001) coinciden con este estudio al reportar aumento de precipitación invernal durante eventos El Niño en el norte del país.

Usando el Índice Multivariado del ENOS (MEI), Méndez *et al.* (2007) documentan un superávit de lluvia invernal en México durante eventos cálidos del mismo.

La TMAX muestra la mayor teleconectividad al ONI durante el año actual (A0) con 17.98 % del total de *Ec* (Figura 5B), donde enero, marzo y julio son los meses con mayor señal, que representan en promedio 24.26 % (Figura 5E), donde los primeros dos meses registran correlaciones negativas (76.97 % de *Ec* con $p \leq 0.10$); en el mes de julio predominan correlaciones positivas en un 98.36 % (ante un evento cálido del ONI, la TMAX aumenta) (Figura 6B) donde las regiones más afectadas son el centro-norte del país y costa del Pacífico (Figura 7B). La mayor influencia del ONI en TMIN en México se registra en A1 con 14.56 % del total de *Ec* (Figura 5C) donde el periodo estacional de julio a septiembre constituyen los meses con mayor teleconectividad con un promedio de 25.98 % (Figura 5F), con dominancia de correlación positiva (82.94 %) (Figura 6D), cuyos signos de teleconectividad ocurren sobre todo en la parte centro del país y costa de Golfo de México (mapas no presentados). No obstante durante A0, la TMIN también indica teleconexión con 14.09 % del total de *Ec* (Figura 5C), con una teleconectividad más homogénea a lo largo del año registrándose de febrero a abril las correlaciones máximas (18.76 %), (Figura 5F), y dominancia de correlaciones negativas (Figura 6C) para el centro y norte de país (Figura 7C).

Teleconectividad del TNI a PP, TMAX y TMIN en México: escala temporal y espacial

La teleconectividad promedio desde A0 hasta A2 en las tres variables climáticas (PP, TMAX, TMIN) oscila de 14.38 a 17.59 % del total de Ec (línea negra, Figura 5G-5I), siendo A2 donde se registran los signos más importantes con 14.75, 19.09 y 19.10 % de Ec con $p \leq 0.10$, respectivamente (Figura 5G, 5H y 5I), cuyos valores de r oscilan de 0.20 a 0.50. La precipitación muestra una teleconectividad similar a lo largo del año con el TNI desde A0 hasta A2 (Figura 5J), donde la menor teleconectividad (en A0) ocurre en febrero (3.78 %) y la mayor en julio (24.61 %); no obstante, no hay predominancia de correlaciones negativas ni positivas (Figura 6E). Geográficamente la teleconectividad del TNI a PP en México no es consistente (Figura 8A); es decir, se presentan regiones heterogéneas en cuanto al signo de r , opuesto a lo encontrado con otros índices climáticos (por ejemplo al MEI usado por Méndez *et al.*, 2007; y al PDO, Méndez *et al.*, 2010), incluso las señales de teleconectividad en estos índices ocurren en A0 para PP, TMAX y TMIN. Birk *et al.* (2010) registran variaciones climáticas interanuales significativas en la región del medio oeste de los E.U. asociada al ENOS. Kennedy *et al.* (2009) documentan que el TNI muestra signos importantes (correlación positiva) con el caudal en el noroeste de E.U., específicamente a finales de otoño e inicio de invierno, relacionándose con mayor precipitación en este periodo.

En TMAX y TMIN los patrones anuales de teleconectividad con el TNI son similares promediando 17.27 y 17.59 % de Ec significativas ($p \leq 0.10$) respectivamente (línea negra, Figura 5H y 5I), en A2. Durante el mes de julio TMAX y TMIN registran

la teleconectividad más importante al TNI (37.52 % y 34.93 %, respectivamente) (Figura 5K y 5L), de estas estaciones y en este mes, 91.28 y 82.28 % representan correlación negativa respectivamente (Figura 6F y 6G); febrero registra la menor teleconectividad (9.81 y 11.18 %). Los patrones geográficos de teleconexión de TNI con TMAX y TMIN son semejantes entre sí ocurriendo principalmente al centro y noreste del país y costa del Golfo de México (Figura 8B-C) cuyos valores de r llegan hasta 0.5. Por su parte, Tiscareño *et al.* (2003), con base a modelos de simulación, demuestran que las regiones áridas y semiáridas de México son susceptibles a presentar incrementos de temperatura durante todas las estaciones del año, tanto en episodios cálidos (El niño) como fríos (La niña).

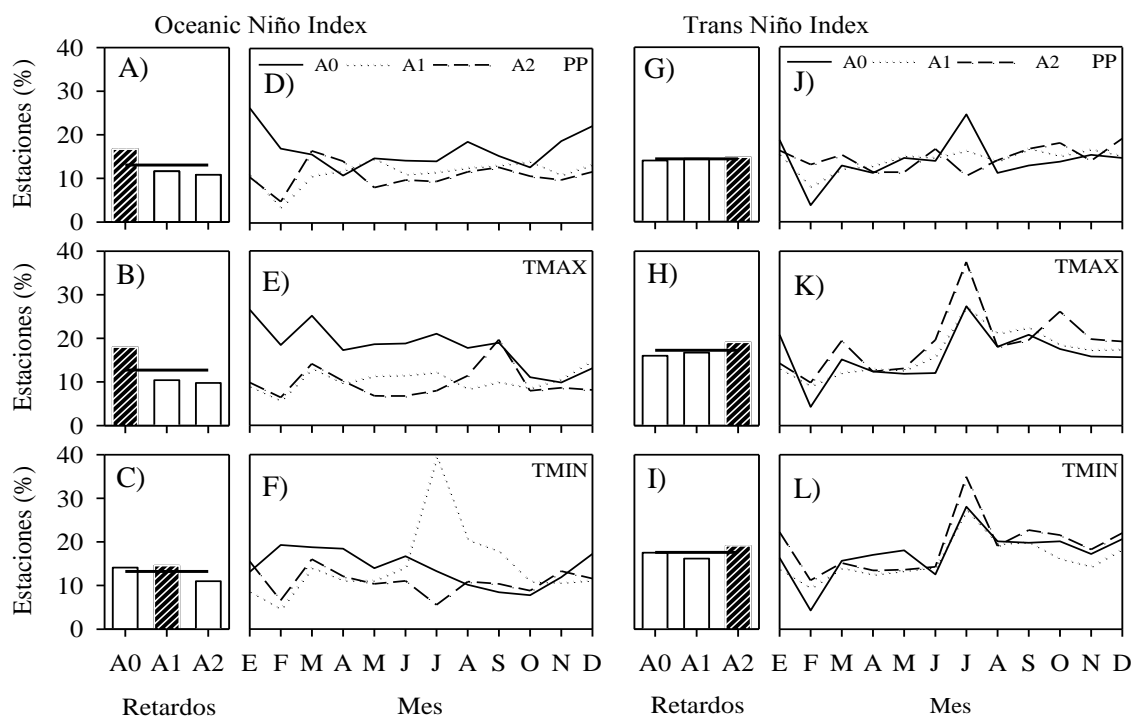


Figura 5. Porcentaje de estaciones climatológicas con correlación estadísticamente significativa ($p \leq 0.10$ y $-1 \leq r \leq 1$) a escala anual (barras) y mensual (líneas), entre ONI (izquierda) y TNI (derecha) con precipitación (PP), temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN).

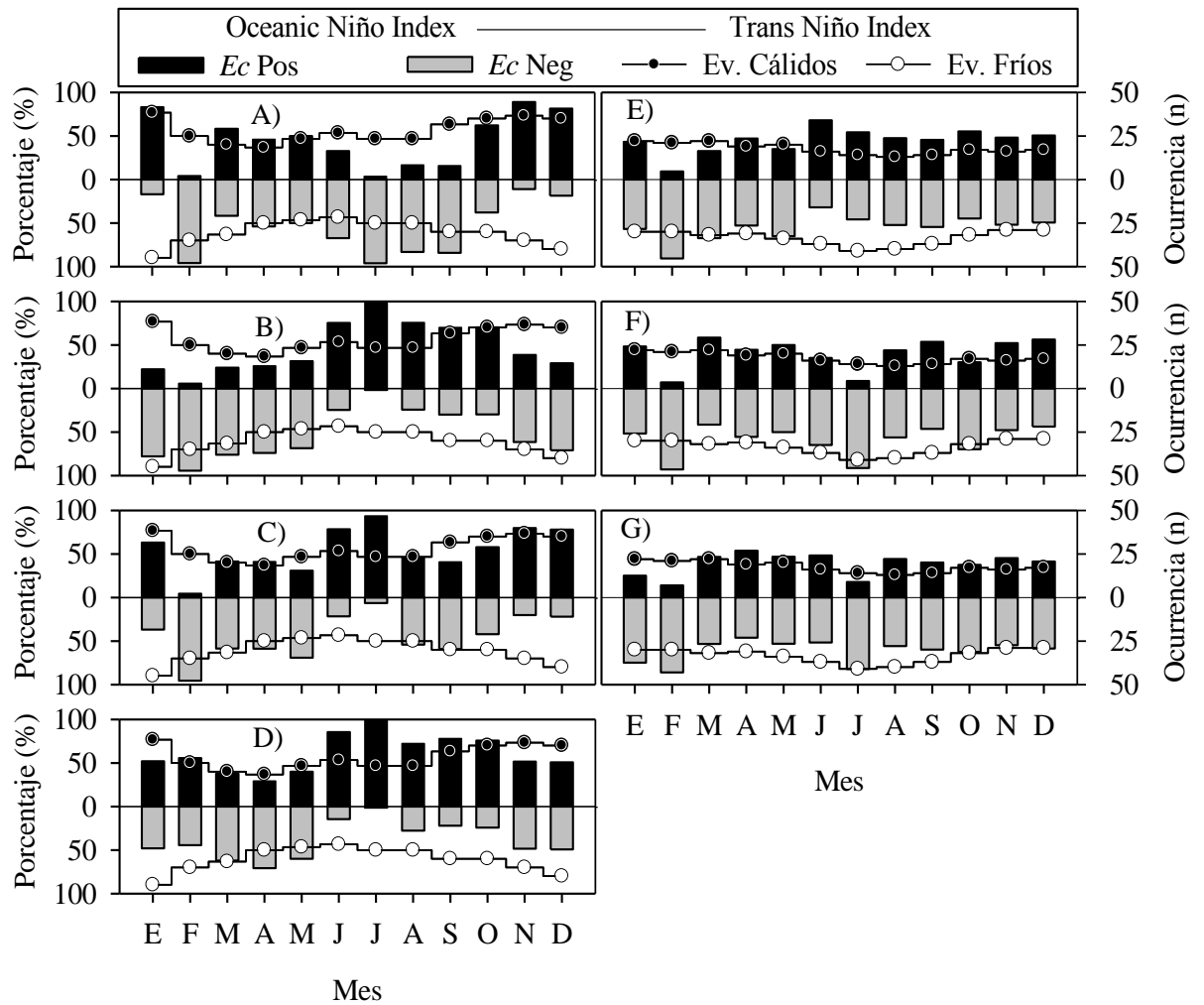


Figura 6. Porcentaje de estaciones con correlación positiva y negativa (barras) del ONI y TNI con precipitación (A - E), temperatura máxima (B - F), temperatura mínima (C - G) y número de eventos cálidos y fríos registrados de 1950 - 2013 (líneas).

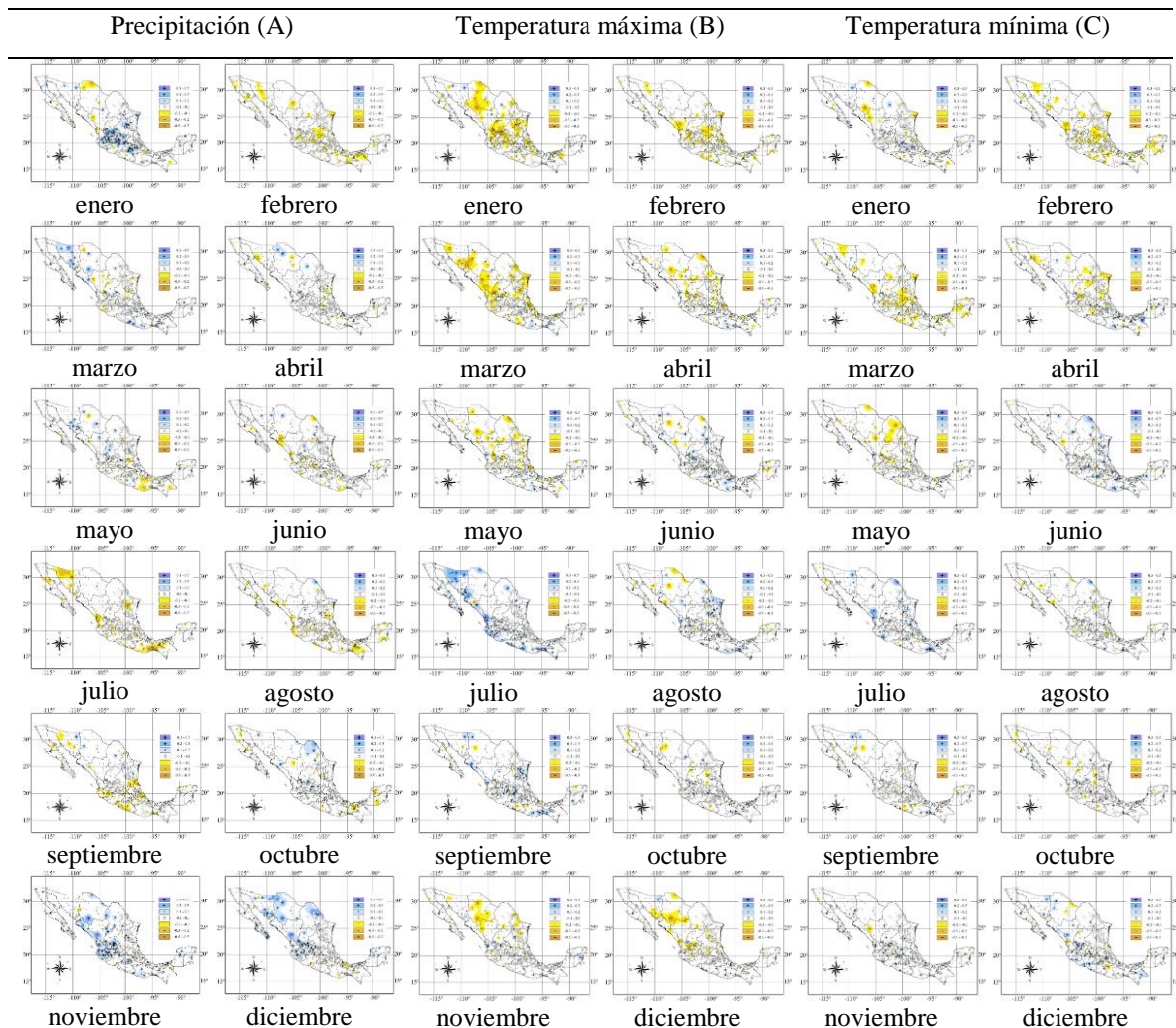


Figura 7. Patrones geográficos de correlación ($p \leq 0.10$) del Oceanic Niño Index (ONI) a precipitación (A), temperatura máxima (B) y mínima (C) en México, periodo 1950 - 2011.

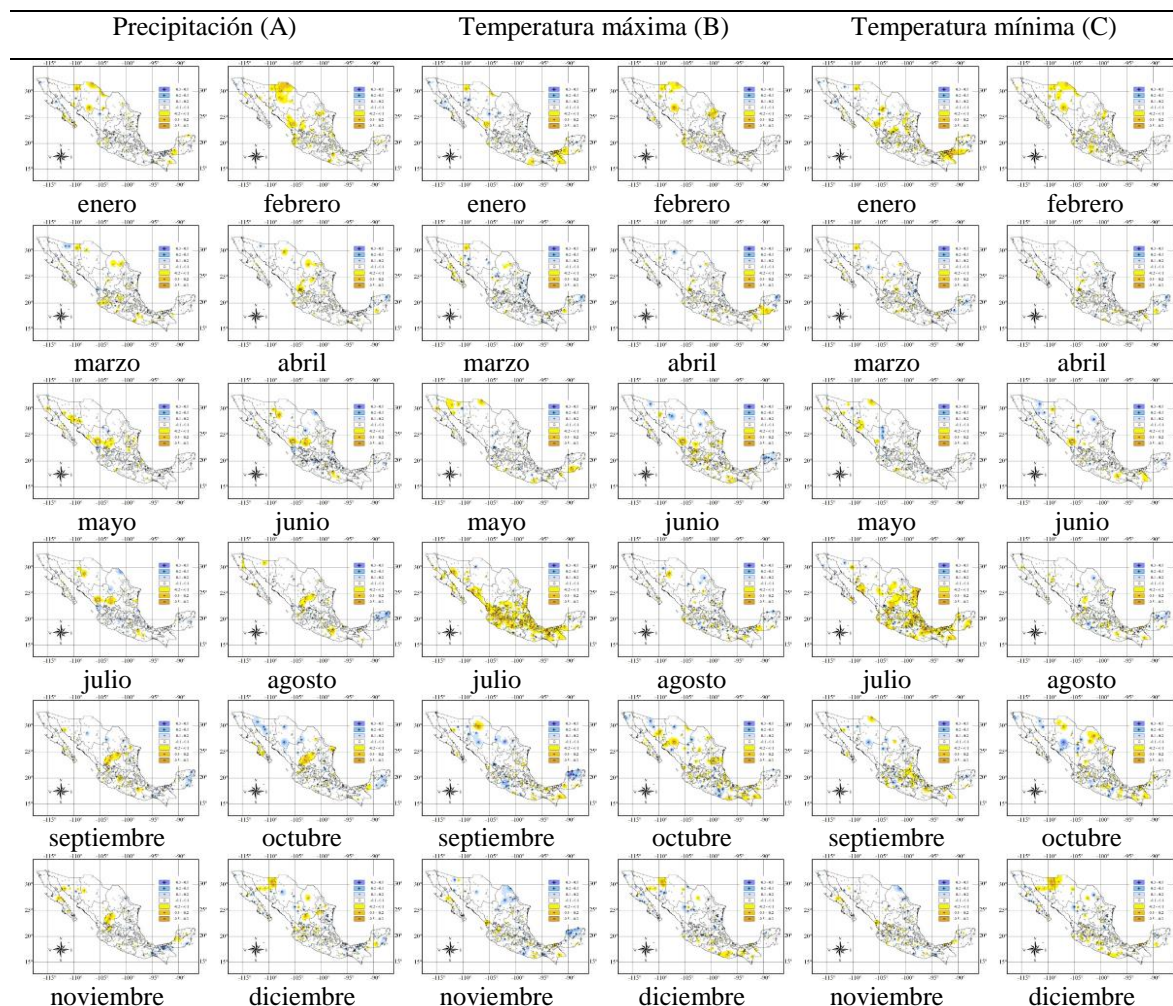


Figura 8. Patrones geográficos de correlación ($p \leq 0.10$) del Trans Niño Index (TNI) a precipitación (A), temperatura máxima (B) y mínima (C) en México, periodo 1950 - 2011.

Intensidad de la teleconectividad entre ONI y TNI a variables climáticas

El análisis de resultados de la prueba KW señala diferencias significativas en la intensidad de teleconectividad de PP a ONI y TNI ($p < 0.0001$), siendo más alta entre PP y ONI con r promedio de 0.27, pero también mucha mayor ocurrencia de estaciones

significativas ($p < 0.10$) (Cuadro 2). La intensidad de teleconectividad de los índices climáticos a TMAX resultó estadísticamente igual ($r = 0.29$; $p = 0.6822$). Contrario a lo que ocurre con PP, el TNI muestra mayor grado de correlación (teleconectividad) a TMIN ($r = 0.29$; $p = 0.0002$), incluso también mayor número de estaciones significativas ($p \leq 0.10$).

Cuadro 2. Comparación de medias de “ r ” entre Oceanic Niño Índice y Trans Niño Index a precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en México (1940 - 2011)

Variable	Índice	n	Media	D.E	Mediana	Valor de p (>F)
PP	ONI	1166	0.29	0.06	0.27 ^b	0.0001 ***
	TNI	974	0.28	0.06	0.26 ^a	
TMAX	ONI	1256	0.29	0.06	0.28 ^a	0.6822
	TNI	1115	0.29	0.07	0.28 ^a	
TMIN	ONI	981	0.28	0.06	0.27 ^a	0.0002 ***
	TNI	1220	0.29	0.07	0.28 ^b	

Dónde: ONI = Oceanic Niño Índice; TNI = Trans Niño Index; PP = precipitación; TMAX = temperatura máxima; TMIN = temperatura mínima; n = número de observaciones (estaciones estadísticamente significativas ($p < 0.10$)); D.E. = desviación estándar de r . Letras ^a y ^b en columnas y en variable climática indican la agrupación de medianas según la prueba de Kruskal-Wallis.

Teleconectividad histórica del ONI y TNI a PP, TMAX y TMIN en México

Al analizar el comportamiento histórico de la teleconectividad de los índices (ONI y TNI) a variables climáticas se observa que aunque el grado de intensidad ($|r|$) entre ONI y PP es estadísticamente igual ($p = 0.4457$) en el periodo más reciente (1981 - 2010) se está incrementado considerablemente el número de *Ec* significativas ($p \leq 0.10$) (Cuadro 3). Las relaciones ONI - TMAX y ONI - TMIN, tampoco mostraron diferencias significativas de $|r|$ entre periodos ($0.1530 < p < 0.3260$). Los resultados de este análisis muestran cambios importantes, la intensidad de teleconexión ($|r|$) entre TNI - PP y TNI - TMAX está incrementando en los últimos años (1981 - 2010), resultando mucho más fuerte la primera relación ($p = 0.0070$), incluso en TMAX se observa un incremento de estaciones estadísticamente significativas ($p \leq 0.10$). Dichos resultados podrían deberse al periodo pre-cambio (frío) y post-cambio (cálido) climático ocurrido en 1977/1978 en el Océano Pacífico (Zhang *et al.*, 1997; Wang y An, 2002; Easterbrook, 2011) modificando quizá las teleconexiones del ENOS con algunas variables climáticas en los últimos años.

Cuadro 3. Comparación de medias de “ r ” entre Oceanic Niño Índice y Trans Niño Index a precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en México, en dos periodos de tiempo

Variable	Periodo	n	Media	D.E	Mediana	Valor de P
ONI_PP	P I	62	0.40	0.08	0.38 ^a	0.4457
	P II	99	0.39	0.08	0.37 ^a	
ONI_TMAX	P I	85	0.38	0.08	0.37 ^a	0.3260
	P II	90	0.39	0.08	0.38 ^a	
ONI_TMIN	P I	72	0.38	0.06	0.37 ^a	0.1530
	P II	63	0.37	0.06	0.35 ^a	
TNI_PP	P I	61	0.37	0.07	0.36 ^a	0.0070 ***
	P II	55	0.41	0.08	0.40 ^b	
TNI_TMAX	P I	55	0.38	0.08	0.37 ^a	0.0235 **
	P II	74	0.41	0.07	0.40 ^b	
TNI_TMIN	P I	74	0.38	0.07	0.38 ^a	0.1710
	P II	74	0.39	0.09	0.39 ^a	

Donde: ONI = Oceanic Niño Índice; TNI = Trans Niño Index; PP = precipitación; TMAX = temperatura máxima; TMIN = temperatura mínima; PI = Periodo uno (1951 - 1980); PII = Periodo dos (1981 - 2010); D.E. = desviación estándar de r . Letras ^a y ^b en columnas y en variable climática indican la agrupación de medianas según la prueba de Kruskal-Wallis.

V. CONCLUSIONES

Considerando precipitación, temperatura máxima y mínima, la mayor ocurrencia de teleconectividad con el ONI fue en A0 (16.26%) y en A2 (17.64 %) con el TNI. La teleconectividad del índice con variables climáticas muestra el siguiente comportamiento: ONI: TMAX (17.98 %) > PP (16.72 %) > TMIN (14.09 %); TNI: TMIN (19.10%) > TMAX (19.09 %) > PP (14.75 %), manifestándose con correlación positiva/negativa ($0.50 > |r| < 0.50$) durante invierno (PP - ONI), verano (TMAX y TMIN - TNI), en el centro, noroeste y costa del Golfo de México, principalmente. La teleconectividad $|r|$ más fuerte ocurre entre ONI - PP y TNI - TMIN; en TMAX el grado de asociación es estadísticamente igual con ambos índices. El número de estaciones climatológicas con teleconexión (ONI - PP; TNI - TMAX) está incrementando significativamente en los últimos años; la intensidad de teleconexión ($|r|$) entre TNI - PP y TNI - TMAX también se incrementó en el último periodo (1981 - 2010). Los resultados muestran que es posible que el cambio de régimen climático de la década del 1970 en el océano Pacífico pudo haber modificado las teleconexiones de índices climáticos del ENOS con algunas variables climáticas sobre algunas regiones del mundo, de acuerdo a los resultados, lo anterior podría reflejarse en mejores pronósticos climáticos futuros en México, usando ONI y TNI.

VI. RESUMEN

RESUMEN

PALABRAS CLAVE / Teleconexiones / Anomalías / ENOS / Precipitación / Temperatura

Es ampliamente conocido que el fenómeno ENOS es un modulador climático dominante en la región tropical y subtropical de América, incluso a escala global. Esta investigación tiene como objetivos: 1) evaluar teleconexiones climáticas entre anomalías de precipitación (PP), temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN), con dos índices climáticos del ENOS: ONI y TNI, usando correlación de Pearson, “r” ($p \leq 0.10$) desde cero (A0) hasta dos años (A2), determinando ocurrencia e intensidad, a escala mensual, anual y espacial (1950 - 2011), analizando 581 estaciones climatológicas (*Ec*) distribuidas en todo México; y 2) analizar el comportamiento histórico de teleconectividad ONI y TNI con PP, TMAX y TMIN en dos periodos: PI (1951 - 1980) y PII (1981 - 2010). Los resultados demuestran mayor ocurrencia de teleconexión en A0 (16.26 % *Ec*) para el ONI, y en A2 (17.64 % *Ec*) para el TNI, incluyendo PP, TMAX y TMIN. Teleconectividad en PP: ONI > TNI (con 2.76 % de *Ec*), en TMIN: TNI > ONI (3.43 % de *Ec*), manifestándose con correlación positiva/negativa ($0.20 > |r| < 0.50$) durante invierno/verano, en el centro-oeste y noroeste del país/centro, noreste y Golfo de México, respectivamente. Se observan cambios importantes en los últimos años (1981 - 2010) en el número de *Ec* con correlación significativa ($p \leq 0.10$) entre ONI y TNI y algunas variables climáticas, pero

también en el grado de teleconectividad, lo anterior sugiere mejores pronósticos climáticos futuros en México utilizando el ONI y TNI.

**TELECONNECTIOS OF OCEAN-ATMOSPHERIC EL NIÑO SOUTHERN
OSCILLATION (ENSO) INDICES TO PRECIPITATION AND TEMPERATURE
ANOMALIES IN MEXICO**

SUMMARY

KEYWORDS / Teleconnections / Anomalies / ENSO / Precipitation / Temperature

It is widely known that ENSO is a key modulator in the climate in tropical and subtropical regions, even globally. The objectives of this research are: 1) To assess climatic teleconnections between precipitation anomalies (PP), maximum temperature (TMAX) and minimum temperature (TMIN), with two ENSO climate indices, ONI and TNI, using Pearson correlation analysis “r” ($p \leq 0.10$) employing two correlation lags (A1-A2) from the actual year (A0) up to two years to determine occurrence and intensity, on a monthly, annual and spatial scale (1950 - 2011) considering 581 weather stations (*Ec*) distributed throughout Mexico. 2) To analyze the historical behavior of teleconnectivity to ONI and TNI with PP, TMAX and TMIN in two periods: PI (1951 - 1980) y PII (1981 - 2010). The results show higher occurrence of teleconnection in A0 (16.26 % *Ec*) for ONI, in regard to TNI, A2 (17.64 % *Ec*), including PP, TMAX y TMIN. Teleconnectivity to PP: ONI > TNI (with 2.76 % *Ec*), respecting TMIN: TNI > ONI (3.43 % *Ec*) manifesting positive/negative correlation ($0.20 > |r| < 0.50$) during winter/summer, in the center-west and northwest/central, northeastern and Gulf of Mexico, respectively. Significant changes were observed in recent years (1981 - 2010)

respecting *Ec* with significant correlations ($p \leq 0.10$) among ONI and TNI and some climatic variables, but also to the level of teleconnectivity, this suggests better future climate forecasts in Mexico using ONI and TNI.

**TELECONEXÕES DOS ÍNDICES OCEANO-ATMOSFÉRICOS DO
NIÑO/OSCILAÇÃO SUL (ENOS) PARA ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO E
TEMPERATURA NO MÉXICO.**

RESUMO

PALAVRAS CHAVE / Teleconexões / Anomalias / ENOS / Precipitação / Temperatura

É amplamente conhecido que o fenômeno ENOS é um modulador do clima dominante na região tropical e subtropical da América e globalmente. Esta pesquisa tem como objetivos: 1) avaliar teleconexões climáticas entre anomalias de precipitação (PP) temperatura máxima (TMAX) e temperatura mínima (TMIN) com dois índices climáticos ENOS: ONI e TNI, utilizando a correlação de Pearson, “*r*” ($p \leq 0.10$) a partir do zero (A0) até dois anos (A2) determinando a ocorrência e intensidade, em uma escala mensal, anual e espacial (1950 - 2011) analisando 581 estações meteorológicas (*Ec*) distribuídas em todo México; 2) analisar o desempenho histórico das teleconexões ONI e TNI com PP, TMAX e TMIN em dois períodos: PI (1951 - 1980) y PII (1981 - 2010). Os resultados demonstram maior ocorrência de teleconexão em A0 (16.26 % *Ec*) para a ONI e A2 (17.64 % *Ec*) para a TNI, incluindo PP, TMAX e TMIN. Teleconexões em PP: ONI > TNI (con 2.76 % de *Ec*), em TMIN: TNI > ONI (3.43 % de *Ec*) manifestando-se uma correlação positiva/negativa ($0.20 > |r| < 0.50$) durante o inverno/verão, no centro-oeste e norte-oeste/centro, nordeste e Golfo do México, respectivamente.

Mudanças significativas foram observadas nos últimos anos (1981 - 2010) no número de *Ec* com correlação significativa ($p \leq 0.10$) entre ONI e TNI e algumas variáveis climáticas, e do grau de teleconexão, isso sugere melhores previsões climáticas futuras no México usando a ONI e TNI

VII. REFERENCIAS

- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein-Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa-Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson DB, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre JL (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature. *Journal of Geophysical Research* 111:1-22.
- Bjerknes J (1969) Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific. *Monthly Weather Review* 97:163-172.
- Birk K, Lupo AR, Guinan P, Barbieri CE (2010) The interannual variability of midwestern temperatures and precipitation as related to the ENSO and PDO. *Atmósfera* 23:95-128.
- Buendía CEJ (2012) Sobre las Variaciones Climáticas en México. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* 38:117-127.
- Cane MA (2005) The evolution of El Niño, past and future. *Earth and Planetary Science Letters* 230:227-240.
- Conde C (2006) México y el cambio climático global. Dirección General de Divulgación de la Ciencia. UNAM, México. 23 pp.
- Davey MK, Brookshaw A, Ineson S (2014) The probability of the impact of ENSO on precipitation and near-surface temperature. *Climate Risk Management* 1:5-24.
- Delgadillo MJ, Aguilar OT, Rodríguez VD (1999) Los aspectos económicos y sociales de El Niño: Los Impactos de El Niño en México. Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación. México. 238 pp.

- De la Lanza G, Galindo I (1989) ENSO 1986-87 at Mexican Subtropical Pacific offshore waters. *Atmósfera* 2:211-219.
- Easterbrook DJ (2011) Geologic evidence of recurring climate cycles and their implications for the cause of global climate changes: The Past is the Key to the Future. Department of Geology, Western Washington University, Bellingham, WA, E.U. 51 pp.
- Escobar BE, Bonilla M, Badán A, Caballero M, Winckell A (2001) Los efectos del fenómeno El Niño en México: 1997-1998. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, DF. 246 pp.
- Fedorov AV, Philander SG (2000) Is El Niño changing. *Science* 288:1997-2002.
- Folland CK, Karl TR, Christy JR, Clarke RA, Gruza GV, Jouzel J, Mann ME, Oerlemans J, Salinger MJ, Wang SW (2001) Observed climate variability and change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge. 181 pp.
- García-Páez F, Cruz-Medina IR (2009) Variabilidad de la Precipitación Pluvial en la Región Pacífico Norte de México. *Agrociencia* 43:1-9.
- Gergis JL, Fowler AM (2005) Classification of synchronous oceanic and atmospheric El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events for palaeoclimate reconstruction. *International Journal of Climatology* 25:1541-1565.
- Glantz MH, Katz RW, Nicholls N (1991) *Teleconnections Linking Worldwide: Climate Anomalies Scientific Basis and Societal Impact*. Cambridge University Press. Cambridge. 535 pp.
- Graham NE (1994) Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: Observations and model results. *Climate Dynamics* 10:135-162.
- Guevara DJM (2008) El abc de los índices usados en la identificación y definición cuantitativa de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). *Terra* 24:85-140.

- Hanley DE, Bourassa MA, O'Brien JJ, Smith SR, Spade ER (2003) A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. *Notes and Correspondence* 16:1249-1258.
- Hernández B (2002) Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Investigaciones Marinas* 30:21-31.
- Huber M, Caballero R (2003) Eocene El Niño: Evidence for robust tropical dynamics in the "Hothouse". *Science* 299:877-881.
- Hughen KA, Schrag DP, Jacobsen SB (1999) El Niño during the last interglacial period recorded by a fossil coral from Indonesia. *Geophysical Research Letters* 26:3129-3132.
- INEGI (2009) Aspectos generales del territorio mexicano [<http://www.inegi.org.mx/inegi>].
- INEGI (1994) Estadísticas históricas de México. Tomos I y II, INEGI México, D. F.
- IPCC (2007) Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. Ginebra, Suiza. 103 pp.
- Jáuregui E (1997) Climate variability and climate change in Mexico: A review. *Geofísica Internacional* 36:0 pp.
- Jones PD, Mann ME (2004) Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics* 42:1-42.
- Kennedy AM, Garen DC, Koch RW (2009) The association between climate teleconnection indices and Upper Klamath seasonal streamflow: Trans-Niño Index. *Hydrological Processes* 23:973-984.
- Kruskal WH, Wallis WA (1952) Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J. Amer. Stat. Assoc.* 47:583-621.

- Magaña V, Ambrizzi T (2005) Dynamics of subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters. *Atmósfera* 18:211-233.
- Magaña VO, Vázquez JL, Pérez JL, Pérez JB (2003) Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42:313-330.
- Méndez GJ, Návar CJJ, Gonzáles RH, Treviño GEJ (2007) Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México. *Ciencia UANL* 10:290-298.
- Méndez GJ, Ramírez LA, Cornejo OE, Zarate LA, Cavazos PT (2010) Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). *Investigaciones Geográficas* 73:57-70.
- Pavia EG, Graef F, Reyes J (2006) PDO-ENSO effects in climate of Mexico. *Notes and correspondence* 19:6433-6438.
- Pereyra DD, Angulo CQ, Palma BE (1994) Effect on ENSO on the mid-summer drought in Veracruz State, Mexico. *Atmósfera* 7:211-219.
- Rifakis IP, Gonçalves CN, Omaña RW, Manso MM, Espidel GA, Intingaro RA, Hernández MO, Rodríguez-Morales AJ (2005) Asociación entre las variaciones climáticas y los casos de dengue en un hospital de Caracas, Venezuela, 1998-2004. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* 22:183-190.
- Ropelewski CF, Halpert MS (1986) North American Precipitation and Temperature Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*. 114:2352-2362.
- Rzedowski J (2006) *La vegetación de México*. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad. México. 505 pp.
- Salinas-Zavala CA, Lluch-Beldas D, Hernández-Vázquez S, Lluch-Cota DB (1998) La aridez en el Noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmósfera* 11:29-44.

- Santos JL (2006) El conocimiento sobre El Evento de El Niño : Una perspectiva local dentro de un contexto global. *Revista Tecnológica ESPOL* 19:143-152.
- Steven RH, Mantua, NJ (2000) Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography* 47:103-145.
- Tiscareño LM, Báez GAD, Izaurralde C, Rosenberg NJ, Salinas GJ (2003) Modeling El Niño Southern Oscillation climate impact on Mexican agriculture. *Geofísica Internacional*. 42:331-339.
- Trenberth KE (1990) Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bulletin American Meteorological Society* 71:988-993.
- Trenberth KE (1997) The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78:2771-2777.
- Trenberth KE, Hurrell JW (1994) Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics* 9:303-319.
- Trenberth KE, Stepaniak PD (2001) Indices of El Niño evolution. *Journal of Climate* 14:1697-1701.
- Tsonis AA, Hunt AG, Elsner JB (2003) On the relation between ENSO and global climate change. *Meteorology and Atmospheric Physics* 84:229-242.
- Tudhope AW, Chilcott CP, McCulloch MT, Cook ER, Chappell J, Ellam RM, Lea DW, Lough JM, Shimmield GB (2001) Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle. *Science* 29:1511-1517.
- Wang B, An SI (2002) A mechanism for decadal changes of ENSO behavior: roles of background wind changes. *Climate Dynamics* 93:475-486.
- Zhang Y, Wallace JM, Battisti DS (1997) ENSO-like Interdecadal Variability: 1900-93. *Journal of Climate* 10:1004-1020.