

Artículos y ensayos

Análisis ondicular de la temperatura de la superficie del mar a lo largo de la costa del Pacífico mexicano

Ricardo Troncoso-Gaytán* y Sergio Reyes-Coca**

Resumen

En este trabajo se explora la variabilidad climática de datos mensuales de Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) y su anomalía en la vertiente del Pacífico mexicano, basados en el análisis de Fourier y análisis ondicular de series de tiempo. El intervalo analizado comprende el periodo de 1960 al 2000, cubriendo una franja costera del Pacífico mexicano de $\sim 6^\circ$ de longitud de ancho a partir de la costa, con una separación de 2° entre estaciones. Los resultados muestran la existencia de una variabilidad interanual e interdecenal de la TSM, probablemente relacionadas con el ciclo de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) y otros de frecuencias más bajas, como la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP). A partir de un análisis ondicular, con la ondícula de Morlet, es posible observar modulaciones en la frecuencia de la banda de actividad del ENOS, así como la localización temporal de intervalos con actividad significativa para periodos correspondientes a ENOS y otros periodos mayores. De acuerdo al análisis con la ondícula de Haar, se encuentra que el efecto de la transición climática del Pacífico Norte (1976/77) tiene representatividad para la región que corresponde a la Corriente de California. Para esa misma región, los efectos de el ciclo ENOS parecen estar representados dentro de un proceso conocido como de ruido rojo y de intensidad comparable a la señal del ENOS, excepto durante la década de los 90's, cuando el periodo parece ser el más bajo (~ 2.5 años). En el dominio de la Corriente de California, se observan dos señales relativamente importantes pero no siempre significativas, con periodos de ~ 40 y ~ 13 años, que aparecen tanto en el análisis de Fourier como en el ondicular. Desde la parte Sur de la península de Baja California hacia el Ecuador, la intensidad espectral de las frecuencias correspondientes al ciclo ENOS se vuelven más significativas, mientras que las correspondientes a las frecuencias más bajas pierden significancia. Esto confirma el carácter tropical de el fenómeno ENOS, mientras que la ODP se observa principalmente en latitudes medias

Abstract

The climatic variability of the sea surface temperature (SST) and its anomaly along the Mexican Pacific coast is explored based on Fourier and wavelet analysis of monthly SST time series. The period analyzed spans 1960 to 2000, and the study area covers a region $\sim 6^\circ$ wide from the coast towards open ocean, with 2° between observation stations. Results show a differential interannual and interdecadal variability of SST, which is probably related to El Niño/Southern Oscillation (ENSO) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). Wavelet analysis (using Morlet wavelet) indicates that there is a frequency modulation inside the active frequency band of ENOS, as well as a time location of this feature, and also isolated time intervals with significant activity during other periods. Analysis using the Haar wavelet indicates that the climatic shift of 1976/77 is clearly observed only in the corresponding California Current region. In that same region, the ENSO signal seems to be mixed with a red noise process, except during the 90s, when the smallest period of ~ 2.5 years appears active. Furthermore, the Baja California region displays two relatively important signals, which are not always significant, with periods of ~ 40 and ~ 13 years. South of the tip of the Baja California peninsula, the spectral intensity of frequencies associated with ENSO becomes highly significant, while lower frequencies become less significant. These findings confirm the tropical nature of ENSO phenomena, in contrast with the PDO, which is mainly observed in mid latitudes.

Résumé

Il s'agit d'explorer la variabilité climatique des données mensuelles de la Température de la Superficie de la Mer (TSM) et son anomalie dans le Pacifique mexicain, fondées sur l'analyse de Fourier et les analyses ondiculaires des séries de temps. L'intervalle étudié comprend la période de 1960 à 2000, qui couvre une frange côtière du Pacifique mexicain d'environ 6° de longitude à partir de la côte, avec une séparation de 2° entre les saisons. Les résultats montrent l'existence d'une variabilité interannuelle et interdécennale de la TSM, probablement en rapport avec le cycle de "El Niño"/oscillation du sud (ENOS) et de fréquences plus basses, comme l'Oscillation Décennale du Pacifique (ODP). A partir d'une analyse ondulaire, à l'aide de l'ondicule de Morlet, il est possible d'observer des modulations sur la fréquence de la bande d'activité de l'ENOS, ainsi que sur la localisation temporelle d'intervalles dont l'activité est significative pour les périodes correspondant à l'ENOS et autres périodes majeures. Selon l'analyse avec l'ondicule de Haar, on trouve que l'effet de la transition climatique du Pacifique Nord (1976/77) contient une représentativité pour la région qui correspond au Courant de Californie. Pour cette même région, les effets du cycle ENOS paraissent être représentés à l'intérieur d'un processus connu comme celui du bruit rouge et d'intensité comparable au signal de l'ENOS, sauf pendant la décennie des années 90, quand la période semble être la plus basse (environ 2,5 ans). Dans le domaine du Courant de Californie, on observe deux signaux relativement importants mais pas toujours significatifs avec des périodes de 40 et 13 ans, qui apparaissent dans l'analyse de Fourier autant que dans l'analyse ondulaire. De la partie sud de la péninsule de Basse Californie jusqu'à l'Equateur, l'intensité spectrale des fréquences correspondant aux fréquences les plus basses perdent de l'importance. Ceci confirme le caractère tropical du phénomène ENOS, tandis que l'ODP s'observe principalement sur les latitudes moyennes.

Palabras clave: El Niño/Oscilación del Sur, Oscilación Decenal del Pacífico, análisis ondicular, temperatura superficial del mar.

*Centro Regional de Investigación Pesquera, Ensenada.

** Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada

Introducción

La Temperatura Superficial del Mar (TSM) es un parámetro físico de gran importancia, no solamente por su relación directa con la atmósfera, como regulador de algunos aspectos de intercambio de masa, calor y momento, sino también por los efectos que produce en los organismos marinos y por lo tanto, en los ecosistemas. Mas allá del ciclo estacional, que indudablemente regula muchas de las fases del ciclo vital de las especies, la variabilidad no estacional de la TSM, representada por su anomalía (ATSM), también tiene efectos en los ecosistemas y la economía de los pescadores, para eventos como los del ciclo ENOS.

En este trabajo se presenta una caracterización de la variabilidad de la TSM a escalas interanuales e interdecenales a lo largo de una franja longitudinal de $\sim 6^\circ$ desde la costa del Pacífico mexicano hacia el Oeste (Fig. 1). Poco se podrá decir de las causas directas de tal variabilidad, que como otros autores han documentado ampliamente, obedece a múltiples procesos físicos que involucran amplias escalas espaciales y temporales (Clark, 1972; Davis, 1976;

Weare *et al.* 1976; Latiff y Barnett, 1994; Gu y Philander, 1997; Minobe, 1997; Barnett *et al.* 1999). Sin embargo, al aplicar las técnicas de análisis de Fourier y la transformada ondicular, es posible revelar algunas características espectrales y temporales de fenómenos conocidos, como son el ENOS y la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP). En Particular, se pueden definir con mayor precisión el tiempo, duración e intensidad relativa de los efectos regionales de tales fenómenos climáticos, así como su rango de frecuencias.

Material y métodos

Datos.

Este estudio está basado en datos mensuales de TSM, a lo largo de las costas del Pacífico mexicano. Los datos más antiguos, desde 1946 hasta 1987, fueron obtenidos de un disco compacto, denominado World Weather Disk (WWD). Además, se obtuvieron datos más recientes, desde 1982 hasta el 2000 del sitio Internet (<http://ingrid.Ldgo.columbia.edu/descriptions/reynolds/anom.html>) de la Universidad de Columbia (UC). Dado que no todas las series están suficientemente

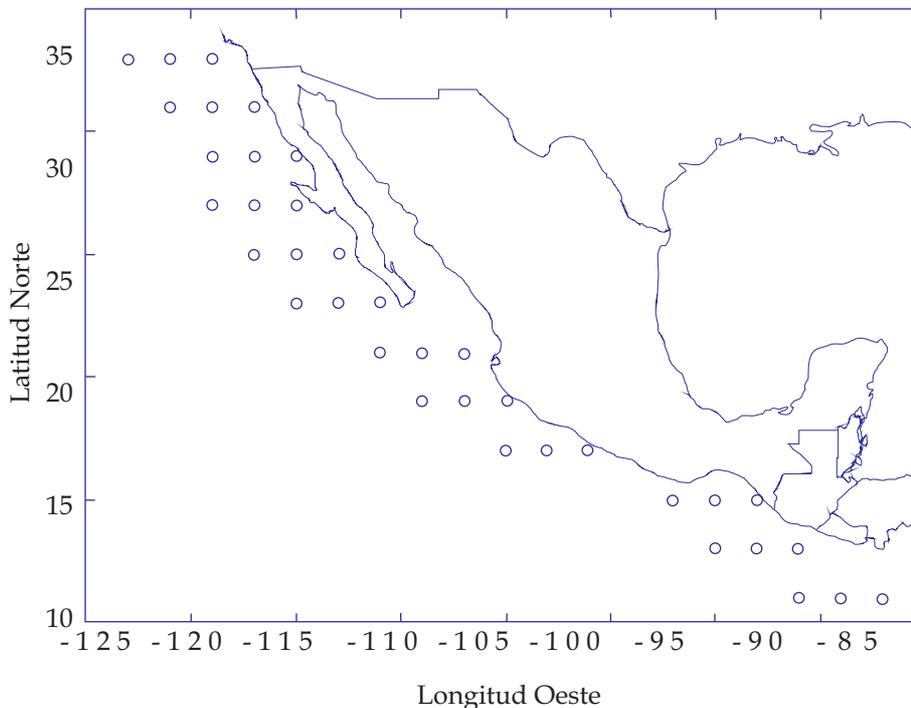


Figura 1. Localización de los puntos para los cuales se formaron las series de tiempo de TSM.

completas desde 1946, se tuvieron que cortar las series para que su longitud fuera igual, por lo que los datos aquí analizados comprenden desde 1960 al 2000.

Los datos del WWD están distribuidos en una malla de $2^{\circ}2'$ centrada en valores de latitud y longitud impar, mientras que los datos de la UC están distribuidos en una malla de $1^{\circ}1'$. Las series se escogieron tal que una de sus localizaciones fuera lo más cercana posible a la costa (punto costero) y, para una misma latitud, se formaron dos series más, ubicadas hacia el Oeste, cada dos grados (punto medio y externo). El resultado (Fig. 1), son 36 puntos frente a la costa occidental del Pacífico mexicano y parte de Centroamérica. Las estimaciones de TSM presentadas en el WWD están basadas solamente en datos de temperaturas tomadas por buques de oportunidad, es decir, que miden la temperatura de la superficie marina. Las estimaciones de TSM que se presentan en el sitio de la UC, son resultado de la asimilación objetiva de datos de satélite, buques y boyas oceanográficas.

Dado que deben existir sesgos derivados de los diferentes métodos de estimación de la TSM, se procedió a unir las series de acuerdo al método siguiente. Primero se hizo una regresión lineal entre las anomalías de los datos mensuales coincidentes entre las dos fuentes (de 1982 a 1987), tomando como variable dependiente a los datos de la UC. Con ello, efectivamente los datos del WWD se aproximan más a los datos de la UC en cuanto a su distribución y algunos momentos estadísticos. Se asumió que antes de 1982 los datos, recalculados con base en la regresión, atenúan en algún grado aceptable las diferencias entre los dos métodos de estimación. Sin embargo, esta suposición resultó ser falsa para tres puntos, pues los valores recalculados presentaron una fuerte reducción, ya que la pendiente de la recta ajustada fue pequeña (del orden de 0.2 a 0.3). Las correlaciones entre los segmentos de datos que se traslapan fueron, en estos casos, pequeñas también. Analizando los espectros de estos segmentos coincidentes de las series, se observa que los datos del WWD son más ruidosos que los de la UC. El ruido es de alta frecuencia y ocasiona que las correlaciones sean bajas, aunque las series sean coherentes en las bajas frecuencias. Por lo anterior, buscando la mayor

similitud entre los espectros en las bajas frecuencias, se aplicó un filtro de Butterworth con frecuencia baja de corte entre 0.12 y 0.25 ciclos/mes a los segmentos de datos del WWD y de la UC. Las series suavizadas resultantes fueron usadas para una nueva regresión lineal, con cuyos parámetros se recalcularon los valores de temperatura, tomando como base los datos del WWD. Es importante señalar que se logró una gran mejoría en las correlaciones entre segmentos y no se observó la exagerada reducción de algunas de las series recalculadas (pendientes alrededor de 0.6), como en el caso de utilizar las series coincidentes sin filtrar.

Se utilizaron los datos del índice de la ODP (disponibles en http://www.jisao.washington.edu/data_sets/pdo/) para ilustrar la transformada ondicular con la ondícula de Haar y apoyar la hipótesis de la presencia de una oscilación multidecenal en nuestros datos. El índice usado está definido como el modo principal de la descomposición en funciones ortogonales empíricas del promedio de noviembre a marzo de la ATSM al Norte de los 20° N en el océano Pacífico

Análisis

A partir de las series de temperatura de 1960 al 2000, se construyó la climatología mensual para cada punto y al restarla a las series originales se obtuvieron series de tiempo de ATSM, las cuales representan la variabilidad no estacional de la temperatura en cada punto durante el periodo considerado.

Se utilizó una rutina estándar de Matlab para calcular el espectro crudo de las series de tiempo de la ATSM. La potencia espectral se normalizó con el factor N^{-2} para que un ruido blanco quedara representado por una unidad (de varianza) a todas las frecuencias. N y $^{-2}$ son el número de datos de la serie de tiempo y su varianza respectivamente.

Cada gráfica del espectro de las series de tiempo, se presenta junto a un espectro de ruido rojo básico y uno de ruido blanco, así como espectros de ambos ruidos multiplicados por un factor $x_2^2/2$ para poder comparar contra el espectro de las series de tiempo a un nivel de

confianza del 95%. Se utilizó el espectro teórico de un proceso autorregresivo de primer orden, AR(1), con un coeficiente igual a $(r_1+r_2^{1/2})/2$ para modelar un ruido rojo básico correspondiente a la serie analizada, es decir un ruido que se vuelve progresivamente más intenso conforme se acerca a las frecuencias bajas pero es finito en la banda cero. r_1 y r_2 son los coeficientes de la autocorrelación a 1 y 2 retrasos (Torrence y Compo, 1998).

Dado al interés en observar la variabilidad interanual e interdecenal, según lo revelan los datos mensuales de temperatura, solo se presenta el rango espectral a partir de los periodos mayores a un año aproximadamente.

El método de la transformada ondicular se aplicó usando tanto las rutinas de Matlab, como el software de análisis ondicular proporcionado por Torrence y Compo (1998), disponible en URL: <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>. Se utilizó una transformación continua con la ondícula de Morlet, que es una onda plana modulada por una Gaussiana (Lau y Weng 1995). Esta ondícula está dada por

$$(t) \quad e^{i\omega t} e^{-t^2/2}$$

y está valuada en los números complejos, por lo que es posible extraer información acerca de la amplitud y la fase del proceso que esta siendo analizado. En este trabajo solamente se analizó el cuadrado del valor absoluto de la transformada. Dado que la ondícula de Morlet presenta oscilaciones con un periodo bien definido, es posible obtener una estimación de la distribución de la energía en el dominio del tiempo y de las frecuencias o periodos de Fourier simultáneamente. Es decir, aplica una serie $x(t)$ a un espacio $X(t,f)$. El método de la transformada ondicular consiste básicamente en dilatar o contraer la ondícula elegida, de acuerdo a las escalas permitidas por la longitud de la serie y la frecuencia de Nyquist, e ir analizando con ella la serie de tiempo localmente (Lau y Weng, 1995, Kumar y Foufoula-Georgiou, 1997).

Estos espectros ondiculares se presentan con nivel de significancia del 5%, marcado por una línea a trazos generalmente encerrando áreas

definidas. Se presenta además una región limitada por dos líneas exponenciales, que señalan el cono de influencia deformante de los extremos de la serie, según la escala de la ondícula de Morlet, y debajo de las cuales son dudosos los valores de la transformada. Con este método se resaltan algunos aspectos de la evolución espectral a lo largo del tiempo, que no revela el método de análisis de Fourier.

Se aplicaron transformadas ondiculares a las series de ATSM, utilizando la ondícula de Haar, con el fin de detectar cambios en el nivel de oscilación media, tal como la transición climática del Pacífico Norte ocurrida en 1976/77 (Miller *et al.* 1994; Minobe, 1997). La ondícula de Haar es una función escalón definida por la relación

$$(t) \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t < 1 \\ 0 & \text{cualquier otro } t \end{cases}$$

por lo que es adecuada para detectar cambios de nivel medio de oscilación, ya que posee la propiedad que deseamos sea revelada por el análisis (Kumar y Foufoula-Georgiou 1997). En este caso, no se hizo ningún análisis de significancia. Se presenta, como ejemplo, la transformada con la ondícula de Haar del índice de la ODP, para el intervalo de 1900 al 2000. La transformada marca el punto de cambio del nivel medio de oscilación, como una región (medio cono) de alto contraste en los valores a todas las escalas de la transformada en el momento (tiempo constante) en el cual ocurre el cambio (transición de 1941/42, Fig. 2c), o como un cono, no necesariamente simétrico, con el vértice apuntando hacia el momento del cambio (transición de 1976/77, Fig. 2c). Estos rasgos, principalmente el primero, se observan en algunos espectros ondiculares en los datos de ATSM, lo cual nos sugiere que lo que estamos observando en los espectros ondiculares de las series de ATSM, calculados con la ondícula de Haar, corresponde a cambios en el nivel medio de oscilación de las series de tiempo analizadas. Las fechas de transición señaladas han sido identificadas por otros autores también (Chao *et al.* 2000; Gedalof y Smith, 2001).

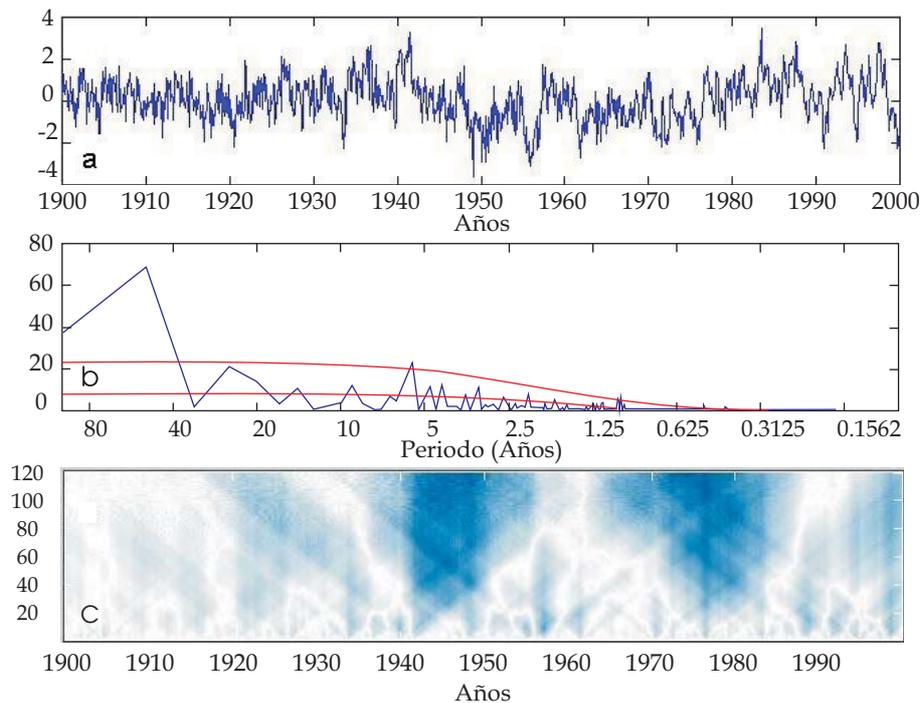


Figura 2. a) Índice de la ODP. b) Espectro de Fourier de la ODP, mostrando un máximo significativo (5%, ver Fig. 3) en el periodo de ~50 años. c) Transformada utilizando la ondícula de Haar del índice de la ODP. El cambio en el nivel medio de oscilación se observa como una región de alto contraste a todas las escalas a partir de la ocurrencia de la transición con forma de cono (1976/77) o medio cono (1941/42).

Resultados.

Análisis de Fourier. A la banda cero siempre correspondió una potencia espectral de cero. Los picos más energéticos en los espectros de Fourier (EF) calculados a lo largo de la franja costera, caen principalmente dentro de tres bandas de frecuencia: la frecuencia inmediata a la banda cero, con periodo de 40 años, la banda de frecuencias correspondientes a los periodos normalmente asociados al fenómeno ENOS de 2.5 a 7 años y una variación decenal de aproximadamente 13 años. Sin embargo, la importancia relativa y la significancia de estos máximos varían a lo largo de la franja costera. Aquí definimos un pico espectral relativamente importante como aquel que, sin ser significativo al nivel de confianza del 95%, cae por arriba del nivel del ruido rojo básico y es localmente sobresaliente. Por ejemplo, los máximos en los periodos de 2.5 a 5 años o los máximos a los 40 años en la figura 3 serían, según esta definición, relativamente importantes, mientras que los únicos máximos significativos al 5%

corresponden a el periodo de ~13 años en la misma figura. Cuando aparecen picos espectrales relativamente importantes, asumimos que las señales asociadas están presentes, pero con una intensidad comparable a un proceso de ruido rojo y probablemente indistinguible de este.

La variación multidecenal (~40 años) es relativamente importante en los EF a todas las latitudes analizadas, aunque solo es significativa en los puntos externos de la franja costera entre los 27° y los 23° N (véase Fig. 4), en la mitad Sur de la península de Baja California), así también en el punto costero a los 21° N (Fig. 5), en el punto medio a los 19° N y en los tres puntos a los 15° N (no se muestra), mientras que a los 13° N (Fig. 6) solo es significativa en los puntos medio y costero.

La banda de periodos correspondientes a la actividad de ENOS es de 2.5 a 5 años, según los máximos significativos encontrados en los EF de nuestros datos, aunque se encontraron picos locales relativamente importantes a frecuencias de ~7 años. En las dos primeras líneas de latitud

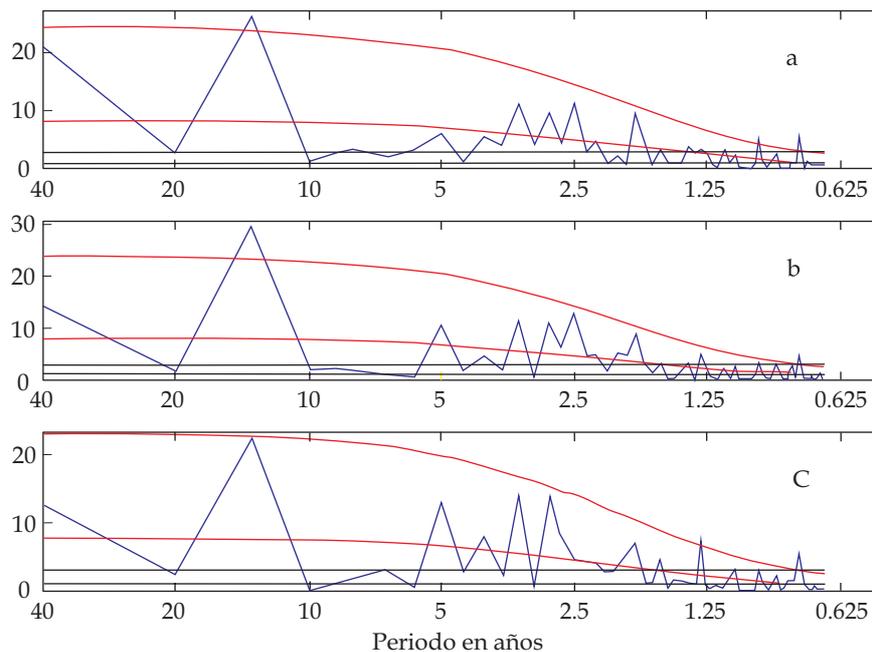


Figura 3. Espectros de Fourier para la ATSM en la línea de latitud 33° N. La potencia está expresada en unidades de varianza: a) Punto externo, b) punto medio y c) punto costero. Se muestran también los espectros de ruido rojo (valores decrecientes hacia cero para los periodos pequeños) al 5% de significancia (línea continua superior), y ruido rojo básico (línea continua inferior), así como los espectros de potencia constante o ruido blanco básico (recta horizontal inferior) y al 5% de significancia (recta horizontal superior).

constante (33° N, Fig. 3 y 31° N, no se muestra), los tres puntos correspondientes no muestran picos significativos en esta banda, aunque si son relativamente importantes

El periodo de ~2.5 años es significativo en los puntos costeros a partir de los 29° N hacia el Sur a lo largo de la península de Baja California (Fig. 4). Este periodo corresponde al límite inferior de la banda espectral de actividad de ENOS. Después, desde los 25° N hasta los 21° N, esta señal es significativa en los tres puntos de latitud constante, excepto en el punto más cercano a la costa a los 21° N (Fig. 5). A partir de esta última latitud, los periodos de 4 y 5 años, correspondientes a la región intermedia de la banda de actividad del ENOS, se vuelven significativos, mientras que los periodos de ~2.5 años pierden significancia (Fig. 6). Hay ocasiones en que un mismo espectro muestra dos picos significativos y/o relativamente importantes en el rango de periodos del ciclo ENOS (Fig. 5 y 6).

Esta bimodalidad en la distribución de la energía se comentará más adelante en relación a los resultados del análisis ondicular.

Por otro lado, la variabilidad asociada al periodo decenal de ~13 años es significativa a los 33° N en los dos puntos externos (Fig. 3) y aunque es relativamente importante, no vuelve a ser significativa sino hasta los 23° N (Fig. 4), de nuevo en los dos puntos más externos, para luego ir perdiendo importancia hacia el Sur, confundándose con el espectro de ruido blanco.

Transformada Ondicular. Los resultados de este análisis con la ondícula de Morlet son, en general, consistentes con aquellos obtenidos del análisis de Fourier, es decir, los periodos significativos que aparecen en los EF también se observan en los espectros ondulares (EO). La señal de ~40 años, cuando es significativa cae dentro de la región del efecto deformante de los extremos de la serie (cono de influencia), por lo que es dudosa su relevancia de acuerdo a este análisis.

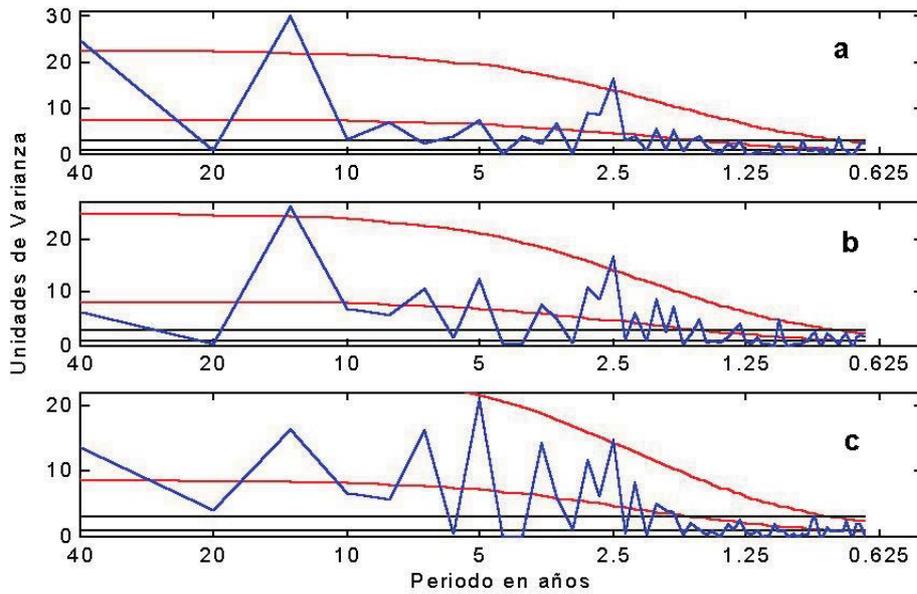


Figura 4. Igual que la figura 3, pero para la latitud de 23° N.

En los EO, el periodo de ~13 años es también consistente, en cuanto a la significancia, con los resultados del análisis de Fourier. El análisis ondicular indica que esta señal es significativa a partir de 1975 hasta principios de la década de los 90 (Fig. 7). Sin embargo, gran parte de su presencia en el EO, cae en la región de influencia de los extremos de la serie, por lo que una interpretación sería dudosa.

Las transformadas ondulares, para el rango de escalas correspondiente a la banda de actividad de ENOS de 2.5 a 7 años, muestran la distribución de la energía en el tiempo para estos periodos. Un resultado importante de acuerdo a este análisis, a diferencia de el de Fourier, es que en todos los EO las señales asociadas a los periodos de ENOS son significativas, pero aquí es posible la localización de intervalos de tiempo

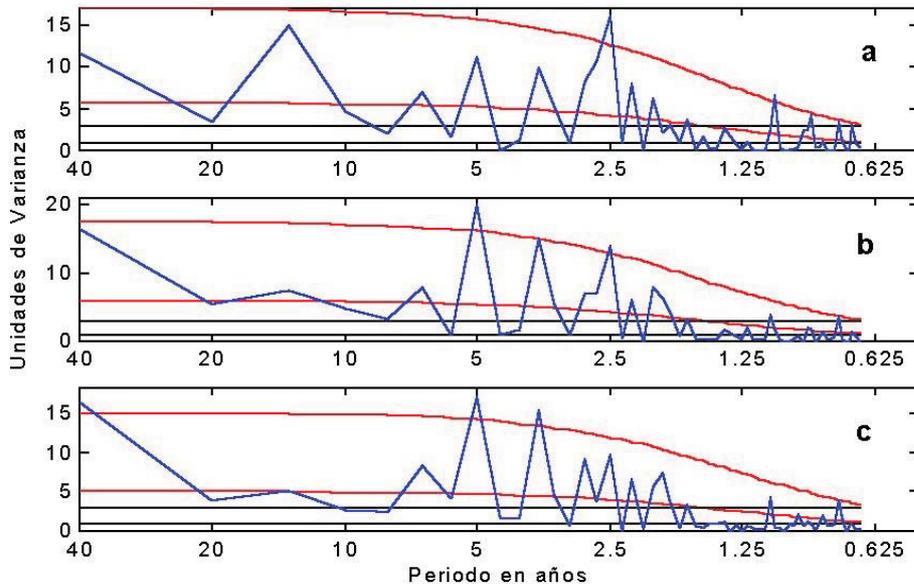


Figura 5. Igual que la figura 3, pero para la latitud de 21° N.

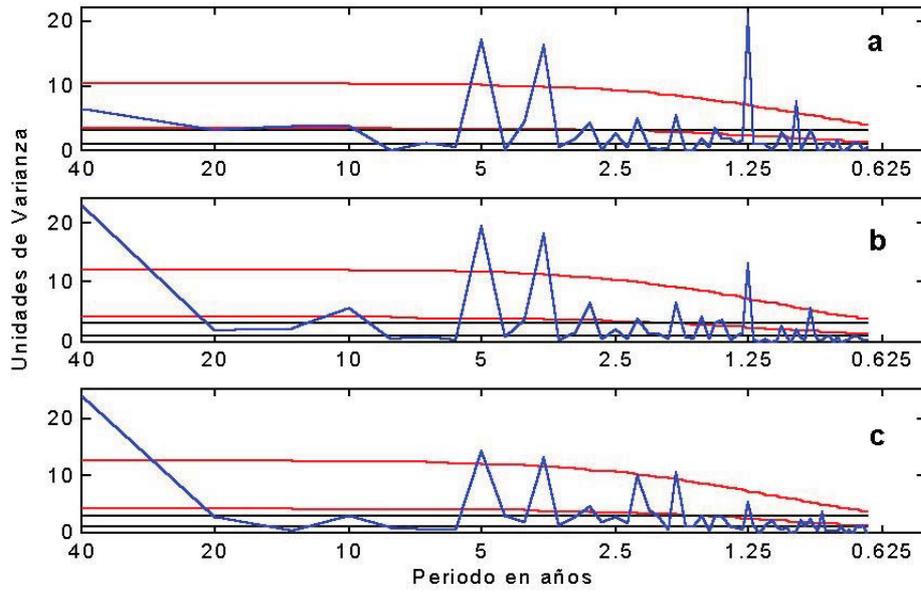


Figura 6. Igual que la figura 3, pero para la latitud de 13° N.

donde se presenta actividad significativa para periodos definidos. En la región de influencia de la Corriente de California (33° - 21° N) las señales del ENOS en los EF se presentan generalmente confundidas dentro de un espectro de ruido rojo. En el análisis ondicular la falta de significancia se observa solamente hasta principios de los 90's

(Fig. 7), de ahí en adelante hasta el final de la serie, se observan valores significativos en la banda de periodos de ENOS. Una diferencia notable se observa a partir de la latitud 19° N hacia el Sur, zona de transición entre la Corriente de California (CC) y el Pacífico tropical. Aquí la actividad de la banda de ENOS ocurre hacia la

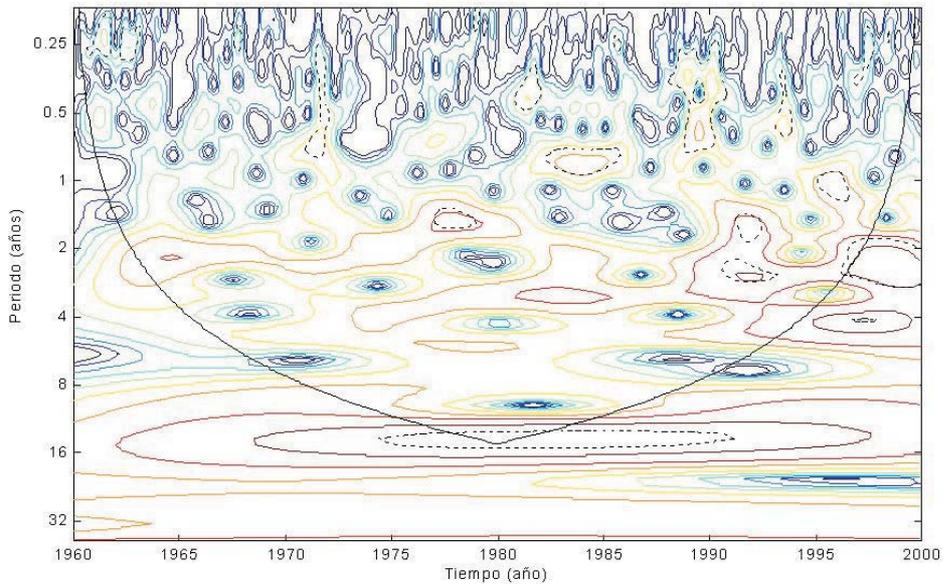


Figura 7. Espectro ondicular (Morlet) para la ATSM en el punto medio a los 33° N. Las líneas punteadas encierran áreas con valores de la transformada significativamente (5%) diferentes de ruido rojo. Las líneas exponenciales marcan el área de influencia deformante debido al efecto de los extremos de la serie.

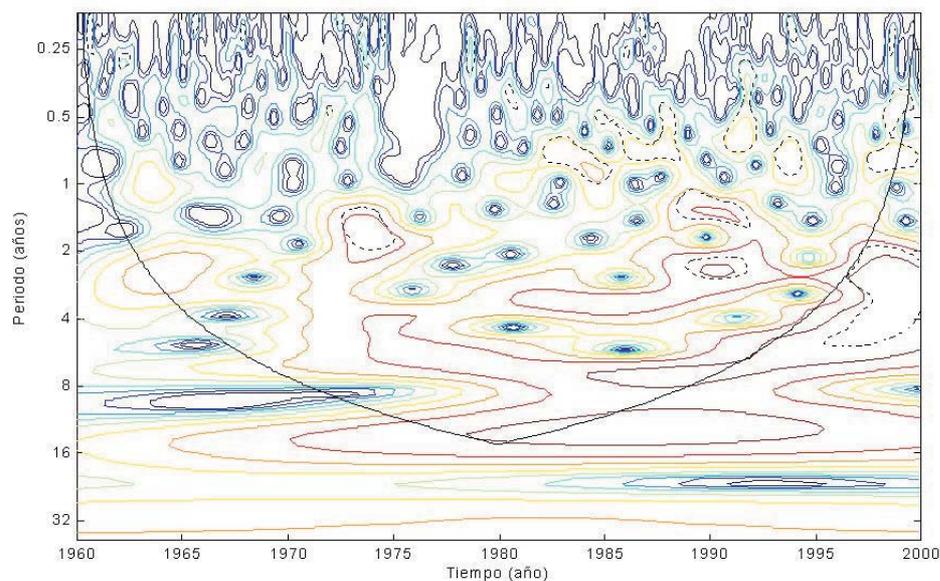


Figura 8. Igual que la figura 7, pero para el punto costero a 25° N.

parte media de la serie de tiempo, algunas veces dividida en dos o más partes significativas (Fig. 8, 9 y 12) y otras como una zona continua (Fig. 10 y 11). En la región de la CC, los periodos significativos a partir de ~1990, comprenden desde los 2 hasta los 4 años (Fig. 7), aunque en la mayoría de los casos parte de la región espectral, con valores significativos, cae dentro del área de influencia deformante del extremo final de la

serie, por lo que los valores señalados no son confiables y solo pueden considerarse como una indicación cualitativa de la actividad ENOS. En cambio, hacia el sur de los 21° N, la ubicación de los zonas de significancia en la banda de actividad del ENOS cae fuera de la zona de influencia de los extremos de la serie e incluso resuelve, en el dominio del tiempo, la presencia de los dobles picos espectrales, que aparecen en

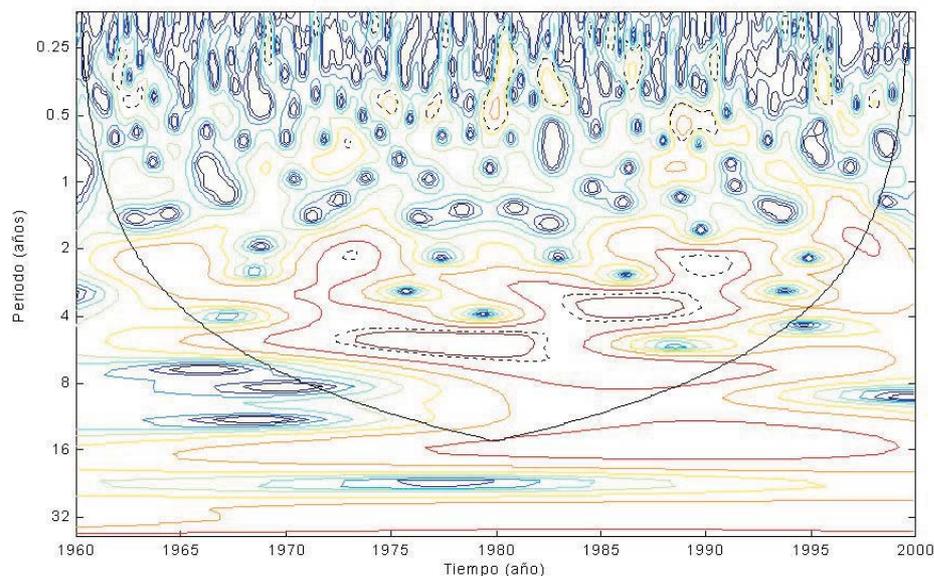


Figura 9. Igual que la figura 7, pero para el punto costero a 21° N.

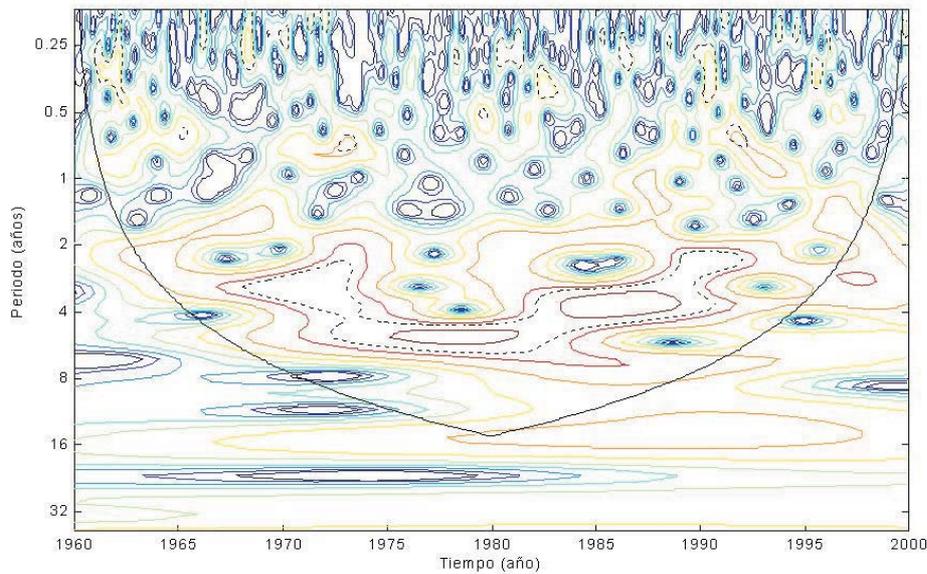


Figura 10. Igual que la figura 7, pero para el punto costero a 19° N.

el análisis de Fourier dentro de la banda de actividad de ENOS. Los EF para la latitud de 21° N (Fig. 5) muestran, para el punto intermedio, hasta tres picos significativos, a ~5, ~4 y ~2.5 años. El análisis ondicular (Fig. 9) revela que el periodo de 5 años fue significativo de 1972 a 1983; el periodo de ~4 años de 1983 a 1990 y el de 2.5 años, alrededor de 1990. En el punto costero a 19° N, el EF (no se muestra) presenta tres picos significativos en 3, 4 y 5 años, mientras que el EO

presenta una modulación continua en forma de "U" (Fig. 10) con periodos del orden de 3 años en los extremos de la "U", desde 1966 a 1992, con un periodo máximo de ~6 años centrado alrededor de 1977. El EF para el punto externo a 17° N (no se muestra) presenta un pico en 5 años y otro a los 3 años. El EO para esta latitud, (Fig. 11) muestra una modulación continua hacia las altas frecuencias desde 1975, ~5 años, hasta 1998, ~2.5 años. En las dos latitudes más australes, 13° N

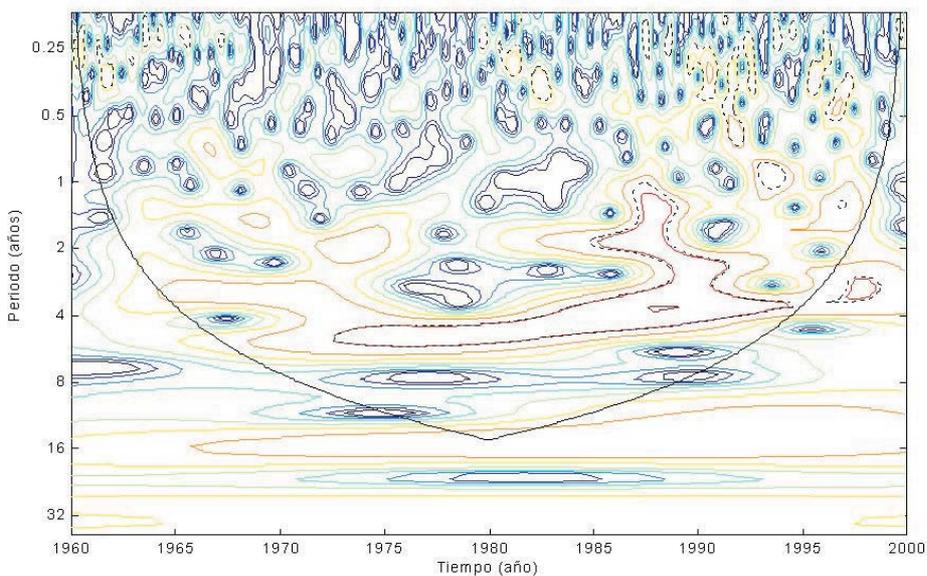


Figura 11. Igual que la figura 7, pero para el punto externo a 17° N.

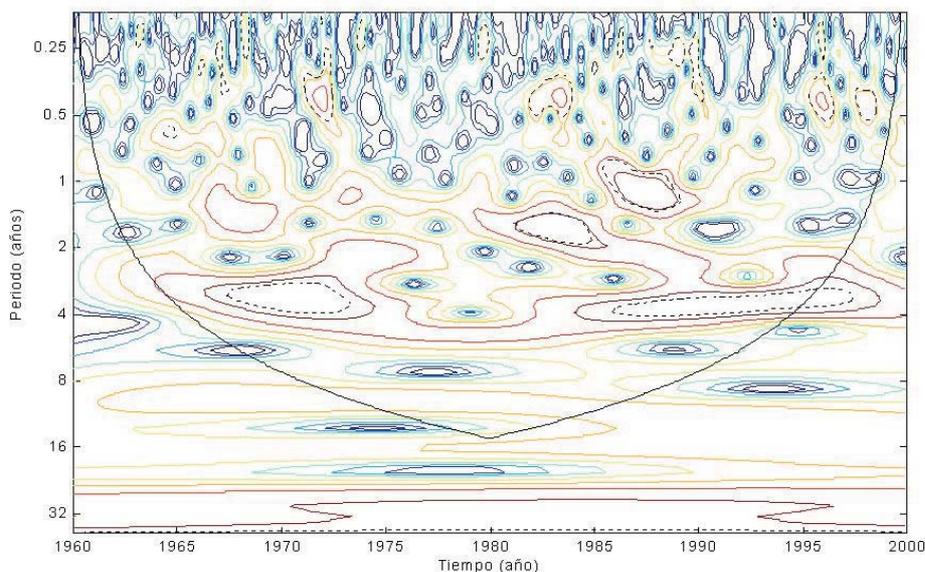


Figura 12. Igual a la figura 7, pero para el punto externo a los 15° N.

(Fig. 6) y 11° N (no se muestra), dos picos significativos, correspondientes a los periodos de ~5 y ~4 años, son muy claros en los EF. En los EO la presencia significativa de actividad en esos periodos no es clara a los 13° N (no se muestra). Los puntos de la latitud 11° N, muestran zonas significativas aisladas en la banda de actividad

de ENOS, similares aunque más extensas que las mostradas en el EO del punto externo a los 15° N (Fig. 12).

Los análisis con la ondícula de Haar muestran claramente la transición climática de 1976/77 en la región que va de los 33° N a los 23° N (solo se muestra la línea de latitud 31° N, Fig.

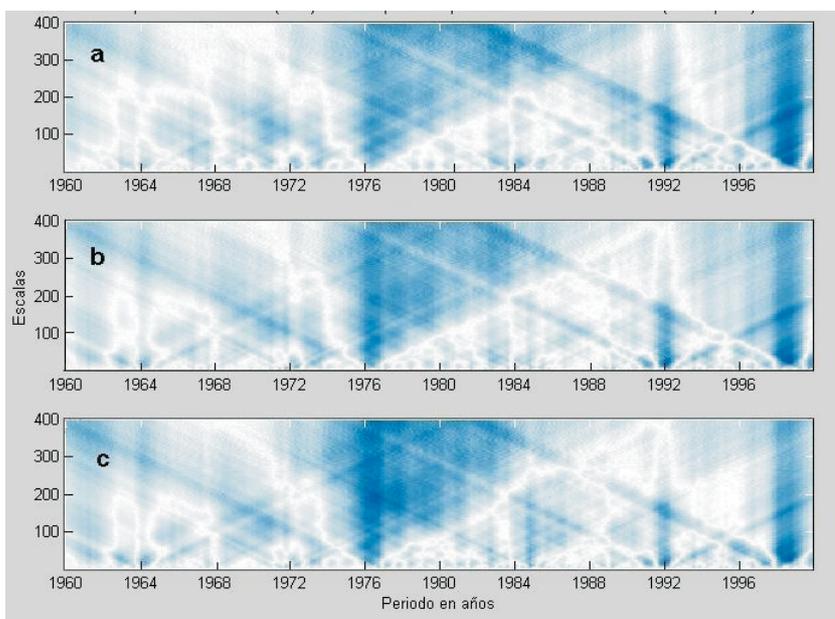


Figura 13. Espectro calculado con la ondícula de Haar para la ATSM en la línea de latitud constante de 31° N: a) punto externo, b) punto medio y c) punto costero. Comparar con la Fig. 2. Nótese la transición en el nivel medio de oscilación marcada entre 1976 y 1977.

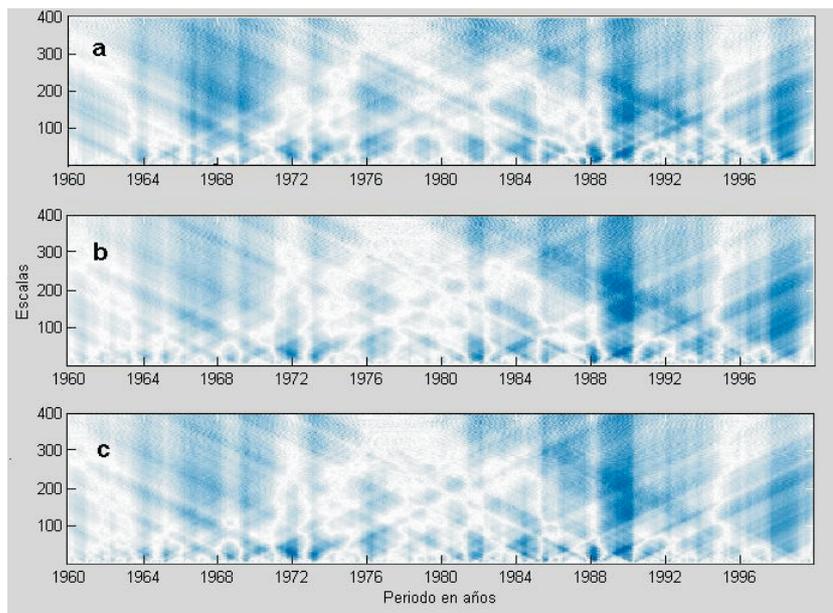


Figura 14. Igual que la figura 13 pero para la línea de latitud 17° . Nótese las indicaciones de transición del nivel medio de oscilación a principios de la década de los 90's principalmente.

13), aunque en las últimas dos latitudes la transición está bien marcada en los puntos externos. Es notable que se observen indicaciones de esta transición en las dos latitudes más australes (13° y 11° N, no se muestran), después de una ausencia de esta entre 21° y 15° N. En todas las latitudes hay indicaciones de transiciones alrededor de principios de los 90's y a fines de la misma década, pero estas indicaciones son más claras en los puntos al sur de 23° N (Fig. 14).

Discusiones y conclusiones

La presencia de un máximo de energía en la frecuencia inmediata a la banda cero, que corresponde a un periodo de 40 años, puede ser el reflejo deformado de una señal cuyo periodo real se encuentre alrededor de este mismo. Es notable que el espectro de el índice de la ODP, con una extensión temporal de 100 años (1900-2000), presente un máximo correspondiente al periodo de ~ 50 años, lo cual apoya la hipótesis de la presencia de la señal multidecenal en nuestras series. En la región Norte de estudio, desde los 33° hasta los 23° N, esta señal está mejor

representada en los puntos más alejados de la costa, lo cual sugiere que los procesos costeros obscurecen esa señal. Sin embargo, es notable que esta sea significativa en el punto más cercano a la costa en la latitud 21° N y en el punto intermedio a los 19° N. También notable es que esta señal sea significativa en algunos puntos a los 15° y 13° N (frente al golfo de Tehuantepec), mientras que a las latitudes 17° y 11° este periodo no sea significativamente diferente de un ruido rojo. Dada la incertidumbre en la definición del periodo, poco se puede decir de esta señal, particularmente al sur de los 23° N. En el análisis ondicular, este periodo multidecenal aparece significativo, de manera consistente con el análisis de Fourier, pero dentro del área de la influencia deformante de los extremos de la serie. La variación multidecenal del Pacífico ha sido estudiada por diferentes autores en análisis de datos (Minobe, 1997; Chao *et al.* 2000; Gedalof y Smith, 2001) como con simulaciones con modelos (Latiff y Barnett, 1994; Gu y Philander, 1997; Barnett *et al.* 1999; Minobe, 1999). No parece haber un único periodo característico para la variabilidad interdecenal. Se señalan periodos de 20, 35, 50 y 70 años, el primero de los cuales se

asocia con la escala de tiempo necesaria para la circulación de una parcela de agua alrededor del giro del Pacífico Norte (Latiff *et al.* 1999), el segundo periodo resulta de un modelo que considera la interacción del océano Pacífico extra-tropical con el tropical (Gu y Philander, 1997). Los periodos de 50 a 70 (Minobe, 1997) se han asociado a la variabilidad no solo de la TSM, sino a otras variables atmosféricas y oceanográficas (Minobe, 1997) probablemente debido a la variación interdecenal de la circulación termohalina de los océanos. De estos estudios, es evidente la posibilidad de una modulación en la frecuencia alrededor de los periodos señalados, bien por la dinámica interna del sistema océano-atmósfera o debido a un forzamiento aleatorio que podrían introducir irregularidades en los ciclos básicos.

Los periodos asociados a el fenómeno ENOS presentan en los EF picos significativos para casi toda la región de estudio. Excepto en la región Norte de la franja costera analizada (33° y 31° N) la cual coincide con el extremo Sur de una circulación ciclónica secundaria y semipermanente, el remolino del Sur de California (Lynn y Simpson, 1987) y en la vecindad de la posición media del Frente de Ensenada (Haury *et al.* 1993), lo cual podría estar bloqueando la propagación libre de la señal ENOS.

Es notable que la señal ENOS sea significativa en los periodos cortos (~2.5 años), en la región comprendida desde los 29° N hasta los 21° N, mientras que a partir de ahí hacia el Sur, hasta el extremo de la franja costera analizada, sean significativas señales de ENOS con periodos mayores (~3 a ~5 años). Sin el análisis ondicular, el hecho de que en los EF el periodo de 2.5 años presente valores significativos de potencia al Norte de la región de estudio, tendría que ser explicada como una característica estacionaria.

En los EO correspondientes a la región de la CC, se observan zonas de valores significativos alrededor del periodo de 2 años a partir de 1990 hasta el final de la serie, mientras que el resto del espectro no presenta actividad significativa en los periodos de ENOS, lo cual se puede interpretar como un incremento en la intensidad

y frecuencia de los eventos ENOS. Esta diferencia, entre la presencia significativa de las señales de ENOS en la región de la CC y el Pacífico tropical, es consistente con lo encontrado por Lluich-Cota *et al.* (2001). Cabe hacer notar que los EO de la región tropical de la franja costera estudiada guardan cierta semejanza con los EO de las ATSM en la región de El Niño 3, para el periodo 1960 al 2000 (ver Fig 1b de Torrence y Compo 1998).

La región al Sur de los 21° N está caracterizada por un relajamiento en las velocidades, tanto de la atmósfera como del océano (Wyrтки, 1965), y cae dentro del dominio de las aguas más cálidas de todo el Pacífico oriental. Además, tiene múltiples influencias oceánicas y atmosféricas como la CC, la Contracorriente Ecuatorial, la corriente de Costa Rica, los vientos alisios y la circulación monzónica, entre otras. Este gran número de influencias puede resultar en un proceso de ruido rojo y oscurecer tanto las señales con periodos decenales, como es el caso de la variación multidecenal (~40 años), pero principalmente la señal de ~13 años, la cual prácticamente desaparece al Sur de los 19° N. Esto indica que solamente los eventos cálidos del ciclo ENOS pueden sobresalir por encima del proceso de ruido rojo en la región tropical del Pacífico mexicano. Para los periodos correspondientes a la actividad de ENOS, el análisis ondicular en esta región muestra modulaciones crecientes y decrecientes en las frecuencias o periodos, así como intervalos de tiempo, durante los cuales aparecen zonas significativas aisladas en vez de presentarse una modulación continua, tal vez debido a efectos locales que deforman la señal de ENOS.

Como se indicó, la señal de ~13 años es significativa solo en algunos puntos al Norte de 21° N dentro de la franja costera analizada, principalmente a los 23° N, y es apenas relativamente importante al sur de esta latitud en unos pocos puntos. Aquí también, como para el periodo multidecenal, hay incertidumbre en la localización exacta de la frecuencia o periodo en los espectros de Fourier. Actualmente hay poco conocimiento en la literatura sobre los procesos

físicos que se puedan asociar a este periodo de ~13 años. Sin embargo, en estudios recientes de datos de TSM (Tourre *et al.* 2001), y datos de TSM reconstruidos a partir de muestras de coral (Cobb *et al.* 2001), identifican en sus resultados variaciones de ~13 años. Se ha señalado también que, la variabilidad de la TSM con escalas de tiempo características de unos cuantos años, hasta siglos, no esta confinada solamente al océano Pacífico, sino que cubre escalas espaciales hemisféricas y globales (Gise y Carton, 1999).

La transición climática de 1976/77 no es un evento único, sino que ya han ocurrido eventos similares en el pasado (Chao *et al.* 2000; Gedalof y Smith, 2001). Sin embargo, dada la longitud de las series empleadas en este estudio, solamente se detectó una transición climática. Esta parece presentarse con claridad en la región central de la CC, ya que en los dos puntos más costeros y los dos intermedios al Sur de la península de Baja California esta transición no está claramente marcada, y se inicia la región donde sí se presentan transiciones en el nivel medio de oscilación asociadas a la década de los 90's, cuando se presento el evento multi-anual de El Niño y el extraordinario evento de 1997/98.

La señal multidecenal de ~40 años aparece consistentemente a lo largo de la CC, aunque solo sea significativa en los puntos más alejados de la costa en la parte Sur de esta región. Aún mas al Sur de la franja costera analizada, su presencia significativa es irregular. Dada la incertidumbre en la exactitud de la frecuencia inmediata a la banda cero, no se puede asegurar que las señales multidecenales en la CC, y aquellas detectadas frente al Golfo de Tehuantepec, tengan una causa común u obedezcan a procesos diferentes.

La transición climática de 1976/77 se presenta definida en la región de la CC, mientras que en la región tropical este salto no es tan evidente.

La señal de ENOS muestra una distribución caracterizada por una presencia significativa en toda la región del Pacífico tropical, mostrando periodos con actividad durante intervalos de tiempo y/o modulaciones continuas. Sin embargo, las señales, aunque

significativas en los EF, no lo son siempre a lo largo de toda la serie según los EO, lo cual puede ser consecuencia de la propia variación interdecenal de la señal ENOS. La región de la CC muestra actividad significativa en los periodos ENOS solamente en la década de los 90's, con periodos de alrededor de 2 años desde principios hasta mediados de la década. Las características particulares de la modulación mostrada por los EO en la región tropical del Pacífico mexicano, pueden ser explicadas por su semejanza con la evolución de la TSM en las regiones El Niño 1+2, 3 y 4 y por efectos locales. Mayor atención merece la variabilidad de ~13 años evidenciada en los espectros de Fourier y ondulares, reportada por otros autores también. La variabilidad multidecenal detectada en la región de la CC principalmente tendrá que ser estudiada basándose en serie de tiempo más largas que las aquí empleadas, lo cual es posible ya que para esta región existen datos desde antes de 1960, mientras que en la región del Pacífico tropical mexicano habrá que esclarecer los mecanismos por medio de los cuales las señales del ENOS se manifiestan en esa región.

Agradecimientos.

El presente trabajo se efectuó bajo el presupuesto del Laboratorio de Climatología del Centro Regional de Investigación Pesquera de Ensenada, órgano del Instituto Nacional de Pesca, actualmente dependiente de la SAGARPA. Se agradecen los comentarios de los revisores anónimos que ayudaron a mejorar la comprensión del artículo.

Bibliografía.

- Barnett P. T., W. D. Pierce, R. Saravanan, N. Schneider, D. Dommenges, y M. Latiff, 1999. Origins of the midlatitude Pacific decadal variability. *Geophys. Res. Lett.* Vol 26(10): 1453-1456.
- Clark N. E., 1972. Specification of sea surface temperature patterns in the Eastern North Pacific. *J. Phys. Ocean.*, (10): 391-404.
- Chao Y., M. Ghil, y C. McWilliams, 2000. Pacific interdecadal variability in this century's sea surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 27(15): 2261-2264.

- Cobb K. M., C. D. Christopher, y D. E. Hunter, 2001. A central tropical Pacific coral demonstrates Pacific, Indian, and Atlantic decadal climate connections. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 28 (11), p. 2209.
- Davis R. E., 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean. *J. Phys. Ocean.* Vol 6(3): 249-266.
- Gedalof Z. y Smith J. D., 2001. Interdecadal Climate variability and Regime-scale shifts in Pacific North America. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28(8): 1515-1518.
- Gise B. S., y J. A. Carton, 1999. Interannual and Decadal variability in the tropical and midlatitude Pacific Ocean. *J. Clim.*(12): 3402-3418.
- Gu D. y S. G. H. Philander, 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. *Science*, Vol. 275: 805-807.
- Haury L. R., E. L. Vernick, C. F. Fey, J. A. McGowan y P. P. Niiler, 1993. The Ensenada Front: July 1985. *CalCOFI Rp.* Vol 3: 69-88.
- Latiff M., D. Dommenges, P. T. Barnett, W. D. Pierce, y R. Saravanan, 1999. Interdecadal interactions between the Tropics and Midlatitudes in the Pacific basin. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 26(5): 615-618.
- Latiff M. y T. P. Barnett, 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, Vol. 266: 634-637.
- Lau K. M. y H. Weng, 1995. Climate signal detection using wavelet transform: how to make a time series sing. *Bull. Am. Met. Soc.*, Vol 76(12): 2391-2402.
- Lluch-Cota D. B., W. S. Wooster y S. R. Hare 2001. Sea surface temperature variability in coastal areas of the Northeastern Pacific related to El Niño-Southern Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* (28): 2029-2032.
- Lynn J. R. y J. J. Simpson, 1987. The California current system: the seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, Vol 92(C12): 12947-12966.
- Kumar P. y E. Foufoula-Georgiou, 1997. Wavelet analysis for geophysical applications. *Rev. Geophys.*, Vol. 35(4): 385-412.
- Miller A. J., D. R. Cayan, T. P. Barnett, N. E. Graham y J. M. Oberhuber, 1994. The 1976-77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography* 7: 21-26.
- Minobe S., 1997. A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 24(6): 683-686.
- Minobe S., 1999. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: role in climatic regime shifts. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 26(7): 855-858.
- Torrence C. and G. G. Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* (79): 61-78.
- Toure Y. M., B. Rajabopalan, Y. Kushnir, M. Barlow, y W. B. White, 2001. *Geophys. Res. Lett.* (28): 2069-2072.
- Weare B. C., P.T. Strub y D. M. Samuel, 1976. Annual mean surface heat fluxes in the Tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Ocean.*, pp 705-717.
- Wyrtki K., 1965. Surface currents of the eastern tropical Pacific Ocean. *IATTC Bulletin*, vol. IX, No. 5: 271-294.

Recibido: 24 de Agosto del 2001
 Aceptado: 12 de noviembre del 2001