

El impacto del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en la generación de ciclones tropicales alrededor de México

Sergio Reyes Coca *
Ricardo Troncoso Gaytán *

Resumen

Se analiza la variabilidad espacial y temporal de algunas características (número, lugar y tiempo de origen) de los ciclones tropicales (tormentas tropicales y huracanes) sobre los océanos Pacífico y Atlántico, alrededor de México, y se discute la posible relación con fenómenos planetarios tales como El Niño - Oscilación del Sur (ENOS), el ciclo de las manchas solares (MS) y la Oscilación Quasi-Bianual (OQB); para esto se utilizan además diferentes índices físicos como son la temperatura superficial del mar, la oscilación del sur, los vientos a diferentes niveles y la radiación de onda larga. Los mecanismos que controlan la generación, intensificación y desplazamiento de estos ciclones tropicales se relacionan con los distintos fenómenos de interacción mar/aire, particularmente con la transferencia de calor y humedad del océano a la atmósfera y con el transporte de energía de los vientos a los diferentes niveles de altura. Los resultados obtenidos sugieren que las anomalías interanuales en la génesis de los ciclones en el Pacífico, se pueden asociar a las MS y a la OQB y no tanto al fenómeno ENOS; mientras que las anomalías interanuales en la génesis de ciclones en el Atlántico, es ENOS el principal mecanismo que los regula. Además, se propone un Índice Multivariado de Generación de Ciclones, derivado del método de funciones empíricas ortogonales, que se puede usar para el pronóstico del número de ciclones a formarse estacionalmente en ambas cuencas oceánicas.

Introducción

Distintas actividades humanas, tales como la agricultura, la pesquería, las comunicaciones y el turismo, entre otras, son afectadas fuertemente por fenómenos meteorológicos que tienen una escala espacial del orden de varios cientos de ki-

* Laboratorio de Climatología, Centro Regional de Investigación Pesquera. Instituto Nacional de la Pesca. SEMARNAP. Ensenada, B.C.

Abstract

The spatial and temporal variability of some general characteristics (number, location and time of origin) of the tropical cyclones (tropical storms and hurricanes) over the Pacific and Atlantic oceans around Mexico is analyzed; furthermore, their possible relationship with other planetary phenomena such as the El Niño - Southern Oscillation (ENSO), the cycle of sunspots (SS) and the Quasi-Biennial Oscillation (QBO) is also discussed; this is done with the aid of different physical indexes such as sea surface temperature, the southern oscillation, the winds at different levels, and the outgoing long-wave radiation. The physical mechanisms that control the genesis, intensification and trajectories of these tropical cyclones are closely related with different air / sea interaction phenomena, particularly the heat and moisture transfer from the ocean to the atmosphere and with the energy transport at surface and upper levels. The results suggest that the interannual anomalies of the number of tropical cyclones over the Pacific ocean is principally influenced by SS and QBO, rather than by the ENSO phenomena; while the interannual anomalies of the genesis of tropical cyclones over the Atlantic ocean could be mainly associated to the ENSO events. Also proposed is a Multivariate Index of Cyclogenesis, derived from the empirical orthogonal functions method, which could be used to forecast the seasonal number of tropical cyclones over both oceans.

lómetros (100 a 1000 km) y una escala temporal del orden de varios días (3 a 10 días). Estos fenómenos, también conocidos como ciclones atmosféricos, tienen como principal función transportar grandes cantidades de calor, humedad y energía de las regiones de mayor acumulación a aquellas en que se tiene un déficit. Los ciclones atmosféricos pueden causar desastres socioeconómicos por las inundaciones y los intensos vientos que se derivan de ellos. Un ciclón siempre tiene una

presión atmosférica baja en la parte central y una presión alta en la parte externa. Los ciclones en el hemisferio norte son aquellos sistemas atmosféricos que tienen una circulación de sus vientos en dirección contraria a las manecillas del reloj; mientras que, en el hemisferio sur, tienen una circulación a favor de las manecillas del reloj. Para que se forme un ciclón atmosférico se deben presentar varias condiciones dinámicas y termodinámicas, tanto en la atmósfera como en la superficie del suelo; en primer lugar, la condición más común es la convergencia horizontal de masas de aire que giran por el efecto de rotación terrestre, adquiriendo el giro ciclónico, y en segundo lugar el movimiento vertical ascendente del aire, característico en todo ciclón, que libera grandes cantidades de energía al presentarse los cambios de fase del vapor de agua. De acuerdo al principio de conservación de la materia, las corrientes de aire, que convergen en el plano horizontal, desarrollan un componente en dirección vertical. En el caso de dos corrientes de aire en la superficie, éstas estarán obligadas a ascender, favoreciendo el desarrollo de distintos procesos termodinámicos como son la convección, la evaporación, la condensación, la formación de nubes y la precipitación. La convergencia de las corrientes de aire no puede presentarse simultáneamente en todos los niveles de una columna de aire; es decir, si el

proceso de convergencia se da en los niveles inferiores, se deberá observar un proceso de divergencia en los niveles superiores; de tal manera que, en promedio se tenga un balance entre las masas de aire que convergen (entrada) y las que divergen (salida). Hay dos tipos principales de ciclones: los ciclones extra-tropicales, que se presentan en la región de las latitudes medias y los ciclones tropicales, que se presentan en las regiones cercanas al ecuador. En este trabajo nos concentramos en los ciclones tropicales, también conocidos como tormentas tropicales y huracanes.

Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales reciben varios nombres en las distintas regiones del mundo (Fig.1): en la región de la India se les conoce como *ciclones*; en la región oriental de Asia se les conoce como *tifones* (esta palabra se deriva del vocablo chino «Ti Fun», que significa «gran viento»); en la región de las Filipinas se les conoce como *baguíos*; mientras que en Australia se les llama *willy willies*; en el resto del mundo el término más usado es de *huracán* (esta palabra se deriva del vocablo maya «hunraken», el cual significa «Dios de las Tormentas»). Independientemente de los nombres, estos sistemas tropicales tienen las mismas causas y propiedades.

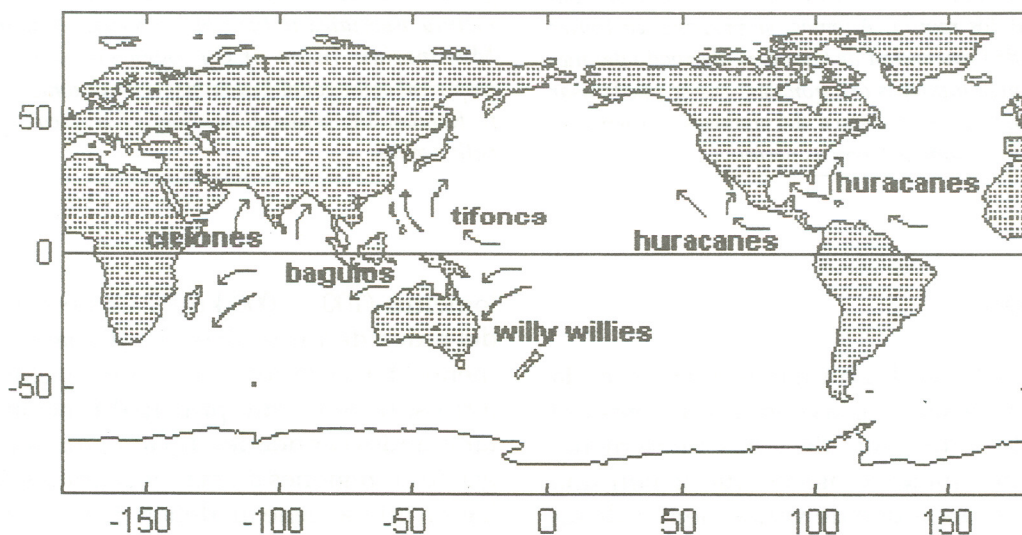


Fig.1 REGIONES DE ORIGEN DE LOS CICLONES TROPICALES (CICLONES, TIFONES, BAGUÍOS, WILLY WILLIES, HURACANES) DEPENDIENDO DE SU LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.

En promedio se forman aproximadamente 100 tormentas tropicales al año en el mundo; unas dos terceras partes de ellos alcanzan fuerza de huracán. Se ha observado que unas dos terceras partes de estos fenómenos se presentan en el hemisferio noroccidental, en el Pacífico asiático (Tabla I). Las temporadas de formación de ciclones van de mayo a noviembre en el hemisferio norte, y de octubre a mayo en el hemisferio sur (Gray, 1978). Hasta finales de la década de los 60's, se creía que México era principalmente afectado por los ciclones del océano Atlántico; sin embargo, desde el advenimiento de los satélites meteorológicos en 1965, el Océano Pacífico Tropical Oriental (OPTO), correspondiente a las costas de México, ha sido reconocido como una región prolífica en generación de ciclones tropicales (Zehnder y Gall, 1991; García y Reyes, 1985), con aproximadamente 16 como promedio anual, mientras que la región del Atlántico americano tiene solamente unos 9 por año, aunque estos últimos tienen una mayor permanencia sobre los océanos cálidos y normalmente son más destructivos e intensos, mientras que los huracanes formados sobre el Pacífico americano en general son de menor duración e intensidad.

Los ciclones tropicales son sistemas atmosféricos de presión baja, caracterizados por vientos intensos y lluvias abundantes, que se originan sobre los océanos tropicales, en ambos lados del ecuador geográfico. A diferencia de las tormentas extra-tropicales, que se desarrollan en regiones de intensos gradientes de temperatura, densidad y viento, como es la región de latitudes medias (con una atmósfera de características baroclínicas), los ciclones tropicales se desarrollan en regiones de débiles gradientes de temperatura y viento, como es la región cercana al ecuador

(con una atmósfera de características barotrópicas). Los ciclones tropicales pasan la mayor parte de su tiempo de vida sobre los océanos, esto se debe a que es ahí donde se producen los principales transportes de calor (latente y sensible) que alimentan a estas perturbaciones atmosféricas; por el contrario, cuando se mueven sobre las regiones continentales ceden gran parte de su energía al suelo, ya sea en forma de lluvia ó por fricción del viento, por lo que son rápidamente disipados.

Los ciclones tropicales han sido objeto de numerosos estudios, tanto de su estructura y características generales, como de los mecanismos que rigen su génesis, evolución y trayectoria, pues son de los fenómenos naturales más impresionantes de la naturaleza y siempre están asociados tanto a efectos destructivos (por los fuertes vientos e inundaciones repentinas) como a efectos benéficos (pues las lluvias permiten la recarga de acuíferos y presas). Los estudios sobre estos fenómenos, hoy en día, se basan en las más sofisticadas técnicas observacionales (aviones de reconocimiento, imágenes de satélite, radar doppler y estaciones de superficie), así como en modelos tridimensionales en computadora. La formación de estos fenómenos meteorológicos, llamada ciclogénesis, se observa en regiones cálidas, húmedas, inestables y donde se presenta una perturbación atmosférica que favorece la disminución de la presión y el giro de los vientos.

En la zona tropical existen varios tipos de perturbaciones ondulatorias que ocurren principalmente en las capas inferiores de la atmósfera y que se originan a partir de los procesos de intercambio de energía, calor y masa entre el mar y el aire. Solamente unas cuantas de ellas evolucionan

Tabla I. Número total promedio de huracanes en los distintos océanos tropicales del mundo	
Océano Pacífico noroccidental	21
Océano Pacífico oriental	16
Océano Atlántico	9
Bahía de Bengala	7
Océano Indico del Sur	5
Mar Timor	3
Mar del Coral	3
Mar de Arabia	2
TOTAL	66

nan hasta convertirse en ciclones tropicales, la gran mayoría, son perturbaciones atmosféricas poco profundas (0-8 km. de altura) que viajan del este al oeste, a lo largo de la Zona Intertropical de Convergencia, inmersas en la corriente de vientos alisios en los trópicos. Estas perturbaciones pueden originarse de distintas formas, pero quizás la más común se deriva de lo que se conoce como las ondas del este.

Génesis de los huracanes

Aunque la evolución de un huracán aún no se entiende completamente, la mayoría de los meteorólogos están de acuerdo en que hay 4 fases principales: 1) la fase de formación, que comienza con una inestabilidad en una onda del este, en la que se inicia el movimiento giratorio de los vientos ciclónicos del orden de 4 a 7 m/s en la superficie y con vientos más intensos en los niveles superiores. Si continúan condiciones favorables, la perturbación evolucionará para convertirse en depresión tropical, donde el movimiento circulatorio se organiza, formando un conglomerado de nubes convectivas con vientos máximos del orden de 18 m/s; 2) la fase de inmadurez, cuando la depresión se intensifica para convertirse en tormenta tropical y se alcanzan velocidades en el rango de 18-33 m/s; durante esta fase, la tormenta es muy simétrica y cubre un área relativamente pequeña, con un diámetro del orden de decenas de kilómetros; 3) la fase de madurez, cuando el diámetro se agranda a varios cientos de kilómetros, formándose el 'ojo', en el cual los vientos logran alcanzar velocidades mayores de 33 m/s, definiéndose el huracán; y 4) la fase de decaimiento, que se inicia cuando los vientos empiezan a disminuir y el ojo desaparece; usualmente los huracanes inician la fase de decaimiento cuando se desplazan sobre regiones con aguas relativamente frías, en latitudes subtropicales, donde es insuficiente la fuente de calor y humedad del océano, o cuando penetran al continente, donde pierden su energía por el efecto friccional del suelo.

Se sabe que la principal fuente de energía que sustenta a los huracanes proviene del calor latente de vaporización del agua. Para que el mar pueda liberar una cantidad suficiente de calor es

necesario que se desarrolle un proceso de convección en la atmósfera, asociado al movimiento ascendente del aire con un giro ciclónico en el plano horizontal; es decir, para la formación y desarrollo de los huracanes, se necesita una combinación apropiada en los procesos dinámicos y termodinámicos del océano y la atmósfera. En términos simples se puede describir el proceso de ciclogénesis de los huracanes de la siguiente forma: conforme los rayos del sol inciden sobre la superficie oceánica, iniciándose la evaporación, el aire húmedo se calienta y se eleva, favoreciendo una reducción en la presión atmosférica y una convergencia de aire con circulación ciclónica alrededor del núcleo cálido del sistema. El aire en ascenso se expande y se enfría, favoreciendo la condensación del vapor de agua y liberando grandes cantidades de calor latente al medio atmosférico, retroalimentando al sistema. Los principales mecanismos físicos para la formación de huracanes son los siguientes (Musk, 1991):

1. Fuerte vorticidad relativa en niveles superficiales.- Se ha observado que los ciclones tropicales sólo se forman en regiones donde existe movimiento ciclónico y convergencia de los vientos en la atmósfera baja. Mientras más grande sea el movimiento giratorio (vorticidad relativa) del aire, mayor potencial de formación para huracanes (o mayor ciclogénesis). A su vez, este proceso de fuerte vorticidad favorece una alta convergencia y un mayor movimiento ascendente de las masas de aire.
2. Fuerte efecto de Coriolis (vorticidad terrestre).- El mayor número de huracanes se observa entre los 10° y 15° N y S, donde el efecto de Coriolis, asociado a la rotación terrestre, se hace importante en el giro natural del movimiento de las parcelas de aire. Este factor es muy importante para la formación de huracanes, pues sirve como condición inicial en el giro ciclónico del viento en las zonas de convergencia. El efecto combinado entre ambas vorticidades se conoce como vorticidad absoluta.
3. Débil esfuerzo vertical del viento horizontal entre la baja y alta troposfera.- Se ha podido observar que las regiones de generación de huracanes coinciden con las regiones de débil esfuerzo ver-

tical del viento; en este caso, se podrá tener una gran energía potencial disponible para alimentar el desarrollo del huracán, permitiendo el aumento del contenido de vapor de agua por unidad de volumen atmosférico. En caso contrario, es decir, a mayor esfuerzo vertical, se tendrá una mayor turbulencia e inestabilidad dinámica que propiciará una gran disipación (o ventilación) de las nubes cúmulos; esto hará que el calor (latente y sensible) disponible para alimentar la perturbación sea distribuido en una mayor área (o volumen) y en consecuencia la energía disponible por unidad de volumen será menor, teniendo menos probabilidades de tener transformación desarrollo de la perturbación en huracán.

4. *Suficiente energía térmica del océano.*- La principal fuente de energía para la formación de un huracán es el calor que extrae del océano. Cuando la temperatura superficial del mar, TSM, es mayor de 27°C se propicia una diferencia de temperatura entre el agua y el aire que genera una transferencia de calor latente y sensible del océano a la atmósfera. Cuando el huracán se desplaza por regiones de temperaturas menores de 27°C, la pérdida de energía es grande y el huracán tiende a disiparse rápidamente. Esta es una de las razones por las que no se observa nacimiento de huracanes sobre las regiones dominadas por corrientes oceánicas frías, como las corrientes de California y de Perú en el Pacífico. La influencia del océano para la formación de huracanes, puede extenderse hasta los 60 m o hasta la profundidad donde la temperatura tenga el valor de 27°C.

5. *Suficiente gradiente vertical de temperatura.*- En general, en regiones de convección intensa, en donde se forman nubes de tipo cumulonimbus, se tendrá un gradiente vertical de temperatura, entre los niveles troposféricos altos y los bajos, del orden de 10°C, lo cual permite un transporte continuo de calor de la superficie del mar a niveles superiores en la atmósfera. Por supuesto que, mientras mayor sea este gradiente, la atmósfera estará ganando más calor y energía potencial para alimentar el desarrollo del huracán.

6. *Alto contenido de vapor de agua en la troposfera baja y media.*- Cuando la región de la troposfera media se encuentra con un alto contenido de hu-

medad (H.R. > 70 %), el peso neto de la columna de aire será menor que a sus alrededores, lo cual favorece una presión baja en niveles superficiales que, a su vez, favorece el movimiento vertical y la formación de convección.

7. *La génesis de ciclones tropicales*, no sólo depende de las características oceánicas y atmosféricas, sino que también los continentes pueden tener una influencia importante. La interacción del viento con las montañas, puede dar como resultado un fenómeno conocido como ondas de sotavento, donde conforme el aire pasa sobre la montaña, se va generando un giro en el viento. Un ejemplo de este fenómeno se presenta cuando los vientos Alisios del noreste, provenientes del mar Caribe y del golfo de México, pasan sobre las sierras de Centroamérica y sur de México, generando una mayor vorticidad del viento sobre la vertiente del Pacífico al suroeste de México. En esta región se ha observado la mayor generación de tormentas tropicales y huracanes del Pacífico oriental, sugiriéndose la posibilidad de que las características orográficas de la zona afecten los sistemas de viento y sea este un mecanismo importante en la generación de huracanes en esta región.

Un huracán es un gran sistema atmosférico, que puede extenderse entre 300 y 500 km de radio, con intensos vientos girando alrededor de un centro de calma relativa. El centro, también conocido como el ojo de la tormenta, puede tener un diámetro del orden de 20 - 30 km de forma circular o elíptica, se caracteriza por vientos débiles, aire seco, cielos despejados, altas temperaturas y una presión atmosférica muy baja. En el huracán, los vientos pueden alcanzar velocidades mayores de 250 - 300 km/hr (70 - 85 m/s), incluso en algunos "super-huracanes" se han detectado rachas con vientos mayores de 400 km/hr (>110 m/s). El huracán puede alcanzar hasta 16 km de altura y llegar a la tropopausa. Su movimiento de desplazamiento horizontal puede alcanzar velocidades del orden de 15 - 20 km/hr (4 - 6 m/s). Usualmente, cuando se encuentra sobre los trópicos, su trayectoria es hacia el oeste-noroeste; conforme se adentra en latitudes subtropicales, puede girar hacia el noreste, siguiendo el patrón de circulación general de la at-

mósfera y los océanos. Hoy en día, gracias a los satélites, se puede dar un excelente seguimiento a los huracanes y detectar muchas de sus características, como son la velocidad y dirección de desplazamiento, así como las grandes concentraciones de nubes cumulonimbus girando en sentido ciclónico alrededor del ojo. Por su parte, de las imágenes de radar y de observaciones directas se pueden detectar abundantes precipitaciones y los intensos vientos asociados a estos ciclones tropicales. Debido a su gran tamaño, a la intensidad de sus vientos, a sus abundantes precipitaciones y a su duración de varios días, o incluso de varias semanas, los huracanes pueden causar severos desastres socioeconómicos cuando entran a tierra, tales como inundaciones, destrucción de zonas portuarias y vías de comunicación, además de la pérdida de vidas humanas cuando no se han tomado las debidas precauciones.

Estructura del viento en un huracán

Las observaciones del viento en los huracanes indican un proceso de convergencia en los niveles superficiales, con vientos húmedos muy intensos girando ciclónicamente (Fig.2a); mientras que los niveles de la troposfera superior se caracterizan por una circulación divergente, en la que se observan vientos relativamente más secos y débiles girando anticiclónicamente. (Fig.2b).

Dadas las condiciones de génesis, descritas en la sección anterior, se tendrá que en una región oceánica de temperatura alta, el aire superficial absorberá humedad y calor del agua, disminuyendo su densidad y siendo entonces forzado a ascender formándose una zona de convergencia en la región central, lo que permitirá que el aire alrededor, relativamente más frío y denso, converja; el aire húmedo al ascender, se enfría y se condensa, liberando calor hacia el medio ambiente, aumentando la flotabilidad e inestabilidad del aire y promoviendo a su vez el movimiento ascendente de las parcelas de aire húmedo. Todos estos factores favorecen una rápida disminución de la presión atmosférica, generándose un fuerte gradiente de presión, haciendo que el aire externo converja hacia el centro, rotando espiralmente en dirección ciclónica por el efecto combinado de vorticidad relativa y de Coriolis, con velocidad creciente hasta llegar a la frontera del ojo. Al intensificarse la componente tangencial de los vientos espirales, la resultante de fuerzas impide que los vientos húmedos convergentes logren alcanzar el centro de la tormenta; entonces éstos ascenderán alrededor del "ojo" permitiendo que el aire más pesado y denso de los niveles superiores descienda y se caliente adiabáticamente, en la región central del ojo. Este proceso de subsidencia no se extiende hasta la superficie, sino que se detiene a una altura aproximada de 1 km, donde se

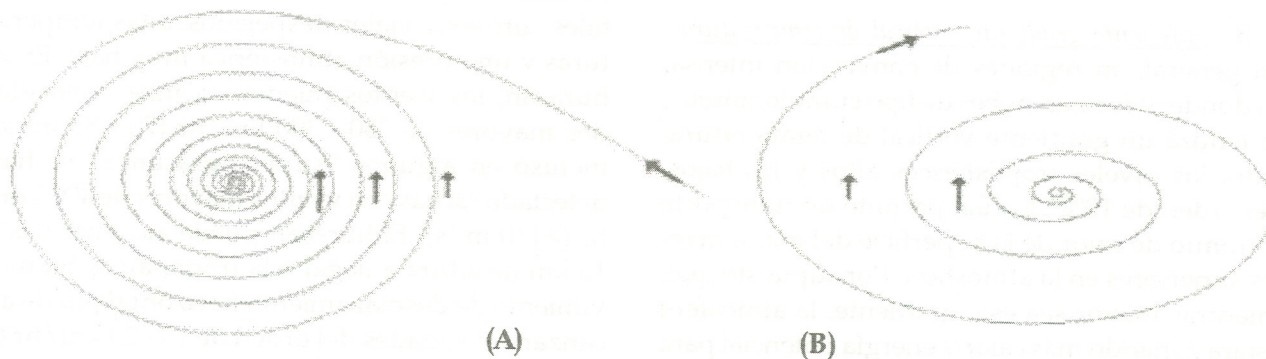


FIG.2 ESQUEMA IDEALIZADO EN EL PLANO HORIZONTAL DE LA CIRCULACIÓN DE LOS VIENTOS EN UN HURACÁN EN EL HEMISFERIO NORTE: (A) EN NIVELES SUPERFICIALES, CON VIENTOS CICLÓNICOS, DONDE EL FUERTE GRADIENTE DE PRESIÓN FAVORECE VIENTOS MUY INTENSOS CONFORME SE ACERCA AL OJO; (B) EN NIVELES SUPERIORES, CON VIENTOS ANTICLÓNICOS, CON UN GRADIENTE DE PRESIÓN MAS DÉBIL Y VIENTOS MENOS INTENSOS QUE EN LA SUPERFICIE. LAS FLECHAS INDICAN LA MAGNITUD Y DIRECCIÓN RELATIVA DEL VIENTO EN AMBOS NIVELES; LA SEPARACIÓN ENTRE LAS LÍNEAS ESPIRALES INDICA LA INTENSIDAD DEL GRADIENTE DE PRESIÓN.

forma una capa de inversión, con aire muy cálido en la parte superior y aire menos cálido por debajo. Conforme los vientos húmedos convergen en los niveles bajos y ascienden en la frontera del ojo, forman las columnas de nubes, en forma de espirales alrededor del centro del huracán. Cerca de la tropopausa comienza la divergencia, alejando el aire del centro con movimiento anticiclónico; la circulación vertical se completa cuando el viento divergente de los niveles superiores desciende a la superficie en la frontera externa del huracán (Fig.3).

El proceso de convección vertical del aire se mantendrá mientras la temperatura de las parcelas de aire en ascenso sea más alta que la temperatura del medio ambiente. Mientras que la entrada de energía por calor sea mayor que la pérdida de energía por disipación (fricción y precipitación) el huracán continuará intensificándose. Por el contrario, el huracán dejará de recibir las grandes cantidades de calor, cuando se mueva sobre corrientes oceánicas frías, sobre los continentes o cuando las corrientes atmosféricas inhiban el proceso termodinámico de convección; en estas condiciones el huracán tenderá a disiparse, liberando grandes cantidades de energía en forma de vientos y de precipitación, destruyendo todo a su paso y causando grandes estragos a la población.

Gracias a los nuevos sistemas de radar instalados en los aviones de reconocimiento, se ha podido tener una idea más clara de la intensidad y estructura de los vientos horizontales dentro de un huracán. En el caso del huracán Gilberto de fecha 14 de septiembre de 1988, se observó que entre la superficie y aproximadamente los 6 km de altura, los vientos tienden a incrementarse muy rápidamente haciéndose máximos (> 60 m/s), a una distancia de 10 a 15 km del ojo de la tormenta; a partir de esa zona, los vientos disminuyen lentamente hasta alcanzar los límites exteriores del huracán; también se puede observar que los vientos de la superficie (por abajo de los 6 km) son de mayor intensidad que los vientos superiores (por arriba de los 12 km) (Fig.4). Los huracanes evolucionan de distinta manera conforme se desplazan sobre la superficie terrestre: sobre los océanos cálidos, reciben energía principalmente de la evaporación del agua, mientras que sobre los continentes, pierden rápidamente su energía, principalmente en forma de intensos vientos y abundantes precipitaciones. Se puede representar la evolución de un huracán en términos del comportamiento de la intensidad del viento y la presión atmosférica, tanto sobre la superficie oceánica, donde los cambios son relativamente lentos, como cuando hace su entrada al continente, donde tanto el viento como la presión varían rápidamente.

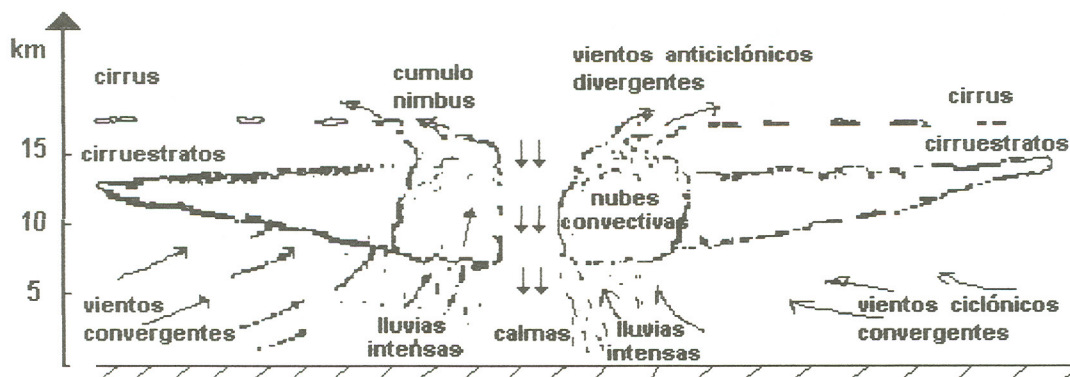


FIG.3 ESTRUCTURA IDEALIZADA DEL CAMPO DE VIENTO Y DE LAS BANDAS DE NUBOSIDAD EN UNA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN HURACÁN. LA COLUMNA ASCENDENTE DE AIRE CÁLIDO Y HÚMEDO DENTRO DEL HURACÁN SE CONDENSA PRODUCIENDO DENSAS NUBES CUMULONIMBUS EN FORMA DE ESPIRALES, CON ABUNDANTE LLUVIA. LA TORMENTA SE NUTRE DEL AIRE CONVERGENTE EN LOS NIVELES INFERIORES, AIRE RELATIVAMENTE FRÍO DESCENDE POR EL OJO Y ES CALENTADO POR COMPRESIÓN ADIABÁTICA.

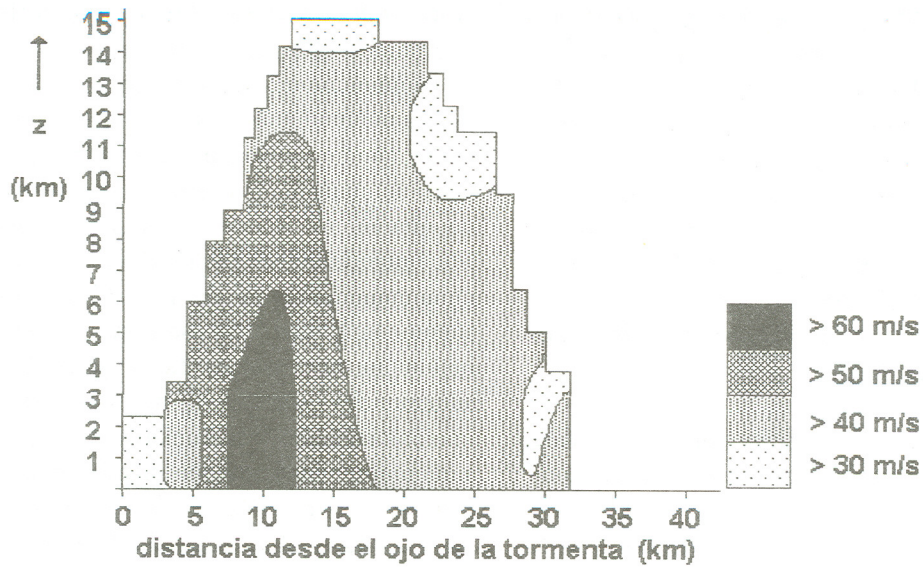


FIG.4 UN ESQUEMA SIMPLE DEL VIENTO EN EL HURACÁN GILBERTO (14 SEPTIEMBRE DE 1988), OBTENIDA POR RADAR. LOS VIENTOS MÁXIMOS EN LA SUPERFICIE SE OBSERVAN EN UNA REGIÓN AISLADA CERCANA AL OJO, DISMINUYENDO RÁPIDAMENTE HACIA EL OJO Y MAS LENTAMENTE HACIA AFUERA DEL HURACÁN. CADA HURACÁN ES DIFERENTE Y ESTÁN CAMBIANDO MINUTO A MINUTO.

VIENTO Y PRESION DURANTE EL PASO DE UN HURACAN

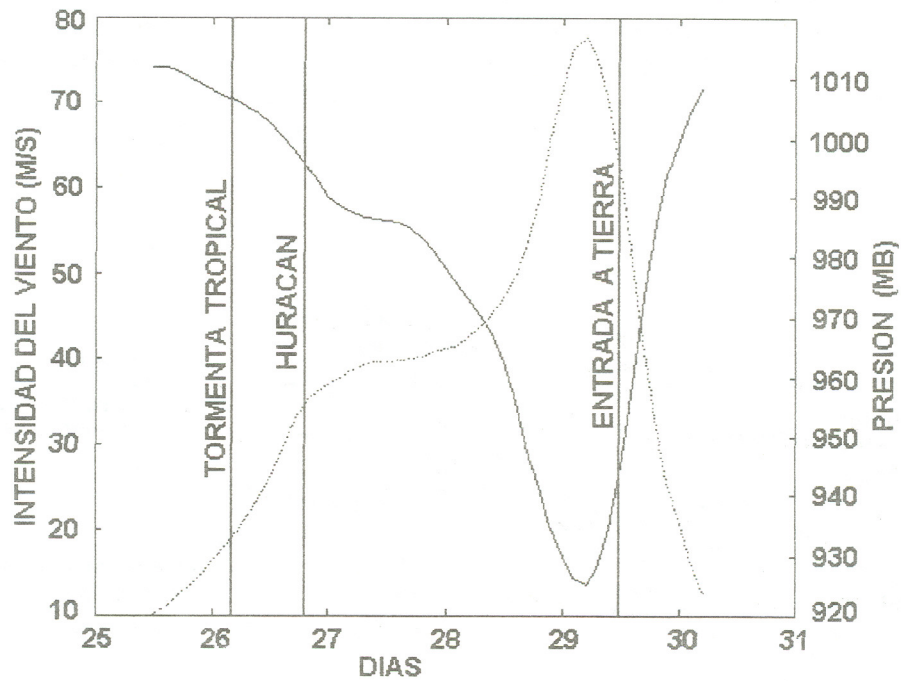


FIG.5 PERFILES DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y LA INTENSIDAD DEL VIENTO DURANTE EL PASO DE UN HURACÁN. [MODIFICADO DE JARVINEN, NEUMANN Y DAVIS, 1988].

De entre los trabajos teóricos realizados a la fecha se pueden citar los de Emanuel y Rotunno (1987), Tuleya (1988), y Kurihara y Tuleya (1981), entre otros, en el campo de los modelos de ciclo génesis; Newman (1979), presenta una guía completa de modelos de predicción de trayectorias. En lo que respecta a estudios observacionales podemos mencionar los trabajos de Charney y Eliassen (1963), Sadler (1964), Gray (1968 y 1978), Zehnder y Gall (1991); la variabilidad interanual de los huracanes ha sido discutida por Reyes y Mejía (1991), Nicholls (1985) y Gray *et. al.* (1997).

Los objetivos de este trabajo son:

- a) actualizar las estadísticas climáticas para el período de 1966 a 1997 del número, lugar y tiempo de origen de los ciclones tropicales en la región oceánica alrededor de México;
- b) identificar los fenómenos de escala planetaria y regional que rijen la variabilidad temporal de estos ciclones tropicales y;
- c) proponer un índice multivariado de ciclones tropicales que pueda ser usado para hacer pronósticos del número de ciclones tropicales por temporada. El tema principal se centra en las condiciones climáticas atmosféricas y oceánicas en las que es factible la formación de un ciclón tropical, en un intento por conocer más a fondo las condiciones de generación en el Pacífico y Atlántico mexicanos.

Datos y metodología

Bases de datos

Los datos sobre los ciclones tropicales (tormentas tropicales y huracanes) se obtuvieron de la página de Internet de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration); éstos consisten de la posición (latitud y longitud) a intervalos de 6 hrs. de cada ciclón tropical, por año, por cuenca oceánica. Los datos de los diferentes índices de la Temperatura Superficial del Mar de la región El Niño 1+2 (TSM), el Índice de la Oscilación del Sur (IOS), los vientos zonales a 30 mb (U30) y a 850 mb (U850), además de la Radiación de Onda Larga (ROL) se obtuvieron de la página

de Internet de la NOAA: <http://nic.fb4.noaa.gov/data/cddb/cddb/indices>.

Estadísticas generales

Los datos para cada parámetro fueron organizados en series de tiempo mensuales desde 1966, año en que se iniciaron observaciones de satélite confiables en el Pacífico oriental, hasta 1997. Se obtuvieron series de tiempo del número de ciclones (NCPA y NCAT) para las regiones de mayor formación de ciclones tropicales en ambos océanos Pacífico (PA) y Atlántico (AT); y se usaron las series de tiempo de los índices estandarizados. Los datos fueron analizados usando las técnicas conocidas de estadística básica (promedios, desviación estandar, filtros, tendencias lineales, anomalías o desviaciones de la normal) y de espectros de potencia con las subrutinas del paquete comercial de cómputo MATLAB.

Índice multivariado de ciclones tropicales

El Índice Multivariado de Ciclones Tropicales (IMCT) se obtiene de una manera similar al Índice Multivariado del ENOS (Wolter y Timlin, 1993). Este índice multivariado se deriva a partir del método de funciones empíricas ortogonales (FEO's) aplicado al total de variables que se quiere analizar. En nuestro caso, se usaron 7 variables: NCPA, NCAT, IOS, TSM, ROL, U850 y U30. En términos generales, el método FEO's se basa en el álgebra de matrices. Debido a que el IMCT se deriva del método de funciones empíricas ortogonales, presentamos una breve síntesis del mismo (para una mayor discusión de este método aplicado a variables oceanográficas y meteorológicas se puede consultar a Kutzbach (1967), Bedi y Bindra (1980), entre otros.

Sea \mathbf{P} definida por la matriz rectangular con elementos $[p_{ij}]$; donde los elementos de las columnas $-i-$ representan cada uno de los parámetros y los elementos de los renglones $-j-$ representan los valores mensuales de cada parámetro. En nuestro caso $i = 1, \dots, 7$ (siete parámetros), mientras que $j = 1, \dots, 384$ ($32 * 12$ meses, de 1966 a 1997).

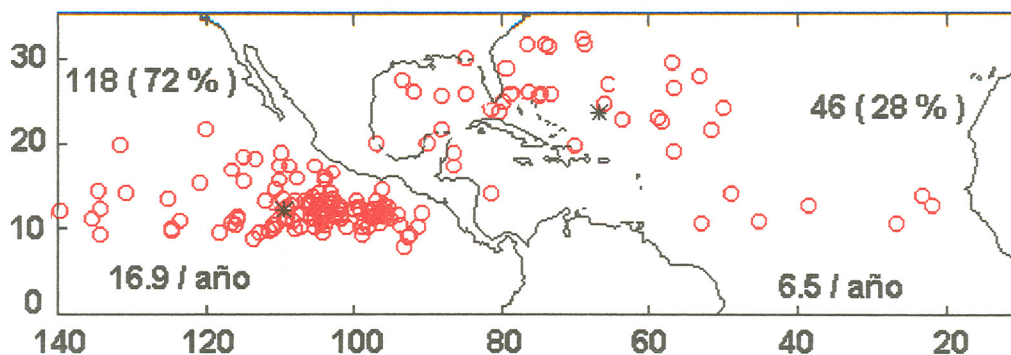


FIG.6 LUGAR DE ORIGEN DE CICLONES TROPICALES DURANTE EVENTOS ENOS (1968, 72, 76, 82, 86, 91 Y 97) COMPRENDIDOS DENTRO DEL INTERVALO 1966 A 1997. SE MUESTRAN LOS VALORES PROMEDIO / AÑO PARA CADA CUENCA Y EL NÚMERO Y PORCENTAJE (%) RELATIVO.

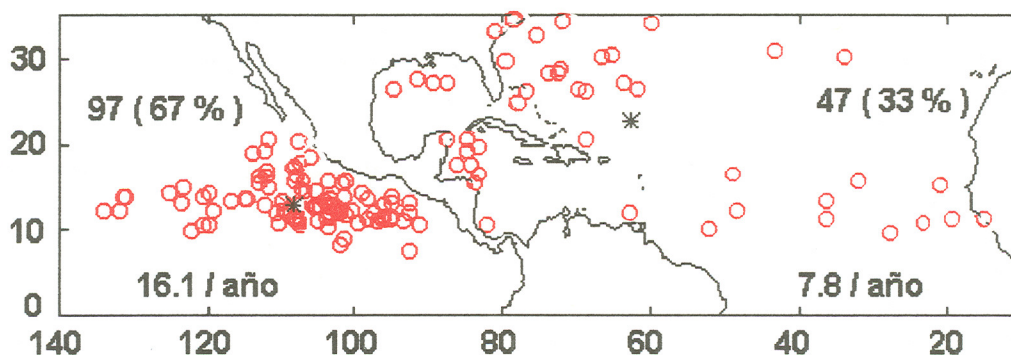


FIG.7 LUGAR DE ORIGEN DE CICLONES TROPICALES DURANTE EVENTOS POST-ENOS (1969, 73, 77, 83, 87 Y 92) COMPRENDIDOS DENTRO DEL INTERVALO 1966 A 1997. SE MUESTRAN LOS VALORES PROMEDIO / AÑO PARA CADA CUENCA Y EL NÚMERO Y PORCENTAJE (%) RELATIVO.

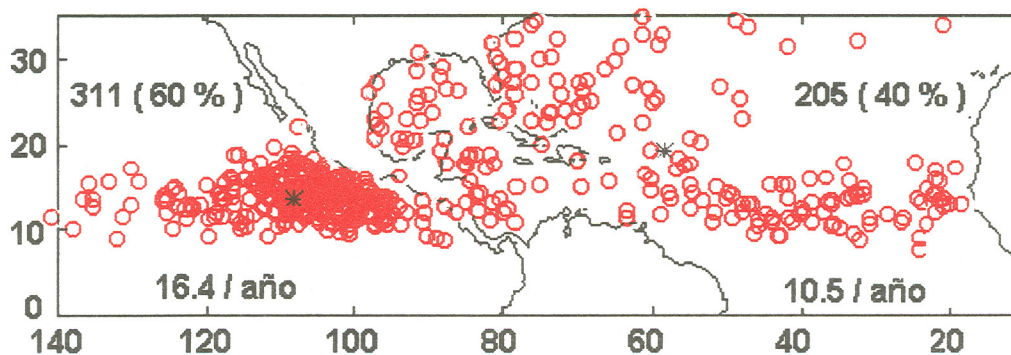


FIG.8 LUGAR DE ORIGEN DE CICLONES TROPICALES DURANTE EVENTOS NO-ENOS (1966, 67, 70, 71, 74, 75, 78, 79, 80, 81, 84, 85, 88, 89, 90, 93, 94, 95 Y 96) COMPRENDIDOS DENTRO DEL INTERVALO 1966 A 1997. SE MUESTRAN LOS VALORES PROMEDIO / AÑO PARA CADA CUENCA Y EL NÚMERO Y PORCENTAJE (%) RELATIVO.

Posteriormente se procede a normalizar la matriz **P** mediante la normalización de la serie de tiempo de cada parámetro:

$$p = (p_i - \bar{p}_i) / s.d. (p_i)$$

a) Se calcula la matriz de covarianza:

$$S = P' * P;$$

b) Se calculan los eigenvalores, **D**, y los eigenvectores, **F**, de **S**:

$$[F, D] = \text{eig}(S);$$

c) Se calcula el porcentaje de varianza para cada modo:

$$D = D * 100 / \text{sum}(D)$$

d) **F** es una matriz ortonormal, donde **I** es la matriz identidad:

$$I = F' * F$$

e) Finalmente se calculan las series de tiempo para cada modo, **Q**:

$$Q = P / F'$$

Este método de las FEO's tiene un uso importante cuando se manejan grandes cantidades de datos, pues al obtener los modos principales (usualmente los 2 ó 3 primeros) estos contienen el mayor porcentaje de la varianza del total de datos, por lo que se puede considerar que esos primeros modos contienen la información física de más relevancia para entender un determinado fenómeno natural. En nuestro caso, el modo 1 se asocia directamente al fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur, este primer modo es similar al Índice Multivariado del ENOS (Wolter y Timlin, 1993); el modo 2 se asoció al fenómeno de los ciclones tropicales en el Pacífico, pudiéndose definir el Índice Multivariado de Ciclones Tropicales del Pacífico (IMCTP), y el modo 3 se asoció al fenómeno de los ciclones tropicales en el Atlántico, pudiéndose definir el Índice Multivariado de Ciclones Tropicales del Atlántico (IMCTA), como se presenta en la siguiente sección.

Resultados

Variabilidad espacial

En las siguientes gráficas se muestran el número y las posiciones de origen de los ciclones tropicales, para ambos océanos, en condiciones ENOS (Fig.6); post-ENOS (Fig.7) y No-ENOS (Fig.8). En el Pacífico, para las tres figuras, se puede observar que la región de máxima densidad de formación está localizada al suroeste de los estados de Oaxaca y Guerrero; mientras que en el Atlántico, no hay una región específica de máxima densidad, sino que se pueden formar ciclones en prácticamente toda la cuenca.

En el caso de las temporadas con eventos ENOS (Fig.6), el Pacífico muestra una región de formación de ciclones más extendida al norte y al oeste, además de incrementar su número ligeramente respecto al promedio anual (de 16 a 16.9 / año); mientras que en el Atlántico la región de formación se contrae y su número decrece significativamente respecto al valor anual (de 9 a 6.5 / año). En el caso de las temporadas con eventos Post-ENOS (Fig.7), el Pacífico muestra un valor muy cercano al promedio (16.1 / año) y una menor área, aunque se detecta un ligero acercamiento del lugar de génesis de los ciclones hacia el suroeste de México; por su parte el Atlántico muestra un ligero aumento con respecto a años ENOS, tanto en el número (7.8 / año) como en el área de formación de ciclones. Finalmente, en condiciones No-ENOS (Fig.8) en el Pacífico la región de máxima densidad se concentra más al suroeste de Oaxaca y Guerrero, pero el número de ciclones se mantiene muy parecido a los otros casos (16.4 / año); por su parte el Atlántico muestra significativas diferencias, pues se detecta un claro incremento en el número de ciclones formados (10.5 / año), por arriba del promedio anual, además de que los ciclones formados en el Golfo de México se hacen mucho más frecuentes que en condiciones ENOS y Post-ENOS.

De los resultados anteriores se puede inducir una diferencia en el efecto que el fenómeno ENOS tiene en la formación de ciclones tropicales para ambas cuencas; es decir, se puede pensar que el Atlántico claramente reduce la formación de ci-

clones cuando hay condiciones ENOS y Post-ENOS, mientras que en condiciones No-ENOS, la formación de ciclones se ve incrementada significativamente (Fig.7). Por el contrario el Pacífico no parece cambiar mucho entre condiciones ENOS, Post-ENOS y No-ENOS, pues el número promedio de ciclones formados no varía mucho para tales condiciones. ¿Acaso el fenómeno ENOS no afecta significativamente la formación de ciclones en el Pacífico? Para tratar de encontrar una posible respuesta, hagamos un análisis más detallado del comportamiento temporal de los ciclones tropicales.

Variabilidad interanual

El estudio de la variabilidad interanual del número de ciclones tropicales se ha convertido en un tópico de investigación muy popular, ya que los impactos socioeconómicos de estos fenómenos son de mucha importancia (Gunther y Cross, 1986). Ya que los modelos numéricos aun no son muy confiables, se siguen usando modelos estadísticos para estimar anualmente el número

de ciclones que se formarán y sus posibles trayectorias. Para esto se usa el conocimiento que se tiene de la variabilidad interanual del sistema océano - atmósfera. Hay numerosos trabajos que investigan la variabilidad interanual de las diferentes características de los ciclones tropicales en los océanos del mundo (e.g. Angell *et. al.*, 1969; Nicholls, 1979; Ding y Reiter, 1981; Shapiro, 1982; Chan, 1985; Gray, 1984; Congbin *et. al.*, 1986, etc.). En particular, Gray et al. (1993) sugieren que parte de los cambios interanuales que se observan en los ciclones tropicales del Atlántico pueden atribuirse al fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur y a los diferentes parámetros relacionados con el mismo ENOS, como son la dirección de los vientos estratosféricos (vientos a los 30 mb), las anomalías de la temperatura del aire y las lluvias en la región del Sahel africano, entre los principales parámetros. Por su parte, los estudios de Reyes y Mejía (1991) para los ciclones tropicales en el Pacífico oriental, sugieren una relación muy importante con el índice de oscilación del sur, la circulación monzónica de Norteamérica y las variables regionales de viento y temperatura su-

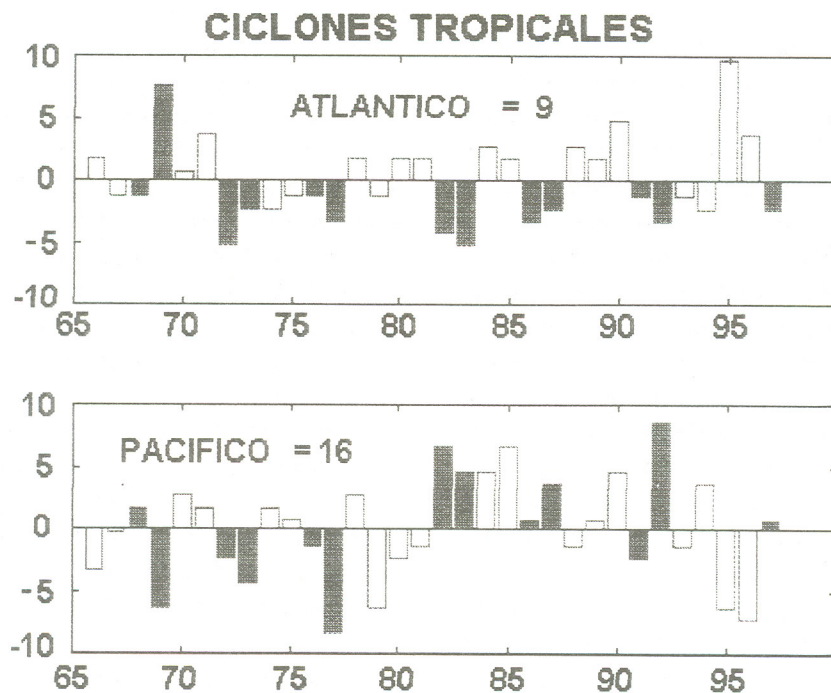


FIG.9 SERIES DE TIEMPO DE LAS ANOMALÍAS DE VALORES ANUALES DE LOS CICLONES TROPICALES (TORMENTAS TROPICALES Y HURACANES) EN (A) EL OCEANO PACIFICO ORIENTAL Y (B) EL ATLANTICO. PARA OBTENER EL NÚMERO DE CICLONES OBSERVADOS PARA CADA AÑO SE DEBE SUMAR LA ANOMALÍA AL VALOR DEL PROMEDIO ANUAL. LAS BARRAS SOMBRADAS INDICAN LOS AÑOS EN QUE SE TUVIERON EVENTOS ENOS.

perfidial del mar, pero hacen notar las diferencias que existen para el período de 1966 a 1979 y de 1980 a 1987. En este trabajo se amplía el período desde 1966 hasta 1997, por lo que se espera que los resultados sean mas concluyentes.

La frecuencia de ocurrencia de las tormentas tropicales y huracanes para cada cuenca oceánica muestra grandes variaciones año con año (Fig.9). En particular se puede notar que el Atlántico muestra una clara disminución de ciclones tropicales durante eventos ENOS y Post-ENOS (con excepción del año 1969), mientras que en condiciones No-ENOS, el número parece incrementarse con el tiempo. Por otro lado, el Pacífico muestra una diferencia notoria entre 1966-1981 y 1982-1997, pues en el primer período se presenta una anomalía negativa durante eventos ENOS y Post-ENOS, mientras que en el segundo período la anomalía es positiva (Tabla II). Estos resultados sugieren que además del fenómeno ENOS, con un período del orden de 3 - 4 años, deben estar superpuestos otros fenómenos con diferentes períodos, tales como las manchas solares (~ 11 años) o la oscilación quasi-bianual (~ 2 años). Para tener una idea más amplia al respecto, procederemos a un análisis espectral de las distintas variables que se utilizan en este trabajo con valores mensuales.

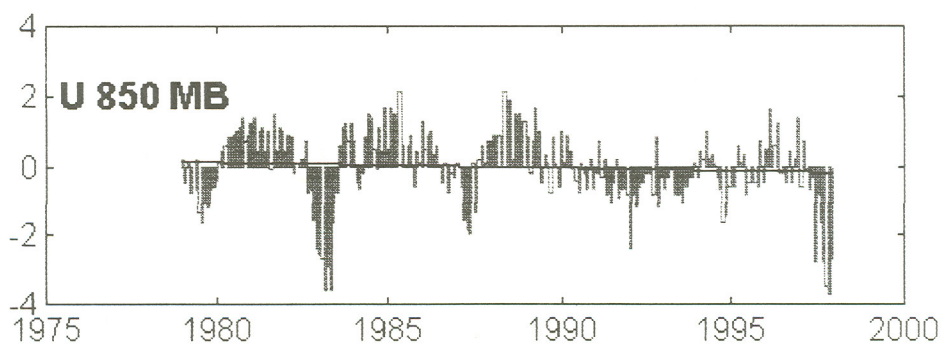
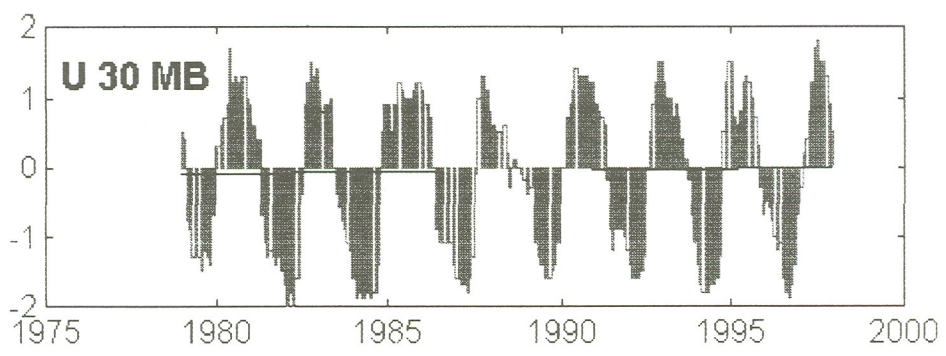
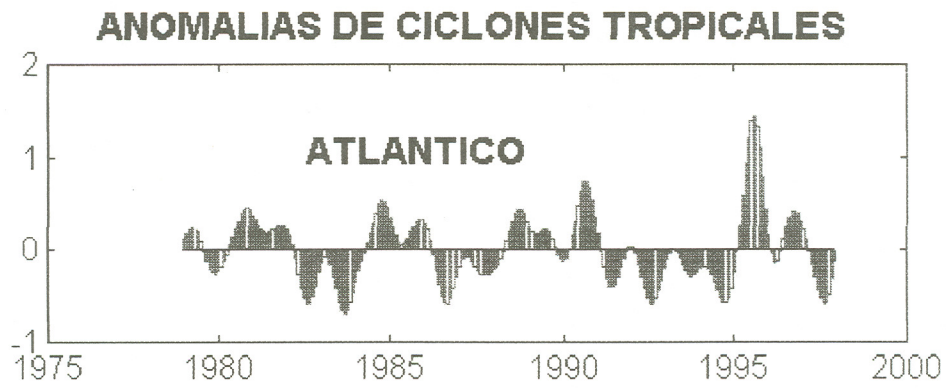
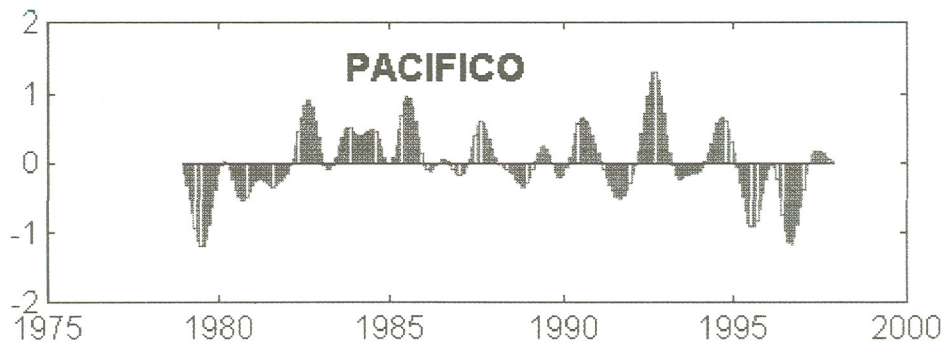
Análisis espectral

En esta sección se analiza el comportamiento temporal de los parámetros ya mencionados. Se usan los valores mensuales desde enero 1979 hasta diciembre 1997, para un total de 19 años con 228 datos por parámetro, esto se hizo debido a que algunos índices usados sólo tienen datos desde 1979, además de que como ya se vio, este último período es radicalmente diferente al primero. Las series de tiempo del número de ciclones tropicales en el Pacífico y el Atlántico fueron filtradas para eliminar fluctuaciones menores del ciclo anual, pues estos datos mostraban una gran variabilidad de mes a mes; en todas las otras series de tiempo se usaron los valores mensuales originales, pues estas series mostraban un comportamiento más homogéneo (Fig.10).

Estos parámetros han sido seleccionados por ser los que representan a los fenómenos ENOS (IOS, TSM, ROL, U850), así como a la OQB (U30). De un análisis visual, se puede detectar una clara correlación (positiva o negativa) entre las series IOS, TSM, ROL y U850, pero de estas gráficas no es fácil detectar sus períodos de oscilación, ni mucho menos la coherencia entre las mismas. Entonces, para tratar de detectar esas características se aplica un análisis espectral a las mismas

TABLA II		66-81	82-97	66-97
Pacífico	ENOS	15.6	18	16.9
	Post-ENOS	10	22	16
Atlántico	ENOS	6.6	6.5	6.6
	Post-ENOS	10	5.6	7.7

TABLA II. PROMEDIO ANUAL DEL NÚMERO DE CICLONES TROPICALES FORMADOS EN AMBAS CUENCAS DURANTE LOS PERÍODOS 1966 - 81, 1982 - 97 Y 1966 - 97, PARA CONDICIONES ENOS Y POST - ENOS.



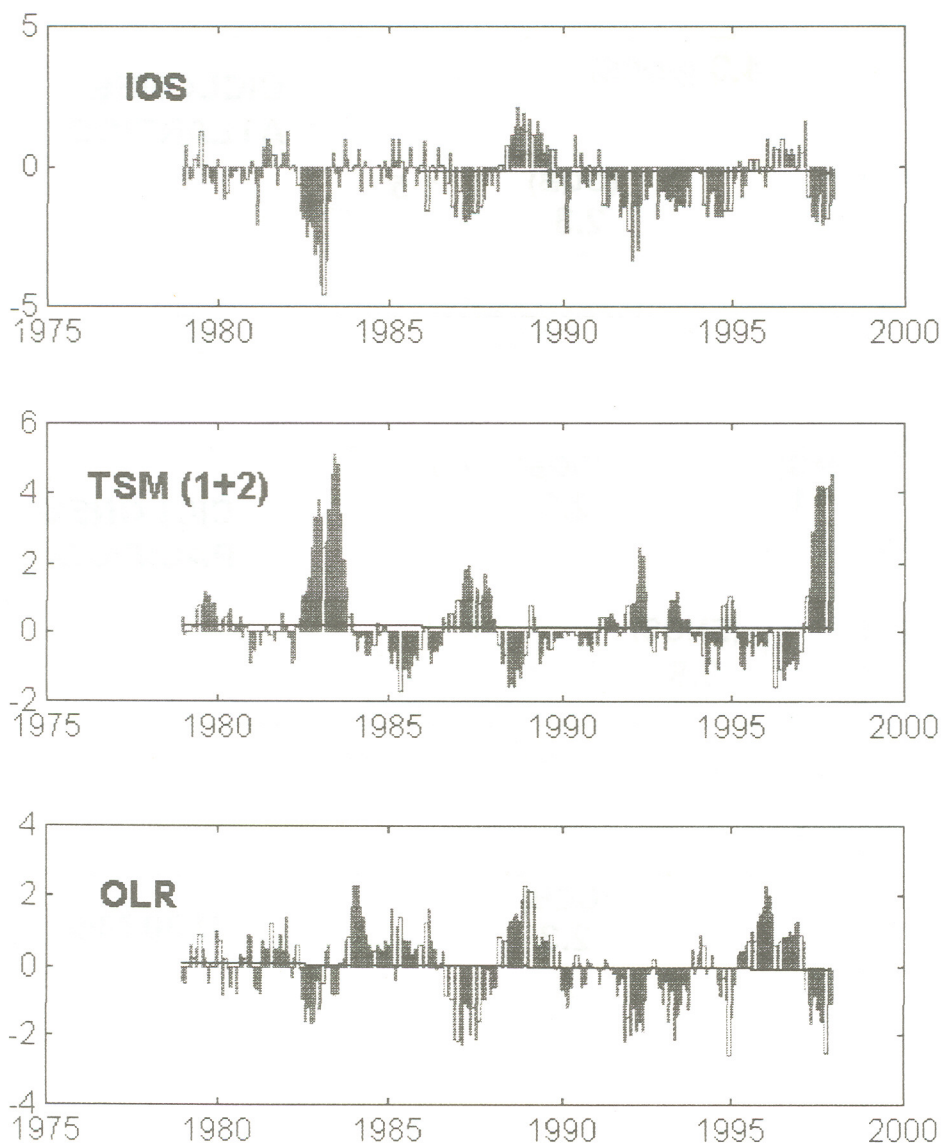


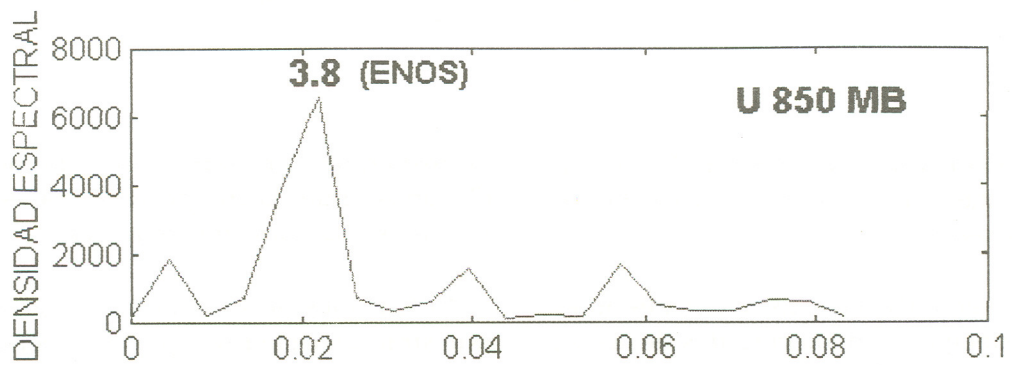
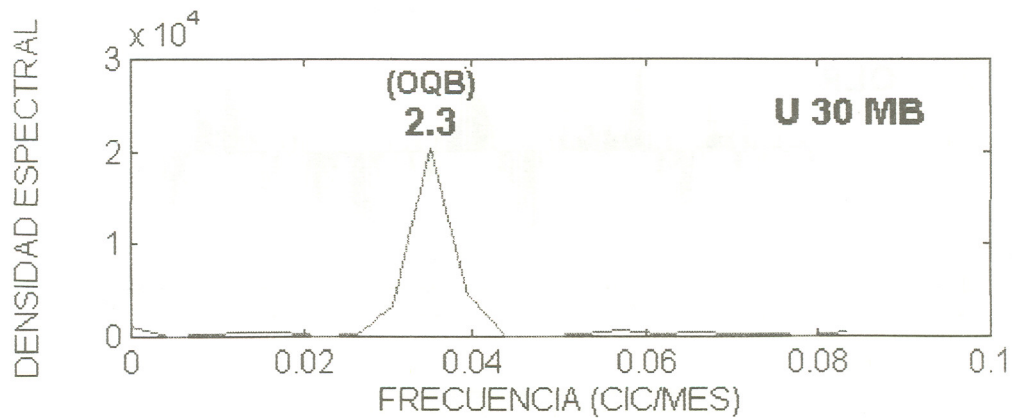
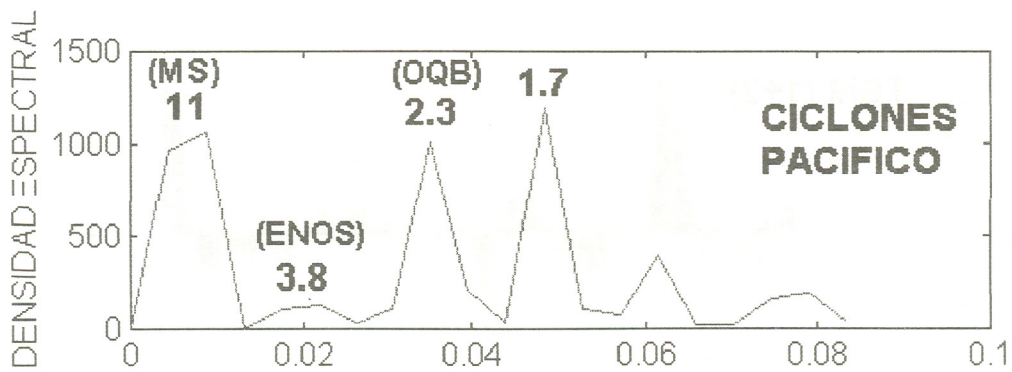
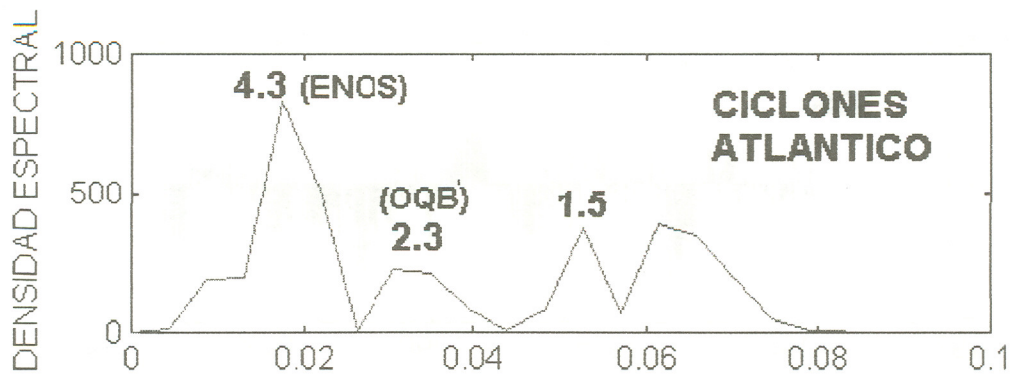
FIG.10. SERIES DE TIEMPO DE LOS PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL: IOS = ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR, TSM (1+2), TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN LA REGIÓN NIÑO 1+2, U30 = VIENTOS ZONIALES A LA ALTURA EQUIVALENTE DE 30 MB, U850= VIENTOS ZONIALES A LA ALTURA EQUIVALENTE DE 850 MB, OLR= RADIACIÓN DE ONDA LARGA; Y LOS VALORES FILTRADOS DE LAS ANOMALÍAS DEL NÚMERO DE CICLONES EN EL PACÍFICO Y EL ATLÁNTICO. PARA ESTE ANÁLISIS SE SELECCIONÓ SOLAMENTE EL PERÍODO DE 1979 A 1997, PRINCIPALMENTE POR SER LOS ÚNICOS DATOS DISPONIBLES PARA ESTOS PARÁMETROS.

series (se usa el paquete de cómputo MATLAB) (Fig.11). De estas gráficas se obtienen algunos resultados interesantes:

a) Ciclones en el Pacífico.- Estos ciclones muestran ciclos principales en los períodos de la oscilación quasi-bianual (2.3 años) y de las manchas solares (~11 años). Parece ser que estos ciclones

no responden directamente al fenómeno ENOS (3-5 años), pues la energía espectral en estos períodos es relativamente pequeña.

b) Ciclones en el Atlántico.- Estos ciclones muestran un ciclo principal en el período del fenómeno ENOS, mientras que los otros ciclos (MS y OQB) prácticamente son inapreciables.



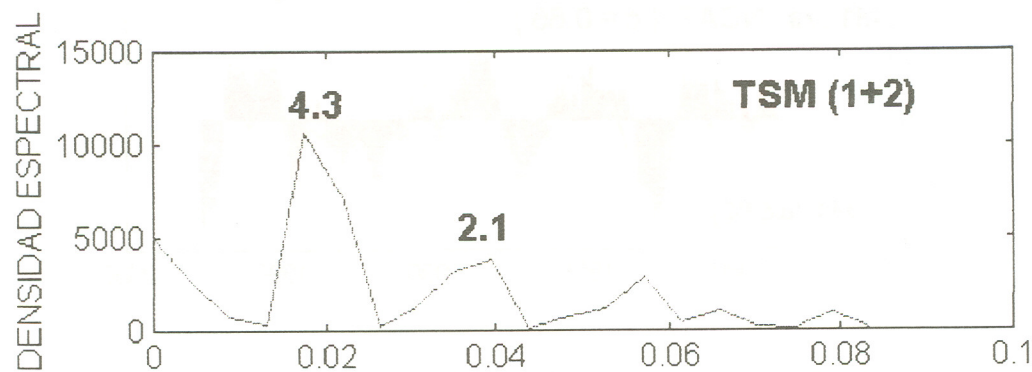
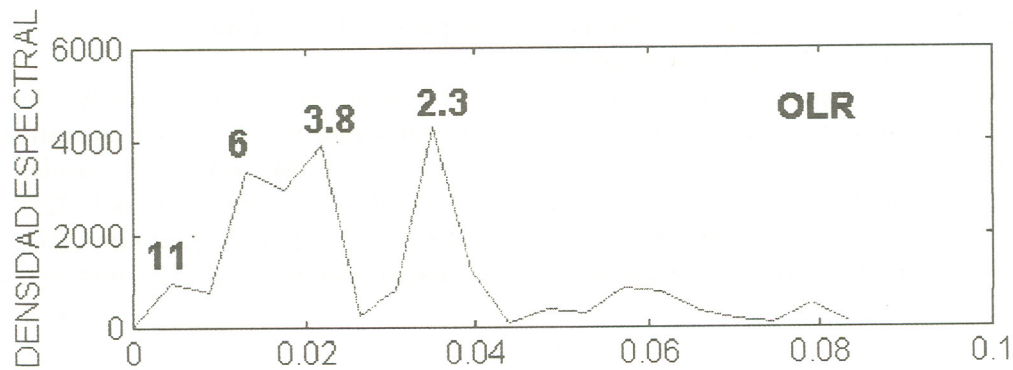
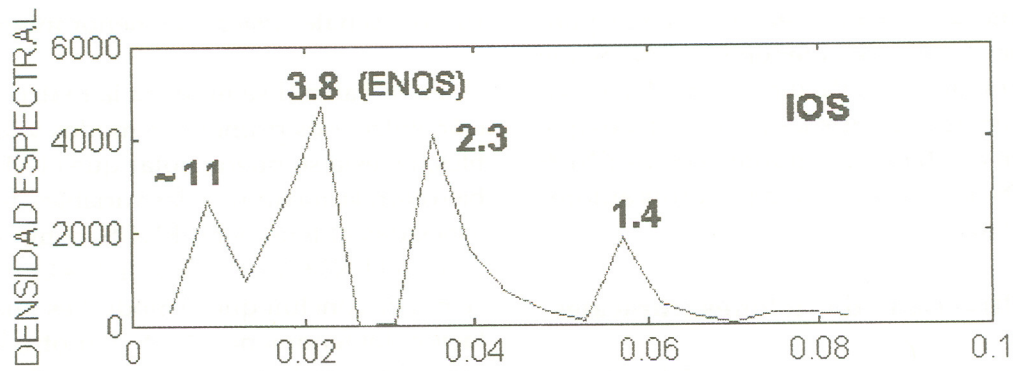


FIG. 11 ESPECTROS DE POTENCIA PARA LOS DISTINTOS PARÁMETROS USADOS. EN EL EJE HORIZONTAL LAS UNIDADES SON DE FRECUENCIA (CICLOS/MES), LOS NÚMEROS ARRIBA DE LOS DIFERENTES PICOS INDICAN EL PERÍODO EN AÑOS, SE INCLUYEN NOTACIONES DEL POSIBLE FENÓMENO FÍSICO QUE ESTÉ ASOCIADO A CADA PICO ESPECTRAL.

Es decir, se podría sugerir que los ciclones tropicales que se forman en el Atlántico responden más eficientemente al fenómeno ENOS que aquellos formados en el Pacífico oriental. La relativa buena coherencia entre los pocos ciclones que se forman en el Atlántico durante eventos ENOS y Post-ENOS ha sido analizada por otros autores (e.g. Gray et al., 1993).

Índice multivariado de ciclones tropicales

Al aplicar el análisis de las FEO's al conjunto de 11 variables (NPA, NAT, TMPA, TMAT, VPA, VAT, IOS, EN12, ROL, V850, V30), se obtiene un conjunto de 11 modos, con el 100 % de la varianza total; de estos modos, sólo los primeros 3 modos son importantes, pues contienen aproximadamente el 80 % de la varianza. Mientras que los otros 8 modos sólo contienen el 20% distribuida muy similarmente entre ellos. De tal manera que se puede sugerir que las principales señales físicas están contenidas en esos primeros

3 modos y los demás modos son principalmente ruido o señales físicas de menor intensidad.

En la Tabla II se muestra la matriz de correlación entre esos primeros 3 modos y las 11 variables, de ésta se puede notar que el M1 está muy bien correlacionado con las variables directamente asociadas al fenómeno ENOS, como son: el IOS ($c=0.$), el EN1+2($c=0.$), la ROL ($c=0.$); es decir, que se puede concluir que el modo 1 es una representación del fenómeno ENOS. Por otro lado, el M2 está bien correlacionado con los ciclones tropicales en el Pacífico ($c=0.$); mientras que, finalmente, el M3 está bien correlacionado con los ciclones tropicales del Atlántico ($c=0.$).

De estos resultados, se pueden derivar tres índices multivariados: del M1, el equivalente al Índice Multivariado del ENOS, similar al obtenido por Wolter y Timlin (1993); del M2, se puede derivar el Índice Multivariado de Ciclones Tropicales para el Pacífico (IMCTP), mientras que del M3

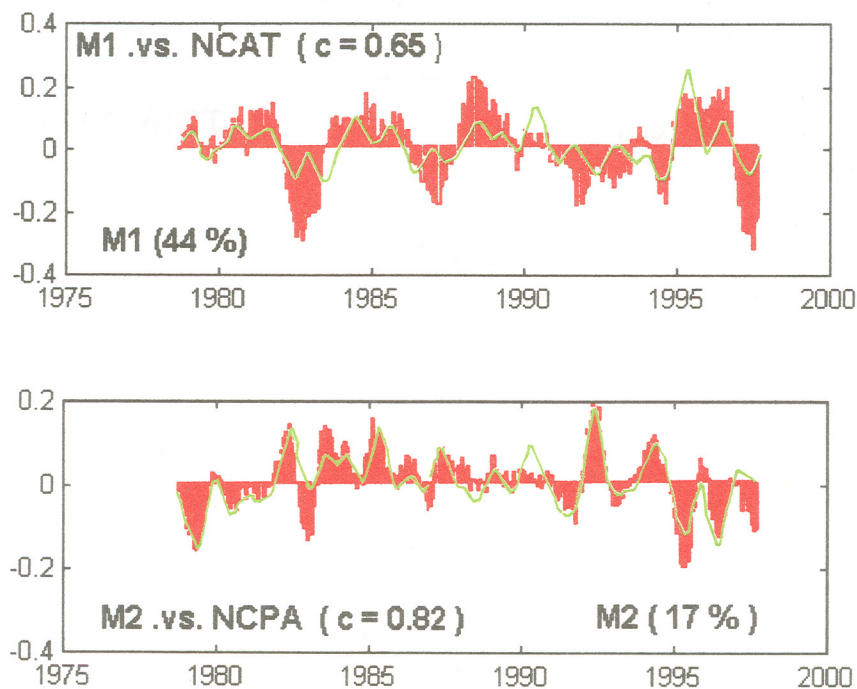


Tabla II

se puede derivar el Índice Multivariado de Ciclones Tropicales para el Atlántico (IMCTA).

Conclusiones

Los huracanes ayudan a mantener el balance de calor en el mundo, actuando como «válvulas de seguridad», las que extraen el exceso de calor de los trópicos, transportándolo hacia las latitudes altas, además de formar parte importante en el balance de agua, redistribuyendo el agua dulce sobre los continentes para la recarga de los mantos freáticos. En general, la cantidad promedio de lluvia asociada a un huracán, puede variar entre 8 y 15 centímetros en una región particular, aunque estos valores dependerán de la topografía y altura del suelo, y del viento; en algunas ocasiones se han observado precipitaciones promedio de 50 cm, en un solo evento de huracán. Del total de energía extraída del océano por evaporación, aproximadamente un 90 % es liberada como calor latente de condensación al formarse las nubes y la lluvia; sin embargo, sólo un 3 % puede ser convertido en energía mecánica, disponible para generar y alimentar los vientos. Este 3 % es equivalente a unos 10 mil millones de KW-hr. Para darse una idea esquemática de esta energía, considérese la precipitación observada de un huracán, que puede ser de unos 10 cm en el transcurso de 1 día; si se tiene un radio aproximado de 300 km., con un área de 280,000 km², para un volumen total de agua de cerca de 2.8×10^{11} m³ o su equivalente de 2.8×10^{11} toneladas; de tal manera que al condensarse esta cantidad de agua se liberan unas 2.8×10^{17} calorías a la atmósfera, lo que equivale aproximadamente a 3×10^{10} KW-hr. Esta energía es equivalente a unas 2 bombas de hidrógeno o a unas 2,000 bombas atómicas, como las que fueron usadas en la 2da. Guerra Mundial, contra Japón.

Bibliografía

Battan, L. J. (1961). «The Nature Of Violent Storms». *Physics and the weather.- Science study series*. Anchor Books Doubleday & Company, Inc. Garden City, New York. USA. p158.

Bengtsson, L., M. Kanamitsu, P. Kalberg & S. Upalla. (1982). «FGGE 4-dimensional data assimilation at ECMWF». *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vol 63. pp 29-43.

Charney, J. G. & A. Eliassen. (1963). «On the growth of the hurricane depression». *Jour. Atmos. Sci.* Vol. 21. pp. 68-75.

Emanuel, K. E. & R. Rotunno. (1987). «An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model». *Jour. Atmos. Sci.* Vol. 44, N° 3. pp. 524-561.

FGGE Data Catalogue. (1982). « First GARP Global Experiment (FGGE) Data Catalogue». Environmental Data and Information Service. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) U. S. Department of Commerce. U. S. A. p. 90.

García, L. J. J. & Reyes S. (1985). «Promedios mensuales del lugar y tiempo de origen de las perturbaciones tropicales en el Océano Pacífico Oriental». Reporte Técnico. CICESE, México. p. 23.

Gray, W. M. (1968). «Global view of the origin of tropical disturbances and storms». *Mon. Wea. Rev.* Vol. 96, N° 10. pp. 669-700.

Gray, W. M. (1978). «Hurricanes: Their Formation, Structure And Likely Role In The Tropical Circulation». Tomado de: *Meteorology Over the Tropical Oceans*. The Royal Meteorology Society. U.K. 278 p. pp 155-218.

Gunther, E. B. (1980). «Eastern North Pacific tropical cyclones of 1979». *Mon. Wea. Rev.* Vol 108, May 1980. pp 631-641.

Haurwitz, B. & J. M. Austin. (1944). *Climatology*. 1st edition, 3th -impression. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, U. S. A. p. 409.

Holton, J. R. (1979). «An Introduction To Dynamic Meteorology». 2nd Edition. *International Geophysics Series*. Vol 23. Academic Press, Inc. NY, USA. p. 391

Kurihara, Y. & R. E. Tuleya. (1981). «A numerical simulation study on the genesis of a tropical storm». *Mon. Wea. Rev.* Vol. 109, N° 8. pp. 1629-1653.

Miller, A. & R. Anthes. (1980). «Meteorology». 4a. Edición. Charles E. Merrill Pub. Co.p. 170.

Newman, Ch. J. (1979). «A guide to Atlantic and Eastern Pacific models for the prediction of

tropical cyclone motion». National Hurricane Center. (NOAA/National Weather Service). Department of Commerce. Miami, Florida. U. S. A. p. 26.

Nicholls, N. (1985). «Predictability of interannual variations of Australian seasonal tropical cyclone activity». *Mon. Wea. Rev.* Vol 113. Jul 1985. pp. 1144-1149.

Nieuwolt, S. (1977). *Tropical Climatology. An Introduction to the Climates of Low Latitudes*. John Wiley & Sons. London, 1977. p. 207

Palmén, E. & C. W. Newton. (1969) «Atmospheric Circulation Systems: Their Structure And Physical Interpretation». *International Geophysics Series*. Vol 13. Academic Press. New York, U. S. A., p. 603.

Reyes, S., et. al. (1980b). «Plan operativo del CICESE durante El Primer Experimento Mundial Del Tiempo, FGGE-GARP.1979». Reporte técnico, CICESE. México. p. 94.

Reyes, S., T. N. Krishnamurti, O. E. Ramírez S. (1980a). «Meteorology of Central America and México». MECEMEX 1981-1987. Reporte técnico, CICESE. México. p. 27.

Reyes, S. (1985). «Apuntes del curso de Meteorología. Interacción Océano-Atmósfera». Revisión Otoño de 1985. CICESE, México. p. 82.

Reyes, S., D. Villalobos, R. Hasimoto & J. García. (1985b). «Análisis of the III-b FGGE data set over the Tropical Americas». Technical Report. CICESE, México. p.29

Reyes, S. & D. L. Cadet. (1988). «The Southwest branch of the Northamerican Monsoon during the Summer 1979». *Mon. Wea. Rev.* Vol 116. pp. 1175-1187.

Reyes, S., J. García, E. García & A. Sanchez. (1985a). *Características meteorológicas de las tormentas y marejadas observadas en el Puerto de Ensenada, B. C. de 1978 a 1983*. Reporte Técnico. CICESE, México. p. 29.

Reyes, S. & A. Mejía T. (1991). «Tropical perturbations in the Eastern Pacific and the precipitation field over North-Western Mexico in relation to the ENSO phenomenon». *International Jour. of Climatology.*, July-August 1991. Vol. 11, pp. 515-528.

Rivera, V. (1985). «Evolución de los campos de viento, divergencia y vorticidad sobre la región tropical de América durante el período de mayo a septiembre de 1979». Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC.

Sadler, J. C. (1964). «Tropical cyclones of the Eastern North Pacific as revealed by TIROS observations». *Jour. App. Met.* Vol. 3, N§ 4. pp.347-366.

Tuleya, R. E. (1988). «A numerical study of the genesis of tropical storms observed during the FGGE year». *Mon. Wea. Rev.* Vol. 116. pp. 1188-1206.

Wolter, K., & M.S. Timlin, (1993). Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. Proc. Of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ of Oklahoma, 52-57.

Zehnder, J. A. & R. L. Gall. (1991). «On a mechanism for orographic triggering of tropical cyclones in the Eastern North Pacific». *Tellus*, 43A. pp. 25-36.