

EVIDENCIA DE ONDAS ECUATORIALES EN SALINAS Y GALAPAGOS*

Por: BONNY BAYOT⁽¹⁾
M. PILAR CORNEJO-RODRÍGUEZ⁽²⁾

RESUMEN

Series de tiempo de promedios diarios de algunas variables oceano-atmosféricas en: SAL (arreglo formado por las estaciones La Libertad-Salinas) y GAL (arreglo formado por las estaciones Santa Cruz-San Cristóbal-Baltra), se han analizado utilizando Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) y Análisis Espectral.

El análisis de las FEO determinó que en las dos estaciones, los modos 1 y 2 explicaban la mayor variabilidad común. En SAL representaron el 39.7% y 23.3%, y en GAL el 56.6% y 20.5% respectivamente, de la varianza total de las series. La presencia del ciclo anual en el modo 1, reveló la existencia de esta periodicidad en todas las series, a pesar que en algunas de ellas, no se evidenció en un primer análisis visual-gráfico. El modo 2 representó la relación entre el nivel medio del mar y los vientos, reflejando que algunas de las oscilaciones, estuvieron forzadas atmosféricamente y seguramente relacionadas a cambios en los vientos alisios locales o remotos.

Además, el Análisis Espectral de las series de tiempo y de los modos 1 y 2 de SAL y GAL, evidenciaron la presencia de distintas oscilaciones con períodos menores al anual, que coincidieron con aquellas de las ondas ecuatoriales (Kelvin y Rossby-gravedad), con algunas periodicidades de mareas, así como con oscilaciones atmosféricas.

Finalmente espectros cruzados entre variables atmosféricas y oceánicas sugirieron en algunos casos, un forzamiento atmosférico local.

ABSTRACT

Time Series of daily averages of some oceanic-atmospheric variables from SAL (array formed by La Libertad and Salinas stations) and GAL (array formed by Santa Cruz-San Cristobal-Baltra stations), had been analyzed using Empirical Orthogonal Functions (EOF) and Spectral Analysis.

EOF analysis determined that in both stations, the first and second modes explained the great variability. In SAL they represented 39.7% and 23.8%, and in GAL 56.6% and 20.5% respectively of the total variation of the series. The presence of the annual cycle in the first mode, reveals the existence of this periodicity in all the series, although in some of them, it was not evident in a first visual-graphic analysis. The second mode represented the relation between the sea level and winds, reflecting that some of these oscillations were forced atmospherically and surely related to changes of local or remote trades winds.

Also, the Spectral Analyses of the time series and of the first and second modes of SAL an GAL, showed the presence of different oscillations with periods lesser than annuals. These were coincident with that of the equatorial waves (Kelvin and Rossby-gravity), some tide periodicities and some atmospheric oscillations.

Finally the cross spectral analysis between atmospheric and oceanic variables suggested in some cases, a local atmospheric forcing.

⁽¹⁾ Instituto Oceanográfico de la Armada, INOCAR.- P.O. Box, 5940.- Guayaquil-Ecuador

⁽²⁾ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL.- P.O. Box, 5863.- Guayaquil-Ecuador

* Trabajo presentado en las Conferencias TOGA 95, Melbourne, Australia

INTRODUCCION

Las ondas ecuatoriales constituyen un aspecto fundamental en la Oceanografía de la Región Ecuatorial. Ellas están directamente involucradas en eventos anómalos que tienen su origen en el Océano Pacífico Occidental, por ejemplo, El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). Cuando en esa región ocurren anomalías significativas en los vientos alisios; ésto es, anormal fortalecimiento de vientos del oeste o repentino debilitamiento de vientos del este, el océano "transmite" esa información al otro lado del Pacífico y lo hace a través de ondas.

Numerosos autores han realizado investigaciones de oscilaciones atmosféricas y oceánicas en la región del Océano Pacífico Tropical (Wunsch y E. Gill, 1976; Luther, 1980, etc). Tales investigaciones han encontrado variabilidades de baja frecuencia (semanas a meses), asociadas a la presencia de ondas internas, especialmente a las llamadas ondas largas.

La importancia fundamental de estas ondas en las regiones tropicales (30°S - 30°N) y especialmente en el sector ecuatorial (5°S - 5°N), radica en que al propagarse más rápidamente que en regiones subtropicales, permiten un ajuste oceánico más rápido y eficaz ante cualquier alteración oceano-atmosférica.

Por lo tanto, grandes cantidades de calor pueden ser redistribuidas y propagadas horizontalmente a través de la capa superficial oceánica en una escala de tiempo de semanas a meses, a diferencia de las regiones subtropicales donde puede tomar hasta años. Esto implica, que en la región ecuatorial se pueden encontrar ondas en casi todas las frecuencias espectrales, mientras que en latitudes medias sólo es posible encontrar ondas en una banda de frecuencia entre las ondas Inercia-gravedad y Rossby (Luther, 1973). Este aspecto señala una variabilidad de baja frecuencia, que es forzada principalmente por factores atmosféricos (vientos), ya que la contribución oceánica (corrientes) es mínima (Philander, 1981).

Es importante considerar lo anteriormente expuesto, al tratar de entender fenómenos que se originan en latitudes ecuatoriales. Así, la rapidez con que se produce la redistribución horizontal y vertical de calor, durante la ocurrencia de sucesos anómalos en el campo de vientos del Pacífico Occidental, puede desencadenar un evento ENOS,

provocando cambios considerables en los patrones superficiales y a lo largo de la estructura subsuperficial oceánica, principalmente en los campos de circulación y temperatura (Philander, 1990).

La forma en que se realiza tal distribución es a través de ondas. Esta es la manera como el océano comunica o transmite una irregularidad hacia otros lados del océano. Al parecer, ondas ecuatoriales se están originando y propagando continuamente, lo que significa que se van a presentar inclusive en períodos de normalidad. De hecho, ello sucede; por ejemplo, la manera en que la zona oriental y central del Océano Pacífico conoce que existe una frontera en el otro lado, es a través de perturbaciones de ondas (Cornejo, 1991).

Lo anterior es un suceso normal. Sin embargo las ondas "interesantes" son las que transmiten cambios anormales, ya que en algunos casos lo hacen sin dispersión. Por ejemplo, las ondas Kelvin que son originadas en el Pacífico Ecuatorial Occidental, por la supresión o cambios de dirección de los vientos del este y coherentes con eventos ENOS, viajan a lo largo del Pacífico Ecuatorial hasta chocar con el continente sudamericano.

Por otro lado, el hecho que en la región ecuatorial la aceleración de coriolis tiende a desaparecer, la convierte en una especie de canal, conocido como canal ecuatorial de ondas, ubicado aproximadamente entre 5°S - 5°N , por donde las ondas viajan impidiendo la dispersión fuera de sus límites.

MATERIALES Y METODOS

La información utilizada consiste en series de tiempo de promedios diarios (período 1985-1988) de: Temperatura Superficial del Mar (TSM), Nivel Medio del Mar (NMM), Presión Atmosférica a Nivel del Mar (PSA) y Vientos: Zonales (en dirección oeste-este, VTOX) y Meridionales (en dirección norte-sur, VTOY).

La irregularidad de los datos en las Islas Galápagos obligó a emplear información combinada de: TSM de la Estación Científica Charles Darwin

en Santa Cruz; vientos y PSA obtenidos en la estación meteorológica de San Cristóbal; y NMM de la estación mareográfica de Santa Cruz combinada con Baltra. Reuniendo esta información se armó el arreglo de la estación que será llamada GAL, centrada en $90^{\circ}00'\text{W}$, $0^{\circ}40'\text{S}$ (Figura 1). Además, se

utilizaron los datos de TSM, PSA, VTOX y VTOY de la estación meteorológica de Salinas y de NMM de la estación mareográfica de La Libertad para

conformar el arreglo SAL, centrado en $80^{\circ} 56' W$, $2^{\circ} 12' S$ (Figura 1). Un resumen con los detalles de estas estaciones se presenta en la Tabla I.

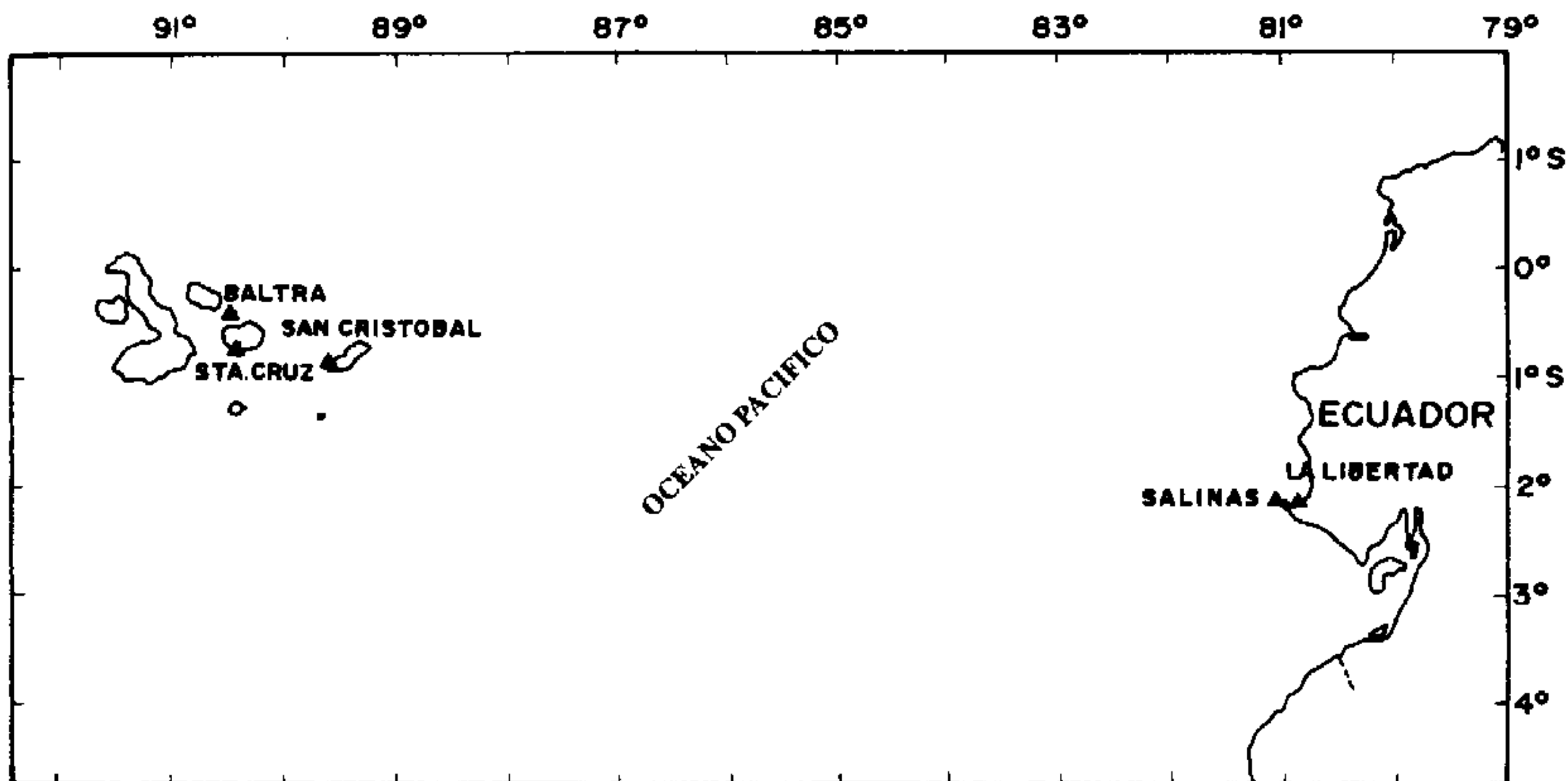


Figura 1. Ubicación de las estaciones oceanográficas-meteorológicas (▲)

Tabla I. Estaciones: Meteorológica (1) y Mareográfica (2)

| ESTACION | TIPO | LATITUD | LONGITUD | FUENTE |
|---------------|-------|------------------|------------------|-----------------|
| Salinas | 1 | $02^{\circ}12'S$ | $80^{\circ}59'W$ | FAE |
| La Libertad | 2 | $02^{\circ}12'S$ | $80^{\circ}54'W$ | INOCAR |
| Baltra | 2 | $00^{\circ}45'S$ | $90^{\circ}18'W$ | INOCAR |
| Santa Cruz | 1 y 2 | $00^{\circ}26'S$ | $90^{\circ}17'W$ | INOCAR ECCHD |
| San Cristóbal | 1 | $00^{\circ}54'S$ | $89^{\circ}36'W$ | INAMHI |

FAE: Fuerza Aérea Ecuatoriana
 ECCHD: Estación Científica Charles Darwin
 INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
 INOCAR: Instituto Oceanográfico de la Armada

Un vacío de datos de tres meses (mayo, junio y julio de 1986) en la serie de NMM de Santa Cruz, fue rellenado en base a una regresión lineal con una media corrida de 15 días de datos de NMM en Baltra. En las series de TSM, VTOX y VTOY de GAL se presentaron tres meses de datos en blanco (enero, abril y julio de 1986) y se rellenaron con las medias correspondientes a cada serie. Eventuales vacíos (en ningún caso más de 6 datos seguidos) se rellenaron utilizando la media correspondiente al mes involucrado. En todos los casos se realizaron pruebas de hipótesis nula utilizando una función de probabilidad F, determinando que las series rellenadas conservaban sus propiedades estadísticas, requisito de estacionaridad para la aplicación de las FEO y Análisis Espectral.

Para un primer análisis se utilizaron conceptos de estadística descriptiva en el dominio del tiempo (Tabla II). Posteriormente se aplicó la técnica de las Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) para obtener la variabilidad común entre los parámetros de las estaciones SAL y GAL (Silva, 1992; Bayot, 1993), siendo ésta, una técnica de reducción de variables que puede sumarizar matrices de correlaciones grandes. Brevemente, las FEO consisten en transformar el conjunto de las variables originales (en este trabajo series de tiempo de TSM, PSA, NMM, VTOX y VTOY) en uno más pequeño de combinaciones lineales (series de tiempo de los modos) que contengan la mayoría de la varianza del conjunto original. Esto se consigue determinando la menor cantidad de modos, que expliquen la mayor

cantidad de varianza de los datos originales. Por lo que, a pesar que matemáticamente se puede obtener tantos modos como variables se hayan utilizado, no todos serán importantes, ya que serán significativos sólo aquellos que expliquen la mayor cantidad de varianza original.

Así, las series de tiempo $X_m(t)$ con n observaciones pueden ser descompuestas en M funciones ortogonales $F_k(m)$:

$$X_m(t) = \sum_{k=1}^M a_k(t) F_k(m) \quad (1)$$

Donde K representa el modo y a_k la amplitud de la serie de tiempo. En otras palabras, $F_k(m)$ representa en forma gráfica vectores ortogonales, por tanto describe un sistema de M ejes coordenados; mientras que la amplitud $a_k(t)$ representa la proyección de las $X_m(t)$ series de tiempo originales sobre la dirección de $F_k(m)$.

Por otro lado, la forma canónica de las FEO es:

$$\sum_{m=1}^M \{X_m X_n\} F_c(m) = \lambda_c F_c(n) \quad (2)$$

Donde $\{X_m(t)X_n(t)\}$ es la matriz de covarianza cruzada muestreada, $F_c(n)$ representa los eigenvectores de la matriz de covarianza cruzada y λ_c representa los eigenvalores.

Tabla II. Principales propiedades estadísticas de las series de tiempo. Período de análisis: 1985-1988.

| ARREGLO | SERIE | MAXIMO | MINIMO | MEDIA | D.E. |
|---------|------------|--------|--------|--------|------|
| SAL | TSM (°C) | 29.0 | 18.4 | 23.9 | 1.73 |
| | NMM (cm) | 289.0 | 242.0 | 257.6 | 6.96 |
| | PSA (mb) | 1015.6 | 1005.7 | 1011.4 | 1.64 |
| | VTOX (m/s) | 1.7 | -5.5 | -2.2 | 0.88 |
| | VTOY (m/s) | 2.4 | -5.4 | -2.3 | 1.02 |
| GAL | TSM (°C) | 28.8 | 16.0 | 23.3 | 2.07 |
| | NMM (cm) | 169.7 | 127.7 | 143.1 | 7.26 |
| | PSA (mb) | 1018.1 | 1005.8 | 1011.9 | 1.78 |
| | VTOX (m/s) | 8.1 | -2.5 | 1.6 | 1.42 |
| | VTOY (m/s) | 3.3 | -8.8 | -2.6 | 1.84 |

VTOX (-): del Oeste
VTOY (-): del Sur

Otro concepto que es necesario conocer es la ponderancia, que se obtiene dividiendo la covarianza para las desviaciones estandar de X_i y Y_j e indica la medida de importancia de cada variable con respecto al modo.

Por último, Análisis Espectral fué utilizado para determinar los períodos energéticos de las ondas. Esto se realizó para todas las series de tiempo, así como para los modos que se encontraron significativos. Espectros cruzados fueron calculados entre las variables de ambas estaciones (SAL y GAL) para determinar las relaciones entre ellas. Los

fundamentos teóricos de estas técnicas se los pueden encontrar en Cornejo, 1984.

ANALISIS DE LAS SERIES DE TIEMPO

Un análisis visual-gráfico inicial de las series de tiempo normalizadas (Figuras 2 y 3), revela la presencia del ciclo anual solamente en la TSM y PSA de SAL y GAL, así como en el VTOY de SAL. En todas las series se observan oscilaciones con períodos menores al ciclo anual, entre las que parecen destacarse las oscilaciones intraestacionales de 40-60 días.

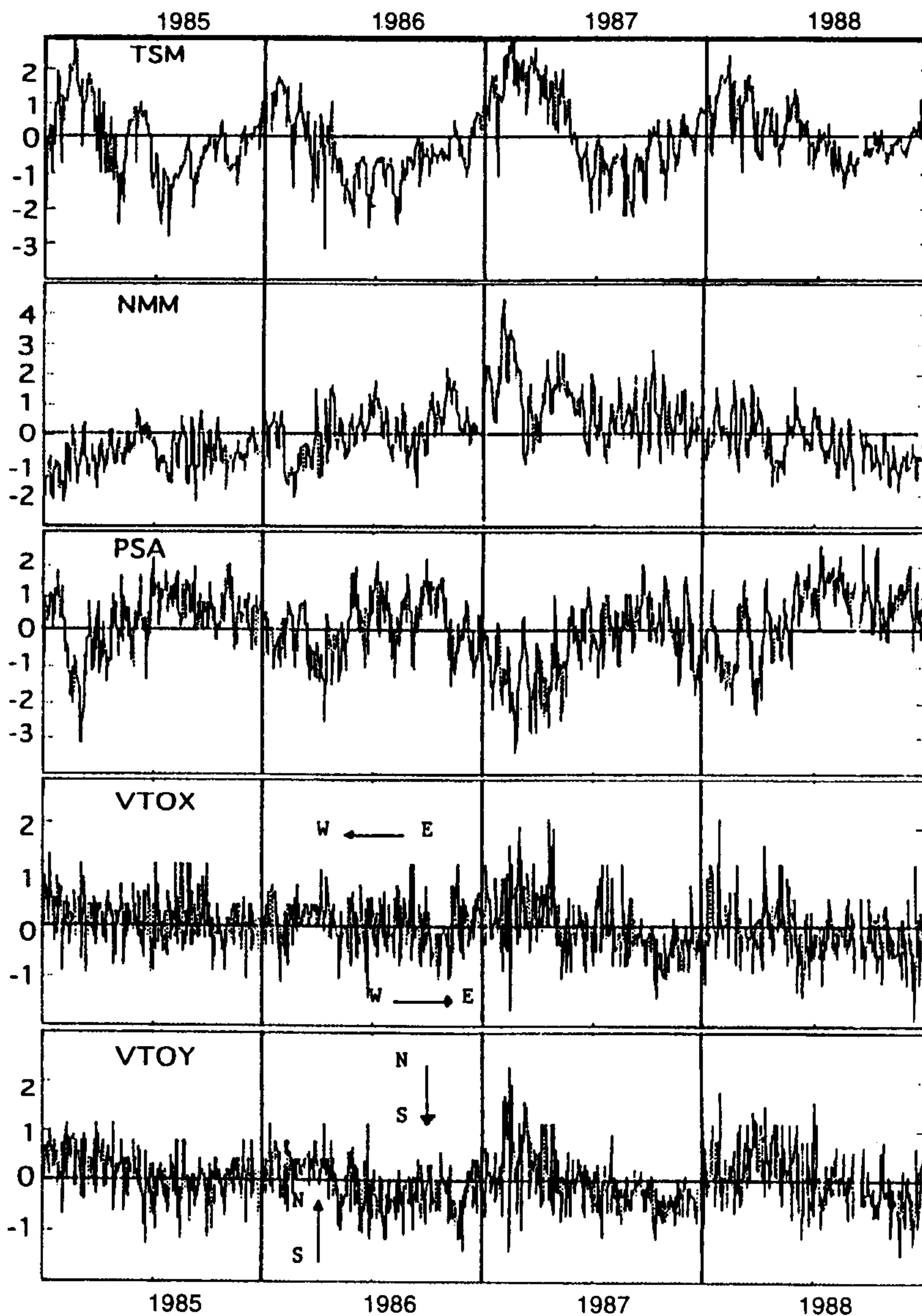


Figura 2. Series de promedios diarios normalizados en SAL

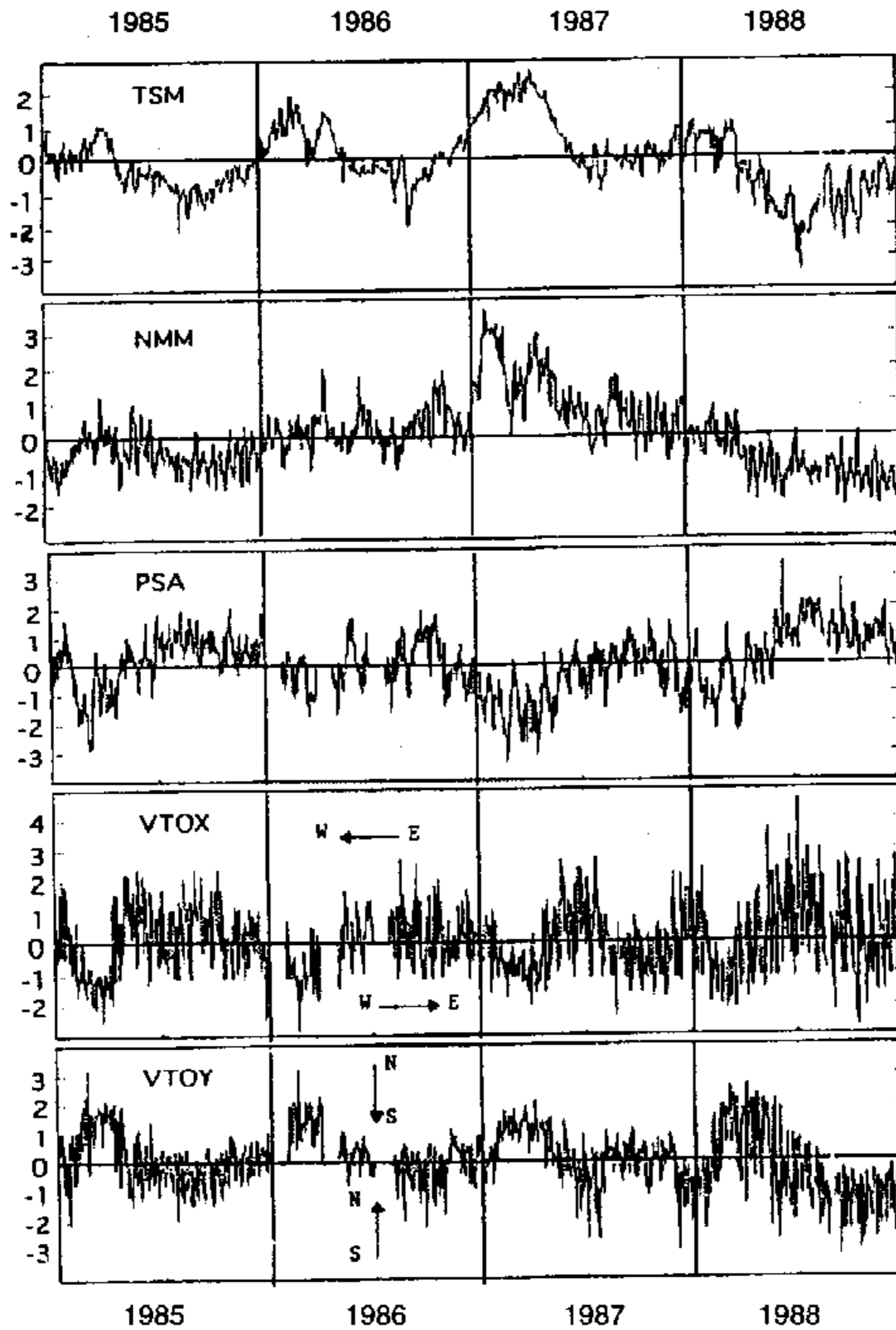


Figura 3. Series de promedios diarios normalizados en GAL.

En la TSM y PSA de ambas estaciones se observa el evento ENOS de 1987. Durante este período cálido y especialmente en SAL, las anomalías de TSM no se destacan (de manera especial) del calentamiento estacional y normal que ocurre a principios del año calendario, pero si se aprecia un comportamiento sostenido de ellas.

Durante casi todo el año de 1988 y sólo en la TSM de GAL, se presentó un período frío, cuyos valores a mitad de ese año, llegaron a sobrepasar significativamente dos desviaciones estándar negativas. Tal aspecto es coherente con el evento frío Anti-El Niño, que se presentó en la región del Pacífico Tropical desde 1988 hasta mediados de 1989. Las series de PSA confirman lo anterior, ya que se puede apreciar relativas altas presiones durante la segunda mitad de 1988.

Las series de NMM de ambas estaciones no muestran un ciclo anual definido. Sin embargo, se observa una tendencia lineal al aumento y a la disminución, antes y después del evento ENOS de 1987 respectivamente. Esto indicaría la presencia de una oscilación interanual que no se puede detectar con el período de este análisis y que además estaría modulando el ciclo anual de las series. Durante el ENOS de 1987 se presentaron los máximos valores de NMM, especialmente en SAL, donde llegó a alcanzar valores mayores a cuatro desviaciones estándar. La disminución del nivel del mar posterior a este evento está asociado al Anti-El Niño de 1988.

Los vientos zonales predominantes en SAL son del oeste y en GAL del este. Esta componente no presenta un ciclo anual en ninguna de las dos

estaciones. Por otro lado, la dirección predominante de la componente meridional del viento en las dos estaciones es del sur; GAL tampoco exhibe un ciclo anual definido, no así SAL, donde sí es evidente, estando asociado a los cambios estacionales del Centro de Alta Presión del Pacífico Suroriental.

RESULTADOS DEL ANALISIS ESPECTRAL

Los resultados del análisis espectral aplicado a las series de tiempo son mostrados en la Tabla III y en las figuras 4 y 5. Adicionalmente, se encontraron en las frecuencias más bajas picos y bandas espectrales no muy definidos pero con algo de energía. Así, en el espectro de TSM y VTOX de SAL, se observó este tipo de bandas en los períodos cercanos a 100, 55 y 32 días y en el de TSM de GAL se encontraron bandas centradas en 100 y 50 días.

| ARREGLO | SERIE | PERIODOS DE PICOS Y BANDAS ESPECTRALES ENERGETICOS (días) |
|---------|-------|---|
| SAL | TSM | 15.2, 7.2, 5.6 |
| | NMM | 14.5, 13.7, 5.6 |
| | PSA | 32.0, 7.0 |
| | VTOX | 26-22, 20, 15.8-14.7 |
| | VTOY | 11.0, 5.8 |
| GAL | TSM | 35-26, 20, 13.2-12, 6.5-6.0 |
| | NMM | 14.5, 13.7, 9.5, 8.8 |
| | PSA | 32, 9.5 |
| | VTOX | 15-12.9, 5.9, 5.7 |
| | VTOY | 10.5, 9.5, 6.2 |

Tabla III. Resultados del Análisis Espectral aplicado a las series de tiempo.

Tal como sucedió en el espectro de TSM y VTOX, el espectro de NMM de SAL presentó una banda no muy definida y centrada alrededor de 100 días. También se observó otra de estas bandas, aunque con menor cantidad de energía que la anterior, ubicada entre 51 y 26 días. En el espectro de NMM de GAL también se encontraron, no muy definidos, un pico en 50 días y una banda entre 34 y 23 días.

Los espectros de PSA de las dos estaciones son muy parecidos, porque además de la similaridad en los picos energéticos, se encontró una banda en común entre 50 a 55 días que parece contener gran energía.

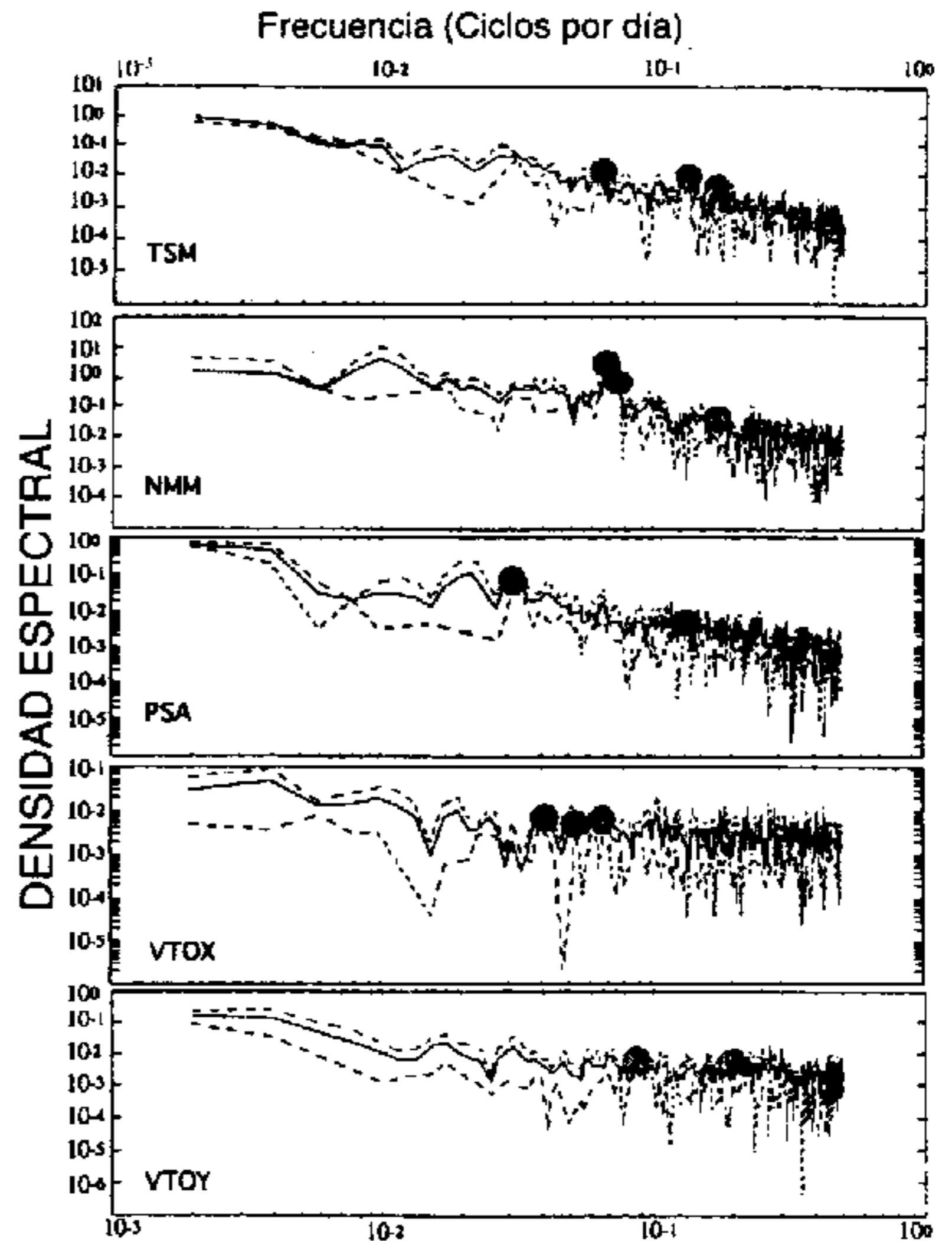


Figura 4. Densidad espectral de los promedios diarios en SAL. Las unidades de densidad espectral son: (°C)²/cpd para TSM, cm²/cpd para NMM, mb²/cpd para PSA, (ms⁻¹)²/cpd para VTOX y VTOY.

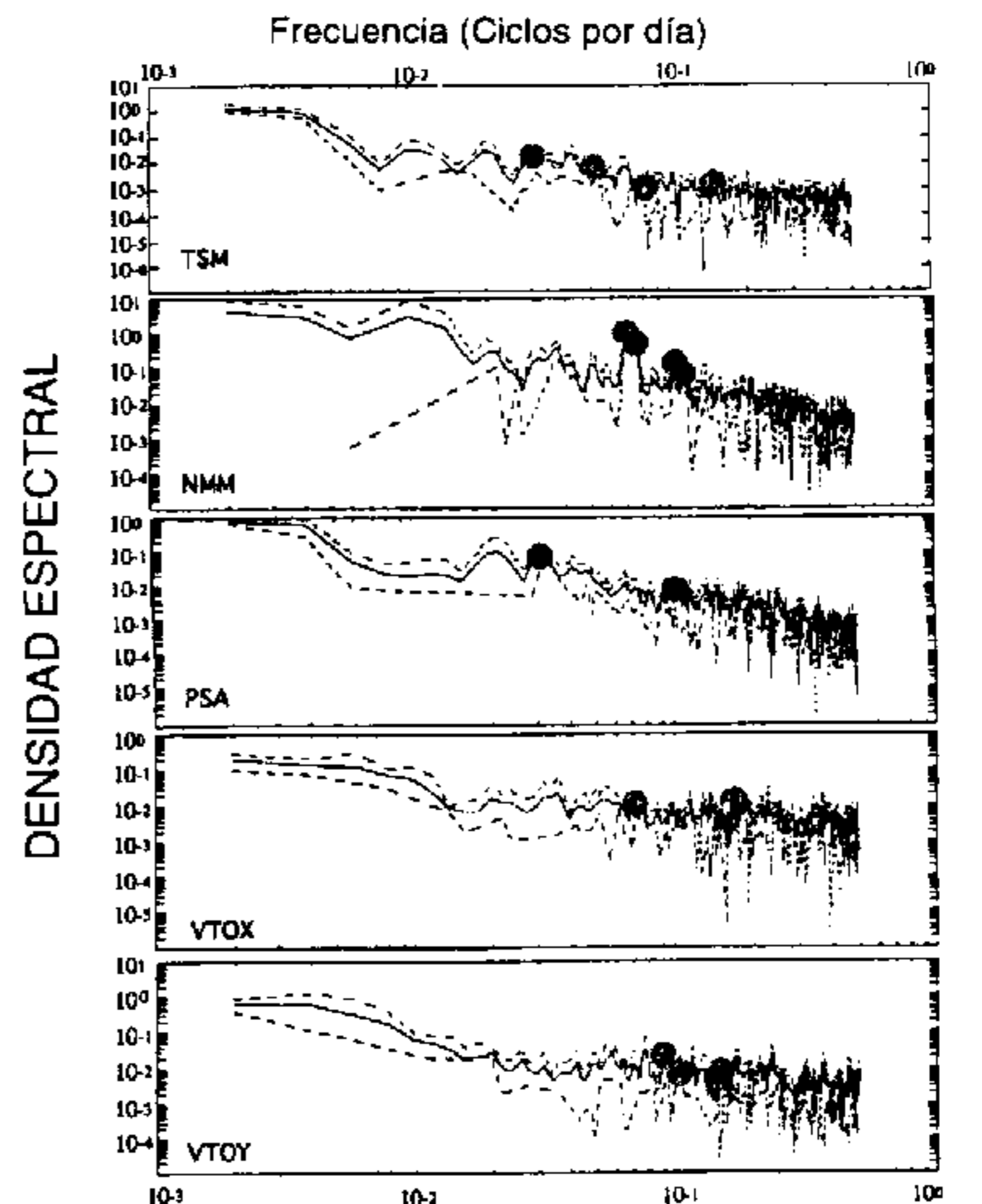


Figura 5. Densidad espectral de los promedios diarios en GAL. Las unidades de densidad espectral son: (°C)²/cpd para TSM, cm²/cpd para NMM, mb²/cpd para PSA, (ms⁻¹)²/cpd para VTOX y VTOY.

El espectro de VTOX de GAL presentó dos picos situados en 28 y 23 días enmascarados en bandas no muy definidas.

El espectro de VTOY de SAL, parece contener un poco de energía en la banda centrada en 55 días y en aquella localizada entre 31 a 25 días. En GAL se presentó una banda no muy definida y localizada entre 22 a 16 días.

RESULTADOS DE LAS FUNCIONES EMPIRICAS ORTOGONALES

La Tabla IV muestra un resumen de las FEO aplicadas para cada arreglo, donde se observa que los modos 1 y 2 (Figura 6) suman la mayor cantidad de varianza de cada arreglo, por tanto explican la mayor variabilidad común, descartando del análisis los modos restantes. Tales modos significativos totalizan en SAL el 63.03% y en GAL el 77.05%. De los dos modos, el 1 es el que explica la mayor varianza, en SAL responde por el 39.69% y en GAL por el 56.58% de la varianza total de cada arreglo.

En SAL, los modos 3, 4 y 5, en menores cantidades que los modos 1 y 2, contribuyen en porcentajes similares a la varianza total de este arreglo (15.22, 11.57 y 10.18% respectivamente). Las ponderancias del modo 1 están relacionadas principalmente a las series que mostraron un ciclo anual definido: PSA (57.85%) y TSM (56.34%) y en menor medida a VTOY (37.16%), NMM (23.76%) y VTOX (23.34%). El segundo modo está relacionado con las series que no presentaron un ciclo anual claro, principalmente NMM (44.37%), VOTX (34.43%) y en menor medida con el VTOY (29.16%).

El comportamiento de las ponderancias en GAL es similar al presentado en SAL. Las mayores ponderancias del modo 1 están principalmente repartidas en las series que mostraron claramente el ciclo anual: TSM (78.66%) y PSA (70.54) y en menor grado: NMM (58.70%), VTOY (48.78%) y VTOX (26.22). El modo 2 está relacionado principalmente con el VTOX (54.53%) y en menor medida con el NMM (21.48%) y el VTOY (19.08%), siendo poco importantes la TSM y la PSA, a diferencia del modo 1 donde estas dos variables presentan las mayores ponderancias.

Tabla IV. Resumen de las Funciones Empíricas Ortogonales. Resultados por arreglo.

| ARREGLO | MODO | EIGEN VECTOR | VARIANZA % | SUMATORIA VARIANZA | PONDERANCIAS | | | | |
|---------|------|--------------|------------|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | TSM | NMM | PSA | VTOX | VTOY |
| SAL | 1 | 1.98 | 39.69 | 39.69 | 56.34 | 23.76 | 57.85 | 23.34 | 37.16 |
| | 2 | 1.17 | 23.34 | 63.03 | 1.04 | 44.37 | 7.73 | 34.43 | 29.16 |
| | 3 | 0.76 | 15.22 | 78.25 | 18.96 | 12.81 | 0.15 | 36.49 | 7.68 |
| | 4 | 0.58 | 11.57 | 89.82 | 2.98 | 18.06 | 14.07 | 2.06 | 20.67 |
| | 5 | 0.51 | 10.18 | 100.00 | 20.68 | 0.99 | 20.20 | 3.67 | 5.33 |
| GAL | 1 | 2.83 | 56.58 | 56.58 | 78.66 | 58.70 | 70.54 | 26.22 | 48.78 |
| | 2 | 1.02 | 20.47 | 77.05 | 4.54 | 21.48 | 2.75 | 54.53 | 19.08 |
| | 3 | 0.52 | 10.36 | 87.41 | 0.22 | 2.64 | 0.01 | 19.05 | 29.84 |
| | 4 | 0.38 | 7.69 | 95.10 | 0.25 | 11.45 | 24.71 | 0.1 | 1.96 |
| | 5 | 0.24 | 4.90 | 100.0 | 16.33 | 5.73 | 2.00 | 0.1 | 0.34 |

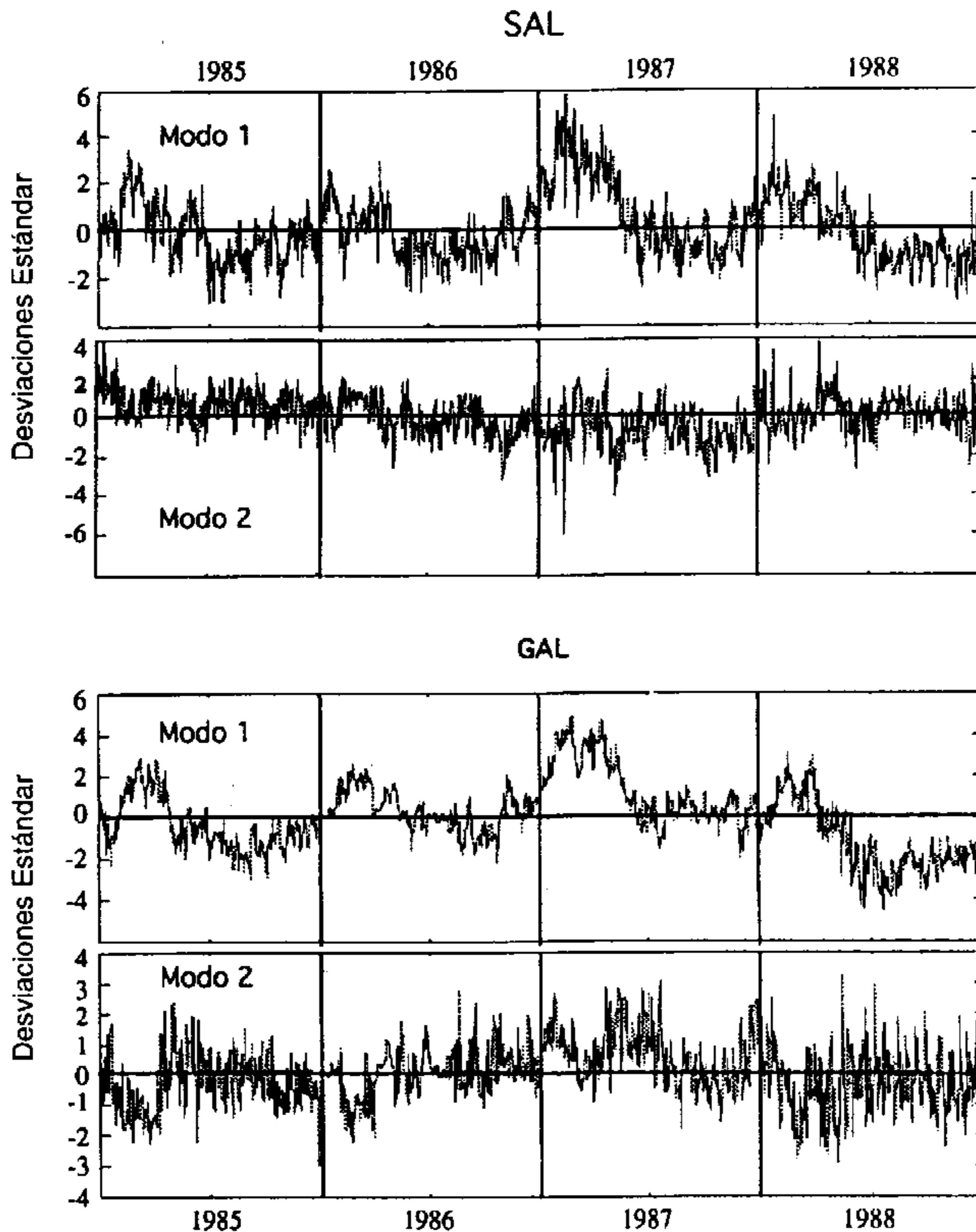


Figura 6. Series de Tiempo de los modos

ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS MODOS

El análisis de las FEO arrojó los modos estadísticamente más significativos y mediante el cálculo de las ponderancias se llegó a determinar las variables que están relacionadas con esos modos. Sin embargo, es necesario discriminar si los modos que, matemáticamente resultaron significativos, responden a una realidad física, ya que "significancia estadística no garantiza necesariamente significancia física" (Wallace, 1972), puesto que pueden responder a ruido presente en la serie original y no ser un fenómeno real de la naturaleza. Además, hay

que considerar que cada modo puede ser interpretado como una estructura específica de una onda, describiendo un fenómeno físico determinado.

Entonces para discriminar si la significancia de los modos es estadística o real y para determinar cuál es el fenómeno físico que representa cada modo, se calcularon los espectros de los modos significativos (Figura 7 y Tabla V). Con este análisis se determinaron los períodos espectrales energéticos y se los relacionó con los períodos de las ondas ecuatoriales.

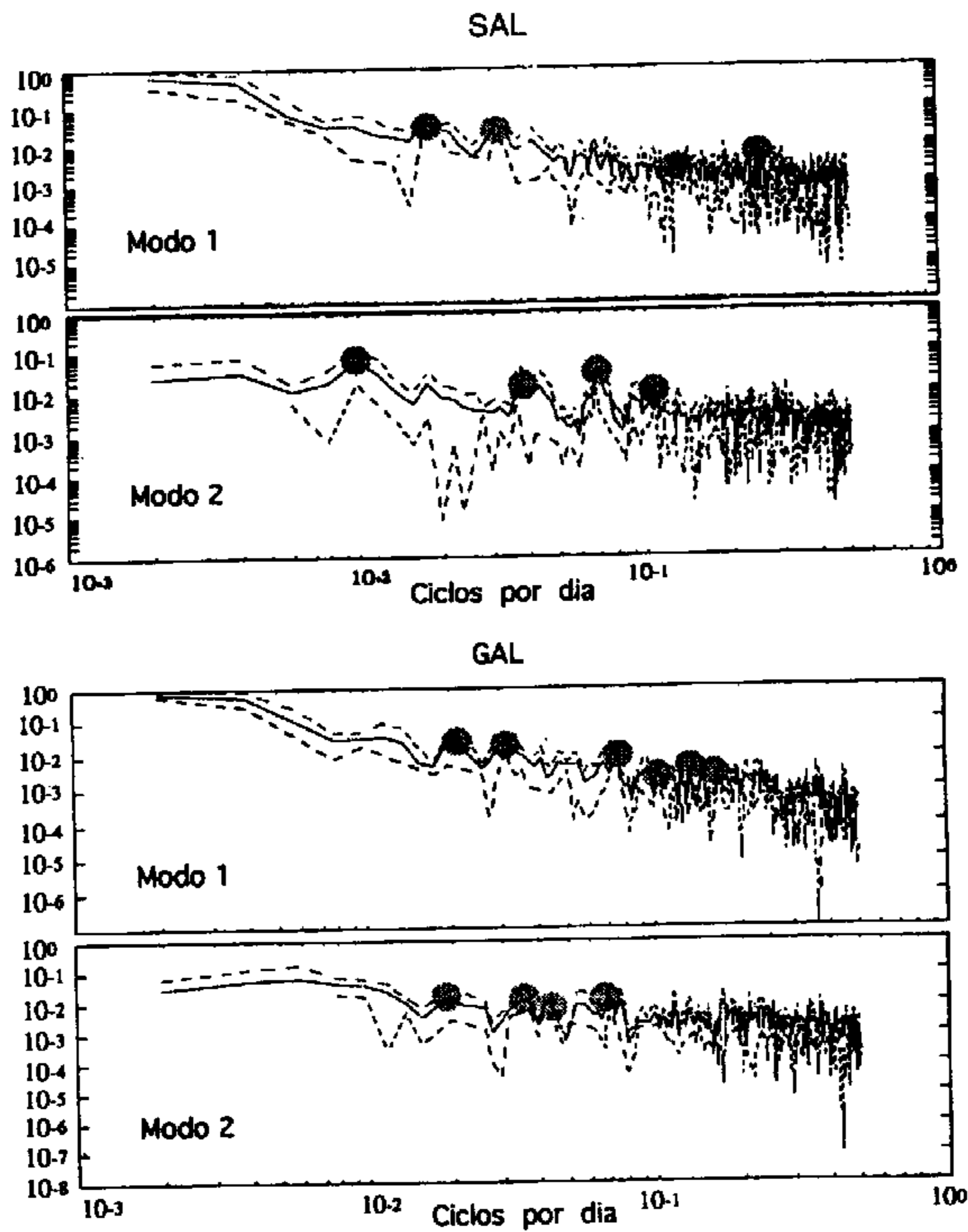


Figura 7. Densidad espectral de los modos. (La densidad espectral de los modos es adimensional.)

Tabla V. Resultado del Análisis Espectral aplicado a las series de tiempo de los modos.

| ARREGLO | MODO | PERIODOS DE PICOS Y BANDAS ESPECTRALES ENERGETICOS (días) |
|---------|------|---|
| SAL | 1 | 55, 32, 7.5-6.8, 4.0 |
| | 2 | 100, 25, 14.5, 9.0 |
| GAL | 1 | 50, 32, 13.7, 9.5, 7.0, 5.6 |
| | 2 | 50, 28, 23, 14.5 |

AUTOESPECTROS DE LOS MODOS DE SAL

En el modo 1 se encontró una banda significativa centrada en 55 días. Esta oscilación se presentó en forma de bandas no muy definidas en casi todos los espectros de las series de SAL. Un segundo pico significativo en 32 días, fue observado con anterioridad en todos los gráficos espectrales de SAL, ya sea en forma de pico (en el espectro de PSA) o contenido en bandas no muy definidas (en los espectros de TSM, NMM y VTOY); en el espectro de VTOX, este pico no fue observado en forma muy clara. Sin embargo, ya que las FEO extraen la variabilidad común, se esperaría que una oscilación de 32 días esté presente en todas las series e inclusive en los vientos zonales. Se observó una tercera banda energética entre 7.5 a 6.8 días, en la que estaría resumida la energía que se presentó en algunos de los espectros individuales de SAL. Finalmente, resulta interesante la presencia de una cuarta oscilación en 4.0 días que no fue observada en los espectros individuales.

La oscilación de 14.5 días es la más destacable en el espectro del modo 2 de SAL. Coherente con las ponderancias de este modo, esta oscilación estaría relacionada con el NMM; alrededor de este pico bien definido se localizó una banda muy energética entre 16.7 y 14.7 días, muy similar a lo encontrado en el espectro de VTOX. Se destaca un segundo pico en 9.0 días, que de acuerdo a las ponderancias podría estar relacionado con los vientos zonales. Sin embargo, este pico no es observado en los espectros de las series originales, a pesar que se esperaría encontrarlo en el espectro de VTOX. También se encontró una banda centrada alrededor de 100 días, la misma que fue observada aunque no muy definida, principalmente en los espectros de TSM, NMM y VTOX. Por último, fue observada una banda centrada en 25 días, esta señal también se encontró contenida en el espectro de VTOX.

AUTOESPECTROS DE LOS MODOS DE GAL

En el modo 1 se encontró una banda ancha centrada en 50 días. Coherente con el valor de las ponderancias, este pico fue más evidente en los espectros de TSM, PSA y NMM y no se observó en los espectros de VTOY y VTOX. Un segundo pico significativo en 32 días, de tanta energía como el anterior, se destacó previamente en los espectros de PSA y TSM (especialmente en el primero) y se observó en forma de banda no definida en el espectro

de NMM, aunque no se destacó en los espectros de VTOX y VTOY. Un tercer pico significativo se localizó en la frecuencia correspondiente a 13.7 días, el mismo que se observó como pico muy significativo en el espectro de NMM y como banda en el correspondiente a VTOX. Un cuarto pico energético en 9.5 días es similar al encontrado con anterioridad en los espectros de NMM, PSA y VTOY. También se destacaron dos picos en 7.0 y 5.6 días.

En el modo 2, la oscilación de 50 días es común en forma de banda no definida a los espectros de TSM, NMM y PSA, pero no se encontró en los espectros de VTOX y VTOY. La onda de 28 días es común en los espectros de: TSM (en forma de banda), NMM y VTOX (en ambos se observa un pico dentro de una banda energética no muy definida), pero no se presentó ni en el espectro de VTOY ni en el de PSA. La oscilación de 23 días se encontró en los espectros de VTOX y NMM en forma de pico dentro de bandas no muy definidas. La oscilación de 14.5 días es coherente con los espectros de NMM y VTOX.

ESPECTROS CRUZADOS

El espectro cruzado de TSM mostró poca coherencia, no así el de NMM que presentó alta coherencia especialmente en las frecuencias más bajas (Figura 8). El espectro cruzado de PSA (no presentado) también exhibió altas coherencias, especialmente en las frecuencias menores a 0.25 cpd (períodos mayores a 4.0 días), los 0° de fase entre las dos estaciones demostraron que las oscilaciones que están afectando a la presión son regionales. También se calcularon espectros cruzados entre variables; el realizado entre VTOY y NMM de SAL (Figura 8), reveló que las oscilaciones con períodos de 50 y 32 días (observados en el modo 1 de SAL y GAL y en el modo 2 de GAL) presentaban coherencias significativas sugiriendo un forzamiento atmosférico local. No se encontraron coherencias entre el NMM y vientos en las oscilaciones de 100 y 25 días (presentes en el modo 2 de SAL), por lo que no parecen estar forzadas atmosféricamente. A pesar que la oscilación de 28 días del modo 2 de GAL coincide con el período de la Componente Media Mensual de las Mareas (Mm), los espectros cruzados de NMM no presentaron coherencias significativas en este período. Sin embargo, sí se encuentra coherencia en el espectro cruzado de PSA, indicando que esta oscilación está influenciada atmosféricamente.

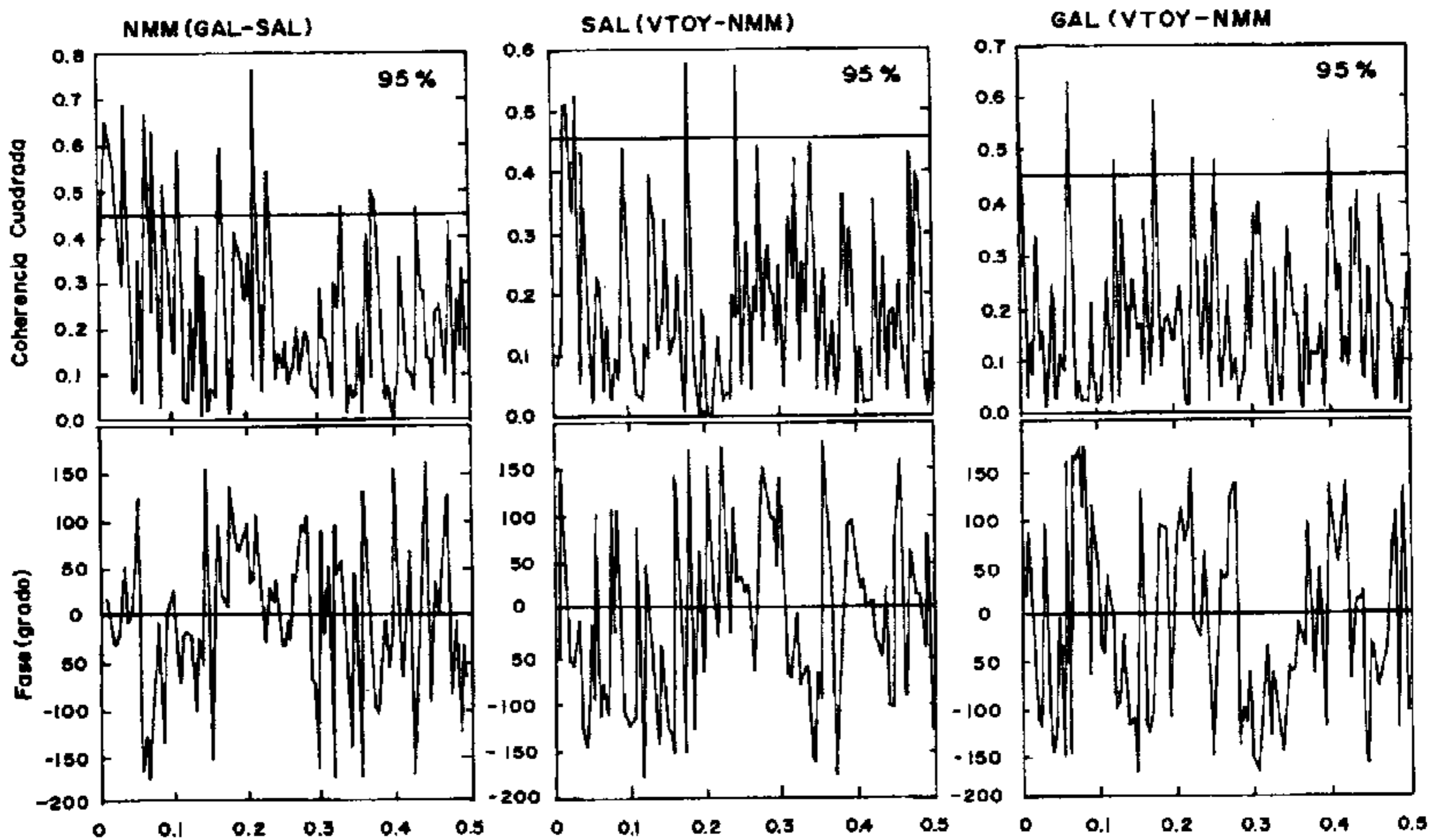


Figura 8. Espectros cruzados

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

1. El espectro más destacable en las series de tiempo del modo 1 de SAL y GAL es la presencia de un ciclo anual. Puesto que el modo 1 representa la variabilidad común, se deduce que el ciclo anual es el primer aspecto en común en las series de SAL y GAL, aunque no sea evidente visualmente o no esté bien definido en algunas series, puesto que en ellas parecen estar presentes oscilaciones interanuales que no se pueden detectar con el período de este análisis. Las ponderancias

son coherentes con este aspecto, e indican que este modo está más relacionado con las variables cuyo ciclo anual es más evidente: TSM y PSA:

En tales modos se destaca el evento ENOS de 1987 y sólo en GAL, un período frío que es coherente con el evento Anti-El Niño, que se presentó en la región del Pacífico Tropical desde 1988 hasta mediados de 1989. Lo anterior sugiere que GAL es mejor indicador de lo que sucede en términos generales en el

- Pacífico.
2. El hecho que las ponderancias de los vientos, tanto zonales como meridionales, así como la del NMM, sean las más importantes en el modo 2 de SAL y GAL, significa que algunas oscilaciones oceánicas están siendo forzadas aunoféricamente por algún proceso de viento local o remoto.
 3. En los modos 1 y 2 de SAL y GAL se observan oscilaciones de períodos menores al anual, que luego de realizado el análisis coinciden con los períodos de las ondas ecuatoriales.
 4. Las oscilaciones de 55 y 50 días presentes en los modos 1 de SAL y GAL y en el modo 2 de GAL, se enmarcan dentro del período de las ondas Kelvin intraestacionales de 30-60 días encontradas entre otros, por Spillane et al. (1987) y Enfield (1987). Esta oscilación fue observada en el espectro cruzado entre VTOY y NMM de SAL sugiriendo un forzamiento atmosférico local.
 5. La oscilación de 32 días detectada en el modo 1 de SAL y GAL se ajusta al rango de períodos de una onda Kelvin o de una onda Rossby-gravedad. Sin embargo, el hecho que en el espectro cruzado de NMM (entre GAL y SAL) se presente en fase (0°), indica no sólo que está ocurriendo al mismo tiempo en las dos estaciones, sino que su velocidad de fase es infinita (no así la propagación de energía) sugiriendo una onda Rossby-gravedad (Cornejo, 1987). Esta oscilación parece estar forzada atmosféricamente ya que también se observa coherente en los espectros cruzados de VTOX (entre GAL y SAL) y PSA (entre GAL y SAL). También se observa coherencia significativa en el espectro cruzado entre VTOY y NMM de SAL, de esto se deduce que en esta frecuencia, el océano está atmosféricamente forzado por los vientos meridionales. Tal circunstancia podría estar relacionada a cambios de vientos alisios del Pacífico asociados a eventos ENOS.
 6. En el modo 2 de SAL, la oscilación de 100 días, coherente en el espectro cruzado de NMM (entre GAL y SAL) y la de 25 días, coherente en los espectros cruzados de NMM (entre GAL y SAL) y PSA (entre GAL y SAL), ambas en fase, sugieren la presencia de ondas Kelvin (en la región del Pacífico Suroriental la onda Kelvin tiene predominancia en los períodos mayores a 2 semanas. Enfield, 1987). No se encontró evidencia de esta oscilación en ningún espectro cruzado de vientos, por lo que no parecen estar forzadas localmente por la atmósfera. Los espectros cruzados que presentaron coherencia significativa en estas frecuencias, señalan que SAL y GAL están en fase, sugiriendo que este proceso oceánico local o remoto está ocurriendo a la vez en GAL y en SAL.
 7. La oscilación de 28 días (modo 2 en GAL) sólo presenta coherencia significativa en el espectro cruzado de PSA (entre GAL y SAL) presentándose en fase (0°). Esta oscilación parece estar influenciada atmosféricamente.
 8. La oscilación de 23 días presente en el modo 2 de GAL sólo se presenta coherente en el espectro cruzado de NMM, la fase de 0° indicaría que se trata de una onda Rossby-gravedad.
 9. Una de las oscilaciones más energéticas del modo 2 de SAL y GAL, es la que tiene un período de 14.5 días y corresponde a la Componente Lunisolar Quincenal de las Mareas (Msf). Este modo está reflejando la gran energía de esta componente en el NMM. La oscilación de 13.7 días presente en el modo 1 de GAL corresponde a la Componente Lunar Quincenal de las Mareas (Mf).
 10. La presencia en el modo 2 de SAL de energía en los 9.0 días, puede representar la onda Rossby-gravedad de 7 a 9 días o una onda Kelvin de 8-10 días. Sin embargo, la ausencia de ella en los autoespectros de vientos o NMM, así como la presencia en el espectro cruzado de NMM, sugieren que es una onda Rossby-gravedad sin forzamiento atmosférico local (Luther, 1973), además en períodos de 1 a 2 semanas las ondas Rossby-gravedad dominan sobre las ondas Kelvin (Enfield, 1987).
 11. Las oscilaciones de 5.6 a 7.5 días parecen estar relacionadas a las ondas Rossby-

gravedad, ya que investigaciones anteriores sugieren que las ondas con períodos cercanos a 7 días que se presentan en el área tropical, responden a oscilaciones atmosféricas Rossby-gravedad (Luther, 1973).

12. Las oscilación de 4.0 días, observada en el espectro del modo 1 de SAL, puede responder a la presencia de las oscilaciones atmosféricas

globales con período medio de cinco días, ya establecidas por Madden y Julian (1972) y encontradas en todas las longitudes y en todas las latitudes, desde por lo menos 60°S hasta 60°N.

BIBLIOGRAFIA

- Bayot, B., 1993.** Variabilidad de Baja Frecuencia de Parámetros Oceano-Atmosféricos en Salinas y Galápagos durante el período 1985-1988. Tesis de Grado, ESPOL.
- Cornejo-Rodríguez M. P., 1984.** Estudio Estadístico de un Registro Analógico de Olas, Tesis de Grado, ESPOL.
- Cornejo-Rodríguez M. P., 1987.** Propagation and Forcing of High Frequency Sea Level Variability in the Eastern Equatorial Pacific. Tesis de Masterado, Oregon State University.
- Cornejo-Rodríguez M. P., 1991.** El Papel de las Ondas Internas en el Océano Pacífico Ecuatorial, sin publicar. II Curso Latinoamericano sobre Variabilidad Climática y su Impacto Ambiental y III Curso Latinoamericano sobre Aspectos Meteorológicos y Oceanográficos del Fenómeno El Niño/Oscilación del Sur, Santiago de Chile.
- Enfield, D. B., M. P. Cornejo-Rodríguez, R. L. Smith y P. A. Newberger, 1987.** The Equatorial Source of Propagating Variability along the Peru Coast during the 1982-1983 "El Niño", *J. of Geophys. Res.*, 92 (C13), 14335-14346.
- Enfield, D. B., 1987.** The Intraseasonal Oscillation in the Eastern Pacific Sea Levels: How is it forced?, *J. Phys. Ocean.*, 17, 1860-1876.
- Gill, A. E., 1982.** Atmosphere-Ocean Dynamic, International Geophysics Series, Vol. 30, Academic Press Inc., New York, 429-449.
- Luther, D. S., 1980.** Observations of Long Period Waves in the Tropical Oceans and Atmosphere, Tesis de Doctorado, Massachusetts Institute of Technology y Woods Hole Oceanographic Institution.
- Madden, R. A. y P. R. Julian, 1972.** Further Evidence of Global-Scale, 5-day pressure waves, *J. Atm. Sc.*, 29, 1464-1469.
- Philander, S. G., 1981.** The Response of Equatorial Oceans to a Relaxation of the Trades Winds, *J. Phys. Ocean.*, 11, 176-189.
- Philander, S. G., 1990.** El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation, International Geophysics Series, Vol. 46, Academic Press Inc. San Diego, 103-131.
- Ripa P. y S. P. Hayes, 1981.** Evidence for Equatorial Trapped Waves at the Galápagos Islands, *J. of Geophys. Res.*, Vol. 86, 6509-6516.
- Silva G., 1992.** Análisis de la Variabilidad Climática de la Zona Costera Ecuatoriana utilizando Componentes Principales, Tesis de Grado. ESPOL.
- Spillane M. C., D. B. Enfield y J. S. Allen, 1987.** Intraseasonal Oscillations in Sea Level along the West Coast of the Americas, *J. of Phys. Ocean.* Vol. 17(3), 313-325.
- Wallace J. M., 1972.** Empirical Orthogonal Representation of Time Series in the Frequency Domain. Part I: Theoretical Considerations, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 11 (6), 887-892.
- Wunsch C. y A. E. Gill, 1976.** Observations of Equatorially Trapped Waves in the Pacific Sea Level Variations, *Deep-Sea Res.*, Vol. 23, 371-390.