

Estructura espectral de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias

Marcelino Hernández González [*marcel@oceano.inf.cu*]
Instituto de Oceanología, Cuba

Resumen:

Se caracteriza la estructura espectral de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias a partir de mediciones directas. Se determinan las zonas del espectro para las cuales se producen sus variaciones más intensas, ubicándose sus principales máximos espectrales entre los 0,22 y 0,24 cpd ($T=108,8$ h; 4.5 d) y entre los 0,38 y los 0,78 cpd ($T=2,9 - 1,3$ días). Se concluye que las variaciones de períodos más cortos alcanzan como promedio, mayor energía que las de períodos más largos durante la temporada ciclónica. En cambio, las variaciones de períodos más largos poseen mayor energía que las de períodos más cortos en casi todas las localidades analizadas, durante los meses de mayor influencia de los sistemas frontales. El proceso analizado se caracteriza por una mayor energía promedio durante los meses de mayor influencia de los sistemas frontales que durante la temporada ciclónica. No se aprecian cambios de las principales características de la estructura espectral de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico, en la escala sinóptica de frecuencias, a lo largo del período analizado.

Palabras claves: Nivel del mar, variaciones aperiódicas, análisis espectral.

Introducción

Las variaciones de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias poseen períodos característicos de 3 a 15 días en el dominio del tiempo, según la región geográfica del mundo en que ocurran (Guerman y Levikov, 1988). Las mismas responden a la variabilidad espacio-temporal de los campos de la presión atmosférica y del viento, en condiciones de régimen y extremas, así como al relieve del fondo marino y a la configuración de la línea de costa a escala local. En condiciones severas del estado del tiempo, las variaciones aperiódicas del nivel del mar ocurren con mayor intensidad, es decir, con mayor amplitud y frecuencia.

Las más notorias variaciones aperiódicas del nivel del mar ocurren con más intensidad en algunas regiones del mundo, como los mares del Norte y Báltico, el Golfo de Bengala y el Mediterráneo americano.

El incremento de la población y de las actividades económicas en la zona costera, con el consecuente aumento de los elementos en riesgo ante las penetraciones del mar, dio lugar a un rápido avance de las investigaciones acerca de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico desde mediados del pasado siglo.

El presente trabajo tuvo como objetivo general la caracterización de la estructura espectral de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias en el archipiélago cubano, a partir de mediciones directas efectuadas por la Red Mareográfica Nacional.

Antecedentes

En la actualidad, la bibliografía internacional recoge numerosos trabajos dedicados parcial o totalmente al análisis de las variaciones de la componente aperiódica del nivel del mar (en lo adelante CA-NM) de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias, los cuales reportaron un rápido aumento a partir de los años 60 cuando aparecieron los estudios de Hamon (1962), Hamon y Hannan (1963) y Groves y Hannan (1968). Esto fue posible gracias a la disponibilidad de series de tiempo de alturas horarias del nivel del mar, obtenidas de los registros de los mareógrafos en las zonas costeras y al continuo desarrollo de métodos de tratamiento y análisis de series de tiempo.

En Cuba, los primeros estudios sobre la estructura espectral de las variaciones del nivel del mar se iniciaron a inicios de los años 80 (Victoria, I., *et al.*, 1990; Moreno, A. *et al.*, 1997; Ramírez y Candela, 2002; Hernández y Díaz, 2003; Ramírez y Hernández, 2007). Estos se han extendido al análisis y pronóstico del oleaje (Juantorena, Beauballet y Sosa 1999; Juantorena y Rosales, 2003).

Características geográficas del área de estudio

Cuba se extiende de Este a Oeste entre el Golfo de México, el estrecho de La Florida y los canales de San Nicolás y Viejo de Bahamas al Norte, el Mar Caribe occidental y el estrecho de Colón al Sur y el Canal de Yucatán y el Paso de Los Vientos al Este y al Oeste. El archipiélago cubano está formado por la Isla de Cuba, la Isla de la Juventud y más de 1 600 islas, islotes y cayos que poseen en su conjunto una extensión superficial de 110 922 km². A la Isla de Cuba corresponde aproximadamente un área de 105 007 km² y a Isla de la Juventud un área de 2 200 km². El área de los restantes cayos e islotes es 3 715 km², mientras que la plataforma insular abarca 67 832 km². La costa Norte posee una longitud de 3 209 km y la Sur 2 537 km,

para un total de 5 746 km aproximadamente (Furrazola y Núñez, eds., 1997).

Su zona costera posee cuatro tipos de costas: la terraza baja de diente de perro, los manglares, las playas y las costas acantiladas. Su frontera exterior se encuentra definida por el abrupto declive del talud insular (Toledo *et al.*, 2005). En la misma, se destacan cuatro zonas de plataforma que están separadas por sectores costeros en los que el talud se encuentra próximo al litoral. La plataforma noroccidental se extiende unos 240 km desde Cabo San Antonio hasta Bahía Honda. Su amplitud varía de 50 a 2 km de Oeste a Este. Presenta una sinuosa línea de costa y una profundidad de 2 a 6 m en su mayor parte, con excepción de algunas zonas como la región central del Golfo de Guahacabibes donde alcanza 26 m (Blázquez, 1981). El Archipiélago de los Colorados limita parcialmente su comunicación con las aguas oceánicas adyacentes. La plataforma nororiental posee 1 500 km² y se extiende 465 km desde la bahía de Cárdenas hasta la bahía de Nuevitás. La profundidad de sus lagunas costeras varía entre 3 y 5 m ya que se encuentran parcialmente resguardadas por los cayos que integran el Archipiélago Sabana-Camagüey o Jardines del Rey.

La plataforma suroriental se extiende desde Casilda hasta Cabo Cruz y posee un área aproximada de 18 000 km² y una profundidad media de 15 m. Se encuentra dividida en los Golfos de Ana María y Güacanayabo por una franja de aguas menos profundas con numerosos cayos y bajos fondos (Lluis, 1977); su comunicación con el océano se encuentra parcialmente limitada por el Archipiélago de los Jardines de la Reina y bajos como el Médano de la Vela. Al Este de la misma se encuentra la Fosa de Jagua, de profundidades oceánicas. La plataforma suroccidental posee un área de 20 850 km² y una profundidad media de 6 m. Su topografía se distingue por numerosos grupos y cadenas de cayos (Lluis, 1972), entre los cuales se destaca el Archipiélago de los Canarreos. Desde Cabo Francés hasta Cabo San Antonio las aguas profundas se encuentran muy próximas al litoral.

El clima de Cuba es tropical, estacionalmente húmedo, con influencia marítima y rasgos de semicontinentalidad debido a la influencia de las masas de aire continentales. Como se encuentra en la frontera entre las zonas de circulación tropical y extratropical, recibe la influencia de ambas estacionalmente. Entre noviembre y abril son más notables las variaciones del tiempo, con cambios bruscos en el tiempo diario, debido al paso de sistemas frontales asociados a centros de bajas presiones extratropicales y a la influencia anticiclónica de origen continental que se alterna con la del anticiclón subtropical del Atlántico Norte. De mayo a octubre, por el contrario, se presentan pocas variaciones en el tiempo, con una mayor influencia del anticiclón subtropical del Atlántico Norte. Los cambios más importantes se vinculan con la presencia de disturbios en la circulación tropical: ondas del Este y ciclones tropicales. En el área geográfica de Cuba se distinguen dos subregiones: Caribe occidental, con vientos estacionales y calmas e influencia continental en invierno, subregión en la cual se encuentra la región occidental de Cuba, y Caribe Oriental, caracterizada por la presencia de los Alisios, en la cual se encuentra la región oriental de Cuba (ACC, 1989; Lecha, Paz y Lapinel, 1994; Centella, Llanes, Paz, López y Limia, 2001).

En aguas cubanas predomina la marea mixta diurna y semidiurna. La mixta diurna aparece entre La Fe y Ca-

bañas y la mixta semidiurna en el resto del archipiélago; con excepción de la Bahía de Cienfuegos, las cercanías de la Bahía de Manzanillo y un amplio sector costero del Norte de Cuba hasta Bahía de Nipe, donde es semidiurna. En general, la amplitud de la marea en la parte Norte del archipiélago es como promedio mayor que en la parte Sur (Rodríguez y Rodríguez, 1983). La amplitud media varía entre menos de 25 cm en la plataforma suroccidental hasta 65 cm en la plataforma nororiental. Las componentes de largo período solar anual (Sa) y solar semianual (Ssa) determinan la variabilidad estacional, ya que alcanzan valores comparables a los de la onda lunar principal semidiurna M_2 (ACC, 1989).

Materiales y métodos

En calidad de información primaria, se utilizaron series de datos de alturas horarias del nivel del mar observado (en lo adelante NMO), registrados durante cuatro décadas por mareógrafos del sistema de flotador y contrapeso de la Red Mareográfica Nacional (Figura 1, Tabla 1), en 14 localidades a las cuales se les aplicó los métodos de control de la calidad establecidos por la Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia del MINFAR (Geocuba, 2004) y por IOC (1985). Los mareógrafos de esta tecnología captan las variaciones del nivel del mar de períodos mayores que una hora y

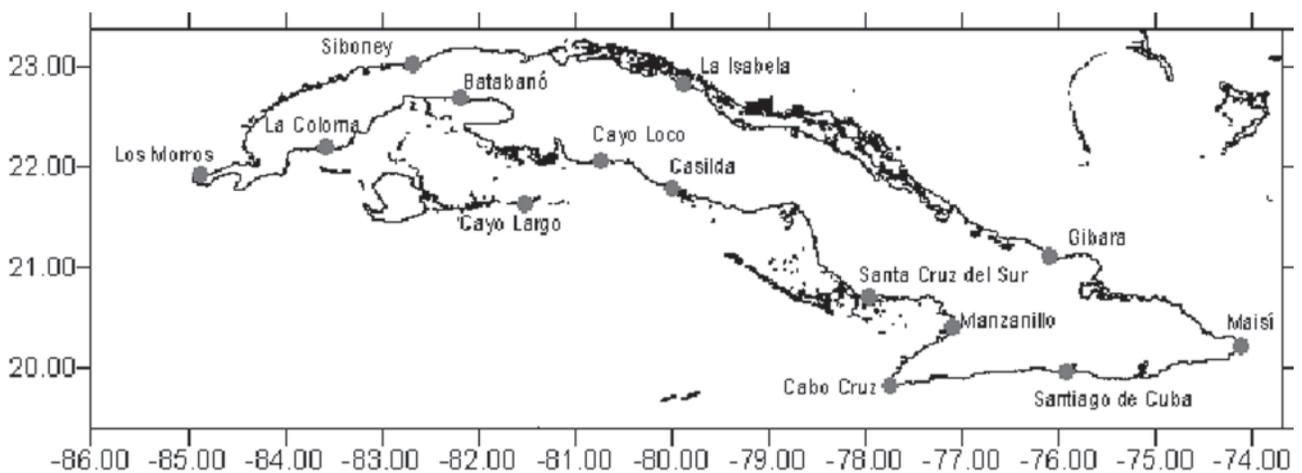


Fig. 1. Distribución geográfica de las estaciones de la Red Mareográfica Nacional, cuyos registros se utilizaron en el presente trabajo.

representan hasta el momento la principal fuente de datos para la investigación y los servicios (IOC, 2006).

Tabla 1. Principales características de los registros mareográficos.

Estación Mareográfica	Duración de los registros			Cero	Latitud (N)	Longitud (W)
	Desde	Hasta	Años			
Los Morros	1973	2000	28	-38	21°54.0'	84°54.4'
Siboney	1966	2005	40	-53	23°05.6'	82°28.2'
La Isabela	1973	2007	35	-62	22°56.4	80°00.8
Gibara	1976	2007	32	-92	21°06.5	76°07.5
Maisí	1995	2001	4	-135	20°14.8	74°08.7
Santiago de Cuba	1993	2007	11	-153	19°59.1	75°52.5
Cabo Cruz	1993	2007	13	-88	19°50.4	77°43.7
Manzanillo	1993	2007	10	-128	20°20.4	77°08.8
Sta. Cruz del Sur	1994	2001	7	-88	20°42.0	77°58.6
Casilda	1972	1995	24	-95	21°45.2	79°59.5
Cayo Loco	1992	2007	14	-155	22°09.1	80°27.3
Cayo Largo	1983		1	-126	21°37.3	81°33.9
Batabanó	1991		1	-68	22°40.5	82°17.5
La Coloma	1991	2001	11	-100	22°14.2	83°34.3

Las interrupciones de las series de alturas horarias del NMO no permiten aplicar el filtrado numérico y el análisis espectral, por lo que resultó necesario restablecer la continuidad numérica de las mismas. El nivel del mar está integrado por el Nivel Medio del Mar más las diferentes componentes de origen astronómico, meteorológico, climatológico, oceanográfico y geológico. De todas ellas, la marea constituye un proceso determinístico que representa la mayor parte de la energía del espectro de las variaciones del nivel del mar (Guerman y Levikov, 1988), lo cual posibilita la restitución de la misma mediante el análisis armónico. Por esta razón, la continuidad numérica de las series de nivel del mar que presentaban interrupciones se restableció con valores horarios de la marea obtenidos mediante el Sistema de Análisis de Mareas de la Universidad de Hawai (Caldwell, 1998). Un procedimiento similar se aplicó en Enfield y Allen (1983). En el presente trabajo, se consideraron inaceptables para el análisis espectral las series mensuales con interrupciones de más de 7 días de duración y las series anuales con al menos un mes no aceptable.

La CA-NM en la escala sinóptica de frecuencias se obtuvo mediante un esquema de filtrado consistente en el filtro de Doodson de 39 coeficientes de ponderación, el cual eliminó eficazmente las oscilaciones diurnas y semidiurnas de la marea astronómica y dejó intactas las componentes periódicas semianuales y anuales del nivel del mar (Groves, 1955; Matuchevski y Pribalski, 1968, Guerman y Levikov, 1988), y una media móvil de orden $n=361$ que excluyó dichas componentes de baja frecuencia (Guerman y Levikov, 1988).

De esta forma se obtuvieron las series horarias de la CA-NM de origen meteorológico en el intervalo sinóptico de frecuencias en la banda de frecuencias 0,07 – 1,00 ciclos por día (cpd) correspondiente en el dominio del tiempo a períodos de 1 a 15 días, como un proceso aleatorio estacionario.

Las variaciones de la CA-NM se caracterizaron mediante el análisis espectral de los procesos aleatorios estacionarios (Bendat y Piersol, 1983; Guerman y Levikov, 1988), con la finalidad de determinar la estructura espectral de todas las series anuales y de las series semianuales correspondientes a los períodos del año junio – noviembre (temporada ciclónica) y diciembre – mayo, durante el cual ocurren la mayor parte de los sistemas frontales. Con esta finalidad, se calcularon las funciones de autocorrelación anual (FAA) y espectral anual (FEA).

La Función de Autocorrelación $Rx(\tau)$ caracteriza la relación lineal del valor de un proceso físico en un momento dado del tiempo con su valor en otro momento (Bendat y Piersol, 1983). Se define como:

$$Rx(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-T)dt \quad (1)$$

$Rx(\tau)$ se expresa en el dominio del tiempo y es una función real y par, con su máximo valor para $\tau=0$. Puede ser positiva y negativa.

Se seleccionó, el intervalo entre los valores discretos $h=\Delta t$ de tal forma que $h = \frac{1}{2f_c}$ donde: $f_c = 1/2h$ (frecuen-

cia de Naiquist) y $1/f_c$ es el menor período del proceso que está comprendido en la serie temporal analizada. Teóricamente, para la obtención de resultados confiables son suficientes dos valores discretos de la serie $x(t)$ para un ciclo de oscilaciones de frecuencia f_c . Se utilizaron datos horarios del nivel del mar, por lo que $h=1$.

La función de autocorrelación se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\hat{R}_{x, m} = \hat{R}_x = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x_n x_{n+r}, r = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

Donde:

r - paso de la función de autocorrelación

m - número máximo de pasos

\hat{R}_x - estimación de la función de autocorrelación para un paso r correspondiente al desplazamiento rh .

$\tau_{m\acute{a}x} = mh$ es el desplazamiento máximo temporal y se recomienda tomar el valor del número máximo de pasos m no mayor que 1/10 del número de miembros de la serie N , cuya máxima longitud $T_r = Nh$.

El número máximo de pasos se relaciona con la frecuencia de la siguiente forma:

$$f = \frac{kf_c}{m}, k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

El gráfico de $R_x(\tau)$ de un proceso armónico, como la marea, se repite cíclicamente y el de un proceso aleatorio, como las variaciones aperiódicas del nivel del mar, tiende a cero para un elevado valor del número máximo de pasos. Por esto, $R_x(\tau)$ se utiliza para diagnosticar la presencia de componentes determinísticas (armónicas) y/o aleatorias en un proceso físico.

La Función Espectral $G_x(f)$ se expresa en el dominio de las frecuencias, por lo que caracteriza la estructura espectral de los procesos físicos, ya que representa la distribución de energía o la variabilidad medio cuadrática de la misma para la banda de frecuencias analizada y se define como:

$$G_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau \quad (4)$$

$G_x(f)$ es una función real no negativa. En los procesos estacionarios $G_x(f)$ se relaciona con la $R_x(\tau)$ a través de la Transformada de Fourier.

La integral del espectro energético para cualquier límite tiene un valor finito, determinado por el valor medio del cuadrado (Ψ_x^2), y éste es proporcional al área comprendida entre el gráfico de la función espectral y los ejes de coordenadas, por lo que $G_x(f)$ también caracteriza la intensidad promedio del proceso físico analizado.

Con la finalidad de suavizar la función de correlación se utilizó la ventana de Parzen:

$$D_r = \begin{cases} 1 - 6\left(\frac{r}{m}\right)^2 + 6\left(\frac{r}{m}\right)^3, & r = 0, 1, 2, \dots, m/2 \\ 2\left(1 - \left[\frac{r}{m}\right]\right)^3, & r = \frac{m}{2} + 1, \dots, m \\ 0, & r > m \end{cases} \quad (5)$$

Debe señalarse que $D_0 = 1$ y $D_m = 0$. Esta ventana permite obtener estimaciones de la coherencia entre -1 y 1 en correspondencia con la teoría.

La función espectral suavizada se obtuvo mediante la expresión:

$$\hat{G}_k = \hat{G}_x\left(\frac{kf_c}{m}\right) = 2h \left[\hat{R}_0 + \sum_{r=1}^{m+1} D_r R_r \cos \frac{\pi r k}{m} \right] \quad (6)$$

Los gráficos de la FEA se elaboraron con una escala logarítmica, ya que la transformación logarítmica de la estimación del espectro $\log \hat{G}(f)$ posee una distribución más cercana a la normal que la distribución original de $\hat{G}(f)$.

Las características espectrales que describen los procesos aleatorios estacionarios se calcularon mediante programas elaborados en Digital Visual Fortran VII.

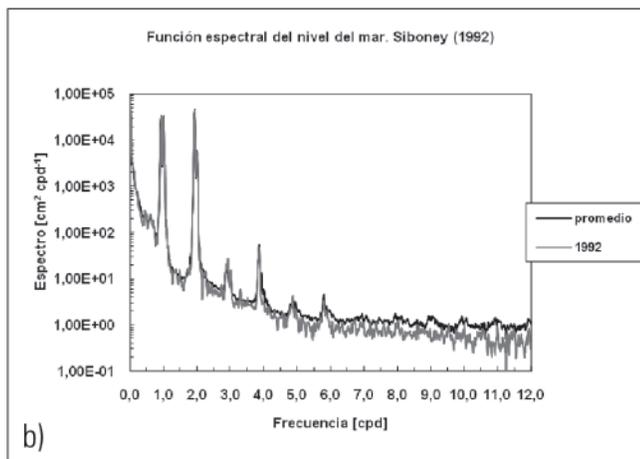
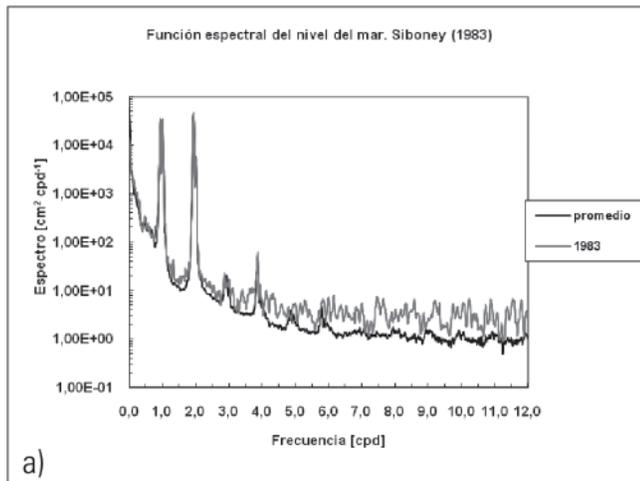
Resultados y discusión

En la FEA del NMO (Figura 2 a y b), sobresalieron los máximos espectrales de las oscilaciones diurnas y semidiurnas de la marea y de sus derivadas sobre un fondo de ruido aleatorio. En algunos casos, la energía del fondo de ruido aleatorio fue mayor que el promedio, lo cual evidenció una mayor influencia meteorológica, como ocurrió en 1983 (Figura 2 a).

La FAA del NMO (Figura 3 a y b) mostró oscilaciones armónicas cada 12 horas, en correspondencia con el predominio energético de la marea (Guerman y Levikov, 1988), que en el caso de la localidad tomada

como ejemplo es semidiurna irregular (Rodríguez y Rodríguez, 1983); mientras que la función de autocorrelación correspondiente a su componente aperiódica decayó suavemente y tendió a cero, de acuerdo con el carácter aleatorio y estacionario de la misma.

La energía de las variaciones de la CA-NM se distribuyó a lo largo de la banda analizada (0,07 – 1,00 cpd), notándose máximos espectrales y otras señales menos prominentes. Estos máximos, denominados también “máximos sinópticos” (Guerman y Levikov, 1988), señalan zonas del espectro energético donde se producen variaciones más intensas debido a una mayor influencia de las fuerzas generadoras de la CA-



Figuras 2 a y b. Función espectral del nivel del mar observado (NMO). Nótese en “a” que el ruido aleatorio superó al promedio de todos los años en 1983.

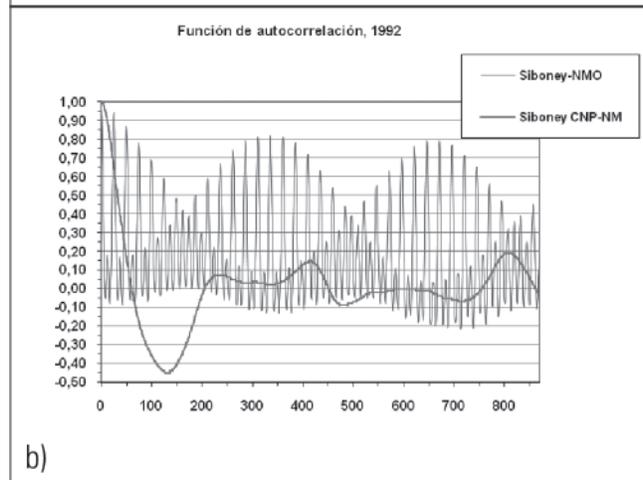
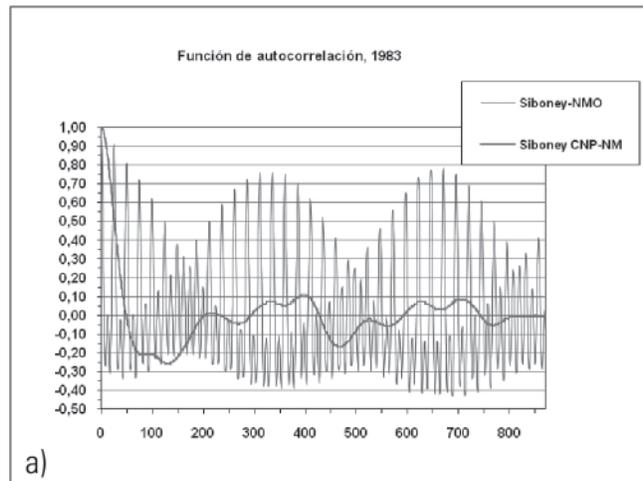


Fig. 3a y b. Las series del NMO exhiben una FAA propia de los procesos predominantemente armónicos o armónicos sobre fondo de ruido aleatorio; luego del filtrado numérico, las FAA de la CNP-NM adquirieron la forma característica de un proceso aleatorio estacionario.

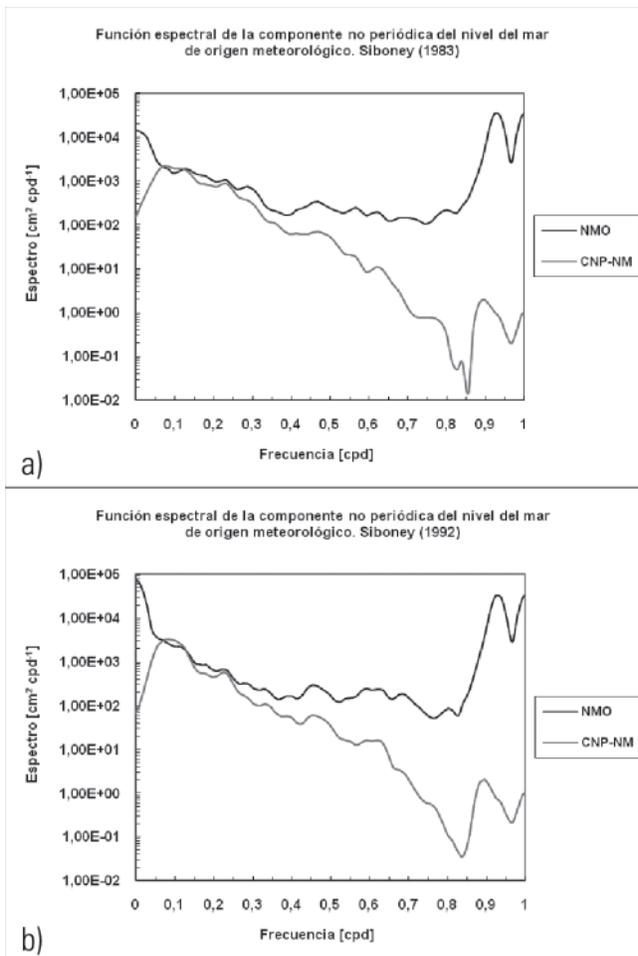


Fig. 4. En los gráficos de la FEA, el primer máximo espectral desde el origen de coordenadas es falso, ya que se debe al filtrado numérico, por lo que no representa un máximo de energía sinóptico (Guerman y Levikov, 1988).

NM (Figuras 4 a y b).

En las localidades de las costas Norte y Sur, aparecieron máximos espectrales bien definidos entre los 0,22 y 0,24 cpd ($T=108,8$ h; 4.5 d) y entre los 0,38 y los 0,78 cpd ($T=2,9 - 1,3$ días) (Figuras 5 a - f). Los máximos de los 0,22 cpd ($T=4,5$ d) aparecieron con más frecuencia que los demás en todas las FEA obtenidas, lo que indica un predominio de variaciones de la CA-NM con períodos cercanos a los 4,5 días.

La FEA de Batabanó de 1991 mostró señales espectrales distribuidas en un amplio intervalo de frecuencias: 0,17 - 0,87 cpd (Figura 6), en correspondencia con la naturaleza predominantemente aperiódica de origen meteorológico de las variaciones del nivel del mar en

esa localidad (Figura 7). En la FEA de 1983 de Cayo Largo (Figura 6), aparecieron leves señales espectrales en los 0,22, 0,31 y 0,52 cpd. Por el momento, la menor disponibilidad de datos en Batabanó solo permite suponer, que las variaciones de la CA-NM en condiciones de régimen pudieran ocurrir con mayor intensidad promedio que en La Coloma.

En la mayor parte de las FEA de las costas N y S, se destacó un pequeño pero definido máximo espectral en los 0,90 cpd ($T=1,1$ días) que resultó más evidente en las localidades de la costa Norte cercanas a las aguas oceánicas profundas como Siboney, Los Morros y Gibara (Figura 5 a, b, c y f). En la costa Sur resultaron menos visibles dichos máximos (Figura 5 d, e y f).

En todos los espectros promedio obtenidos a partir de todos los datos disponibles (Figura 8), se observaron leves señales espectrales alrededor de los 0,20 y los 0,60 cpd ($T=4,8$ y 1,7 d), lo que indica que en la mayor parte de las FEA aparecieron máximos espectrales en esas frecuencias, a pesar del efecto suavizador de la promediación. Se destacaron los máximos de los 0,90 cpd, con excepción de algunas localidades de la costa Sur como Santa Cruz del Sur y La Coloma (Figura 1).

Las variaciones de la CA-NM ocurrieron en general con mayor intensidad promedio anual en las zonas interiores de la plataforma insular, como Batabanó, La Coloma, Santa Cruz del Sur y Manzanillo (Figura 1), que en las localidades cercanas al límite oceánico de la misma (Figura 9 y 10). En Batabanó, las variaciones de la CA-NM fueron más intensas en más de un 50% de la varianza y en casi toda la banda de frecuencias analizada que en La Coloma, también localizada en el interior de la plataforma pero más próxima a las aguas oceánicas (Figura 6). La estructura espectral de la CA-NM en las localidades estudiadas es similar entre los 0,07 y los 0,70 cpd, a pesar de las diferencias físico - geográficas de las mismas.

Las variaciones de la CA-NM del intervalo de frecuencias más bajas 0,07 - 0,50 fueron como promedio más

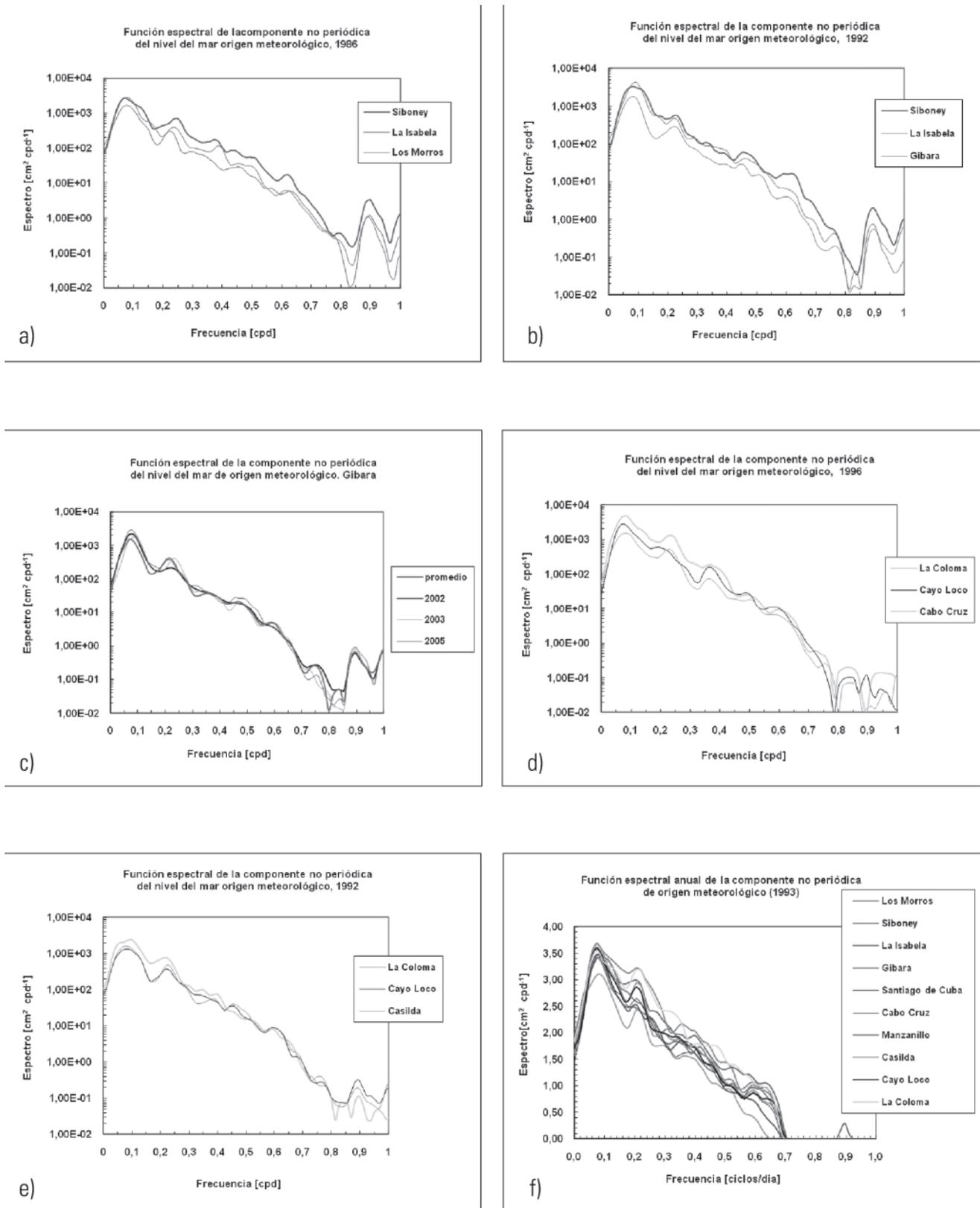


Fig. 5. Estructura espectral de las variaciones de la CNP-NM de diferentes localidades de las costas norte y sur del archipiélago cubano.

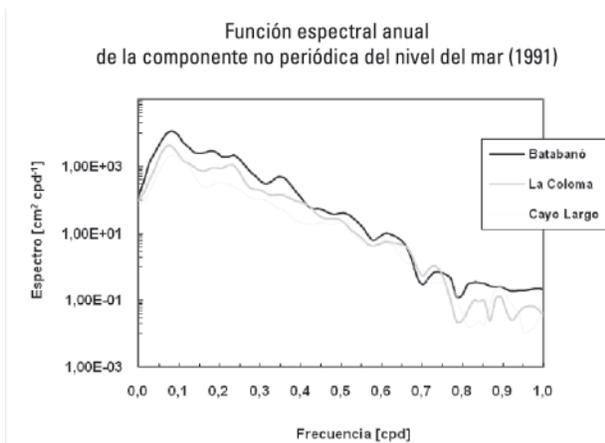


Fig. 6. Estructura espectral de las variaciones de la CNP-NM, en la plataforma suroccidental.

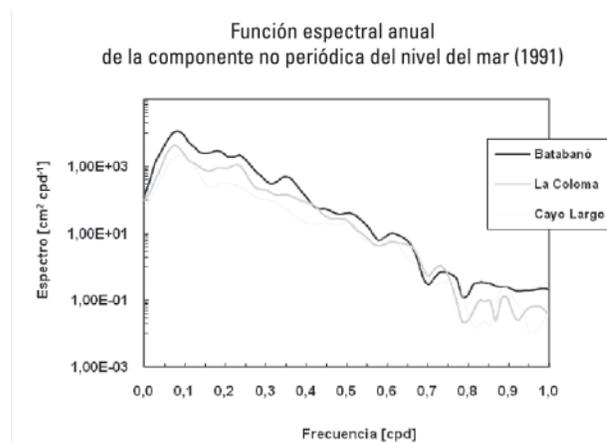


Fig. 7. Variaciones del NMO en la plataforma suroccidental no referidas al cero del puesto.

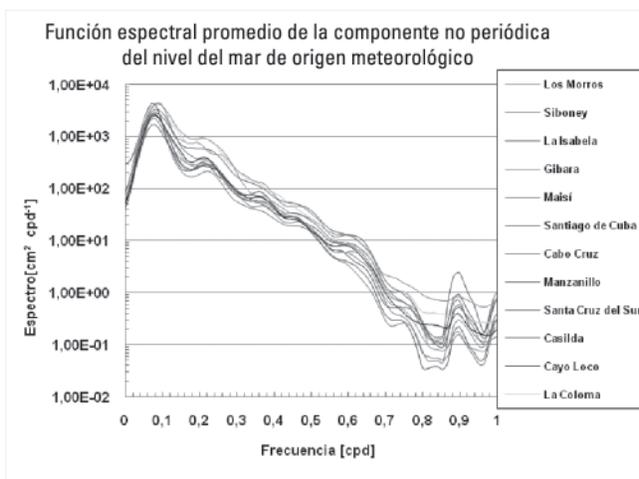


Fig. 8. Las variaciones de la CNP-NM poseen mayor energía en localidades de zonas someras de la plataforma insular y en Siboney.

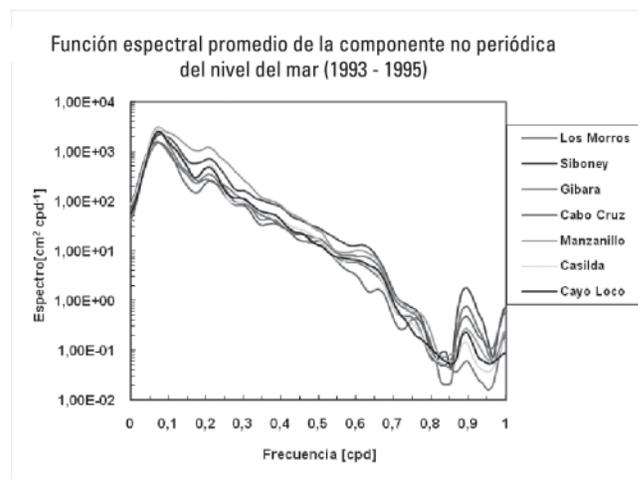


Fig. 9. Se destacaron los máximos espectrales de los 0,90 cpd, en localidades costeras abiertas a aguas profundas.

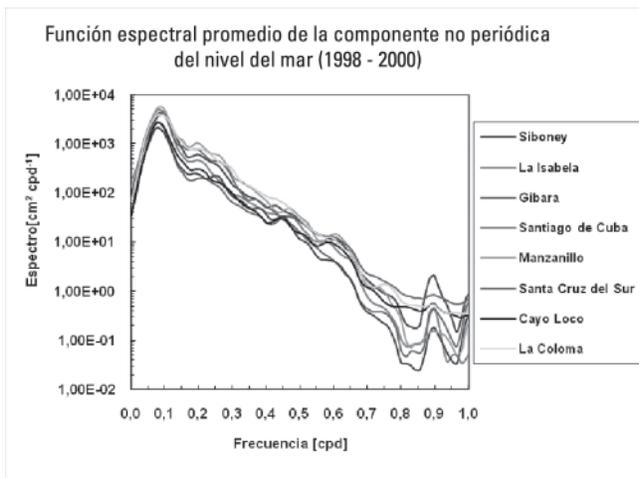


Fig. 10. Se produjeron variaciones de la CNP-NM más intensas en los intervalos de frecuencias altas y medias, en zonas de plataforma de aguas someras.

intensas en las zonas interiores de la plataforma que en las localidades cercanas al límite oceánico. Por el contrario, las variaciones de la CA-NM ocurridas en el intervalo de frecuencias más altas (0,50 – 1,00 cpd) resultaron más intensas cerca del límite oceánico de la plataforma que en su interior (Figuras 9 y 10).

La estructura espectral de la CA-NM del semestre diciembre - mayo (Figuras 11 a – f) fue similar a la de junio – noviembre (Figuras 12 a - h). En ambos semestres se observó una disminución de la energía espectral desde 0,07 cpd hasta 0,40 cpd ($T=2,5$ d) y máximos y señales espectrales en casi todas las localidades, sobre todo alrededor de los 0,12 cpd ($T=8,3$ d), los 0,20 cpd ($T=5,0$ d) y en los 0,30 cpd ($T=0,3$ d)

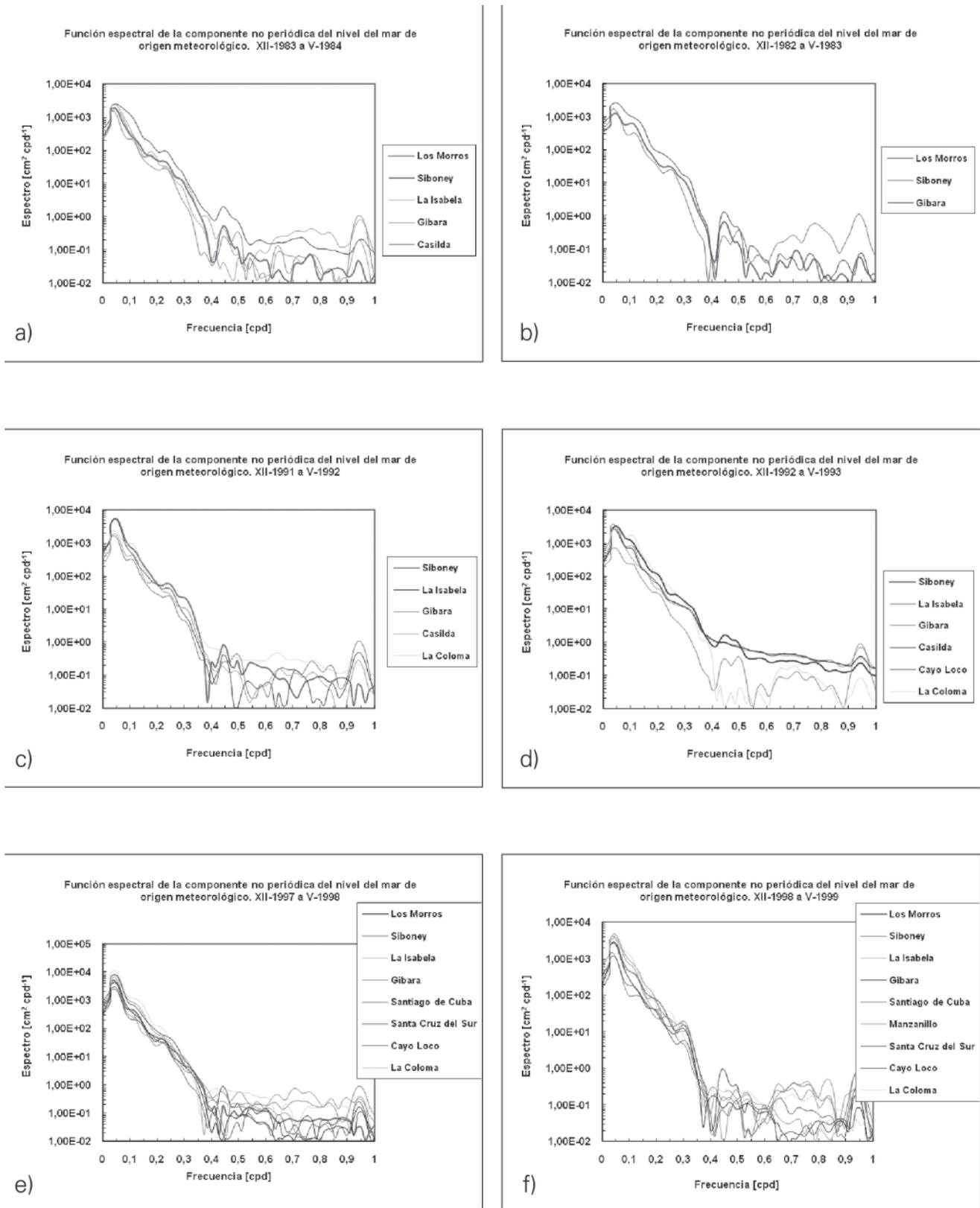


Fig. 11. Estructura espectral de las variaciones de la CNP-NM, para el semestre diciembre–mayo.

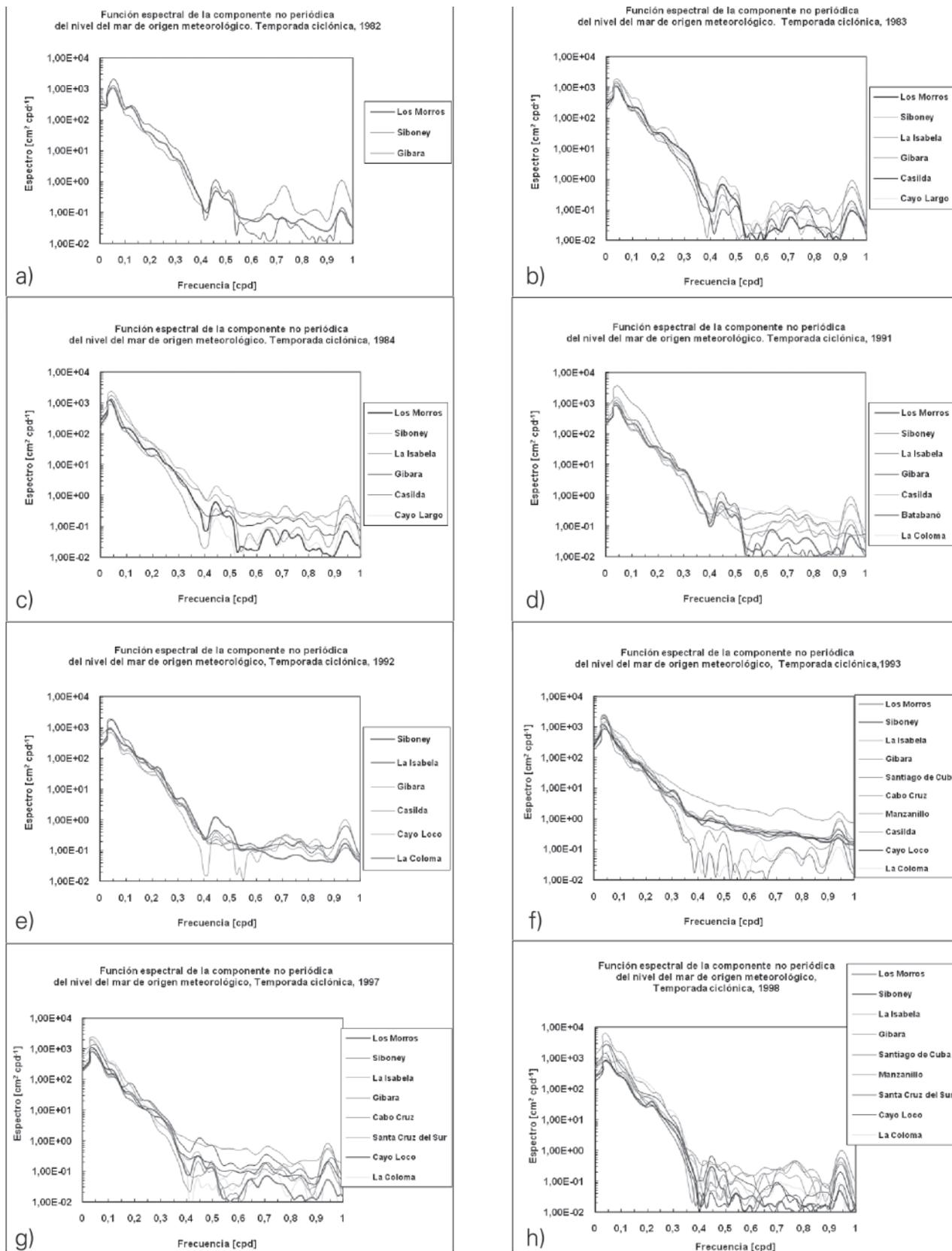


Fig. 12. Estructura espectral de las variaciones de la CNP-NM, para el semestre junio–noviembre.

Entre los 0,40 cpd y 1,00 cpd, la estructura espectral de las variaciones de la CA-NM se manifestó en general, de dos formas diferentes:

1. La energía espectral disminuyó suavemente desde los 0,40 cpd hasta los 0,90 – 0,95 cpd ($T = 1,1 - 1$ d), donde apareció un máximo espectral. Esta estructura fue más común en la costa Sur (La Coloma y Cayo Loco) que en la Norte (Los Morros y Siboney) (Figura 11 c y d). En algunas funciones espectrales aparecieron máximos espectrales bien definidos en el intervalo 0,4 - 0,5 cpd ($T = 2,5 - 2,0$ d), sobre todo en las localidades de la costa Norte.
2. Se observó una estructura espectral irregular con máximos espectrales notablemente más estables en el intervalo 0,4 - 0,5 cpd ($T = 2,5 - 2,0$ d), sobre todo en las localidades de la costa Norte y Santiago de Cuba. Se observó el máximo espectral de los 0,90 cpd.

Para ambos semestres del ciclo anual predominaron por su energía las variaciones de la CA-NM con períodos de 1,1, de 2,0 a 2,5 y de 3,0 a 4,5 días; mientras que ocurrieron en menor medida las variaciones con períodos de aproximadamente 7 - 8 días.

Como pudo apreciarse, la estructura espectral de las variaciones de la CA-NM en ambos semestres fue similar aunque para el semestre diciembre – mayo la energía de la CA-NM fue mayor como promedio que para el semestre junio - noviembre.

Para el intervalo de frecuencias más bajas 0,07 – 0,40 cpd ($T = 2,5 - 15$ días), las variaciones de la CA-NM ocurrieron como promedio con mayor intensidad en el semestre diciembre – mayo que en el semestre junio – noviembre, observándose la mayor diferencia entre ambos semestres en Siboney (Figura 13) y la menor en Manzanillo (Figura 14).

Para el intervalo de frecuencias más altas 0,40 – 1,00 cpd ($T = 2,5 - 1$ día), las variaciones de la CA-NM ocurrieron como promedio con mayor intensidad entre junio y noviembre (Figuras 13 y 14).

Es decir, durante la temporada ciclónica las variaciones de la CA-NM de períodos más cortos alcanzaron como promedio anual mayor energía que las de períodos más largos. En cambio, durante los meses de mayor influencia de los sistemas frontales, las variaciones de períodos más largos se caracterizaron por una mayor energía que las de períodos más cortos en casi todas las localidades analizadas.

Espectros promedios de la componente no periódica del nivel del mar de origen meteorológico. Siboney (1993 - 1995)

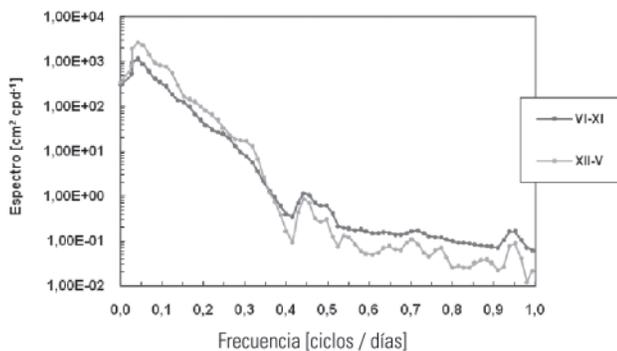


Fig. 13. Estructura espectral promedio de la CNP-NM para dos semestres opuestos del ciclo anual, en el sector noroccidental.

Espectros promedios de la componente no periódica del nivel del mar de origen meteorológico. Manzanillo (1998 - 2000)

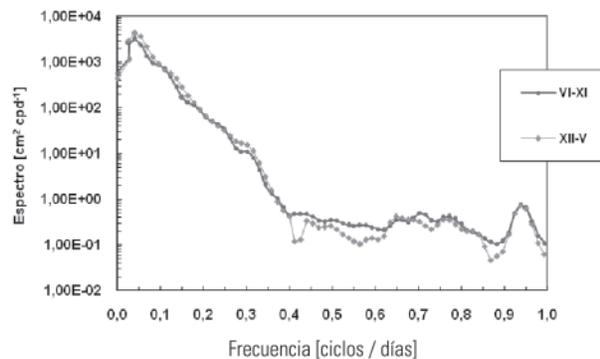


Fig. 14. Estructura espectral promedio de la CNP-NM, para dos semestres opuestos del ciclo anual en la plataforma suroriental.

Excepcionalmente, en La Coloma la energía espectral promedio de la CA-NM del semestre diciembre - mayo fue mayor que la energía de la CA-NM de la TC en casi toda la banda de frecuencias analizada (Figura 15). Esto significa que en esta localidad, y probablemente en la mitad occidental del Golfo de Batabanó, las variaciones de la CA-NM fueron más intensas entre diciembre y mayo que entre junio y noviembre entre los años 1991 y 2001.

En la estructura espectral ocurrieron cambios interanuales relacionados principalmente con la ubicación de los máximos espectrales y la amplitud de los mismos, lo que debe estar relacionado con el comportamiento diferente de los organismos sinópticos de un año a otro. Sin embargo, la estructura espectral podría tender a cambiar en el transcurso de varias décadas debido a alguna tendencia en el comportamiento de los organismos sinópticos. En este sentido, se calcularon espectros promedio para una media móvil de orden $n = 18$ años con el registro de datos de mayor longitud de Siboney (Tabla 1), con la finalidad de conocer si se estaban produciendo cambios de la estructura espectral con alguna tendencia. Como resultado, la similitud entre los espectros promedio no evidenció cambios en la estructura espectral de la CA-NM durante un período de 40 años en Siboney (Figura 16).

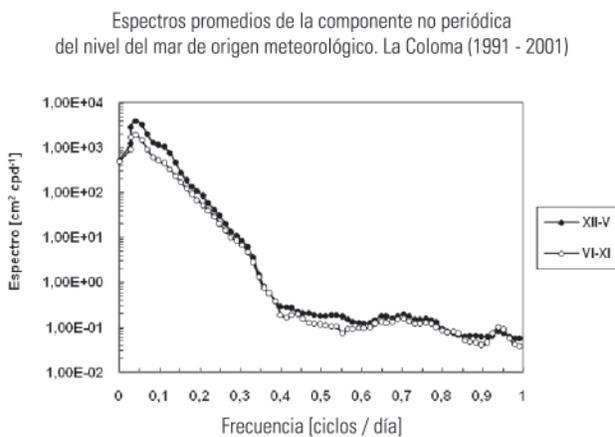


Fig. 15. En la plataforma suroccidental se produjo variaciones de la CNP-NM con mayor energía, durante el semestre diciembre–mayo que en el semestre junio–noviembre.

Conclusiones

1. La estructura espectral de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias en las localidades estudiadas es similar para la mayor parte de la banda de frecuencias analizada (0,07 - 0,70 cpd), a pesar de las diferencias físico – geográficas de las mismas.
2. Los máximos espectrales de la componente aperiódica del nivel del mar, de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias, característicos de las costas Norte y Sur se encuentran entre los 0,22 y 0,24 cpd ($T=108,8$ h; 4.5 d) y entre los 0,38 y los 0,78 cpd ($T=2,9 - 1,3$ días).
3. Durante la temporada ciclónica, las variaciones de períodos más cortos de la componente aperiódica del nivel del mar, de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias, alcanzaron como promedio, mayor energía que las de períodos más largos. En cambio, durante los meses de mayor influencia de los sistemas frontales, las variaciones de períodos más largos mostraron mayor energía que las de períodos más cortos en casi todas las localidades analizadas.

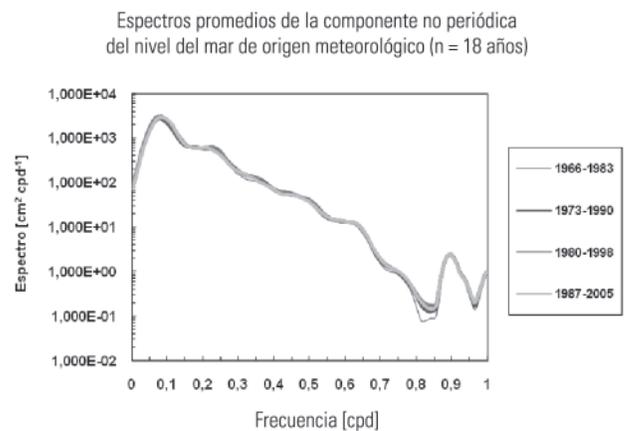


Fig. 16.p No se distinguieron cambios en la estructura espectral a largo plazo. Se muestran solo cuatro de los espectros promedio calculados para $n=5$ años.

4. La función espectral fue como promedio de menor amplitud para las temporadas ciclónicas que para la temporada de mayor influencia de los sistemas frontales, lo cual puede estar relacionado con la mayor frecuencia de ocurrencia de los mismos.
5. A lo largo del período analizado, no se produjeron variaciones apreciables de las principales características de la distribución por frecuencias de la energía de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al M.C. Orlando Marzo Lovaina y a todos los especialistas y técnicos de la Red Mareográfica Nacional, sin cuya encomiable labor no hubiera sido posible este trabajo; a la Dra. Ida Mitrani Arenal, por sus valiosas sugerencias y recomendaciones y a la Lic. Martha M. Rivero Fernández por su apoyo en la elaboración de este artículo.

Referencias

Bendat, J.S. y A.G. Piersol (1983) Análisis y medición de los procesos aleatorios. Moscú: MIR. p 408.

Blázquez, L. (1981) Algunos aspectos del régimen de la temperatura en la plataforma Noroccidental de Cuba y la región oceánica adyacente. Academia de Ciencias de Cuba, (171), octubre, p 28.

Caldwell, P. (1998) Sea Level Data Processing on IBM-PC Compatible Computers, Version 3.0 (Year 2000 Compliant). JIMAR, (319), SOEST, University of Hawaii, 72 p.

Centella, A., J. Llanes, L. Paz, C. López y M. Limia, eds. (2001) Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. La Habana: CUBAENERGIA. p 169.

Chelton, D.B. and D.B. Enfield (1986) Oceans Signals in Tide Gauge Records. Journal of Geophysical Research, 91 (B9) agosto, pp. 9081-9098.

Enfield, D.B. and J.S. Allen (1983) The generation and propagation of sea level variability along the Pacific coast of Mexico. Journal of Physical Oceanography 13, pp. 1012-1033.

Furrazola, G. y K. Núñez, eds. (1997) Estudios sobre Geología de Cuba. La Habana: CNDIG, pp. 527.

Groves, G.W (1955) Numerical filters for discrimination against tidal periodicities. American Geophysical Union, 36 (6), diciembre, pp. 1073-1084.

Geocuba (2004): MET 30-34. La Habana: Geocuba Geodesia. 42 p.

Groves, G.W. and E.J. Hannan (1968) Time series regression of sea level on weather. Reviews of Geophysics 6 (2), mayo, pp. 129- 174.

Guerman, V.J. and S.P. Levikov (1988) Análisis probabilístico y modelación de las variaciones del nivel del mar. Moscú: Hidrometeoizdat. pp. 229 [en ruso].

Hamon, B.V. (1962) The Spectrums of Mean Sea Level at Sydney, Coff's Harbour, and Lord Howe Island. Journal of Geophysical Research. 67 (13), diciembre, pp. 5147 5155.

Hamon, B.V. and E.J. Hannan (1963): Estimating relation between time series. Journal of Geophysical Research, 68 (21), pp. 6033 – 6042.

Hernández, M. y G. Díaz (2003) Some considerations about the variability of sea level synoptic component in the Gulf of Batabanó. Serie Oceanológica [Internet], (1). Disponible en: <<http://oceanologia.redciencia.cu/>> [Acceso el 9 de marzo de 2009].

IOC (1985) Manual on Sea level Measurement and Interpretation. I - Basic procedures. Paris: IOC, p. 83 (IOC, Manuals and Guides I, 14).

IOC (2006) Manual on Sea-level Measurements and Interpretation, IV : An update to 2006. Paris: IOC, UNESCO, pp. 78 (IOC, Manuals and Guides IV (14), JCOMM Technical Report No.31; WMO/TD. No.1339) .

Jenkins, G.M. y D.G. Watt (1968) Spectral analysis and its applications. San Francisco: Holden Day. p 513.

- Juantorena, Y., P. Beauballet y M. Sosa (1999) Cálculo de la propagación de la componente espectral de la energía de las olas. *Revista Cubana de Meteorología*. 6 (1), pp. 3 – 7.
- Juantorena, Y. y P. Rosales (2003) Análisis de las interacciones no lineales en espectros bimodales y su aplicación en el pronóstico de las olas. *Revista Cubana de Meteorología*. 10 (2), pp. 3-8.
- Lecha, L. , L. R. Paz y B. Lapinel, (1994) *El Clima de Cuba*. La Habana: Academia, pp.186.
- Lluis, M. (1972) Estudios hidrológicos del Golfo de Batabanó y de las aguas oceánicas adyacentes. *Serie Oceanológica* (14), p. 49.
- _____ (1977) Estudios hidrológicos de la plataforma suroriental de Cuba y aguas oceánicas adyacentes. *Academia de Ciencias de Cuba*, (16), octubre, p 29.
- Matuchevski, G.B. y V.E. Pribalski (1968) Filtrado de las series temporales en hidrometeorología. *Oceanología*. T. VIII, pp. 502 – 511, [en ruso].
- Moreno, A., *et al.* (1997) *Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las Inundaciones Costeras. Prevención y Reducción de su Acción Destructiva*. La Habana: PNUD. 172 p.
- ACC (1989) *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. La Habana: IGT / ICGC.
- Ramírez, I. (1991) Propagación de señales en registros de nivel del mar, en la costa occidental de México. *Atmósfera*, (4) pp. 23-35.
- Ramírez, O. y J. Candela (2003) Respuesta del nivel del mar al forzamiento atmosférico en las costas del Golfo de México. *Serie Oceanológica* [Internet], (1). Disponible en: <<http://oceanologia.redciencia.cu/>> [Acceso el 13 de abril de 2009].
- Ramírez, O. y M. Hernández (2006) Ondas atrapadas a la costa en el sector noroccidental de Cuba. *Serie Oceanológica* [Internet], (2). Disponible en: <<http://oceanologia.redciencia.cu/>> [Acceso el 1 de marzo de 2009].
- Rodríguez, J. y J. F. Rodríguez (1983) Las mareas en las costas cubanas. *Reporte de Investigación*. (6) enero. pp. 34.
- Toledo, M., H. Alfonso, F. Piedra, L. Díaz, B. Molina, M. Ribot, S. Matousek, H. Carrasco, M. Hernández, I. Hernández, J. L. Chang (2005) Características geológico – geomorfológicas de las costas cubanas. Incidencia en la vulnerabilidad de estas y su dinámica litoral [CD-ROM], La Habana: Sociedad Cubana de Geología. pp 12.
- Victoria, I., M. Hernández, L. Rodas, J. Simanca, A. Cabal, H. Puentes (1990) Características Oceanográficas de la Fosa de Jagua y de la Zona Económica Exclusiva al Sur de Cuba. Informe final de proyecto. *Archivo Científico del Instituto de Oceanología*. pp 296.

Abstract:

The spectral structure of sea level non-regular component of meteorological origin in the synoptic frequency scale is characterized starting from direct measurements. It is determined the areas of the spectrum in which the most intense variations of this component occur, being their main spectral maxima located between 0,22 and 0,24 cpd (T=108,8 h; 4.5 d), and between 0,38 and 0,78 cpd (T=2,9 – 1,3 d). It is concluded that non-regular variations of shorter periods averagely reach greater energy than those of longer periods during the hurricane season. However, variations of longer periods possess greater energy than those of shorter ones in most localities during the months of higher frontal system influence. The analyzed process is characterized by greater average energy during the months of higher frontal system influence than during the hurricane season. No change is observed in the main spectral structure characteristics of sea level non – regular variations of meteorological origin, in the synoptic frequency scale, throughout the analyzed period.

Keywords: *Sea level, non-regular variations, spectral analysis.*