



## Tendencia lineal del nivel medio del mar en algunas localidades del archipiélago cubano.

### *Linear trend of mean sea level in some localities of the Cuban archipelago.*

Marcelino Hernández González\*, Orlando Marzo Lovaina\*\* y Angel Acanda Reyes\*\*\*.

\*Instituto de Oceanología. Ave. 1ra. No. 18406 entre 184 y 186. Reparto Flores. Playa, Ciudad de La Habana. Cuba. [marcel@oceano.inf.cu](mailto:marcel@oceano.inf.cu)

\*\*Geocuba Geodesia. Loma y 39. Plaza, Ciudad de La Habana. Cuba.

\*\*\*Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia. Ciudad de La Habana. Cuba.

### Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo la determinación de la tendencia lineal del nivel medio del mar en cinco localidades del archipiélago cubano a partir de mediciones directas. La tasa lineal anual de ascenso del nivel medio del mar en el archipiélago cubano obtenida a partir de los registros mareográficos de mayor longitud, fluctuó entre 0,214 cm/año en Siboney y 0,005 cm/año en Casilda. El incremento lineal del nivel medio del mar fluctuó entre 0 (Casilda) y 8,56 cm (Siboney) en las localidades y períodos de tiempo analizados. La tasa de ascenso y el incremento del nivel medio del mar varían notablemente entre las diferentes localidades analizadas, lo cual puede estar relacionado con la variabilidad de los procesos oceanográficos de las aguas cercanas a las estaciones mareográficas y los movimientos verticales del terreno a escala local. Puede considerarse que el incremento lineal del nivel medio del mar que se ha experimentado hasta la fecha, desde el inicio de los registros mareográficos en Cuba, es ya de relativa importancia y sus estimados deben tomarse en cuenta en la formulación de políticas y el diseño de obras en la zona costera.

### Abstract

The objective of present work was to determine the linear trend of mean sea level in the Cuban archipelago, starting from direct measurements in five localities. Annual linear rate of mean sea level rise in the Cuban archipelago, obtained from the tidal records of greater length, fluctuated between 0.214 cm/year in Siboney and 0.005 cm/year in Casilda. Mean sea level linear increase fluctuated between 0 (Casilda) and 8.56 cm (Siboney) in the analyzed localities and periods of time. Mean sea level rise rate and increase vary remarkably among the different localities analyzed, which can be related to the variability of oceanographic processes in waters near the tide gauge stations and vertical land movements on a local scale. It can be considered that the mean sea level linear increase that has been experienced to date, since the beginning of tidal records in Cuba, is already of relative importance and its estimates should be taken into account in the formulation of policies and the design of works in the coastal zone.

**Palabras claves:** nivel medio del mar, cambio Climático, variabilidad climática, variabilidad interanual.

**Keywords:** mean sea level, climate change, climate variability, inter-annual variability.



## INTRODUCCION

El nivel del mar se elevó en unos 120 m desde el final del último período glaciario, hará unos 21000 años, y se estabilizó hace 2000 ó 3000 años; desde aquel momento hasta finales del siglo XIX el nivel del mar no varió significativamente, comenzando a cambiar nuevamente a partir de entonces. Existe alta confianza de que el ritmo del aumento del nivel del mar observado se haya incrementado del siglo IX al XX. Durante el siglo XX el nivel medio del mar aumentó con una tasa de 1,7 mm / año y desde 1961 a 2003 aumentó como promedio 1,8mm anualmente. Esta tasa se aceleró entre 1993 – 2003 alcanzando 3,1 mm por año. El aumento total estimado del siglo XX fue de 0,17 m y se estima que a escala global el nivel medio del mar aumentará en el siglo XXI a una velocidad mayor que durante el período 1961 - 2003 (IPCC, 2007).

El ascenso del nivel medio del mar debido al Cambio Climático representa para Cuba un peligro a largo plazo. En primer lugar, este proceso ocasionará un aumento de las zonas sumergidas del archipiélago con un aumento gradual de las zonas permanentemente inundadas. También, aumentarán las zonas temporalmente inundadas debido a las oscilaciones de la marea y a las variaciones del nivel del mar que ocurran como consecuencia de eventos meteorológicos severos. En general, se crearán condiciones más favorables para la erosión costera y una mayor penetración de la cuña salina en los ríos y en el manto freático (Centella, Llanes, Paz, López y Limia, 2001). Como este proceso ocurre de forma gradual y de forma imperceptible para el observador común, la población en general y no pocos tomadores de decisiones, no poseen una percepción objetiva de este peligro y consecuentemente del riesgo.

La estimación de la tasa de ascenso del nivel medio del mar forma parte de los estudios sistemáticos que se realizan en función de las investigaciones sobre Cambio Climático y los estudios de riesgo, y constituye una práctica internacional establecida metodológicamente y científicamente (IOC, 2006). Esta información es básica para el análisis de la vulnerabilidad y el riesgo de los ecosistemas costeros y de los asentamientos humanos ante el ascenso del nivel medio del mar, ya que permite conocer con cuanta rapidez está ascendiendo y cuánto ha ascendido el nivel medio del mar.

La bibliografía internacional recoge un número creciente de trabajos sobre este tema, de los cuales algunos de los más recientes y representativos son Pugh, (1996), Douglas, (2001), Woodworth, Gregory y Nicholls, (2004) y Walton Jr. (2007), entre otros. Acerca de la estimación de la tendencia del nivel medio del mar a partir de mediciones directas se cuenta en la bibliografía nacional con los trabajos de Hernández (2006) y Hernández y Rodas (2007) en los cuales se analizaron solo los registros de las estaciones de Siboney y La Isabela.

El presente trabajo tuvo como objetivo la determinación de la tendencia lineal del nivel medio del mar en el archipiélago cubano a partir de mediciones directas en cinco localidades.

## MATERIALES Y METODOS

Las mediciones directas del nivel del mar representan la principal fuente de información para la estimación del ascenso del nivel medio del mar a largo plazo (IOC, 2006). En calidad de información primaria se utilizaron las series de alturas horarias del nivel del mar de los cinco registros mareográficos de mayor longitud con que cuenta Cuba: Los Morros, Siboney, La Isabela, Gibara y Casilda (Figura 1; Tabla 1).

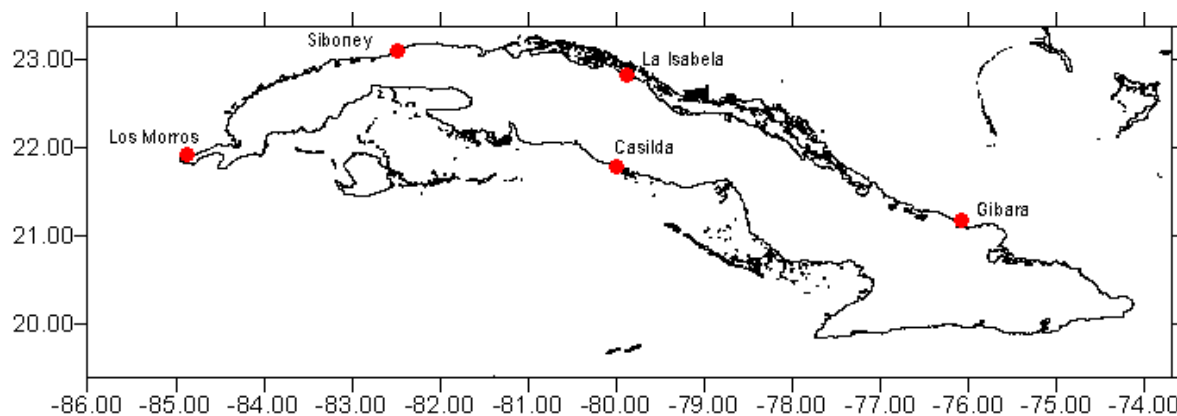


Figura 1. Distribución geográfica de las estaciones mareográficas cuyos registros se utilizaron en el presente trabajo.

Figure 1. Geographic distribution of the National Tidal Network tide gauges, whose records were used in the present work.

Tabla 1. Características de las series de datos de alturas horarias utilizadas para la estimación de la tendencia. (\*) Cero del puesto que se seleccionó para todo el período.

Table 1. Characteristics of the hourly height data series used for estimating the trend. (\*) represents the datum selected for the entire period.

Estación Mareográfica	Duración de los registros				Latitud (N)	Longitud (W)
	Desde	Hasta	Años	Cero*		
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	2008	36	-62	22°56.4	80°00.8
Gibara	1976	2008	33	-92	21°06.5	76°07.5
Casilda	1972	1995	24	-95	21°45.2	79°59.5

La estación mareográfica Siboney, nominada Datum Siboney, es el Datum Altimétrico de la República de Cuba y el sistema de alturas vigente es el sistema de alturas normales (Geocuba Geodesia, 2004).

Los datos se obtuvieron con mareógrafos del sistema de flotador y contrapeso (Tabla 2) con equipamiento recomendado de este tipo (IOC, 2006).

Tabla 2. Características de los mareógrafos.  
 Table 2. Characteristics of the tide gauges.

Puesto mareográfico	Firma y marca	Procedencia	Velocidad del papel	Escala de altura
Los Morros 1973 - 2000	SEBA Hydrometrie, DELTA	Alemán	2 mm/hora	1:10.
Siboney 1966 - 1991	OTT	Alemán	16 mm/hora	1:5
Siboney 1992 - 2005	SEBA Hydrometrie, DELTA	Alemán	2 mm/hora 10 mm/hora	1:5 1:5
Isabela 1973 - 1999	GR-38	Rusa	2 mm/hora	1:10
Isabela 2000 - 2008	SEBA Hydrometrie, DELTA	Alemán	2 mm/hora	1:10.
Gibara 1976 - 2008	SEBA Hydrometrie, DELTA	Alemán	2 mm/hora	1:10.
Casilda 1972 - 1995	GR-38	Rusa	2 mm/hora	1: 5

La tendencia lineal del Nivel Medio del Mar (NMM) se caracterizó mediante el análisis estadístico de series de valores medios anuales (Guerman y Levikov, 1988). Con esta finalidad, fue necesario restablecer la continuidad numérica de las series de nivel del mar con interrupciones con valores horarios de la marea (Enfield y Allen, 1983; Guerman y Levikov, 1988) mediante el análisis armónico (Caldwell, 1998). No se consideraron en el análisis los meses con interrupciones de más de 15 días, o interrupciones de 7 a 14 días durante algún evento extremo. Los datos de alturas horarias se refirieron al cero geodésico mediante la sustracción del cero del puesto (Tabla 1).

Se aplicó un filtro pasa baja (fórmula 1) a las series de alturas horarias del nivel del mar, conocido como filtro de Doodson X0 (IOC, 1985 y 2006) con la finalidad de obtener series suavizadas de valores diarios, centrados al medio día. Este filtro remueve exitosamente las oscilaciones diurnas y de períodos menores de la marea y deja intactas las componentes anual y semianual. Sólo requiere 39 valores horarios, por lo cual es muy conveniente para el tratamiento de series de alturas horarias de nivel del mar con interrupciones. Además, impide la aparición del “aliasing” de la marea en los valores medio mensuales (Pugh, 1996).

$$X_T = \frac{1}{30} \sum_{d=-19}^{d=19} F(d)H(T + d), d \neq 0 \quad (1)$$

Donde: H, es a altura del nivel medio del mar  
 T =12:00 horas  
 F(d) =(2,1,1,2,0,1,1,0,2,0,1,1,0,1,0,0,1,0,1)

Los valores medio anuales se obtuvieron a partir de las series de valores diarios mencionadas.



La tendencia al ascenso del NMM debido a los cambios eustáticos del agua oceánica es cuasi lineal (Chelton y Enfield, 1986). Sin embargo, se encuentra metodológicamente aceptada la estimación lineal de su tasa anual (IOC, 2006) con lo cual se asume que no se ha producido hasta ahora un proceso de aceleración del ascenso del nivel medio del mar (Pugh, 1996).

La tasa anual del nivel medio del mar ( $TA_{NMM}$ ) en cada localidad, es una resultante de los cambios eustáticos del NMM y de la componente vertical de los movimientos de terreno. Una tasa positiva señala un ascenso del NMM y un valor negativo de la misma, indica un descenso del NMM para el intervalo de tiempo analizado. El incremento del nivel medio del mar ( $I_{NMM}$ ) en cada localidad depende pues, de la tasa anual ( $TA_{NMM}$ ) y de la duración total del registro ( $D$ ) y se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\{I_{NMM}\}[cm] = \frac{\{TA_{NMM}\}[cm/años]}{\{D\}[años]}$$

La estimación del ascenso futuro del NMM como una proyección obtenida a partir del análisis estadístico de las mediciones directas es indispensable como información para diversos fines a escala local, y de provecho para una zona más amplia si se tienen en cuenta las condiciones geodinámicas, oceanográficas y climatológicas.

## RESULTADOS Y DISCUSION

El NMM se define como el valor medio de las alturas horarias del nivel del mar por un período de al menos un año, en cuyo caso se denomina nivel medio anual, (Pugh, 1996), aunque generalmente se utiliza el término nivel medio del mar para designar un promedio de muchos años que caracteriza un estado o posición del nivel medio del mar en una localidad o región. En algunos trabajos se ha recomendado estimar la tasa anual del NMM mediante registros mareográficos de una duración no menor de 50 años (Walton Jr., 2007) argumentando que la estimación de la tasa anual goza de la estabilidad estadística adecuada solo a partir de las cinco décadas.

Ninguno de los registros cubanos cuenta con más de 50 años ya que en 1959, al triunfo de la Revolución, el Servicio Geodésico Inter-Americano de la Marina de Guerra de Estados Unidos desactivó la Red Mareográfica que funcionaba en Cuba desde inicios del siglo XX. Las mediciones mareográficas solo pudieron ser reanudadas en 1966 con la asesoría de la Unión Soviética. De esta forma, los registros mareográficos continuos cubanos de mayor longitud no alcanzan en la actualidad más de 40 años.

De observarse de forma ortodoxa el criterio de un mínimo de 50 años, no podría contarse en Cuba con una estimación de la tasa anual del NMM hasta pasados 10 ó 20 años más. Sin embargo, las características geomorfológicas de la zona costera cubana, la amenaza del ascenso del NMM y el aumento de la densidad poblacional y de las actividades socio – económicas en la misma, son imperativos actuales para la estimación de la tasa anual del NMM.

En el sentido de lo expuesto anteriormente, los datos de los registros de mayor longitud con que se cuenta en Cuba (Tabla 1), presentan la calidad necesaria para estimar la tasa anual del NMM, con carácter local, debido a las siguientes condiciones: las mediciones de nivel del mar se han realizado por una sola Red Nacional, con una metodología única, correctamente documentada (Geocuba Geodesia, 2004), adecuada a los estándares internacionales de

medición y procesamiento (IOC, 2006). A esta actividad ha dado seguimiento y aseguramiento permanente la Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia del Ministerio de las Fuerzas Armadas, la cual rige los aspectos metodológicos de la La Red Mareográfica Nacional. Los valores medios mensuales y anuales de las cinco estaciones (Figura 1, Tabla 1) se envían al Servicio Permanente del Nivel Medio del Mar (PSMSL por sus siglas en inglés) y los de Los Morros, Siboney y Gibara, al Sistema Global de Observación del Nivel Medio del Mar (GLOSS por sus siglas en inglés).

Las estaciones mareográficas de registros más largos analizadas se encuentran distribuidas irregularmente predominando por su número, las ubicadas en la costa Norte. Esto limita la comparación entre ambas costas, ya que sería necesario contar con más registros largos en la costa Sur. Por esta razón, el presente trabajo se limita a determinar la tasa lineal en las localidades con mayor longitud y calidad de las series hasta el presente y a compararlas entre sí.

A primera vista, se observan diferencias importantes en cuanto a la tendencia, entre la mayor parte de las localidades (Figuras 2 – 6; Tabla 3). El valor más alto de la tasa anual del nivel medio del mar se obtuvo en Siboney (0,214 cm/año) en el litoral de Ciudad de La Habana y el más bajo en Casilda (0,005 cm/año), al Sur de Cuba, en la extremo occidental de la plataforma suroriental (Figura 1; Tabla 2). En esta localidad la tasa lineal estimada indica que la tendencia es prácticamente nula y que no ha existido ascenso del NMM entre 1972 y 1996 (Figura 6; Tabla 1).

El valor de la tasa lineal anual de Siboney y Gibara es más de tres veces mayor que el de la tasa lineal anual de Los Morros y La Isabela, lo cual se aprecia fácilmente, por la diferencia en la tendencia lineal en dichas localidades (Figuras 2, 3, 4 y 5).

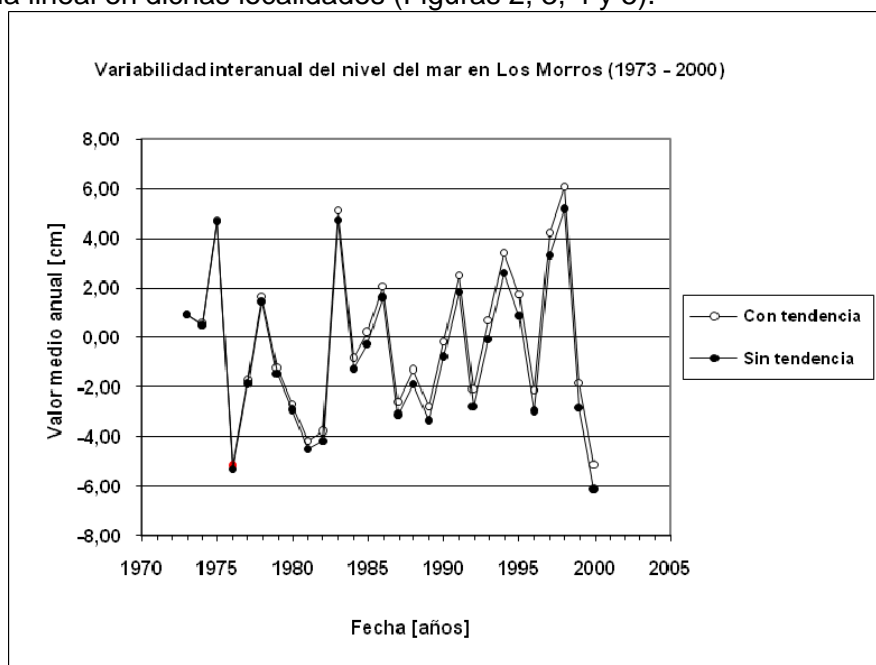


Figura 2. Variabilidad interanual del nivel del mar en Los Morros (1973 – 2000).

Nota: La tasa lineal anual resultó de 0,038 cm/año.

Figure 2. Sea level inter-annual variability at Los Morros (1973 – 2000).

Note: Linear annual rate was 0,038 cm/year.

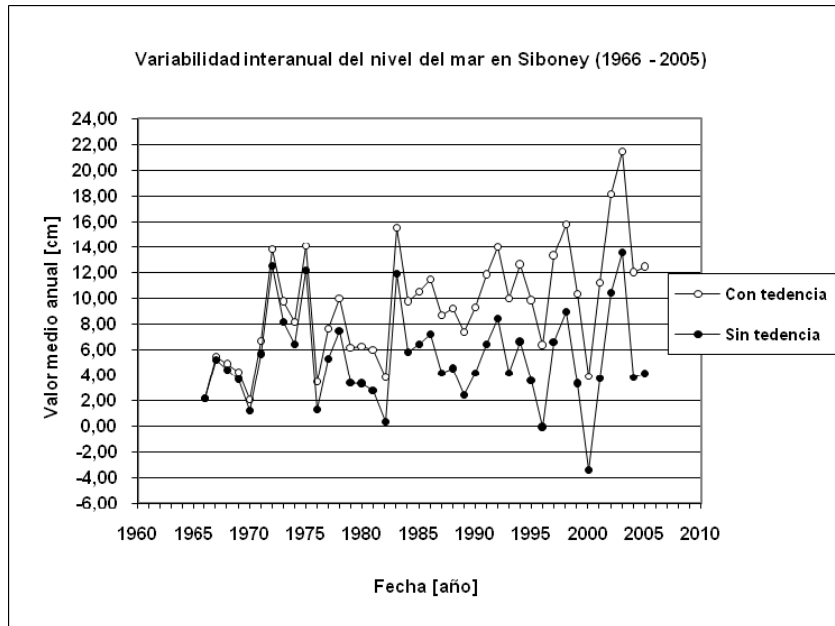


Figura 3. Variabilidad interanual del nivel del mar en Siboney (1966 – 2005).

Nota: La tasa lineal anual resultó de 0,214 cm/año.

Figure 3. Sea level inter-annual variability at Siboney (1966 – 2005).

Note: Linear annual rate was 0,214 cm/year.

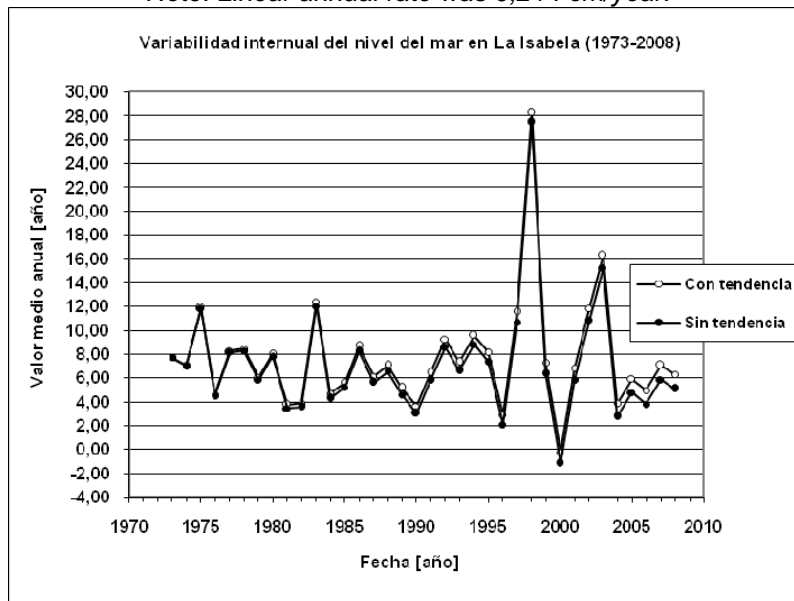


Figura 4. Variabilidad interanual del nivel del mar en La Isabela (1973 – 2008).

Nota: La tasa lineal anual resultó de 0,035 cm/año.

Figure 4. Sea level inter-annual variability at La Isabela (1973 – 2008).

Note: Linear annual rate was 0,035 cm/year.

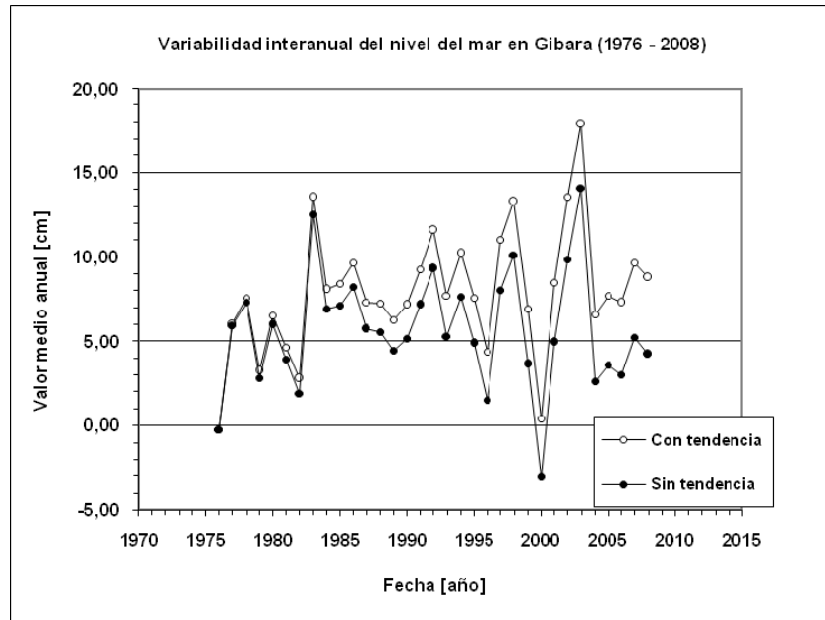


Figura 5. Variabilidad interanual del nivel del mar en Gibara (1976 – 2008).

Nota: La tasa lineal anual resultó de 0,143 cm/año.

Figure 5. Sea level inter-annual variability at Gibara (1976 – 2008).

Note: Linear annual rate was 0,143 cm/year.

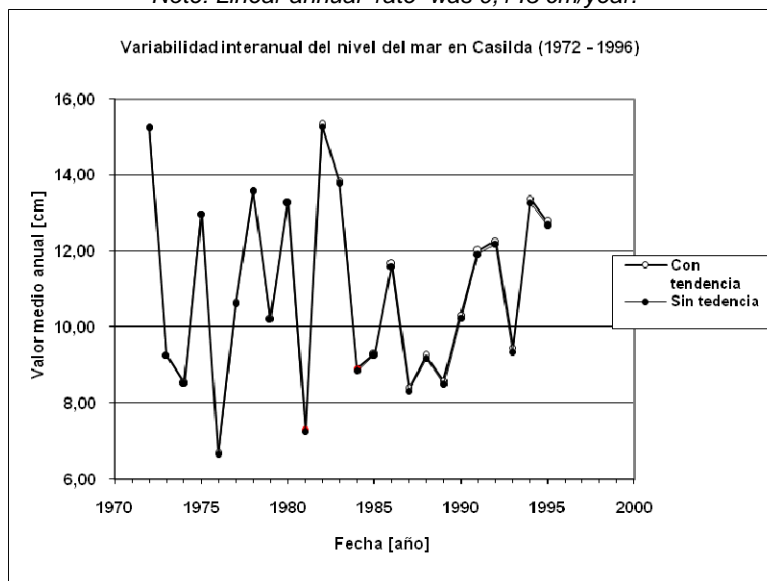


Figura 6. Variabilidad interanual del nivel del mar en Casilda (1972 – 1995).

Nota: La tasa lineal anual resultó de 0,005 cm/año.

Figure 6. Sea level inter-annual variability at Casilda (1972 – 1995).

Note: Linear annual rate was 0,005 cm/year.



Tabla 3. Tendencia del nivel medio del mar en cinco localidades del archipiélago cubano ( $TA_{NMM}$  – Tasa anual del nivel medio del mar;  $I_{NMM}$  – Incremento del nivel medio del mar).

Table 3. Mean sea level trend in five localities of the Cuban archipelago ( $TA_{NMM}$  – Mean sea level annual rate;  $I_{NMM}$  – Mean sea level increase).

Estaciones	Latitud (N)	Longitud (W)	Período	Duración [años]	$TA_{NMM}$ [cm/año]	$I_{NMM}$ [cm]
1	2	3	4	5	6	7
Los Morros	21° 54,0'	84° 54.4'	1973-2000	28	0,038	1,064
Siboney	23° 05,6'	82° 28.2'	1966-2005	40	0,214	8,560
La Isabela	22° 56,4'	80° 00.8'	1973-2008	36	0,035	1,260
Gibara	21° 06,5'	76° 07.5'	1976-2008	33	0,143	4,653
Casilda	21° 45,2'	79° 59.5'	1972-1995	24	0,005	0,120

Tabla 4. Amplitud de la variabilidad interanual del nivel del mar en las localidades estudiadas.

Table 4. Amplitude of sea level inter-annual variability in the studied localities.

	Los Morros [cm]	Siboney [cm]	La Isabela [cm]	Gibara [cm]	Casilda [cm]
Máximo	6,09	21,46	28,32	17,94	15,32
Mínimo	-5,20	2,06	-0,25	-0,24	6,68
Amplitud	11,30	19,40	28,57	18,18	8,64

Las características de la variabilidad interanual del nivel del mar modulan la tendencia, ya que la tasa anual del NMM se obtiene a partir de los valores medios anuales.

En Los Morros, en el extremo occidental de Cuba, la variabilidad interanual se comportó de forma más estable que en Siboney y la máxima amplitud de la misma resultó menor que en Siboney y Gibara (Tabla 4). En La Isabela, la variabilidad interanual se mantuvo estable hasta 1998, año que se destacó por un valor medio anual muy alto: 28,32 cm (Figura 4) el cual, contribuyó estadísticamente a un valor de la máxima amplitud muy alto, e influyó positivamente en el valor de la tasa lineal anual de La Isabela (Tabla 3), pero no es representativo de las características generales de la variabilidad interanual del nivel del mar en esa localidad.

En Siboney y también en Gibara en menor medida, la intensidad de la variabilidad interanual tendió a aumentar sostenidamente desde el inicio del período analizado. Por esta razón, los valores de máxima amplitud de estas dos localidades (Tabla 3) reflejan mejor el comportamiento de la variabilidad interanual en las mismas que en La Isabela.

La tasa lineal anual de Siboney es comparable por su magnitud, con estimados de algunas estaciones mareográficas cercanas de la región geográfica en que se encuentra Cuba. Por ejemplo, para Pensacola, Key Wets y Fernandina, se han obtenido tasas anuales de 2,1, 2,2 y 2,0 mm/año, respectivamente (Douglas, 2001). Sin embargo, la tasa anual de Los Morros (Figura 1), ubicada en la misma zona, resultó mucho menor. Como resultado de la comparación de las tasas del NMM entre localidades de una misma región o zona de la misma, pueden obtenerse valores bastante diferentes, aunque el análisis se efectúe para períodos iguales de tiempo.



Las causas de dichas diferencias residen en que los cambios a largo plazo del NMM no se comportan de la misma forma a escala regional y local, debido a diversos factores oceanográficos y geológicos, independientemente de que este proceso ocurre a escala global (Pugh, 1996, Douglas, 2001). En relación con los primeros, se sabe que en la distribución espacial de la temperatura de las aguas en el Mar Caribe y el Golfo de México, juega un papel importante la circulación, además de los ciclos estacionales de las condiciones térmicas superficiales y de los primeros cientos de metros Sukhovey, (1980). De esta forma, deben existir condiciones diferentes para la expansión térmica en regiones como las aguas al noroccidente de Cuba, donde dominan rápidas corrientes muy cálidas Sukhovey, (1980), con una marcada variabilidad interanual, o en aguas profundas con circulación anticiclónica, que en otras zonas, aunque cálidas, no se caractericen por una gran variabilidad interanual. En cuanto a lo segundo, no se dispone hasta la fecha de datos acerca de la velocidad de los movimientos verticales del terreno de las localidades cubanas estudiadas. La combinación de unos y otros podrían ser la causa de las diferencias entre las tasas anuales del nivel medio del mar entre localidades como Siboney y Casilda. Los mencionados factores podrían causar efectos no lineales de origen regional en la tendencia del nivel medio del mar a largo plazo, pero este aspecto en particular, no es objeto de este trabajo.

En relación al incremento, el NMM ascendió 8,56 cm en Siboney durante 40 años desde 1966 hasta el 2005, mientras que en Gibara aumentó más de tres veces que en La Isabela para un período de tiempo similar. En Casilda aparentemente no hubo cambios en la posición del NMM en el último cuarto del siglo XX (Tabla 3). Sin embargo, los valores de la tasa lineal anual estimados, deben considerarse de importancia debido a la reconocida vulnerabilidad de la mayor parte de las costas cubanas ante las penetraciones del mar.

## CONCLUSIONES

1. La tasa lineal anual de ascenso del nivel medio del mar en el archipiélago cubano, obtenida a partir de los registros mareográficos de mayor longitud, fluctuó entre 0,214 cm/año en Siboney y 0,005 cm/año en Casilda.
2. El incremento lineal del NMM fluctuó entre 0 (Casilda) y 8,56 cm (Siboney) en las localidades y períodos de tiempo analizados.
3. La tasa de ascenso y el incremento del nivel medio del mar varían visiblemente entre las diferentes localidades analizadas lo cual puede estar relacionado con las condiciones oceanográficas de las aguas cercanas a las estaciones mareográficas y los movimientos verticales del terreno a escala local.
4. El incremento lineal del nivel medio del mar es ya de relativa importancia, y sus estimados deben tomarse en cuenta en la formulación de políticas y el diseño de obras en la zona costera.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus más sinceros agradecimientos a la Lic. Martha M. Rivero Fernández por su apoyo en la elaboración de este artículo y a la Dra. María Elena Miravet Regalado por sus valiosas recomendaciones.

