

# NIVEL DEL MAR EN LAS COSTAS ESPAÑOLAS Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA

Elena TEL y M<sup>a</sup> Jesús GARCÍA

*Instituto Español de Oceanografía. C/ Corazón de María, 8. 28002 Madrid.  
(elena.tel@md.ieo.es, mjesus.garcia@md.ieo.es)*

## RESUMEN

La series del nivel del mar procedentes de la red de estaciones mareográficas costeras operadas por el IEO pueden ser consideradas por su longitud y su distribución geográfica un índice de la variabilidad regional climática. El análisis de conglomerados jerárquicos presenta 3 regiones diferenciadas en las que, mediante el ACP, se han encontrado tendencias regionales que varían desde 2.4 mm/año en el norte de la península ibérica (región de transición), 0.9 mm/año en el estrecho y 0.8 mm/año en Canarias (región subtropical). La variabilidad decadal no permite encontrar valores de aceleración fiables para la longitud de éstas series. Las correlaciones encontradas con las presiones en costa son altas y algo inferiores con el índice de la NAO lo que permite deducir que las variaciones del nivel del mar registrado en costa, aparte de las señales locales, mantienen las características propias de la región.

**Palabras clave:** nivel del mar, tendencias, variabilidad regional, NAO.

## ABSTRACT

*The coastal sea level time series operated by the IEO tide gauge network can be considered, in attention to its length and geographical distribution an appropriated regional climatic variability index. A PCA performed to the 3 difference regions founded by a clusters analysis, gives regional trends from 2.4 mm/year on the north of the Iberian peninsula to 0.9 mm/yr in the Strait of Gibraltar and 0.8 mm/yr in the Canary islands. The decadal variability gives no evidence to reliable acceleration values. The correlation between mean sea level is higher for atmospheric pressure than for the NAO index. It shows that the variation in coastal sea level keeps the local signals in addition to the regional behaviour.*

**Key words:** sea level, trend, regional variability, NAO.

## 1. INTRODUCCIÓN

El nivel del mar en las costas españolas viene registrándose desde finales del siglo XIX para referencia de la cartografía terrestre, pero es a partir de 1943 cuando el IEO establece una red mareográfica para referencia de la cartografía marina, predicción de mareas astronómicas y otros estudios oceanográficos. En la actualidad las actividades de investigación, tanto en proyectos locales y regionales, como internacionales (GLOSS, 1997), requieren sistemas de medida muy precisos y series de datos de gran calidad. En particular los estudios de variabilidad climática precisan series temporales de gran longitud, debido a la importancia de las variaciones interanuales e interdecadales en el sistema climático, por lo que recientemente se está haciendo un gran esfuerzo para disponer de unas series temporales sin cambios de referencia a lo largo de todo el periodo.

Desde principios de la década de los 90 (GARCÍA *et al.*, 1992) se planteó la calidad de estos datos y los problemas que pueden acarrear en los resultados de investigaciones. Posteriormente, en el marco del proyecto RIMA (PÉREZ *et al.*, 1999) se dio un gran empuje al control de calidad de estas series de datos. En este trabajo se ha completado el control de calidad que ha permitido estudiar con mayor fiabilidad tanto los ciclos y tendencias en cada estación costera de la red mareográfica del IEO, como la regionalización y su relación con el clima. Desde el año 2000 se vienen presentando resultados parciales de este trabajo, en particular para la cornisa cantábrica (TEL y GARCÍA, 2001), y para la región del estrecho de Gibraltar (TEL y GARCÍA, 2002). El objetivo final es conocer el comportamiento de la variabilidad del nivel medio del mar y sus causas, poniendo un especial interés en la valoración de estas series como indicador del cambio climático regional tanto natural como antropogénico. El modelo más aceptado en la actualidad incluye factores meteorológicos, principalmente la presión atmosférica y el viento, últimamente el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) esta siendo considerado un buen indicador de procesos en el océano, así como las variaciones en la densidad del agua y los cambios en las circulaciones oceánicas asociados. Pero las escalas de estos fenómenos varían de años a décadas, incluso han sido descritas escalas de hasta un siglo para la NAO, por lo que los resultados de este estudio deben de ser considerados en la medida de la información parcial que estas series pueden aportar.

La NAO es una variación a gran escala de la presión atmosférica que representa uno de los factores principales de la variabilidad climática en el Hemisferio Norte, influyendo en la temperatura y precipitación que se registran en toda Europa. Por lo tanto su correlación puede dar idea de la interrelación entre las variables atmosféricas y oceánicas. Una NAO fuerte hace que los vientos del oeste soplen con fuerza sobre Europa, mientras la península queda bajo la acción de un fuerte anticiclón y la precipitación es baja. Si la NAO es débil los vientos oceánicos atraviesan la península ibérica, dejando precipitación (PÉREZ *et al.*, 2000).

## 2. ESTACIONES DE OBSERVACIÓN

La red de monitorización del IEO comprende 12 estaciones, si bien por la longitud de las series sólo se analizan 11 estaciones distribuidas en regiones oceanográficas diferenciadas: Norte Peninsular (3), Estrecho de Gibraltar y adyacentes (5) e islas Canarias (3). Asimismo se han utilizado datos procedentes del PSMSL de la estación de Cascáis operada por el IHM portugués con el fin de obtener una mejor distribución de las estaciones que complete el estudio regional (fig. 1).

Las series de nivel del mar analizadas datan de 1943 en la península y de 1949 en las islas Canarias aunque no todas las series están completas, habiendo incluso algunas estaciones en las que la falta de medidas se prolonga por periodos muy largos, como es el caso de las estaciones de las islas Canarias y algunas del estrecho, coincidiendo fundamentalmente con cambios de ubicación del equipo como consecuencia de obras portuarias. En el caso de la estación de Palma de Mallorca, el periodo disponible no hace aconsejable realizar este estudio aunque los datos de los últimos años están siendo de gran utilidad tanto como origen de la nivelación geodésica de la isla como para la calibración del Topex/Poseidon.

Por otra parte, este trabajo requiere información tanto del océano como de la atmósfera. Los datos meteorológicos utilizados en el presente trabajo, proceden de las estaciones meteorológicas operadas por el Instituto Nacional de Meteorología (INM) y los de la NAO proceden de la página web:

*<http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html>*

El sistema completo de observación de nivel del mar se compone de la red de estaciones mareográficas y la red local de nivelación que a su vez está enlazada a la red geodésica nacional en el caso de las estaciones peninsulares. En la actualidad este sistema se complementa con estaciones GPS que permiten además del control de la cota de referencia de forma permanente o episódica, la referenciación de todas las estaciones a un sistema global que permitirá enlazarlas con los datos altimétricos oceánicos. Las estaciones, compuestas por mareógrafo y pozo, son un sistema complejo que puede conducir a distintos errores en las series de datos registrados, producidos por obstrucciones del pozo, mal funcionamiento del reloj mecánico, rotura o pérdida de tensión del cable (ARAUJO *et al.* 2001). La mayoría de los errores son corregidos en los controles de calidad realizados anualmente por el método de la marea residual. En la actualidad la incorporación en los sistemas de medida de salida digital además del registro gráfico, solventa algunos errores y lo más importante ayuda a corregir otros y permite la recepción de los datos en el Centro de Datos en tiempo casi presente vía módem.

Con el fin de calibrar la serie temporal de cada estación a una única referencia a lo largo de todo el periodo, se ha estudiado el comportamiento de las diferencias entre las series de estaciones ubicadas en la misma región oceanográfica. Asimismo se ha aplicado el Test de Homogeneización Normal Estándar (SNHT) propuesto por Alexanderson (1999) para series climáticas. El test proporciona los puntos donde existe una inhomogeneidad, pero no indica si es debida a un error en la referencia u otro tipo de error en la medida, o si por el contrario, es parte de la variabilidad natural del nivel del mar.

Para efectuar las correcciones se han tenido en cuenta los registros históricos de incidencias, que han ayudado a discernir si la inhomogeneidad detectada era debida en cada caso, a un error en la medida o si debía mantenerse por ser un dato real.

Las lagunas que contienen las series de datos se han completado (en casos puntuales y siempre menos del 5 % de la longitud de las series con el fin de asegurar la fiabilidad de los resultados posteriores) utilizando el siguiente algoritmo:

$$X_j = \frac{\sum_i \rho_{ij}^2 X_i}{\sum_i \rho_{ij}^2} \quad (1)$$

donde  $X_i$  es el dato normalizado correspondiente en las otras cuatro estaciones y  $\rho_{ij}$  es el coeficiente de correlación entre las series.

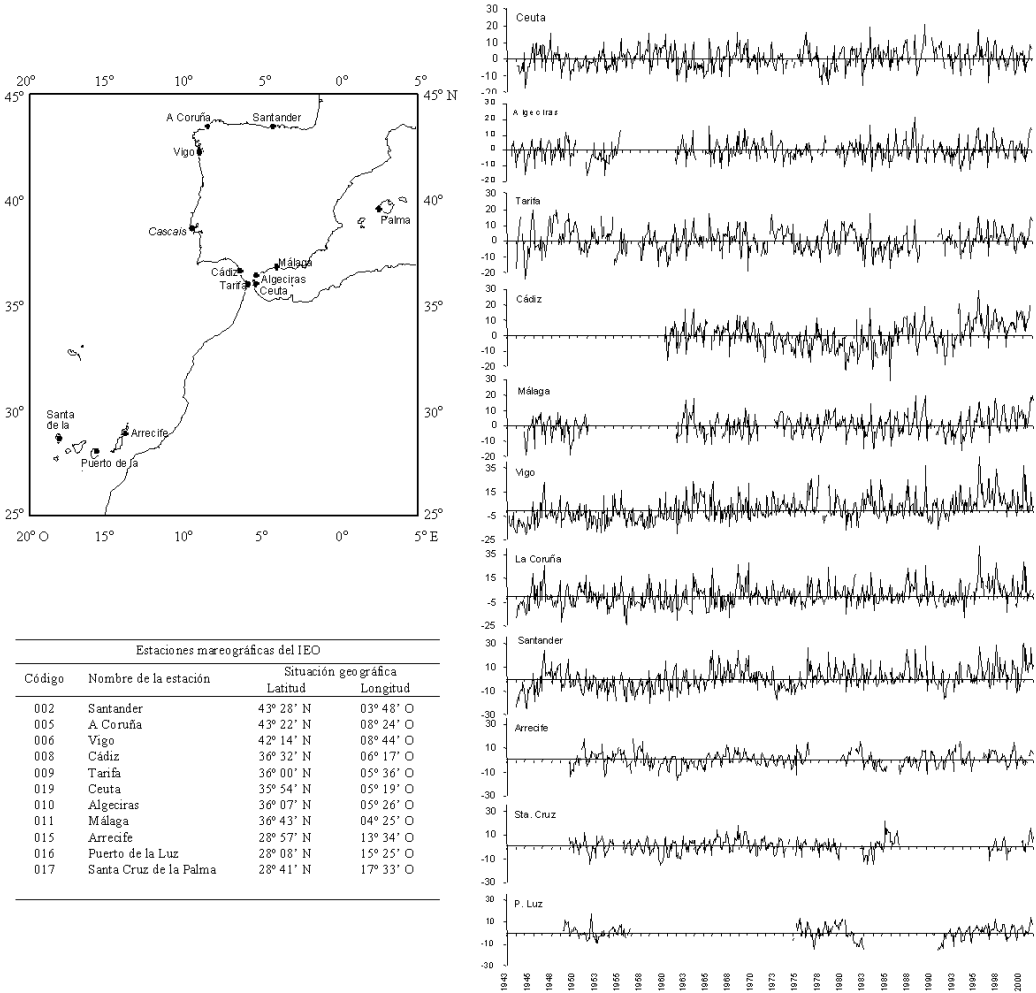


Figura 1: Mapa de estaciones (IEO, IHM Portugués). Series temporales del nivel del mar en las estaciones del IEO.

Tabla 1: Tendencias de las series según el ajuste para el periodo 1943-1999, amplitudes de los ciclos anual y semianual. (Ver series de datos en fig. 1).

ESTACIÓN	INICIO	FIN	N	ANUAL SEMIANUAL		ANUAL+SEMIANUAL		PGR (mm/año)	TENDENCIA TEND+PGR	
				AMPLITUD (mm)		RANGO	MAX.		(mm/año)	(mm/año)
Vigo	mar-43	dic-01	700	48	17	112	Nov	0,22	2,63	2,83
La Coruña	ene-44	dic-01	683	44	18	103	Nov	0,13	1,40	1,51
Santander	ene-44	dic-01	675	30	21	102	Nov	0,27	2,00	2,22
Ceuta	mar-44	dic-01	667	47	13	104	Oct	0,43	0,50	0,86
Algeciras	jul-43	dic-01	568	40	15	93	Oct	0,43	0,38	0,83
Tarifa	ene-44	dic-01	635	48	26	129	Oct	0,42	0,06	0,46
Cádiz	sep-60	dic-01	484	48	8	102	Oct	0,41	1,85	2,06
Málaga	ene-45	dic-01	535	56	11	117	Oct	0,43	0,89	1,27
Sta. Cruz	ene-50	dic-01	438	46	12	99	Sep	0,20	0,31	0,47
Arrecife	ene-50	dic-01	539	40	14	90	Oct	0,20	0,19	0,36
P. Luz	jun-49	dic-01	308	42	13	95	Sep	0,20	-0,01	0,22

### 3. DISCUSIÓN

La metodología más utilizada en el análisis de datos mensuales de nivel medio del mar es intentar separar mediante una función de ajuste matemático las contribuciones debidas a la tendencia y las debidas a la variabilidad estacional (PUCH 1987) según el modelo:

$$Z(t) = Z_0 + At + \frac{1}{2}Bt^2 + \sum_{i=1}^2 (C_i \text{sen}(\varpi_i t) + D_i \text{cos}(\varpi_i t)) \tag{2}$$

donde  $\varpi_i = 2\pi/T_i$  y  $T_i$  son los periodos anuales y semianuales. El término lineal  $At$  representa la tendencia, el término  $\frac{1}{2}Bt^2$  está asociado a la aceleración, y  $Z_0$  es la media.

Los ciclos de periodo más largo no se han estudiado por el momento ya que la longitud y continuidad de las series no permite discernir con claridad estas señales. Asimismo en un segundo ajuste, se ha considerado el término de aceleración pero los resultados obtenidos son muy dispares ya que las series son muy cortas y la variabilidad interdecadal del nivel medio del mar enmascara estos resultados. De hecho, si para el cálculo de tendencias la longitud de las series está en el límite de fiabilidad, para realizar un estudio de aceleración medianamente fiable es aconsejable al menos un periodo de 75 años. DOUGLAS (1992), muestra una aceleración de  $-0.011 (\pm 0.012)$  mm/año<sup>2</sup> para grupos de 80 años y de  $0.001 (\pm 0.008)$  mm/año<sup>2</sup> para grupos de 92 años, y no los considera evidencia de aparente aceleración.

Es preciso tomar con precaución estos resultados obtenidos debido a que en principio las series no son demasiado largas, y por otro lado el registro no ha sido totalmente descontaminado de los movimientos verticales del terreno. El gráfico adjunto muestra la fiabilidad de los resultados expuestos. Se puede comprobar que cuanto más largo es el registro, más estable es la tendencia que se obtiene.

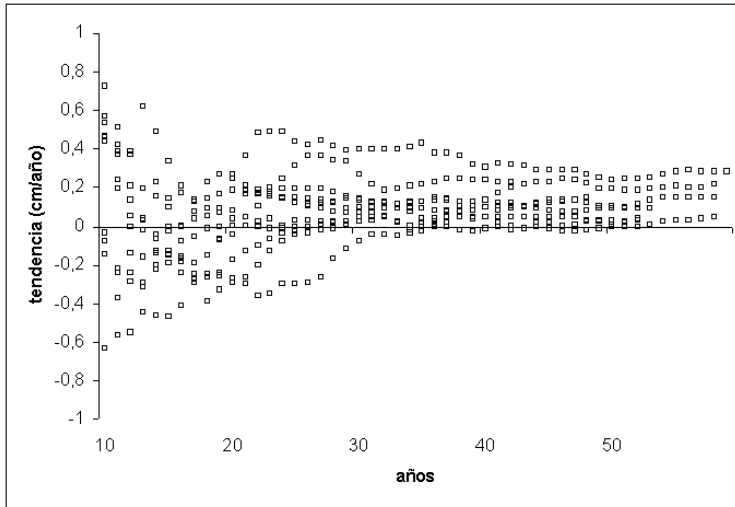


Figura 2: Tendencias acumuladas de las series.

Por otra parte, el registro medido del nivel del mar, viene afectado por los movimientos verticales del terreno, por lo que el conocimiento de la geodinámica del área es importante. Es conveniente señalar que la parte más oriental de la llanura Bética, así como el mar de Alborán y la zona del Estrecho conforman una de las zonas con mayor actividad tectónica de la Península Ibérica debido a la convergencia de las placas africana y eurasiática (CASTELLOTE *et al.*, 2000). Esto provoca movimientos verticales de la tierra que influyen en los registros de nivel del mar y pueden conducir a falsas tendencias.

En la tabla de tendencias (tabla 1) se dan los resultados obtenidos por el modelo de ajuste a los datos de nivel medio del mar relativo y a los datos corregidos de la isostacia posglacial según los resultados del modelo geodinámico propuesto por PELTIER (2000):

$$y_{corr}(t) = y_{orig}(t) + \sigma t \quad (3)$$

donde  $\sigma$  es el valor de la corrección dado por Peltier.

Para el estudio regional del nivel del mar se han buscado zonas de comportamiento homogéneo mediante la aplicación de un análisis de conglomerados jerárquicos (se ignora la serie de P. Luz por las características de la misma). Probando con distintos métodos de agrupación comprobamos que los resultados no varían con el método, lo que nos asegura la bondad del tratamiento. Encontramos que hay tres zonas: una comprende las estaciones del norte peninsular, otra que agrupa las estaciones de la zona del Estrecho y otra que separa los registros de Canarias. Cabe destacar que la estación de Cádiz no se agrupa con las estaciones que están geográficamente más próximas, sino con las de Canarias.

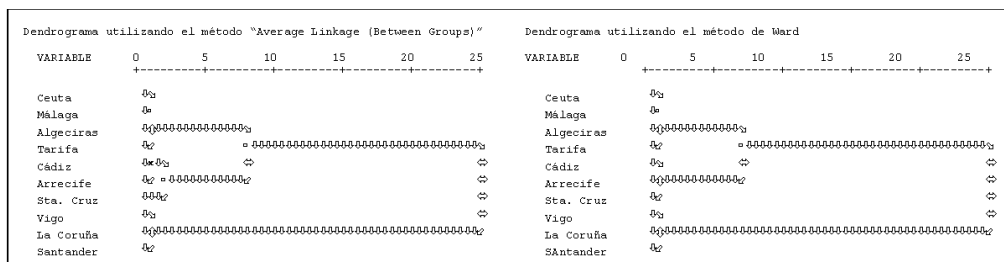


Figura 3: Dendrogramas de los análisis de conglomerados con diferentes métodos de agrupación.

Tabla 2: Tendencias regionales obtenidas mediante ACP.

Escenario 1	KMO	%VARIANZA	TENDENCIA (mm/año)	Escenario 2	KMO	%VARIANZA	TENDENCIA (mm/año)
NORTE	0,742	82,2	2,40	NORTE	0,742	82,2	2,40
ESTRECHO-CADIZ	0,778	67,3	0,88	ESTRECHO+CADIZ	0,843	64,1	0,95
CANARIAS+CADIZ	0,606	50,8	0,83	CANARIAS-CADIZ	0,500	64,1	0,39

Atendiendo a la clasificación obtenida hemos realizado un Análisis de Componentes Principales (ACP) con el fin de obtener tendencias regionales del comportamiento del nivel del mar, eliminando así posibles factores locales. En la tabla 2 se muestra el valor del test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) en cada caso que nos da idea de la adecuación de las series de datos al análisis que se realiza, así como el tanto por ciento de varianza explicada por el primer modo, que es el que aporta la tendencia del área en estudio.

Al observar los resultados se puede comprobar que la inclusión de Cádiz en uno u otro grupo afecta significativamente a la tendencia regional del mismo, especialmente si se agrupa con Canarias (la tendencia pasa de 0.39 a 0.83 mm/año), no ocurriendo lo mismo cuando lo incluimos el Estrecho. Estos resultados parecen indicar que la tendencia al alza del nivel del mar es más acusada en la región de transición que en la región subtropical siempre teniendo en cuenta la información que estas series pueden aportar, en particular las series de Canarias que aparte de presentar lagunas han estado ubicadas en distintos muelles con los consiguientes problemas de asentamiento de los mismos.

Los resultados disponibles en el PSMLS para las estaciones próximas de Cascáis (38°41'N 09°25'O) y Brest (48°23'N 4°30'O) son respectivamente de 1.20 (±0.10) mm/año (1882-1991) y 0.97 (±0.05) mm/año (1807- 1999), en ambos casos sin considerar la corrección de Peltier, pero no pueden ser contrastados con nuestros resultados por la longitud del periodo de muestreo.

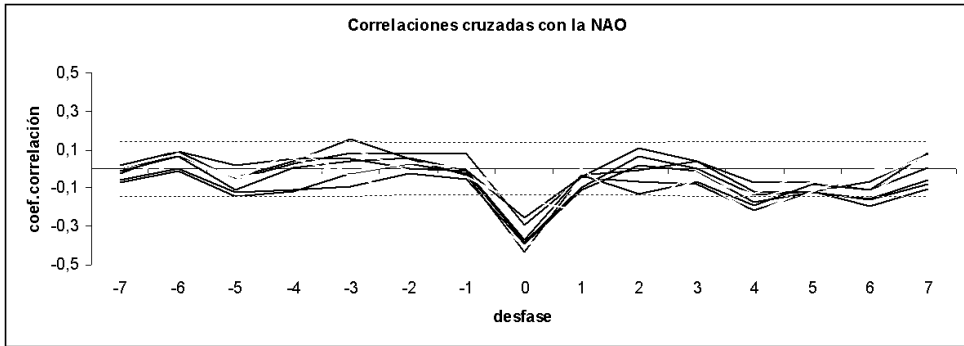


Figura 4: Correlaciones cruzadas de las series de las estaciones con el índice NAO.

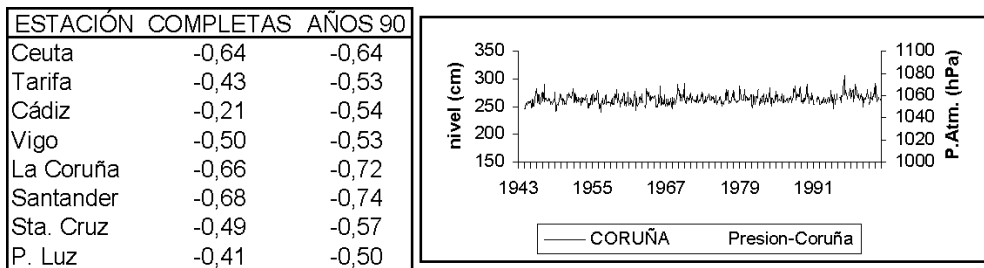


Figura 5: Coeficientes de correlación entre las series y las series de presión en cada estación.

Con el fin de dar una idea de la información que los datos registrados por los mareógrafos en la costa pueden aportar a la variabilidad del clima se han realizado las correlaciones de las series de nivel del mar con la NAO, y según se puede apreciar en la figura 4, el valor  $\tilde{(-0.3)}$  para orden cero es significativo, lo que indica que el nivel del mar en la costa responde a las variaciones barométricas en el Hemisferio Norte.

Asimismo, encontramos valores de correlación buenos con la presión atmosférica en todas las estaciones. Los valores son ligeramente más altos para las estaciones de La Coruña y Santander que para el resto de las estaciones, que presentan valores similares en torno a 0.55. Además estos valores son más altos que los valores de correlación encontrados con la NAO como corresponde a señales locales. Lógicamente la mejora de los equipos tanto por parte del INM como del IEO influye en la calidad de los datos, como se puede apreciar al comparar con las correlaciones en la última década.



Los datos del nivel del mar en la costa son imprescindibles por el impacto que el nivel del mar causa en la misma y consecuentemente afecta a sus habitantes. Si bien, los efectos locales (batimetría, orientación de la estación, orografía de la zona, etc.) afectan a la señal del nivel del mar registrado, los resultados encontrados para la correlación con la NAO nos muestra que el registro del nivel del mar en la costa puede ser un buen indicador del comportamiento oceánico. Así también, los resultados encontrados por CABANAS *et al.* (2001) sobre la variabilidad en la cornisa Cantábrica y VARGAS *et al.* (2001) para el mar de Alborán, en variables oceanográficas presentan un comportamiento coherente con estos resultados durante la última década.

#### 4. CONCLUSIONES

Considerando las series históricas del nivel del mar en estudio, que datan desde 1943, y su distribución se ha realizado un estudio de las mismas, obteniéndose tres regiones diferenciadas para las que se han encontrado unas tendencias de 2.4 mm/año en el norte de la península ibérica, 0.9mm/año en la zona del estrecho y 0.8 mm/año en las islas Canarias; si bien estos resultados tienen que ser considerados con precaución debido a la longitud de las series, lagunas y señales registradas por los mareógrafos que no han podido ser removidas por falta de información al respecto (movimientos verticales, asentamientos del terreno, ...).

La información que estos datos aportan al conocimiento de la variabilidad climática, si bien es relevante, pone de manifiesto la necesidad de seguir monitorizando el nivel del mar, pero también, que el sistema de observación del nivel del mar es complejo y requiere la inclusión de muchos factores a tener en cuenta.

Para completar el estudio de las causas del comportamiento del nivel del mar se requieren la monitorización continuada no solo del nivel del mar, sino de variables atmosféricas que ya vienen registrándose históricamente y oceanográficas cuyo registro continuado ha comenzado recientemente en el IEO, por lo que la información disponible no es, por el momento, suficiente aunque es un gran avance para conocimiento del clima en el futuro.

#### 5. REFERENCIAS

- ALEXANDERSSON, H. y MOBERG (1997): A Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *Int. Jour. of Climat.*, 17, pp. 25-34.
- ARAUJO, I, PUCH, D. y COLLINS, M. (2001): *An intensive analysis of trends in sea level variability at Newlin*. Final Workshop of COST Action 40. Hydrographic Of the Republic of Croatia.
- CABANAS, J.M., LAVÍN, A, GARCÍA, M.J., GONZÁLEZ-POLA, C. y TEL PÉREZ, E. (2001): Oceanographic variability in the northern shelf of the Iberian peninsula (southern bay of Biscay). 1990-1999, *ICES Marine Science Symposium*.
- CASTELLOTE, M., FLETA, J., GIMÉNEZ, J., GOULA, X., SORO, M., SURIÑACH, E., TALLAYA, J. y TÉRMENS, A. (2000): CuaTeNeo GPS Network to monitor crustal deformations in the SE of the Iberian Peninsula . *The Tenth General Assembly of the WEGENER Project*. Boletín ROA 3/2000.

- DOUGLES, B.C. (1992): Global sea level acceleration. *Jour. Geoph. Res.*, 97 (8), pp. 12699-12706.
- DOUGLAS, B.C., KEARNEY, M.S. y LEATHERMAN, S.P. (2001): *Sea level rise, history and consequences*. Int. Geoph. Series, Academic press. vol. 75.
- GARCÍA, M.J., RUIZ, C. y ESTEBAN, A. (1992): *Niveles medios y constantes armónicas en los puertos de la costa española*. Informes técnicos IEO, 128. Madrid.
- IOC. Global Sea Level Observing System (GLOSS) (1997): *Implementation Plan 1997*. Intergovernmental Oceanographic Commission. Technical series.
- PELTIER, W.R., ICE (VM2) (2000): Glacial isostatic adjustment correction. En *Sea Level rise, History and Consequences*, Academic Press, New York, 228 pp.
- PÉREZ, B., GARCÍA, M.J. y PUYOL, B. (1999): *Integración y optimización de las redes mareográficas españolas*. Presentado en las jornadas Portuarias-Coruña 99.
- PÉREZ, F.F., POLLARD, R.T., READ, J.F., VALENCIA, V., CABANAS, J.M. y RIOS, A.F. (2000): Climatological coupling of the thermohaline decadal changes in Central Water of the Eastern North Atlantic. *Sci.Mar.*, 64 (3), pp. 347-353.
- PUCH, D.T. (1987): *Tides, surges and mean sea level*. Wiley and Sons Ltd.
- ROSS, T., GARRET, C., y LE TRAON, P.I. (2000): Western Mediterranean sea-level rise: changing exchange flow through the Strait of Gibraltar. *Geoph. Res. Lett.* 27, 18, pp. 2949-2952.
- TEL, E., y GARCÍA, M.J. (2001): *Mean sea level changes along the northern iberian peninsular coast*. Final Workshop of COST Action 40. Hydrographic Ins. Of the Republic of Croatia.
- VARGAS-YAÑEZ, M., SARHAN, T., ABAD, E., RAMÍREZ, T., CORTÉS, D. y PLAZA, F. (2001): Results from the ECOMALAGA Project: hydrological and biological seasonal cycles and trends in the Malaga Bay and Alboran Sea. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 36, pp. 86.