

# LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y EL VIENTO EN LA VARIABILIDAD DEL NIVEL DEL MAR EN EL MAREÓGRAFO DE BONANZA (CÁDIZ)

Pablo FRAILE JURADO y Mónica AGUILAR ALBA  
Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla

## RESUMEN

En esta comunicación se analiza la influencia de la presión atmosférica y el viento en la variabilidad del nivel del mar en el mareógrafo de Bonanza (Cádiz) mediante modelos de regresión lineal con el objeto de caracterizar y cuantificar el peso de las variables climáticas sobre los valores y la variabilidad del nivel del mar.

**Palabras clave:** nivel del mar, presión atmosférica, viento, regresión lineal, Andalucía.

## ABSTRACT

This paper analyses the influence of air pressure and wind on sea level through the data provided by tidal gauge of Bonanza (Cádiz) by means of linear regression analysis. The aim of the study is to characterize and quantify the importance of the climatic variables on the values and variability on sea level for this area.

**Key words:** sea level, air pressure, wind, linear regression, Andalusia

## 1. INTRODUCCIÓN

La subida del nivel del mar es, de todos los elementos relacionados con el cambio climático, uno de los hechos que menos discusiones científicas ha generado acerca de su ocurrencia o no. A diferencia de otras variables, como la presión atmosférica o las precipitaciones, los registros de niveles del mar indican un claro cambio al alza en todo el planeta. Existiendo un notable grado de consenso acerca sobre este primer aspecto, la discusión científica se centra en la magnitud de este cambio del nivel del mar durante los próximos dos siglos, y en mejorar su estimación a escala regional (TITUS *et al.*, 1996), de manera que sea posible cuantificar y evaluar los cambios en cualquier costa del mundo.

El nivel del mar se puede definir como la altura de la superficie de contacto entre dos fluidos –atmósfera y océano- relativa a un punto conocido de la superficie terrestre (FRAILE, 2005). Su estudio se realiza a partir de la información puntual proporcionada por los mareógrafos, o bien por modelos que a partir de diferentes variables oceanográficas (corrientes, temperatura, salinidad, densidad...) y atmosféricas (presión atmosférica, viento), calculan la elevación de la superficie del mar.

Nuestro estudio se enmarca dentro de un proyecto más amplio en el que uno de los objetivos es la espacialización del nivel del mar a lo largo de la línea de costa del litoral

andaluz, con el objetivo último de representar cartográficamente los riesgos asociados a una potencial subida del nivel del mar. El nivel del mar presenta una alta variabilidad espacial, como ejemplo, en el litoral andaluz se registran diferencias de hasta 40 centímetros, como valor medio, respecto al nivel medio del mar de referencia en España situado en Alicante. En España no disponemos de una representación cartográfica precisa y continua de esta variable a lo largo de la línea de costa. La única información de detalle es la proporcionada por los datos procedentes de mareógrafos situados en claves puntuales pertenecientes a diversas Administraciones Públicas. Por lo tanto, es necesario transformar estos datos puntuales en información continua para la línea de costa.

Una serie de registros del nivel del mar de un mareógrafo puede ser descompuesta en dos tipos de componentes: i) la componente mareal, determinista y predecible, y ii) otras componentes, de carácter estocástico (TEJEDOR *et al.*, 1996), como el efecto de la atmósfera (presión y viento), de elementos oceanográficos (corrientes) o hidrológicos (densidad o volumen de la masa de agua). Por lo tanto, esta segunda componente aleatoria es la que exige un mayor estudio con objeto de poder caracterizar estas variables a escala local.

Dentro de estas componentes aleatorias, la influencia de las variables climáticas sobre el nivel del mar sólo se conoce a partir de valores muy generales. Es el caso del valor de la influencia de la presión atmosférica que genera una modificación de -0,993 cm por cada hPa de presión., siendo esta relación constante y lineal en todo el planeta (PUGH, 2004).

Cuando intentamos evaluar la influencia del viento sobre el nivel del mar, hay que considerar una serie de parámetros locales –dirección, intensidad, topografía, batimetría, amplitud de la plataforma continental- que dificultan el establecer relaciones físicas directas y universales con las mediciones de los mareógrafos. Hasta ahora, el estudio local del viento y de su relación con la variabilidad del nivel del mar se ha realizado a partir de modelos relativamente imprecisos (MENÉNDEZ *et al.*, 2004), o bien del análisis estadístico de las series de los mareógrafos (MÉNDEZ *et al.*, 2004).

Hemos centrado este trabajo en el estudio de estas variables climáticas como un primer paso para conocer su importancia en el nivel del mar local y así poder alcanzar mayor precisión en su espacialización. Presentamos los resultados obtenidos en un punto del litoral andaluz, Bonanza, situado en la desembocadura del río Guadalquivir, en la provincia de Cádiz.

Así, el objetivo de esta comunicación es mejorar el conocimiento de la influencia de la componente aleatoria climática sobre el nivel del mar y caracterizarla para esta zona, lo que llevaremos a cabo analizando el nivel del mar respecto a las dos variables climáticas.

## **2. ÁMBITO DE ESTUDIO Y DATOS**

El mareógrafo de Bonanza se encuentra en el municipio de Sanlúcar de Barrameda, en la margen izquierda de la desembocadura del río Guadalquivir. Está situado en la fachada atlántica del litoral andaluz, lo que le confiere una serie de rasgos que

LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y EL VIENTO EN LA VARIABILIDAD DEL NIVEL DEL MAR EN EL MAREÓGRAFO DE BONANZA (CÁDIZ)

condicionan la variabilidad del nivel del mar. En la tabla 1 se puede apreciar su enorme variabilidad en la costa andaluza.

	NIV. MAR LOCAL	NMM Alicante	MÍNIMO	MÁXIMO	CARRERA. MAREA	PER.
HUELVA	200,88	39,88	-5	417	370	92-03
BONANZA	170,05	29,05	0	406	317	92-03
MÁLAGA	59,38	-0,62	3	122	80	92-03

Tabla 1. DESCRIPCIÓN DE LOS NIVELES DEL MAR EN MAREÓGRAFOS DEL LITORAL ANDALUZ. FUENTE: FRAILE, P. (2005) Y PUERTOS DEL ESTADO (2005)

En primer lugar, la existencia de una amplia plataforma continental –unos 60 kms- influye de dos formas sobre la dinámica litoral, por un lado, permite la adaptación del oleaje al perfil costero, y por otro, dificulta la evacuación de las acumulaciones de agua que se producen con los temporales procedentes del suroeste. En segundo lugar, los aportes de agua del río Guadalquivir pueden suponer importantes modificaciones del nivel del mar, especialmente en situaciones de amplias avenidas fluviales.

Los rasgos generales climáticos de la zona están determinados por su localización en una franja de transición entre los climas de las latitudes medias y los climas tropicales. Esta transición entre dominios se plasma en el modo de actuación de la circulación atmosférica general sobre la región, al verse sometida a la alternancia de centros de acción y mecanismo meteorológico diferentes según las estaciones (PITA, 2003).

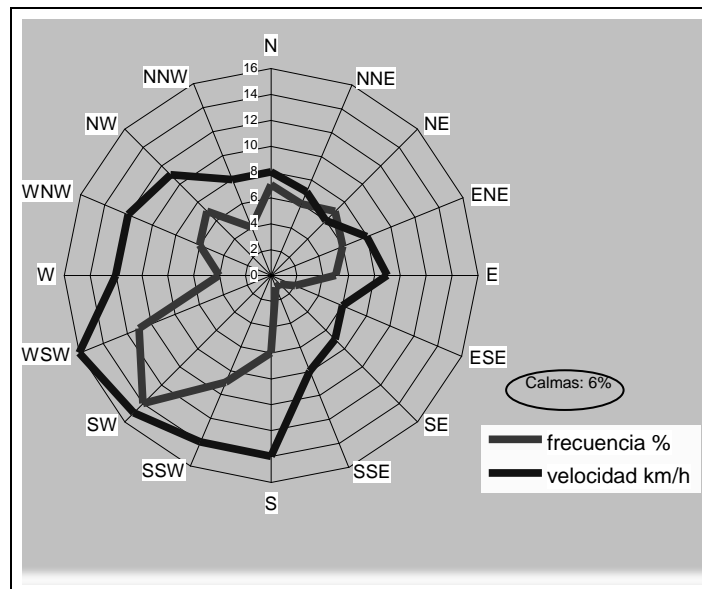


Fig. 1: Rosa de los vientos de Huelva.

La presión atmosférica media en el Golfo de Cádiz es ligeramente alta (1016 hPa en el observatorio de Rota) debido a la proximidad al máximo subtropical de las Azores, y en muy pocas ocasiones desciende por debajo de 1000 hPa. Sin embargo, cuando las perturbaciones frontales asociadas a la corriente en chorro afectan a estas latitudes pueden generar mínimos de presión en torno a 990 hPa., ocasionando fuertes temporales.

En el Golfo de Cádiz dominan los vientos provenientes del tercer cuadrante, con presencia ocasional de vientos de levante (figura 1). La influencia del viento sobre el nivel del mar se debe a un fenómeno denominado *estrés del viento*, que es la fuerza generada sobre la superficie del mar al desplazarse el aire a más velocidad. Esta fuerza aumenta en función del cuadrado de la velocidad del viento (PUGH, 2004).

Todos estos factores determinan que la dirección dominante del oleaje sea del suroeste. Cuando los vientos de esta dirección se combinan con fuertes descensos barométricos, unidos a la presencia de la extensa plataforma continental, se pueden generar importantes sobreelevaciones de temporal cercanas a 1 metro.

### 3. DATOS

Para la realización de este estudio han utilizado datos procedentes de diversas fuentes, que quedan recogidos en la tabla 2. Los registros del nivel del mar proceden de un solo punto, buscándose la información climática de los observatorios meteorológicos situados en el entorno (figura 2). Para el análisis de la relación entre el nivel del mar con las variables climáticas se han utilizado dos períodos diferentes condicionados por la diferente duración de las series buscando siempre el mayor período común entre ellas.

Variable	Fuente	Periodicidad	Comienzo	Final	Ubicación
Residuo no mareal	Puertos del Estado	Horaria	1992	2002	Bonanza
Velocidad medio del viento	Puertos del Estado	Horaria	1997	2004	Chipiona
Velocidad máxima del viento	Puertos del Estado	Horaria	1997	2004	Chipiona
Dirección del viento	Puertos del Estado	Horaria	1997	2004	Chipiona
Presión atmosférica	INM	4 registros diarios	1992	2004	Rota

Tabla 2. DATOS UTILIZADOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO.

### 4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La variable fundamental en el estudio de la variabilidad del nivel del mar es denominada por Puertos del Estado como *marea meteorológica*, y se define como la diferencia entre el nivel del mar esperado por causas exclusivamente astronómicas y el nivel del mar registrado por el mareógrafo ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)). Esta variable muestra la componente estocástica del nivel del mar para un momento determinado. Como demostraremos más adelante, ese término nos resulta impreciso, puesto que atribuye a la componente aleatoria causas exclusivamente meteorológicas, cuando influyen otras variables. Por esta razón, denominaremos a estos registros residuo no mareal.

## LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y EL VIENTO EN LA VARIABILIDAD DEL NIVEL DEL MAR EN EL MAREÓGRAFO DE BONANZA (CÁDIZ)

Para caracterizar la influencia de la presión atmosférica y del viento en la variabilidad del nivel del mar en el mareógrafo de Bonanza se ha utilizado el análisis de regresión lineal, que permite i) generar un modelo en el que se estiman los valores de una variable a partir de otra y ii) cuantificar su capacidad explicativa. El análisis de regresión lineal se ha realizado en distintas etapas sucesivas que intentan ir profundizando en el estudio de este fenómeno que se desarrollan a continuación.

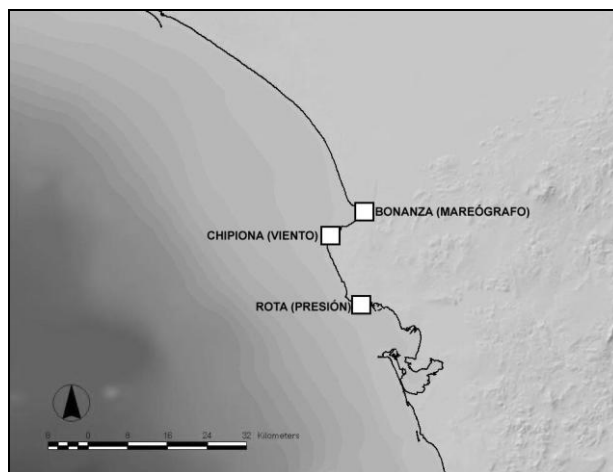


Fig. 2. Emplazamientos de las fuentes de información y plataforma continental.

### 4.1. Análisis del nivel del mar y la presión atmosférica

En primer lugar relacionaremos el nivel del mar, a través del residuo no mareal, solamente con la presión atmosférica, para intentar evaluar su influencia en la zona. Utilizaremos el periodo común que se extiende desde junio de 1992 hasta diciembre de 2002. Se eligió el registro diario de las 13 horas para evitar la influencia de brisas de carácter local, como podría suceder con los datos de las 7 horas (brisas del continente al océano) o de las 18 horas (vientos del océano al continente), y que podrían distorsionar el modelo al influir levemente en el nivel del mar.

En el diagrama de dispersión (figura 3) podemos apreciar cómo la pendiente de la recta, con un valor de  $-0,1137$ , que se corresponde con la tasa general de variación del nivel del mar con respecto a la presión atmosférica recogida en la literatura científica. Además, el valor del coeficiente de determinación muestra un porcentaje de varianza explicada muy elevado, un 38,95%, como era de esperar, pero que al mismo tiempo pone de manifiesto la influencia de otros factores. Debido al gran peso de los valores centrales de ambas variables, correspondientes a las condiciones atmosféricas habituales en la región, el modelo proporciona valores muy por debajo de los reales, cuando están asociados a presiones atmosféricas muy bajas.

La escasa precisión del modelo para los valores de nivel del mar que se producen con muy bajas presiones parece deberse a la influencia de otros factores, como el viento, que aumenta su importancia en situaciones extremas. Estos residuos tan elevados es posible que se correspondan con situaciones sinópticas que originen con vientos muy fuertes como los que se producen con la llegada de perturbaciones frontales al Golfo de Cádiz.

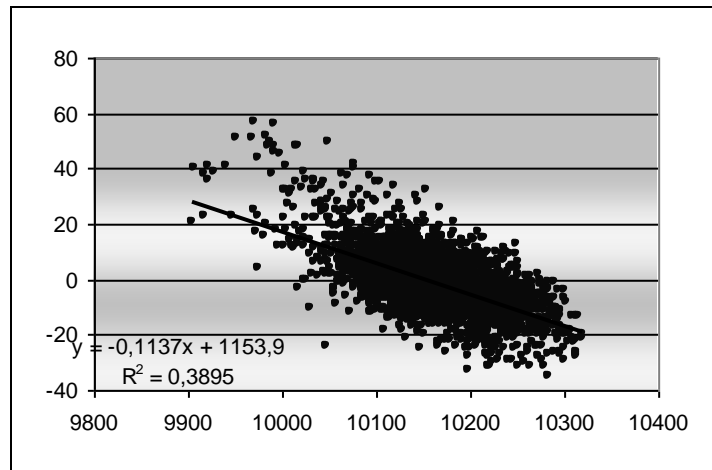


Fig. 3. Diagrama de dispersión y ecuación de la recta de regresión entre la presión atmosférica (décimas de hPa) y el residuo no mareal (cm).

#### 4.2. Análisis del nivel del mar y la presión atmosférica en las distintas direcciones del viento

En esta etapa, realizaremos un análisis más detallado incorporando la influencia del viento sobre el modelo. Los registros fueron clasificados en 16 grupos en función de las direcciones de viento con las variables residuo no mareal, presión atmosférica y velocidad del viento. Se calcularon los modelos de regresión lineal simple relacionando la presión atmosférica y el nivel del mar en cada una de las direcciones cuyos resultados aparecen resumidos en la figura 4.

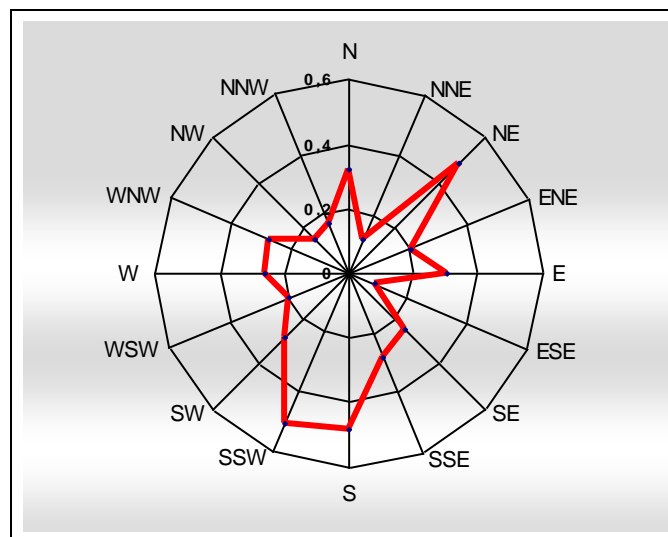


Fig. 4. Valor del coeficiente de determinación en la relación presión / nivel del mar por direcciones de viento.

Podemos apreciar cómo en condiciones de viento de componente S y SW los modelos de regresión lineal simple explican más del 50% de la variabilidad del nivel del mar. Este resultado supone un importante aumento de la variabilidad explicada en conjunto,

y sorprende por cuanto estas situaciones están asociadas tanto a perturbaciones frontales como a situaciones anticiclónicas, posiblemente a causa de un mayor rango en los datos introducidos para la generación del modelo. Por el contrario, los valores más bajos se obtienen en condiciones de viento de componente ESE, WNW y NW, paralelos a la dirección de la costa.

Con vientos del tercer cuadrante, los habituales tanto en períodos de estabilidad atmosférica como en los de perturbaciones frontales, existe una estrecha relación entre el nivel del mar, la presión atmosférica y el propio viento. Sin embargo, cuando los vientos proceden del segundo y cuarto cuadrantes deben ser otros los factores con mayor capacidad explicativa que la presión atmosférica.

#### 4.3. Análisis del nivel del mar y la velocidad del viento en sus distintas direcciones

En esta fase, queremos relacionar el nivel del mar y la velocidad del viento, en función de las diferentes direcciones, mediante un análisis de regresión lineal simple. Al igual que en el apartado anterior, se distinguieron los 16 grupos clasificados en función de la dirección del viento. En este caso, los valores del coeficiente de determinación obtenidos para cada modelo son ostensiblemente inferiores a los obtenidos en la relación de la presión y el nivel del mar (figura 5).

En la mayoría de las direcciones de viento elegidas, los valores de este coeficiente son nulos. Sin embargo, los valores obtenidos en las direcciones del cuadrante SW – SSE superan un 12% que, a pesar de no ser muy elevado, resulta significativo por el hecho de que únicamente en estas cuatro direcciones continuas -de SW a SSE- y corresponden con aquellas situaciones en las que el viento sopla en perpendicular a la línea de costa.

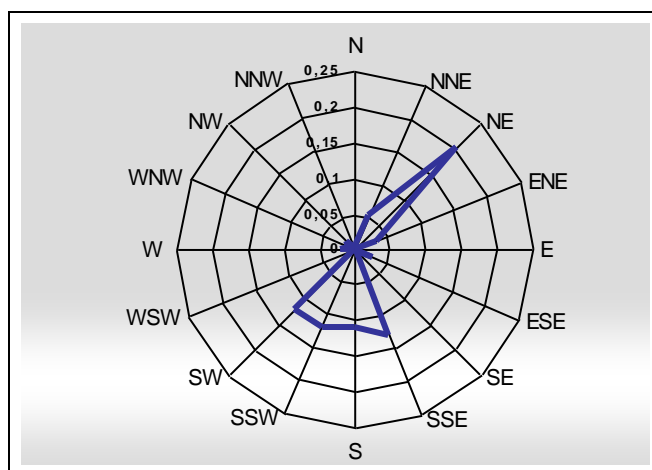


Fig. 5. Valor del coeficiente de determinación en las rectas de regresión lineal de viento y residuo no mareal.

Este análisis de regresión también permite distinguir el sentido e intensidad de las tasas de variación del nivel del mar con respecto a la velocidad del viento para cada una de las direcciones (figura 6).

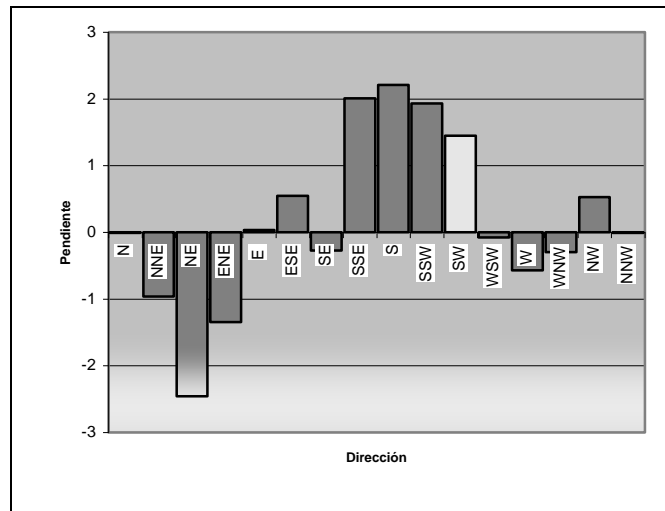


Fig. 6. Pendientes de las rectas de regresión lineal del residuo no mareal y la velocidad del viento.

La pendiente es positiva en el cuadrante SW, negativo en el cuadrante NE y nula en los cuadrantes NW y SE, tal y como cabe esperar teniendo en cuenta la orientación de la línea de costa. En torno a la dirección perpendicular a la costa (correspondientes al primer y tercer cuadrante), las pendientes son mayores en valores absolutos, y el signo depende del sentido del viento (figura 6).

Los vientos procedentes del segundo y cuarto cuadrante no parecen influir en modificaciones del nivel del mar debido a que soplan paralelos a la costa, sin que se generen acumulaciones de agua, con lo que los signos de la pendiente no pueden explicarse por causas geográficas.

#### 4.4. Análisis del nivel del mar durante por rachas de viento

Por último, se analizó la relación entre el residuo no mareal, la presión atmosférica y la velocidad del viento en rachas de viento procedentes del tercer cuadrante en el que los resultados han sido más relevantes. En teoría, cuanto prolongada e intensa sea una racha de viento proviene de una dirección perpendicular a la línea de costa, mayor será la subida del nivel del mar, debido al efecto de desplazamiento y apilamiento de la masa de agua transportada. Si a esto sumamos la extensa amplitud de la plataforma continental de nuestro ámbito de estudio, se dificulta aún más la evacuación del agua acumulada.

Por ello, se han seleccionado las rachas de más de 24 horas de duración procedentes del cuadrante SW-SSE. Se han elegido como variables el valor del residuo no mareal y el de la presión atmosférica registrados en la última hora de la racha de viento, y por otra parte, la velocidad media del viento registrada durante la racha. Se obtuvo una serie de 78 registros de valor de nivel del mar, presión y viento asociados a direcciones de viento particularmente estables y provenientes del cuadrante SW-SSE.

Al realizar un análisis de regresión lineal múltiple con el nivel del mar como variable dependiente, y la presión atmosférica, velocidad media del viento y duración de la racha



de viento como independientes, se obtiene un valor del coeficiente de determinación múltiple de un 56,7%. Esto nos indica que en condiciones de permanencia en la dirección del viento, la componente atmosférica explica un parte muy importante de los valores del nivel del mar y de su variabilidad.

## 5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en este estudio fueron las siguientes:

- La relación entre la presión atmosférica y el nivel del mar en el mareógrafo de Bonanza explica en torno a un 40% de la variabilidad de éste, debido a la estabilidad de la preponderancia de determinadas situaciones sinópticas. Esta relación es aún más fuerte en situaciones de viento del cuadrante SW, especialmente durante rachas sostenidas de más de 24 horas, cuando llega a explicar más del 55% de la variabilidad del nivel del mar.
- La velocidad del viento sólo es capaz de explicar un 10% de la variabilidad del nivel del mar cuando procede del tercer cuadrante. Tan sólo en situaciones de alta estabilidad en la dirección del viento puede suponer un 25%. Cuando el viento sopla con componentes paralelas a la costa (NW o SE), no se aprecian, mediante los modelos de regresión lineal realizados, ningún efecto sobre el nivel del mar.
- Todos estos análisis confirman y cuantifican el comportamiento del nivel del mar esperable en la zona y corroboran las explicaciones debidas a factores geográficos y de circulación atmosférica en la variabilidad espacial y temporal de esta variable.
- Será importante en futuros avances de esta línea de investigación analizar la influencia no sólo de variables oceanográficas (temperatura, densidad, corrientes...), sino también de la influencia de las avenidas fluviales del río Guadalquivir. Es probable que en los episodios de fuertes temporales hagan coincidir en esta zona condiciones extremas de viento con importantes avenidas fluviales, por lo que para futuros trabajos debería ser una de las variables tenidas en cuenta en la modelización del nivel del mar.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a D. Ismael Vallejo (Universidad de Sevilla) por su contribución en el estudio del viento y a D<sup>a</sup> Noela Sánchez (Universidad de A Coruña) los comentarios hechos a este trabajo.

## 7. REFERENCIAS

FRAILE, P. (2005). *Niveles medios y máximos del mar en los mareógrafos de la costa andaluza*, Tesina, Departamento de Geografía Física, Universidad de Sevilla, sin publicar.

- MÉNDEZ, F., y otros (2004). *Estudio de los impactos en la costa española por efecto del cambio climático*, IV Congreso de la Asociación Española de Climatología.
- MÉNÉNDEZ, F., y otros (2004). *Variaciones del régimen extremal del clima marítimo en el litoral español en el período 1958-2001*, IV Congreso de la Asociación Española de Climatología.
- OJEDA, J., (1988). *Aplicaciones de la Teledetección espacial al estudio de la dinámica litoral (Huelva): Geomorfología y Ordenación Litoral*, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- PITA LÓPEZ, M. F. (2003). *El clima de Andalucía*, en LÓPEZ ONTIVEROS, A. (coord.). *Geografía de Andalucía*, Ariel Geografía.
- PUERTOS DEL ESTADO (2005). *Información climática de nivel del mar. Mareógrafo de Bonanza*, Ministerio de Fomento.
- PUGH, D. (2004). *Changing Sea Levels*, Cambridge University Press.
- TEJEDOR MARTÍNEZ, L., y BRUNO MEJÍAS, M. (1996). *Niveles del mar en la Bahía de Cádiz*, en *Estudios para la Ordenación, Planificación y Gestión Integrada de las Zonas Húmedas de la Bahía de Cádiz*, Barcelona, Oikos Tau.
- TITUS, J., y NARAYANAN, V. (1995). *The probability of sea level rise*, EPA, Washington.
- YANAGI, T., y AKAKI, T. (1994). "Sea Level Variation in the Eastern Asia", *Journal of Oceanography*, vol 50, pp. 643-651.