

## **VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y MORFOLOGÍA DEL LITORAL ANDALUZ**

### ***CLIMATIC VARIABILITY AND MORPHOLOGY OF THE ANDALUSIAN COAST***

**Juan M. Santiago**  
**Miguel A. Losada**  
**Elena Sánchez-Badorrey**  
**Asunción Baquerizo**  
**Miguel Ortega**  
**Alberto Ávila**

*Centro Andaluz de Medio Ambiente, Universidad de Granada, Av. del Mediterráneo  
s/n 18006  
Granada, España.  
e-mail:*

[\*santi@ugr.es\*](mailto:santi@ugr.es)

[\*mlosada@ugr.es\*](mailto:mlosada@ugr.es)

[\*elenasb@ugr.es\*](mailto:elenasb@ugr.es)

[\*abaqueri@ugr.es\*](mailto:abaqueri@ugr.es)

[\*miguelos@ugr.es\*](mailto:miguelos@ugr.es)

[\*aavilaa@correo.ugr.es\*](mailto:aavilaa@correo.ugr.es)

## **RESUMEN**

Este trabajo revisa y analiza la evolución de costas en el litoral andaluz a la luz de tres factores: variabilidad climática, morfología litoral y respuesta morfológica a los diferentes forzamientos y la disponibilidad de sedimento. Desde hace más de cien años, y así continuará en los próximos trescientos, el nivel del mar está ascendiendo tras el periodo de descenso que se extendió desde los siglos XII a XVIII. Esta subida provocará el desmantelamiento de las estructuras morfológicas litorales generadas durante el ciclo de descenso entre el Máximo Medieval y la Pequeña Edad de Hielo de principios del XVIII. Este proceso, actualmente en fase intermedia, entrará en este siglo en la fase definitiva con consecuencias dramáticas para los desarrollos urbanos realizados sobre los cordones litorales, estuarios y formaciones deltaicas. Aproximadamente, la mitad del litoral andaluz está formado por estructuras sedimentarias acumulativas desarrolladas durante el último descenso del nivel del mar.

## **ABSTRACT**

This work checks and analyzes and the evolution of coasts in the Andalusian littoral in the light of three factors: climatic variability, coastal morphology and morphologic response to the different forcings and the availability of sediment. For more than hundred years, and this way will continue in the next ones three hundred, the sea level is ascending after the period of decrease that spreads from XIIth to XVIIIth century. This raise will provoke the dismantlement of the morphologic coastal structures generated during the cycle of decrease between the Medieval Maximum and the Little Age Ice in the beginning of the XVIIIth. This process, nowadays in intermediate phase, will enter in this century the definitive phase with dramatic consequences for the urban developments realized on the coastal dune lines, estuaries and deltaic formations. Approximately, half of the Andalusian littoral is formed by sedimentary accumulative structures developed during the last decrease of the sea level.

## **UN RÉSUMÉ**

Ce travail revise et analyse l'évolution des côtes du littoral andalou à la lumière de trois facteurs: variabilité climatique, morphologie littorale et réponse morphologique à différents forçements et la disponibilité du sédiment. Depuis plus de cent ans, et ainsi il continuera dans les proches trois cents, le niveau de la mer monte après la période de descente qui s'est étendue dès les XIIe à XVIIIe siècles. Cette montée provoquera le démantèlement des structures morphologiques littorales engendrées durant le cycle de descente entre le Maximum Médiéval et le Petit Âge Glaciaire de principes du XVIIIe. Ce processus, actuellement dans une phase intermédiaire, entrera à ce siècle dans la phase définitive avec des conséquences dramatiques pour les déroulements urbains réalisés sur les cordons littoraux, les estuaires et les formations deltaïques. À peu près, la moitié du littoral andalou est formée par des structures sédimentaires cumulatives développées durant la dernière descente du niveau de la mer.

## 1. Variabilidad Climática

Desde hace dos décadas se está trabajando intensamente en el denominado "cambio climático", entendido como un calentamiento desordenado e incontrolado de la atmósfera terrestre debido a la acción del hombre y por tanto de escala corta, es decir del orden de décadas. Este calentamiento estaría provocando un ascenso monótonamente creciente del nivel del mar.

Sin embargo esta visión no está relacionada con los ciclos que de forma natural se han ido produciendo en la evolución de la Tierra, y menos aún con los ciclos que se han tenido lugar durante el Holoceno. Para establecer la secuencia correcta de evolución climática ha de tenerse en cuenta la evolución global del clima, fundamentalmente en su faceta holocena.

Desde el último mínimo térmico, aproximadamente 13.000 años a.C., la temperatura global ha ascendido progresivamente unos 8 -10º Celsius hasta alcanzar, alrededor del 7.000 a.C., una cota similar a la actual. Los últimos hielos se retiraron de Centro Europa hace unos doce mil años.

Desde el año 7000 a.d.C., incluyendo los 2.000 que llegan hasta nuestros días, la temperatura en la tierra permanece esencialmente estable con fluctuaciones o variaciones térmicas alrededor de una temperatura media ligeramente superior a la actual y alternando ciclos fríos y cálidos (pulsos) con un periodo de unos 1.100 años. Durante este periodo, la amplitud de las variaciones de la temperatura en la Tierra (alrededor de ese valor medio) ha estado acotada en un intervalo del orden del 25% de salto térmico ocurrido entre la transgresión flandiense y hoy en día (es decir, del orden de  $\pm 2.5$  °C).

En consecuencia, el pronóstico más plausible es que en la actualidad el planeta se está calentando, independientemente de la actividad humana y que, como se analiza más adelante este proceso continuará unos trescientos años más (Santiago, 2006).

## 2. Oscilaciones del nivel del mar en el período de estabilidad térmica

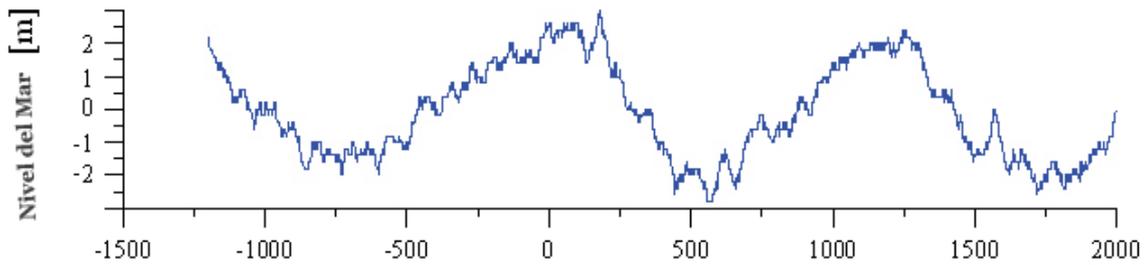
Las variaciones del nivel del mar en una región se puede deber, principalmente, a tres causas: isostática, tectónica y eustática. En Europa, la primera se produce en latitudes superiores al paralelo 50. La segunda se considera estática en la escala de este trabajo. Es el nivel eustático del mar el que está estrechamente ligado a la variabilidad climática. El término eustático indica que se trata de la cota asociada con el volumen total y temperatura del agua en los océanos, discriminando variaciones de menor magnitud y permanencia, como son las mareas.

A la luz del calentamiento actual, no parece cuestionable la subida del nivel del mar en un plazo medio. El objeto de controversia está en su magnitud y en la posibilidad de que sufra alteraciones, de temporalidad corta, que en la escala de la vida humana sean consideradas como significativas.

En el periodo que va del 13.000 al 9.000 a.C. el nivel del mar subió aproximadamente de 120 a 150 m. En el periodo de estabilización, las oscilaciones térmicas produjeron elevaciones medias de entre 3 y 5 m.

Sin embargo, en estos últimos 9000 años el nivel del mar además de oscilar con los periodos de los 1.100 años (Santiago et al. 2007), también lo hace con oscilaciones que se pueden ordenar en ciclos de amplitud variable:

- (2) intermedia, con periodo del orden de los 90-110 años (seculares)
- (3) corta, con periodos del orden de los 11 y 22 años de amplitud (décadas)



**Figura 1.** Propuesta de variación del nivel del mar incluyendo los ciclos seculares

El origen de estas oscilaciones podría estar relacionado con el papel de la circulación oceánica (por viento, marea astronómica y gradientes de salinidad y temperatura) como redistribuidor de los gradientes térmicos atmosféricos y con los ciclos de las manchas solares y su influencia en las variabilidades secular e hiperanual de la radiación solar. De los datos disponibles se puede admitir que la amplitud de estas oscilaciones no ha superado el 5% de la amplitud de la transgresión flandiense.

### **3. Los ciclos largos en la historia de las civilizaciones**

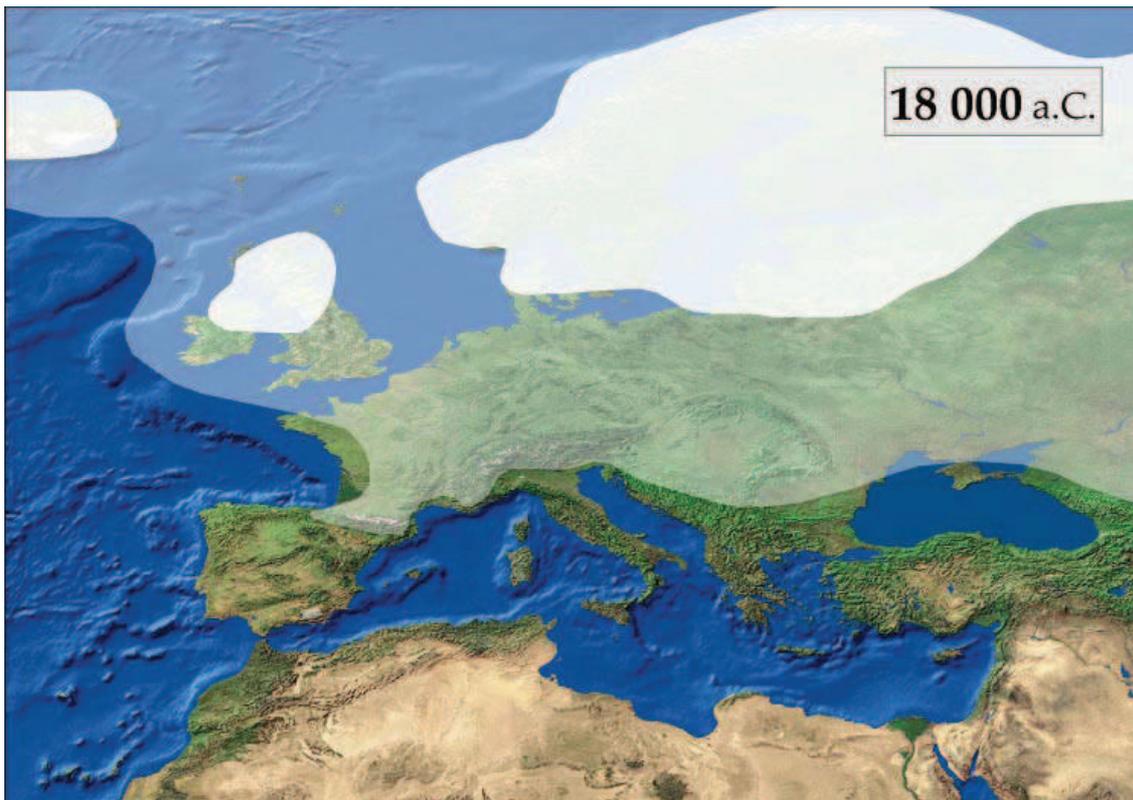
El clima a lo largo de la historia ha sido un condicionante de primer orden de la evolución del hombre sobre el planeta. Las oscilaciones climáticas han influido en el comportamiento de las sucesivas culturas. Se puede conjeturar que una civilización se desarrolla siempre que tenga control sobre las cosechas anuales durante un período de tiempo suficiente y su crecimiento es función del territorio que logre dominar. Es evidente que el auge o declive no puede ser atribuido en exclusiva a este hecho. Son muchos los elementos, unos azarosos y otros determinados, que puede considerarse que influyen.

Pero no deja de ser cierto que existe una determinada correlación entre el clima, el sustento y la capacidad de producir sistemas autoorganizados que son capaces de considerar la experimentación y la retroalimentación como elementos de conocimiento y perfeccionamiento.

La consecución de la cosecha facilita el desarrollo de una parte de la población dedicada a otras tareas, no relacionadas con la mera subsistencia, con lo que la organización se vuelve más compleja y provoca "estrés" social, con el consiguiente incremento de la necesidad de posesión, la guerra como medio de conquistas y extensión del territorio y el control de ríos y costas. Alcanzado un determinado nivel surgen otro tipo de manifestaciones como son las culturales.

Relacionado con el clima, la variación media del nivel del mar, que incluye todas las periodicidades observadas por Fairbridge (1962) en su modelo oscilante, ha sido determinante en la ubicación física y en el devenir de dichas civilizaciones, observadas por Santiago (2006) a partir de datos históricos y socioeconómicos.

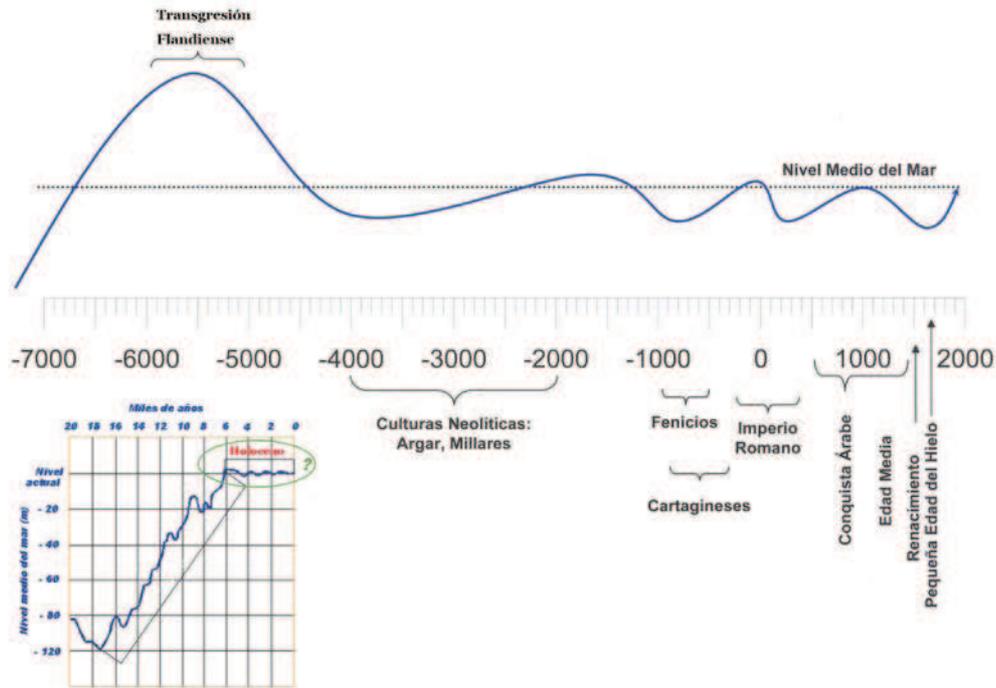
Hacia el 13.000 a. P., en la Edad del Hielo, los casquetes polares tenían una dimensión tres veces superior a la actual con lo que la zona templada, ideal para el desarrollo de la vida, habría de situarse al sur del Desierto del Sahara y en el oriente medio. Allí fue donde se dieron condiciones que permitieron el inicio de la rápida evolución del ser humano.



**Figura 2.** Extensión de los casquetes polares y la zona fría en Europa

El retroceso progresivo y constante de esos hielos en una recta de pendiente prácticamente uniforme hasta aproximadamente el 9000 a. P. hizo subir el nivel del mar desde los -120 m hasta el nivel actual. En esta época se considera que el Sahara se convierte en desierto. Hacia el norte del mismo se desplazó la zona templada, permitiendo el desarrollo de las primeras civilizaciones: en el sur de Mesopotamia, en Egipto, en el Valle del Indo. Son las dos primeras las denominadas culturas "muertas", a partir de las cuales se desarrolló la civilización occidental.

A partir de la estabilización y en particular desde 1.000 años a. de C. se puede rastrear el ritmo oscilatorio del clima en la Tierra en función de la ubicación y del trasiego de los imperios desde el norte de África, al norte de la cuenca Mediterránea, hasta llegar a Centroeuropa.

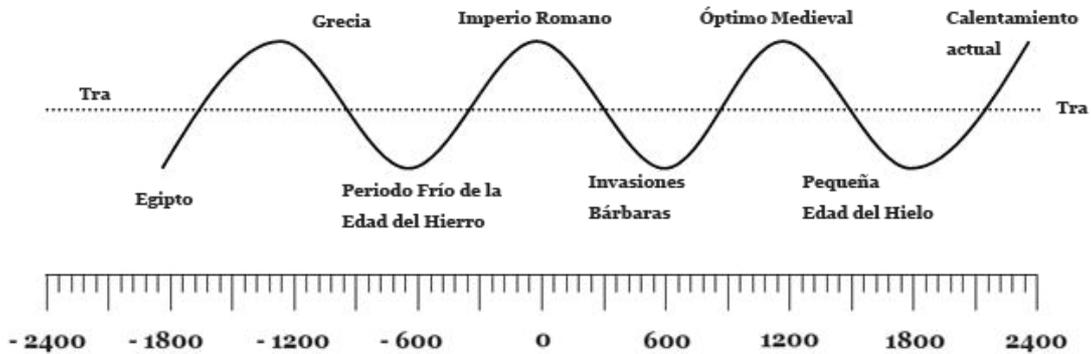


**Figura 3.** Evolución del nivel medio del mar durante el Holoceno

El desplazamiento de los hielos hacia el norte sitúa el nivel del mar aproximadamente en la cota -2,5, y la zona templada en el sur de Europa, dando como resultado el inicio del desarrollo de la civilización griega (alrededor de 1.100 a. P.). Por el contrario la llegada de los fenicios al sur de la península ibérica en el 700 a.C. coincide con el periodo frío de la Edad del Hierro.

El dominio cartaginés coincide con este desplazamiento de la zona fría hacia el sur, y el desarrollo de todo el norte de África: Cartago como ciudad emblemática que dio nombre al imperio y el sur de la península ibérica. Las costas andaluzas son lugar profuso de asentamientos: Cádiz, Málaga, Almería y Granada.

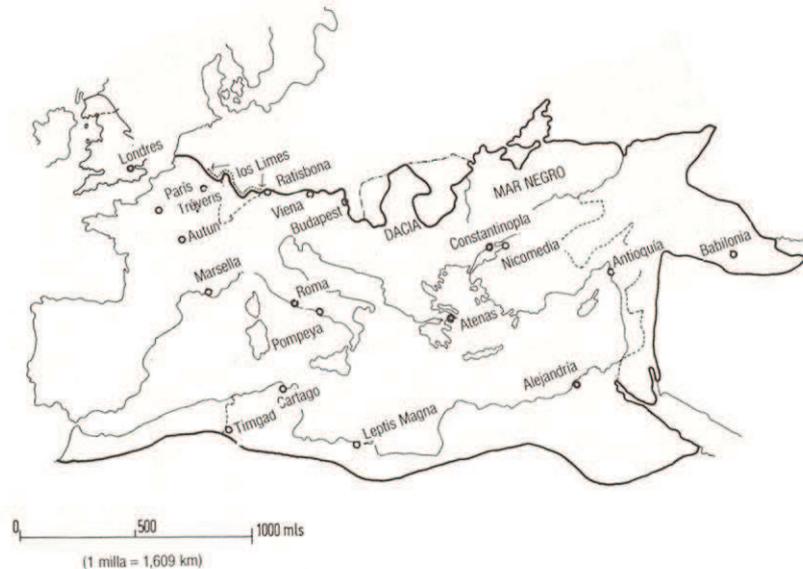
El retroceso de los hielos volverá a desplazar la zona templada hacia el norte de la cuenca Mediterránea. Es el período de desarrollo de la civilización romana. El nivel del mar pudo estar entre 2,5 y 3 m por encima del actual.



**Figura 4.** Esquema de evolución de la temperatura en los ciclos milenarios

Con un poderío sin parangón a lo largo de la historia, si se observa con detenimiento la extensión máxima del imperio romano puede apreciarse su

correspondencia con una zona climática templada, fuera de la cual las condiciones de vida eran muy poco favorables.



**Figura 5.** Extensión máxima del Imperio Romano

En las postrimerías del siglo III, el enfriamiento de la zona norte de Europa, y Asia pudiera ser el motor de las migraciones de los pueblos bárbaros de las estepas siberianas hasta el interior del imperio romano. Por lo que a la Europa meridional se refiere coincide con el inicio de la bajada de los pueblos germánicos hacia el sur, provocando la caída del Imperio Romano.

Continuando la alteración en el equilibrio del nivel del mar, el aumento del frío y de los hielos supuso el descenso de la zona denominada templada de nuevo hacia las riberas del sur de la cuenca Mediterránea. Todo el norte de África debió ser una zona templada y fértil. A menor escala se puede considerar una oscilación de sentido contrario, a lo que había sido habitual de retroceso de los hielos a escala intermedia. En este periodo se inicia el dominio árabe. En Europa la vida urbana sigue decayendo hasta llegar a su punto más bajo a finales del siglo IX. Se interrumpe el comercio y la economía de intercambio es sustituida por una economía de consumo y subsistencia. Por el contrario las ciudades más florecientes de la época, cultural, económica y políticamente, se sitúan en el sur de la península ibérica (Córdoba) y oriente medio, concretamente en Siria (Damasco), con una latitud parecida.

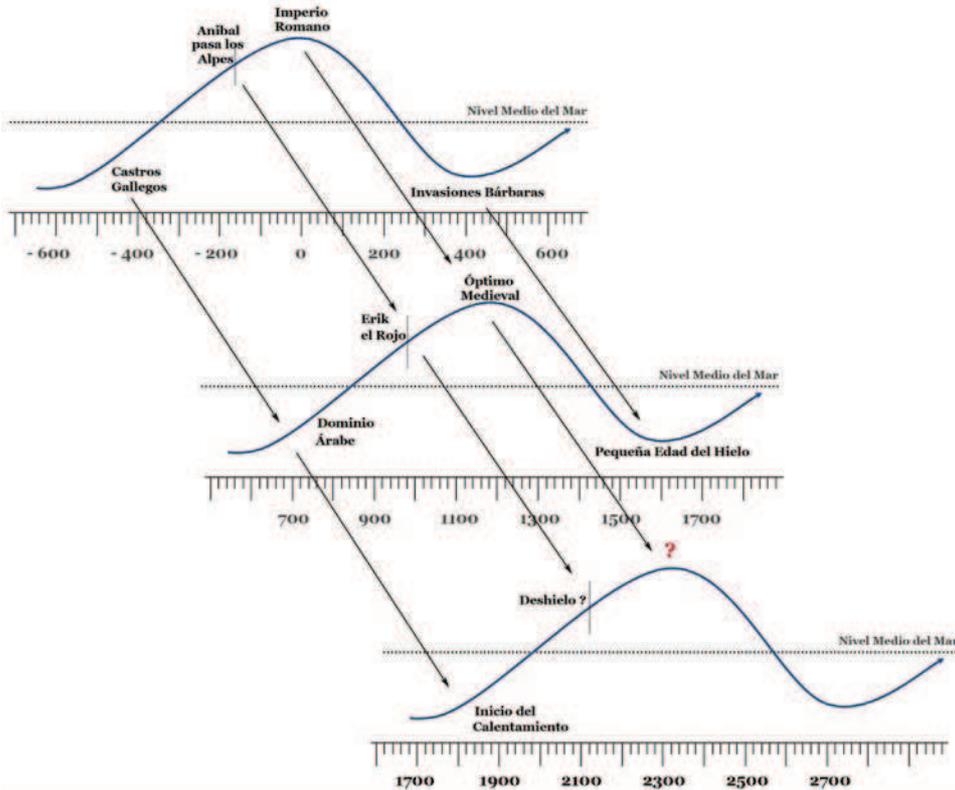
El Pequeño Óptimo Climático (que tiene su momento álgido alrededor del siglo XIII) se caracteriza por el inicio del resurgimiento cultural en la península itálica y su extensión al resto de Europa, en un periodo de máxima actividad.

El cambio de ciclo y la nueva fluctuación hacia el sur supone el desarrollo del Imperio Español. Los distintos reinos peninsulares se fueron uniendo hasta 1492 en que el descubrimiento de América va a suponer el dominio ibérico a lo ancho del mundo. Este proceso de enfriamiento alcanza el punto mínimo alrededor de 1700-1750 y se denominó la Pequeña Edad de Hielo.

En 1840 se inicia un período climático denominado Cálido relativo, que es considerado como inicio del calentamiento actual.

La existencia de estos ciclos largos en los últimos 5.000 años queda corroborada por: la sucesión de ciclos históricos, el desarrollo de las civilizaciones occidentales y la ocupación del territorio; los datos de evolución de la temperatura por diferentes técnicas y las variaciones del nivel del mar en ese periodo debidamente contrastadas, que han permitido identificar los siguientes hitos del nivel del mar de ciclo largo:

- (1) 700-650 a.d.C: Iniciada la edad de Hierro; frío y nivel inferior al actual (-1m?)
  - (2) 100-50 a.d.C: Inicio época romano; cálido y nivel superior del actual (+2.5 a 3 m)
  - (3) 500-550: Tras la crisis del siglo III; frío y nivel por debajo del actual. (-1m)
  - (4) 1100-1150: Milagro siglo XII; cálido y nivel superior al actual (2.5 a 3m)
  - (5) 1700-1750: Pequeña edad de hielo; frío y nivel por debajo del actual (-1m)
  - (6) 2300 aprox. cálido y nivel del mar superior al actual (2.5 a 3m ?)
- que pueden a su vez reflejarse en la siguiente figura:



**Figura 6.** Ciclo de evolución del nivel medio del mar y algunos hitos históricos relevantes

#### 4. Morfología y evolución del Litoral andaluz

A los efectos de los estudios de evolución de la costa andaluza ocurrida durante los últimos 13.000 años, es conveniente distinguir dos fases temporales dependiendo de la influencia del comportamiento del ascenso del nivel:

- (1) Ascenso rápido hasta llegar a la tradicionalmente denominada transgresión flandiense (9.000 a.P) con pulsaciones "violentas".
- (3) Del 9.000 a.P. a la actualidad: estabilización y comportamiento oscilatorio (oscilaciones de corto, medio y largo periodo)

##### 4.1. Hipótesis tradicional de la evolución de la costa

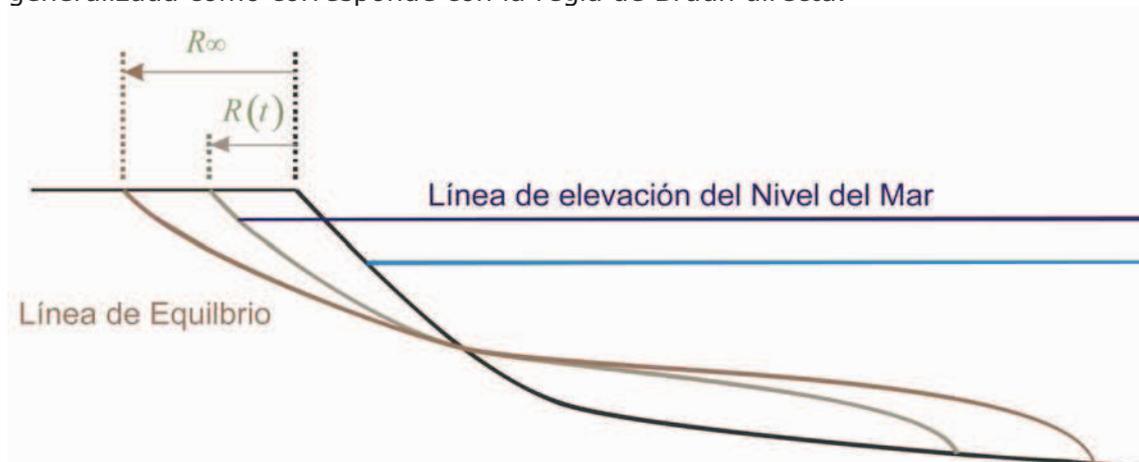
Tradicionalmente se ha supuesto que la morfología actual de la costa se debe a la subida rápida de la transgresión flandiense (primera fase temporal) y a la acción de la dinámica marina, con un nivel del mar esencialmente constante o ligeramente ascendente. De acuerdo con este esquema, en ausencia de isostasia, la costa de acantilados y sus playas de pie, los cordones litorales y playas están en regresión o estabilizadas si hay aporte de sedimentos suficiente para, al menos compensar, la

subida del nivel del mar y los deltas fluviales y los estuarios, si no existe déficit de aportación fluvial, son progradantes.

Esta hipótesis de trabajo conduce a que la secuencia temporal de barras y flechas encontrada en un estuario debe ser coincidente con su disposición espacial: las formas más antiguas están en la cabecera del estuario y las más jóvenes se ubican en las proximidades de la costa actual. Las playas tanto de pie como de barrera están en la ubicación que le corresponda según la alineación general de la costa que, depende de la resultante anual media del régimen de oleaje.

#### 4.2. Nuevas hipótesis sobre la evolución de la costa

Sin embargo, la variabilidad del nivel del mar que se ha descrito en los apartados anteriores, cambia algunas de las conclusiones anteriores. A la luz de las informaciones recogidas sobre las variaciones del nivel del mar, el esquema clásico de evolución debe estar modulado por las oscilaciones sucesivas del nivel del mar y durante los periodos cálidos en los que el nivel del mar estaba más alto, los estuarios experimentaron un rejuvenecimiento y la línea de costa una erosión generalizada como corresponde con la regla de Bruun directa.



**Figura 7.** Variación de la línea de costa en función del nivel del mar (Basado en Bruun (1962) Kriebel y Dean (1993))

Durante los periodos fríos, con el consiguiente descenso del nivel del mar los cauces fluviales progresaron hacia el mar, excavaron sus lechos, la línea de costa avanzó y la nueva alineación marcó la posición de los cordones litorales y playas. La formación de estos últimos se explica por la regla de Bruun inversa, en la que los materiales necesarios para su formación se obtienen de la erosión del perfil sumergido en vez de la erosión de la costa. Un resultado general es que,

- (1) En las costas planas de material suelto, se produce la erosión del perfil sumergido, y la acumulación en la zona emergida formando barreras litorales.
- (2) En los estuarios avanza la sedimentación, se desarrolla la playa barrera, se colmatan las marismas y se ciegan y se echan a pasto las partes altas de los estuarios.

Así, con el último descenso del nivel del mar entre el siglo XII y el XIX, se consolidó una parte importante del litoral andaluz que se puede observar en la actualidad entre la desembocadura del Guadiana y Tarifa. Los estuarios se progradaron, se consolidaron el acantilado, las flechas y playas barrera y los cordones litorales dejaron tras ellos importantes lagunas litorales que hoy en día han sido rellenadas y consolidadas urbanísticamente con las siguientes **consecuencias esperables con la subida del nivel del mar.**

La estimación más plausible es que en este siglo el nivel del mar ascenderá aproximadamente un metro y la línea de costa del litoral occidental andaluz, (si no se aporta material), retrocederá siguiendo la regla de Bruun directa. La mayor parte del litoral formado en el ciclo frío anterior, será sobrepasado, erosionado o trasladado hacia tierra. Este proceso continuará hasta el 2.300 donde el nivel del mar deberá ascender del orden de 2 a 3 m. Lugares como Punta Umbría, Matalascañas, Antilla, Isla Cristina e Isla Canela se verán sometidas a la capacidad erosiva de las olas y deberán protegerse si se desea mantener su posición.

En la actualidad se está en estos momentos elaborando los mapas de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo del litoral andaluz como consecuencia del ascenso del nivel del mar durante este siglo en función de su morfología, tendencia evolutiva y grado de ocupación.

## 5. Bibliografía

- Brunn, P. 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion, *Journal of Waterways Harbours Division.*, ASCE, 88, 117-130.
- Fairbridge, R.W. 1962. World sea level and climatic changes, *Quaternaria*, 111-34.
- Kriebel, D., and R. Dean. 1993. Convolution Method for Time-Dependent Beach-Profile Response, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean engineering*, 119(2), 204-226.
- Santiago, J.M. (2006). Evolución Ambiental y Socioeconómica como Fundamento de la Ordenación del Litoral. Ph.D. Thesis. Universidad de Granada. 310 pp. (En español).
- Santiago, J.M., Baquerizo, A., Ávila, A. y Losada M. A., (2007) Time Dependent Beach Profile Response To Climate Evolution *Proceedings of the 30th International Conference of Coastal Engineering* (En edición)