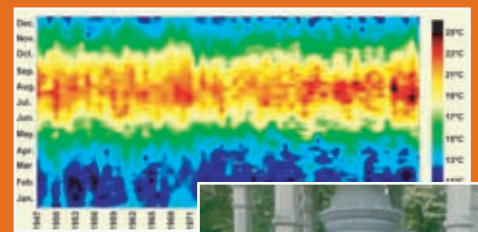


18(1)

Variaciones multidecadales notables en la temperatura atmosférica, temperatura superficial y nivel del mar en el sudeste del golfo de Vizcaya, detectadas mediante filtros “Kolmogorov-Zurbenko”



Manuel González
Almudena Fontán
Ganix Esnaola
Victoriano Valencia

González, M., Fontán, A., Esnaola, G. y Valencia, V. , 2011. Variaciones multidecadales notables en la temperatura atmosférica, temperatura superficial y nivel del mar en el sudeste del golfo de Vizcaya, detectadas mediante filtros “Kolmogorov-Zurbenko”. 17(8): 1-15.

La serie ‘*Revista de Investigación Marina*’, editada por la Unidad de Investigación Marina de Tecnalia, cuenta con el siguiente Comité Editorial:

Editor: Dr. Ángel Borja

Adjunta al Editor: Dña. Mercedes Fernández Monge e Irantzu Zubiaur (coordinación de las publicaciones)

Comité Editorial: Dr. Lorenzo Motos
Dr. Adolfo Uriarte
Dr. Michael Collins
Dr. Javier Franco
D. Julien Mader
Dña. Marina Santurtun
D. Victoriano Valencia
Dr. Xabier Irigoien
Dra. Arantza Murillas
Dr. Josu Santiago

La ‘*Revista de Investigación Marina*’ de Tecnalia edita y publica investigaciones y datos originales resultado de la Unidad de Investigación Marina de Tecnalia. Las propuestas de publicación deben ser enviadas al siguiente correo electrónico aborja@azti.es. Un comité de selección revisará las propuestas y sugerirá los cambios pertinentes antes de su aceptación definitiva.



Edición: 1.ª Enero 2011

© AZTI-Tecnalia

ISSN: 1988-818X

Unidad de Investigación Marina

Internet: www.azti.es

Edita: Unidad de Investigación Marina de Tecnalia

Herrera Kaia, Portualdea

20010 Pasaia

Foto portada: © AZTI-Tecnalia

Variaciones multidecadales notables en la temperatura atmosférica, temperatura superficial y nivel del mar en el sudeste del golfo de Vizcaya, detectadas mediante filtros “Kolmogorov-Zurbenko”

Manuel González^{1*}, Almudena Fontán¹, Ganix Esnaola¹, Victoriano Valencia¹

Resumen

En este trabajo se analizan series históricas de datos de temperatura y nivel del mar, aplicando la técnica de filtro Kolmogorov-Zurbenko (KZ), consistente en un algoritmo de medias móviles, y su variante adaptativa (KZA), mediante un software específicamente diseñado y validado para esta función. El filtro KZ es una alternativa no paramétrica de aplicación al estudio de tendencias en series de datos notablemente sencilla. El filtro KZA, no supone una complejidad algorítmica importante respecto al KZ, y es una técnica especialmente indicada para detectar alteraciones abruptas en la serie, que pueden ser naturales o debidas a errores instrumentales sistemáticos o cambios en los equipos. El software desarrollado se valida mediante series sintéticas generadas con números aleatorios y variabilidad estacional, a las que se añaden saltos arbitrarios y tendencias de variación lineal.

Los filtros KZ y KZA se han aplicado al análisis de la variabilidad multidecadal de la temperatura atmosférica de Igeldo (1928-2009) y Hondarribia (1971-2009), a la temperatura superficial del mar del Aquarium de San Sebastián (1947-2009), al nivel medio diario del mar en Saint Jean de Luz (1964-1997) y a la serie horaria de altura de marea en Santander (1943-2004).

Se han detectado variaciones multidecadales notables en todas las series analizadas. En la serie de temperatura superficial del mar del Aquarium se observan tres períodos, uno cálido antes de los años 70 (con una temperatura promedio entre 16,2 °C y 16,3 °C), un período frío entre los 70 y los 90 (con temperaturas promedio entre 15,7°C y 15,9 °C), y otro similar al primero entre los 90 y la actualidad. En la temperatura atmosférica (Igeldo y Hondarribia) se han localizado saltos de 1,2 °C en los valores promedio en los 80 y los 90. En la serie de nivel del mar de Santander se observa un incremento de unos 60 mm a finales de la década de los 60 y un período posterior de ascenso sensiblemente lineal. El nivel medio diario del mar en Saint Jean de Luz presenta dos fases de nivel constante separadas por un salto de 35 mm durante los años 80.

Abstract

In this study, long-term datasets of temperature and sea level are analysed, by using the Kolmogorov-Zurbenko filter (KZ) and its extension, the Kolmogorov-Zurbenko adaptive filter (KZA), with a software designed and validated for this purpose. The KZ filter is a relatively simple non-parametric method to study long-term trends. The KZA filter does not present a great complexity with respect the the KZ filter. In addition, this technique is specially designed to detect abrupt breaks in a time-series, induced by natural variability or by instrumental systematic errors, changes in the instrumentation, etc. The software developed has been validated with synthetic time-series of random numbers, by adding seasonal variability, arbitrary breaks and linear trends.

The KZ and KZA filters have been used to analyse the long-term variability of air temperature in Igeldo (1928-2009) and Hondarribia (1971-2009), sea surface temperature at the Aquarium of San Sebastián (1947-2009), and sea level datasets from Saint Jean de Luz (1964-1997) and Santander (1943-2004).

The time-series analysed reveal significant contribution of multidecadal variability. The Sea Surface Temperature series in the Aquarium of San Sebastian shows three clear periods: a warm period from 1947 to 1970, a cold period between the 70s and 90s and a warm period up to the present. The air temperature (Igeldo and Hondarribia) shows breaks of 1.2 °C, in relation to the average, in the 80s and 90s. The sea level series in Santander reveals an increase of 60 mm in the late 60s, followed by a linear decrease. Finally, the sea level time-series in Saint Jean de Luz shows an increase of 35 mm in the early 80s.

Palabras clave: Filtros Kolmogorov-Zurbenko, series temporales, temperatura atmosférica, SST, nivel del mar y golfo de Vizcaya.

Keywords: Kolmogorov-Zurbenko filters, time-series, air temperature, Sea Surface Temperature, sea level, Bay of Biscay.

¹ AZTI-Tecnalia; Marine Research Division
Herrera Kaia, Portualdea z/g; 20110 Pasaia; Spain,

* mgonzalez@azti.es

Introduction

El área de estudio se encuentra situada en el sudeste del golfo de Vizcaya, en la zona de cambio de orientación de este-oeste de la costa española y norte-sur de la costa francesa. En esta zona se registra una influencia de las condiciones climáticas terrestres y de los aportes de aguas continentales notablemente mayor que en zonas costeras más abiertas y menos continentalizadas (Valencia *et al.*, 2004).

La serie de datos de temperatura superficial del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián, iniciada en julio de 1946, es la serie de SST más larga en esta zona. Los análisis del período 1947-1997 (Borja *et al.*, 2000) han mostrado un ciclo de unos 20 años en las temperaturas medias, con un progresivo enfriamiento desde 1946 hasta finales de la década de los 70 y un posterior incremento. Para el período 1947-2008, la pendiente de la tendencia descendente detectada es pequeña (González *et al.*, 2010). Por el contrario, desde 1985 hasta 2007 se ha observado una fase de calentamiento con una pendiente superior a $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ (González *et al.*, 2008a).

Los datos de temperatura del aire en Igeldo y Hondarribia proceden de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Estudios previos de la serie de Igeldo (1928-2008) muestran un calentamiento de $0,008$ y $0,011\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ en la temperatura mínima y máxima, respectivamente (González *et al.*, 2008b, 2010). Sin embargo, desde mediados de la década de los 80 las pendientes de las tendencias son notablemente mayores: $0,019\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ en las máximas y $0,026\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ en las mínimas.

Las escalas de variabilidad espacial y temporal de los cambios del nivel del mar son del orden de decenas a centenas de kilómetros y de décadas, respectivamente (Pugh, 2004). Los datos disponibles para su análisis proceden fundamentalmente de mareógrafos y de satélite. Las medidas de satélite permiten análisis espaciales pero, la longitud de los registros es bastante limitada (e.g. TOPEX/POSEIDON desde 1992) frente a los registros de los mareógrafos (e.g. Brest desde mediados del siglo XIX o Estocolmo y San Francisco desde finales del siglo XIX).

Las variaciones del nivel medio del mar (denotado como MSL, por sus siglas en inglés) están asociadas a oscilaciones de la presión atmosférica, ciclos anuales y semianuales, cambios en los patrones circulatorios oceánicos (Woodworth, 1999, 2010) y procesos de escala multidecadal que incluyen cambios en el volumen del agua del mar (Pugh, 2004). Según Pugh (1987), las variaciones estacionales en latitudes medias se sitúan entre 40 y 70 mm, por ejemplo en Brest (Francia) la amplitud anual es de 48 mm y la semianual de 15 mm. Además de la variabilidad estacional, el ciclo nodal induce una componente de largo período (18,6 años de período) de amplitud 33 mm en Newlyn (Reino Unido) según Menéndez *et al.* (2009).

Según Araújo (2005), uno de los factores que mayor influencia tiene en la estimación de las tendencias del MSL son las oscilaciones de largo período. Las tendencias del MSL a largo plazo en el globo terrestre muestran una considerable

variación, debido a factores geológicos, entre otros, con valores promedio situados entre $1\text{-}2\text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ (Pugh, 2004). En la zona de estudio se han referido tendencias en el MSL en este rango o ligeramente superiores, tanto a partir de series instrumentales (e.g. Tel y García, 2001; Marcos *et al.*, 2005; Chust *et al.*, 2009, 2010) como con el estudio de registros fósiles (Leorri y Cearreta, 2009).

En este estudio, se han utilizado los datos horarios de la red mareográfica del Instituto Español de Oceanografía (IEO) en Santander y los datos diarios de la estación de Saint Jean de Luz pertenecientes al *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine* (SHOM).

El análisis de series de datos mediante medias móviles produce pequeños errores en el caso de oscilaciones complejas como la marea astronómica, al no considerar dentro de la ventana de promediado el ciclo completo de todas las ondas que intervienen. En la terminología al uso, este fenómeno se denomina “aliasing”. La contribución del “aliasing” a los cambios de nivel del mar en una serie promediada a 30 días es del 0,055% de la amplitud de la onda M2, del 0,267% de la amplitud de la onda K1 y del 0,401% de la amplitud de la onda O1 (Pugh, 1987).

El filtro Kolmogorov-Zurbenko (KZ) es una alternativa sencilla para el estudio de tendencias y consiste en una aplicación iterativa de la técnica de medias móviles (Zurbenko, *et al.*, 1996). Su variante adaptativa, el filtro KZA, no supone un aumento importante de la complejidad algorítmica, la cual tiene la ventaja de las aproximaciones no paramétricas, no requiriendo un modelo descriptivo de la variabilidad temporal de la serie (Yang y Zurbenko, 2010a); asimismo, es una técnica especialmente indicada para detectar alteraciones abruptas en la serie, que pueden ser naturales o debidas a errores instrumentales sistemáticos, cambios en los equipos de medición u otros factores.

En este trabajo se presenta un desarrollo numérico para el cálculo de los filtros KZ y KZA adaptado a largas series de datos (típicamente series de varios años de longitud con frecuencias de muestreo variables: diarias, horarias y minutarias). Se ha comprobado la capacidad del código para detectar saltos y tendencias en series sintéticas generadas con números aleatorios y variabilidad estacional, y se ha realizado el análisis de las series de datos de temperatura atmosférica de Igeldo y Hondarribia, la serie de temperatura superficial del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián, y las series de nivel del mar de Saint Jean de Luz y de Santander (ver localización de las estaciones en la Figura 1).

Datos

En la Figura 2 pueden verse las series de datos analizadas en este trabajo. Las series de temperatura atmosférica pertenecen a la AEMET y son las medidas del observatorio de Monte Igeldo de San Sebastián ($43^{\circ} 18' \text{ N}$, $02^{\circ} 02' \text{ O}$, y 252 m de altitud) y del observatorio de Hondarribia ($43^{\circ} 21' \text{ N}$, $01^{\circ} 47' \text{ O}$, y 8 m

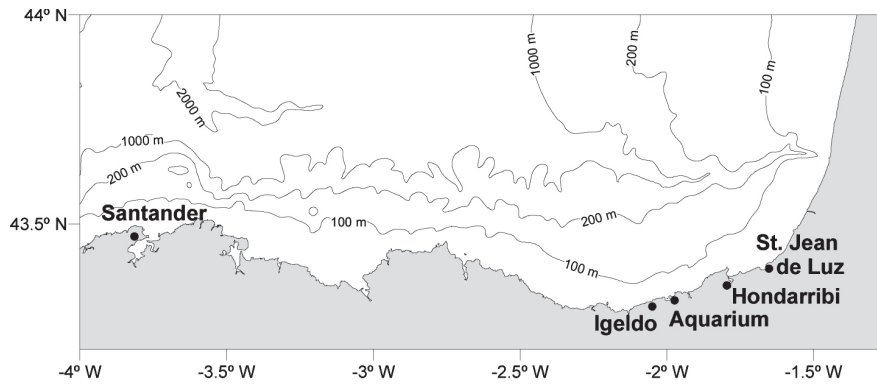


Figura 1. Localización de las series de datos analizadas. Temperatura atmosférica de Igeldo (1928-2009) y Hondarribia (1971-2009), temperatura superficial del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián (1947-2009), nivel medio diario del mar en Saint Jean de Luz (1964-1997) y serie horaria de altura de marea en Santander (1943-2004).

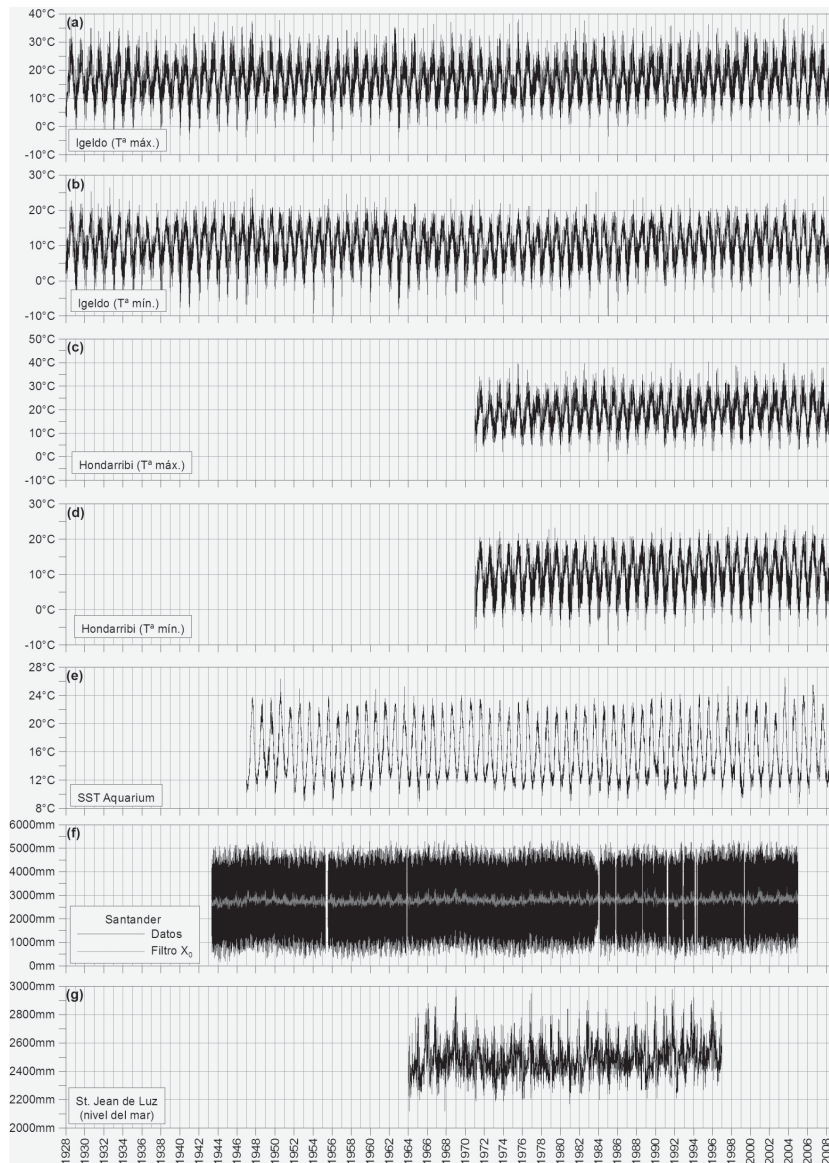


Figura 2. Series de datos analizadas: (a) temperatura máxima atmosférica diaria en Igeldo; (b) temperatura mínima atmosférica diaria en Igeldo; (c) temperatura máxima atmosférica diaria en Hondarribi; (d) temperatura mínima atmosférica diaria en Hondarribi; (e) temperatura superficial del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián; (f) nivel del mar horario en Santander (línea de color negro) y nivel medio del mar horario obtenido con el filtro X_c de Doodson (línea de color gris); y (g) nivel medio del mar diario en Saint Jean de Luz.

de altitud). En Igeldo se dispone de la temperatura máxima y mínima diaria desde el 2 de enero de 1928 hasta el 31 de diciembre de 2009; la serie está prácticamente completa, ya que únicamente no se dispone de información de la temperatura máxima en 116 días y de la mínima en 13 días (González *et al.*, 2008b). En Hondarribia los datos son también temperatura máxima y mínima diaria, y abarcan desde 1971 hasta 2009, en este caso sólo hay un hueco en las máximas y tres en las mínimas.

La serie de temperatura superficial del mar (SST) del Aquarium de Donostia-San Sebastián presenta importantes ausencias de datos (especialmente en el período entre 1967 y 1975), de modo que no se dispone de información en un 23% de la serie (González *et al.*, 2008a). Al igual que en trabajos precedentes (González *et al.*, 2010), para disponer de una serie completa los huecos se han rellenado mediante la técnica DINEOF (Álvarez-Azcárate *et al.*, 2005).

Los datos de marea de Santander son horarios desde 1943 hasta 2004, con más de 519.000 medidas y 23.000 huecos, lo cual supone una pérdida de información inferior al 5% del total. Con objeto de cubrir parte de los huecos se ha empleado un filtro de paso bajo X_o de Doodson, para obtener así una estima horaria del nivel medio del mar. Se ha admitido como válido el valor del filtro X_o siempre y cuando se tenga medida, con valor del coeficiente de ponderación no nulo, para 19 ó más de los 39 datos necesarios. Para el resto de los casos, se ha rellenado el hueco en la serie filtrada con el valor medio del nivel durante el período completo.

La serie de datos de Saint Jean de Luz es diaria entre 1964 y 1996. En los 12.055 días de este período hay 559 huecos (algo menos del 5%).

Métodos

Según Zurbenko *et al.* (1996) y Yang y Zurbenko, (2010a, 2010b), siendo $x(t), t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m$ una serie temporal de datos, la media móvil centrada (MMC) de semiancho q se define como:

$$MMC^q(x_i) = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q x_{i+j}; i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m \quad (1)$$

El filtro Kolmogorov-Zurbenko para la primera iteración coincide con la media móvil centrada:

$$KZ_q^1(x) = MMC^q(x) = y_i^1 = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q x_{i+j} \quad (2)$$

y, recursivamente, para la iteración k -ésima se define como:

$$KZ_q^k(x) = y_i^k = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q y_{i+j}^{k-1} \text{ para } k \geq 2 \quad (3)$$

El filtro adaptativo define un ancho de ventana a izquierda $q_H(t)$ y a derecha $q_T(t)$ del siguiente modo:

$$z(t) = KZ_q^k[x(t)] \quad (4)$$

$$D(t) = |z(t+q) - z(t-q)| \quad (5)$$

$$D'(t) = D(t+1) - D(t) \quad (6)$$

$$f(t) = 1 - \frac{D(t)}{\max[D(t)]} \quad (7)$$

$$q_H(t) = \begin{cases} q & \text{si } D'(t) < 0 \\ q \cdot f(t) & \text{si } D'(t) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$q_T(t) = \begin{cases} q & \text{si } D'(t) > 0 \\ q \cdot f(t) & \text{si } D'(t) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$KZA_q^1(x) = y_i^1 = \frac{1}{q_H + q_T + 1} \sum_{j=-q}^q z_{i+j} \quad (10)$$

$$KZA_q^k(x) = y_i^k = \frac{1}{q_H + q_T + 1} \sum_{j=-q}^q y_{i+j}^{k-1} \quad (11)$$

La representación de los datos filtrados $KZA_q^k(x)$ permite observar las discontinuidades en la serie. Cuantitativamente las discontinuidades se observan analizando la varianza $\hat{\sigma}$ de los datos filtrados, $KZA_q^k(x)$, definida como (Zurbenko *et al.*, 1996):

$$KZA_q^k(x) = Y(t)$$

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{q_H + q_T + 1} \sum_{j=-q_H}^{q_T} Y_{i+j} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{1}{q_H + q_T} \sum_{j=-q_H}^{q_T} (Y_{i+j} - \bar{Y}_i)^2$$

El filtro $KZA_q^k(x)$ sobre una serie permite retirar de la misma, aproximadamente, los períodos inferiores a $q\sqrt{k}$ (Eskridge *et al.*, 1997).

Se ha desarrollado específicamente un código en Fortran para los algoritmos KZ y KZA adaptado a series de datos largas (decenas de miles a centenas de miles de datos) con frecuencias de muestreo diarias, horarias y minutarias.

A la serie de datos horarios de la marea de Santander, previamente, se le ha realizado un procesado mediante un filtro de paso bajo X_o de Doodson, para obtener una serie de nivel medio del mar. Este filtro permite retirar de la señal la parte diurna y semidiurna de la marea, requiere solamente 39 valores y admite la presencia ocasional de huecos (Pugh, 1987). Este tipo de filtro consiste en una media móvil centrada y ponderada que puede expresarse como:

$$X_F(t) = \frac{1}{F_o + 2 \sum_{k=1}^{19} F_k} \left[F_o X(t) + \sum_{k=1}^{19} F_k [X(t+k) + X(t-k)] \right] \quad (13)$$

Los valores no nulos de los coeficientes F_k se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores no nulos de los coeficientes de ponderación del filtro Xo de Doodson con 39 datos (Pugh, 1987).

F_1	F_2	F_3	F_4	F_6	F_7	F_9	F_{11}	F_{12}	F_{14}	F_{17}	F_{19}
2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1

Resultados y discusión

Casos test

El primer caso test analizado es una serie de datos cada cinco minutos en un período de 3 años, con un total de 315.000 datos. La serie se ha generado mediante un número aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo $[-1, 1]$, con un salto de 0,05 en el inicio del segundo año y un salto de -0,05 en el inicio del tercer año. En la Figura 3 se muestra la serie de datos, la MMC de 28 días de semiancho, los resultados de los filtros $KZ_{28\text{días}}^{4iter.}(x)$ y $KZA_{28\text{días}}^{4iter.}(x)$ y el valor de la desviación estándar de los datos filtrados. Puede observarse que el filtro KZA detecta el salto en la serie, tanto el valor del mismo como el instante en que se produce con mayor nitidez que el KZ .

En el segundo caso test analizado, la serie se ha generado mediante un número aleatorio con una distribución normal tipificada. La serie es de 3 años y presenta una frecuencia de muestreo cada 5 minutos. En la serie de números aleatorios se han introducido una tendencia de incremento 0,5 unidades·año⁻¹ y saltos de -0,5 unidades en el inicio del segundo y tercer año. En la Figura 4 puede verse la serie de datos, la MMC de 7 días y los resultados de los filtros $KZ_{7\text{días}}^{4iter.}(x)$ y $KZA_{7\text{días}}^{4iter.}(x)$ y el valor de la desviación estándar. En este caso, además de detectarse los saltos se recupera la tendencia lineal introducida.

El tercer caso test es el mismo caso analizado anteriormente más una combinación lineal de funciones coseno de período 7 y 15 días y coeficientes 0,5 y -0,3, respectivamente. En la Figura 5 se muestra la serie de datos, la MMC de 14 días, los resultados de $KZ_{14\text{días}}^{4iter.}(x)$ y $KZA_{14\text{días}}^{4iter.}(x)$ y la desviación estándar de los datos filtrados. De nuevo el filtro adaptativo localiza con mayor precisión la posición de los saltos, su valor y la tendencia.

El cuarto caso es la suma de una señal de marea más un ruido aleatorio, obtenido mediante una distribución normal de media 0 y desviación estándar 50 mm, más un salto de -10 mm en el centro del período y una tendencia de variación lineal de 10 mm·año⁻¹ (Figura 6). La serie tiene dos años de duración con datos cada minuto, lo que supone un total de más de 1 millón de datos. En la Figura 7 puede verse el resultado de la MMC de 7 días, $KZ_{7\text{días}}^{4iter.}(x)$ y $KZA_{7\text{días}}^{4iter.}(x)$ y la desviación estándar de

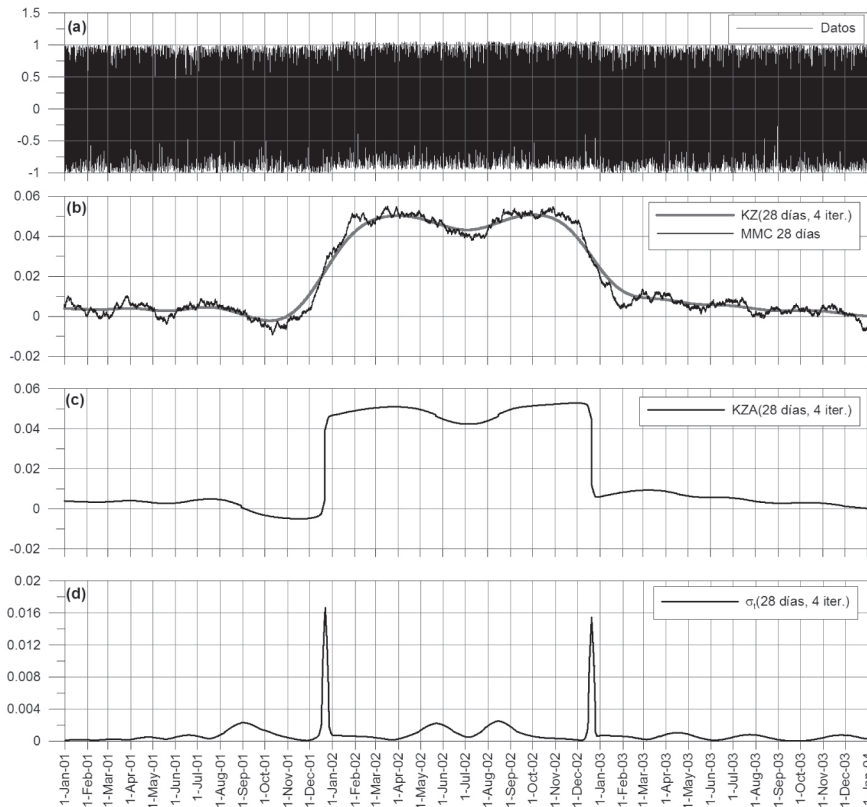


Figura 3. Caso test 1: (a) serie de datos generada; (b) media móvil centrada de semiancho 28 días (línea negra) y resultado del filtro KZ de semiancho 28 días y 4 iteraciones (línea gris); (c) filtro KZA de semiancho 28 días y 4 iteraciones; y (d) desviación estándar de los datos filtrados.

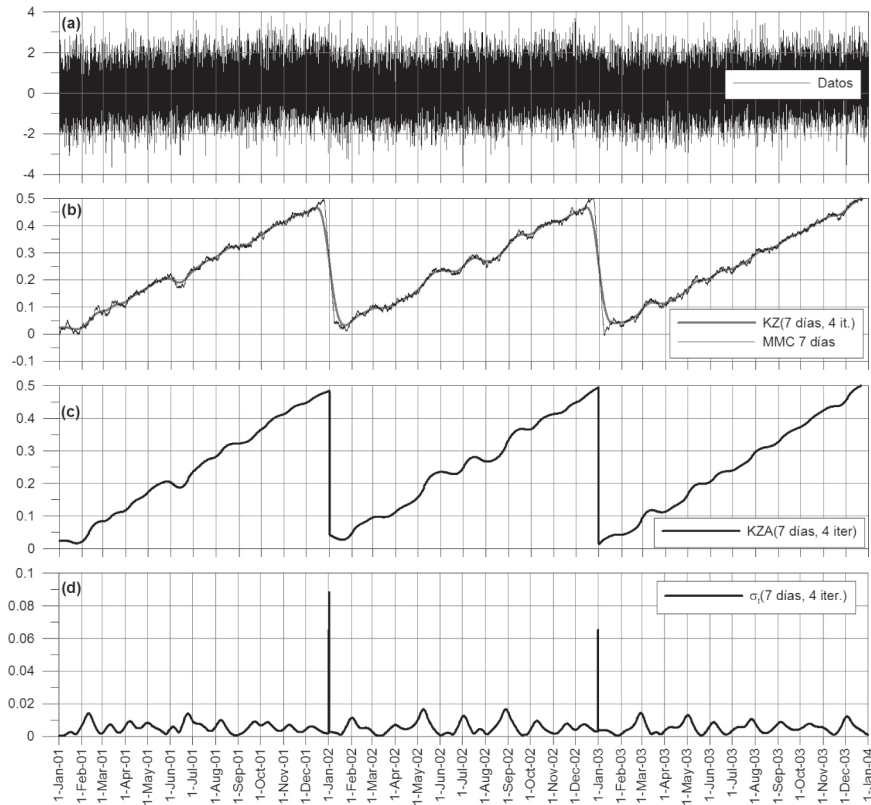


Figura 4. Caso test 2: (a) serie de datos generada; (b) media móvil centrada de semiancho 7 días (línea negra) y resultado del filtro KZ de semiancho 7 días y 4 iteraciones (línea gris); (c) filtro KZA de semiancho 7 días y 4 iteraciones; y (d) desviación estándar de los datos filtrados.

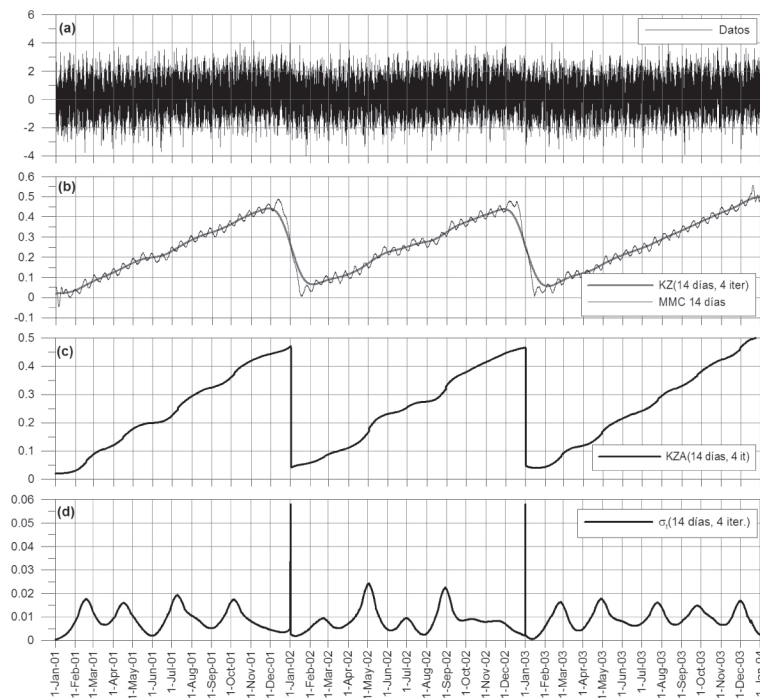


Figura 5. Caso test 3: (a) serie de datos generada; (b) media móvil centrada de semiancho 14 días (línea negra) y resultado del filtro KZ de semiancho 14 días y 4 iteraciones (línea gris); (c) filtro KZA de semiancho 14 días y 4 iteraciones; y (d) desviación de los datos filtrados.

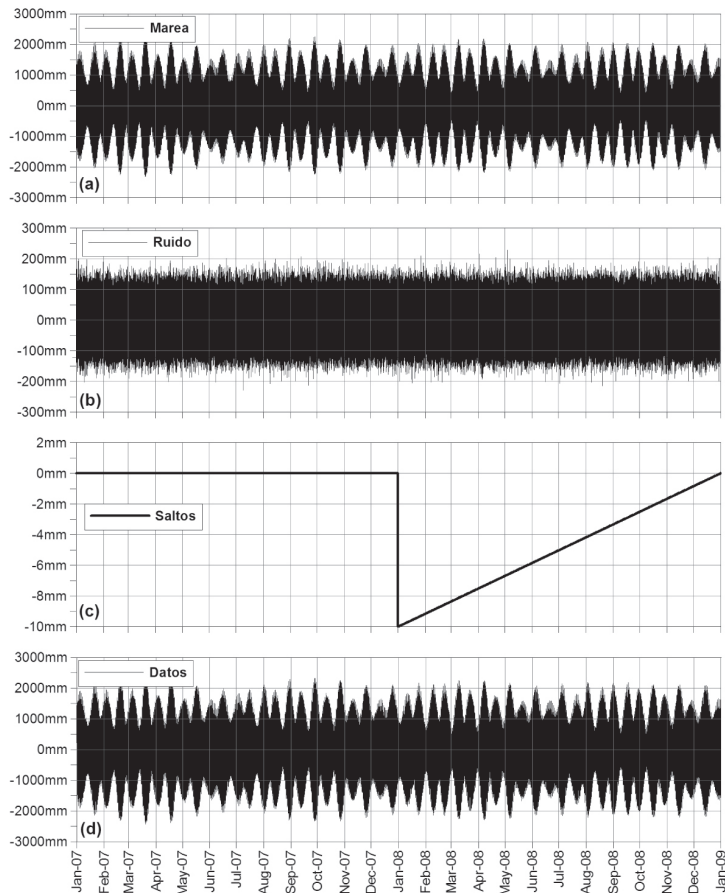


Figura 6. Caso test 4: (a) onda de marea; (b) ruido obtenido mediante un generador de números aleatorios de distribución normal de media nula y desviación estándar 50 mm; (c) salto y tendencia lineal introducidos en la serie; y (d) serie de datos generada.

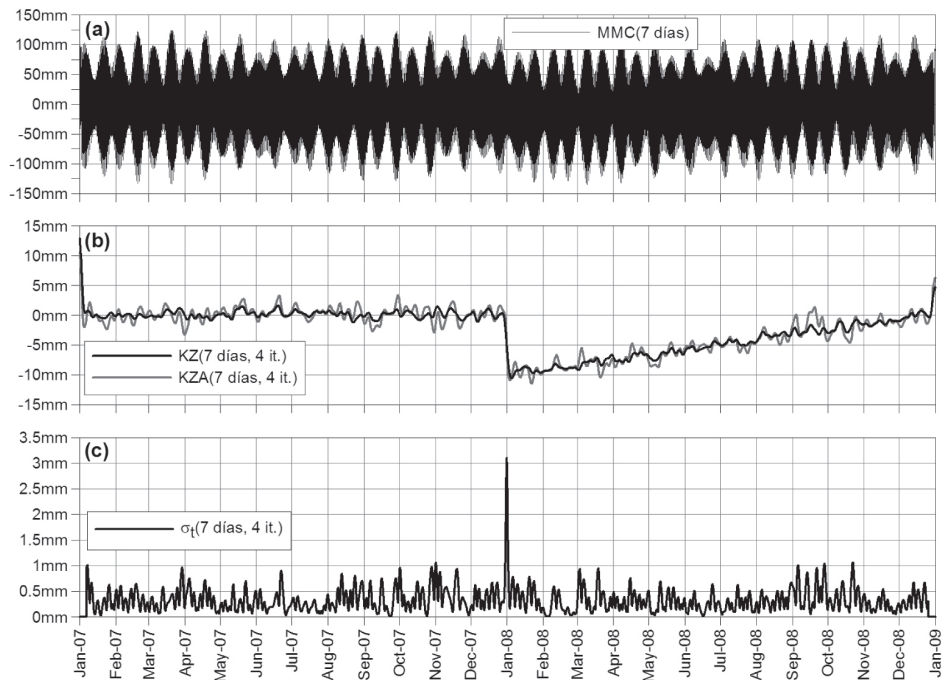


Figura 7. Caso test 4: (a) media móvil centrada de semiancho 7 días; (b) resultados del filtro KZ de semiancho 7 días y 4 iteraciones (línea negra) y del filtro KZA de semiancho 7 días y 4 iteraciones (línea gris); y (c) desviación estándar de los datos filtrados.

los datos filtrados. Incluso con un ancho de ventana relativamente pequeño (7 días), se observa que los filtros KZ y KZA detectan bien los valores promedio de la serie, el punto de salto de la misma y la tendencia lineal introducida. Sin embargo, en la MMC no se observan dichos cambios. En la Figura 8 se presentan los mismos resultados, pero para un valor de q igual a 10 días y siendo k igual a 4 iteraciones. Nuevamente puede comprobarse que en los resultados de los filtros de Kolmogorov-Zurbenko se detectan adecuadamente los cambios en la serie, mientras que en la MMC pasan desapercibidos. En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos con $q=30$ días y $k=4$. En este caso sí que, también en la MMC, resulta perceptible gráficamente el salto y la tendencia introducida en la serie.

Series de T, SST y MSL

En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos en el estudio de la serie de temperatura atmosférica (máxima y mínima diaria) de Igeldo (1928-2009) y de Hondarribia (1971-2009). En la Figura 11 se muestran los resultados de las series de temperatura atmosférica de Igeldo y Hondarribia, pero en este caso empleando únicamente los datos del período común (1971-2009). En ambos casos se ha aplicado también un valor de q igual a 6 años y k igual a 5 iteraciones.

La serie de temperatura máxima de Igeldo presenta dos períodos claramente diferenciados, uno frío anterior a finales de la década de los 80 y otro cálido, desde los 90 hasta la actualidad, con un incremento de 1,2 °C. Esta distinción puede observarse que se mantiene tanto en los resultados del período

1928-2009 (Figura 10) como en los del período coincidente con la serie de Hondarribia 1971-2009 (Figura 11).

En las mínimas también se distingue un período cálido, posterior al fin de los 80, con un incremento de 1,2 °C respecto al período anterior. No obstante, en las mínimas de Igeldo y en el período anterior a los 80, se observa una alternancia de períodos más fríos y más cálidos que no se han detectado en las temperaturas máximas. Los resultados en Hondarribia muestran un comportamiento semejante al de Igeldo, con un incremento de las temperaturas durante la década de los 80, tanto de las máximas como de las mínimas, de 1,3 a 1,5 °C.

Estos cambios de finales de la década de los 80 se han reflejado en numerosos estudios, tanto a escala local (Valencia, 1993; Cabanas *et al.*, 2003; Valencia *et al.*, 2003) como a escalas geográficas más amplias, como la zona inter-giro del Atlántico nordeste (Pérez *et al.*, 1995; 2000). Además, en este período se observaron de forma muy neta patrones anómalos acoplados en otras variables meteorológicas y oceanográficas como la precipitación y la salinidad, los índices de la *Iberian Poleward Current*, y el número de *eddies* o remolinos de Agua Central Nord-Atlántica (ACNA) formados y la persistencia de los mismos en el golfo de Vizcaya (Pingree y Le Cann, 1990; 1992a, 1992b; Pingree, 1994).

En esta época se intensificó el predominio del régimen de vientos del sur y del oeste durante el otoño y el invierno, lo que favorece la entrada en el golfo de Vizcaya de Agua Central Nord-Atlántica de tipo subtropical procedente del sur. Esta agua de la rama subtropical, East North Atlantic

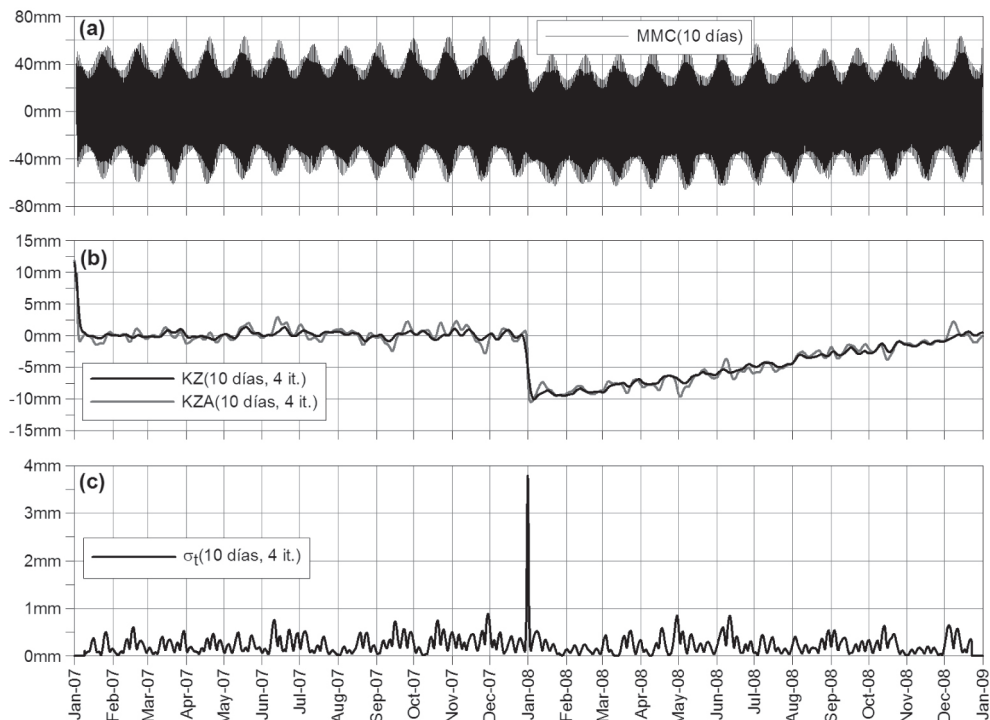


Figura 8. Caso test 4: (a) media móvil centrada de semiancho 10 días; (b) resultados del filtro KZ de semiancho 10 días y 4 iteraciones (línea negra) y del filtro KZA de semiancho 10 días y 4 iteraciones (línea gris); y (c) desviación estándar de los datos filtrados.

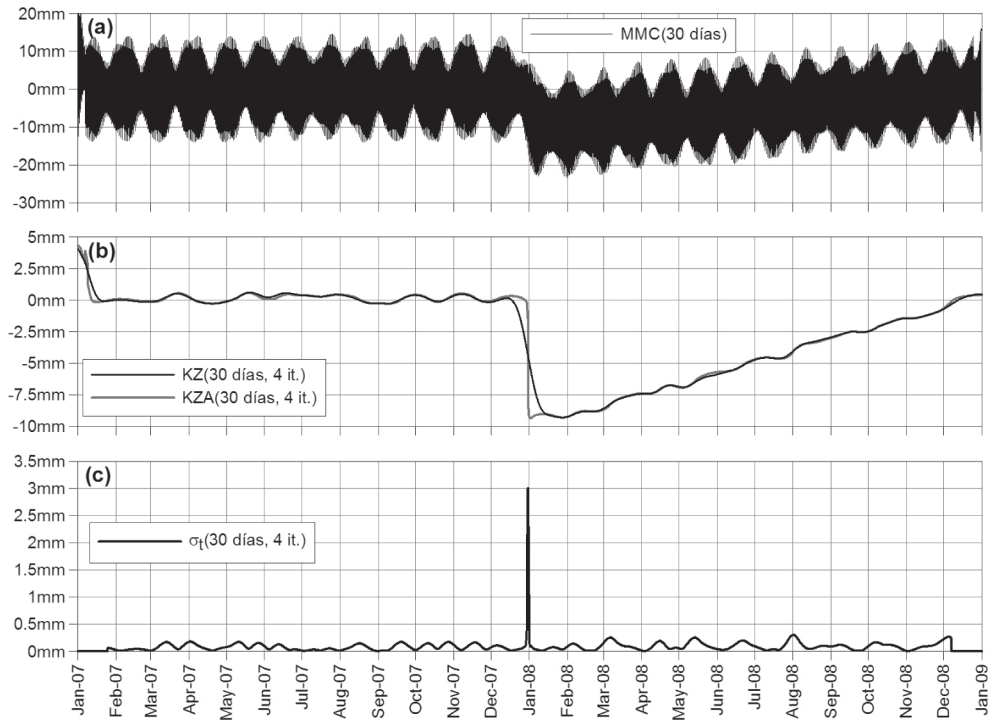


Figura 9. Caso test 4: (a) media móvil centrada de semiancho 30 días; (b) resultados del filtro KZ de semiancho 30 días y 4 iteraciones (línea negra) y del filtro KZA de semiancho 30 días y 4 iteraciones (línea gris); y (c) desviación estándar de los datos filtrados.

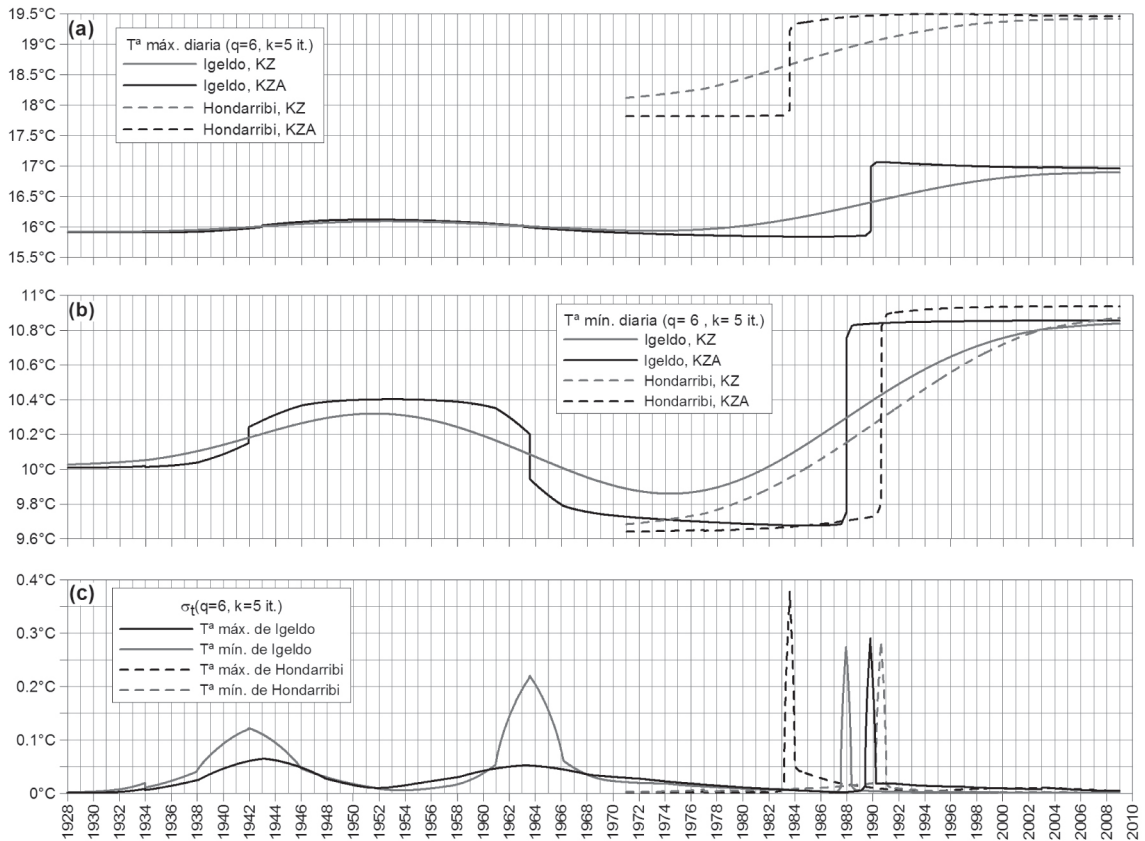


Figura 10. Temperatura atmosférica (máxima y mínima diaria) de Igeldo (1928-2009) y Hondarribia (1971-2009): (a) resultados de los filtros KZ y KZA de semiancho 6 años y 5 iteraciones aplicados a la temperatura máxima diaria; (b) resultados de los filtros KZ y KZA de semiancho 6 años y 5 iteraciones aplicados a la temperatura mínima diaria; y (c) desviación estándar de los datos filtrados.

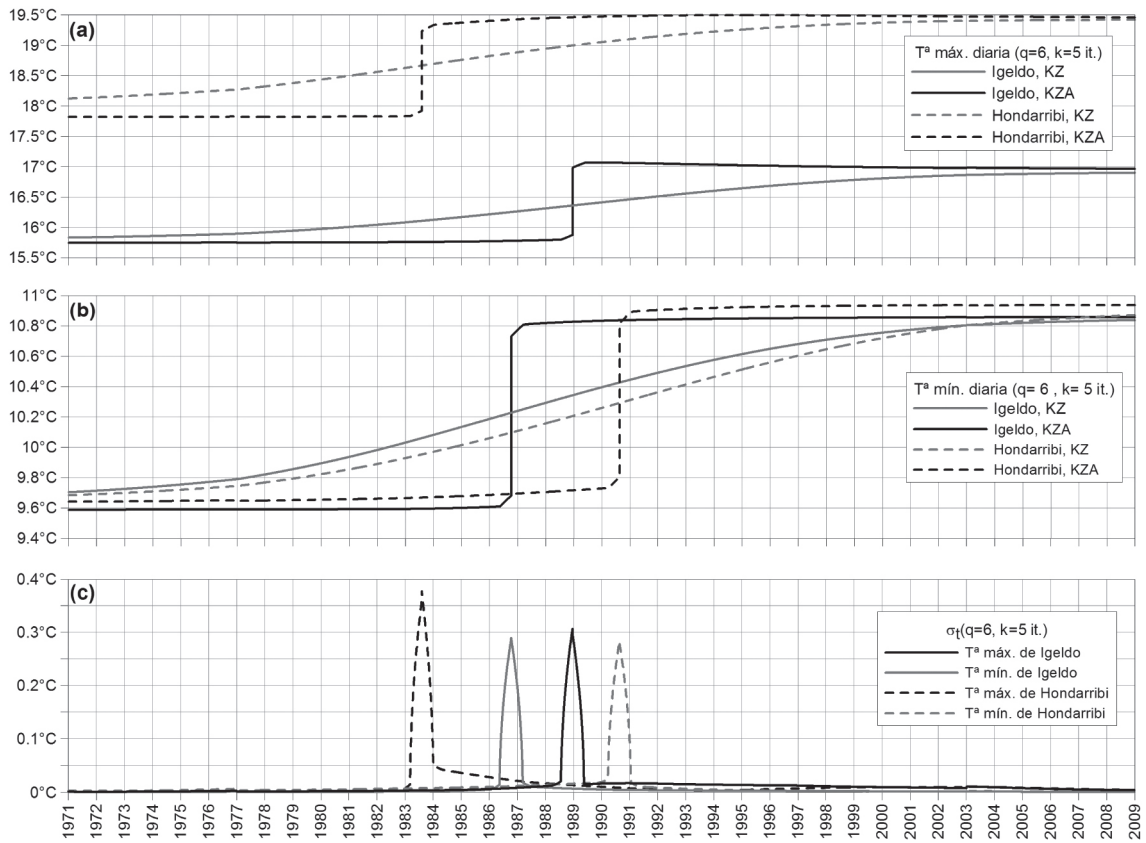
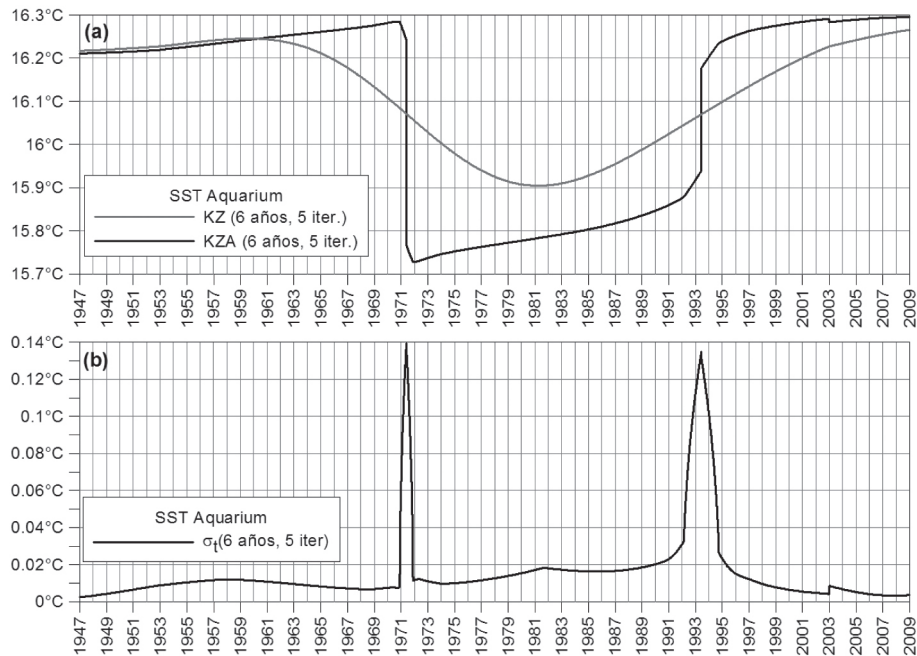


Figura 11. Temperatura atmosférica (máxima y mínima diaria) de Igeldo (1971-2009) y Hondarribia (1971-2009): (a) resultados de los filtros KZ y KZA de semiancho 6 años y 5 iteraciones aplicados a la temperatura máxima diaria; (b) resultados de los filtros KZ y KZA de semiancho 6 años y 5 iteraciones aplicados a la temperatura mínima diaria; y (c) desviación estándar de los datos filtrados.



33

Figura 12. Temperatura superficial del agua del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián: (a) resultados del filtro KZ de semiancho 6 años y 5 iteraciones (línea gris) y del filtro KZA de semiancho 6 años y 5 iteraciones (línea negra); y (b) desviación estándar de los datos filtrados.

Central Water (según la denominación de Ríos *et al.*(1992), ENACW_r) es más cálida y salada que la correspondiente rama subpolar (ENACW_p) cuya entrada en el golfo de Vizcaya está favorecida por el régimen de vientos del norte. Por otra parte, ese mismo régimen de vientos del sur da lugar a inviernos con temperaturas suaves y pocas precipitaciones. Así pues, las mismas condiciones que favorecieron la presencia de aguas de alta salinidad y temperatura propiciaron que estas se mantuvieran con pocas modificaciones en el golfo de Vizcaya por medio de las condiciones de temperatura y precipitación invernales generadas paralelamente (Cabanas *et al.*, 2003; Valencia *et al.*, 2003). Por lo tanto, este periodo constituye un ejemplo muy típico de acoplamiento de las condiciones atmósfera-oceano y, en la costa vasca, se refleja en la serie de temperatura superficial del mar (SST) del Aquarium de San Sebastián (Fontán *et al.*, 2008; Goikoetxea *et al.*, 2009)

En la Figura 12 se presentan los resultados obtenidos en el análisis del registro de temperatura superficial del mar en el Aquarium de San Sebastián. En este caso se ha empleado un valor de q de 6 años y k igual a 5 iteraciones. Con esta combinación se filtran, aproximadamente, las oscilaciones de la serie detectadas en estudios previos (Goikoetxea *et al.*, 2009). El filtro KZA y la representación gráfica de la desviación estándar de los datos filtrados, según la expresión (12), permiten distinguir tres periodos claramente diferenciados que no son discernibles en el filtro KZ.

- Desde 1947 hasta 1971, con un valor promedio de 16,25 °C y un ligero incremento de aproximadamente 0,1 °C en esos 24 años. Este periodo finaliza con un brusco descenso de 0,6 °C aproximadamente, que coincide con el enfriamiento del Atlántico norte asociado a la “Gran Anomalia Salina” de principios de los 70 (Dickson *et al.*, 1988).
- Una fase de temperaturas bajas con un valor promedio de la SST de 15,8 °C entre la década de los 70 y los 90 y una tendencia positiva (0,2 °C en 21 años) que finaliza con un incremento de 0,3 °C en las temperaturas promedio, coincidente con el incremento de la entrada de aguas más salinas y cálidas en el sudeste del golfo (Cabanas *et al.*, 2003; Valencia *et al.*, 2003).
- Desde la década de los 90 hasta la actualidad, una fase similar al primer periodo de la serie con ligero calentamiento, este resultado coincide con otros obtenidos en trabajos previos (Goikoetxea *et al.*, 2009).

Como se señala en estudios anteriores sobre esta serie, la mayor parte de los patrones anómalos (persistencia de anomalías del mismo signo durante varios años consecutivos) y de ciclos registrados, con cambios de tendencia más o menos bruscos, coinciden con patrones y tendencias similares observados a escala geográfica más amplia. A su vez, estas anomalías y tendencias se relacionan con patrones anómalos de índices meteorológicos de baja frecuencia como la *North Atlantic Oscillation* (NAO) o el *Eastern Atlantic Pattern* (EA). Una parte importante de la variabilidad de la circulación atmosférica, e indirectamente de la distribución de calor y humedad, se relaciona con las variaciones de estos índices (Hurrell, 1995, 1996; Hurrell *et al.*, 2003) y, por tanto, resulta

frecuente que las anomalías de temperatura coincidan con anomalías de salinidad.

Anteriormente se ha señalado la asociación del periodo frío de la década de los 70 con la formación y propagación de la “Gran Anomalia Salina” de principios de dicha década (Dickson *et al.*, 1988). De modo análogo, Belkin *et al.* (1998) y Belkin (2004) definen formación y propagación de anomalías de salinidad para las décadas de los 80 y los 90. Aunque estos estudios se centran principalmente en latitudes superiores al golfo de Vizcaya, de los esquemas de propagación de las distintas anomalías de salinidad se deduce una influencia geográficamente más extendida y más duradera de la anomalía de los 70 y una influencia relativamente menor de las anomalías de los 80 y 90 para zonas del Atlántico nordeste al sur de la latitud 50° N. De todos modos, la influencia de estos patrones anómalos resulta coherente con los mínimos y los cambios de tendencia, en términos de anomalías acumuladas, de la serie SST del Aquarium de San Sebastián. En este sentido, en Goikoetxea *et al.* (2009) se reflejan singularidades en los 80 y en los 90 que resultan menos marcadas y persistentes que las de periodos anteriores, pero que responden a patrones similares a los descritos para esos periodos.

Por otra parte, en cuanto a la sincronización de las anomalías locales con índices de meso o macroescala, puede considerarse un retardo o desfase en la respuesta debido a que el efecto no se produce de forma simultánea a la formación de la anomalía principal sino que, en la mayoría de los casos, se debe a la propagación de la misma. Este mecanismo también aparece condicionado por la recurrencia de anomalías del mismo signo (por ejemplo, inviernos consecutivos con fase positiva de la NAO). De hecho, buena parte de los periodos con tendencia sostenida en la SST coinciden con periodos de baja variabilidad en el régimen definido por los principales índices meteorológicos del Atlántico norte. Recíprocamente, diferencias interanuales importantes y cambios de tendencia en la SST aparecen relacionadas con cambios de régimen en dichos índices.

Hay que tener en cuenta que la NAO se computa para los meses de invierno por lo que, *a priori*, la influencia más inmediata y directa sobre la circulación atmosférica, sobre la temperatura del aire y la SST, lo será sobre las temperaturas mínimas de invierno. A escala geográfica más concreta, la influencia del EA sobre el sudeste del golfo de Vizcaya se extiende a la totalidad del año pero se ha observado que la mayor correlación entre el EA y la SST se registra para los meses de mayor energía en la circulación atmosférica, desde octubre a marzo (Valencia *et al.*, 2009). También hay que tener en cuenta que puede darse una relativa modulación entre los efectos derivados de las anomalías de ambos índices. La fase positiva de la NAO se asocia a inviernos fríos y secos mientras que la fase positiva del EA se relaciona con clima seco pero más cálido, asociado a circulación del suroeste.

En este sentido, dentro de las interacciones múltiples y de los periodos asociados a los distintos ciclos de la serie SST del Aquarium (Goikoetxea *et al.*, 2009), el filtro KZA resalta las tendencias sostenidas y la σ de los datos filtrados resalta

periodos en los que se dan inflexiones destacables (Figura 12). Estos periodos, alrededor de 1972 y de 1993, coinciden con épocas en las que los índices NAO y EA se mantuvieron en fase opuesta (Valencia *et al.*, 2009), lo que representaría una sinergia en su efecto sobre la temperatura.

A la serie de nivel medio del mar de Santander obtenida mediante el filtro X_0 de Doodson se le ha realizado el análisis KZ y KZA empleando una ventana de 8 años y 6 iteraciones para filtrar la frecuencia nodal (18,6 años). En la Figura 13 se han representado la serie de datos MSL, los resultados de los filtros, y la desviación estándar de los datos filtrados. En los resultados obtenidos con el filtro KZA se observan dos periodos claramente definidos, separados por un salto de unos 60 mm a mediados de los años 60, lo cual se relaciona en parte con variaciones del patrón NAO (Kolker y Hameed, 2007). En el primer periodo el nivel medio se ha mantenido constante, y desde la década de los 70 hasta 2005 se observa un ascenso lineal de unos 20 mm. Los resultados obtenidos mediante el filtro KZ no permiten distinguir los dos periodos mencionados.

Por último, los resultados de los filtros KZ y KZA con 8 años y 6 iteraciones sobre la serie de MSL de Saint Jean de Luz se han representado en la Figura 14. Se pueden observar dos periodos de MSL constante, separados por un salto de 35 mm producido en la década de los 80, lo cual se relaciona con un periodo climático más cálido y húmedo (Cabanas *et al.*, 2003).

Conclusiones

La técnica numérica de filtrado adaptativo de Kolmogorov-Zurbenko, *KZA*, permite detectar, en largas series de datos, saltos en los valores promedio y cambios en las tendencias de variación sobre series sintéticas de forma más eficaz que el filtro *KZ*, sin que esto suponga un incremento importante de la complejidad del algoritmo.

Este tipo de filtro aplicado a largas series de datos permite detectar cambios abruptos en el clima o en los niveles medios del mar, así como modificaciones causadas por cambios en la instrumentación o en los procedimientos de adquisición de datos.

Los resultados de las series de datos analizadas muestran, en general, periodos de características uniformes separados por cambios bruscos en los valores promedio coincidentes con procesos de gran escala como la “Gran Anomalía Salina” de los años 70, variaciones en el patrón de la NAO o periodos de mayor entrada de aguas cálidas y salinas en el fondo del golfo de Vizcaya.

La serie de SST del Aquarium presenta tres periodos separados por saltos en los valores promedio pero, todos ellos con una ligera tendencia de calentamiento. El primero, cálido, desde 1947 a 1971, uno intermedio más frío comprendido entre los 70 y los 90, y desde los 90 hasta la actualidad uno cálido muy similar al inicial.

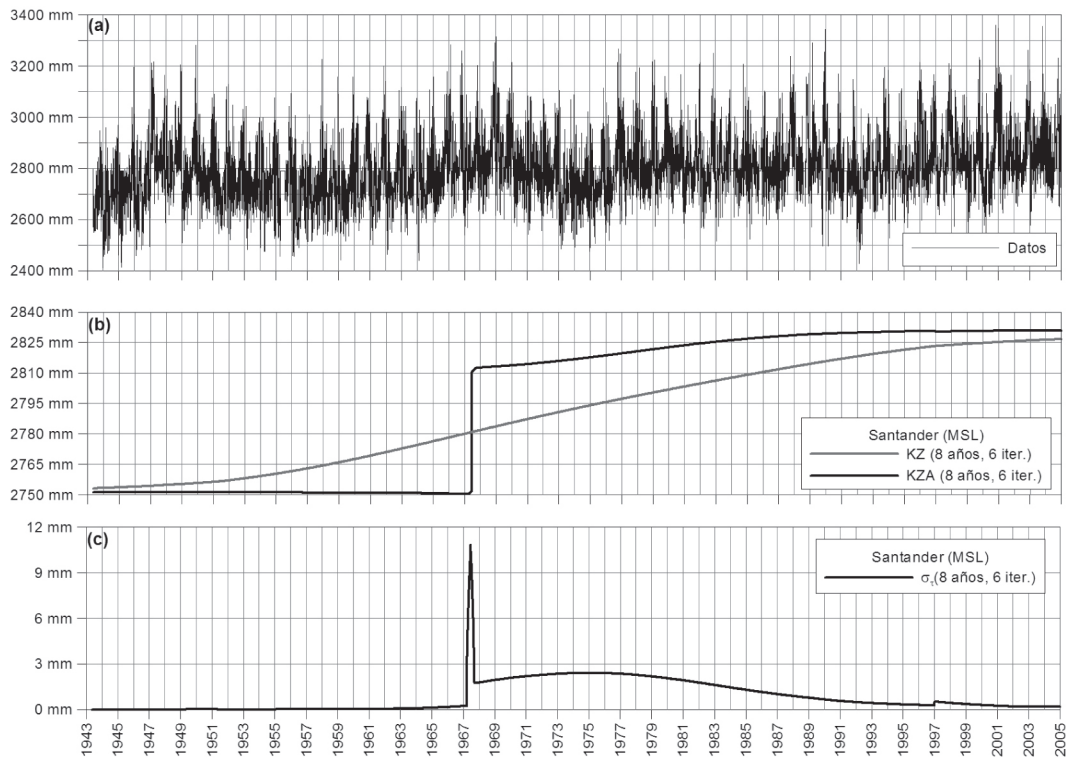


Figura 13. Nivel medio del mar en Santander: (a) datos de MSL obtenidos mediante el filtro X_0 de Doodson; (b) resultados del filtro KZ de semiancho 8 años y 6 iteraciones (línea gris) y del filtro KZA de semiancho 8 años y 6 iteraciones (línea negra); y (c) desviación estándar de los datos filtrados.

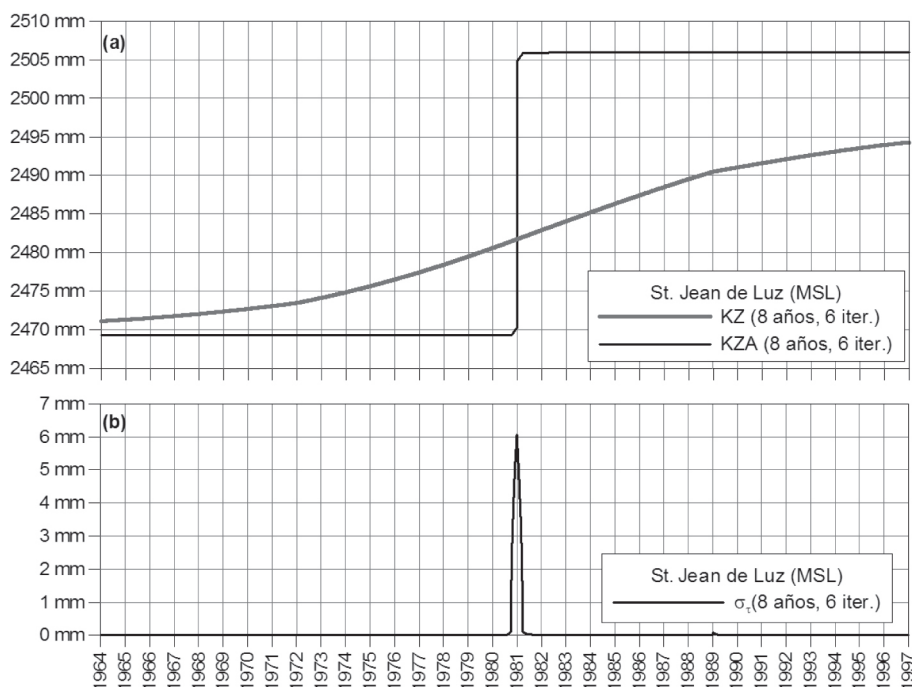


Figura 14. Nivel medio del mar en Saint Jean de Luz: (a) resultados del filtro KZ de semiancho 8 años y 6 iteraciones (línea gris) y del filtro KZA de semiancho 8 años y 6 iteraciones (línea negra); y (b) desviación estándar de los datos filtrados.

Los datos de temperatura atmosférica muestran, de forma más clara en el caso de las temperaturas máximas que en las mínimas, un cambio de patrón durante la década de los 80, con un período frío inicial y otro cálido desde los 90 hasta la actualidad, separados por un salto superior a 1 °C en los valores promedio. Este cambio de patrón es perceptible tanto en la serie de Igeldo (1928-2009) como en la de Hondarribia (1971-2009).

Algunas diferencias entre las series están condicionadas por la influencia del punto de inicio del periodo de observación y por el diferente peso de la variabilidad estacional sobre los valores máximos y mínimos. La aparición de estas diferencias puede considerarse un indicador de la sensibilidad del análisis.

La semejanza de algunos patrones de respuesta de las series de T y SST indica un fuerte acoplamiento atmósfera-oceano, al menos en balance térmico para las aguas superficiales. Por otra parte, la asociación de la variabilidad general y de los puntos de cambio más singulares con los patrones anómalos de índices oceano-meteorológicos (con influencia a escala geográfica mucho más amplia) puede considerarse como un factor de representatividad de los datos manejados, a pesar de su carácter local.

En las series de nivel del mar de Santander y Saint Jean de Luz se observan saltos pero no coincidentes entre sí. Mientras la serie de Santander tiene un período inicial desde 1943 a los años 60 con un nivel medio uniforme separado por un incremento de unos 60 mm hasta el nivel actual, la serie de Saint Jean de Luz presenta dos fases de nivel medio constante separados por un incremento de unos 35 mm, producido en

los años 80. En el caso de Santander los datos desde los 70 hasta el año 2005 muestran una tendencia de ascenso lineal, de unos 20 mm. Los resultados indican, en ambos casos, saltos en las series pero, no es descartable que sean debidos a causas naturales, de instrumental o metodología de la toma de datos. Una vía de estudio podría ser el análisis de otras series de nivel del mar: las de Brest y Newlyn en el norte y las de A Coruña y Vigo en el sur.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer la puesta a disposición de la información empleada en el mismo por los siguientes organismos: *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*, Aquarium de Donostia-San Sebastián, Agencia Estatal de Meteorología e Instituto Español de Oceanografía, así como las aportaciones de los revisores (Dr. Luis Ferrer y un revisor anónimo) que han mejorado notablemente el contenido del manuscrito.

Esta es la contribución número 521 de AZTI-Tecnalia (Unidad de Investigación Marina).

Bibliografía

- Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Rixen, M. and Beckers, J.M., 2005. Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using Empirical Orthogonal Functions. Application to the Adriatic Sea. *Ocean Modelling*, 9: 325-346.
- Araújo, I., 2005. *Sea level variability. Examples from the atlantic coast of Europe*. Ph D. Thesis. Southampton University, 411 pp.

- Belkin, I.M., Levitus, S., Antonov, J.I. and Malmberg, S.A., 1998. "Great Salinity Anomalies" in the North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 41, 1–68.
- Belkin, I.M., 2004. Propagation of the "Great Salinity Anomaly" of the 1990s around the northern North Atlantic. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L08306, doi:10.1029/2003GL019334, 2004
- Borja, A., Egaña, J., Valencia, V., Franco, J. y Castro, R., 2000. 1947-1997, estudio y validación de una serie de datos diarios de temperatura del agua del mar en San Sebastián, procedente de su Aquarium. *Oceanografika*, 3: 139-151.
- Cabanas, J.M., Lavín, A., García, M.J., González-Pola, C., Tel, E., 2003. Oceanographic variability in the northern shelf of the Iberian Peninsula, 1990-1999. *ICES Marine Science Symposia*, 219: 71-79.
- Chust, G., Borja, Á., Liria, P., Galparsoro, I., Marcos, M., Caballero, A. and Castro, R., 2009. Human impacts overwhelm the effects of sea-level rise on Basque coastal habitats (N Spain) between 1954 and 2004. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(4): 453-462.
- Chust, G., Caballero, A., Marcos, M., Liria, P., Hernández, C., and Borja, A., 2010. Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(1): 113-124.
- Dickson, R.R., Meincke, J., Malmberg, S.A., Lee, A.J., 1988. The "great salinity anomaly" in the northern North Atlantic 1968–1982. *Progress in Oceanography*, 20: 103-151.
- Eskridge, R.E., Ku, J.Y., Rao, S.T., Porter, P.S., Zurbenko, I.G., 1997. Separating different scales of motion in times series of meteorological variables. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78, 1473-1483.
- Fontán, A., Valencia, V., Borja, Á., Goikoetxea, N. 2008. Oceanometeorological conditions in the SE Bay of Biscay for the period 2001–2005. A comparison with the last two decades. *Journal of Marine Systems* 72, 167–177.
- Goikoetxea, N., Borja, Á., Fontán, A., González, M. and Valencia, V., 2009. Trends and anomalies of sea surface temperature during the last 60 years, within the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, 29: 1060-1069.
- González, M., Mader, J., Fontán, A., Uriarte, A. y Ferrer, L., 2008a. Análisis de la tendencia de la temperatura superficial del agua en Donostia-San Sebastián, a partir del estudio de la serie del Aquarium (1946-2007). *Revista de Investigación marina*, 4: 7 pp.
- González, M., Mader, J., Fontán, A., Uriarte, Ad., Del Campo, A., Ferrer, L. y Revilla, M. 2008b. Análisis de la tendencia de la temperatura atmosférica en Donostia-San Sebastián a partir del estudio de la serie del Observatorio del Monte Igeldo (1928-2007). *Revista de Investigación Marina*, 7: 7 pp.
- González, M., Fontán, A., Borja, Á., Del Campo, A., Esnaola, G., Ferrer, L., Goikoetxea, N., Mader, J., Uriarte, Ad. and Valencia, V., 2010. Trend analysis of multidecadal datasets of air and sea surface temperatures within the southeastern Bay of Biscay. *Thalassas*, 26(2): 23-31.
- Hurrell, J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269: 676-679.
- Hurrell, J.W., 1996. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature. *Geophysical Research Letters*, 23: 665-668.
- Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Gier, O. and Visbeck, M., 2003. An overview of the North Atlantic oscillation. In: Hurrell, Y.Kushnir, G.Ottersen, M.Visbeck (Eds.). *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*, *Geophysical Monograph Series*, vol. 134, American Geophysical Union, Washington, pp.1–35.
- Kolker, A.S. and Hameed, S., 2007. Meteorologically driven trends in sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 34, L23616, doi:10.1029/2007GL031814.
- Leorri, E. and Cearreta, A., 2009. Recent sea-level changes in the southern Bay of Biscay: transfer function reconstructions from salt-marshes compared with instrumental data. *Scientia Marina*, 73(2): 287-296
- Marcos, M., Gomis, D., Montserrat, S., Álvarez-Fanjul, E., Pérez, B. and García-Lafuente, J., 2005. Consistency of long sea-level time series in the northern coast of Spain. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 11, C03008, doi:10.1029/2004JC002522.
- Menéndez, M., Méndez, F.J. and Losada, I.J., 2009. Forecasting seasonal to interannual variability in extreme sea levels. *ICES Journal Science*, 66: 1490-1496.
- Pérez, F.F., Ríos, A.F., King, B.A. and Pollard, R.T., 1995. Decadal changes of the θ -S relationship of the Eastern North Atlantic Central Water. *Deep-Sea Research I*, 42: 1849-1864.
- Pérez, F.F., Pollard, R.T., Read, J.F., Valencia, V., Cabanas, M., Ríos, A.F., 2000. Climatological coupling of the thermohaline decadal changes Eastern North Atlantic Central Water. *Scientia Marina*, 64(3): 347-353.
- Pingree, R.D., 1994. Winter warming in the southern Bay of Biscay and Lagrangian eddy kinematics from a deep-drogued Argos Buoy. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 74:107-128.
- Pingree, R.D. and Le Cann, B., 1990. Structure, Strength and Seasonality of the Slope Currents in the Bay of Biscay Region. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 70: 857-885.
- Pingree, R.D. and Le Cann, B., 1992a. Three anticyclonic Slope Water Oceanic eDDIES (SWODDIES) in the southern Bay of Biscay. *Deep-Sea Research I*, 39: 1147-1175.
- Pingree, R.D. and Le Cann, B., 1992b. Anticyclonic eddy X91 in the Southern Bay of Biscay, May 1991 to February 1992. *Journal of Geophysical Research*, 97: 14353-14367.
- Pugh, D.T., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level: A Handbook for Engineers and Scientists*. Wiley, Chichester, 472 pp.
- Pugh, D.T., 2004. *Changing Sea Levels*. Cambridge University Press, 256 pp.
- Ríos, A.F., Pérez, F.F. and Fraga, F., 1992. Water masses in the upper and middle North Atlantic Ocean east of the Azores. *Deep-Sea Research I*, 39: 645-658.
- Tel, E. and 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*: 110-113.
- Valencia, V., 1993. Estudio de la variación temporal de la hidrografía y el plancton en la zona nerítica frente a San Sebastián. Resultados 1988-1990. *Informes Técnicos (Departamento de Agricultura y Pesca, Gobierno Vasco)*, 52: 1-105.
- Valencia, V., Borja, Á., Fontán, A., Pérez, F.F. and Ríos, A.F., 2003. Temperature and salinity fluctuations in the Basque Coast (Southeastern Bay of Biscay), from 1986 to 2000, related to the climatic factors. *ICES Marine Science Symposia*, 219: 340-342.
- Valencia, V., Franco, J., Borja, Á. and Fontán, A., 2004. Hydrography of the southeastern Bay of Biscay. In: Borja, A., Collins, M. (eds.), *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*. Elsevier Oceanography Series, vol. 70. Elsevier, Amsterdam, pp. 159-194.
- Valencia, V., Fontán, A., Borja, Á., Goikoetxea, N. and Sáenz, J., 2009. Recent climatic changes in the SE Bay of Biscay affecting pelagic and coastal ecosystems. *ICES CM 2009/G:11*, 13 pp.
- Woodworth, P.L., 1999. High waters at Liverpool since 1768: the UK's longest sea level record. *Geophysical Research Letters*, 26: 1589-1592
- Woodworth, P. L., 2010. The gyre-scale circulation of the North Atlantic and sea level at Brest. *Ocean Science*, 6: 185-190
- Yang, W. and Zurbenko, I., 2010a. Nonstationarity. *WIREs Comp. Stat.*, 2: 107–115.
- Yang, W. and Zurbenko, I., 2010b. Kolmogorov-Zurbenko filters. *WIREs Comp. Stat.*, 2: 340-351.
- Zurbenko, I.G., Porter, P.S., Rao, S.T., Ku, J.Y., Gui, R. and Eskridge, R.E., 1996. Detecting discontinuities in time series of upper air data: development and demonstration of an adaptive filter technique. *Journal of Climate*, 9: 3548–3560.

