

Variabilidad y tendencia del nivel del mar en el Atlántico Norte

M. DES*, M. DECASTRO

**mdes@alumnos.uvigo.es*

*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias,
Universidade de Vigo,
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

RESUMEN

Se han caracterizado las tendencias del nivel del mar en la costa Noreste y Este del Atlántico Norte. Para ello se utilizaron los registros de mareógrafo disponibles para quince estaciones de la zona de estudio. Además, para determinar si existe relación entre el comportamiento del nivel del mar en las diferentes estaciones se ha realizado una correlación entre estaciones para un período de tiempo común. Finalmente, se estudió la dependencia de la tendencia obtenida con el período de tiempo utilizado. Así, de las quince estaciones utilizadas en doce se observa una tendencia significativamente positiva de aumento del nivel del mar (SLR) para todo el período de registro. En las otras tres estaciones (Algeciras, Ceuta y St. John de Luz/Socoa) la tendencia no es concluyente. Además, se han determinado dos sub-zonas con comportamientos del nivel del mar similar: una al Sur englobando las estaciones de Ceuta y Cádiz y otra al Norte con las de A Coruña, St. John de Luz, Brest, le Havre, Newlyn y Dublín. Finalmente, se ha observado que la elevación del nivel del mar es mayor durante el último período (1983- 2009) siendo especialmente intenso en la estación de Dublín a partir del año 2000.

Palabras Clave: tendencia, nivel del mar, Atlántico Norte.

1. Introducción

Evidencias geológicas muestran que el nivel del mar fluctúa a lo largo de grandes períodos por lo que el nivel del mar no es estático en el tiempo. Durante el último período interglaciar (hace 125.000 años) se encontraba 2-6 m por encima del actual y durante la última glaciación (hace 20.000 años) unos 120 m por debajo (Gornitz, 1995). Se sabe que los movimientos verticales en la superficie continental, tanto debido a procesos tectónicos naturales como

antropogénicos, pueden producir variaciones en el nivel del mar, pero las principales causas de estos cambios a gran escala son variaciones climáticas y variaciones en el volumen de la masa de agua oceánica.

Según el Cuarto informe del IPCC el nivel del mar está aumentando de forma general, siendo el promedio global para el período 1961-2003 de 1,8 mm/año [variando entre 1,3 y 2,3 mm/año] y para el período 1993-2003 de 3,1 mm/año [variando entre 2,4 y 3,8 mm/año], con un intervalo de confianza del 90%. Actualmente no es posible

determinar si la mayor tendencia para el período 1993-2003 se debe a una variación decadal o constituye un aumento de la tendencia a largo plazo (IPCC, 2007).

Esta tendencia y el aumento de la temperatura superficial, mayor en tierra que en los océanos, están directamente relacionados. La temperatura superficial influye directamente en la dilatación térmica y en la fusión de las masas de hielo y nieve, y estos factores son los principales causantes del aumento del nivel del mar. Por ello, el estudio de las variaciones en el nivel del mar es un importante indicador de las variaciones climáticas y la evolución del Cambio Climático.

A las variaciones en el volumen de masa oceánica se unen otras causas de la variación del nivel del mar: tectónica de placas, variaciones en la presión atmosférica, isostasia post-glaciar, cambios en la gravedad, extracción de aguas subterráneas y de reservas creadas por el hombre, mareas de origen astronómico y atmosférico, cambios en la erosión y sedimentación costera (Tel, 2007).

El aumento del nivel del mar tendría un fuerte impacto, tanto medioambiental como económico. Este aumento implicaría que las aguas anegasen zonas anteriormente secas produciéndose pérdidas y cambios en los humedales (hábitat de numerosas especies), cambios morfológicos en la costa debidos a la erosión, aumento del nivel base del alcance de las mareas en los ríos e intrusión de agua salada en acuíferos (reducción de la calidad y disponibilidad de agua potable). El aumento del nivel del mar además de afectar a las mareas y al oleaje propicia que las tempestades costeras sean más intensas. Cuando un sistema de bajas presiones toca tierra se produce una marea de tempestad, que es una elevación del nivel del mar por encima de lo esperado debido a las variaciones

en el oleaje y que tienen lugar de forma puntual y local. Todo ello conllevaría efectos económicos y sociales en los asentamientos costeros que sufrirían inundaciones, pérdida de tierras e incluso pudiendo tener que abandonar estos asentamientos. Las islas de poca altitud podrían llegar a quedar completamente anegadas y el aumento en la intensidad de las tormentas provocaría daños en infraestructuras, paralización de la actividad pesquera, etc...

Existe una gran cantidad de estudios encaminados a la evaluación de los posibles efectos económicos que implicarían la subida del nivel del mar, como por ejemplo el llevado a cabo por los investigadores Richard S. J. Tol y titulado "*The double trade-off between adaptation and mitigation for sea level rise: an application of FUND*", en el cual se utilizan cuatro escenarios diferentes parametrizados en función de diferentes crecimientos poblacionales, cambios climáticos en el nivel del mar y medidas adoptadas de mitigación y adaptación para estimar los posibles efectos del nivel del mar. En 2100, para el escenario de crecimiento poblacional más probable la subida del nivel del mar podría anegar países enteros, pudiendo reducirse este impacto con medidas mitigantes como la estabilización de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera a 500ppm, que conllevaría un 10% menos de impacto, siendo el impacto menor cuanto mayor sea la reducción y cuantas más medidas adaptativas se tomen (Tol, 2007).

Este estudio se centra en la costa Noreste y Este del Atlántico Norte. La costa Este del Atlántico Norte posee una densidad de población mucho mayor en las zonas costeras que en el interior, destacando las costas ibéricas y del Mar del Norte con más de 500 habitantes por km². La economía de estas zonas costeras se basa en la industria, el turismo y la agricultura

intensiva. La economía de Islandia, Noruega, las islas Feroe y Groenlandia se basa en la industria pesquera; la producción de petróleo y gas en el Mar del Norte es de gran importancia para la economía de Dinamarca, el Reino Unido y los Países Bajos. En estos últimos además, las industrias relacionadas con la ingeniería costera se encuentran en auge, sobre todo las relacionadas con las energías renovables marinas. La economía irlandesa se basa en el transporte y la industria marisquera, mientras que para Francia, España y Portugal prima el turismo costero (OSPAR Commission, 2010). Esta intensa relación entre el medio

marino y la economía hace imprescindible el conocimiento del impacto de las actividades humanas sobre el sistema físico y biológico marino así como las respuestas de éstos a los cambios debidos tanto a procesos naturales como antropogénicos. El presente estudio se centra en el aumento del nivel del mar en la costa Noreste y Este del Atlántico Norte, excluyendo el mar del Norte.

Según la Organización Hidrográfica Internacional, el límite Norte y Este del Atlántico Norte viene determinado por la línea roja que se muestra en la Figura 1.

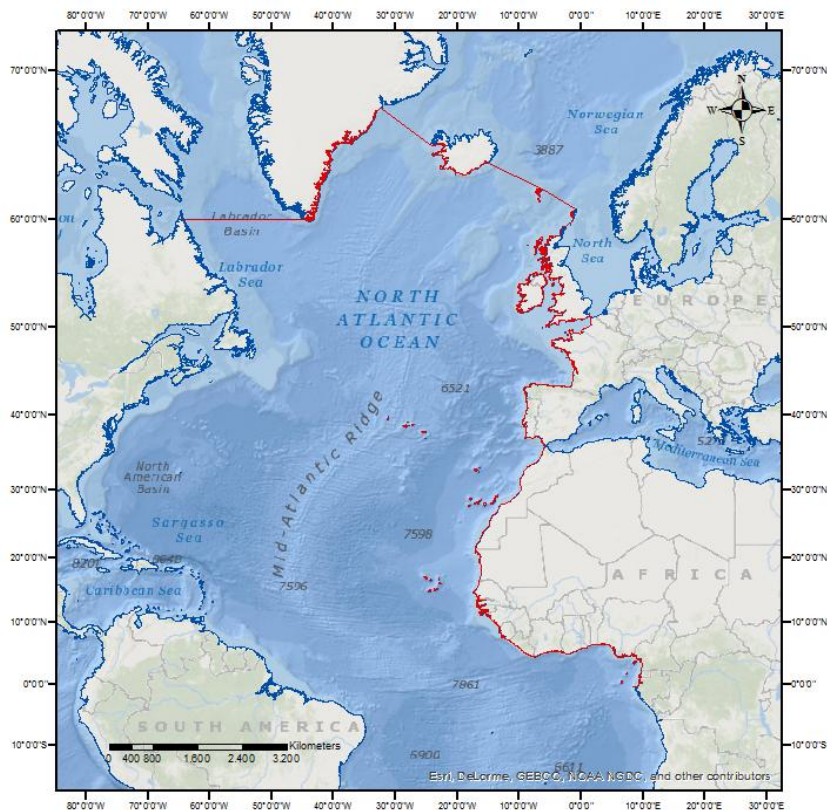


Fig. 1. Límite Norte y Este del Atlántico Norte

En la zona se han realizado estudios previos cuyos resultados se muestran en la tabla 1 donde las tendencias obtenidas para cada estación con su

correspondiente error y el período para el que fueron calculadas se agrupan en función de la fuente.

FUENTE	ESTACIÓN	PERÍODO	TENDENCIA (cm dec ⁻¹)
<i>National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)</i>	Santa Cruz de Tenerife	1927-2009	1,62±0,31
	Ceuta	1944-2009	0,52±0,29
	Algeciras	1943-2002	0,43±0,30
	Cádiz	1961-2001	4,02±0,74
	Lagos	1908-1999	1,50±0,24
	Cascais	1982-1993	1,27±0,15
	Ponta Delgada	1975-2007	2,58±1,10
	A Coruña	1943-2012	1,53±0,43
	St. John de Luz	1942-2011	1,40±0,58
	Brest	1908-1999	1,05±0,08
	Le Havre	1941-2011	2,15±0,52
	Newlyn	1915-2011	1,76±0,17
	Dublín	1938-2001	0,07±0,40
	Stornoway	1977-2011	1,92±0,94
	Reykjavik	1953-2011	2,33±0,50
Marcos et al., 2013	Santa Cruz de Tenerife	1927-2010	2,09±0,04
	Ceuta	1944-2002	0,5±0,1
	Cádiz	1961-2001	4,0±0,3
	Lagos	1908-1999	1,5±0,1
	Cascais	1882-2005	1,3±0,1
	A Coruña	1943-2001	1,4±0,2
	St. John de Luz	1942-1996	2,1±0,3
Wöppelman et al., 2007	Lagos	61 años	1,35±0,18
	Cascais	97 años	1,22±0,10
	Brest	87 años	1,40±0,05
	Newlyn	87 años	1,69±0,11
Gómez Gesteira et al., 2011	A Coruña	1943-2004	1,67
Chust et al., 2009	St. John de Luz	1942-2006	2,09±0,42
Haigh et al., 2009	Brest	1900-2006	1,41±0,11
	Le Havre	1959-2006	2,53±0,39
	Newlyn	1916-2006	1,74±0,10
	Dublín	1938-2001	0,20±0,27
	Stornoway	1977-2006	1,83±0,69

TABLA 1. Estudios previos en la zona: Autor, estación, período y tendencia calculada.

2. Datos y procedimiento

2.1. Datos

Los datos mensuales de nivel del mar utilizados en este estudio se obtuvieron de la base de datos del Servicio Permanente para el Nivel del Mar (PSML)

(<http://www.psmsl.org/data/obtaining/>).

El Servicio Permanente para el Nivel del Mar se encarga de recopilar, publicar, analizar e interpretar los datos de nivel del mar a partir de los datos aportados por las autoridades responsables de la red de mareógrafos

de cada país, creando así una red mundial de mareógrafos.

Para este estudio se utilizaron los datos de registro de mareógrafo de quince estaciones distribuidas a lo largo de la costa Noreste y Este del Atlántico Norte: Santa Cruz de Tenerife (I), Ceuta, Algeciras, Cádiz (III), Lagos, Cascais, Ponta Delgada, A Coruña (I), St. John de Luz/Socoa, Brest, Le Havre, Newlyn, Dublín, Stornoway, Reykjavik, cuyas coordenadas se muestra en la Tabla 2.

Como inicio del período de estudio se tomó el primer año en el que la estación estuvo en funcionamiento desde el mes

de enero y como fin el último con registros durante todo el año. En alguna de las estaciones este período se limita en función de la densidad de datos (Tabla 1).

Para corregir el Ajuste Isostático Glacial se ha utilizado la tabla de valores del modelo geodinámico ICE

4G (VM2) propuesto por Peltier (Peltier, 2001) (Tabla 1). Los valores positivos de corrección isostática indican que la estación se encuentra dentro de la región cubierta de hielo durante la última glaciación, mientras que los valores negativos sitúan la estación en la región periférica.

ESTACIÓN	CÓDIGO PSMSL	SITUACIÓN		PERÍODO DE ESTUDIO	ICE 4G (VM2) (mm/año)
		LATITUD (°)	LONGITUD (°)		
1.Santa Cruz de Tenerife I (España)	370-032	28,483333	-16,23333	1993-2011	-0,22
2.Ceuta (España)	340-001	35,900000	-5,316670	1945-2012	-0,43
3.Algeciras (España)	220-011	36,116667	-5,433333	1944-2001	-0,43
4.Cádiz III (España)	220-003	36,533333	-6,283333	1961-2012	-0,41
5.Lagos (Portugal)	210-031	37,100000	-8,666667	1909-1987	-0,30
6.Cascais (Portugal)	210-021	38,683333	-9,416667	1882-1993	-0,29
7.Ponta Delgada (Portugal)	360-001	37,736000	-25,67116	1979-2006	
8.A Coruña I (España)	200-030	43,366667	-8,400000	1944-2012	-0,13
9.St. John de Luz/Socoa (Francia)	190-141	43,395239	-1,681623	1964-2011	-0,32
10.Brest (Francia)	190-091	48,382900	-4,495040	1807-2011	0,26
11.Le Havre (Francia)	190-051	49,482015	0,106066	1959-2011	0,02
12.Newlyn (Reino Unido)	170-161	50,103000	-5,542833	1916-2012	0,25
13.Dublín (Irlanda)	175-071	53,350000	-6,216667	1938-2009	-0,40
14.Stornoway (Reino Unido)	170-251	58,207806	-6,388972	1977-2012	-0,34
15.Reykjavik (Islandia)	010-001	64,150583	-21,939880	1957-2012	0,09

TABLA 2. Posición de las estaciones utilizadas, período de estudio y valores de corrección del AIG según el método ICE 4G (VM2).

2.2. Procedimiento

Para caracterizar la evolución interanual de la elevación del nivel del mar, se representaron los valores mensuales descargados y se calculó la tendencia lineal mediante el método de “mínimos cuadrados” con su correspondiente coeficiente de determinación.

A continuación también se caracterizó la climatología para cada estación, para lo que se promediaron todos y cada uno de los meses del año para todo el período de estudio.

Posteriormente se calcularon las medias anuales siguiendo dos procedimientos diferentes. En el primer método (método 1) se promediaron los valores mensuales siempre y cuando hubiese datos para más de la mitad del año. Cuando a pesar de cumplirse la

condición anterior faltaba algún dato, se valoró que los datos disponibles no sesgasen el resultado, para lo que se utilizó la información obtenida en la climatología anual. En el segundo método (método 2) se realizó el promedio anual sustituyendo los meses que faltaban por el valor de ese mes en la climatología.

En el cálculo de la climatología y de los valores anuales de la elevación del mar se ha considerado la desviación estándar para la estimación del error.

A la tendencia final se le aplicó el factor de corrección del Ajuste Isostático Glacial según el método ICE 4G (VM2) utilizando la ecuación 1.a

$$y_{corr}(t) = y_{orig}(t) + \theta \cdot t \quad (1.a)$$

Las tablas de corrección no aportan un valor para la estación de Ponta Delgada (Portugal) por lo que se tomó el valor de la estación de Lagos (Portugal) ya que se encuentran a la misma latitud y éste es el parámetro más importante para la determinación de este coeficiente.

Para la comparación entre series de datos de elevación del nivel del mar entre diferentes estaciones de medición se seleccionó un período de tiempo común que cumpliera una serie de requisitos. Primero que fuese el más largo posible para realizar un estudio riguroso y segundo que el número de estaciones con ese período de registro fuese representativo de la zona de estudio (costa este del Atlántico Norte). El período de tiempo que cumplía ambos requisitos fue 1964-2009 que corresponde a un período de 46 años común para más de la mitad de las estaciones de estudio (9 de 15). Se utilizó el método de correlación de Spearman utilizando y sin utilizar la función “*Detrend*”, la cual elimina la tendencia lineal de la serie de datos. También se calculó la fiabilidad para determinar el grado de precisión con que el test estadístico escogido, en este caso Spearman, es capaz de medir la correlación.

Para analizar la influencia de la longitud de la serie de datos se determinaron las tendencias del nivel del mar para dos períodos de tiempo. El primero de 46 años (1964-2009) es el período más largo común para más de la mitad de las estaciones, y el segundo de 27 años (1983-2009), es lo suficientemente largo para aportar información climatológica. Además, el segundo período permite analizar la influencia del último período de calentamiento, iniciado en torno a 1977, en las tendencias del nivel del mar. Las tendencias se calcularon a partir de los

datos mensuales el método 2, para ocho de las quince estaciones.

Por último y a partir de los datos anteriores se analizó la influencia que tiene el período de tiempo en la tendencia del nivel del mar, para lo que se calculó la tendencia de dos períodos contiguos y de igual longitud (23 años) uno de 1964 a 1986 y otro de 1987 a 2009.

3. Resultados y Discusión

3.1. Comparación entre métodos

En la Tabla 2 se muestran los valores de la tendencia con su correspondiente error y el coeficiente de determinación (R^2) obtenidos para cada estación con ambos métodos, tanto para los datos mensuales como los anuales.

El coeficiente de determinación nos indica la relación entre el valor de la línea de tendencia y el valor de la serie de datos. Así, se observa que en las series de datos anuales la línea de tendencia tiene un mejor ajuste que en la serie mensual, y la discrepancia entre los valores del coeficiente de determinación entre los dos métodos no es significativa.

Al comparar las tendencias obtenidas a partir de datos mensuales y anuales se aprecia que, de forma general, difieren menos entre ellas en el método 2 que en el método 1 y el error en las tendencias es menor para el método 2 que para el 1. Comparando las tendencias obtenidas en los dos métodos se observa que en doce de las quince estaciones la diferencia no es significativa, por lo que en este caso el uso de la climatología no sesga los datos. En las estaciones de Ponta Delgada (2,85 cm dec⁻¹ frente a 2,33 cm dec⁻¹ y 2,94 cm dec⁻¹ frente a 2,39 cm dec⁻¹), Le Havre (2,44 cm dec⁻¹/1,99 cm dec⁻¹ y 2,37 cm dec⁻¹/1,95 cm dec⁻¹) y Stornoway (2,16 cm dec⁻¹/1,62 cm dec⁻¹ y 2,00 cm dec⁻¹/1,53 cm dec⁻¹) la variación entre las tendencias es

significativa y esto se debe a la escasez de datos.

ESTACIÓN	PERÍODO DE ESTUDIO	Método 1				Método 2			
		Datos mensuales		Datos anuales		Datos mensuales		Datos anuales	
		Tendencia (cm dec ⁻¹)	R ²	Tendencia (cm dec ⁻¹)	R ²	Tendencia (cm dec ⁻¹)	R ²	Tendencia (cm dec ⁻¹)	R ²
1.Santa Cruz de Tenerife	1993-2011	6,62±0,75	0,265	5,59±0,75	0,778	5,63±0,75	0,201	5,30±0,68	0,780
2.Ceuta	1945-2012	0,61±0,10	0,043	0,58±0,17	0,150	0,59±0,10	0,040	0,58±0,17	0,146
3.Algeciras	1944-2001	0,36±0,14	0,012	0,37±0,19	0,077	0,34±0,12	0,011	0,41±0,18	0,087
4.Cádiz III	1961-2012	3,89±0,21	0,372	3,94±0,41	0,655	3,77±0,20	0,357	3,75±0,40	0,638
5.Lagos	1909-1987	1,51±0,10	0,220	1,51±0,16	0,575	1,45±0,09	0,207	1,44±0,14	0,563
6.Cascais	1882-1993	1,28±0,05	0,329	1,26±0,09	0,652	1,22±0,05	0,310	1,25±0,09	0,647
7.Ponta Delgada	1979-2006	2,85±0,43	0,157	2,94±0,61	0,589	2,33±0,35	0,119	2,39±0,63	0,354
8.A Coruña I	1944-2012	2,28±0,15	0,232	2,37±0,24	0,603	2,24±0,14	0,228	2,22±0,24	0,567
9.St. John de Luz	1964-2011	1,27±0,24	0,057	1,17±0,39	0,200	0,96±0,19	0,041	0,91±0,29	0,175
10.Brest	1807-2011	1,06±0,03	0,345	1,06±0,05	0,749	0,95±0,03	0,304	0,95±0,05	0,674
11.Le Havre	1959-2011	2,44±0,24	0,180	2,37±0,33	0,566	1,99±0,20	0,137	1,95±0,27	0,506
12.Newlyn	1916-2012	1,79±0,09	0,278	1,76±0,10	0,769	1,70±0,09	0,255	1,69±0,10	0,761
13.Dublín	1938-2009	1,46±0,17	0,082	1,39±0,33	0,203	1,44±0,17	0,080	1,40±0,32	0,215
14.Stornoway	1977-2012	2,16±0,55	0,040	2,00±0,59	0,278	1,62±0,48	0,026	1,53±0,49	0,222
15.Reykjavik	1957-2012	2,20±0,23	0,125	2,18±0,34	0,441	2,21±0,23	0,125	2,17±0,33	0,445

TABLA 3. Análisis estadístico comparativo de los dos métodos.

3.2. Tendencias del nivel del mar eustático

Al tener en cuenta las variaciones litosféricas se calcula la tendencia del nivel del mar eustático es decir, la tasa de variación del volumen de la masa de agua oceánica. Para tener en cuenta estas variaciones litosféricas se aplicó el factor de corrección propuesto por el modelo ICE 4G a las tendencias anuales relativas obtenidas en el apartado anterior.

Para las estaciones de Ponta Delgada, Le Havre y Stornoway se tomaron las

tendencias anuales relativas calculadas mediante el método 1 debido a que, como se ha comentado con anterioridad, en estas tres estaciones los períodos de discontinuidad son muy grandes y el uso de la climatología sesga los datos. En el resto de las estaciones se tomaron las calculadas mediante el método 2.

Así, en la Tabla 4 se muestran las tendencias anuales relativas, el factor de corrección y la tendencia corregidas con el modelo ICE 4G, obteniendo las tendencias del nivel del mar eustático.

ESTACIÓN	SLT (cm dec ⁻¹)	ICE 4G (VM2) (cm dec ⁻¹)	SLT corregida (cm dec ⁻¹)
1.Santa Cruz de Tenerife I (España)	5,30±0,68	-0,22	5,08±0,68
2.Ceuta (España)	0,58±0,17	-0,43	0,15±0,17
3.Algeciras (España)	0,41±0,18	-0,43	-0,02±0,18
4.Cádiz III (España)	3,75±0,40	-0,41	3,34±0,40
5.Lagos (Portugal)	1,44±0,14	-0,30	1,14±0,14
6.Cascais (Portugal)	1,25±0,09	-0,29	0,96±0,09
7.Ponta Delgada (Portugal)*	2,94±0,61	-0,30*	2,64±0,61
8.A Coruña I (España)	2,22±0,24	-0,13	2,09±0,24
9.St. John de Luz/Socoa (Francia)	0,91±0,29	-0,32	0,59±0,29
10.Brest (Francia)	0,95±0,05	0,26	1,21±0,05
11.Le Havre (Francia)	2,37±0,33	0,02	2,39±0,33
12.Newlyn (Reino Unido)	1,69±0,10	0,25	1,94±0,10
13.Dublín (Irlanda)	1,40±0,32	-0,40	1,00±0,32
14.Stornoway (Reino Unido)	2,00±0,59	-0,34	1,66±0,59
15.Reykjavik (Islandia)	2,17±0,33	0,09	2,26±0,33

TABLA 4. Tendencia del nivel del mar eustático a partir tendencias anuales corrigiendo el Ajuste Isostático Glacial.

En la Figura 2 se representan las tendencias del nivel del mar eustático. Debido a la cercanía geográfica entre las estaciones de Cádiz y de Algeciras la representación de la tendencia en

Algeciras solapa la representación de la tendencia de Cádiz, por lo que se ha realizado un zoom la zona (Figura 3).

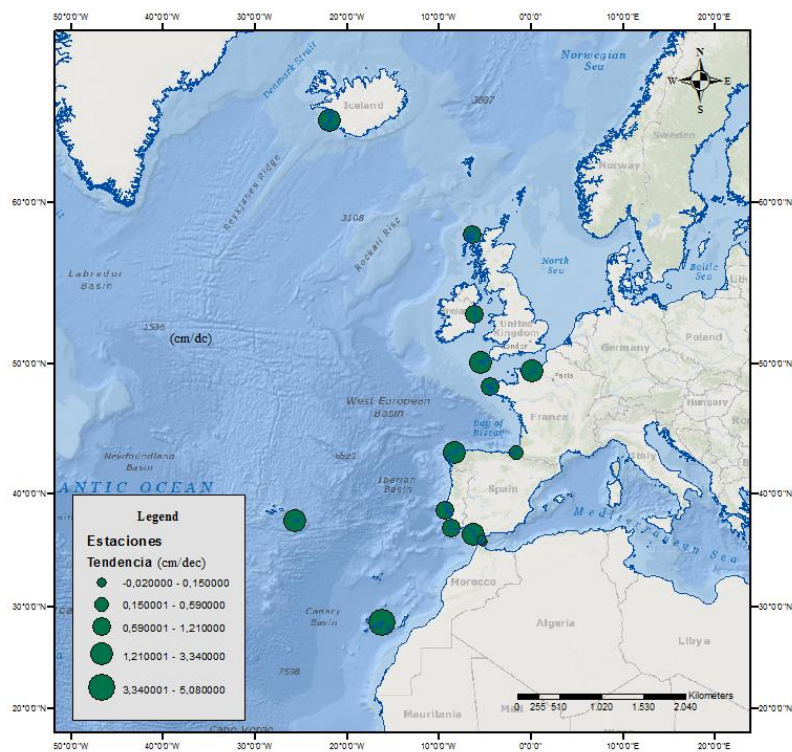


Fig. 2. Tendencias del nivel del mar eustático para la zona de estudio.

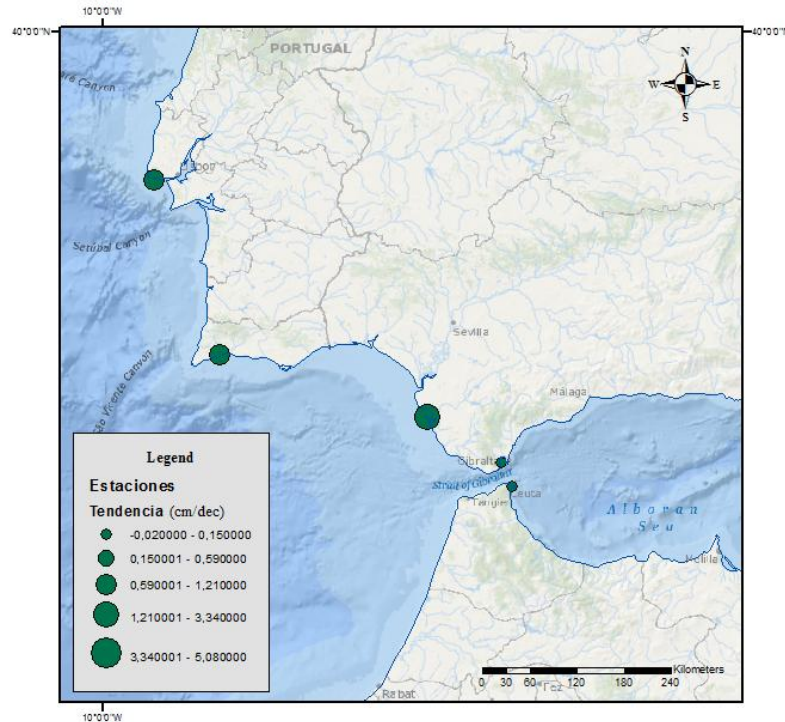


Fig. 3. Tendencias del nivel del mar eustático en la zona del Estrecho de Gibraltar.

En general se puede observar un aumento en el nivel del mar para prácticamente todas las estaciones analizadas. Al Sur de la zona de estudio se encuentra la estación de Santa Cruz de Tenerife para la que, se obtiene el valor de tendencia isostática más elevado [$5,08 \pm 0,68 \text{ cm dec}^{-1}$]. Este máximo difiere considerablemente de las otras tendencias pero puede deberse a que es el período más corto y reciente y refleje la variabilidad climática actual, influenciada por una alta tasa de aumento de la temperatura superficial oceánica. En la región del Estrecho de Gibraltar se sitúan las estaciones de Ceuta y Algeciras, las cuales distan entre si alrededor de 30 km, por lo que son las estaciones más cercanas utilizadas en este estudio. Para estas estaciones se obtienen las tendencias eustáticas más bajas [$0,15 \pm 0,17$ y $-0,02 \pm 0,18 \text{ cm dec}^{-1}$], valores que se solapan al tener en cuenta el error y se puede concluir que en esta zona el nivel del mar se mantiene estable. Siguiendo la costa española hacia el Oeste y cerca

de estas dos estaciones se encuentra la estación de Cádiz, para la que se obtiene la segunda tendencia más elevada [$3,34 \pm 0,40 \text{ cm dec}^{-1}$]. En el Golfo de Vizcaya en la estación de St. John de Luz también se observa una tendencia baja de SLR [$0,59 \pm 0,29 \text{ cm dec}^{-1}$]. Para las otras estaciones de estudio la tendencia varía entorno a una media de $1,59 \text{ cm dec}^{-1}$ (de $0,96$ a $2,26 \text{ cm dec}^{-1}$).

3.3. Comparación y correlación entre estaciones

Al analizar las correlaciones se observa que los valores de correlación obtenidos cuando no se elimina la tendencia lineal de cada serie son ligeramente mayores, esto se debe a que la tendencia positiva, más o menos elevada, del nivel del mar en todas las estaciones sesga los valores.

Los resultados de las Tablas 4 y 5 muestran correlaciones significativas (con fiabilidades superiores al 95%) indicando que cuando se produce un aumento (disminución) del SLR en una estación también aumenta (disminuye)

en la otra. Las únicas anticorrelaciones, o correlaciones negativas, obtenidas son entre las estaciones de Reykjavik y Ceuta y entre Reykjavik y St. John de Luz. En este caso cuando aumenta (disminuye) el nivel del mar en una estación disminuye (aumenta) en la otra. La estación de Reykjavik sólo muestra una correlación significativa con la de Dublín ($r= 0,38$ con una fiabilidad $> 95\%$).

La mayor correlación entre estaciones se observa entre las estaciones de Brest y Newlyn, debido a su proximidad geográfica ($r= 0,88$ con una fiabilidad $> 99\%$). También se observan altas correlaciones significativas (con un r superior a $0,50$) entre las estaciones de Brest- A Coruña, Brest- Dublín, Brest- St. John de Luz, Brest- Le Havre, Newlyn- A Coruña, Newlyn- Dublin y Le Havre- Newlyn.

Las estaciones españolas (Ceuta, Cádiz y A Coruña) se correlacionan entre sí aunque la correlación es mayor entre

Ceuta y Cádiz por su proximidad geográfica. Los resultados de estas correlaciones permiten dividir la costa Noreste y Este del Atlántico Norte en dos subzonas con comportamientos del nivel del mar similares. Así, una primera subzona englobaría las estaciones de Ceuta y Cádiz, situadas al Sur de la zona de estudio y una segunda las estaciones de A Coruña, St. John de Luz, Brest, le Havre, Newlyn y Dublín, situadas al Norte.

Puesto que no se disponen de datos para ninguna de las estaciones portuguesas durante el período de estudio no se ha podido evaluar la similitud o discrepancia del comportamiento del nivel del mar en esta zona.

3.4. Influencia de la longitud del período

En la Figura 4 se muestran las tendencias obtenidas para los períodos 1964-2009 (46 años) y 1983-2009 (27 años) con una fiabilidad $> 95\%$.

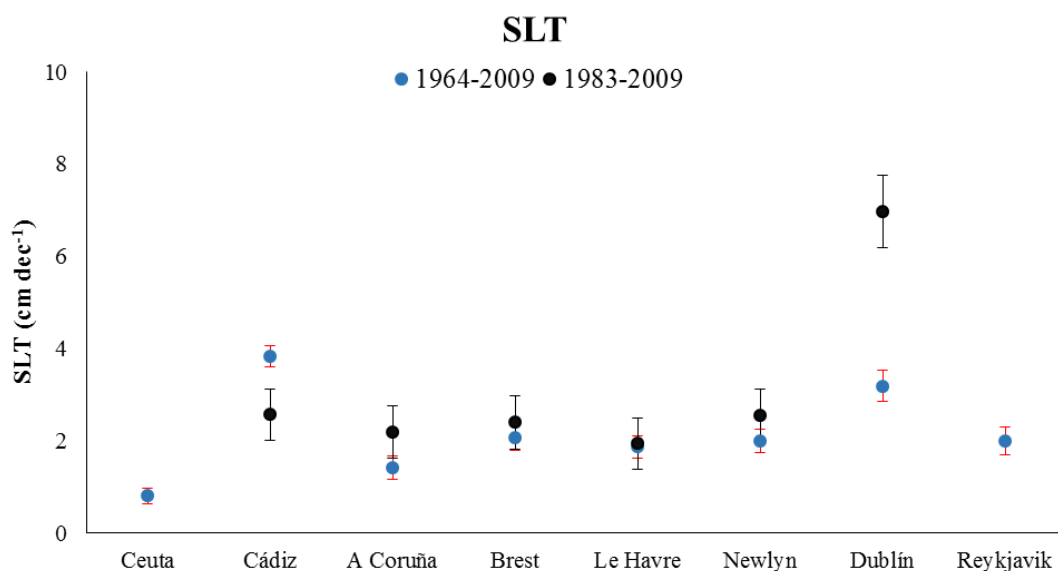


Fig. 4. Tendencia del nivel del mar y error con una fiabilidad $>95\%$

Comparando estas tendencias se observa que se mantiene una tendencia al aumento en el nivel del mar aunque

las tendencias netas para los dos períodos son diferentes en todas las estaciones. Si se tiene en cuenta el error, los valores se solapan en cuatro de las

ocho estaciones: A Coruña, Brest, le Havre y Newlyn (hay que tener en cuenta que las tendencias obtenidas para la estación de le Havre pueden estar condicionados por la climatología), lo que indica que la tendencia es básicamente la misma para los dos períodos de tiempo considerados. Sin embargo, la tendencia del nivel del mar es mayor en la estación de Dublín y menor en las estaciones de Ceuta, Cádiz y Reykjavik durante el período de tiempo de 27 años que en el de 46 años. Por otro lado, se observa que el error en las tendencias es menor cuando el período de estudio es largo (1964-2009) que cuando es corto (1983-2009), de media la tendencia se reduce en $0,31\text{cm dec}^{-1}$.

Los valores de tendencia son significativos (significancia $>95\%$) en

todas las estaciones para el período 1964-2009. Durante el período 1983-2009, únicamente se obtienen tendencias significativas en las estaciones de Cádiz, A Coruña, Brest, Le Havre, Newlyn y Dublín. Las tendencias para las estaciones de Ceuta y Reykjavik no son significativas para el período de 27 años, confirmándose la necesidad de series largas para la realización de una buena climatología.

3.5. Influencia del período

Para analizar la influencia que tiene el período de tiempo en la tendencia del nivel del mar se tomaron dos períodos contiguos y de igual longitud (23 años) uno de 1964 a 1986 y otro de 1987 a 2009. En la Figura 5 se muestran las tendencias obtenidas con una fiabilidad $> 95\%$.

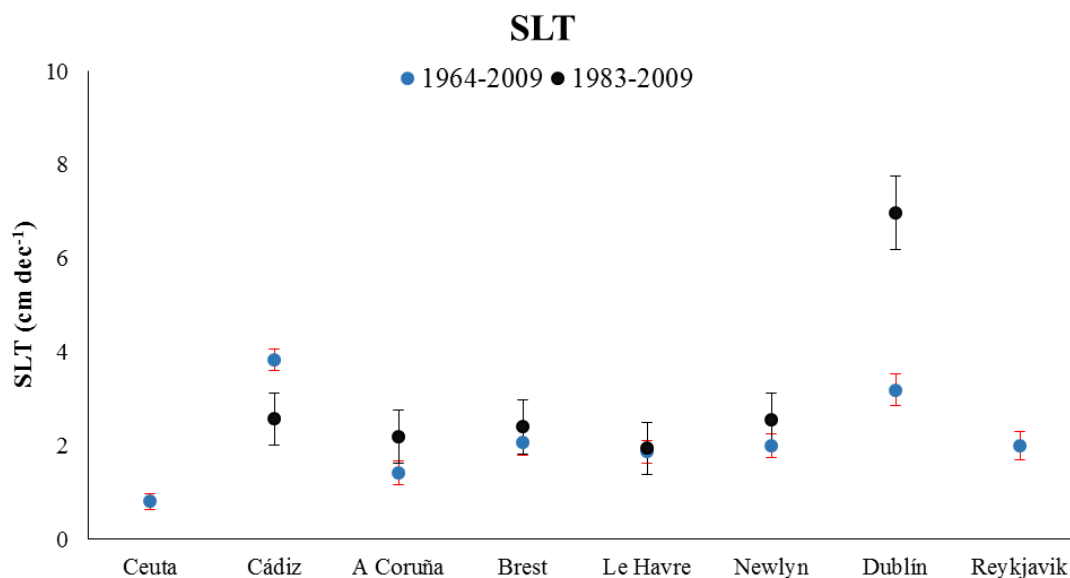


Fig. 5. Tendencia del nivel del mar y error con una fiabilidad $>95\%$.

Comparando las tendencias para ambos períodos se observa que se mantiene una tendencia al aumento del nivel del mar para los dos períodos de tiempo para todas las estaciones excepto para la de Dublín. Esta estación durante el período 1964-1986 muestra una tendencia a la disminución del nivel del

mar de $-1,69 \pm 0,78\text{ cm dec}^{-1}$ y durante el período 1987- 2009 muestra un fuerte incremento en el nivel del mar de $8,05 \pm 1,02\text{ cm dec}^{-1}$, ambos significativos. Este cambio de tendencia pone de manifiesto la importancia del período de análisis.

Para el período 1964-1986 la tendencia es significativa en las estaciones de Ceuta, Cádiz, Le Havre, Newlyn, Dublín y Reykjavik. Para el período 1987-2009 la tendencia es significativa en las estaciones de A Coruña, Brest, Le Havre, Newlyn y Dublín. Esto implica que sólo tres estaciones, Le Havre, Newlyn y Dublín, muestran significancia en sus tendencias en ambos períodos aunque hay que tener en cuenta que las tendencias calculadas para la estación de Le Havre pueden estar condicionadas por la climatología. Comparando los dos períodos para las estaciones con significancia estadística se aprecia un aumento de la tendencia de SLR. En la estación de Le Havre se obtiene el menor porcentaje de

variación, un incremento del 9,05%, mientras que el mayor porcentaje de cambio corresponde a la estación de Dublín es del 576,33%.

4. Conclusiones

De las quince estaciones estudiadas se observa una tendencia positiva del aumento del nivel del mar en doce, en las otras tres estaciones (Algeciras, Ceuta y St. John de Luz/Socoa) la tendencia no es concluyente.

En la tabla 5 se muestran los resultados bibliográficos y los obtenidos en este estudio para su comparación.

ESTACIÓN	FUENTE	PERÍODO	TENDENCIA (cm dec ⁻¹)
Santa Cruz de Tenerife	NOAA	1927-2009	1,62±0,31
	Marcos et al., 2013	1927-2010	2,09±0,04
	Presente estudio	1993-2011	5,08±0,68
Ceuta	NOAA	1944-2009	0,52±0,29
	Marcos et al., 2013	1944-2002	0,5±0,1
	Presente estudio	1945-2012	0,15±0,17
Algeciras	NOAA	1943-2002	0,43±0,30
	Presente estudio	1944-2001	-0,02±0,18
Cádiz	NOAA	1961-2001	4,02±0,74
	Marcos et al., 2013	1961-2001	4,0±0,3
	Presente estudio	1961-2012	3,34±0,40
Lagos	NOAA	1908-1999	1,50±0,24
	Marcos et al., 2013	1908-1999	1,5±0,1
	Wöppelman et al., 2007	61 años	1,35±0,18
	Presente estudio	1909-1987	1,14±0,14
Cascais	NOAA	1982-1993	1,27±0,15
	Marcos et al., 2013	1882-2005	1,3±0,1
	Wöppelman et al., 2007	97 años	1,22±0,10
	Presente estudio	1882-1993	0,96±0,09
Ponta Delgada	NOAA	1975-2007	2,58±1,10
	Presente estudio	1979-2006	2,64±0,61
A Coruña	NOAA	1943-2012	1,53±0,43
	Marcos et al., 2013	1943-2001	1,4±0,2
	Gómez Gesteira et al., 2011	1943-2004	1,67
	Presente estudio	1944-2012	2,09±0,24
St. John de Luz	NOAA	1942-2011	1,40±0,58
	Marcos et al., 2013	1942-1996	2,1±0,3
	Chust et al., 2009	1942-2006	2,09±0,42
	Presente estudio	1964-2011	0,59±0,29
Brest	NOAA	1908-1999	1,05±0,08
	Wöppelman et al., 2007	87 años	1,40±0,05
	Haigh et al., 2009	1900-2006	1,41±0,11
	Presente estudio	1807-2011	1,21±0,05
Le Havre	NOAA	1941-2011	2,15±0,52

	Haigh et al., 2009	1959-2006	2,53±0,39
	Presente estudio	1959-2011	2,39±0,33
Newlyn	NOAA	1915-2011	1,76±0,17
	Wöppelman et al., 2007	87 años	1,69±0,11
	Haigh et al., 2009	1916-2006	1,74±0,10
	Presente estudio	1916-2012	1,94±0,10
Dublín	NOAA	1938-2001	0,07±0,40
	Haigh et al., 2009	1938-2001	0,20±0,27
	Presente estudio	1938-2009	1,00±0,32
Stornoway	NOAA	1977-2011	1,92±0,94
	Haigh et al., 2009	1977-2006	1,83±0,69
	Presente estudio	1977-2012	1,66±0,59
Reykjavik	NOAA	1953-2011	2,33±0,50
	Presente estudio	1957-2012	2,26±0,33

TABLA 5. Comparación entre el valor de tendencia del nivel del mar calculado en el presente estudio y los valores bibliográficos.

En las estaciones de Santa Cruz de Tenerife y Dublín la tendencia obtenida es superior a los valores bibliográficos y esta discrepancia puede deberse a la diferencia entre los períodos de estudio. Las tendencias obtenidas en las estaciones de Ceuta, Algeciras, Cádiz, Lagos, Cascais, Ponta Delgada, Le Havre, Newlyn, Stornoway y Reykjavik son estadísticamente equiparables a los valores bibliográficos. En la estación de A Coruña la tendencia obtenida es superior a la obtenida por Gómez Gesteira et al., (2011) y Marcos et al., (2013) y superior pero estadísticamente equiparable a la obtenida por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA). En la estación de St John de Luz el valor es inferior al obtenido por Marcos et al. (2013) y al obtenido por Chust et al. (2009). Además, es ligeramente inferior pero equiparable al obtenido por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA). Lo mismo sucede en la estación de Brest, el valor es inferior al obtenido por Wöppelman et al., (2007) y al obtenido por Haigh et al. (2009) y estadísticamente equiparable al obtenido por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).

De la correlación entre estaciones para el período 1964- 2009 se obtienen dos sub-zonas de comportamiento del nivel del mar similar. Una al Sur englobando las estaciones de Ceuta y Cádiz y otra al Norte con las de A Coruña, St. John de Luz, Brest, le Havre, Newlyn y Dublín. Las únicas estaciones con correlación negativa (es decir con comportamientos de tendencia del nivel del mar opuestos) son Reykjavik y Ceuta y Reykjavik y St. John de Luz.

Del estudio de la tendencia en períodos de diferente longitud se puede concluir que las tendencias son más significativas cuanto mayor es el período considerado.

El estudio de tendencias en diferentes períodos de igual longitud indica un aumento de la tendencia en el período más reciente (1983- 2009). Este aumento ha sido especialmente intenso en la estación de Dublín.

Referencias

Chust G. et all. (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* No 84 (2009) page 453–462.

- Gómez- Gesteira, M, Gimeno, L, Decastro, M, Lorenzo, MN, Alvarez, I, Nieto, R, Taboada, JJ, Crespo AJC, Ramos, AM, Iglesias, I, Gómez-Gesteira, JL, Santos, FE, Barriopedro, D, Trigo, IF (2011). The state of Climate in NW Iberia. *Climate Research* 48 (2, 3), 109-144. Doi: 10.3354/cr01017.
- Gornitz, V (1995). A comparison of differences between recent and late Holocene sea level trends from Eastern North America and other selected regions. *Journal of Coastal Research Special Issue No. 17: Holocene Cycles: Climate, Sea Levels, and Sedimentation*, pp. 287-297.
- Haigh, I, Nicholls, R, Wells, N (2009). "Mean sea level trends around the English Channel over 20th century and their wider context". *Continental Shelf Research Volume 29, Issue 17, 30 September 2009, Pages 2083–2098*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). "Fourth Assessment Report: Climate Change".
- International Hydrographic Organization (1953). "North Atlantic Ocean and its Sub-divisions".
- Marcos, M, Puyol, B, Calataf, FM, Woppelman, G (2013). Sea level changes at Tenerife Island (NE Tropical Atlantic) since 1927. *Journal of Geophysical research* 118 Issue 10. Doi: 10.1002/JGRC.20377.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, <http://www.noaa.gov>
- OSPAR Commission (2010). Quality status report 2010, chapter 2 The North-East Atlantic.
- Peltier, W. R (2001). Global Glacial Isostatic Adjustment and Modern Instrumental Records of Relative Sea level History. Douglas et al (eds) *Sea Level Rise: History and Consequences*. International Geoph. Series. No 75. Academic Press.
- Tel Pérez, E (2007). Variabilidad y tendencias del nivel del mar en las costas de la península Ibérica y zonas limítrofes: su relación con los parámetros meteorológicos. Tesis Doctorales del Instituto Español de Oceanografía. Issue 26, 2007, Pages 10-349.
- Tol R. S. J. (2007). The double trade-off between adaptation and mitigation for sea level rise: an application of FUND. *Mitig Adapt Strat Glob Change 2007 Volume 12 pages 741-753*. DOI: 10.107/S11027-007-9097-2.
- Wöpelmann, G, Martin Miguez, B, Bouin, N, Altamimi, Z (2007). Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide. *Global and Planetary Change Volume 57, Issues 3–4, June 2007, Pages 396–406*. DOI: 10.1016/J.GLOPLACHA.2007.02.002.