



Fraile Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD ASOCIADA AL AUMENTO DE LA SUPERFICIE INUNDABLE POR LA SUBIDA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN LA COSTA ENTRE CÁDIZ Y TARIFA

FRAILE JURADO, P. y OJEDA ZÚJAR, J.

Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla,
C/ Doña María de Padilla s/n, 41004, Sevilla.

pfraile@us.es y zujar@us.es

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis de la peligrosidad asociada a la subida del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático en la costa situada entre los municipios de Cádiz y Tarifa (Cádiz). A partir de la combinación de las tasas de cambio del nivel medio del mar de los mareógrafos localizados en ambos puertos y de un modelo global de previsiones de cambio del nivel medio del mar en el futuro se identifican las celdillas de un modelo digital de elevaciones de la superficie emergida que quedarían por debajo de una cota local de inundación. Dicha cota local de inundación es diferente en cada punto de la costa, debido a las características oceanográficas de la misma, lo que ha exigido procesos de interpolación y análisis espacial que permitan una aproximación fidedigna para realizar el análisis de la peligrosidad. Los resultados obtenidos muestran incrementos generalizados de las áreas inundables en las llanuras costeras del área estudiada.

Palabras clave: Subida del nivel del mar, peligrosidad, mareógrafo, MDE, espacialización, interpolación espacial, pleamar, análisis de superficies.

ASSESSMENT OF FLOODED AREA HAZARD BECAUSE OF SEA LEVEL RISE IN THE CADIZ - TARIFA SHORELINE

ABSTRACT

The aim of this paper is to make an analysis of the hazards associated to sea level rise as a consequence of climate change on the shoreline between the Cadiz and Tarifa (Cádiz). By means of the combination of the sea level change rates identified in the tide gauges located in both ports and a global model that estimates the changes in mean sea level in the future, the cells of a digital

Recibido: 10/6/2012

Aceptada versión definitiva: 1/10/2012

© Los autores

www.geo-focus.org

Fraile Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

elevation model are identified as "under future sea level" when they are below a local level of inundation. Such local flood elevation is different for each point on the coast, due to its oceanographic characteristics. This has required interpolation processes and spatial analysis that allow a reliable approach for the analysis of hazards. The results show widespread increases in inundated areas in the coastal plains of the study area.

Keywords: sea level rise, vulnerability, tide gauge, DEM, spatialization, spatial interpolation, high tide, analysis of surfaces.

1. Introducción

De todas las consecuencias del cambio climático, la subida del nivel medio del mar es probablemente la que muestra menores incertidumbres acerca de su probabilidad de ocurrencia durante las próximas décadas. Por ello, existen numerosas publicaciones que abordan el cálculo, a escalas globales, regionales e incluso locales, de los efectos de dicha subida sobre diferentes entornos naturales o antrópicos.

Existen dos grandes aproximaciones para evaluar la vulnerabilidad costera ante una subida del nivel medio del mar. La primera de ellas consiste en la elaboración de índices relativos, que identifican los sectores más expuestos de cualquier tramo costero (Gornitz y White, 1992; Gornitz *et al.*, 1994; Thieler, 2009; Ojeda *et al.*, 2009; Hinkel y Klein, 2009; Warrick, 2009). La segunda aproximación consiste en el análisis de las áreas potencialmente inundables a través de la identificación de las celdillas de un modelo digital de elevaciones que queden por debajo de una determinada cota de inundación futura (Titus y Richmann, 2000; Priestnall, 2000; Gesch, 2009; Zhang, 2010; Fraile, 2011).

Dentro de este último tipo de aproximaciones, la mayor parte de los trabajos publicados utilizan i) modelos exclusivamente globales sobre el comportamiento futuro del nivel medio del mar, en los que se asume que este subirá de igual forma en todas las costas del planeta; o bien ii) estudios a escala de detalle donde se incorpora la influencia de los factores locales tales como la tectónica local y/o regional (nivel del mar relativo), rango mareal, sobreelevaciones de temporal, etc. La asunción de uno u otro tiene importantes implicaciones de cara al análisis de la peligrosidad, condición necesaria para la posterior evaluación de la vulnerabilidad e impactos derivados de la subida del nivel medio del mar.

Numerosos organismos han alentado la realización de estudios a escala local (Ministerio de Medio Ambiente, 2005; IPCC, 2007). Sin embargo, este tipo de trabajos presentan un problema relacionado con la falta de información a lo largo de la costa: la red de mareógrafos existentes no suele ser densa en ningún sector costero del planeta. En España existen tan solo 12 mareógrafos con series temporales de más de 20 años para un total de unos 4000 km de costa. Aunque es posible interpretar y predecir el comportamiento del nivel medio del mar en el próximo siglo en los entornos inmediatos de los mareógrafos a partir de la asunción de ciertos parámetros futuros y de

Fraile Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

sus interrelaciones (escenarios y modelos climáticos), los sectores costeros alejados de estos representan una incógnita, más allá de la asunción de modelos globales de cambio del nivel medio del mar, que eliminan cualquier componente local. En este trabajo se trata de dar respuesta a la necesidad de predicción de riesgo en este tipo de áreas intermedias, alejadas de mareógrafos.

2. Área de estudio

El área de estudio abarca el litoral situado entre la Bahía de Cádiz (36° 37'N y 6°21' W) y la Punta de Tarifa (36°00'N y 5°36'W), cubriendo por lo tanto la mayor parte de la costa atlántica de la provincia de Cádiz. Se ha elegido este sector por estar situado entre los mareógrafos de Cádiz y de Tarifa, los mareógrafos contiguos con series más largas de Andalucía, y por representar un sector costero lo suficientemente variado (acantilados, playas, marismas...) y amplio (60 km en línea recta) como para poder evaluar la metodología a desarrollar ([figura 1](#)).

Esta costa se desarrolla sobre materiales de relleno de la prefosa alpina de la Depresión del Guadalquivir y sobre los materiales del Subbético en la costa de Cádiz junto a los flyschs del Campo de Gibraltar. Geomorfológicamente, está fuertemente compartimentada por un complejo sistema de fallas, y esto, junto con la ausencia de grandes ríos que aporten un gran excedente sedimentario, condiciona la formación de unidades sedimentarias, las cuales presentan un tamaño menor que las que se pueden encontrar en la vecina costa de Huelva.

En la costa atlántica gaditana, la significativa compartimentación tectónica y la importancia de la protección de amplios sectores litorales por la presencia de bahías como la de Cádiz y Algeciras, provocan que las formaciones arenosas de mayor tamaño sean las playas-barrera progradantes, así como extensos sectores de marismas mareales. En el resto de la costa, más expuesta al oleaje, aparece una sucesión de playas y acantilados, también sectores dunares y tómbolos. En el Estrecho de Gibraltar destaca la presencia de una costa rocosa (Moreira y Ojeda, 2003).

Se trata de una costa en la que se observa una transición entre un régimen mesomareal, que alcanza en el sector norte de la provincia un rango mareal de unos 3,4 metros, semejante al de la Bahía de Cádiz (Tejedor y Bruno, 1996; Fraile, 2011), y el comienzo de costas de régimen micromareal propias del Mar Mediterráneo, en el entorno del Estrecho de Gibraltar, donde el rango disminuye hasta 1,3 m (Fraile, 2011).

3. Objetivo

El objetivo de este trabajo es identificar los espacios potencialmente inundables por la pleamar ante una previsible subida del nivel medio del mar en el año 2100 en el tramo costero Cádiz – Tarifa, comparando la extensión de las áreas inundadas por la pleamar en la actualidad con la simulación de las áreas inundables en el año 2100.

4. Datos

Para el análisis y representación espacial realizados en este trabajo se emplearon cuatro tipos de datos:

- a. Series de niveles del mar medios mensuales de los mareógrafos de Cádiz y Tarifa, procedentes del Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), para el periodo 1961-2009.
- b. Altura local de la pleamar, de coeficiente 0,7, para los puertos atlánticos de la provincia de Cádiz, simulada por Puertos del Estado correspondiente al día 29 de junio de 2012.
- c. Modelo Digital del Terreno elaborado por la Junta de Andalucía en 2005 (*MDE_Junta* en el resto del texto), con un tamaño de celdilla de 10 metros, para toda la Comunidad Autónoma. La precisión vertical de este MDT oscila entre 1 y 2 metros, dada su fuente de información básica (vuelo fotogramétrico a escala 1:20.000). En algunos sectores (marismas) en que ha sido testada su precisión respecto a datos Lidar, presenta un error vertical medio de 0,68 metros respecto a un MDE Lidar, de mayor precisión (Ojeda *et al.*, 2006).
- d. *Mapa Fisiográfico del Litoral Andaluz*, elaborado por la Junta de Andalucía, en formato vectorial.

5. Métodos

El método aplicado consistió esencialmente de tres pasos orientados a comparar la extensión de la superficie inundable por la pleamar en la actualidad y en el año 2100: i) en primer lugar, el tratamiento estadístico de las series temporales de los mareógrafos de Cádiz y de Tarifa, que junto a la información sobre el rango mareal local de ambos puertos sirvió para determinar la cota de inundación máxima por pleamar en el horizonte del año 2100; ii) en segundo lugar, los procesos de interpolación espacial que permitieron simular la superficie marina de la cota local de inundación a lo largo de toda la costa de Cádiz, y iii) en tercer lugar, el análisis espacial resultante de la comparación entre la superficie marina de inundación interpolada a lo largo de la costa y un MDE de la costa de Cádiz. En cuarto lugar se caracterizaron los espacios inundables a partir de sus morfologías costeras.

- a) Tratamiento estadístico de las series de registros de los mareógrafos para la determinación de la cota de inundación local máxima en el año 2100

En primer lugar, se obtuvieron las tasas de cambio del nivel medio del mar (indicador empleado usualmente para evaluar las subidas registradas en el pasado) en los mareógrafos de Cádiz y de Tarifa, mediante un análisis de regresión lineal, asumiendo que el coeficiente de la recta de regresión resultante es representativo de la tendencia de la serie estadística (Kendall y Ord, 1990; Pugh, 2004). Además, se evaluó la correlación de ambas series temporales, obteniendo un

Fraille Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

coeficiente de correlación de Pearson de 0,91, lo cual es un indicador aparente de la homogeneidad estadística de ambas series.

Para poder realizar una predicción sobre el comportamiento futuro del nivel medio del mar en ambos mareógrafos, es preciso integrar estos datos con los modelos globales de cambio del nivel medio del mar, puesto que la mayor parte de la bibliografía sobre el tema admite una probable aceleración de los procesos de subida del nivel medio del mar común a todo el planeta. Para ello se empleó el escenario A1F1 del IPCC (2007), que asumiendo un crecimiento económico global basado en los combustibles fósiles, indica una subida esperada de 53 +/- 16 cm. Puesto que el propio IPCC ha estimado una subida del nivel medio del mar de 1,7 mm /año durante las últimas décadas, es preciso considerar que las diferencias entre las tasas locales registradas en ambos mareógrafos y la subida global registrada en el mismo período se deben a elementos locales, entre los que se suele citar la tectónica local (IPCC, 2007), además de otro tipo de fenómenos, como la isostasia (Tel y García, 2004).

Para integrar tanto la tasa registrada localmente en cualquier mareógrafo como las expectativas futuras consideradas en cualquier modelo futuro de cambio del nivel medio del mar basado en las asunciones del IPCC, es preciso sustraer la componente de subida global ya ocurrida en el pasado (1,7 mm/ año) a las observaciones tomadas en mareógrafos (Titus y Narayan, 1998), evitando así contar por duplicado dicha tasa de 1,7 mm/ año (puesto que de no sustraerla, estaría presente tanto en la tasa registrada localmente como en la subida global) resultando la expresión 1:

$$S_l = S_g + (r-1,7) \times t \quad (1)$$

Siendo:

S_l la subida local futura del nivel medio del mar.

S_g la subida del nivel del mar obtenida a partir de un modelo global de cambio del nivel del mar.

r la tasa local de cambio del nivel medio del mar, en mm/ año.

t el tiempo en número de años para la fecha a calcular.

Para calcular la cota de inundación por pleamar en la costa en el futuro, y asumiendo que no existirán cambios significativos en los rangos mareales como consecuencia de una subida del nivel medio del mar (Pugh, 2004), se añadió el componente mareal a la expresión anterior, resultando la expresión 2:

$$S_l = R/2 + S_g + (r-1,7) \times t \quad (2)$$

Siendo R el rango mareal local.

Para poder determinar la cota local de inundación en ambos puertos en el año 2100, de acuerdo con el umbral alto del escenario A1F1, es preciso sumar la mitad de los rangos mareales en cada puerto ([tabla 1](#)), puesto que indican el alcance máximo del agua en condiciones de una marea de coeficiente 0,7. Se eligió el coeficiente de marea 0,7 por expresar la situación media de todas las

Fraille Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

mareas (Tejedor y Bruno, 1996). Por lo tanto, los resultados que se deriven del análisis de estos datos no deben ser entendidos como valores extremos, sino como la identificación de los espacios sometidos a inundaciones de manera habitual.

Sin embargo, esta información únicamente sirve para la evaluación de la peligrosidad en el entorno inmediato de los mareógrafos de Cádiz y de Tarifa ([tabla 1](#)), pero no de los sectores intermedios donde no existen mareógrafos ([tabla 2](#)), dada la alta variabilidad espacial de las variables estudiadas. Por lo tanto, son necesarios procesos de interpolación espacial para poder realizar un correcto análisis de la peligrosidad en el resto del área de estudio.

b) Interpolación espacial de las superficies marinas de inundación

Para realizar un análisis de la peligrosidad tal y como se plantea en este trabajo es preciso superponer dos superficies irregulares para comparar sus alturas relativas: la superficie emergida, mediante un MDE, y la superficie marina que inunda a la anterior, resultado de la interpolación de los valores puntuales de los mareógrafos utilizados para conseguir una superficie marina continua.

Para el uso de una representación de la superficie continental no fue preciso elaborar ningún nuevo MDE, puesto que se empleó un modelo previamente elaborado (*MDE_Junta*).

Sin embargo, para conocer la cota máxima de inundación en cualquier punto de la costa del área de estudio tanto en el presente como en el futuro fue necesario elaborar dos grids de superficies marinas: el de *subida local del nivel medio del mar*, a partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior para Cádiz y Tarifa, y el de *superficie marina de inundación actual*, que representa la altura local de la pleamar de coeficiente 0,7, a partir de los datos de la [tabla 2](#).

La suma de ambos *grids* permitió obtener el *grid superficie marina de inundación futura*, por lo que se dispuso de dos *grids* de superficies marinas de inundación (actual y futura).

Una fase crítica del proceso de trabajo de la elaboración de ambos *grids* consistió en desarrollar un método que permitiese obtener una superficie marina con valores "tierra-adentro" idénticos a los que tuviera la celdilla más cercana ortogonalmente situada en la línea de costa, puesto que el objetivo del trabajo no solo era interpolar la información disponible en los mareógrafos para la costa atlántica de Cádiz, sino identificar las celdillas de la superficie emergida cuya altitud fuese menor que la de cualquiera de los dos *grids* anteriores. Por lo tanto, los *grids* que dieron lugar a los de *superficie marina de inundación actual* y *superficie marina de inundación futura* fueron elaborados mediante el siguiente proceso:

1. A partir de la localización de cada mareógrafo, se trazaron líneas que unían las diferentes localizaciones. Estas líneas sirvieron de base para elaborar segmentos perpendiculares de 25 km de longitud (asumida como la distancia máxima de penetración futura del mar en el continente) en cada uno de los extremos del área de estudio, es decir, en Cádiz y Tarifa. A estos segmentos se otorgó como valor la cota máxima de inundación calculada en los

Fraille Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

capítulos anteriores ([figura 2.A](#)). A continuación, y a partir de estas líneas perpendiculares, se elaboraron superficies TIN que fueron convertidas en grid.

2. El siguiente paso consistió en el trazado de transectos perpendiculares a una línea de costa simplificada a través de un suavizado Paek (2.B), mediante el software DSAS (Digital Analysis for Shoreline System), elaborado por el USGS (Thieler, 2009; Thieler *et al.*, 2009). Las intersecciones de estos transectos con la línea de costa fueron convertidas en un *shape* puntual, que fue empleado para extraer los valores de la superficie TIN elaborada previamente.

3. Mediante la opción *join espacial* en ArcGis 9.3, los valores de cada punto fueron asignados a los transectos sobre los que se encontraban, obteniéndose una nueva serie de transectos perpendiculares a la orientación general de la línea de costa con la información del TIN sobre el que se encontraban ([figura 2.C](#)).

4. Una nueva superficie TIN fue generada a partir de los transectos, convirtiéndose a *grid* posteriormente ([figura 2.D](#)). Con ello se garantiza una total perpendicularidad de cada valor del *grid* sobre la línea de costa en su penetración sobre la superficie emergida, esencial para poder realizar correctamente en el siguiente paso.

c) Delimitación de áreas inundables bajo condiciones de pleamar actuales y futuras

Con el objeto de identificar tanto las celdillas del MDE de la superficie emergida inundables en la actualidad bajo pleamares de coeficiente 0,7 como las inundables en el futuro (año 2100) bajo dicha pleamar, se realizó el siguiente análisis de superficies:

1. Resta de los "grids" *superficie marina de inundación actual* y *superficie marina de inundación futura* al *MDE_Junta*, obteniéndose celdillas con valores negativos -las que quedaron por debajo del nivel de inundación- y positivos -las que quedaron por encima.

2. Reclasificación de las celdillas con valores negativos en una máscara, identificando con valor 1 las celdillas con valores negativos (y por lo tanto identificándolas como inundables), y asignando valor nulo a las que tuvieran valores positivos.

3. La continuidad de la inundación exigía que no pudieran identificarse como inundables las celdillas aisladas de la superficie marina, como ocurre con las celdillas de color negro de la [figura 3](#). Para ello se aplicó un algoritmo de contigüidad que permitiese seleccionar a aquellas celdillas en contacto con la superficie marina o con otra celdilla inundada (sin enlace diagonal).

Como resultado de este proceso se obtuvieron dos *grids* de valor único en los que se identificaron las celdillas inundables bajo una pleamar de coeficiente 0,7 en la actualidad y en el año 2100.

d) Caracterización fisiográfica de las superficies inundables

Con el objetivo de caracterizar la tipología morfológica de las superficies inundables se cruzaron las superficies de inundación generadas en el apartado anterior con el Mapa Fisiográfico del Litoral Andaluz mediante el módulo *intersect* de ArcGIS 9.3, obteniendo dos archivos vectoriales diferentes a partir de los cuales se obtuvieron parámetros estadísticos para cada tipo de unidad fisiográfica afectada.

6. Resultados

Los resultados obtenidos muestran un incremento del área inundable por la pleamar de coeficiente 0,7 en la totalidad del tramo costero entre Cádiz y Tarifa ([tabla 3](#) y [figura 4](#)). Sobre una superficie inundable de 3362 ha en la actualidad en este tramo (en su mayoría marismas, además de otros espacios, como llanuras intermareales de playa), se observa un incremento de 5578,9 ha más, lo cual, en términos relativos, es un 265,9% más de la superficie actual.

La mayor parte de los incrementos del área inundable (el 92%) se concentran en la Bahía de Cádiz ([figura 5](#)), lo cual es coherente con el hecho de que ya en la actualidad el área ocupada por la pleamar en la Bahía de Cádiz supone un 91% del total del área inundada por la marea (3071,7 de 3362,5) ([tabla 4](#)) en el área de estudio. El segundo espacio más afectado por una subida del nivel medio del mar son las Marismas de Barbate ([figura 6](#)), con un incremento de 397,8 ha sobre las 188,8 ha actuales, lo cual supone un 310% más que el área inundada en la actualidad por la pleamar de coeficiente 0,7. El resto del sector costero Cádiz – Tarifa presenta un incremento del espacio inundable más reducido que estos dos espacios, con 57,2 ha, lo que supone un incremento relativo del 56% con respecto a las 102 ha actuales.

Desde el punto de vista de los tipos de unidad fisiográfica ocupadas que pasarían a ser nuevas áreas inundadas por pleamares de coeficiente 0,7, el incremento mayoritario se da en las marismas (áreas de marisma que en el presente no se inundan por pleamares de coeficiente 0,7 sino solo en situaciones de coeficientes mayores), que pasan de 2333 ha a 7096 ha ([tabla 5](#)), lo cual supone un incremento del 204% sobre la superficie inundada en la actualidad, y un 55% del total de los nuevos espacios inundables.

Se observa un incremento de 234 ha de formaciones arenosas litorales inundables, sobre las 152,9 ha inundables actuales, lo cual se puede interpretar como un futuro retroceso de la playa alta (Pendón, 2000) frente a la playa media (zonas intermareales de las playas). En comparación con espacios de marisma, el incremento absoluto el incremento es menor, puesto que son áreas que ya en la actualidad no ocupan un espacio tan extenso como las marismas. En términos relativos supone un incremento del 153%.

Fraille Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

El resto de unidades fisiográficas experimentan incrementos de diversa magnitud. Las unidades fluviales y cauces de río sufrirían un aumento de en torno al 100% de su superficie inundada por la pleamar de coeficiente 0,7. De manera semejante, las unidades antrópicas (infraestructuras, paseos marítimos...) sufrirían un incremento de su superficie inundable de 48 ha. Por último, cabe destacar que 300 ha pasarían a estar inundadas sin pertenecer al Mapa Fisiográfico del Litoral Andaluz, es decir, sin estar consideradas en la actualidad como unidades litorales.

7. Discusión y conclusiones

Desde un punto de vista metodológico, el trabajo realizado demuestra que el tratamiento de los datos puntuales analizados (series temporales de niveles del mar y rangos mareales en los puertos atlánticos de la provincia de Cádiz) constata la variabilidad espacial de las dos variables analizadas, y por lo tanto, la necesidad del desarrollo de metodologías que garanticen una adecuada *espacialización* de los mismos. Esta variabilidad ha sido reconocida en los trabajos que han abordado el análisis de series temporales de niveles del mar tanto procedentes de mareógrafos (Tel y García, 2004) como de satélites altimétricos. En todos ellos se han identificado diferencias en la evolución reciente del nivel medio del mar, provocadas tanto por movimientos de la superficie emergida en la que están anclados los mareógrafos (cambios relativos del nivel medio del mar) como por motivos exclusivamente oceanográficos (cambios absolutos del nivel medio del mar).

En relación a las previsiones de futuro es evidente la necesidad de modelos que permitan conjugar los datos observados localmente con las expectativas globales (modelos climáticos) para ser integrados en el análisis de los riesgos costeros. El método propuesto se basa parcialmente en el trabajo de Titus y Narayan (1998). Sin embargo, es preciso que los principales modelos de referencia recientes (IPCC, 2007; Rahmstorf, 2007; Pfeffer *et al.*, 2008) elaboren o indiquen algún método para que los trabajos, basados en estos modelos, puedan ser aplicados a escala local.

El trabajo desarrollado muestra la importancia de incorporar la dimensión espacial en los estudios de riesgos asociados a la subida del nivel del mar. La *espacialización*, tanto de la superficie terrestre (mediante MDE lo más precisos posibles) como de las superficies marinas, es esencial y crítica para el desarrollo de estudios sobre impactos asociados a las oscilaciones del nivel del mar en escenarios futuros. Si bien se ha avanzado notablemente en la elaboración de MDE de gran precisión vertical y resolución espacial (Thieler, 2009), y en el análisis de las repercusiones de estos avances sobre los análisis de peligrosidad ante una subida del nivel medio del mar (Titus y Richmann, 2000; Thieler, 2009), el análisis de la importancia del modelado de la superficie marina en estos trabajos aun requiere de estudios centrados en este tema.

Asimismo, para la evaluación de la peligrosidad natural por subida del nivel medio del mar, es esencial considerar la importancia de la altura de la pleamar en cualquier sector costero, puesto que delimita niveles del mar notablemente más altos que cualquier incremento futuro del nivel medio del mar.

Fraile Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

Desde el punto de vista de los resultados obtenidos, la identificación de las tasas de cambio del nivel medio del mar en el litoral gaditano permite afirmar que la totalidad de la costa del sector analizado se verá afectada, en mayor o menor medida, por dicha subida. Son numerosas las publicaciones que han analizado estas series tanto en este sector de la costa (Tel y García, 2004, PSMSL), como en el resto de la costa española. En todas ellas se constatan dos elementos: i) cierta diversidad en los resultados obtenidos, en función del período de estudio y de los métodos de análisis empleados; y ii) la señalada diversidad espacial observada entre los registros de los diferentes mareógrafos.

Independientemente de los umbrales de los escenarios utilizados para el estudio de la subida del nivel medio del mar, podemos concluir que las zonas más bajas altimétricamente se van a ver especialmente afectadas por la subida durante el resto del siglo XXI. Este hecho ya ha sido constatado tanto por numerosos autores (Titus y Richmann, 2000; Pugh, 2004) como por informes de carácter nacional e internacional (Ministerio de Medio Ambiente, 2005; IPCC, 2007). Por lo tanto, en el futuro resultará crítico realizar trabajos de carácter local en este tipo de áreas que permitan cuantificar la incidencia y probabilidad de ocurrencia de este riesgo.

Los resultados obtenidos muestran una amplificación de los espacios inundables en el entorno del mareógrafo de Cádiz, en parte como consecuencia del método empleado, que incorpora las tasas relativas de cambio del nivel del mar a la *espacialización* de la peligrosidad, y que por lo tanto introduce valores muy altos en los entornos de los mareógrafos con tasas relativas de cambio del nivel del mar más elevadas. No obstante, es preciso señalar que el método desarrollado asume una ausencia de cambios en la topografía costera en el futuro, utilizando el mismo MDE para el presente que para el año 2100. Aunque es la práctica común en este tipo de trabajos (Titus y Richmann, 2000; Priestnall, 2000; Gesch, 2009; Zhang, 2010; Fraile, 2011), es imprescindible asumir que los resultados publicados presentan un carácter orientativo, válido solo para el escenario elegido (umbral alto del A1F1 del IPCC), aunque necesario para los estudios de riesgos naturales.

El mayor incremento de los espacios inundables se identifica en las áreas de marismas que ya en la actualidad funcionan como tales. Este hecho no se trata de un error propio del método, sino que se debe al coeficiente de marea de 0,7 elegido para el análisis. La subida del nivel del mar, por tanto, implicaría profundas modificaciones en la estructura y dinámica de las áreas de marisma durante el presente siglo. En este sentido, destaca la coherencia del análisis realizado con la literatura científica publicada sobre esta cuestión, en la que el cambio climático se ha identificado a medio plazo como una de las principales amenazas de los humedales de las latitudes medias (Dean *et al.*, 1987).

Aunque el incremento de las áreas inundables en formaciones arenosas litorales (playas, islas barrera, flechas litorales) sea escaso en términos absolutos en comparación con otras morfologías costeras, es preciso considerar las pérdidas volumétricas que este avance marino implicaría en las costas del sector estudiado, es decir, su relevancia en tres dimensiones, así como la importancia económica y social de estas zonas.

Fraile Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

Bibliografía

Dean, R. G. (1987): *Responding to changes sea level. Engineering implications*. National Academy Press, Washington, 40-72.

Fraile, P. (2011): *Análisis de las problemáticas asociadas a la espacialización, evolución y representación de niveles del mar presentes y futuros en Andalucía*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 221-298.

Gesch, D.B. (2009): "Analysis of lidar elevation data for improved identification and delineation of lands vulnerable to sea level rise", *Journal of Coastal Research*, 53, 49-58.

Gornitz, V. y White T. W. (1992): *A coastal hazards database for the U.S. West Coast*. ORNL/CDIAC-81, NDP-043C, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 11-31.

Gornitz, V., Richard, C.D., White, T., y Birdwell (1994): "Methods for assessing coastal vulnerability to climate change", *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 12, 327-338.

Hinkel, J. y Klein, R.J.T. (2009): "The DINAS-COAST project: developing a tool for the dynamic and interactive assessment of coastal vulnerability", *Global Environmental Change*, 19, 384-395.

Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC) (2007): *Cambio climático 2007: impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Cambridge University Press, 37-81.

Kendall, M. y Ord, J.K. (1990): *Time Series*. Edward Arnold, Londres, 141-197.

Ministerio de Medio Ambiente (2005): *Principales conclusiones de la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Moreira J.M. y Ojeda, J. (2003): *Las costas*, coord. López Antonio. Barcelona, Ariel, 81-89.

Ojeda J., Álvarez, J., Martín, D. y Fraile, P. (2009): "El uso de las tecnologías de información geográfica para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España)", *Geofocus*, 9, 83-100.

Ojeda Zújar, J., Márquez Pérez, J. y Gómez Molina, A. (2006): *Restitución analítica, estereocorrelación y Lidar para la generación de modelos digitales del terreno en marismas mareales*. AGE.

Pendón, G. (2000): *La costa de Huelva*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva, Huelva, 31-64.

Pfeffer, T., Harper, J. y O'Neel, S. (2008): "Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-Century sea level rise", *Science*, 321.

Priestnall, et al. (2000): "Extracting urban features from LiDAR digital surface models", *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, 65-78.

Pugh, D. (2004): *Changing sea levels*. Cambridge University Press, Cambridge, 157-179.

Fraile Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

Rahmstorf, S. (2007): "A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise", *Science*, Vol. 315, 368-370.

Tejedor, L. y Bruno, M. (1996): "Niveles del mar en la Bahía de Cádiz", *Estudios para la Ordenación, planificación y gestión integrada de las zonas húmedas de la Bahía de Cádiz*. Oikos Tau, Barcelona, 185-229.

Tel, E. y García, M. (2004): "Nivel del mar en las costas españolas y su relación con el clima", *III Congreso de la Asociación Española de Climatología*, Universidad de Cantabria, Santander.

Thieler, R. (2009): *Coastal sensitivity to sea level rise: A focus on the Mid-Atlantic Region*. USGS, 185-193.

Thieler, R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J. L. y Ergul, A. (2009): *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey, 24-49.

Titus, J. y Narayan, V. (1998): *The probability of sea level rise*. EPA, Washington, 143-148.

Titus, J. y Richmann, C. (2001): "Maps of Lands Vulnerable to Sea Level Rise: Modeled Elevations along the U.S. Atlantic y Gulf Coasts", *Climate Research*, 18, 205-228.

Warrick, R. A. (2009): "Using SimCLIM for modeling the impacts of climate extremes in a changing climate: a preliminary case study of household water harvesting in Southeast Queensland", *18th World IMACS/MODSIM Congress*, Cairns, Australia.

Zhang K. (2010): "Analysis of non-linear inundation from sea level rise using Lidar data: A case study for South Florida", *Climatic Change*, 106, 537-565.

9. Agradecimientos

Esta investigación forma parte del desarrollo del proyecto de I+D: "Espacialización y difusión Web de variables demográficas, turísticas y ambientales para la evaluación de la vulnerabilidad asociada a la erosión de playas en la costa andaluza (CSO2010-15807)" financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y por Fondos FEDER.

Frailé Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

TABLAS

Tabla 1. Tasa de cambio del nivel medio del mar, subidas futuras del nivel medio del mar calculadas para los tres umbrales del escenario A1F1 del IPCC, y cotas de inundación presentes y futuras en los mareógrafos de Cádiz y Tarifa.

| | Cádiz | Tarifa |
|--|--------------|---------------|
| Tasa (mm/año) | 4,0 | 0,5 |
| A1F1 bajo, año 2100 (m) | 0,49 | 0,14 |
| A1F1 medio, año 2100 (m) | 0,65 | 0,30 |
| A1F1 alto, año 2100 (m) | 0,82 | 0,47 |
| Cota de inundación actual con marea de coeficiente 0,7 (R/2) (m) | 0,91 | 0,45 |
| Cota de inundación futura (A1F1 alto+ R/2) (m) | 1,85 | 1,02 |

Tabla 2. Rangos mareales con coeficiente de marea de 0,7 en los puertos atlánticos de la provincia de Cádiz.

| Puerto | Rango mareal (m) |
|----------------------|-------------------------|
| Cádiz | 1,84 |
| Conil de la Frontera | 1,66 |
| Barbate | 1,36 |
| Tarifa | 0,90 |

Tabla 3. Resultados totales obtenidos en el área de estudio (C 0,7: coeficiente de marea 0,7).

| COSTA CÁDIZ – TARIFA | | | |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| | Área inundable (ha) | Incremento total (ha) | Incremento relativo |
| Pleamar actual C 0,7 | 3362,5 | - | - |
| Pleamar 2100 C 0,7 | 8941,4 | 5578,9 | 265,9% |

Frailé Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

Tabla 4. Resultados obtenidos en la Bahía de Cádiz, en las Marismas de Barbate, y en el resto del área de estudio(C 0,7: coeficiente de marea 0,7).

| BAHÍA DE CÁDIZ | | | |
|--|-----------|-----------------|---------------------|
| | Área (ha) | Incremento (ha) | Incremento relativo |
| Pleamar actual C 0,7 | 3071,7 | - | - |
| Pleamar 2100 C 0,7 | 8195,6 | 5123,9 | 266,8% |
| MARISMAS DE BARBATE | | | |
| | Área (ha) | Incremento (ha) | Incremento relativo |
| Pleamar actual C 0,7 | 188,8 | - | - |
| Pleamar 2100 C 0,7 | 586,5 | 397,8 | 310,6% |
| RESTO DEL SECTOR CÁDIZ - TARIFA | | | |
| | Área (ha) | Incremento (ha) | Incremento relativo |
| Pleamar actual C 0,7 | 102 | - | - |
| Pleamar 2100 C 0,7 | 159,2 | 57,2 | 56% |

Tabla 5. Resultados obtenidos por tipo de unidad fisiográfica.

| | Pleamar actual C 0,7 (ha) | Pleamar 2100 C 0,7 (ha) | Incremento absoluto (ha) | Incremento relativo |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| Bajos arenosos | 36,07 | 36,92 | 0,85 | 2,37% |
| Cauce de río | 8,86 | 17,80 | 8,94 | 100,87% |
| Caños y estuarios | 607,83 | 1041,02 | 433,19 | 71,27% |
| Elemento antrópicos | 45,35 | 93,51 | 48,16 | 106,21% |
| Formac. arenosas litorales | 152,90 | 386,89 | 233,99 | 153,03% |
| Marismas | 2332,88 | 7095,79 | 4762,91 | 204,16% |
| Otras unidades costeras | 78,39 | 118,44 | 40,05 | 51,10% |
| Superficies de agua | 9,31 | 12,02 | 2,71 | 29,11% |
| Unidades fluviales | 3,45 | 6,57 | 3,12 | 90,59% |

Frailé Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

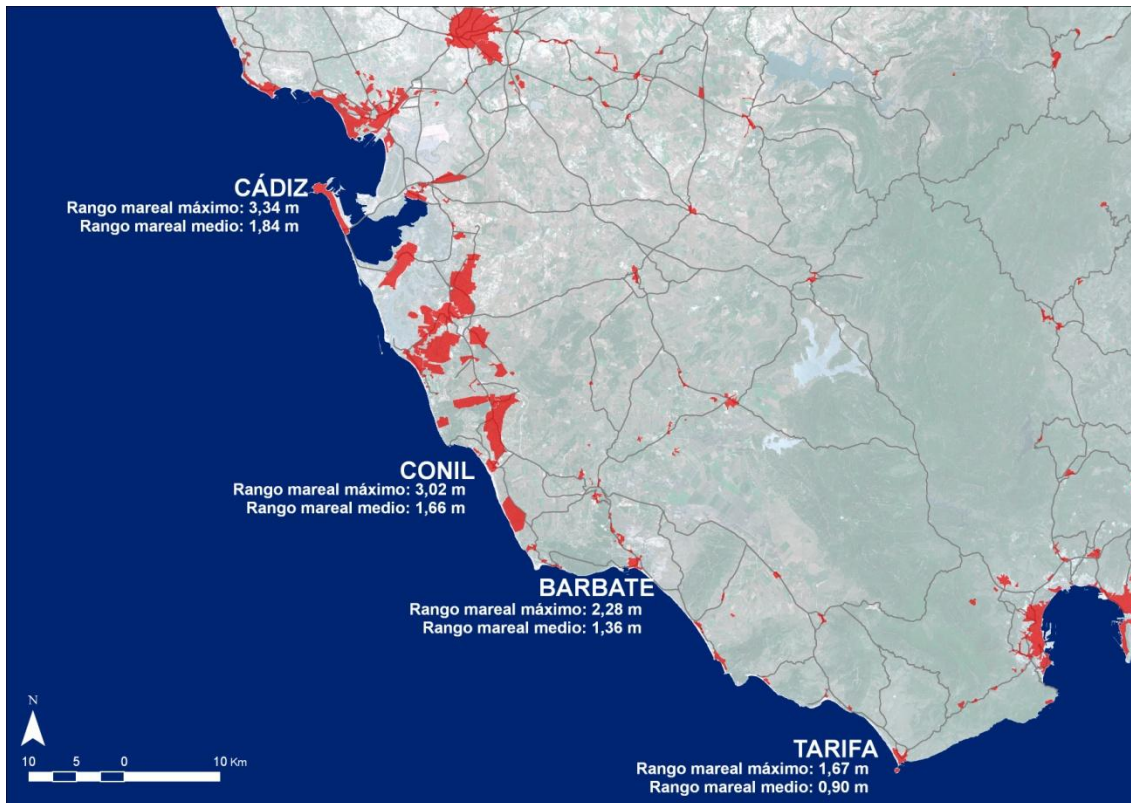


Figura 1. Área de estudio.

Fraile Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

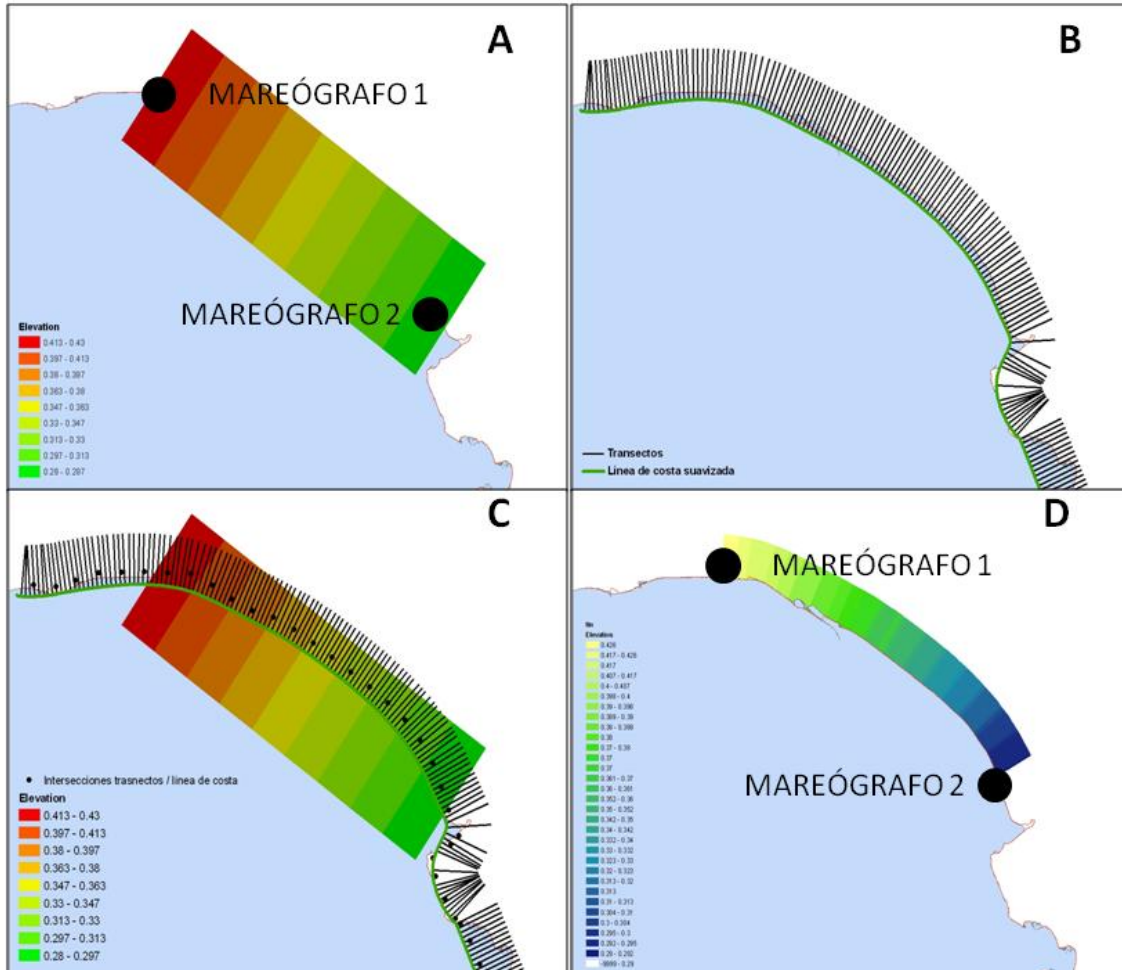


Figura 2. Método de interpolación espacial de niveles del mar para garantizar la perpendicularidad a la línea de costa de los niveles del mar entre dos mareógrafos (1 y 2).

Frailé Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

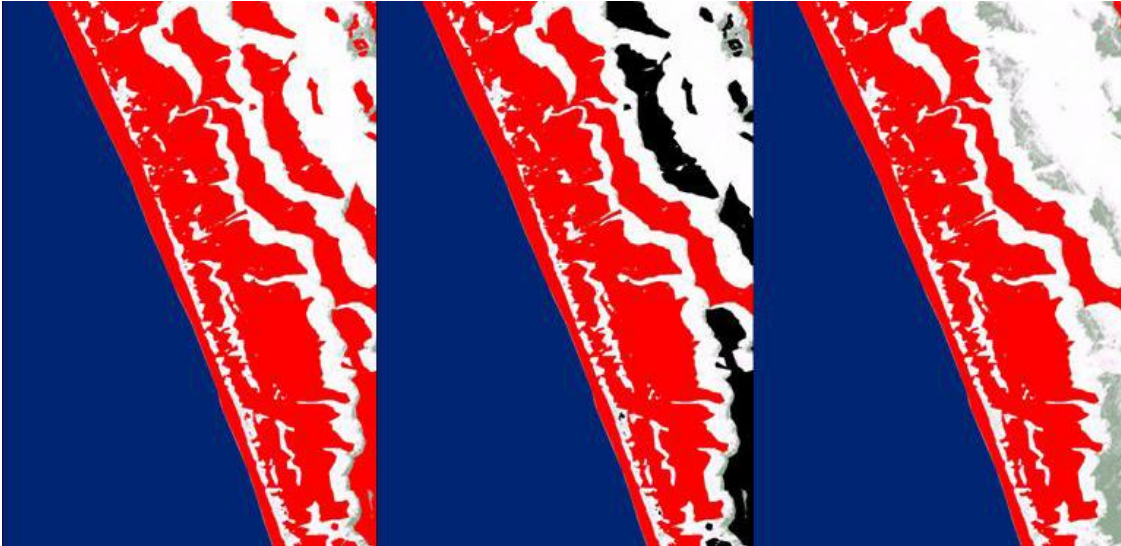


Figura 3. Selección de las celdillas en contacto con la superficie marina mediante la aplicación de un algoritmo de contigüidad espacial. En negro, las celdillas no contiguas.

Frailé Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

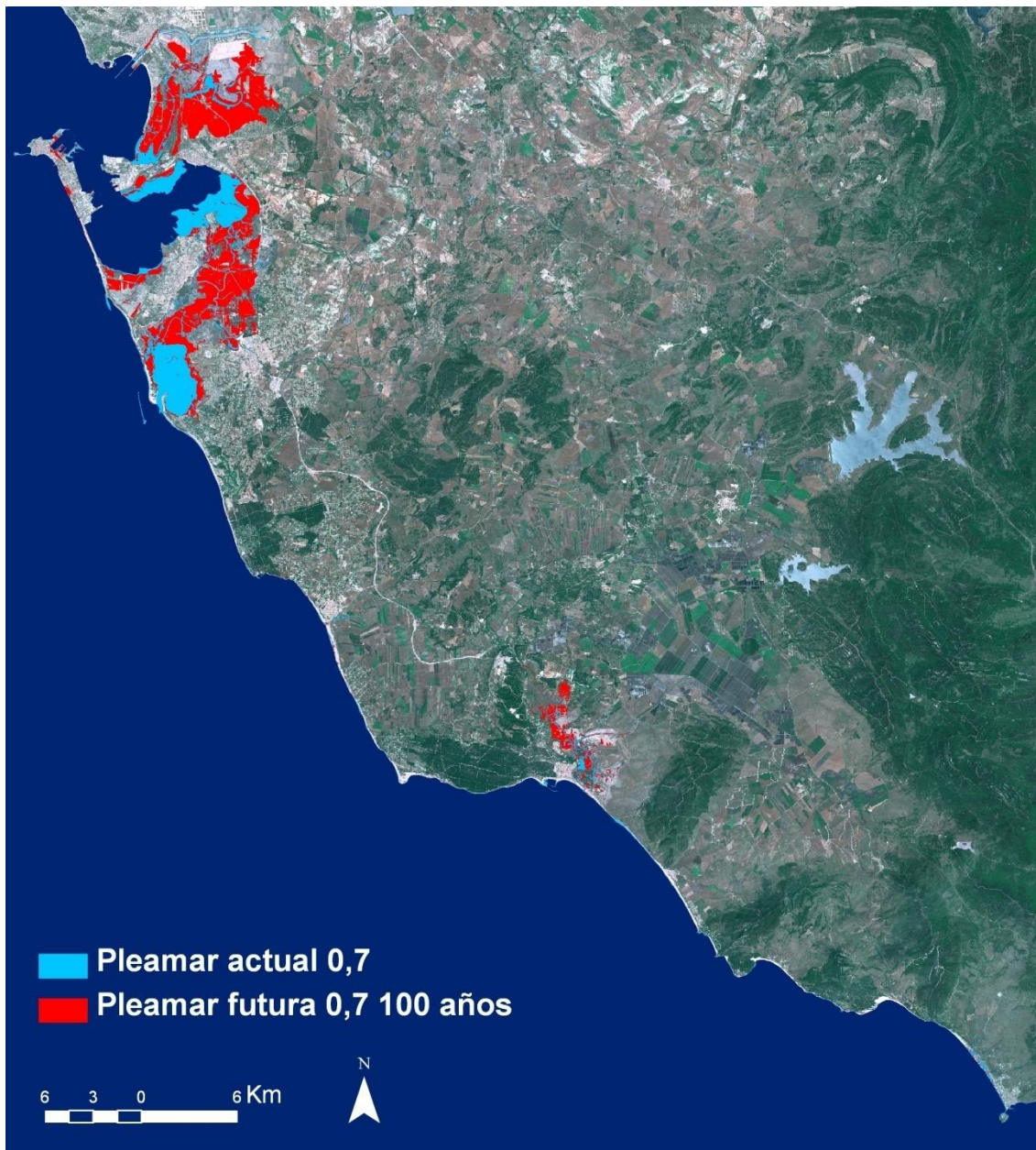


Figura 4. Resultados obtenidos en el área de estudio. En azul, los espacios inundables en la actualidad durante una pleamar de coeficiente 0,7. En rojo, los espacios inundables en el año 2100 durante una pleamar de coeficiente 0,7.

Frailé Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

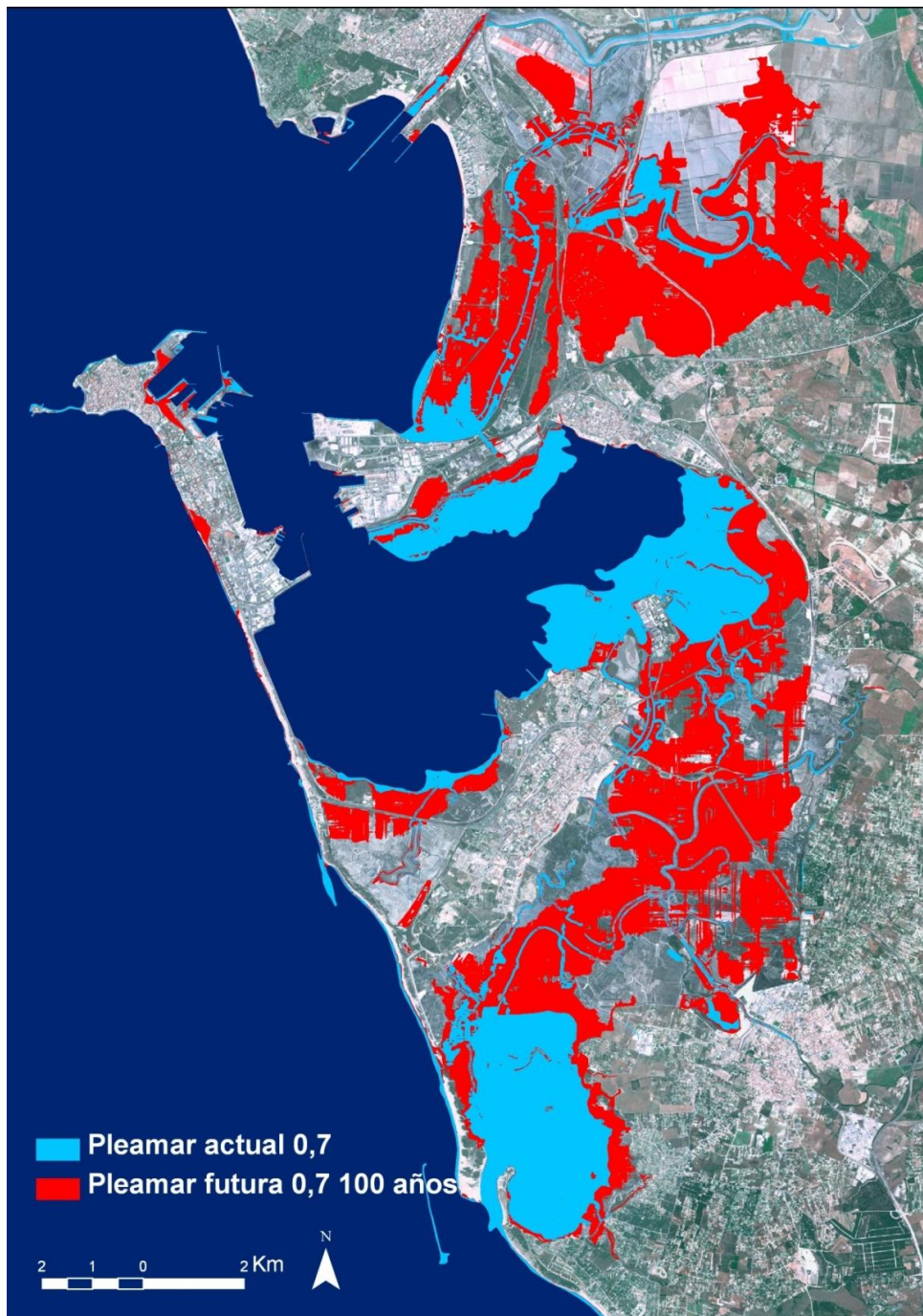


Figura 5. Resultados obtenidos en la Bahía de Cádiz. En azul, los espacios inundables en la actualidad durante una pleamar de coeficiente 0,7. En rojo, los espacios inundables en el año 2100 durante una pleamar de coeficiente 0,7.

Frailé Jurado, P. y Ojeda Zújar, J. (2012): "Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 329-348. ISSN: 1578-5157

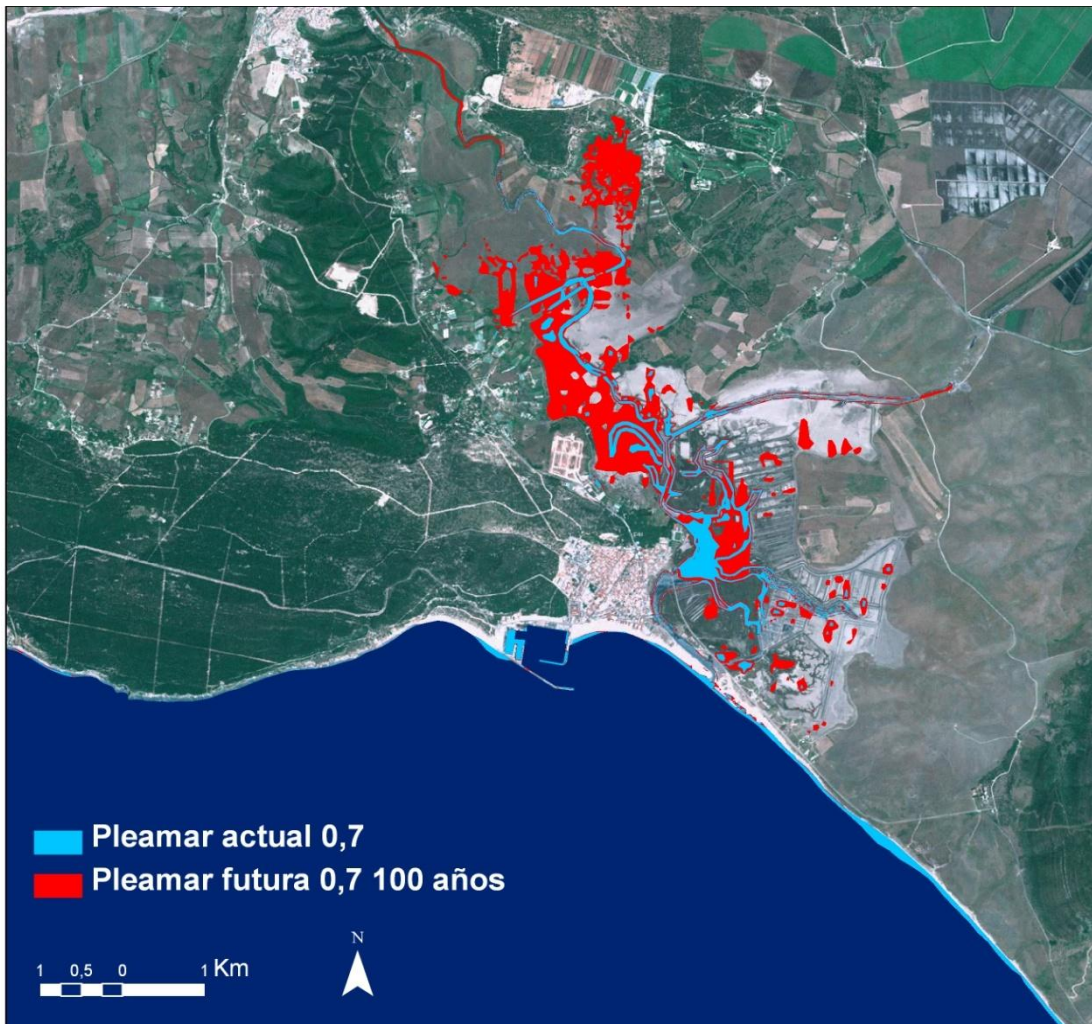


Figura 6. Resultados obtenidos en las Marismas de Barbate. En azul, los espacios inundables en la actualidad durante una pleamar de coeficiente 0,7. En rojo, los espacios inundables en el año 2100 durante una pleamar de coeficiente 0,7.