

ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIÓN PERMANENTE ASOCIADO A LA SUBIDA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN VALDELAGRANA (CÁDIZ)

Fraile¹, P., Álvarez¹, J., & Ojeda¹, J.

¹ Grupo de Ordenación del Litoral y Tecnologías de Información Territorial. Universidad de Sevilla. C/ María de Padilla s/n, 41004. Sevilla. pfraile@us.es

1. INTRODUCCIÓN

La subida del nivel medio del mar es una de las consecuencias directas del cambio climático menos cuestionada, asumiéndose como un efecto obvio resultado del incremento del volumen de las aguas oceánicas (por su aumento de temperatura) y de la masa de las mismas (por el deshielo de glaciares e indlandsis) (IPCC, 2007). Una de la bibliografía científica, por tanto, se ha centrado en cuantificar el rango de dicha subida, a partir de modelos matemáticos y diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero.

Es común encontrar en la literatura científica especializada que las cuatro principales consecuencias de una subida del nivel medio del mar serán los incrementos de los siguientes procesos (Bird, 1993, Warrick e al. 1993, Leatherman y Nichols, 1994, IPCC 2001, 2007, Titus y Richmann 2001, Pugh 2005):

- i) inundación permanente ocasionada diariamente por la marea (Titus y Richmann, 2001, Zhang, 2010).
- ii) inundación episódica en su magnitud y en su frecuencia (Pugh, 2005, IPCC, 2007).
- iii) erosión costera (Bruun, 1954, Van Rijn, 2004, BGS, 2010).
- iv) penetración de agua marina en aguas dulces superficiales y subterráneas (Dean et al., 1990, Guishan, 1992, Tiruneh y Motz, 2001).

El estudio de estas consecuencias suele enfrentarse a 3 obstáculos principales relacionados con la cuantificación de la subida del nivel medio del mar futura, y por tanto previos al modelado de los procesos de inundación, erosión o intrusión de agua salina:

1. La limitación de la principal fuente de información, los mareógrafos, cuyos registros exigen procesos de interpolación espacial a la hora de aplicar su información a otros sectores de la costa debido a su carácter puntual (Fraile, 2011). No obstante, este obstáculo no afecta al problema afrontado en este trabajo, al estar localizada el área a escasa distancia del mareógrafo de referencia. Por otra parte, las series temporales de los mareógrafos presentan discontinuidades notables ya descritas por otros autores (Tel y García, 2000; Pugh, 2005; Fraile, 2005, 2011).
2. La falta de consenso en los métodos empleados para la detección de tendencias de cambio del nivel medio del mar a partir de las series de los mareógrafos, necesarias para realizar proyecciones sobre comportamientos futuros. Este problema ha presentado en la literatura varias aproximaciones como las funciones empíricas ortogonales (Preisendorfer, 1988; Smith et al., 1996; Nerem et al., 1997; Chambers et al., 2002), el análisis armónico (Pugh, 2005) o técnicas de regresión lineal (Méndez, 2004).

3. La dificultad de integración de los factores locales que intervienen en los fenómenos de cambio del nivel medio de mar en las expectativas derivadas de proyecciones a través de modelos climáticos y escenarios. Existen diferentes causas que pueden explicar procesos aparentes de subida del nivel del mar, desde los fenómenos eustásicos (objeto de los modelos XXX sobre cambios globales del nivel medio del mar) a factores locales (movimientos verticales de carácter local de la superficie marina o de la superficie emergida sobre la que está anclado el mareógrafo) (PE, 2009). Una correcta proyección de situaciones futuras y sobre todo de la evaluación de sus consecuencias a escala local y regional requiere obligatoriamente de la contemplación de ambos tipos de procesos (eustásicos y locales), es decir, de cambios relativos del nivel medio del mar

A pesar de estos obstáculos, durante los últimos 15 años se han publicado numerosos trabajos sobre la evaluación de las consecuencias que implicaría la subida del nivel medio del mar para la sociedad desde el punto de vista del riesgo de inundación permanente (Dean et al, 1990, Titus y Rihmann, 2000, Marfay y King, 2005, Cooper et al., 2005, Thieler, 2009, Iglesias et al., 2010), entre otras consecuencias. Estos trabajos se han centrado en calcular cuáles serían los elementos humanos y naturales afectados por dicha subida, por lo que es obligatorio el cálculo y cartografía de la peligrosidad y exposición para identificarlos. La mayor parte de ellos se han realizado mediante la elección de un único modelo climático, un solo escenario futuro de emisiones y un único umbral de probabilidad, lo que supone condicionar el resultado de las predicciones futuras a la elección de estas tres variables, provocando valores altamente dispares.

Por otra parte, la discusión respecto a los resultados de los trabajos de algunos autores (Ramhstorff, 2007, Pfeffer, 2009) en relación a los informes globales (IPCC, 2007), así como la aparición de nuevas variables a considerar, como las consecuencias de los cambios provocados en el geoide introducidas por Mitrovica (2009), han generado un intenso debate científico que cuestiona, entre otras cosas, la elección de los modelos, escenarios y umbrales de probabilidad adecuados. De este modo, cualquier metodología que permita abarcar un abanico más amplio de escenarios, de modelos o de probabilidades en la representación de la peligrosidad y exposición representaría un avance, mostrando resultados con intervalos de confianza más amplios pero menos dependientes de la elección de una de estas variables.

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es evaluar la peligrosidad asociada a los procesos de inundación permanente como consecuencia de la subida del nivel del mar en la playa y marismas de Valdelagrana (Cádiz) en un horizonte de 100 años utilizando un único modelo climático pero abordando la totalidad de los umbrales de probabilidad asociados a diferentes escenarios.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra localizada a 36°30' N y 6°W, en la costa atlántica de la provincia de Cádiz (España). Se ha elegido este área por la diversidad paisajística y ambiental que presenta, al identificarse sectores arenosos litorales, marismas y núcleos urbanos. El rango mareal local es de 3,4 metros en el frente costero (Puertos del Estado, 2011, Tejedor y Bruno, 1996), y la posición del nivel medio del mar local (NMML) está 17 cm por encima del NMMA -nivel medio del mar

en Alicante- (Fraile, 2011). El área emergida sometida a la inundación de la pleamar en la actualidad presenta unas dimensiones de 2831 ha (figura 1).

La mayor parte del frente costero está dominada por la playa de Valdelagrana, separada por un cordón dunar de la margen derecha del estuario del río San Pedro. Las marismas mareales del San Pedro abarcan un área de 8,5 km² del área de estudio. Amplios sectores de las marismas del río San Pedro han sido transformadas en salinas durante los siglos XIX y XX, la mayoría de las cuales permanecen activas en la actualidad, separadas del resto de las marismas por muros (CITA). El canal de desagüe del río San Pedro está casi completamente controlado por la dinámica mareal por lo que su salinidad es semejante a la del agua del Océano Atlántico. En el extremo norte de la playa de Valdelagrana se encuentra la desembocadura del Guadalete, con presencia de algunas instalaciones portuarias en su margen derecha. Los sectores no transformados de las marismas fueron declarados parte del Parque Natural de Marismas de Bahía de Cádiz en 1994.

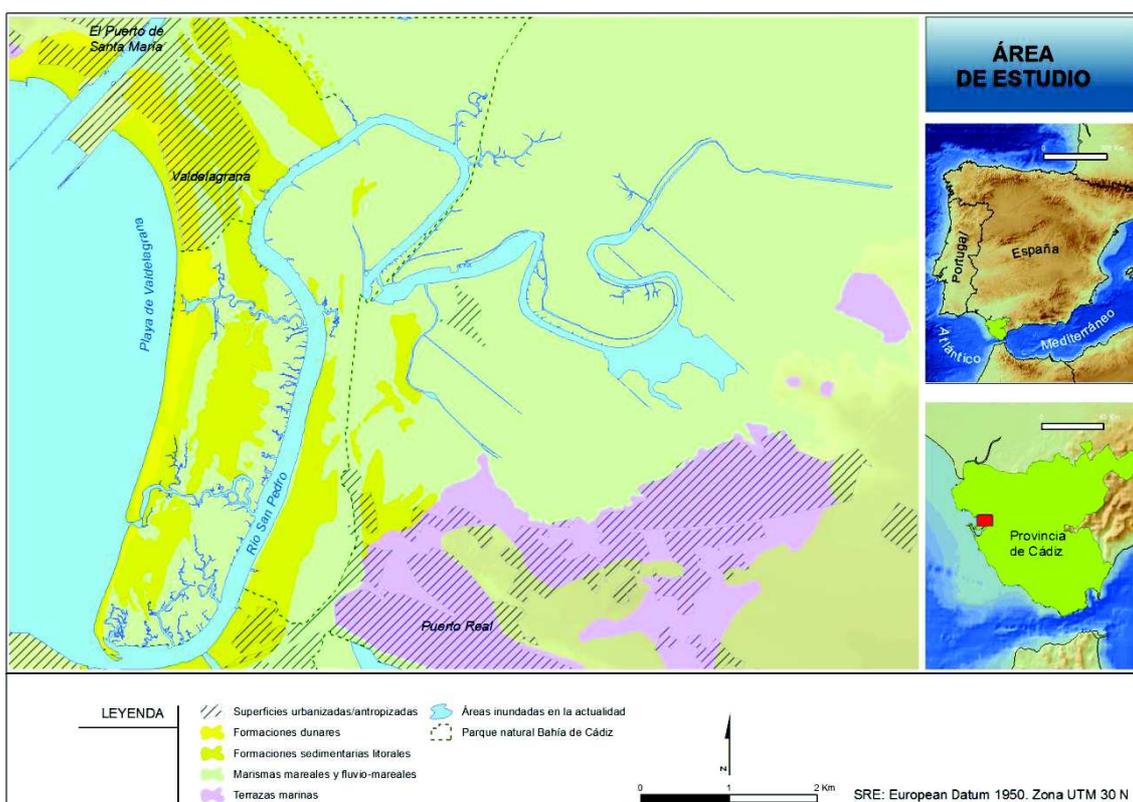


Figura 1. Área de estudio.

4. DATOS

Para la elaboración de este trabajo se han empleado dos tipos de datos:

Datos procedentes del mareógrafo de Cádiz. El mareógrafo de Cádiz es un mareógrafo de presión (Aanderaa WLTS 3791), y está situado en el puerto de Cádiz, a 1,8 km del área de estudio. Este mareógrafo comenzó a recoger datos en 1961, registrando un valor del nivel del mar cada 5 minutos. Estos datos son, desde su comienzo, gestionados por el Instituto Español de Oceanografía (IEO) quien calcula periódicamente las series medias mensuales que cede al Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), organismo que publica las series de más de

3000 mareógrafos del planeta. En este trabajo se utilizó la serie completa de medias mensuales (enero de 1961 a diciembre de 2009).

Para caracterizar el rango mareal local correspondiente a este mareógrafo han utilizado los datos del IEO (obtenidos a partir del análisis de la serie del mareógrafo), comparados con los publicados por Bruno y Tejedor (1996) para la misma zona. Ambas fuentes presentan un alto grado de coincidencia.

Modelo digital de elevaciones (MDE). El MDE utilizado en este trabajo ha sido generado a partir de los datos obtenidos en una campaña realizada con el sensor LIDAR. Este MDE cuenta con una resolución espacial de 1 metro y una precisión vertical estimada en 15 cm para este tipo de MDE (Thieler, 2009).

5. MÉTODOS

El análisis planteado presenta tres fases:

1. Cálculo de la subida del nivel medio del mar prevista para un horizonte de 100 años para todos los umbrales de probabilidad descritos por en el modelo climático de Titus y Narayan (1998), asumiendo el mismo escenario de emisiones descrito por estos autores.

Para realizar una evaluación de la peligrosidad, entendida como la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso (la inundación por la pleamar) es necesario conocer, junto con la subida esperada del nivel del mar, el valor de la pleamar astronómica en la localización estudiada. Dando la vuelta a la expresión, y asumiendo que no existirán cambios significativos en las características locales de la marea ante una subida del nivel medio del mar (Pugh, 2005), la altura del nivel medio del mar en el escenario estudiado para un umbral de probabilidad dado será obtenida del siguiente modo (eq. 1):

$$Pl_{100\ p(x)} = SLR_{100\ p(x)} + Pl_{1,18} \quad (\text{eq. 1})$$

Siendo:

$Pl_{100\ p(x)}$ es la altura de la pleamar para una probabilidad dada. Por ejemplo, $Pl_{100\ p(50)}$ es la altura de la pleamar en 100 años con una probabilidad de ocurrencia del 50% en el mareógrafo de Cádiz.

$SLR_{100\ p(x)}$ es la subida esperada en 100 años para un determinado horizonte de probabilidad de acuerdo con el modelo de subida del nivel medio del mar de Titus y Narayan (1998) (modelo T-N en adelante), calculada a partir de la tasa local de cambio de nivel medio del mar observado en el mareógrafo de Cádiz durante el período 1961-2009. Esta tasa, de 4,1 mm/año, se obtiene a partir del cálculo de la pendiente de un modelo de regresión lineal de la serie mensual de registros del mareógrafo (Fraile, 2011).

$Pl_{1,18}$ es la pleamar astronómica observada en el mareógrafo de Cádiz, medida a partir del NMML, y tiene un valor de 1,54 m (Bruno y Tejedor, 1996).

Cuando se pretende proyectar estos valores sobre la superficie emergida para identificar qué áreas podrían ser inundadas (utilizando un MDE), es necesario añadir un factor de corrección del nivel de referencia (datum altimétrico) a la ecuación anterior (eq. 1), dando a ambas fuentes de datos una referencia común:

$$Pl_{100\ p(x)} = NMML + SLR_{100\ p(x)} + Pl_{1,18} \quad (\text{eq. 2})$$

Donde:

NMML es la diferencia actual entre el nivel medio del mar en Alicante (NMMA) y el nivel medio del mar local. Se ha calculado como el promedio del nivel medio del mar en el mareógrafo de Cádiz durante el período 2001-2009 (se ha elegido este período por ser el más reciente dentro de un ciclo de 7 años) con respecto al NMML, y tiene un valor de 0,17 m (Fraile, 2011).

Utilizando esta expresión (eq.2) fueron calculadas las alturas de la pleamar en un horizonte de 100 años para todos los umbrales de probabilidad contemplados por T-N para su modelo.

2. Cálculo de la sensibilidad física mediante procesos de espacialización. El cálculo de la sensibilidad física (entendida como la probabilidad de inundación de cada elemento físico emergido en la actualidad) exige que una vez calculadas las alturas correspondientes a los diferentes umbrales de probabilidad, se realice un proceso de espacialización de los valores a partir del punto de situación del mareógrafo comparando la altitud de cada celdilla del MDE con las cotas altimétricas obtenidas a partir del modelo T-N.

Esta espacialización se realiza sobre un MDE, de tal modo que para cada caso (para cada umbral de probabilidad) la sustracción de la altitud del MDE sobre el valor de la subida del nivel medio del mar permita localizar aquellas celdas que serían inundadas.

A partir de los datos calculados en el paso anterior (aquellos correspondientes con los umbrales de probabilidad contemplados por T-N para su modelo) podrían generarse tantos mapas de inundación como umbrales de probabilidad han sido calculados. Sin embargo, aislar el término de probabilidad en una ecuación que caracterice la distribución de probabilidades de este evento (inundación permanente por la pleamar) permitiría la generación de un único mapa que resumiese todas las situaciones posibles.

Se ajustó una ecuación a los valores de probabilidad obtenidos para cada umbral de probabilidad descrito por T-N, de modo que se caracterizase de forma continua la probabilidad de ocurrencia asociada a cada altura de pleamar.

La ecuación obtenida (eq. 3) se corresponde con una tangente hiperbólica a la que se añade una distribución normal en las probabilidades altas (78%) para mejorar el ajuste (figura 2).

$$p(x) = \frac{Pl_{max}}{2} * \left(\tanh\left(\frac{x-x_0}{s_0}\right) + 1 \right) + a_0 \exp\left(-\left(\frac{x-x_1}{s_1}\right)^2\right) \quad (\text{eq. 3})$$

En donde:

Pl_{max} es la altitud máxima local de la pleamar en 100 años, que localmente vale 1,54 sobre el NMMA

x es la altitud de subida del nivel del mar.

x_0 , x_1 , s_0 , s_1 y a_0 son constantes ajustadas a los datos (sus valores se muestran en la tabla 1).

Constantes	Valor
x_0	66,2638
x_1	78,1835

s_0	-21,8188
s_1	34,8152
a_0	9,22253

Tabla 1. Coeficientes de las constantes de la ecuación 3.

3. Corrección del MDE para garantizar su continuidad hidrológica. En un territorio ideal en el que cada punto de la superficie emergida presentase continuidad hidrológica hasta el mar, sería posible obtener un mapa de probabilidades de inundación permanente a partir de la implementación de la ecuación anterior sobre el MDE, tomando como variable x la altitud de cada celdilla. De este modo, la probabilidad de inundación en 100 años de cada celdilla dependería exclusivamente de su altitud. Sin embargo, es preciso considerar que, puesto que a escala local la superficie emergida puede presentar numerosas zonas endorreicas, un análisis en el que no se eviten este tipo de configuraciones podría identificar como inundables algunos espacios confinados por celdillas de altitud superior a la cota de inundación asociada a un determinado nivel de inundación.

Por esta razón las zonas endorreicas del MDE fueron modificadas y su altitud ajustada a la menor de las altitudes circundantes (aquella que debe superar la cota de inundación para que esta se produzca)(figura 3).

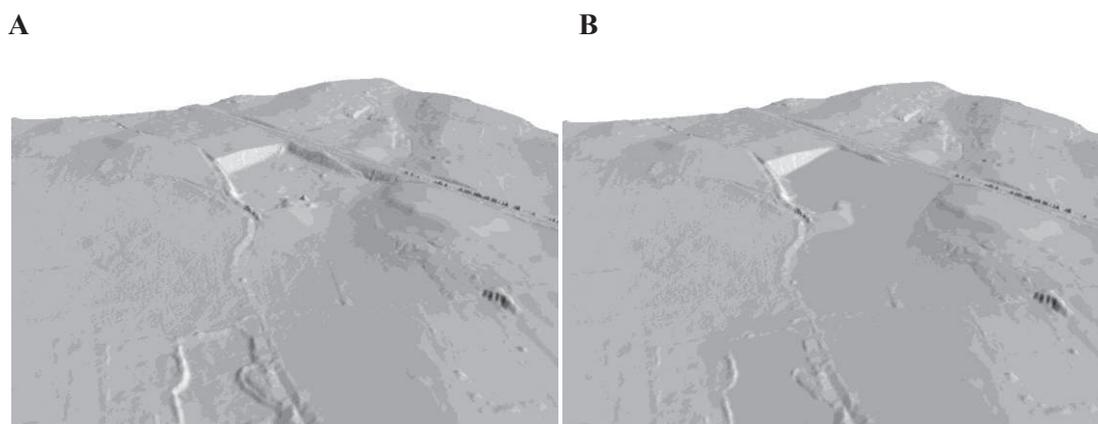


Figura 3. Rectificación de un sector del MDE original (A) para otorgarle continuidad hidrológica, obteniendo un MDE de altitudes hidrológicas ante una subida del nivel del mar (B).

6. RESULTADOS

El análisis realizado muestra profundos cambios esperables en el entorno de Valdelagrana. Tanto el análisis de los límites máximos como de la sensibilidad física ante la inundación ocasionada por la subida del nivel medio del mar señalan diversas probabilidades de ocurrencia por la inundación de la marea, no solo en espacios anexos a las marismas sino también en áreas urbanas e infraestructuras, donde se identifican riesgos altos para todos los espacios antrópicos y para la propia población.

En el desarrollo de este trabajo se han obtenido dos tipos de resultados en forma de mapas: mapas relativos a la sensibilidad física del terreno y mapas relativos a los riesgos naturales asociados a la subida del nivel medio del mar.

En cuanto a la sensibilidad física del terreno, en la figura 3 se muestra la máxima extensión potencial de la pleamar frente a la extensión actual. En este mapa se observa un incremento del área potencialmente inundable de 1717 ha, lo cual supone, en términos relativos, un aumento de un 60,4% del área actualmente inundable por la pleamar en el caso de que la predicción más extrema (con una probabilidad de ocurrencia inferior a un 1%) llegase a producirse (tabla 1). Con probabilidades intermedias (de un 50%), el incremento del área inundable en el futuro es de 1231 ha, lo cual supone un 43,5% más.

	Área (ha.)	Incremento relativo (%)
Área inundada en la actualidad	2831	-
Área inundable en 100 años	4548	60,40%
Área inundable con una probabilidad del 50%	4063	43,50%
Área inundable con una probabilidad del 90%	3801	34,26%

Tabla 1. Resultados obtenidos

Del conjunto de celdillas identificadas como inundables en el futuro, la mayoría presentan probabilidades altas de inundación, superiores al 90% en 970 ha, un 56% de las celdillas identificadas como inundables, lo que supondría un incremento de un 34,2% del espacio inundable en la actualidad. Este fenómeno se produce fundamentalmente por la identificación como inundables de algunas salinas situadas en el sector oriental cuyos muros identificados en el MDE lidar las excluyen de la inundación permanente en la actualidad pero no las protegerían de las inundaciones futuras.

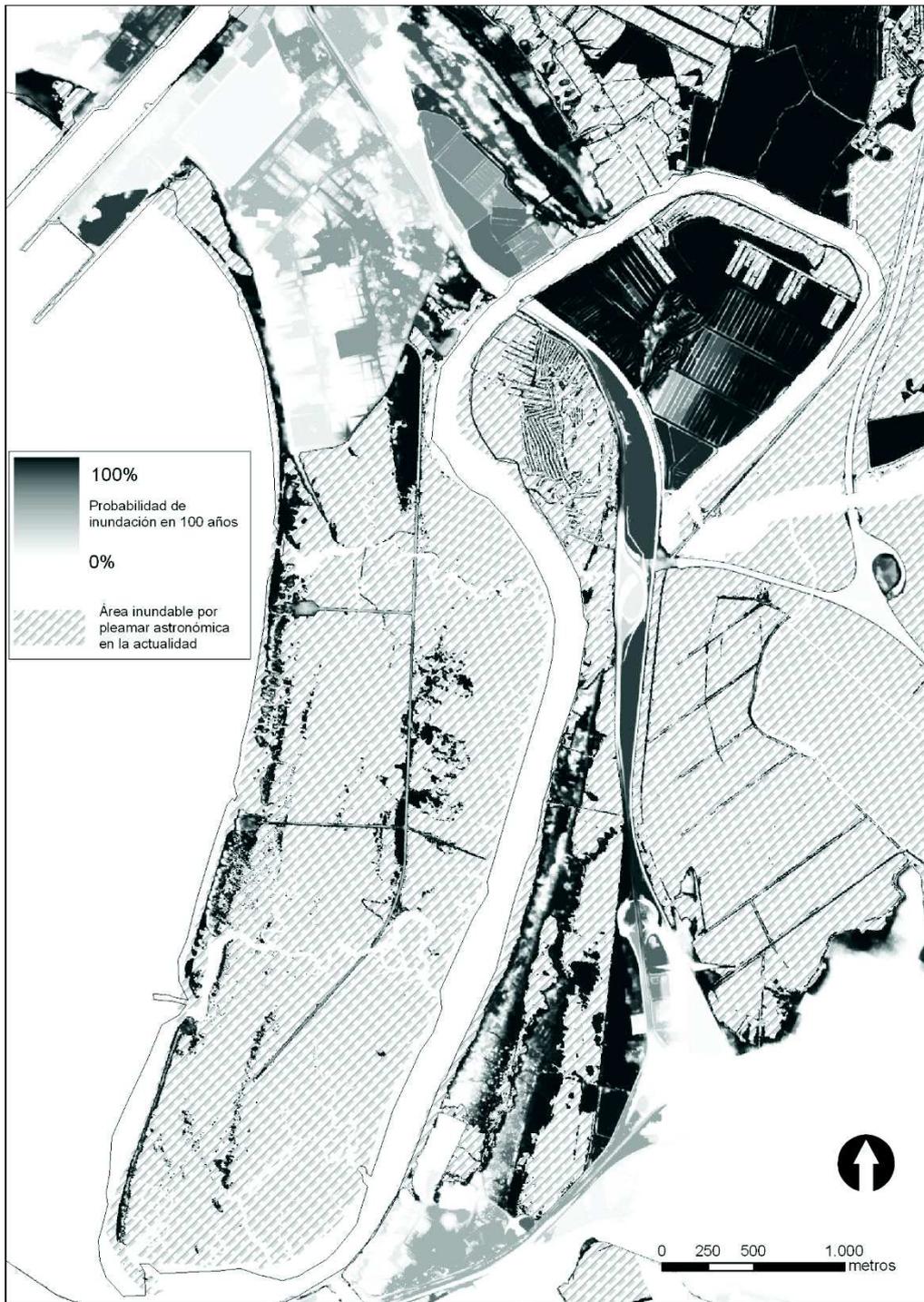


Figura 3. Sensibilidad física ante la inundación permanente por la subida del nivel medio del mar en Valdelagrana.

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las dos aportaciones principales realizadas en este artículo consisten en dos aspectos:

1. La espacialización de la peligrosidad, o cálculo de la sensibilidad física, frente al uso común de i) superficies dicotómicas tipo inundable / no inundable (Titus et al., 2000, Gesch, 2009, Thieler, 2009), ii) del cálculo de la profundidad de inundación ante una inundación con una $p(x)$ fija, generalmente de valor $p=0,5$ (Marfay y King, 2007, Gravelle y Mimura, 2008, Zhang, 2010, Fraile y Ojeda, 2012) o iii) de uno o varios valores arbitrariamente elegidos en una cota altimétrica fija (Hereher, 2010, Condado de Delaware, 2011).

Al permitir distinguir la variabilidad espacial intrínseca de la peligrosidad y del riesgo sobre el territorio, el análisis realizado permite una mayor profundidad y precisión en el análisis de los riesgos frente a la asunción de probabilidades únicas, que no permiten discriminar dentro de los espacios inundables, asumiendo una falsa respuesta homogénea.

En este sentido, Thieler (2009) subraya la importancia de identificar los errores asociados a cualquiera de este tipo de análisis (errores causados por las características del MDE, asociados a los análisis estadísticos, implícitos en el modelo de cambio del nivel medio del mar), y este método elimina el error asociado al modelo climático (puesto que se asumen todas las probabilidades posibles del mismo).

2. La modificación del MDE para el cálculo de la altitud hidrológica ante una subida del nivel medio del mar. Este tipo de modificaciones del MDE son una exigencia de la espacialización de la sensibilidad física, si bien no ha sido señalada en diferentes publicaciones sobre esta cuestión.

8. REFERENCIAS

- BRUUN, P., *Coast erosion and the development of beach profiles*, en *Beach Erosion Technical Memorandum*, Washington, 1954.
- CHAMBERS, D. P., et al. *Low-frequency variations in global mean sea level: 1950–2000*, en *Journal of Geophysical Research*, 107(C4), 3026, 2002.
- COOPER, M., BEEVERS, M. y OPPENHEIMER, M., *Future sea level rise and the new Jersey Coast*, Princeton University, 2005.
- HINKEL, J., y KLEIN, R.J.T., The DINAS-COAST project: developing a tool for the dynamic and interactive assessment of coastal vulnerability, en *Global Environmental Change*, 19, 2009.
- FRAILE JURADO, P., *Niveles medios y máximos en los mareógrafos de la costa andaluza*. Masther Thesis, Universidad de Sevilla, 2005.
- FRAILE JURADO, P., *Análisis de las problemáticas asociadas a la espacialización, evolución y representación de niveles del mar presentes y futuros en Andalucía*, 2011.
- FRAILE JURADO, P. y OJEDA ZÚJAR, J. 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, en *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, vol. 12, p. 329-348, 2012.
- GESCH, D., Topography-based analysis of Hurricane Katrina inundation of New Orleans, en *Science and the Storms: the USGS Response to the Hurricanes of 2005: U.S. Geological Survey Circular 1306*, p. 53-56, 2007.
- GESCH, D.B., *Analysis of lidar elevation data for improved identification and delineation of lands vulnerable to sea level rise*, en *Journal of Coastal Research*, V. 53, 2009.
- GESCH, D.B., *The effects of DEM generalization methods on derived hydrologic features*, en *Spatial Accuracy Assessment: Land Information Uncertainty in Natural Resources*, Chelsea, Michigan, Ann Arbor Press, p. 255-262, 1999.
- GRAVELLE y MIMURA, *Vulnerability assessment of sea-level rise in Viti Levu, Fiji Islands*, Sustainability Science, 2008.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Chapter 7: changes in sea level; en The science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- IGLESIAS-CAMPOS, A., SIMON-COLINA, A., FRAILE-JURADO, P., y HODGSON, N., Methods for assessing current and future coastal vulnerability to climate change. *ETC/ACC Technical Paper. Bilthoven, the Netherlands: European Topic Centre on Air and Climate Change*, 2010.
- MEDINA, R. Y MÉNDEZ, F.J., *Inundación costera originada por la dinámica marina*, en *Ingeniería y Territorio, Catástrofes naturales*, Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2006.
- MÉNDEZ, F., y otros, *Estudio de los impactos en la costa española por efecto del cambio climático*, IV Congreso de la Asociación Española de Climatología, 2004.
- MÉNDEZ, F., y otros, *Variaciones del régimen extremal del clima marítimo en el litoral español en el periodo 1958-2001*, IV Congreso de la Asociación Española de Climatología, 2004.
- MITROVICA, J.X., et al., *Glacial isostatic adjustment on a rotating Earth*, en *Geophysical Journal International*, 1, 2002.

MITROVICA, J.X. y MILE G.A., *On the origin of Late Holocene highstands within equatorial ocean basins*, en *Quaternary Science Review*, 21, 2002.

MUÑOZ PEREZ, J.J., TEJEDOR, L., y MEDINA, R., *Las funciones empíricas ortogonales y los cambios en el perfil de playa a corto, medio y largo plazo*, en *Física de la Tierra*, 13, 2001.

[NEREM, R.S., RACHLIN, K.E. Y BECKLEY, B.D., *Characterization of global mean sea level variations observed by Topex/Poseidon using empirical Orthogonal functions*, en *Surveys in Geophysics* 18: 293–302, 1997.](#)

[Ojeda, J., Álvarez, J. I., Martín, D., y Fraile, P., *El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera \(CVI\) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza \(España\)*, en *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 2009, no 9, p. 83-100.](#)

PFEFFER, T., HARPER, J., y O'NEEL, S., *Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise* en *Science*, 321, 2008.

PREISENDORFER, R. W., *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography*, editado por C. Mobley, 418 p., Elsevier Sci., New York, 1988.

PUGH, D., et al., *The greenhouse effect y rising sea levels in the UK*, Nottingham, M1 Press Limited, 1989.

PUGH, D., *Changing sea levels*, Cambridge University Press, 2004.

RAHMSTORF, S., *A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise*, en *Science*, Vol. 315. 2007.

RUTIGLIANO, P., et al. *Vertical motions in the Western Mediterranean area from geodetic and geological data* en The tenth General Assembly of the WEGENER Project, 2000.

SMITH, T. M., et al., *Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions*, en *Journal of Climate*, 9, 1403– 1420, 1996.

TEJEDOR MARTÍNEZ, L., y BRUNO MEJÍAS, M., *Niveles del mar en la Bahía de Cádiz*, en *Estudios para la Ordenación, Planificación y Gestión Integrada de las Zonas Húmedas de la Bahía de Cádiz*, Barcelona, Oikos Tau, 1996.

TEL, E., y GARCÍA, M., *Nivel del mar en las costas españolas y su relación con el clima*, comunicación del III Congreso de la Asociación Española de Climatología, Santander, 2004.

THIELER, R., *Coastal Sensitivity to Sea Level Rise: A Focus on the Mid-Atlantic Region*, USGS, 2009.

TIRUNEH y MOTZ, 2004 *Climate Change, Sea Level Rise, and Saltwater Intrusion*, en Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress, ASCE 2001.

TITUS, J., et al., *Greenhouse Effect y Sea Level Rise: the cost of Holding Back the Sea*, en *Coastal Management*, Volumen 19, p. 171-204, 1991.

TITUS, J., y NARAYANAN, V., *The probability of sea level rise*, EPA, Washington, 1998.

TITUS, J., y RICHMANN, C., *Maps of Lanas Vulnerable to Sea Level Rise: Modeled Elevations along the U.S. Atlantic y Gulf Coasts*, en *Climate Research*, 2001.

ZHANG K., *Analysis of Non-Linear Inundation from Sea Level rise Using Lidar Data: A Case Study for South Florida*, en *Climatic Change*, 2010 (en prensa).

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Miguel Fernández Díaz sus aportaciones a este trabajo.