

Fraile-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

ALTERNATIVAS AL ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA DE LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR SOBRE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES: EL CASO DE MIAMI-DADE COUNTY (FLORIDA, EEUU).

PABLO FRAILE-JURADO¹ y STEPHEN B. LEATHERMAN²

¹ Departamento de Geografía Física y A.G.R. Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Sevilla. C/ María de Padilla s/n CP 41004. Dirección de los Autores; autor1b@us.es

² Department of Earth & Environment, Florida International University, Miami, Florida, USA; sleat003@fiu.edu

RESUMEN

En este trabajo se presentan tres aproximaciones cartográficas del fenómeno de la subida del nivel medio del mar en el Condado de Miami-Dade. Frente al uso tradicional de modelos digitales de elevaciones para distinguir de manera dicotómica, entre celdillas inundables y no inundables, se proponen tres alternativas que permiten realizar análisis de mayor profundidad y expresividad. La primera aproximación consiste en una representación dicotómica de siete escenarios y/o modelos en un único mapa, lo cual permite una sencilla visualización de un amplio abanico de posibles situaciones futuras contempladas por la comunidad científica. La segunda aproximación es temporal, puesto que representa la fecha en la que, de acuerdo con un único escenario de inundación, será cubierta una celdilla durante situaciones de pleamar. La tercera aproximación representa en cada celdilla la tasa lineal de cambio del nivel medio del mar que debe producirse como promedio durante el siglo XXI para que una celdilla quede inundada durante pleamares de coeficiente 0,7. Los resultados obtenidos muestran una elevada probabilidad de inundación por subida del nivel medio del mar en el norte de la ciudad de Miami a medio y largo plazo.

Palabras clave: cartografía, subida del nivel del mar, modelo digital de elevaciones, inundación, Florida.

ALTERNATIVE APPROACHES TO THE CARTOGRAPHIC ANALYSIS AND REPRESENTATION OF SEA LEVEL RISE BY MEANS OF DIGITAL ELEVATION MODELS: THE CASE MIAMI-DADE COUNTY (FLORIDA, USA)

ABSTRACT

The aim of this paper is to present three different cartographic approaches to sea level rise in Miami-Dade County, Florida, USA. In comparison to the traditional use of digital elevation models to distinguish between inundated and non-inundated cells, three alternatives that allow deeper analysis and cartographic expression are proposed. The first approach represents seven

Fraile-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

scenarios and/or models in a single map, which allows an easy viewing of a wide range of possible future situations accepted by the scientific community. The second approach is temporal, and it represents the date on which each cell will be inundated during high tides. The third approach represents the linear rate of mean sea level rise during the XXI century in which a cell remains flooded during a high tide coefficient of 0.7. Obtained results show a high probability of inundation due to sea level rise in medium and long term in Miami.

Key words: mapping, sea level rise, digital elevation model, inundation, Florida.

1. Introducción

La subida del nivel medio del mar es la consecuencia directa del cambio climático que más consensos ha aunado sobre su ocurrencia, desde hace décadas. Diferentes autores han constatado la existencia de un fenómeno de subida del nivel del mar, estimando tasas de aproximadamente 2,1 mm/año desde principios del siglo XX al presente mediante el análisis de los registros de mareógrafos. El lanzamiento de satélites altimétricos en 1992 permitió la toma de registros de cambio del nivel del mar de forma independiente a los movimientos verticales de la superficie emergida, constatando tanto el fenómeno de subida, como una aceleración de la misma, cuantificada en aproximadamente 3,4 mm/año desde 1992. Existe un consenso científico casi total en vincular esta subida del nivel del mar con el fenómeno de cambio climático causado esencialmente por las emisiones antrópicas de gases de efecto invernadero (Levitus et al., 2012; Stocker, 2014; DeConto y Pollar, 2016).

Paralelamente a la evaluación los cambios del nivel del mar registrados en el pasado reciente, se han realizado estimaciones de las expectativas de subida basadas en diferentes escenarios de emisiones. Todas las previsiones realizadas coinciden en señalar que independientemente del tipo de escenario empleado, la subida del nivel medio del mar posee tal inercia que el nivel del mar subirá de forma global durante lo que resta del siglo XXI y probablemente en el siglo XXII (Titus y Narayanan, 1996; Iglesias-Campos et al. 2010; Kopp et al. 2016). La mayor parte de la discusión científica se centra en la actualidad en la magnitud de la subida esperada de acuerdo con las predicciones realizadas por los modelos de cambio climático. Esencialmente existen dos tipos de predicciones: a) aquellas realizadas a partir de complejos modelos de cambio climático, que, en función del escenario de emisiones, suelen pronosticar subidas de entre 40 y 90 cm para el final del siglo XX (Yin et al., 2009; IPCC, 2013) y b) modelos semi-empíricos que, a partir de la comparación de pronósticos y observaciones recientes de niveles del mar han identificado diferencias tendentes a amplificarse en el futuro, de tal forma que evalúan que la subida del nivel del mar podría llegar a ser de hasta 2 metros a finales del siglo XXI (Rahmstorff, 2007; Pfeffer et al., 2008). Comúnmente se cita un inadecuado modelado del comportamiento del deshielo de Groenlandia en los modelos climáticos más complejos como causa de las diferencias entre observaciones y predicciones (Gardner et al., 2007; Rignot et al., 2011).

De cara a evaluar los efectos que podría tener esta subida en las áreas costeras, numerosos autores han remarcado la importancia de considerar el factor local (Titus y Narayanan 1996; Zazo et al., 1996; Fraile y Ojeda, 2012; Ojeda et al. 2009), tanto por causas hidrológicas, debido a que el nivel del mar no sube de manera homogénea en todas las costas del planeta, como por movimientos de la superficie continental, puesto que existen costas que se

Fraile-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", GeoFocus (Artículos), n°17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

levantan o se hundan por causas tectónicas, compactación de sedimentos... (Fraile y Fernández, 2016).

Durante los últimos años, buena parte de las publicaciones relacionadas con la subida del nivel del mar se han centrado en el cálculo de los impactos que diferentes subidas del nivel medio del mar tendrían sobre las áreas costeras, para lo cual ha sido esencial el uso de la cartografía, con el empleo de modelos digitales de elevaciones (MDEs) como herramienta principal. En este sentido, existen tres aproximaciones que aplican diferentes técnicas de análisis cartográfico:

El tipo de análisis más común es el centrado en el uso de MDEs. La asunción de un único valor de subida del nivel medio del mar asociado a un umbral de probabilidad determinado, utilizado para identificar las celdillas que quedarían por encima o por debajo de dicho nivel de inundación en un horizonte temporal fijo, señalándose por tanto como inundables o no inundables. Este tipo de análisis ha sido aplicado tanto a escalas de detalle, empleando MDEs de alta resolución espacial (Zhang 2011, Fraile-Jurado y Ojeda-Zújar, 2013), como a territorios amplios (Titus y Richman, 2001). Se trata por tanto de análisis que únicamente obtienen dos tipos de resultados, de carácter dicotómico, puesto que los valores para cada celdilla solo pueden ser inundado / no inundado.

Frente a este tipo de aproximaciones, un análisis menos común es aquel que no considera que todas las celdillas inundables reaccionen por igual ante una subida del nivel medio del mar, calculando la profundidad de la futura inundación con un horizonte temporal fijo (Gesch, 2009). Esta técnica permite una aproximación más realista al carácter de la inundación, obteniendo como resultados una variable continua, dado que la inundación es más profunda en las áreas topográficamente más bajas (y que por tanto se inundarían por mayor profundidad) que en las más altas, pese a que queden por debajo de una eventual cota de inundación.

Por último, otra aproximación cartográfica a este tipo de trabajos es la estimación de la probabilidad de subida del nivel medio del mar en cada celdilla del MDE, tal y como ha sido realizado por Purvis et al. (2008) y Fraile-Jurado et al. (2013). Se trata en este caso de la espacialización de la peligrosidad, entendida como la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso, en una fecha futura determinada.

El uso de un horizonte temporal fijo para la identificación de las celdillas inundables es un elemento común a todos los trabajos reseñados. Esta fecha generalmente hace referencia al final del siglo XXI, como el año 2100 o el período 2080-2100 (para las publicaciones más recientes que se derivan de los datos del informe del IPCC de 2013). La dimensión temporal, por lo tanto, apenas está presente en la cartografía de inundaciones futuras.

Este trabajo pretende realizar una aportación al tratamiento cartográfico de los mapas de inundabilidad por subida del nivel medio del mar, profundizando en el tratamiento de la dimensión temporal. El objetivo de este trabajo es, en definitiva, estimar el horizonte temporal para la inundación de territorios actualmente emergidos, ante la eventual subida del nivel medio del mar a partir del desarrollo de un método de análisis espacial sobre MDE basado en el cálculo de isócronas de inundación.

Fraile-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

2. Área de estudio.

Para el desarrollo de este trabajo se eligieron como área de estudio el sector norte de Miami-Dade County (Florida, EEUU), donde se encuentra situado Biscayne Boulevard y el espacio natural protegido de Oleta River State Park (figura 1). El espacio natural protegido de Oleta River State Park está localizado al abrigo de la isla-barrera de Miami Beach. En la vegetación del parque predomina el mangle rojo (*Rizophora mangle*) y la invasora *Casuarina equisetifolia*. El entorno del parque presenta una elevada densidad de población en la isla-barrera de Miami Beach, con numerosos rascacielos y plazas hoteleras. En el interior del parque se encuentran dos áreas residenciales de alto poder adquisitivo, con baja densidad de población, viviendas unifamiliares de una sola planta y embarcaderos para cada vivienda. En la parte continental de Miami se identifican viviendas de menor tamaño y valor económico que las anteriores, aunque la densidad del entramado urbano es significativamente mayor.

La elección de esta área de estudio responde a los siguientes motivos:

- a) La semejanza entre el comportamiento del nivel medio del mar durante el último siglo en la costa este de Florida y los registros globales (Chakraborty et al., 2014). La tasa registrada en el mareógrafo de Miami es semejante a la tasa de cambio global (Church y White, 2012), aparentemente debido a la estabilidad tectónica de la costa oriental de Florida. Este fenómeno permite asumir que el comportamiento futuro del nivel medio del mar en esta zona será semejante al global, pudiéndose utilizar las previsiones globales como fuente para las predicciones futuras sin necesidad de realizar ninguna transformación (Fraile et al., 2014).
- b) La disponibilidad de un MDE de suficiente calidad para realizar los análisis propuestos en la metodología.
- c) La existencia de áreas costeras urbanas consolidadas, lo cual excluye la posibilidad de cambios morfológicos como consecuencia de una subida del nivel medio del mar.
- d) La diversidad en las tipologías edificatorias, que convierte a este lugar en una excelente zona para comprobar la aplicabilidad de las metodologías propuestas.

Existen numerosos antecedentes en el análisis de la exposición a la subida del nivel del mar tanto de la ciudad de Miami, como especialmente de Florida. Al tratarse de un área excepcionalmente llana y de baja altitud, además de por haber contado históricamente con una cartografía de gran calidad, Florida ha sido empleada como caso de estudio, y señalada como una de las áreas más expuestas a la subida del nivel del mar, desde hace décadas (Scholl 1964; Titus y Richman, 2001; Frazier et al., 2010). La ciudad de Miami ha sido objeto de un menor número de estudio debido a la resolución espacial que requiere este tipo de análisis. De este modo, no se han publicado trabajos científicos en esta línea hasta la generalización del uso de datos Lidar (Zhang 2011, Zhang et al., 2011, Cooper et al. 2014). Aunque desde diferentes puntos de vista (acuíferos, consecuencias del incremento en la peligrosidad de los temporales), estos trabajos coinciden en señalar a la ciudad de Miami como una de las áreas más expuestas a los riesgos asociados a la subida del nivel medio del mar.

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

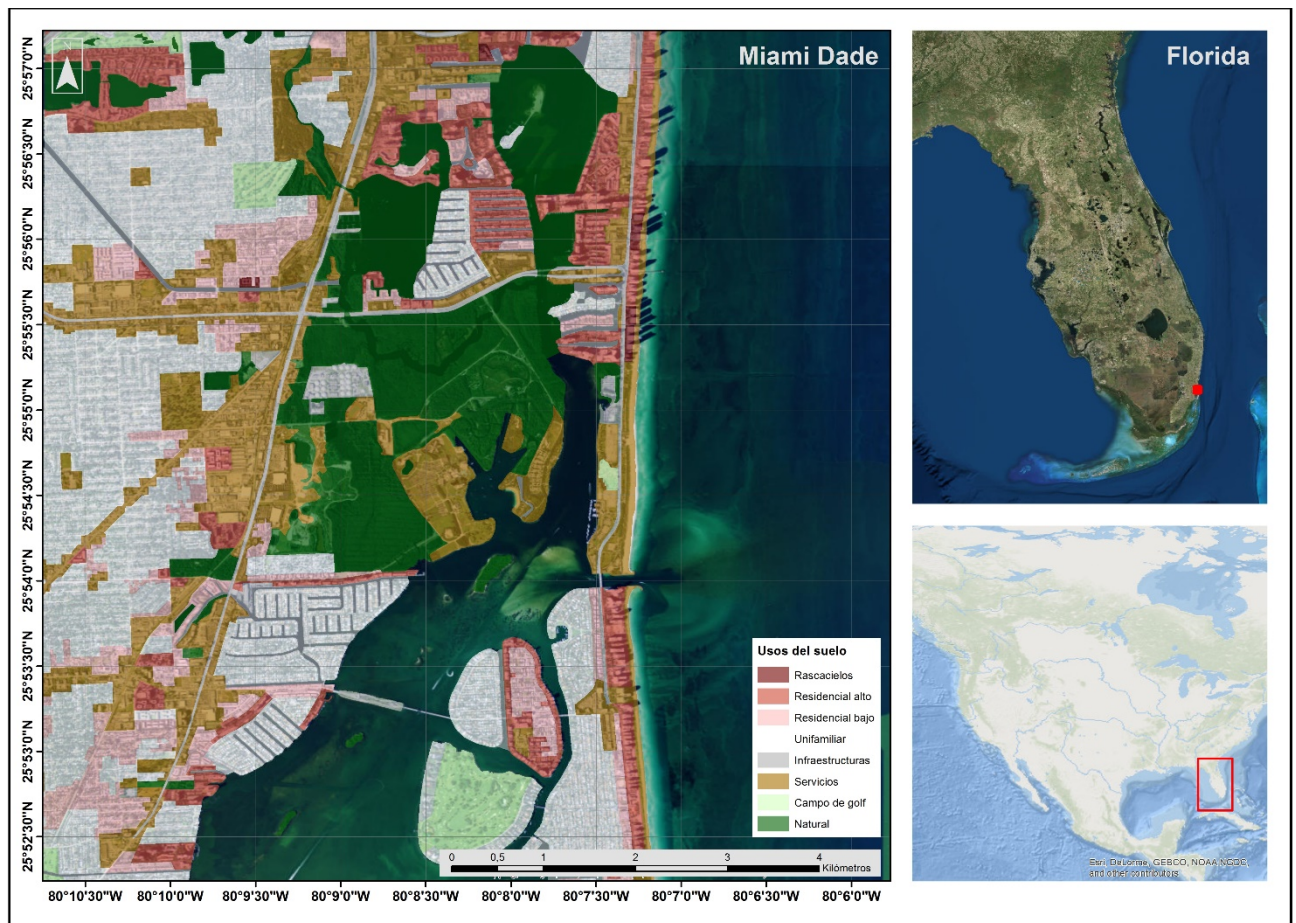


Figura 1. Área de estudio.

3. Material y métodos.

El MDE empleado tiene una resolución espacial de unos 3 metros (5 pies), y ha sido elaborado a partir de la adquisición de información mediante un sensor Lidar en el año 2007. El procesado de los datos Lidar originales respondió a la necesidad de elaborar un MDE explícitamente para la prevención de desastres naturales como las inundaciones ocasionadas por huracanes o la subida del nivel del mar. Presenta una precisión vertical de 24 cm (0,8 pies) con un nivel de confianza del 95%. Está disponible con carácter público en la web <http://www.sfwmd.gov/gisapps/sfwmdxwebdc/dataview.asp>, gestionada por la institución South Florida Water Management District (SFWMD).

Las estimaciones empleadas para la determinación de los diferentes umbrales de subida del nivel medio del mar a finales del siglo XXI proceden de los cálculos y modelizaciones y escenarios elaborados por Rahmstorf (2007), Church y White (2011), y el IPCC (2013). A partir de estos datos, se realizaron tres aproximaciones metodológicas a la representación de futuras inundaciones provocadas por la subida del nivel del mar.

Con la intención de caracterizar las áreas inundables identificadas en los mapas de inundación elaborados, se utilizaron los datos del mapa de usos del suelo de Florida *Land Cover*

Recibido: 23/02/2016

Aceptada versión definitiva: 29/05/2016

© Los autores
www.geofocus.org

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

Land Use 2004, disponibles en la web <http://sfwmd.maps.arcgis.com/>, procedente de la misma institución (SFWMD) que el MDE utilizado. El uso de este mapa requirió de un proceso de simplificación previo, puesto que se sintetizaron los 35 tipos de usos del suelo existentes en el área de estudio en los 7 que aparecen en el mapa de la figura 1. Aunque los datos originales del mapa de usos del suelo sean de 2004, los cambios de uso en esta área han sido mínimos desde entonces debido a que se trata de un área urbana absolutamente consolidada, por lo que se asumió que se pueden emplear para los intereses de este trabajo.

3.1 Aproximación 1: mapa multiescenario.

La primera es la más sencilla, y consiste en una representación dicotómica de siete escenarios y/o modelos de subida del nivel del mar en un único mapa, para un umbral de probabilidad de $p < 0.5$ y con una pleamar de coeficiente 0.7. Los escenarios y/o modelos que se han incluido aparecen reflejados en la tabla 1:

Tabla 1. Características de los escenarios y modelos empleados y subidas del nivel medio del mar esperadas para finales del siglo XXI.

Nombre	Publicado en	Tipo de modelo	Escenario	Subida esperada
RCP2.6	2014	IPCC	Conservador	26 cm
RCP4.5	2014	IPCC	Conservador desde 2030	40 cm
RCP6.0	2014	IPCC	Conservador desde 2060	45 cm
RCP8.5	2014	IPCC	No conservador	63 cm
Rahmstorf	2007	Semiempírico	-	98 cm
Tendencia 1900-2014	-	Ficticio	-	17 cm
Tendencia 2000-2014	-	Ficticio	-	34 cm

En la Tabla 1 se observa que se han incluido los cuatro principales escenarios derivados del modelo del IPCC, y el modelo de Rahmstorf, el modelo semiempírico de mayor difusión. Adicionalmente, y con la intención de evidenciar que los principales escenarios contemplados por la comunidad científica implican subidas e inundaciones de considerable magnitud, se han incluido dos modelos ficticios basados en la asunción de que las tasas de subida del nivel medio del mar observadas desde principios del siglo XX o desde principios del siglo XXI se mantendrán estables hasta finales de siglo. No obstante, es preciso reseñar que existe un amplio consenso en la comunidad científica acerca de que estos dos escenarios son altamente improbables (Rahmstorff, 2007, Nicholls y Cazenave 2010), debido a que las aguas oceánicas aún no se han adaptado al cambio ocurrido en las temperaturas atmosféricas y los paralelos forzamientos radiactivos.

Además de la representación de los diferentes escenarios en un único mapa, se realizó un análisis espacial mediante el cálculo de las tipologías urbanas inundables para cada uno de los escenarios y modelos considerados en esta aproximación, a partir del mapa de usos del suelo de Florida.

Recibido: 23/02/2016

Aceptada versión definitiva: 29/05/2016

© Los autores
www.geofocus.org

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

3.2. Aproximación 2: mapas de isocronas de inundación.

La segunda aproximación se centra en la representación de la magnitud temporal de la subida del nivel medio del mar. El objetivo del mapa consistió en representar la fecha en la que será cubierta una celdilla durante episodios de pleamares medianas (de coeficiente 0,7) a finales del siglo XXI, de acuerdo con un único escenario de inundación (en este caso el RCP8.5 del modelo del IPCC). El valor representado en cada celdilla se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T = H / NI_e,$$

siendo T = el horizonte temporal en el cual la celdilla quedará inundada por la pleamar, H = la altura de la celdilla del MDE, y NI_e = el nivel de inundación, calculado a partir de la suma de las variables altura de la pleamar local con coeficiente 0,7 y subida del nivel medio del mar, diferente en función del escenario elegido.

En el caso considerado, la suma de ambas variables es 1,63 m.

3.3. Aproximación 3: mapa de tasas-límite para la inundación.

La tercera aproximación representa en cada celdilla la tasa lineal de cambio del nivel medio del mar que debe producirse como promedio durante el siglo XXI para que una celdilla quede inundada durante pleamares de coeficiente 0,7. Responde a la expresión:

$$T_{in} = H / T_r$$

siendo T_{in} = la tasa lineal de subida del nivel medio del mar que debe producirse durante lo que resta de siglo XXI para que una celdilla quede inundada durante una pleamar de coeficiente 0,7, y T_r = el tiempo restante desde la elaboración del MDE a un horizonte temporal dado. En este caso toma valor 88, al estar calculado desde el año 2012 al año 2100.

4. Resultados y discusión.

Aunque se han realizado cálculos de áreas inundadas, los principales resultados obtenidos en este trabajo se centran en la representación cartográfica de los métodos expuestos anteriormente. Estos aparecen recogidos en las figuras 2, 4, 5 y 7. En la figura 2 aparece representado el mapa multiescenario, en el que se distinguen las áreas inundadas en la actualidad bajo una pleamar de coeficiente 0,7 (coincidentes con canales y lagoons interiores), y las áreas potencialmente inundables en el futuro en función del escenario de subida del nivel del mar que se produzca. Tal y como se puede observar en el mapa y en la tabla 2, amplios sectores urbanizados del área de estudio (unas 70 ha.), especialmente de Miami Beach y de las islas situadas entre esta y el continente, quedarían inundadas en cualquiera de los escenarios, incluidos escenarios optimistas en los que bajas tasas de cambio del nivel medio del mar se mantienen. En función de las características de los escenarios elegidos, el área inundable se amplía hasta alcanzar casi 1000 ha. (tabla 2), y la práctica totalidad del sector analizado de la isla barrera de Miami Beach, las islas intermedias y amplios sectores continentales. Los

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

mayores incrementos de áreas inundables se identifican en viviendas unifamiliares y residenciales, así como en la categoría denominada "servicios" que incluye comercios y equipamientos urbanos. Dentro de las áreas residenciales, los mayores incrementos se han identificado en las de mayor densidad, por estar situadas en las zonas más cercanas a la costa, así como en las viviendas unifamiliares, en parte por ser el uso del suelo más común en el área de estudio.

Tabla 2. Áreas inundables en la zona de estudio en el mapa multiescenario por tipología de usos del suelo (ha.) y escenario y/o modelo.

	Actual	Tendencia 1900-2014	Tendencia 2000-2014	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	Rahmstorf
Campo de Golf	-	1,7	5,7	8,8	12,1	20,8	28,6
Infraestructuras	-	3,5	8,6	13,7	19,7	37,7	51,4
Rascacielos	-	0,0	0,1	0,3	0,4	0,8	1,3
Residencial alta densidad	-	10,5	37,6	59,4	81,5	142,1	196,8
Residencial baja densidad	-	5,8	22,1	36,7	52,5	96,5	130,3
Servicios	-	14,7	39,2	61,8	89,2	175,0	251,1
Uso Natural	387,0	416,4	441,0	456,5	471,4	502,9	519,8
Vivienda unifamiliar	-	19,4	70,2	114,8	161,8	292,8	397,0
Total	387,0	471,9	624,6	752,0	888,5	1268,6	1576,2

Metodológicamente, la representación de múltiples escenarios de subida del nivel medio del mar no supone estrictamente una aportación relevante sobre los mapas más comúnmente realizados, al tratarse de variables dicotómicas que solo tienen en cuenta un único umbral de probabilidad para distinguir entre la condición de inundado o no inundado en cada celdilla. No obstante, la inclusión de los escenarios más significativos en un único mapa sí resulta una aportación relevante, especialmente en términos de capacidad de comunicación y concienciación de la sociedad. En la figura 3 se observa cómo el área de estudio muestra un incremento notable en cualquiera de los escenarios, con incrementos de casi el 80% de la superficie inundable con respecto a la actualidad en un escenario relativamente conservador como el RCP4.5. En cualquier caso, el riesgo evidenciado en este análisis no reside en los incrementos numéricos de las áreas inundables, sino del tipo de áreas que se inundarán, tal y como evidencia se evidencia en la tabla 2, en la que se observa que la mayor parte de las zonas inundables son usos residenciales, de servicios o infraestructuras.

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

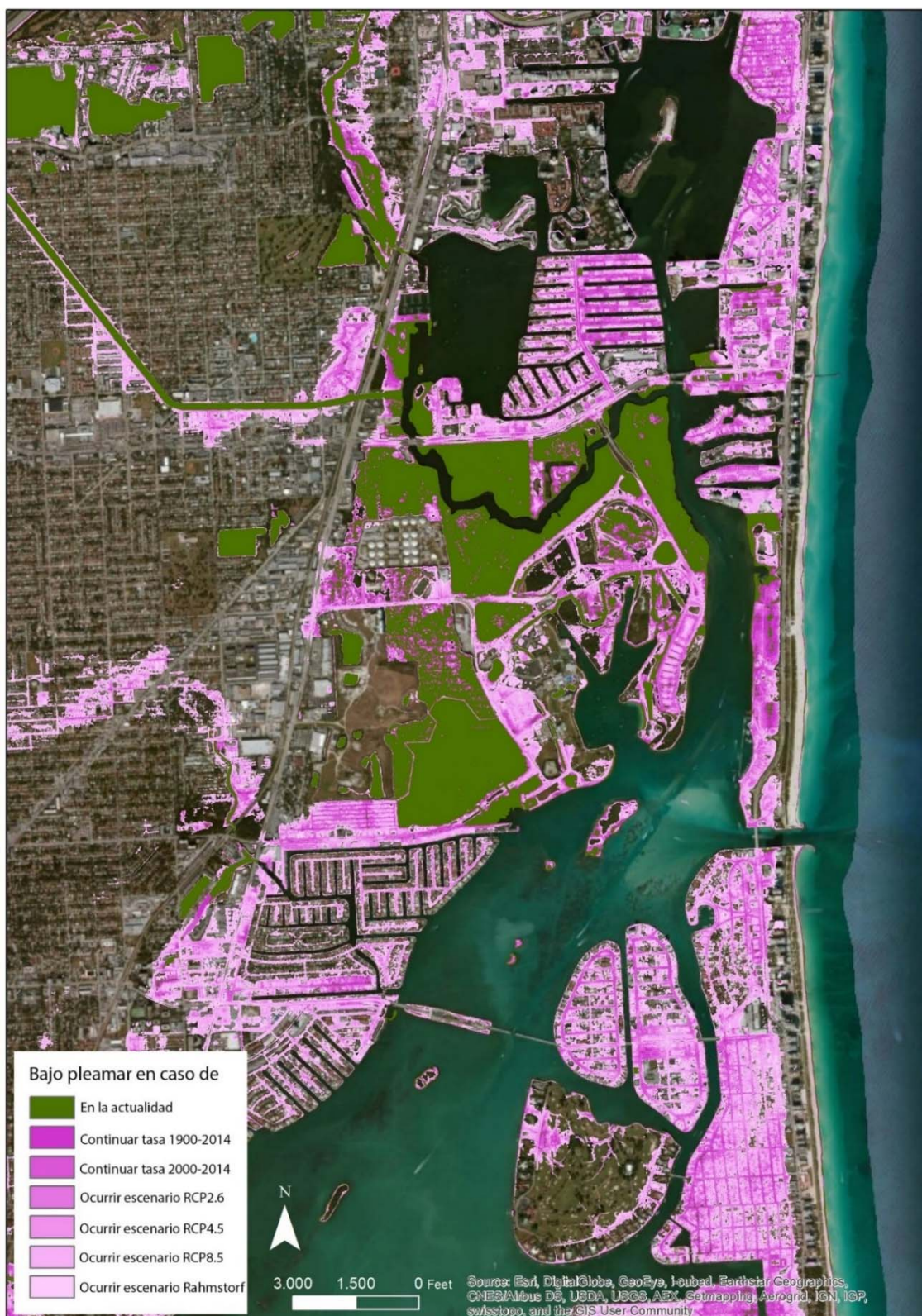


Figura 2. Mapa multiescenario de inundación por subida del nivel del mar con pleamar de coeficiente 0,7 en el escenario RCP8.5 en el norte de Miami-Dade County.

Recibido: 23/02/2016

Aceptada versión definitiva: 29/05/2016

© Los autores
www.geofocus.org

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

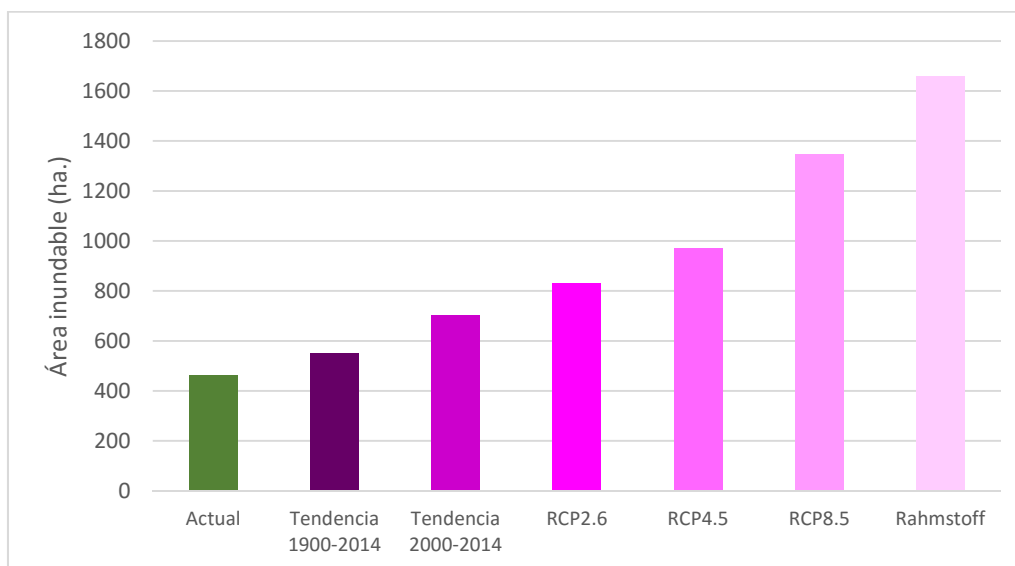


Figura 3. Áreas inundables (ha.) por escenario y/o modelo de subida del nivel del mar en condiciones de pleamar de coeficiente 0,7 en el área de estudio.

Para la segunda aproximación planteada (figuras 4,5 y 6), el cálculo del horizonte temporal de inundación, los resultados obtenidos para el escenario RCP8.5 indican por lo general incrementos leves en el área de estudio para mediados del siglo XXI, que solo son muy intensos a finales del siglo XXI y durante el siglo XXII. Estos resultados concuerdan con la aceleración prevista en la subida del nivel medio del mar en la segunda mitad del siglo XXI, de acuerdo con la mayor parte de los modelos elaborados, y en particular con las previsiones del escenario RCP8.5. Esta clase de análisis cartográfico se ha aplicado en otro tipo de estudios, vinculados al riesgo de avenidas fluviales (Lana et al., 2008) o riesgo sísmico (Giardini et al., 1999).

La representación cartográfica de la tasa de cambio del nivel medio del mar que debería ocurrir para que una celdilla se inundase muestra que más del 50% de las áreas coloreadas en la figura 4 quedarían inundadas a finales del siglo XXI bajo las tasas que se han observado en el período 1992-2014, lo cual resulta concordante con los resultados obtenidos en la figura 2. Aunque esta representación requiere de una interpretación más compleja por parte de un usuario que conozca las tasas más comunes de cambio del nivel medio del mar, su potencial de comunicación es notable si se emplea una gama e intervalos adecuados (figura 7).

Es común a las tres aproximaciones desarrolladas permiten identificar los espacios con una mayor exposición a la subida del nivel del mar, aunque desde diferentes puntos de vista. La mayor parte de la isla barrera de Miami Beach muestra valores que implican una elevada exposición: ya sea a) en caso de producirse los escenarios más conservadores, b) por aparecer las celdillas del MDE como inundables antes de 2030, o c) por inundarse de continuar las tasas globales observadas durante el siglo XX (algo que de acuerdo con la mayoría de autores e informes, se sobrepasará ampliamente). Asimismo, se identifican valores que implican una elevada exposición en las áreas construidas artificialmente, como las islas creadas al norte y al sur de Oleta River State Park.

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

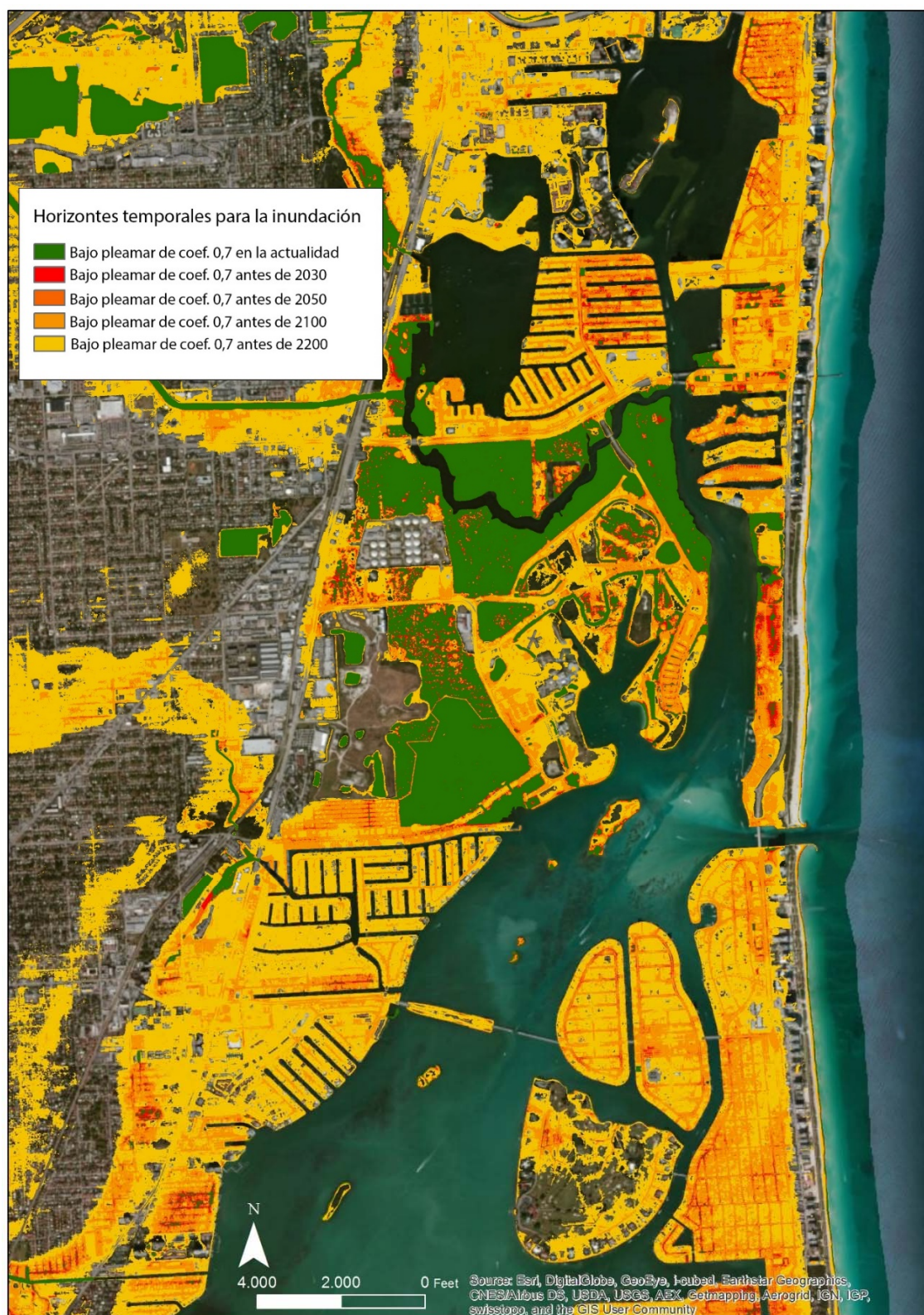


Figura 4. Mapa de isócronas de inundación por subida del nivel medio del mar con pleamar de coeficiente 0,7 en el escenario RCP8.5 en el norte de Miami-Dade County.

Recibido: 23/02/2016

Aceptada versión definitiva: 29/05/2016

© Los autores
www.geofocus.org

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): “Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).”, *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157



Figura 5. Detalle del mapa de isócronas de inundación por subida del nivel medio del mar con pleamar de coeficiente 0,7 en el escenario RCP8.5 en el norte de Miami-Dade County.

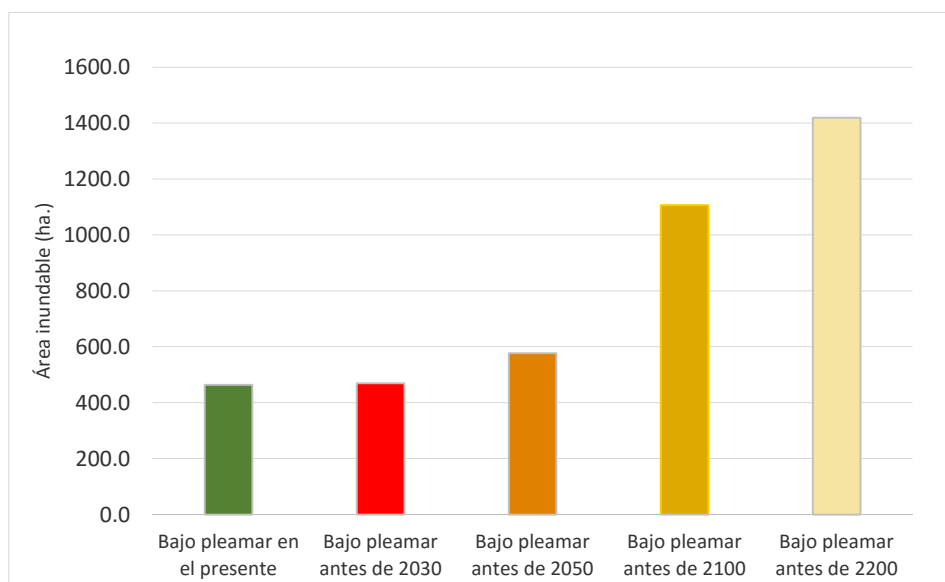


Figura 6. Áreas inundables (ha.) por horizonte temporal en condiciones de pleamar de coeficiente 0,7 en el área de estudio.

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

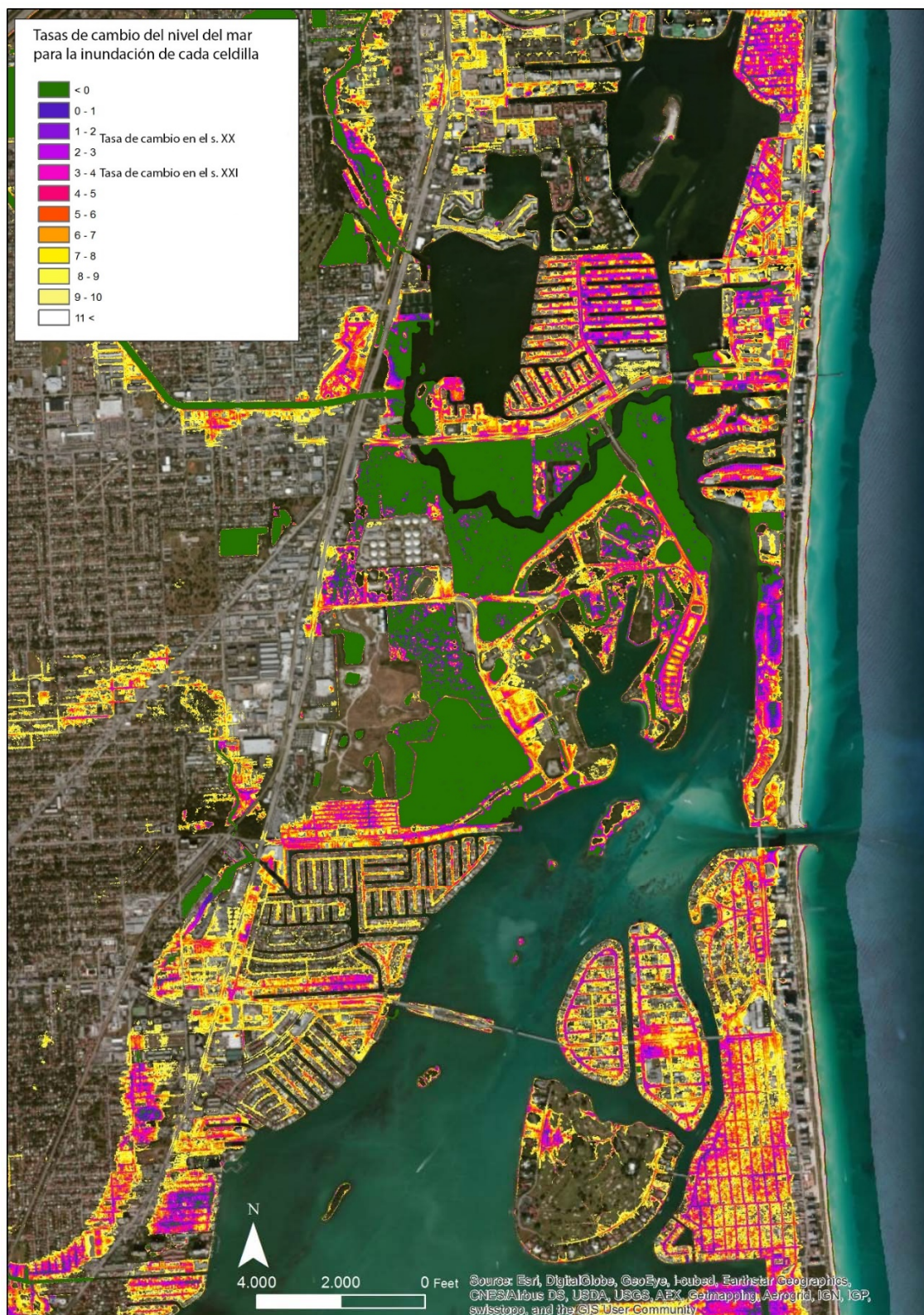


Figura 7. Tasa necesaria para la inundación de cada celdilla del MDE antes del año 2100, con pleamar de coeficiente 0,7 en el escenario RCP8.5 en el norte de Miami-Dade County.

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): "Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

5. Conclusiones

El trabajo realizado demuestra el potencial de la representación cartográfica sobre MDE, especialmente en el cálculo del riesgo de inundación permanente. Este potencial no es solo analítico (ofreciéndose nuevas variables a las comúnmente empleadas) sino de comunicación a la ciudadanía y opinión pública. Resulta conveniente, por tanto, ampliar los horizontes temporales de análisis de este tipo de estudios considerando todas las posibles fechas de inundación entre el presente y el año 2100, así como fechas posteriores. Aunque los efectos de la subida del nivel del mar sean leves a corto plazo (no se esperan incrementos significativos en el horizonte de 2030), a medio y largo plazo las consecuencias de la subida serán catastróficas, debido a la aceleración que se espera que se produzca en este fenómeno a partir de la mitad del siglo XXI.

Desde el punto de vista de la planificación espacial, es esencial contar con herramientas cartográficas que permitan desarrollar un adecuado conocimiento del horizonte de la inundabilidad de cada punto de la superficie emergida, de cara a la autorización de determinados usos y actividades en el territorio en la planificación territorial y urbana, así como para plantear medidas de mitigación basadas en el análisis espacial a escala local.

El área de estudio, profundamente antropizada y de muy baja altitud, muestran tener una excepcional exposición al fenómeno de la subida del nivel medio del mar, cuyas consecuencias serán evidentes en cortos plazos de tiempo. Los espacios potencialmente inundables que se deducen de los análisis realizados no solo son formaciones arenosas litorales o manglares, sino la mayor parte de las infraestructuras viarias y edificaciones de la ciudad de Miami. Resultaría necesario realizar un análisis completo de riesgos naturales, considerando la vulnerabilidad del área de estudio, para poder realizar estimaciones de riesgo de inundación, aunque es evidente que esta zona, por su elevada población, valor inmobiliario y actividad económica, es una de las sometidas a un mayor riesgo de inundación por subida del nivel medio del mar en todo el planeta.

Referencias

Chakraborty, J., Collins, T. W., Montgomery, M. C., y Grineski, S. E. (2014): "Social and spatial inequities in exposure to flood risk in Miami, Florida", *Natural Hazards Review*, 15(3), 04014006.

DeConto, R. M., y Pollard, D. (2016): "Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise", *Nature*, 531(7596), 591-597.

Fraille Jurado, P. y Fernández Díaz, M. (2016): "Escenarios de subida del nivel medio del mar en los mareógrafos de las costas peninsulares de España en el año 2100", *Estudios Geográficos*, 77 (280), 57-79.

Fraille Jurado, P., Sánchez E., Fernández, M., Pita M. F., y López-Torres, J. M. (2014): "Estimación del comportamiento futuro del nivel del mar en las Islas Canarias a partir del análisis de registros recientes", *Geographica*, (66), 79-98.

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. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 12, 329-348.

Fraile-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): “Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).”, *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

Fraile-Jurado, P., y Ojeda-Zújar, J. (2013): “The importance of the vertical accuracy of digital elevation models in gauging inundation by sea level rise along the Valdelagrana beach and marshes (Bay of Cádiz, SW Spain),” *Geo-Marine Letters*, 33(2-3), 225-230.

Fraile-Jurado, P., Álvarez-Francoso, J., Sánchez-Carnero, N., Ojeda-Zújar, J. (2013): “Análisis comparativo de la exposición a la subida del nivel medio del mar de la playa y marismas de Valdelagrana (Cádiz)”, *Geotemas*, vol. 14. pp 167-170.

Frazier, T. G., Wood, N., Yarnal, B., y Bauer, D. H. (2010): “Influence of potential sea level rise on societal vulnerability to hurricane storm-surge hazards, Sarasota County, Florida”, *Applied Geography*, 30(4), 490-50.

Gardner, A. S., Moholdt, G., Cogley, J. G., Wouters, B., Arendt, A. A., Wahr, J. y Ligtenberg, S. R. (2013): “A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009”, *Science*, 340(6134), 852-857.

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*, 49-58.

Giardini, D., Grünthal, G., Shedlock, K. M., y Zhang, P. (1999): “The GSHAP global seismic hazard map”, *Annals of Geophysics*, 42(6).

Iglesias-Campos, A., Simon-Colina, A., Fraile-Jurado, P., y Hodgson, N. (2010): *Methods for assessing current and future coastal vulnerability to climate change*. Copenhagen, Dinamarca, ETC/ACC Technical Paper, Bilthoven, the Netherlands: European Topic Centre on Air and Climate Change.

IPCC (2013): *Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido y New York, Estados Unidos, Cambridge University Press.

Kopp, R. E., Horton, R. M., Little, C. M., Mitrovica, J. X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D. J., y Tebaldi, C. (2014): “Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites”, *Earth's Future*, 2(8), 383-406.

Lana, X., Martínez, M. D., Burgueño, A., y Serra, C. (2008): “Return period maps of dry spells for Catalonia (northeastern Spain) based on the Weibull distribution” / “Périodes de retour des périodes sèches en Catalogne (nord-est de l'Espagne) à partir de la distribution de Weibull”, *Hydrological sciences journal*, 53(1), 48-64.

Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Baranova, O. K., Garcia, H. E., Locarnini, R. A., y Zweng, M. M. (2012): “World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010”, *Geophysical Research Letters*, 39 (10).

Nicholls, R. J., y Cazenave, A. (2010): “Sea-level rise and its impact on coastal zones”, *Science*, 328(5985), 1517-1520.

Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville D. y Fraile Jurado, P. (2009): “El uso de las tecnologías de la 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. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 9, 83-100.

Pfeffer, W. T., Harper, J. T., y O'Neel, S. (2008): “Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise”, *Science*, 321(5894), 1340-1343.

Fraille-Jurado, P. y Leatherman S.B. (2016): “Alternativas al análisis y representación cartográfica de la subida del nivel del mar sobre modelos digitales de elevaciones: el caso de Miami-Dade County (Florida, EEUU).”, *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 115-132. ISSN: 1578-5157

Purvis, M.J., Bates, P.D., Hayes, C.M., (2008): “A probabilistic methodology to estimate future coastal flood risk due to sea level rise”, *Coastal engineering*, 55(12), 1062-1073.

Rahmstorf, S., (2007): “A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise”, *Science*, 315(5810), 368-370.

Rignot, E., Velicogna, I., Van den Broeke, M. R., Monaghan, A., y Lenaerts, J. T. M. (2011): “Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise”, *Geophysical Research Letters*, 38(5).

Scholl, D. W. (1964): “Recent sedimentary record in mangrove swamps and rise in sea level over the southwestern coast of Florida: Part 1”, *Marine Geology*, 1 (4), 344-366.

Stocker, T. F. (2014): *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Titus, J. G., y Narayanan, V. (1996): “The risk of sea level rise”, *Climatic Change*, 33(2), 151-212.

Titus, J. y Richman, C., (2001): “Maps of lands vulnerable to sea level rise: modeled elevations along the U.S. Atlantic and Gulf Coasts”, *Climate Research*, 18, 205-228

Williams, K., Ewel, K. C., Stumpf, R. P., Putz, F. E., y Workman, T. W. (1999): “Sea-level rise and coastal forest retreat on the west coast of Florida, USA”, *Ecology*, 80(6), 2045-2063.

Yin, J., Schlesinger, M. E., y Stouffer, R. J. (2009): “Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States”, *Nature Geoscience*, 2(4), 262-266.

Zazo Cardaña, C., Dabrio, C. J., Goy Goy, J. L., Bardají Azcárate, T., Ghaleb, B., Lario, J., y Silva Barroso, P. G. (1996): “Cambios en la dinámica litoral y nivel del mar durante el Holoceno en el Sur de Iberia y Canarias Orientales”, *Geogaceta*, 20(7), 1679-1682.

Zhang, K. (2011): “Analysis of non-linear inundation from sea-level rise using LIDAR data: a case study for South Florida”, *Climatic Change*, 106(4), 537-565.

Zhang, K., Dittmar, J., Ross, M., y Bergh, C. (2011), “Assessment of sea level rise impacts on human population and real property in the Florida Keys”, *Climatic Change*, 107(1-2), 129-146.