

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

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)

JOSÉ OJEDA ZÚJAR ¹, JOSÉ IGNACIO ÁLVAREZ FRANCO, DANIEL MARTÍN CAJARAVILLE y PABLO FRAILE JURADO

Grupo de Investigación del PAIDI: "Ordenación Litoral y Tecnologías de Información Territorial".
Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla.
C/ María de Padilla, s/n, 41004 Sevilla, España.

¹ zujar@us.es

RESUMEN

Una de las metodologías más utilizadas como aproximación al cálculo de la vulnerabilidad de las costas (entendida como sensibilidad ante un fenómeno y capacidad de adaptación) frente a la potencial subida del nivel del mar asociado al cambio climático, es el "Índice de Vulnerabilidad Costera" (CVI). Se trata de un "índice" o valor integrado", calculado a partir de 6 variables (geomorfología, pendiente, tasas de erosión costera, altura del oleaje significativo, cambios del nivel relativo del mar y rango mareal medio). Se presentan aquí los resultados de su cálculo en la costa andaluza. Se enfatizan las aportaciones metodológicas, esencialmente ligadas a: (i) la elaboración de una "geodatabase" para la estructuración y gestión de las variables, (ii) el uso del potencial analítico de los SIG para su integración, interpolación, ponderación y cálculo y (iii) la utilización de recursos asociados a las TIG para su cartografía y difusión (visores 3D, web mapping, etc.).

Palabras clave: Índice de Vulnerabilidad Costera, nivel del mar, base de geodatos, SIG, visores tridimensionales.

THE USE OF GEOSPATIAL INFORMATION TECHNOLOGIES FOR A COASTAL VULNERABILITY INDEX (CVI) CALCULATION TO FUTURE SEA LEVEL RISE IN ANDALUSIAN COAST (SPAIN)

ABSTRACT

The Coastal Vulnerability Index (CVI) is one of the pioneer methodologies for coastal vulnerability assessment (combination of coastal system susceptibility to change and its natural ability to adapt to a changing environment) to future sea level rise associated to global climatic change. The CVI is an "index or aggregated value" of six variables (geomorphology/geology, slope, shoreline change rates, mean significant wave, relative sea level change and mean tidal range). This paper shows the results of a study intended to apply and adapt the CVI methodology to the coast of Andalusia (Spain). It is focussed on the methodological procedures, especially those linked to: (i)

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", GeoFocus (Artículos), nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

the use of a "geodatabase" for data management and integration; (ii) the use of GIS spatial analysis capabilities for interpolation, ranking and calculation; (iii) the exploration of mapping capabilities of Spatial Information Technologies for delivering the results (3D viewers, web mapping, etc.).

Keywords: Coastal Vulnerability Index, sea level rise, geodatabase, GIS, 3D viewer.

1. Introducción

Tomando datos del último informe del IPCC (2007), el nivel del mar se ha elevado con tasas anuales de 1.7 mm. ± 0.5 durante el último siglo (1.8 mm. ± 0.5 para el periodo 1961-2003). Estas tasas fueron elaboradas a partir de estudios basados en datos registrados para una selección de mareógrafos a nivel mundial (PSMSL –Permanent Service for Mean Sea Level–) que fueron filtrados de la componente de movimiento vertical de las masas continentales donde se asientan, utilizando modelos geodinámicos globales (Peltier) para corregir el ajuste isostático ligado a la fusión de los hielos del último periodo glacial (GIA).

Desde 1992 existe la posibilidad de medir el nivel medio del mar a partir de altímetros embarcados en satélites (Topex/Poseidon, Janson). Los trabajos publicados proporcionan tasas anuales de 3.1 mm. ± 0.7 (IPCC, 2007). Estos datos, al ser obtenidos con carácter cuasi-global, reflejan la variabilidad espacial del nivel del mar, si bien, debido a la escala temporal de los registros, esta variabilidad espacial está mayormente asociada a variaciones de la temperatura y salinidad, así como a fenómenos hidrodinámicos a esta escala (corrientes superficiales, Niño, NAO, etc.).

Para el próximo siglo, las tasas de incremento continuarán y, según hacia qué escenario (de los recogidos en el Informe del IPCC -2007-) evolucionemos, podrían tener valores que duplicarían las tasas registradas en el siglo XX. Estos datos, procedentes de modelos numéricos, suponen ascensos entre 18 cm. (escenarios más controladores de la emisión de gases invernadero) a 58 cm. (escenarios con menos intervención en la emisión de gases invernadero) para final del siglo XXI. Es importante constatar que, independientemente del escenario elegido, el nivel del mar seguirá subiendo con tasas entre 2 y 3 mm/año durante la primera mitad del siglo XXI.

Los impactos de esta potencial subida estarán asociados a un incremento de la erosión costera, a los procesos de intrusión salina en estuarios y acuíferos costeros o a la elevación de los riesgos de inundación entre otros. La evaluación y cuantificación de estos efectos y daños indeseados es un proceso complejo y se han desarrollado diferentes métodos para llevarlos a cabo, cada uno con ventajas y limitaciones (proyección de tasas de erosión, aplicación de la ley de Bruun, la modelización numérica de parámetros como el oleaje y la subida de nivel de mar, la cuantificación numérica –modelos– de balances sedimentarios, etc.).

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): “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)”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

3. Objetivos y zona de estudio

En este artículo, para obtener una primera aproximación de la sensibilidad y capacidad de adaptación de la costa andaluza ante esta potencial subida del nivel del mar, se propone, como objetivo general, aplicar la metodología (Coastal Vulnerability Index –CVI- ó Índice de Vulnerabilidad Costera) desarrollada por el USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos), con una adaptación a las características y escala de la costa andaluza.

La costa de Andalucía se extiende a lo largo de aproximadamente 800 km presentando dos tramos claramente diferenciados: un sector occidental hasta el Estrecho de Gibraltar, expuesto al oleaje del océano Atlántico, con un carácter mesomareal y donde predominan las formaciones arenosas y marismas mareales; y sector oriental (Estrecho de Gibraltar-Almería), expuesto al oleaje del mar Mediterráneo, micromareal y con una mayor presencia de costas rocosas y acantiladas, junto a playas, deltas y albuferas. Debido a su singularidad y peculiaridades (costa atlántica/costa mediterránea) esta costa ha sido objeto de diferentes estudios por parte de diferentes investigadores e instituciones que nos permiten tener un conocimiento bastante detallado de las características físico-naturales de la costa andaluza y su evolución reciente (Serie Magna del IGME, Zazo y Goy, 2000; Ojeda, 2003; Del Río, 2007 o Viciano, 1998 entre otros). Todos ellos han proporcionado un conjunto considerable de información que, en parte (sobre todo la expresada en forma cartográfica), fue integrada en el Sistema de Información Geográfica del Litoral de Andalucía (SIGLA), proyecto impulsado y financiado por la Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía (Ojeda, 2005) con una importante contribución de otras consejerías, especialmente los datos aportados por la Consejería de Medio Ambiente. Esta consejería, a su vez, ha financiado la realización de un proyecto de investigación del que se derivan los resultados de este artículo que, más que centrarse en los resultados, presenta un enfoque esencialmente metodológico enfatizando las aportaciones de las TIG al proceso de cuantificación y cartografía del CVI. Por otra parte, la importante base de datos espacial implementada en el SIGLA ha representado la principal fuente de datos para algunas de las variables utilizadas en la elaboración del CVI y, por tanto, constituye la base para la generación de la “base de geodatos” que sustenta este estudio.

4. Metodología

La elección de este índice (*Coastal Vulnerability Index –CVI-*) está justificado por tratarse de un índice sintético, integrado por variables de carácter mayoritariamente cuantitativo, de fácil aplicación a partir de los datos existentes sobre la costa de Andalucía y de amplia aceptación en otros estados y ámbitos costeros (USA, Canadá, Indonesia, etc.), así como por proponerse, con las consiguientes modificaciones para adaptarlo a las características de la costa española, en el informe sobre “Impactos en la costa española por el cambio climático” (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, 2007) realizado por el Ministerio de Medio Ambiente (Fase III: Estrategias frente al cambio climático en la costa).

Para la correcta comprensión de los resultados del mismo es esencial enfatizar que se trata de un índice relativo de la vulnerabilidad de la costa ante la potencial subida del nivel del mar. El concepto de vulnerabilidad se asocia a la sensibilidad de un ecosistema (grado en que puede verse

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): “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)”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

afectado en función de su exposición) ante un fenómeno (subida del nivel del mar) o/y a su capacidad de adaptación. Generalmente se acepta distinguir entre vulnerabilidad del medio natural y vulnerabilidad socio-económica, pero enfatizando su interrelación e interdependencia. Es comúnmente aceptado que el primer paso en todo estudio de vulnerabilidad comienza por el análisis de la vulnerabilidad del medio natural. A este objetivo se dedica el presente estudio.

Para evaluar esta respuesta de la costa ante una potencial subida del nivel del mar, la primera fase está centrada en la cuantificación de las diferentes variables que contribuyen a la evolución de la costa en un área determinada. Para ello se han propuesto varias metodologías de evaluación de la vulnerabilidad a través de diferentes índices. Experiencias pioneras fueron las de Gornitz y White (1992) y Gornitz *et al.* (1994) en USA y Shaw *et al.* (1998) para las costas canadienses. Posteriormente el USGS ha puesto a punto una metodología (Hammar-Klose y Thieler, 2001) que se ha aplicado a escala nacional en USA y a escala “regional” centrada en los Parques Nacionales costeros de aquel país. Esta metodología, que se utilizará ligeramente modificada en esta comunicación, se basa en la ponderación de 1 (muy baja vulnerabilidad) a 5 (muy alta vulnerabilidad) para un conjunto de 6 variables que tienen una clara influencia en la evolución de la costa. Estas variables se clasifican en dos grandes grupos:

- Variables geológicas/geomorfológicas. Estas variables son consideradas en función de: a) la resistencia que ofrece el soporte geológico/geomorfológico a la erosión (geomorfología / geología); b) las tendencias del cambio de la línea de costa a largo plazo (tasas de erosión) y c) la susceptibilidad a los procesos de inundación marina (pendiente costera).

- Variables físicas/hidrodinámicas. Las tres variables incluidas contribuyen significativamente a los procesos de erosión e inundación del sector costero analizado: d) altura media del oleaje significativo; e) tasas de cambio del nivel relativo del mar y f) rango mareal medio.

El relativamente simple sistema de ponderación (de 1 a 5) empleado con las 6 variables permite su integración en una ecuación que, finalmente, proporciona el Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI):

$$CVI = \sqrt{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}{6}}$$

siendo a = resistencia del substrato geológico/geomorfológico a la erosión, b = tasas de erosión, c = pendiente costera, d = oleaje medio significativo, e = tasa de cambio del nivel relativo del mar y f = rango mareal medio.

4.1. Cálculo y clasificación de la variable: “geología/geomorfológica” (MOR)

Esta variable expresa la erodibilidad relativa de las diferentes formaciones costeras. El sistema de clasificación utilizado exige la asignación a cada tramo costero (en nuestro caso de 200 metros aproximadamente) de un valor entre 1 y 5 de vulnerabilidad. Esta asignación para una

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", GeoFocus (Artículos), nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

variable cualitativa, aunque aquí expresada cuantitativamente, exige una detallada información sobre la morfología y geología de la costa analizada. La posibilidad de utilizar la información georreferenciada contenida en el SIGLA (MDE, mapas geológicos, mapas fisiográficos, etc.), junto a su visualización 3D con el visor desarrollado para ello (Ojeda y Cabrera, 2006), ha sido de inestimable ayuda para la incorporación de esta variable a la base de geodatos sobre la que se calculará el CVI. Asimismo, ha sido esencial la disponibilidad de fotografías de campo (7000) y videos (1000) georreferenciados con GPS procedentes de un recorrido sobre el litoral de Andalucía realizado por el Grupo de Investigación al que pertenecen los autores de este trabajo, también incluidos en el SIGLA. Con este bagaje documental se procede a establecer los criterios de clasificación que se muestran en la [tabla 1](#). Los criterios de clasificación son similares a los de la metodología original, con una adaptación a las formas y formaciones geomorfológicas existentes en la costa de Andalucía.

4.2. Cálculo y clasificación de la variable: "pendiente" (sustituida por "índice topográfico", TOPO).

La aplicación del CVI por el USGS para los Parques Nacionales costeros de USA (con una escala más parecida a la de la costa andaluza que la aplicación a escala nacional), utiliza para el cálculo de la pendiente regional una matriz numérica (grid) de elevaciones (MDE de 90 metros aproximadamente de resolución espacial) que se extiende 10 km. hacia el interior y hacia mar abierto. Posteriormente se calcula la pendiente media para un radio de 10 km. y se remuestran los resultados a 1 minuto de resolución. Para el cálculo de esta variable en las costas de Andalucía era necesario, por lo tanto, la disponibilidad de un MDE, tanto de las tierras emergidas como del relieve sumergido.

En una primera fase se elaboró un MDE conjunto remuestreado a 40 metros de resolución espacial que integraba el Modelo Digital del Terreno de Andalucía extraído por estéreo-correlación y con 10 de resolución espacial (Junta de Andalucía, 2005) para las zonas emergidas, junto al Modelo Digital de Elevaciones del relieve marino (100 metros de resolución espacial), incorporado al SIGLA y elaborado a partir de las curvas batimétricas de las cartas náuticas de Andalucía (escalas medias: aproximadamente 1:50.000). A partir de él se aplicó el método original del USGS, reduciendo el ámbito de influencia a 5 km. para el cálculo de la pendiente media de cada punto de la costa andaluza (equidistancia 200 metros). Los resultados arrojaron dos evidencias: (i) por una parte, el resultado obtenido no permitía matizar mucho espacialmente, ya que el ámbito de influencia de 5/10 km. no hacía posible discriminar la presencia de pequeñas ensenadas, marismas, deltas y valles, en nuestro caso, las áreas de una mayor vulnerabilidad potencial; (ii) por otra parte, la mezcla de MDE de tan diferente calidad en cuanto a precisión nos parecía un gran riesgo.

Dado que el argumento conceptual de la elección de esta variable es que la pendiente de un sector costero puede incrementar la vulnerabilidad (potencial inundación y velocidad de retroceso costero) en el sentido de a menor pendiente, mayor vulnerabilidad y, por otra parte, dado que todas las tasas históricas del nivel relativo del mar en Andalucía son positivas (ver variable cambios del nivel de mar) y es esperable que la contribución del cambio climático intensifique la tendencia en el mismo signo, intentamos modificar la metodología en los siguientes aspectos:

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

- Por una parte, en vez de utilizar el área de influencia para el cálculo de la pendiente media con un buffer circular (10 o 5 km.), definimos el ámbito de análisis a través de un rectángulo de 200m de ancho transversal a la costa y generado a partir de una línea perpendicular a aquella (véase [figura 1](#)).

- Por otra parte, dado que no es esperable, ni en los escenarios más pesimistas para el próximo siglo, subidas del nivel del mar superiores a 10 metros, consideramos que sólo es interesante la pendiente media de los terrenos emergidos inferiores a esa altitud que, además, tengan conexión con la línea de costa actual.

Esto obligaba a un tratamiento del Modelo Digital del Terreno de Andalucía (10 metros de resolución espacial) que permitiese la extracción de los terrenos inferiores a 10 metros y que respetase las características anteriormente comentadas (contigüidad con las aguas marinas). Finalmente, para cada rectángulo, ortogonal a cada punto de la línea de costa (equidistantes 200 m.), se extraen del MDE tres valores:

- La distancia "D" hacia el interior derivada del número de celdillas del MDE (o su expresión como superficie) que cumplen las condiciones referidas (<10 metros de altitud y continuidad espacial con la costa actual). Este parámetro es un indicador del alcance tierra adentro de una potencial subida del nivel del mar: dos polígonos rectangulares pueden tener la misma pendiente y altura media y, sin embargo, uno puede afectar sólo 100 m. tierra adentro y otro 2000 m. A mayor penetración, mayor vulnerabilidad.

- La pendiente media "P" de las celdillas que cumplen las condiciones antes apuntadas para cada polígono: bajo iguales condiciones de penetración hacia el interior y altura media, a menor pendiente mayor vulnerabilidad.

- La altura media "A" de las celdillas que cumplen las condiciones antes apuntadas para cada polígono: podríamos tener dos polígonos con igual pendiente y penetración hacia el interior, pero uno sobre una superficie elevada 4 metros sobre el nivel medio del mar y otro a 2 metros: a menor altitud, mayor vulnerabilidad.

Cada uno de ellos se clasifica con valores de 1 a 5 como se muestra en la [tabla 2](#).

Finalmente se elabora un índice topográfico (TOPO), sustituto de la pendiente media de la metodología original, como la media aritmética de los tres valores. Finalmente el resultado se clasifica de 1 a 5:

$$TOPO = \frac{D + P + A}{3}$$

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): “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)”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

4.3. Cálculo y clasificación de la variable: “tasas de cambio de la línea de costa” (ERO)

El cálculo de tasas de cambio en la línea de costa ha constituido uno de los temas clásicos en geomorfología costera (Ojeda, 2000; Boak y Turner, 2005) y, de hecho, muchos trabajos de estas características han sido realizados sobre diferentes tramos de la costa de Andalucía (Viciana, 1998; Del Río, 2007), si bien ninguno de ellos recoge la totalidad de la costa andaluza. Dadas las características de estos estudios, muy deudores en sus resultados de las fechas de los documentos de referencia utilizados (cartas náuticas, mapas topográficos y, sobre todo, fotografía aérea...), del indicador que se utilice como “línea de costa” y del rango temporal utilizado, se adoptó la decisión de realizar este cálculo “ex novo” por los autores de este artículo. Se seleccionaron las siguientes fuentes de información:

- El vuelo “americano” del 1956. La elección de este vuelo está justificada por ser la referencia fotogramétrica más antigua para la que existe un recubrimiento total de la costa andaluza. Adicionalmente, la reciente elaboración por parte de la Junta de Andalucía de una serie de ortofotografías para este vuelo, eliminaba el problema inherente a los ajustes geométricos necesarios de los fotogramas (escala aproximada 1:30.000) para los procesos de digitalización. La ortofoto tiene una resolución espacial de 1 metro.

- La Ortofotografía Digital de Andalucía del 2001 (0.5 metros de resolución espacial) elaborada por la Junta de Andalucía.

- La Ortoimagen QuickBird de la costa de Andalucía del 2005, recientemente editada por el Instituto Cartográfico de Andalucía –ICA- con una resolución espacial de 0.7 metros.

Para cada una de estas fechas se procedió a la digitalización de las líneas de costa utilizando, con carácter prioritario, el criterio de “línea de costa estable” (límite entre la playa alta –backshore–/duna costera –foredune–, o bien la base del acantilado) siempre que fuese posible. Sólo cuando este límite fue imposible de interpretar se utilizó el criterio de “marca húmeda” de la pleamar (un criterio de más difícil interpretación en el atlántico –mesomareal– que en el mediterráneo –micromareal–). Para los procesos de digitalización y cálculo de las tasas de erosión se utilizó la extensión para ArcGIS 9.2 “DSAS” Digital Shoreline Analysis System (<http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/dsas/>), de forma similar a su utilización por el USGS de USA. Finalmente se procedió a la clasificación de las tasas calculadas y a la asignación de valores entre 1 y 5, utilizando los rangos comúnmente establecidos para el CVI por el USGS que se muestran en la [tabla 3](#).

4.4. Cálculo y clasificación de la variable: “oleaje significativo medio” (HS)

Dada la necesidad de espacialización de este parámetro (oleaje significativo medio –HS–) para su incorporación al CVI se procedió a un análisis de la información disponible, comenzando por la recogida por “Puertos del Estado”. Dicho organismo es el responsable del mantenimiento de la red de boyas de medición de aguas profundas y aguas someras para el estado español. En el mismo nos informaron de la diversidad en los datos originales, así como de la complejidad de su

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", GeoFocus (Artículos), n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

tratamiento de cara a los objetivos del CVI. Por ello, nos propusieron utilizar los datos procedentes del proyecto HIPOCAS que ya habían sido utilizados y calibrados por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria (2007) de cara a la elaboración del proyecto "Impactos en la Costa Española por efecto del Cambio Climático" para el ministerio de Medio Ambiente.

Para la incorporación a la base de geodatos del CVI y el tratamiento integrado de estos datos con el resto de variables se procedió a realizar una interpolación lineal de los datos puntuales obtenidos de dicho proyecto sobre una línea de costa suavizada. Este proceso permitió, posteriormente, asignar un valor medio para cada tramo de 200 metros. Estos datos medios fueron finalmente clasificados (quintiles) de 1 a 5 a partir de los intervalos de la [tabla 4](#).

Finalmente, los valores de esta variable se revisaron para las zonas protegidas del oleaje en los sectores de estuarios (Tinto-Odiel, Piedras, etc.) y bahías parcialmente protegidas (Algeciras y Bahía Exterior de Cádiz), debido a su procedencia de boyas y la modelización del oleaje en aguas profundas.

4.5. Cálculo y clasificación de la variable: "tasas de cambio del nivel relativo del mar" (LEV).

La variable ligada a las oscilaciones del nivel del mar es, quizás, una de las más complejas de integrar en el CVI. El USGS de USA utiliza las tasas extraídas de los registros medidos por los mareógrafos presentes en el área de estudio (nivel relativo del mar). No precisa muy bien como se lleva a cabo el proceso de espacialización de esta variable cuando en la zona de estudio se encuentran varios mareógrafos, aunque en comunicación personal de R. Thieler (autor de muchos estudios de aplicación del CVI para el USGS) en Málaga, se nos informó de que se realizaba una interpolación lineal. Aún siendo conscientes que este procedimiento puede conllevar un alto grado de imprecisión (variabilidad regional del nivel del mar, límites netos entre sectores con comportamiento tectónico diferente, etc.), se optó por aplicar este método en este trabajo, con carácter preliminar, dado su enfoque metodológico.

Aunque en la costa de Andalucía está instalado un número elevado de mareógrafos, los únicos adecuados para esta variable son los que disponen de series temporales suficientemente largas (superiores a 30 años). Adicionalmente es necesario subrayar que, para el cálculo de las tasas existe en la actualidad un complejo debate científico sobre el tratamiento estadístico de las series, cuyo alcance sobrepasa los objetivos de esta comunicación. Siendo conscientes de ello, y dado el objetivo metodológico de este trabajo, se han utilizado finalmente los datos de los mareógrafos proporcionados por el PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level), es decir, las series temporales con periodicidad mensual correspondientes a 6 mareógrafos: Lagos, Cádiz, Tarifa, Algeciras, Málaga y Alicante (PSMSL, 2008: <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>). Para la obtención de la tasa de cambio del nivel relativo del mar en cada mareógrafo se ha realizado un clásico análisis de regresión temporal de cada una de las series anuales de niveles medios del mar procedentes de la corrección y tratamiento (interpolación de las lagunas en las series temporales, cálculo de los valores medios anuales) de cada una de las series mensuales originales del PSMSL.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", GeoFocus (Artículos), n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

Para la incorporación a la base de geodatos del CVI y su integración con el resto de variables (todos los mareógrafos arrojan tasas positivas o cercanas a 0) se realizó una interpolación lineal de los datos puntuales (mareógrafos) sobre una línea de costa suavizada. Estos datos fueron utilizados para asignar a cada tramo de 200 metros de línea de costa un valor entre 1 y 5, a partir de los intervalos contemplados en la metodología del CVI que aparecen en la [tabla 5](#).

4.6. Cálculo y clasificación de la variable: "rango mareal medio" (TID)

La costa andaluza presenta dos fachadas claramente diferenciadas en cuanto a su comportamiento mareal. La fachada atlántica es claramente mesomareal, con rangos mareales medios en mareas vivas próximos a 2.5/3 metros, mientras que la mediterránea es micromareal, cuyos valores están siempre muy por debajo de 1 metro. La costa del Estrecho de Gibraltar se presenta como zona de transición entre ambos ámbitos.

El organismo que aporta un mayor volumen de información para esta variable en la zona de estudio es Puertos del Estado. Esta institución ha desarrollado durante los últimos años el sistema NIVMAR, que predice los niveles del mar esperables con unos pocos días de antelación. El sistema de predicción utilizado es el resultado de la combinación de la simulación de variables meteorológicas y oceanográficas. Una parte de la simulación de las variables oceanográficas está compuesta por un modelo del comportamiento de la marea, que ofrece una gran densidad de puntos para el litoral atlántico andaluz. Para este trabajo se asume que el valor medio del rango mareal está asociado a un coeficiente de marea de 0.7, por lo que con la identificación de los días con coeficiente mareal de 0.7 en la base de datos de Puertos del Estado es posible obtener una primera aproximación al rango mareal medio para cualquier mareógrafo de los disponibles en este organismo.

Para la incorporación a la base de geodatos del CVI y su integración con el resto de variables se tuvo que realizar igualmente una interpolación lineal de los datos puntuales (asociados a los mareógrafos utilizados) sobre una línea de costa suavizada. Estos datos fueron inicialmente clasificados (quintiles) de 1 a 5, a partir de los intervalos de la [tabla 6](#).

4.7. Cálculo del CVI para la costa de Andalucía

El CVI calculado para la costa andaluza, siguiendo la metodología del USGS, proporciona la posibilidad de relacionar las 6 variables asignadas a cada tramo de 200 m. de forma cuantitativa, para expresar su vulnerabilidad relativa en relación a los cambios físicos que sufriría la costa ante la potencial subida del nivel del mar. Es necesario recordar de nuevo que, aunque este método proporciona los resultados de forma numérica, éstos no deben interpretarse como directamente asociados a cambios físicos específicos. Sin embargo, sí muestran dónde los combinados efectos de las oscilaciones del nivel medio del mar serían mayores.

Como ya apuntamos en la introducción, una vez que las 6 variables han sido asignadas a cada tramo de costa (clasificadas de 1 a 5), es posible integrarlas a través de una ecuación que se

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): “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)”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

expresa como la raíz cuadrada del producto de las 6 variables -clasificadas- dividido por el número de variables:

$$CVI = \sqrt{\frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}{6}}$$

siendo a = resistencia a la erosión, b = tasa de erosión, c = índice topográfico, d = oleaje medio significativo, e = tasa de cambio del nivel relativo del mar y f = rango mareal medio.

5. Resultados y conclusiones

El valor del CVI calculado es posteriormente dividido en 4 clases (en algunas ocasiones se utilizan 5) utilizando como límites los percentiles 25%, 50% y 75%. La utilización de percentiles es la forma de ordenar los resultados de la vulnerabilidad, es decir, de esta forma podemos identificar los tramos según su “vulnerabilidad relativa” sin que el valor en sí mismo del CVI se asocie a cambios específicos de tipo físico. Los resultados del CVI, en este caso, arrojan unos valores entre 2,23 y 35,35. Los rangos para la clasificación de la vulnerabilidad total calculada por este índice se muestran en la [tabla 7](#).

Como conclusión metodológica específica, nos gustaría enfatizar que los resultados de la aplicación de esta metodología, al ser generados a partir de una base de geodatos y la utilización de las diferentes técnicas de análisis espacial que facilitan los SIG, pueden finalmente ser expresados de forma estadística (véase [figura 2](#)), asociándolos a diferentes entidades (municipios, provincias, espacios protegidos, etc.) o cartográfica (mapas en papel, vistas tridimensionales, servicios OGC, etc.). Igualmente, la incorporación de los datos a una base de datos espacial (“geodatabase” de ESRI en este caso) facilita todas las labores de gestión y actualización de los mismos y el control interactivo de las ponderaciones, así como la simulación inmediata de diferentes criterios de ponderación para la elección de los umbrales definitivos.

En este sentido, la herramienta “Model Builder” ha sido de gran utilidad para integrar y simular el algoritmo de cálculo definitivo a partir de los tramos de 200 metros que constituyen la referencia espacial más desagregada espacialmente para el cálculo del mismo (véase [figura 3](#)). La utilización de esta herramienta, diseñada por los autores y que consideramos una aportación metodológica singular de este trabajo, facilita igualmente las labores de representación cartográfica si se elige el método de representación utilizado por el USGS, ya que para todas las variables y el cálculo total de vulnerabilidad, se adopta una representación de rectángulos exentos y paralelos a la costa, que pueden ser de diferente tamaño según la escala (500, 1000, 2000 ó 5000 metros de longitud según la extensión del ámbito elegido, véanse [figura 4](#) y [figura 5](#)). Las relaciones de cardinalidad entre “puntos originales” –asociados a tramos de 200 m. de costa- y “rectángulos de representación” establecidas en la base de geodatos y explotadas por esta herramienta, facilitan su cálculo, así como la asignación del valor medio a los rectángulos de la representación cartográfica, cualquiera que sea el tamaño y escala elegidos.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

Adicionalmente, la potencialidad gráfica del visor tridimensional desarrollado para el SIGLA (Ojeda y Cabrera, 2006) ofrece un amplio abanico de representaciones cartográficas, e incluso se está desarrollando una versión para el acceso por Internet. Esta representación simplificada, a base de rectángulos de diferente tamaño (aunque el cálculo original se realiza sobre cada tramo de 200 metros de línea de costa), nos parece acertada, ya que el CVI constituye un índice relativo, esencialmente pensado como un primer análisis preliminar que permita tomar decisiones a nivel "estratégico" y "orientativo" sobre las zonas de mayor vulnerabilidad, las cuales, posteriormente, pueden ser objeto de análisis más detallados y específicos sobre riesgos.

6. Discusión

Es conveniente no confundir, en este sentido, el concepto de vulnerabilidad utilizado en este Índice con el concepto de vulnerabilidad asociado clásicamente a la evaluación de riesgos, ya que éstos conllevan el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno (peligrosidad natural) multiplicado por su "vulnerabilidad" (exposición x evaluación de daños). A diferencia de este enfoque, en este caso no se calcula la probabilidad de ocurrencia, y lo que es más importante, no se cartografían de forma detallada las áreas afectadas (condición necesaria para el cálculo de la exposición y daños). Con este índice se intenta evaluar, en una primera aproximación, la sensibilidad de cada sector costero ante una potencial subida del nivel del mar y su capacidad de adaptación, utilizando para ello un conjunto de variables físicas y geológico/geomorfológicas. Éste es el motivo por el que se utiliza un sistema de representación de los resultados que no identifican sobre la superficie costera emergida el nivel de vulnerabilidad sino que cada nivel de vulnerabilidad relativa se asocia a un tramo costero (de diferente magnitud según la escala de estudio). Es necesario subrayar igualmente que en esta metodología no se evalúa la vulnerabilidad a fenómenos extremos (temporales, tsunamis, etc.).

Agradecimientos

Los resultados de este trabajo proceden del proyecto de investigación "Análisis de la vulnerabilidad de la costa de Andalucía ante una potencial subida del nivel del mar" financiado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía a través de la empresa pública EGMASA, S.A.

Referencias bibliográficas

- Boak, E.H. y Turner, I.L. (2005): "Shoreline definition and detection: a review", *Journal of Coastal Research*, 21 (4), pp. 688-703.
- Del Río Rodríguez, L. (2007): *Riesgos de erosión costera en el litoral atlántico gaditano*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz.
- Gornitz, V.M. 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.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

- Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W. y Birdwell, K.R. (1994): "The development of a coastal vulnerability assessment database; vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast", *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 12, pp. 327-338.
- Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria (2007): "Impactos en la costa española por el cambio climático" (Fase III: Estrategias frente al cambio climático en la costa). Ministerio de Medio Ambiente. CD.
- Junta de Andalucía (2005): *Modelo Digital del Terreno de Andalucía*. Junta de Andalucía. Aplicación informática en DVD.
- Hammar-Klose, E.S. y Thieler, E.R. (2001): *Coastal vulnerability to sea-level rise, a preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts*. U.S. Geological Survey, Digital Data Series DDS-68, 1 CD. [Consulta: 28-12-2008]. Disponible en <http://pubs.usgs.gov/dds/dds68/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*. [Consulta: 28-12-2008]. Disponible en <http://www.ipcc.ch>.
- Ojeda Zújar, J. (2000): "Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuestas". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, n° 30, pp. 103-119.
- Ojeda Zújar, J. (2003): "Las costas andaluzas". En *Geografía de Andalucía*. (Coord. Antonio López Ontiveros). Barcelona, Ariel, pp. 118-135.
- Ojeda Zújar, J. (2005): "El mapa fisiográfico del litoral de Andalucía". En: *Atlas de Andalucía, Tomo II: Cartografía Ambiental*. Consejería de Obras Públicas y Transporte y Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. pp. 241-259 (5 hojas a escala 1:200.000).
- Ojeda Zújar, J. y Cabrera Tordera, A. (2006): "Utilidades y funcionalidades de un visor tridimensional interactivo en la gestión litoral (SIGLA: Sistema de Información Geográfica del Litoral de Andalucía)", *Cuadernos Geográficos*, n° 39 (2), pp.41-52.
- Shaw, J., Taylor, R.B., Forbes, D.L., Ruz, M.H., y Solomon, S. (1998): "Sensitivity of the Canadian coast to sea-level rise", *Geological Survey of Canada Bulletin* n° 505.
- Permanent Service for Mean Sea Level -PSMSL-, 2008: Datos de mareógrafos recopilados por el Proudman Oceanographic Laboratory. Disponibles en: <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>
- Viciano Martínez-Lage, A. (1998): *La erosión antrópica en las acumulaciones sedimentarias del litoral almeriense*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Zazo, C. y Goy, J.L. (2000): "Cambios eustáticos y climáticos durante el Cuaternario. Una síntesis sobre su registro en los litorales del sur y sureste de la Península, Islas Canarias y Baleares". En *Geomorfología Litoral. Procesos activos* (Ed. J. R. de Andres y F.J. Gracia). ITGME. pp. 187-206.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la variable "geología/geomorfología".

Clase	Valor clasificado	Descripción
Muy bajo	1	Acantilados altos sobre rocas coherentes
Bajo	2	Acantilados medios sobre rocas de resistencia media
Moderado	3	Acantilados medios/bajos sobre formaciones sedimentarias de alta erodibilidad
Alto	4	Playas extensas adosadas a planicies sedimentarias litorales poco elevadas
Muy alto	5	Playas adosadas a formaciones de islas-barrera, tómbolos, flechas litorales, deltas, etc. También sectores que protegen formaciones de marismas mareales o fluvio-mareales

Fuente: Elaboración propia a partir de la información del SIGLA.

Tabla 2. Clasificación de las variables que componen la variable "índice topográfico".

Clase	Valor clasificado	D (m)	P (%)	A (m)
Muy bajo	1	[0, 250]	(8, máx.]	(8, máx.]
Bajo	2	(250, 500]	(4, 8]	(6, 8]
Moderado	3	(500, 1000]	(2, 4]	(4, 6]
Alto	4	(1000-3000]	(1, 2]	(2, 4]
Muy alto	5	(3000, máx.]	[0, 1]	[0, 2]

Fuente: Elaboración propia a partir del MDT de Andalucía de 10 metros.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Clasificación de la variable "tasas de cambio de la línea de costa".

Clase	Valor clasificado	ERO (m/año)
Muy bajo	1	(2, máx]
Bajo	2	(1, 2]
Moderado	3	(-1, 1]
Alto	4	(-2, -1]
Muy alto	5	[mín., -2]

Fuente: Elaboración propia a partir del Vuelo "americano" del 1956, de la Ortofotografía Digital de Andalucía del 2001 y de la Ortoimagen QuickBird de la costa de Andalucía del 2005.

Tabla 4. Clasificación de la variable "oleaje significativo medio".

Clase	Valor clasificado	HS (m.)
Muy bajo	1	(0, 0.75]
Bajo	2	(0.75, 0.85]
Moderado	3	(0.85, 0.95]
Alto	4	(0.95, -1.05]
Muy alto	5	(1.05, 1.15]

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del proyecto HIPOCAS.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

Tabla 5. Clasificación de la variable "tasas de cambio del nivel relativo del mar"

Clase	Valor clasificado	LEV (mm/año)
Muy bajo	1	(0, 1.8]
Bajo	2	(1.8, 2.5]
Moderado	3	(2.5, 3.0]
Alto	4	(3.0, 3.5]
Muy alto	5	(3.5, máx.]

Fuente.: Elaboración propia a partir de los datos de los mareógrafos proporcionados por el PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level).

Tabla 6. Clasificación de la variable "rango mareal medio"

Clase	Valor clasificado	TID (m.)
Muy bajo	1	(6, máx.]
Bajo	2	(4, 6]
Moderado	3	(2, 4]
Alto	4	(1, 2]
Muy alto	5	[0, 1]

Fuente.: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por Puertos del Estado.

Tabla 7. Clasificación del CVI.

Clase	Vulnerabilidad clasificada	Valor del CVI
Baja	1	(2.23, 6.32]
Media	2	(6.32, 10.00]
Alta	3	(10.00, 14.14]
Muy alta	4	(14.14, 35.35]

Fuente: Elaboración propia.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

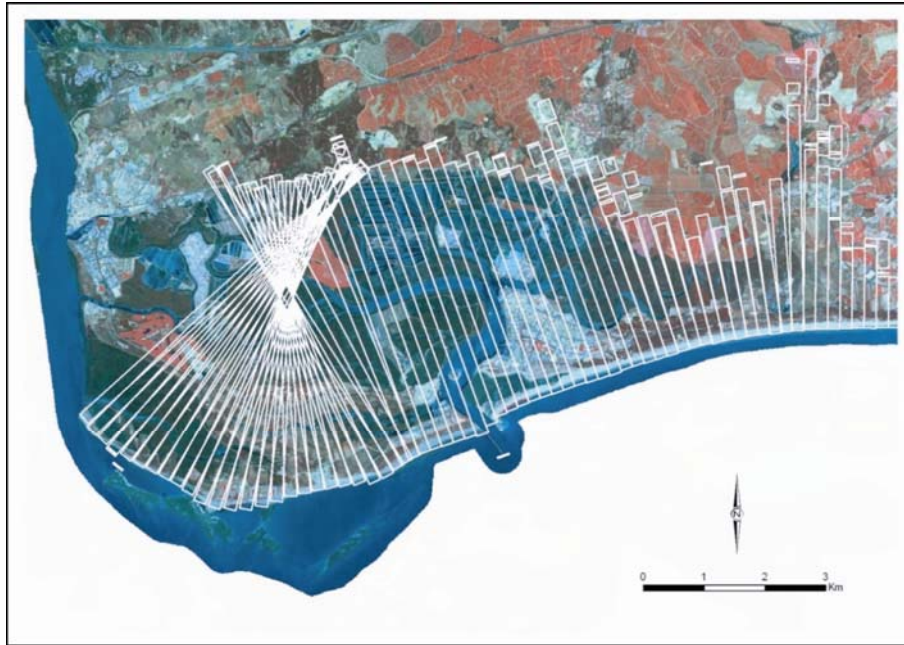


Figura 1. Representación de los rectángulos ortogonales a la costa y su penetración hacia el límite interior definido por las zonas con alturas inferiores a 10 metros (píxeles del MDE de 10 m. de resolución) conectadas con la línea de costa actual.

Fte. Elaboración propia.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

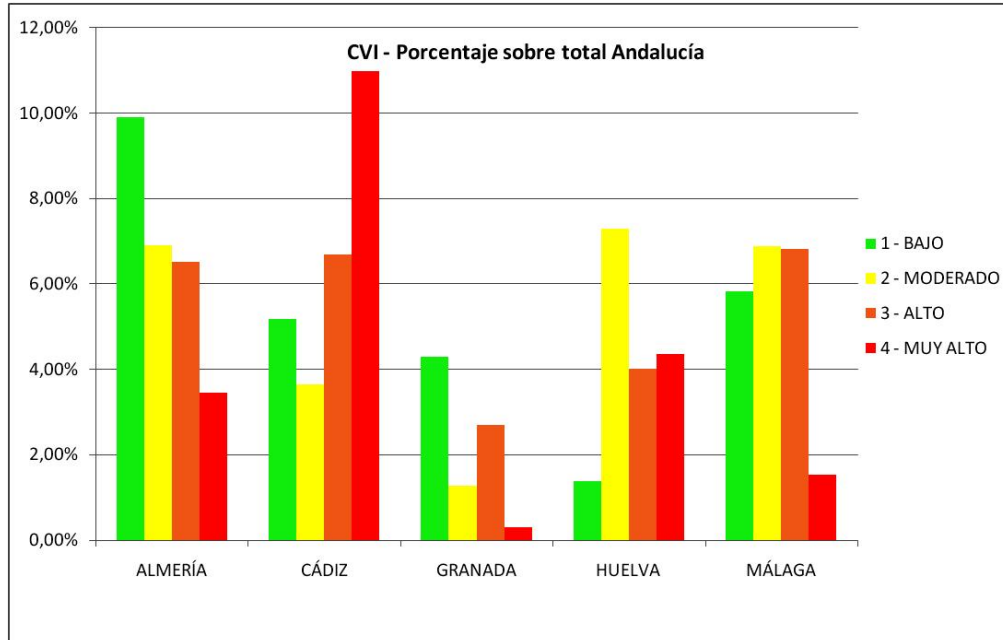


Figura 2. Presentación estadística de los resultados agregados a nivel provincial.
Fuente: Elaboración propia.

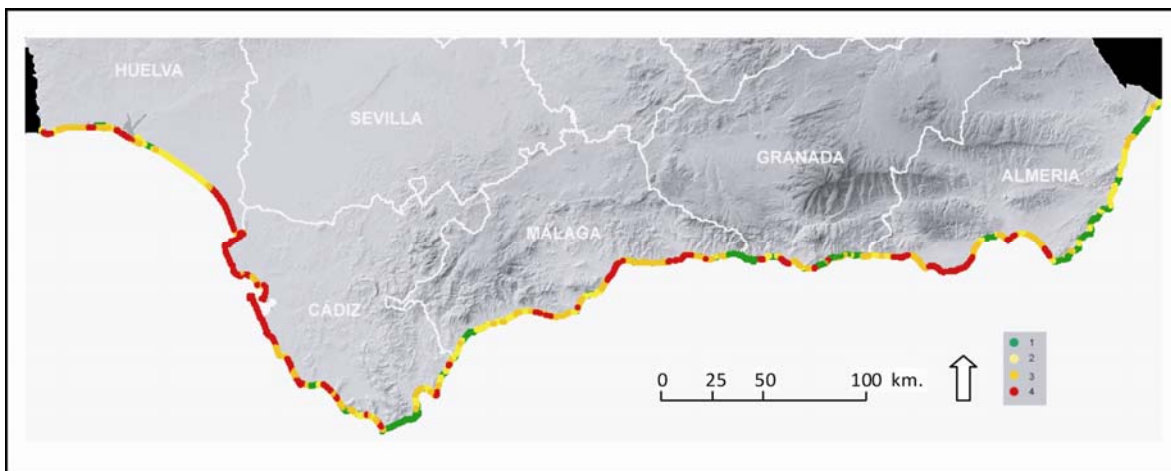


Figura 3. Representación del CVI total para Andalucía, asociado a puntos que representan 200 metros de línea de costa (1 bajo; 2 moderado; 3 alto y 4 muy alto).
Fuente: Elaboración propia.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): "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)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

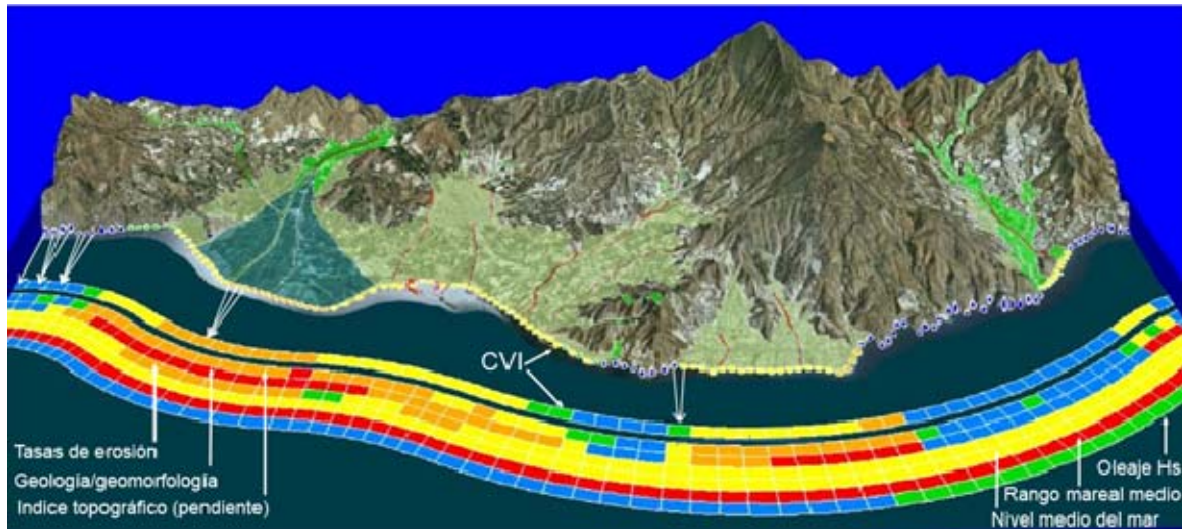


Figura 4. Representación tridimensional de los resultados para un sector de la costa mediterránea de Andalucía realizada con el Visor del SIGLA que integra un MDE, una ortofoto y las unidades fisiográficas costeras. Los puntos representan el cálculo original del CVI (5 percentiles en este caso) sobre cada tramo de 200 metros de la línea de costa. La primera fila de rectángulos representa la media del CVI para tramos de 500 metros y las otras 6 filas de rectángulos el valor medio para cada una de las 6 variables clasificadas entre 1 y 5 (azul, verde, amarillo, naranja y rojo).

Fuente: Elaboración propia.

José Ojeda Zújar, J., Álvarez Francoso, J. I., Martín Cajaraville, D. y Fraile Jurado, P. (2009): “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)”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

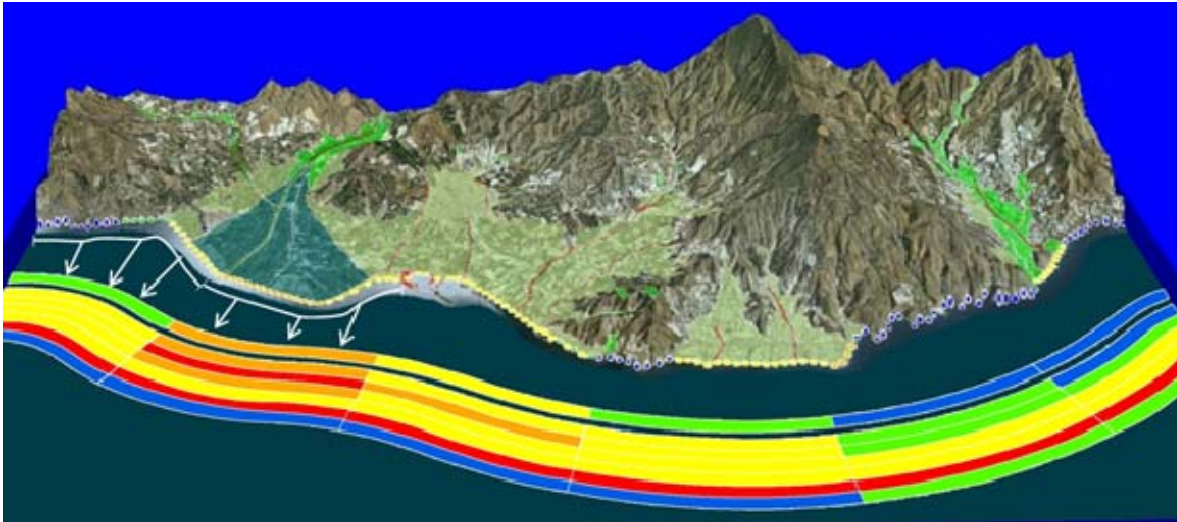


Figura 5. Representación tridimensional de los resultados para un sector de la costa mediterránea de Andalucía realizada con el Visor del SIGLA que integra un MDE, una ortofoto y las unidades fisiográficas costeras. En este caso se ha utilizado una herramienta realizada con “model builder” de Arcgis 9.2 para remuestrear los valores medios a rectángulos que representan tramos de costa de 5 km.

Elaboración propia.