



DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE RESOLUCIÓN MEDIA

Pardo Pascual, J.E., Ruiz Fernández, L.A., Almonacid, J. y Calaf, X.

Grupo de Investigación Cartografía Geoambiental y Teledetección, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València.
jepardo@cgf.upv.es

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta un algoritmo que permite detectar la posición de la línea de costa en mares con escaso rango de marea, con una precisión próxima a los 5 m partiendo de imágenes de resolución media (28,8 m de tamaño de píxel), equiparables a la de las imágenes Landsat TM. Se fundamenta en el hecho de que la respuesta espectral del mar y el continente es muy distinta, sobre todo en la región del infrarrojo próximo, lo que permite modelar una función polinómica sobre un vecindario a lo largo de los píxeles del borde marino y localizar automáticamente la posición de la orilla. Las pruebas se han realizado sobre las playas situadas al norte y sur de la ciudad de Valencia en distintas fechas. Los errores medios en el posicionamiento de la orilla inferiores a los 5 m, lo que permite suponer un buen potencial para su aplicación de la evolución de la línea de costa en series históricas de imágenes a un coste económico bajo y con una disponibilidad elevada.

SUMMARY

This work shows an algorithm that allows automated extract the shoreline position with a precision about 5 m from mean resolution images (28.8 m pixel size), similar to the Landsat TM images. The algorithm is founded in the fact that the spectral signature of the sea is very different to the beach, especially in the near infrared region. That allows modelling a polynomial function on a neighbouring along the sea side and automatically to locate the position of the shore. It has been made some tests on the beaches situated to the north and south of the Valencia city using images of the different dates. The mean error in the position of the shore has been less than 5 m. This result allow us to foresee a interesting potential to apply this method to study the long historical series of Landsat images (from mid eighties) that has a world cover and a cheap cost.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales efectos que se pueden derivar del calentamiento global es que el nivel del mar experimentará una subida media a para finales del siglo XXI de entre 19 y 59 cm (IPCC, 2007). Esta progresiva subida del nivel del mar se presupone que ha de provocar, al tiempo, la erosión de las playas. Ello ha de implicar, por tanto una migración de la línea de costa hacia el continente. Este proceso, sin embargo, se ha de ir dando de forma oscilante –produciéndose tanto avances como retrocesos en la posición de esta línea—debido a la complejidad de fenómenos y procesos que interactúan sobre el interfaz tierra-mar (Pardo y Sanjaume, 2001). Conocer, sin embargo, la existencia de variaciones en la tendencia evolutiva puede resultar fundamental para definir adecuadamente las intervenciones que se hayan de llevar a término para mitigar los posibles daños sobre las sociedades.

Hasta el momento el análisis de este tipo de cambios se ha fundamentado en la comparación de la posición de la orilla en distintas fechas obtenidas a partir de su restitución de fotografías aéreas y, más recientemente, de imágenes de satélite de alta resolución. Los datos así conseguidos, sin embargo, suelen presentar una elevada heterogeneidad en sus características y sobre todo en el nivel de cobertura espacial y temporal, lo que puede suponer un problema importante para conocer la tendencia evolutiva de un sector costero a medio o largo plazo. Existen múltiples estudios llevados a cabo en distintos tipos de playas y en distintos lugares del mundo que evidencian que la localización de la orilla en un momento dado es un dato relativamente poco fiable ya que la variabilidad de esta línea es sumamente elevada. Ello se

debe a distintos factores tales como los cambios en la forma de la playa o las variaciones del nivel marino, sobre todo en zonas con elevado rango de marea pero también en sectores en que ésta no es significativa. Si se analizan los resultados obtenidos en distintos trabajos para medir los cambios interanuales en playas de distintas áreas geográficas (Morton y Speed, 1998; Zhang et al., 2002; Pajak y Leatherman, 2002; Ruggiero et al., 2003; Pardo et al., 2007) se obtiene una conclusión común de que cuando se analizan tendencias usando series de fotografías aéreas relativamente cortas se ha de ser prudente con las conclusiones ya que pueden ser engañosas. O'Connell (2005) insiste que muchas veces, la variabilidad estacional del elemento de referencia utilizado —la posición de la orilla— se desconoce y esto puede producir una fuente de error muy elevada si se pretenden caracterizar los cambios en la costa. Pardo et al. (2007b) apunta que en áreas micromareales la fuente de error pueden venir de los cambios en la forma del perfil de la playa —que siguen una pauta estacional— pero también de variaciones del nivel marino relacionados con factores meteorológicos que tienen un comportamiento más aleatorio.

Por tanto, si se pretende generar una base de datos de posiciones de líneas de costa suficientemente amplia y homogénea, es decir con una cobertura espacial de carácter global y con un volumen de datos suficientes como para integrar todas las posibilidades de cambios relacionados con las oscilaciones provocadas por alteraciones intranuales del perfil de la playa y de variación del nivel marino se hace necesario trabajar con las imágenes de satélite de resolución media que registran el planeta entero con frecuencia mayor al mes: Landsat TM registra prácticamente todo el planeta desde marzo de 1984 una vez cada 16 días, mientras que Spot lleva funcionando desde febrero de 1986 registrando una imagen del mismo lugar una vez cada 26 días.

Ahora bien, para poder emplear estas fuentes de información previamente resolver el problema de determinar con un nivel de precisión suficiente la posición de la orilla partiendo de resoluciones medias o groseras (20-30 m).

Nuestro objetivo, por tanto va a ser establecer un método y las herramientas necesarias para detectar automáticamente la posición de la orilla a partir de imágenes de resolución media de forma que puedan crearse series de líneas de costa lo suficientemente largas y densas en el tiempo como para poder establecer las tasas de cambio tanto a nivel local, regional como global ya que ello aportaría una tipo de información extraordinariamente interesante para tratar de monitorizar los efectos del cambio climático global y otros impactos antrópicos en la dinámica costera. Para lograr este gran objetivo se han de superar tres tipos de retos:

- 1) hay que definir un algoritmo que permita detectar la posición de la orilla a nivel subpixel desde imágenes de resolución media,
- 2) dado el ingente volumen de trabajo que esto supondría se debería automatizar el proceso, y
- 3) se ha de conseguir georreferenciar con un nivel de exactitud suficiente la posición de la cada una de las líneas de costa extraídas.

En el presente trabajo se muestra los avances hasta ahora logrados en este reto. En concreto, se presenta un algoritmo que permite extraer a nivel subpixel la posición de la orilla y se evalúa el nivel de error con que lo hace.

2. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PROPUESTO

2.1. Imagen fuente

El método propuesto se fundamenta en la distinta respuesta espectral que tienen el agua y el continente y, en el hecho, de que la línea de costa en una playa suele tender a disponerse como una línea bastante homogénea y quasi rectilínea. Atendiendo a estas dos circunstancias se puede tratar de definir un método que aproxime, con un nivel de seguridad suficiente, la posición de la orilla incluso sobre píxeles de dimensiones bastante más grosera.

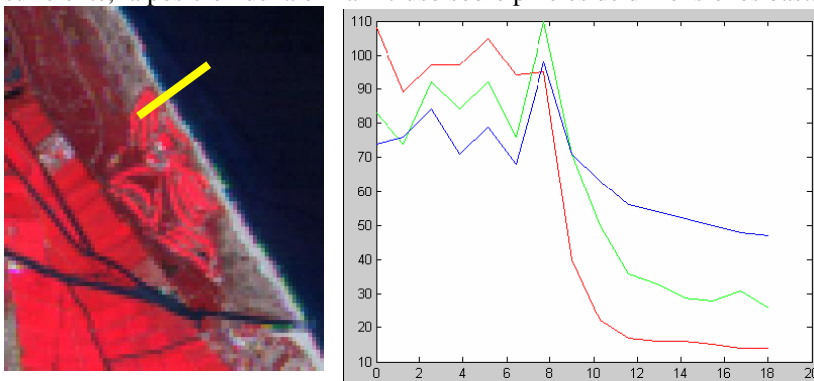


Fig. 1. Composición de imagen de satélite en falso color. En rojo se indica cómo responde la banda del infrarrojo próximo, mientras que en verde se muestra como lo hace el rojo y en azul como lo hace el verde.

Es, sin embargo, sumamente importante, que la imagen analizada presente una respuesta espectral claramente distinta entre los medios cuya frontera se busca localizar. En principio se podría pensar que la mejor opción sería utilizar la banda del infrarrojo próximo dada la gran absorción que hace el agua en esta región del espectro electromagnético. En la figura 1 se aprecia el “escalón” tan importante que se registra entre la tierra y el mar en esta banda (de color rojo en la figura).

A lo largo del trabajo se descubrió que podía haber otras opciones también útiles. En concreto, tras un análisis de los componentes principales se observó que el segundo componente marcaba una respuesta muy diferente entre el medio marino y el continental, obviando incluso la espuma del oleaje (fig. 2).

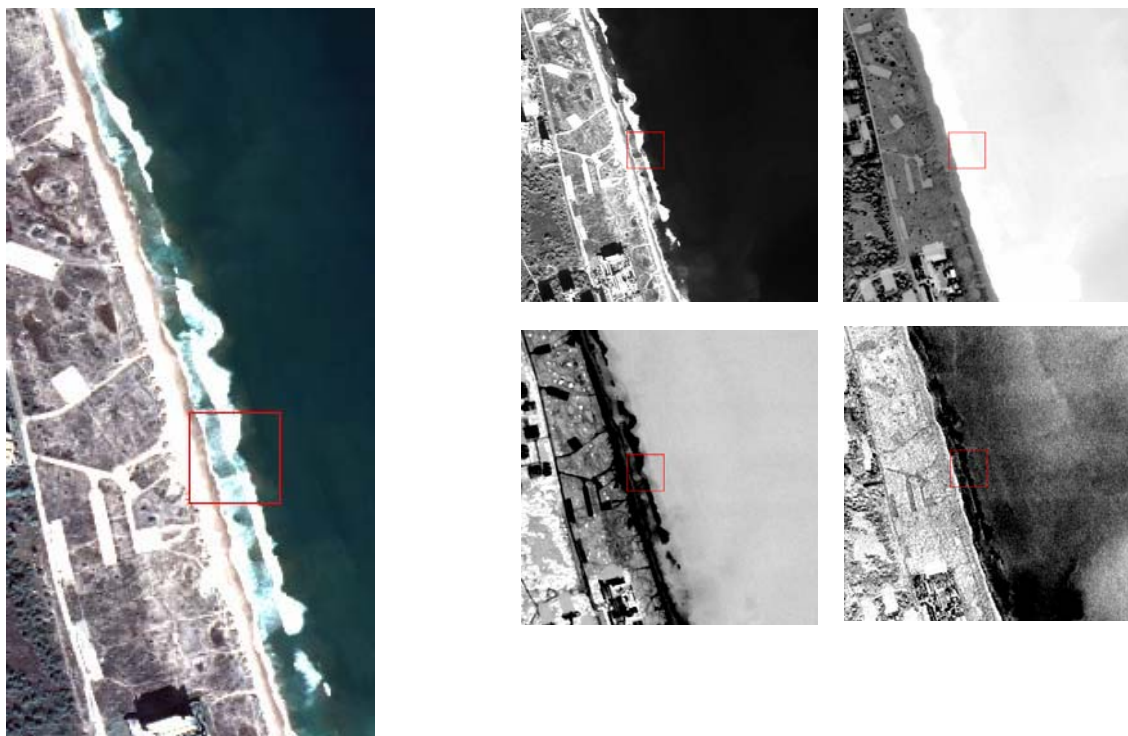


Fig. 2. Sobre un imagen QuickBird se muestran los cuatro primeros componentes principales. Obsérvese como el segundo (parte superior derecha) marca una muy evidente separación entre el mar y la tierra.

2.2. Método de extracción de la línea preliminar (escala de píxel)

El proceso de extracción se desarrolla en dos fases: en una primera se extrae una línea aproximada a escala de píxel y en la segunda, basándose en esta línea inicial, se deduce una nueva posición a escala subpíxel.

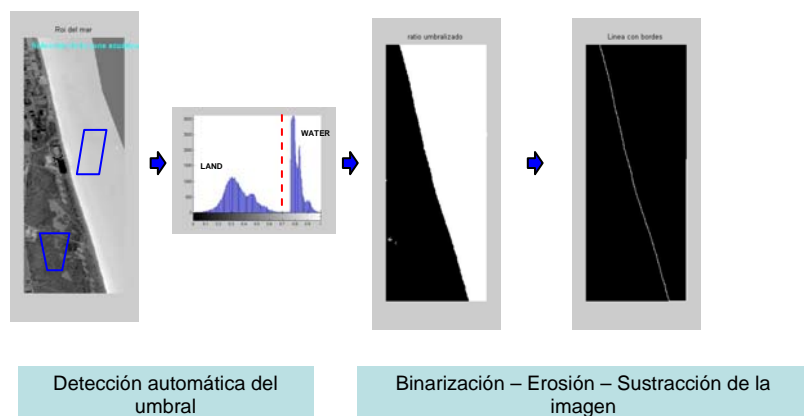


Fig. 3. Procedimiento de determinación de la primera aproximación de la línea de costa, todavía a nivel o escala píxel.

En la primera fase se hace una aproximación basada en una binarización de la imagen original (ya sea el segundo componente principal o la banda del infrarrojo próximo). Para ello se ha de determinar el mejor umbral que distinga estos dos ámbitos. Se toma, pues, una muestra suficientemente significativa de ambos medios y se analizan sus histogramas. En ambos casos su forma se parece a una distribución normal por lo que se modelizan y se crea una intersección entre ambas distribuciones. Una vez umbralizado el espacio la nueva imagen se somete a una serie de filtros morfológicos, lográndose localizar así una primera aproximación de la línea de costas (fig 3)

2.3 Método de extracción de la línea de costa a escala subpíxel

Una vez se dispone de esta línea aproximada de la separación tierra/mar, se pasa a analizar un vecindario más amplio (fig. 4). Con estos datos directamente solo podríamos conocer el valor de cada píxel. La estrategia básica que se busca es definir una expresión matemática que permita conocer el nivel digital de cualquier punto, incluso con valores decimales. Se requiere para ello un buen modelo matemático y ello puede hacerse mediante el ajuste, por mínimos cuadrados, de un polinomio más o menos complejo.

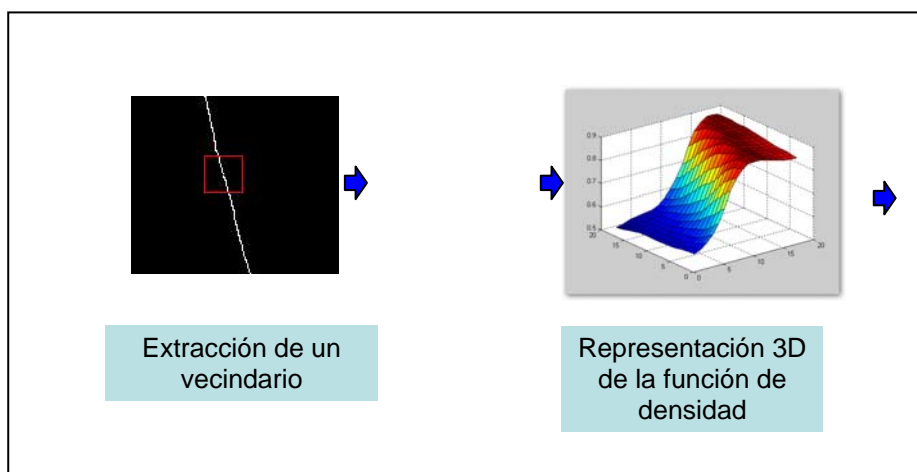


Fig. 4. Aplicación de un vecindario

Tras distintas pruebas se observó que con un polinomio de quinto grado el ajuste era bastante bueno y la solución robusta. Para ello la imagen original se remuestra, para aumentar el número de ecuaciones y se ajusta el polinomio de quinto grado (fig. 5).

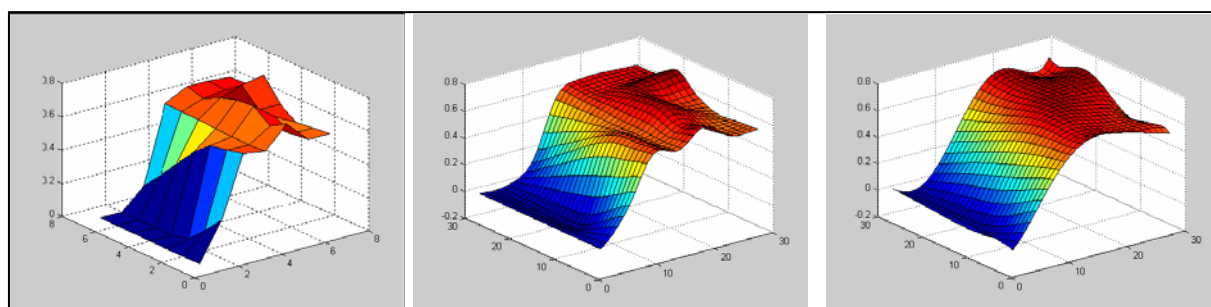


Fig. 5. Modelización

Una vez tenemos una función matemática suficientemente adecuada buscaríamos la zona en la que la curvatura de esta función es nula: ello nos lo aporta el laplaciano (derivada de segundo orden) (fig. 6).

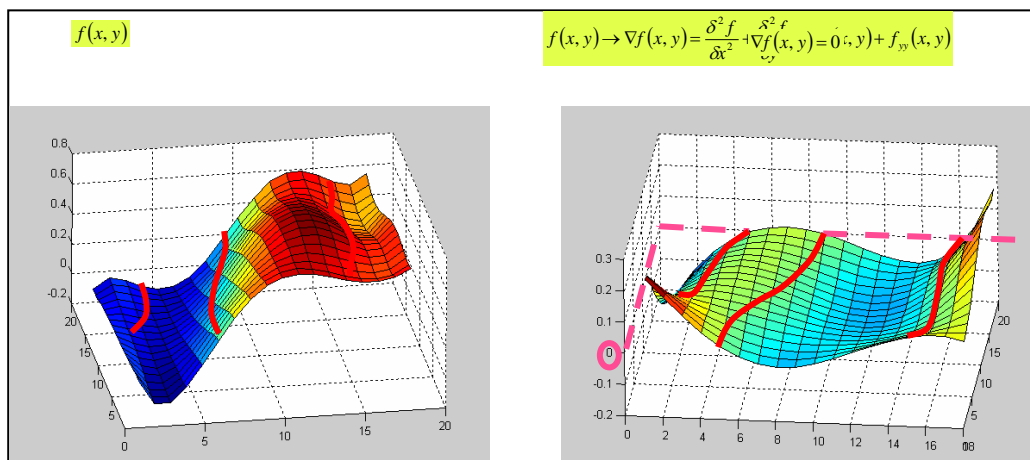


Fig. 6. A la izquierda sobre la representación tridimensional de la imagen remuestreada original se han marcado la posición en que la curvatura del gradiente es nula. A la derecha, sobre la representación tridimensional de la imagen de la segunda derivada (laplaciano) se han señalado los puntos en que el valor es cero.

Pero en realidad existen distintas líneas que cumplen la condición de que el laplaciano es cero. Para localizar la línea que nos interesa lo que se hacen es sucesivos perfiles sobre la función polinómica y se observa que la orilla se encontrará allí donde el laplaciano es cero y el gradiente es máximo (fig. 7).

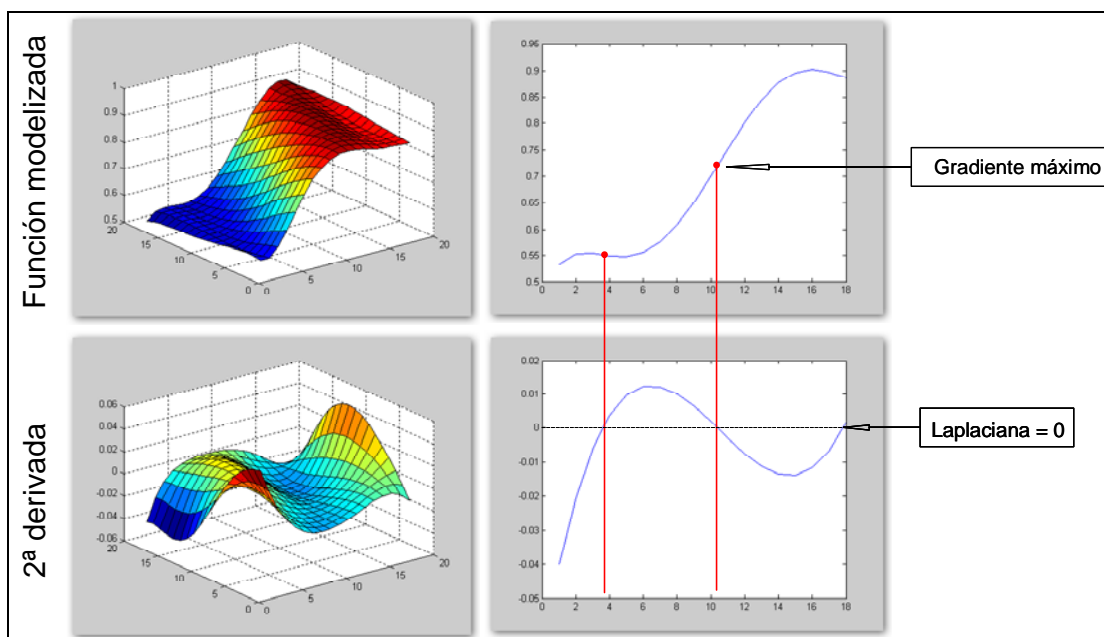


Fig. 7. Tanto sobre la función modelizada mediante el polinomio de 5º grado como sobre su segunda derivada se presenta la representación de un perfil en el que el valor de laplaciano es cero. Visto sobre la función modelizada se aprecia que es fácil observar allí donde el gradiente es máximo.

En realidad de cada perfil del vecindario analizado se obtiene un punto. Dado que el vecindario se va desplazando sobre la línea preliminar calculada inicialmente, se puede esperar que para una misma línea de perfil el cálculo de la posición de la orilla se realizará tantas veces como píxeles (remuestreados) tenga el vecindario, por lo que seguro habrán distintas soluciones en las que el gradiente sea máximo y el valor del laplaciano cero. Esto se resolverá promediando la posición para cada perfil sobre las distintas soluciones obtenidas y así se definirá el punto que más probablemente coincida con la orilla real (fig. 8).

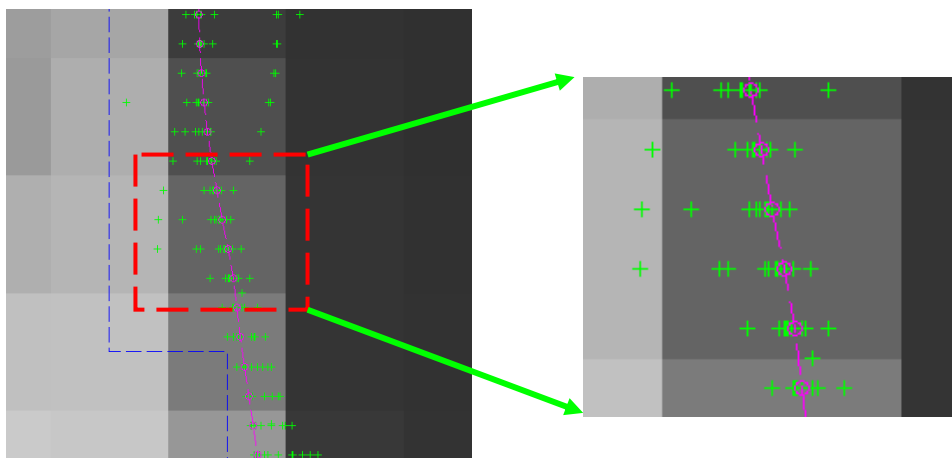


Fig. 8. La línea azul corresponde a la posición de la línea de costa a nivel de píxel. En verde se presentan las distintas soluciones que para cada línea de perfil se han obtenido al desplazarse el vecindario sobre la imagen remuestreada. Los puntos rosa se sitúan en la posición media respecto a la población de puntos verdes para cada línea de perfil y definen la posición de la orilla a nivel subpíxel.

3. DISEÑO DEL TEST PARA COMPROBAR LA POTENCIALIDAD DEL ALGORITMO PROPUESTO

Para poder demostrar la potencia que este algoritmo presenta a la hora de detectar la línea de costa, que por esencia es cambiante, se ha operado de la siguiente forma. Se ha tomado una imagen de satélite de muy alta resolución, concretamente una imagen QuickBird, que presenta en su banda pancromática una resolución espacial de 0,6 m y en las multiespectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo próximo) 2,4 m. Se ha fusionado la banda pancromática y las multiespectrales lo que ha permitido la obtención de una imagen multiespectral con 0,6 m de resolución y sobre ésta se ha definido la línea de costa que se define como verdad terreno y que se utilizará para evaluar los resultados. El procedimiento de extracción de esta línea también ha sido automático y ha quedado explicado en trabajos previos (Pardo et al., 2007; Ruiz et al., 2007).

Por otra parte, a partir de la imagen multiespectral original (2,4 m de píxel) se ha ido degradando la imagen, remuestreándola, a distintos tamaños de píxel (4,8 m, 9,6 m., 14,4 m, 19,2 m y 28,8 m). De esta manera se disponen de imágenes que emulan las que podríamos disponer de sensores de resolución media –tipo Spot o Landsat—pero perfectamente referenciada respecto a la que utilizaremos como verdad terreno. En la figura 9 se muestra la imagen original en una composición en falso color y, la misma composición resmuestrada a 28,8 m de píxel.

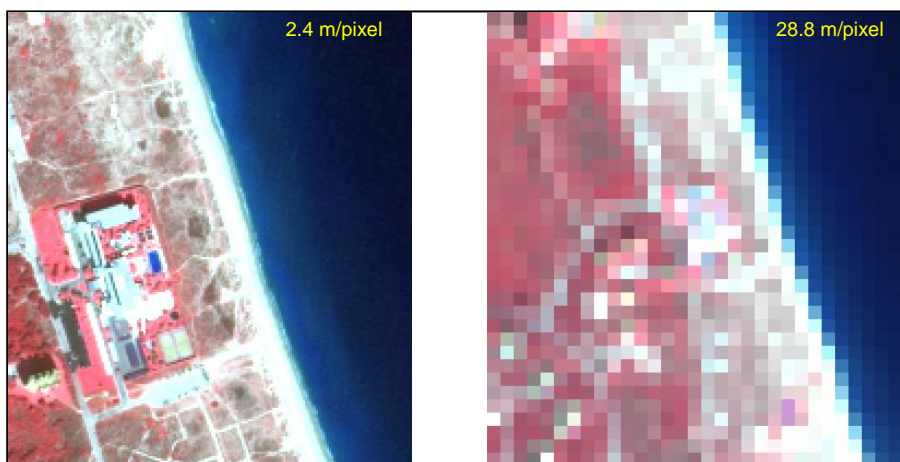


Fig. 8. Ejemplo de la diferencias de apreciación entre una composición en falso color en una imagen con una resolución de 2,4 m y con otra de 28,8 m.

Sobre cada una de las imágenes degradadas se ha aplicado el algoritmo descrito y se ha definido la posición teórica de la orilla. Posteriormente se han calculado las diferencias que existen entre cada uno de los puntos obtenidos mediante el método propuesto y la posición más cercana a la orilla verdadera (tal como ha sido definida anteriormente). Ello ha permitido calcular las diferencias (fig. 9)

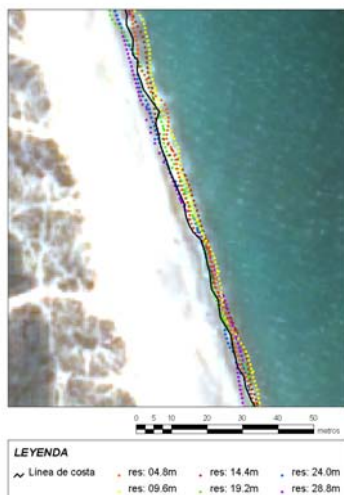


Fig. 9. Sobre la imagen QuickBird fusionada se han superpuesto las distintas soluciones aportadas para los distintos tamaños de píxel. En la evolución se mide la distancia más corta entre cada uno de estos puntos respecto a la línea de costa de referencia (línea negra).

4. EVALUACIÓN DEL MÉTODO

El algoritmo propuesto ha sido evaluado sobre dos áreas geográficas distintas cercanas a la ciudad de Valencia: un sector de unos 10 km de longitud correspondientes a la playa del Saler, situada al sur de la ciudad y, por otra, sobre un segmento de unos 11 km de longitud correspondiente a la costa situada inmediatamente la norte del puerto de Valencia. En ambas zonas la costa está formada fundamentalmente por playas si bien hay ligeras diferencias entre ellas ya que la costa norte es un espacio muy ocupado por infraestructuras humanas y, a lo largo de varios kilómetros, no hay playa sino una costa artificializada formada por grandes bloques de escollera que tratan de frenar la erosión en ese lugar y proteger la autovía de entrada a la ciudad.

En la tabla 1 se presentan un resumen estadístico de los resultados obtenidos para la zona correspondiente a la Devesa del Saler tanto si se utiliza como dato de entrada la imagen de infrarrojo próximo como si se utiliza el segundo componente principal. En la tabla 2 se presentan los resultados correspondientes a la zona situada al norte de la ciudad de Valencia.

Tabla 1. Resultados obtenidos a partir de una imagen QuickBird tomada en noviembre de 2004 en la zona de la Devesa del Saler (sur de Valencia). Valores obtenidos para un sector de unos 11 km de playa.

IR

Tamaño píxel	Distancia a la línea de referencia			
	min	max	media	Desv, estándar
02,4m	0,000	17,960	2,134	2,410
04,8m	0,001	31,751	2,655	3,576
09,6m				
14,4m	0,001	17,028	2,153	1,936
19,2m	0,003	21,853	2,888	2,140



24,0m	0,020	21,991	3,842	3,264
28,8m	0,004	36,752	4,507	3,887

CP

Tamaño píxel	Distancia a la línea de referencia			
	min	max	media	Desv, estándar
02,4m	0,000	16,991	1,741	2,286
04,8m	0,000	24,461	1,886	2,171
09,6m	0,001	7,480	1,487	1,065
14,4m	0,005	9,540	2,285	1,395
19,2m	0,004	15,882	2,991	2,020
24,0m	0,006	23,069	3,555	2,615
28,8m	0,000	30,748	4,240	3,387

Tabla 2. Resultados obtenidos a partir de una imagen QuickBird tomada en marzo de 2005 sobre las playas del norte de la ciudad de Valencia

IR

Tamaño píxel	Distancia a la línea de referencia			
	min	max	media	Desv, estándar
02,4m	0,000	51,649	1,338	3,109
04,8m	0,000	36,335	1,509	2,883
09,6m	0,001	47,402	2,954	5,076
14,4m	0,003	39,365	2,890	3,546
19,2m	0,002	75,578	4,414	7,122
24,0m	0,001	77,714	4,603	7,778
28,8m	0,005	94,302	5,095	7,903

CP

Tamaño píxel	Distancia a la línea de referencia			
	min	max	media	Desv, estándar
02,4m	0,000	10,967	1,025	1,325
04,8m	0,000	24,622	1,745	2,813
09,6m	0,003	22,507	2,449	2,415
14,4m	0,001	48,944	4,295	5,827
19,2m	0,000	54,794	4,895	6,038
24,0m	0,025	26,751	4,743	4,558
28,8m	0,001	50,675	6,549	6,680

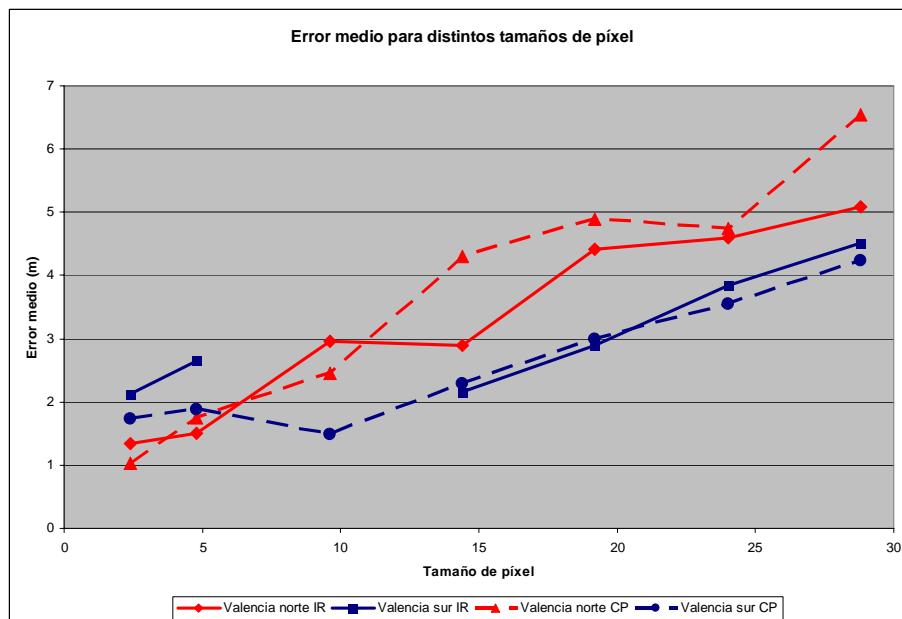


Fig. 10. En rojo aparecen los resultados para la costa norte y en azul para la costa sur de Valencia. En línea continúa se muestra el resultado tomando como imagen de entrada la banda del infrarrojo próximo y en discontinua la banda correspondiente al segundo componente.

Para facilitar el proceso de interpretación de estos resultados y la comparación entre las dos zonas se presenta un gráfico en el que se comparan los errores medios en cada uno de los tamaños de píxel para ambas zonas (fig. 10).

A la luz de estos resultados las principales deducciones que podemos señalar son:

- Los valores medios de error, incluso con imágenes de resolución muy grosera (28,8 m) son francamente alentadores ya que oscilan entre 4,2 y 6,5 m. Estos resultados son significativamente menores que las variaciones en anchura de playa que se han encontrado a lo largo de un mismo año en el Saler, donde la variación media ha sido de unos 13 m (Pardo et al., 2007b). Por tanto, este primer resultado es francamente alentador.
- Los resultados en la zona meridional de Valencia, en la que por la configuración del terreno existe una mayor diferencia en las respuestas espectrales entre la tierra y el mar son mejores que los que se han observado en la zona norte que, por sus características es más homogénea. Ello sugiere que, cuando se empleen imágenes Landsat sería conveniente buscar combinaciones de bandas que exagerasen esta diferencia.
- En el caso del sur de Valencia el error medio alcanzado mediante el empleo de la imagen correspondiente al segundo componente y al infrarrojo es prácticamente idéntica (excepto en los tamaños de píxel más pequeños). Sin embargo, en la costa norte la imagen de IR funciona sustancialmente mejor. Sin embargo, si se analizan los resultados de los errores máximo y de las desviaciones estándar se observa que éstos aumentan significativamente cuando se emplean las imágenes IR.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un algoritmo con un enorme potencial para localizar automáticamente la posición de la línea de costa en playas con escaso rango mareal. Existen, sin embargo, todavía dudas sobre cuál es la mejor imagen fuente para hacer la búsqueda de esta posición mediante este algoritmo. Lo que parece claro, en todo caso, es que si se mejora el contraste entre la respuesta del mar y la tierra, los resultados mejorarán.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y por los fondos FEDER en el marco de los proyectos de investigación CTM2006-11767/TECNO y CLG2006-11242-C03-03/BTE.



REFERENCIAS

- IPCC (2007): Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Synthesis Report (en http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf).
- Morton y Speed (1998): Evaluation of Shorelines and Legal Boundaries controlled by water level on sandy beaches, *Journal of Coastal Research*, vol 14 # 4.
- O'Connell J.F. (2005): Documenting short-term variability of beach referent features using a volunteer beach & dune profiling program in Massachusetts, *Proceedings of the 14^a Biennial Coastal Zone Conference*, New Orleans, Louisiana, July 17-21, 2005.
- Pajak y Leatherman (2002): The high water line as a shoreline indicator, *Journal of Coastal Research*, vol 18, no. 2, pp. 329-337.
- Pardo Pascual, J.E. y Sanjaume Saumell, E. (2001): Análisis multiescalar de la evolución costera, *Cuadernos de Geografía*, Volumen: 69/70, pp. 95-126.
- Pardo Pascual, J.E., Ruiz Fernández, L.A., Almonacid, J., Rodríguez-Recatalá, B. y Gracia, G. (2007a): Métodos para la determinación automática de la línea de costa con precisión subpíxel, Caracterización tridimensional de la dinámica intranual e interanual de la playa del Saler, in Gómez-Pujol, Ll. and Fornós, J.J. (eds.): *Investigaciones recientes (2005-2007) en Geomorfología litoral, IV Reunión de Geomorfología Litoral*, 3-5 May 2007, Palma de Mallorca, Spain, Ed. Universitat de les Illes Balears, pp. 39-40.
- Pardo-Pascual, J.E., Gacía-Asenjo, L., Garrigues, P., Palomar-Vázquez, J. and Porres de la Haza, M.J. (2007b): Caracterización tridimensional de la dinámica intranual e interanual de la playa del Saler, in Gómez-Pujol, Ll. and Fornós, J.J. (eds.): *Investigaciones recientes (2005-2007) en Geomorfología litoral, IV Reunión de Geomorfología Litoral*, 3-5 May 2007, Palma de Mallorca, Spain, Ed. Universitat de les Illes Balears, pp. 41-42.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G.M. y Gelfenbaum, G. (2003): Linking proxy-based and datum-based shorelines on a high energy coastline: implications for shoreline change analyses, *Journal of Coastal Research*, vol. 38, pp. 57-82.
- Ruiz, L.A., Pardo Pascual, J.E., Almonacid, J., Rodríguez, B. (2007): Coastline automated detection and multiresolution evaluation using satellite images, *Proceedings of Coastal Zone 07, Portland, Oregon*, Julio 2007 (http://www.csc.noaa.gov/cz/2007/Coastal_Zone_07_Proceedings/PDFs/Poster_Abstracts/0000.Ruiz.pdf).
- Zhang, K.k Weikai, H., Douglas, B.C. y Leatherman, S. (2002): Shoreline position variability and long-term trend analysis, *Shore and Beach*, vol 70, n° 2, April 2002.