

## Monitorización de espacios costeros mediante un sistema fotogramétrico: C-Pro

E. Sánchez-García<sup>(1,2)</sup>, J.E. Pardo-Pascual<sup>(1,2)</sup>, A. Balaguer-Beser<sup>(1,3)</sup> y J. Almonacid-Caballer<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022-Valencia, España. Email: jaialca@upv.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022-Valencia, España. Emails: elsncgar@upv.es, jepardo@cgf.upv.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022-Valencia, España. Email: abalague@mat.upv.es

**Resumen:** La evaluación de los cambios costeros a diferentes escalas de tiempo es necesaria para una gestión integrada del litoral y para asegurar su sostenibilidad. Diferentes sistemas de monitorización están siendo utilizados para registrar de forma sistemática tanto la dinámica natural como las acciones humanas acaecidas en sectores concretos de costa. Éstos están permitiendo avanzar en la modelización de la respuesta que las playas presentan frente a los efectos del oleaje-principalmente en temporales-, y las variaciones en el nivel del mar. Este trabajo describe una nueva herramienta semiautomática C-Pro (Coastal Projector) que consigue obtener la línea de costa y monitorizar su dinamismo en diferentes áreas con un coste muy bajo. La sistemática es sencilla, requiere de una fotografía terrestre y un mínimo de tres puntos de control perfectamente identificables. El riguroso reposicionamiento de la cámara se logra incluyendo en el sistema de ajuste colineal la condición geométrica de la línea del horizonte, para posteriormente realizar la proyección de la imagen sobre un plano georreferenciado. La precisión de C-Pro fue testada en diferentes playas, comparando la línea de costa obtenida frente a otras líneas medidas con instrumental GPS-RTK.

**Palabras clave:** software de fotogrametría terrestre, proyección fotogramétrica, monitorización de bajo coste, espacios costeros

### *Monitoring coastal areas with a photogrammetric system: C-Pro*

**Abstract:** The assessment of coastal changes at different time scales is required for integrated coastal management and ensuring its sustainability. Different monitoring systems are being used to systematically record both natural dynamics and human actions in specific coastal areas. They are making it possible to progress in the modelling of how beaches respond to the effects of waves -mainly in storms- and sea level changes. This work presents a new semi-automatic tool, C-Pro (Coastal Projector), for extracting the shoreline and monitoring their dynamism in different areas at a very low cost. The tool requires terrestrial photography and at least three perfectly identifiable control points. The rigorous repositioning of the camera is achieved by including the geometric condition of the horizon line in the colinear adjustment. The image is then projected on a geo-referenced map. The accuracy of C-Pro was tested at different beaches, comparing the obtained shoreline against other lines measured by GPS-RTK techniques.

**Keywords:** terrestrial photogrammetric software, plan view photos, low cost monitoring, coastal areas

## 1. INTRODUCCIÓN

Las costas -y muy especialmente las sedimentarias- son ambientes esencialmente dinámicos en las que los cambios son continuos debido a su condición de frontera entre el continente y los mares. Estos cambios se califican como problemáticos cuando comportan un conjunto de implicaciones negativas sobre los recursos y usos propios del espacio litoral, de modo que puedan afectar a los intereses socioeconómicos y a los valores naturales. Las situaciones de temporales costeros resultan paradigmáticas: requieren información precisa para verificar la magnitud de los fenómenos y el impacto sobre el recurso playa y, en función de ello, poder gestionar estos espacios. La amplitud de las áreas afectadas y las tan cambiantes condiciones del estado del mar en el tiempo y el espacio exigen disponer de herramientas de captura de información precisa en múltiples lugares y momentos para realizar un correcto

seguimiento. De hecho, determinar y geoposicionar el alcance real de las olas durante los temporales en nuestras playas tendría que ser parte del sostén básico en la determinación del límite del dominio marítimo-terrestre si atendemos a lo señalado en el Real Decreto 876/2014, del 10 de octubre. Resulta pues clave desarrollar métodos y herramientas con un nivel de precisión suficiente, que determinen el alcance del borde tierra-agua de forma eficiente.

Diferentes soluciones de videomonitorización como los sistemas ARGUS (Davidson *et al.*, 2007), SIRENA (Nieto *et al.*, 2010) y COSMOS (Taborda y Silva 2012), consiguen registrar de forma sistemática y continua las amplias actuaciones que tienen lugar en un segmento de litoral concreto, analizando y cuantificando su evolución. En este contexto, el presente estudio ha generado una herramienta portable denominada C-Pro (Coastal Projector), que de forma sencilla y, a partir de una cámara fotográfica convencional, recrea la posición de la línea de

costa en el instante concreto en que se realizó la fotografía desde el terreno. El objetivo a desarrollar es el establecimiento de un proceso metodológico robusto que realiza de forma automática la proyección de la imagen sobre un plano georreferenciado.

De este modo, capturando el estado de las playas durante y tras la consecución de los diversos temporales costeros, se conocería el impacto que frente a éstos ha sufrido el litoral. Este hecho ayudaría a organismos, como los de demarcaciones de costas, en la gestión y monitorización de las playas.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

Los siguientes apartados muestran el funcionamiento de la herramienta generada, y plantean los experimentos desarrollados para la evaluación de su precisión.

### 2.1. Proceso metodológico de C-Pro

Los diferentes módulos informáticos que forman la herramienta C-Pro fueron desarrollados mediante el lenguaje M de MATLAB. La metodología pretende establecer un vínculo lo suficientemente robusto entre el espacio terreno y el espacio imagen. Secuenciación:

En primer lugar se realiza la calibración de la cámara, obteniendo los parámetros de orientación interna ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $f$ ) y las distorsiones de la lente. Seguidamente se obtiene una fotografía rectificadas y geométricamente correcta con la que empezar la resección espacial y obtener los conocidos parámetros de orientación externa, POE ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ,  $\omega$ ,  $\alpha$ ,  $\kappa$ ). Éstos determinan la posición y orientación de la cámara en el momento en que la fotografía fue capturada.

Investigando las relaciones entre ambos espacios (terreno e imagen), se realiza un proceso iterativo para asegurar que los parámetros obtenidos recreen la toma fotogramétrica lo más fielmente posible de la realidad. Este sistema requiere de unos primeros seis POE aproximados con los que inicializar el ajuste y se calculan mediante la Transformación Lineal Directa (TLD) en el caso de disponer de un mínimo de 6 puntos de control y, en caso contrario, mediante una combinación de los métodos de Church y Colinealidad. El siguiente paso consiste en refinar estos POE mediante un nuevo proceso de ajuste iterativo por Colinealidad. Además, es en esta parte del proceso donde se incorporan varios constreñimientos matemáticos para aportar rigurosidad al proceso de ajuste.

Por lo general, una fotografía de un sector de playa presenta unas características muy homogéneas que dificultan una buena distribución de los puntos de control. Sin embargo, se dispone de un elemento ejemplar como es la línea de horizonte donde confluyen todos los puntos de fuga de la imagen y que por tanto actúa como si dispusiéramos de un conjunto de puntos de control en el infinito.

Considerando que la Tierra es localmente plana, la línea del horizonte representada en la imagen es la intersección de dos planos: el plano  $z=Z_0$  de la posición de la cámara y el plano de la imagen. La intersección es la recta que define el horizonte y es dependiente de la orientación de

la cámara, es decir, del observador. Siguiendo con el diseño de la formulación de este constreñimiento, se estima la posición real de la línea de horizonte visible en la fotografía, corrigiéndola del efecto de esfericidad terrestre. Finalmente, una vez determinado el horizonte de forma matemática, se relaciona con los POE para poder incluirlo mediante dos nuevas ecuaciones en el sistema de ajuste del proceso de refinamiento.

Tras conocer la posición y orientación de la cámara, el último paso consiste en empezar con el proceso proyectivo. Para ello, el programa detecta los límites en coordenadas terreno de la imagen generando una cuadrícula georreferenciada, con un tamaño de píxel determinado, que rellena con el nivel radiométrico correspondiente de la imagen original.

La posición de la línea de costa podrá digitalizarse de forma directa sobre la imagen proyectada y georreferenciada.

### 2.2. Toma de datos en campo



**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio y de los datos de campo en la playa del Saler (Valencia; España).

Las pruebas y evaluaciones presentadas en este trabajo sobre el funcionamiento de C-Pro, se han llevado a cabo en playas de tipo arenoso correspondientes a una franja litoral de 400 m de longitud, al sur del Puerto de Valencia (España) y concerniente a la zona del Saler. La figura 1 muestra el sector de estudio y ejemplifica el lugar desde donde se tomaron las fotografías en dirección norte y sur.

Se utilizó una cámara convencional Sony DSLR-A330 de 10 MP, sin flash y fijando la focal al infinito. La estabilidad de la cámara se aseguró con el uso de un trípode, factor de suma importancia a la hora de trabajar con imágenes promedio. Con estas imágenes medias se pretende obviar el comportamiento aleatorio y las oscilaciones cíclicas provocadas por el movimiento del oleaje durante un lapso temporal concreto.

Por otro lado, para el trabajo de proyección de una imagen fotográfica se requiere de la medición precisa de un mínimo de tres puntos de control claramente visibles e identificables en la fotografía. Para el caso de estudio se pudieron utilizar una serie de elementos fijos existentes en la parte interna de la playa. No obstante, con la finalidad de calibrar la herramienta, se midieron una serie de puntos que fueron monumentados *ex profeso* durante las pruebas.

### 2.3. Detección de la posición precisa de la costa

Para valorar el grado de precisión alcanzado se realizaron medidas de la posición de la orilla al tiempo que se registraban las fotografías. Para ello se empleó un sistema GPS en modo cinemático en tiempo real. La captura de la posición real de la costa se realizó barriendo la orilla y registrando las coordenadas de un punto cada 7 m aproximadamente.

La línea de costa se define como la distancia intermedia entre el máximo vaivén de las olas y la zona donde siempre habrá agua al existir normalmente un cambio de pendiente significativo en la topografía marina. Estos mismos criterios se utilizaron posteriormente para la fotointerpretación de la línea de costa sobre la imagen proyectada, resultado de C-Pro.

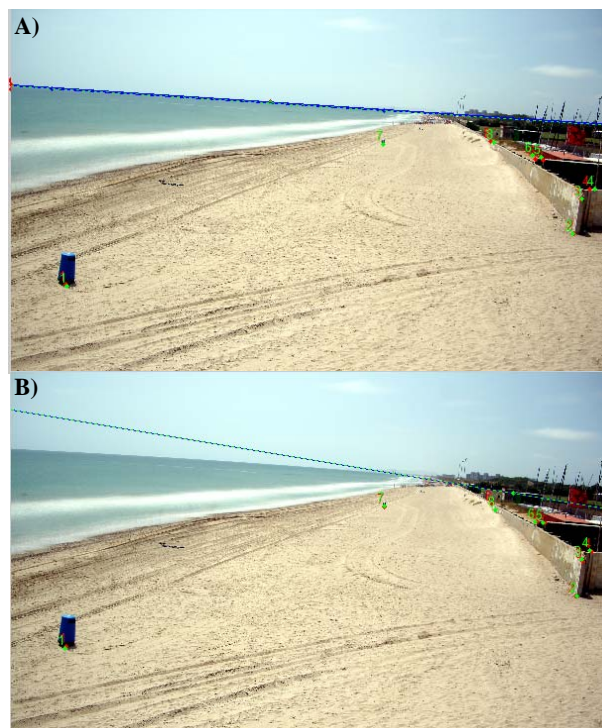
## 3. RESULTADOS

### 3.1. Proceso de resección espacial: Constreñimiento de la línea del horizonte

Se muestran a continuación los resultados del proceso de resección espacial para un caso en que se dispone de 8 puntos de control. Aplicando C-Pro se obtienen en primer lugar unos POE iniciales aproximados mediante el método TLD y, con ellos, se inicia el ajuste iterativo de colinealidad donde serán refinados. Con 8 puntos de control, el sistema dispone de 16 ó 18 ecuaciones, en función de si se tuvo en cuenta (figura 2A) o no (figura 2B) respectivamente el constreñimiento de la línea de horizonte que abreviaremos como “*cLH*”.

En ambas fotografías se dibuja en rojo, la posición exacta de los puntos de control que intervienen en el ajuste y, sólo para el caso de la figura 2A que es donde el horizonte interviene, se marca en azul la posición observada del mismo; posiciones todas ellas en las que debería converger nuestro ajuste. Por otro lado, los resultados obtenidos tras finalizar el ajuste, tanto de los puntos de control como de la línea de horizonte (posiciones imagen estimadas), se representan en la figura en color verde.

**Figura 2.** Resultado de la convergencia del ajuste (última iteración) con inclusión del constreñimiento del horizonte (A) o sin él (B).



Se observa una correcta convergencia del ajuste en la Figura 2A ya que todos los puntos de control, inclusive los de la línea del horizonte, encuentran su posición con mayor o menor acierto. Esta superposición de puntos hace que en las fotografías se aprecie vagamente el color rojo. Sin embargo, en la Figura 2B, el sistema no consigue converger en la posición correcta tan sólo guiándose con los 8 puntos de control medidos en campo. Claramente vemos que estos puntos de control sí se aproximan a su posición correcta pero no los del horizonte, y por tanto la fotografía no estará correctamente orientada. La cuantificación de dichos errores se refleja en la Tabla 1.

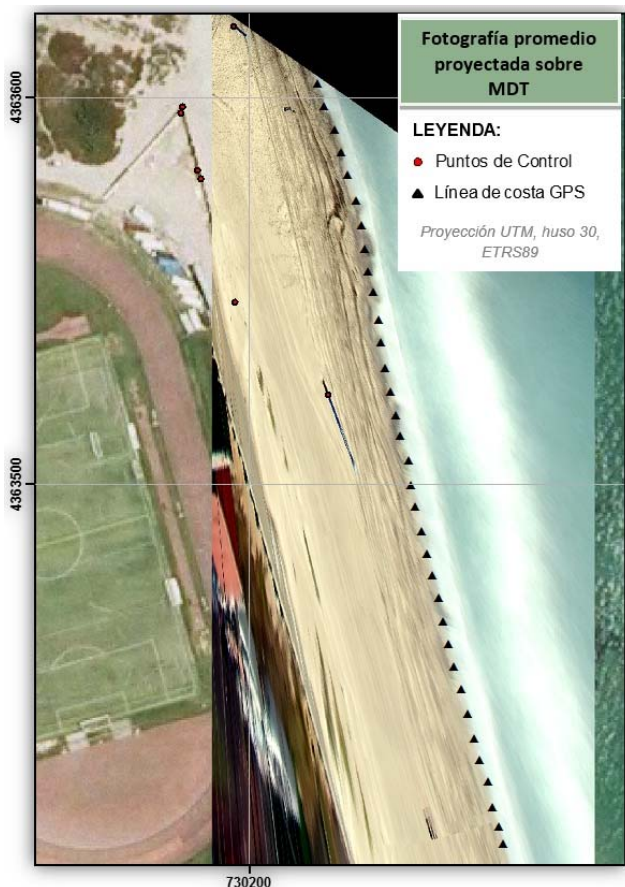
**Tabla 1.** Diferencias en los resultados de los POE

### 3.2. Proceso proyectivo de la fotografía

A partir de los POE obtenidos en el apartado anterior, la herramienta comienza el cálculo de la proyección. El

	POE calculados		GPS - CPro	
	Fig 2A	Fig 2B	Fig 2A	Fig 2B
X0 (m)	730181,398	730181,787	0,143	0,388
Y0 (m)	4363641,215	4363636,882	-0,025	-4,333
Z0 (m)	7,990	6,312	-0,086	-1,678
$\omega$ (rad)	1,3689	2,0884		
$\alpha$ (rad)	-0,0436	-0,1461		
K (rad)	3,6738	3,1946		

paso del sistema imagen (2D) a terreno (3D) supone establecer un constreñimiento para la coordenada Z, ya que de lo contrario el sistema de ecuaciones sería indeterminado (Holland, 1997). Por ello, C-Pro permitirá al usuario asignar este valor para la Z o plano de proyección. No obstante, siendo la línea de costa el elemento de interés a obtener, bastaría con proyectar la imagen sobre un valor medio de cota del nivel del mar, un plano Z=0 o bien, sobre un Modelo Digital del Terreno (MDT) como es el caso de la figura 3.



**Figura 3.** Mapa con la fotografía proyectada sobre el MDT y, superpuesta sobre ortofoto del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

### 3.3. Línea de costa proyectada vs línea GPS

El potencial y la precisión de la línea de costa obtenida a partir de la fotografía proyectada se evaluaron comparando con otra línea de costa medida con GPS en un instante de tiempo muy próximo (ver Tabla 2). Los análisis se realizaron calculando las diferencias en valor absoluto entre ambos grupos de líneas (GPS vs C-Pro implementada considerando el cLH).

Así mismo, se analizó en qué medida afectaba la inclusión o no del constreñimiento de horizonte en el proceso proyectivo de una fotografía (ver Tabla 3). Con los datos de este mismo día, se comprobaron también las ventajas que por definición se esperaban obtener en la proyección de la imagen media, promedio de 72 instantáneas, frente a una obtenida para un instante concreto.

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Intentar modelizar la respuesta de un paisaje tan voluble geomorfológicamente como lo es el sector costero, así como entender su respuesta frente a los temporales, requiere de la generación de una herramienta como

**Tabla 2.** Estadísticos de las diferencias obtenidas entre GPS y C-Pro para las posiciones de 5 líneas de costa.

Fecha	$\mu$ (m)	Desv(m)	Max(m)	Min(m)	n°pts	Zona
10-abr-14	2,41	1,73	5,67	0,01	70	Norte
19-may-14	1,54	0,78	2,58	0,11	63	Sur
28-may-14	1,60	0,99	3,33	0,01	57	Sur
05-jun-14	2,52	1,25	5,00	0,64	46	Sur
26 jun-13	1,04	0,98	2,58	0,003	34	Norte

**Tabla 3.** Estadísticos de las diferencias calculadas entre la línea GPS del día 26-jun-2013 (playa Sur), y la obtenida aplicando C-Pro en diferentes situaciones.

Prueba	$\mu$ (m)	Desv(m)	Max(m)	Min(m)
Inst. Con cLH	0,798	0,633	1,471	0,039
Inst. Sin cLH	1,037	0,647	2,005	0,111
Media Con cLH	0,186	0,559	1,492	0,001
Media Sin cLH	3,130	2,139	6,851	0,055

C-Pro capaz de obtener la línea de costa en un determinado instante de tiempo. Por su fácil adquisición, rapidez, bajo coste, y cuantía en el volumen de datos. Cualquier persona con una cámara convencional puede realizar la toma fotográfica. Así pues, el programa generado se muestra como una herramienta muy eficaz para llevar a cabo tareas de análisis y gestión del litoral. Los primeros resultados obtenidos, evidencian la mejoría que supone el incorporar el constreñimiento geométrico de la línea de horizonte y su corrección por esfericidad terrestre. El sistema de ajuste converge de forma más rápida y en la posición correcta en el caso en que es ayudado por los puntos de fuga presentes en el horizonte. Así mismo, el trabajo con imágenes promedio mejora los resultados ya que su significado se asemeja al criterio definido previamente como línea de costa GPS, minimizando así sus diferencias como se observa en la Tabla 3. Además, con éstas, se facilita la detección e interpretación de la línea de costa.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del doctorado del primer autor financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España con una beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU13/05877; programa estatal en I+D+i 2013-2016).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Davidson, M. *et al* 2007. *The CoastView project: Developing video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management*. Coastal Engineering, 54(6-7), 463-475.
- Holland, K.T. *et al* 1997. *Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 22(1), 81-92.
- Nieto, M. a. *et al* 2010. *An open source, low cost video-based coastal monitoring system*. Earth Surface Processes and Landforms, 35(14), 1712-1719.
- Taborda, R. & Silva, A. 2012. *COSMOS: A lightweight coastal video monitoring system*. Computers and Geosciences, 49, 248-255.