

J.E. PARDO-PASCUAL^a

R. ROCA MOYA^b

F. SEGURA-BELTRAN^c

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA ENTRE ALCOSSEBRE Y ORPESA A PARTIR DE FOTOGRAFÍA AÉREA (1956-2015)

RESUMEN

El artículo presenta un análisis de la evolución de la línea de costa entre Alcossebre y Orpesa, a partir de fotografías aéreas y ortofotografías, entre 1956 y 2015. La digitalización de 12 líneas de costa ha permitido calcular los cambios netos y máximos, así como la tasa de cambio entre los diferentes años. Los resultados muestran una costa recesiva, con una gran variabilidad espacio-temporal. Conviven sectores con crecimiento sostenido provocado por la acción antrópica (deriva arriba de los espigones y regeneraciones de playa) o causas naturales (prominencias costeras), con otros claramente erosivos (deriva abajo de espigones). Además, el análisis de las isobatas del estrán sumergido, ha permitido explicar cómo la configuración de este espacio puede incrementar o frenar la erosión. Los temporales son los responsables de los grandes cambios, mientras que el déficit hidrosedimentario de los ríos a lo largo del siglo XX, subyace como causa última del comportamiento erosivo del área de estudio, tendencia que ya se manifestaba antes de la aparición de la acción antrópica. Así, la fotografía aérea, a pesar de su baja resolución temporal, compensa este déficit con la amplitud de sus series, lo que permite conocer el

a Grup de Cartografia Geoambiental i Teledetecció, Departament d'Enginyeria Cartogràfica, Geodesia i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, s/n, 46022. València. jepardo@cgf.upv.es. <https://orcid.org/0000-0003-0471-9795>.

b Departament d'Agricultura i Medi Ambient. Ajuntament d'Alzira. C/Sant Roc, 6, 46600. Alzira. rafaroca07@gmail.com.

c Departament de Geografia, Universitat de València. Avda. Blasco Ibáñez, 28, 46010. València. Francisca.Segura@uv.es. <http://orcid.org/0000-0002-7969-4740>.

Fecha de recepción: abril 2019. Fecha de aceptación: mayo 2019.

comportamiento de la línea de costa en un momento en el que la presión antrópica sobre este espacio era baja.

PALABRAS CLAVE: cambios costeros máximos; erosión de la playa; evolución; impacto de temporales; tasa de regresión lineal.

ABSTRACT

This article presents an analysis of the coastline evolution between Alcossebre and Orpesa, based on aerial photographs and orthophotographs between 1956 and 2015. Twelve digitalized shoreline positions have allowed the calculation of net and maximum changes, as well as the rate of change between the different years. The results show a recessive coast, with a large spatial and temporal variability. Sectors with sustained accumulation, caused mainly by anthropic action (updrift sediment retention by groins and artificial nourishment of beaches) or natural causes (prominences) coexist with other clearly erosive (sediment deficit groins downdrift). In addition, the analysis of the isobaths of the submerged beach, has allowed to explain how the configuration of this space can increase or reduce the erosion. The big coastal storms are the main cause of the major changes, while the rivers hydrosedimentary deficit, generated along the twentieth century, underlies as the primary cause of the erosive behavior of the whole sector, which already were detected before the beginning of the main anthropic actions. Despite its low temporal resolution, the comparison of enough long series of aerial photography has allowed us to detect and quantify the coastline main changes when anthropogenic pressure was scarce.

KEYWORDS: beach erosion; coastal evolution; coastal storm impact; linear regression rate; maximum coastal changes.

I. INTRODUCCIÓN

La costa es una franja cambiante en el espacio y en el tiempo. Los cambios temporales a microescala (horas, días) se producen principalmente por el efecto de las mareas y los temporales. A mesoescala (décadas, siglos), la movilidad se atribuye a alteraciones del balance sedimentario y, en menor medida, a cambios del nivel del mar. A escala de décadas, las formas litorales son el resultado del equilibrio dinámico entre aportes y pérdidas de sedimentos. Para su pervivencia deben contar con un suministro estable de material, pero cuando el aporte sedimentario disminuye o se interrumpe, las costas de acumulación pueden comenzar a erosionarse, lo que ocurre en buena parte de nuestro litoral (Pardo-Pascual, 1991; Pardo-Pascual y Sanjaume, 2001; Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019). Las alteraciones del balance sedimentario pueden deberse a causas naturales o antrópicas. Entre las primeras cabe citar los cambios climáticos como por ejemplo, las oscilaciones del nivel del mar asociadas a la Pequeña Edad del Hielo, que han servido para explicar el cierre de las golgas de l'Albufera de València (Mateu et al., 1999; Sanchis, 2001). La propia configuración de la costa, con la pre-

sencia de obstáculos naturales, también puede alterar la corriente longitudinal y la dinámica sedimentaria. Las causas antrópicas son muy variadas y se han incrementado con el paso del tiempo. La reducción del suministro de sedimentos (destrucción de dunas, reducción de aportes fluviales, retención en embalses) provoca procesos más o menos acelerados de erosión, mientras que la interrupción de su circulación (diques portuarios o espigones) produce erosión deriva abajo o sobreacumulación deriva arriba, tal como ocurre en buena parte del golfo de València (Pardo-Pascual, 1991; Sanjaume et al., 1996; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005; Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019).

El procedimiento tradicionalmente utilizado para analizar los cambios a escala de décadas ha sido la comparación de las líneas de costa (Stafford, 1971; MOPU, 1979; Pardo-Pascual, 1991). Sin embargo, el concepto de línea de costa, no es simple ni se entiende siempre de la misma forma (Boak y Turner, 2005) debido a la inmediatez del registro temporal en que se toma, por lo que el significado de su posición puede quedar limitado debido a los constantes cambios en el nivel del mar y la pendiente de la playa (Smith y Zarrillo, 1990; List y Farris, 1999). Ello ha hecho que algunos autores (Moore et al., 2006; Ruggiero et al., 2005) hayan criticado su empleo para estudios evolutivos, muy especialmente en costas con amplios rangos mareales. En la bibliografía internacional se han propuesto decenas de indicadores –Boak y Turner (2005) distinguen hasta 42– para referenciar la línea de costa. Con todo, los que mayor seguridad aportan son aquellos que se basan en la localización de un nivel de cota relacionado con el nivel del mar (*datum based shoreline*) lo que obviamente requiere disponer de un modelo tridimensional de la playa. El empleo de técnicas GNSS diferencial (Psuty y Silveira, 2011, Pardo-Pascual et al., 2005), de LiDAR (Shrestha et al., 2005, Gares et al., 2006, Smeckaert, et al., 2013), de levantamientos mediante láser escáner terrestre (Hobbs et al., 2010) o incluso de técnicas SfM (*structure for motion*) (Sánchez-García et al., 2016) facilitan la obtención de estos modelos tridimensionales de playas, prácticamente necesarios en playas meso y macromareales.

Con una perspectiva completamente diferente se plantean los métodos de monitorización de las playas con imágenes de video (Davidson et al., 2007; Archetti et al., 2008; Sánchez-García et al., 2017) o de satélite. El primer método realiza un registro continuo sobre un espacio limitado, mientras que el segundo aumenta la dimensión espacial, pero disminuye la frecuencia de imágenes. Esta última fuente de datos tiene especial interés si se utilizan imágenes Landsat 5, 7 y 8 o Sentinel 2, disponibles gratuitamente para todo el planeta, pero con una baja resolución espacial. Este problema se ha subsanado recientemente, con el desarrollo de distintos algoritmos de detección de la línea de costa a escala subpixel (Pardo-Pascual et al., 2012; Almonacid-Caballer, 2014; Almonacid-Caballer et al., 2016; Liu et al., 2017; Pardo-Pascual et al., 2018; Sánchez-García et al., en revisión). Estas metodologías permiten detectar la línea de costa en imágenes Landsat 8 con un error medio cuadrático de 3,57 m y de 3,01 m con imágenes Sentinel 2 (Sánchez-García et al., en revisión). Esto abre un escenario nuevo sumamente atractivo para analizar los cambios actuales intranuales, pero su

escala temporal no va más atrás de marzo 1984, fecha en que se lanzó el satélite Landsat 5. Por este motivo, la fotografía aérea sigue siendo útil para caracterizar la dinámica evolutiva de periodos anteriores, sobre todo en entornos micromareales, con rangos inferiores a 30 cm (Smith y Zarrillo, 1990; Ojeda-Zújar, 2000; Pardo Pascual, 1991; Del Río y Gracia, 2008; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2008), como es el caso de la costa valenciana.

El uso de fotografías aéreas georreferenciadas y de ortofotografías en un entorno SIG y el desarrollo de diversas herramientas específicas, han permitido obtener distintos indicadores para medir los cambios en la costa de forma automatizada. Particularmente útil es el *Digital Shoreline Analysis System - DSAS*, desarrollado por el United States Geological Survey - USGS (Thieler et al., 2009) para ArcMap, que ha sido ampliamente utilizado en la bibliografía internacional (Cenci et al., 2013; Islam et al., 2014; Jabaloy-Sánchez et al., 2010; Kuleli et al., 2011; Moussaid et al., 2015, Alberico et al., 2018).

En el presente artículo, se analizarán los cambios mesoescalares, acaecidos en las últimas seis décadas, en el sector costero comprendido entre Orpesa y Torreblanca, comparando la posición de la línea litoral de distintas series de fotografías aéreas y ortofotografías, entre 1956 y 2015. Con ello se persiguen los siguientes objetivos: 1) detectar y caracterizar los cambios producidos en este segmento costero, 2) establecer cuáles son los factores que controlan dicha evolución y 3) evaluar si el empleo de las series de fotografías aéreas sigue siendo útil para detectar los cambios mesoescalares acaecidos en este tramo costero.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La Plana d'Orpesa-Torreblanca, situada en el extremo oriental de la cordillera Ibérica, está delimitada por la serra d'Irta (N), el Desert de les Palmes (S) y la serra de Vall d'Àngel (W). Conforman un espacio de 90 km² de superficie y 21 km de longitud. La fosa presenta pequeños hundimientos transversales por los que discurren los dos ríos principales, el riu de les Coves y el riu Xinxilla. Entre los depósitos fluviales de ambos ríos se encuentra el prat de Cabanes o albufera de Torreblanca, una de las zonas húmedas más importantes de las costas valencianas (Mateu, 1977). La marjal se encuentra enmarcada por los abanicos del riu de les Coves, barranc del Toll, barranc de les Raboses, rambla de Manyes y el del riu de Xinxilla (formado conjuntamente con el barranc de la Font del Campello y el barranc dels Llorenços) (Segura et al., 1997).

La línea de costa analizada afecta a las siguientes unidades geomorfológicas: a) abanico del riu de les Coves, b) prat de Cabanes o albufera de Torreblanca, c) abanico del riu Xinxilla, c) marjal d'Orpesa (figura 1):

- a) El abanico progradante del riu de les Coves, forma la protuberancia costera de Capicorb. Constituido en superficie por un nivel de cantos y bloques encostrados, se atribuyen por criterio regional, al Pleistoceno inferior-medio.

Los depósitos del Pleistoceno superior no aparecen en superficie y los materiales holocenos forman un pequeño cono en la desembocadura (Segura, et al., 1993; Segura-Beltran y Pardo-Pascual, 2019).

- b) El prat de Cabanes o albufera de Torreblanca con una superficie de (1.061 ha), está cerrada por una restinga de 10,2 km, con una anchura media de 68 m y una pendiente antelitoral de 0,421 (Sanjaume et al., 2019). La restinga, formada por crestas de cantos, bermas y *washover fans* o abanicos de derrame, presenta tres sectores claramente diferenciados (Sanjaume et al., 1990; Carmona et al., 2014):
- El sector septentrional, situado entre el abanico del riu de les Coves y el Quarter Vell (figura 1), formado por un *ridge* o cresta de cantos, en cuya base aflora la turba. En este tramo aparecen numerosos restos de playas fósiles de cantos (Segura et al., 1993) procedentes niveles de playas pleistocenas sumergidas.
 - El sector central está formado por una playa de arena ancha. Engloba numerosos restos de eolianitas extraídos por el mar procedentes de antiguos niveles cuaternarios sumergidos. Un antiguo cuartel construido a principios del siglo XX (el quarter Vell), ha sido destruido por el mar y sus restos sufren los embates del oleaje (Segura et al., 1993).
 - El sector meridional, nuevamente de cantos, finaliza en Torre la Sal. Entremezclados con los cantos, existen numerosos retazos de eolianitas, que afloran en el extremo meridional, a la altura de Torre la Sal (Segura et al., 1997). Excavado en estos afloramientos se ha localizado un campo de silos rellenos de escombros de la edad del Bronce, que está siendo erosionado por el mar (Segura et al., 2005; Carmona et al., 2014).

En sentido transversal también existen diferencias: en la parte interna los cantos tienen un calibre que supera los 9 cm de diámetro mientras que en la orilla oscilan entre 2,5 y 3,3 cm. En la cara interna de la cresta son frecuentes los abanicos de derrame producidos por los temporales. La presencia de estos abanicos de derrame y el hallazgo de restos de turba en la playa o incluso dentro del mar (Rosselló, 1969) en la zona septentrional evidencian un retroceso importante (Rosselló, 1969, 1993; Segura et al., 1997), previo incluso a la construcción de espigones en las costas situadas al norte.

- c) El abanico formado por el riu de Xinxilla y el barranc de la Font del Campello (figura 1) apenas aporta sedimentos a la playa (Sanjaume et al., 1990) ya que la mayoría de los materiales proceden de áreas más septentrionales. Sobre este complejo de abanicos se asientan las restingas de Torreblanca por el norte y de Orpesa por el sur. Las excavaciones en este sector han detectado un registro

arqueológico muy amplio que se inicia en el VI milenio a.C., con restos de estructuras y construcciones de la edad del Bronce y de los periodos ibérico, romano y andalusí, algunas de las cuales están actualmente sumergidas (Fernández, 1988; Guillem et al., 2005; Flors, 2009).

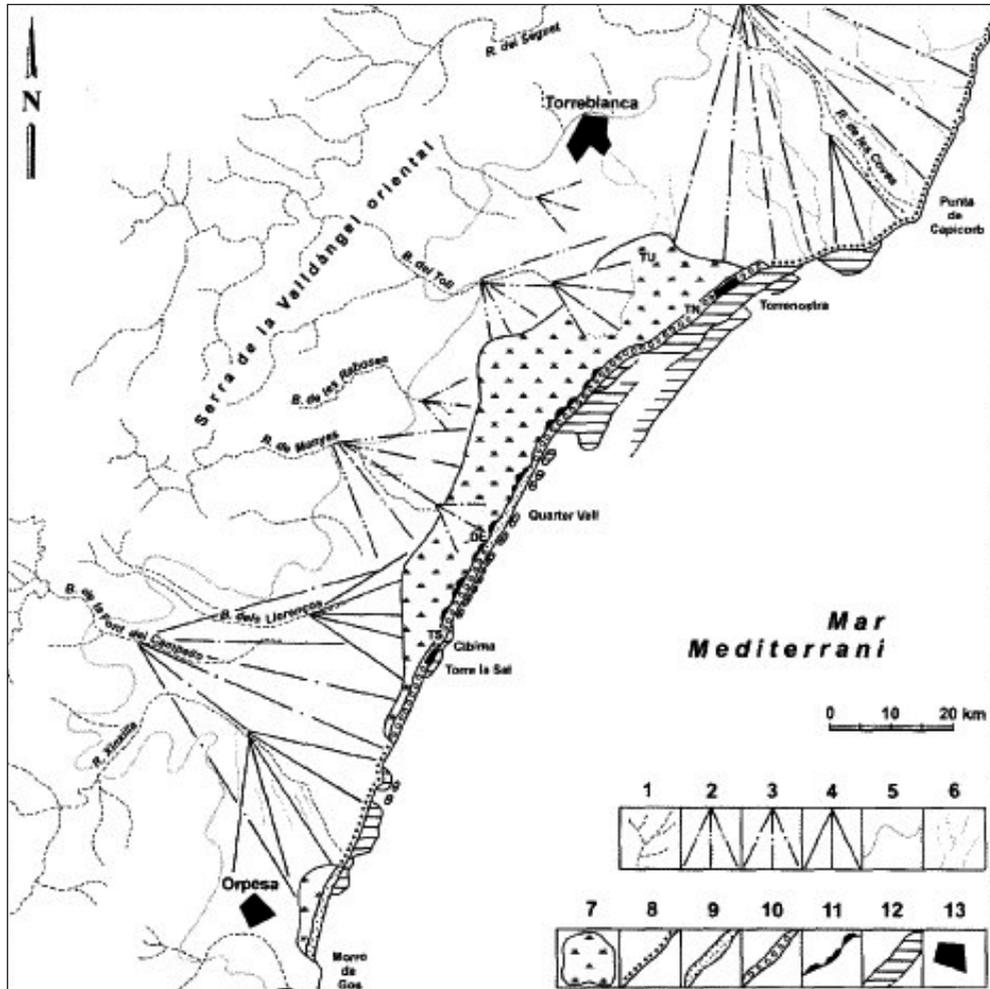


Figura 1. Esquema geomorfológico de la Plana d'Orpessa-Torreblanca. 1. Barrancos. 2. Conos del Pleistoceno medio. 3. Conos del Pleistoceno superior. 4. Conos holocenos. 5. Límites de los depósitos cuaternarios. 6. Paleocauces. 7. Marjal. 8. Playa de cantos. 9. Restinga de arena. 10. Restinga de cantos. 11. Abanicos de derrame. 12. Afloramientos sumergidos del Pleistoceno. 13. Núcleos urbanos. Fuente: Segura et al., 1997.

- d) La marjal d'Orpesa (figura 1), con una extensión de 55 ha, está cerrada por una restinga de 1,9 km de longitud y 100 m de anchura media (Sanjaume et al., 2019). Ha sido prácticamente destruida por la acción antrópica (Mateu, 1977), especialmente por el crecimiento urbano d'Orpesa y, sobre todo, por el complejo turístico-urbanístico de Marina d'Or.

3. MATERIALES Y MÉTODO

Para realizar el análisis sobre el dinamismo de la línea de costa en la Plana de Orpesa – Torrellanca se han utilizado diferentes series de fotografías y ortofotografías (tabla 1).

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las ortofotografías y fotografías aéreas utilizadas. Códigos: O (ortofoto); FA-CG (fotografía aérea corregida geoméricamente); B/N (blanco y negro); PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea); EMC (Error medio cuadrático); IGN (Instituto Geográfico Nacional); ICV (Institut Cartogràfic Valencià); CUV (Cartoteca Universitat de València).

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS								
Código	Formato	Tipo imagen	Fecha	Tamaño Pixel (m)	Escala aproximada	Color	EMC x, y (m)	Fuente
PNOA máx. actualidad	Digital	O	1/6/2015	0,25	1/5.000	Sí	<0,4	IGN
Ortofoto Google Earth	Digital	O	30/03/2015	0,5	1/10.000	Si	>0,4	Google Earth
PNOA histórico	Digital	O	1/6/2012	0,5	1/10.000	Sí	<0,4	IGN
	Digital	O	1/9/2009	0,25	1/5.000	Sí	<0,4	IGN
	Digital	O	1/8/2007	0,5	1/10.000	Sí	<0,4	IGN
	Digital	O	1/9/2005	0,5	1/10.000	Sí	<0,4	IGN
	Digital	O	15/11/2002	0,5	1/5.000	Sí	<0,48	Google Earth
Vuelo de Costas	Analógico	FA-CG	1/4/1991	0,58	1/5.000	B/N	0,89	CUV
Vuelo Nacional	Analógico	FA-CG	1/6/1985	0,85	1/30.000	B/N	0,42	CUV
Vuelo Interministerial	Analógico	FA-CG	1/7/1977	0,5	1/18.000	B/N	0,45	CUV
Vuelo Americano Serie C	Analógico	FA-CG	1/7/1967	0,47	1/45.000	B/N	0,59	CUV
Vuelo Americano Serie B	Digital	O	7/1/1956	0,5	1/32.000	B/N	<0,5	ICV

Las fotografías aéreas se han digitalizado a un tamaño de pixel comparable con las ortofotos más recientes (tabla 1) y se han georreferenciado con ArcGis 10.5. Se han tomado un mínimo de 7 puntos de control por fotograma y sus homólogos en la ortofoto de 2015, con un error medio cuadrático (EMC) inferior al metro. Se ha realizado una corrección geométrica mediante un ajuste polinómico de 2º grado y de esta manera se han georeferenciado. Existen dos casos particulares en que la fotografía aérea se ha descargado de Google Earth (15/11/2002 y 30/3/2015), como imagen ortorectificada y posteriormente se ha georeferenciado utilizando el mismo procedimiento empleado para las fotografías analógicas, si bien en este caso ya se partía teóricamente de un material ortorectificado. El resto de las imágenes son ortofotografías de diferentes organismos (tabla 1), con un error de posicionamiento mínimo (EMC < 0,4 m).

Sobre las fotografías rectificadas y las ortofotografías se ha digitalizado la línea de costa y mediante la herramienta DSAS y se han realizado las siguientes operaciones:

- a) Delimitación de una línea base a partir de la cual, se trazan una serie de perfiles de 300 m de longitud perpendiculares a la línea de costa: se han hecho 914 perfiles separados entre sí cada 20 m.
- b) Determinación de la distancia desde la línea base a la línea de costa de cada fechas, lo que permite medir los cambios en la posición de la costa en cada perfil para cada una de las fechas.
- c) Extracción de distintos parámetros métricos (con un nivel de confianza del 95%) en base a las medidas puntuales de cambio registradas en cada perfil. En particular se han calculado tres parámetros:
 1. Cambio neto de la línea de costa (NSM): calcula la distancia en metros entre la línea de costa más antigua y la más reciente.
 2. Cambio máximo registrado: informa de la máxima variabilidad registrada en cada segmento analizado sin importar la fecha. Define la magnitud máxima de cambio registrado (en metros).
 2. Regresión lineal (LRR): se obtiene al ajustar una función lineal a la relación existente entre la distancia de cada posición de la línea de costa respecto a su posición inicial y el tiempo (figura 2). La tasa de cambio viene definida por la pendiente de la recta. También se ha obtenido el coeficiente de determinación (r^2) de cada ajuste (LR2). En la figura 2 se presenta, a modo de ejemplo, el ajuste el perfil 481, con una tasa de cambio claramente negativa, expresada por el valor de la constante que multiplica a la variable x .

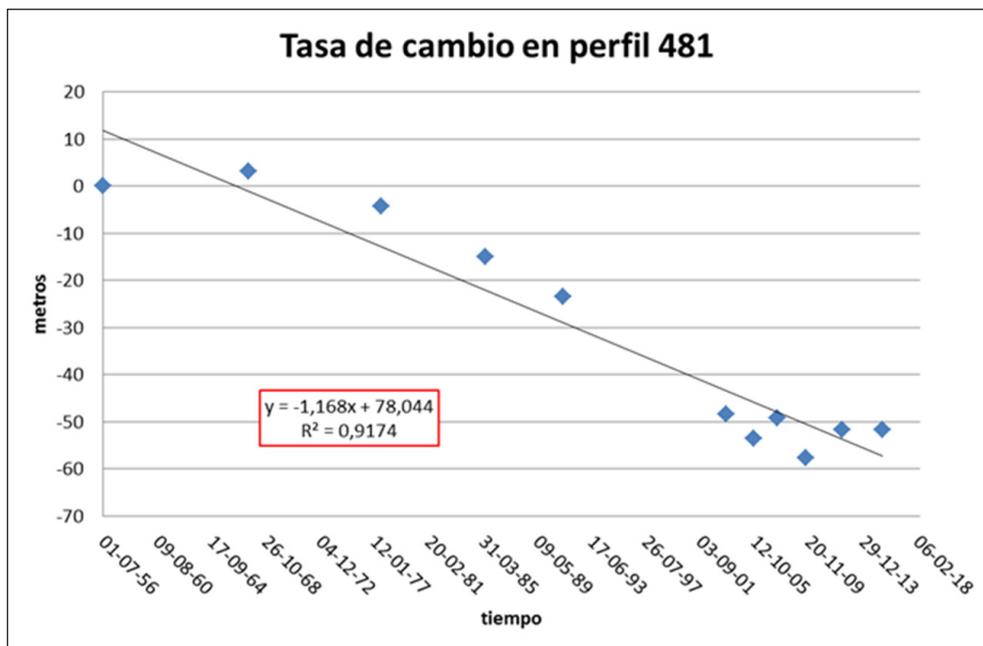


Figura 2. Ejemplo de cálculo de la tasa de cambio en un perfil concreto y de deducción del coeficiente de determinación. Obsérvese que la tasa de cambio es la constante que multiplica la variable x , es decir, $-1,168$ m/año.

Con la finalidad de analizar los cambios de forma pormenorizada, en los 22 km estudiados se han diferenciado los siguientes tramos (figura 3):

- Tramo 1: desde el punto más septentrional (Alcossebre) hasta la punta del Capicorb; es una zona urbanizada para residencias secundarias: se ha analizado con 158 perfiles (del 755 al 913).
- Tramo 2: corresponde a la desembocadura del riu de les Coves, es decir, Capicorb; se han examinado 66 perfiles (del 690 al 754).
- Tramo 3: entre el sur del Capicorb y Torrenostrá. Abarca un espacio de transición entre Capicorb y l'albufera de Torreblanca o prat de Cabanes; se ha analizado con 136 perfiles (del 554 al 689).
- Tramo 4: restinga de l'albufera de Torreblanca o prat de Cabanes; se ha estudiado con 307 perfiles (del 247 al 553).

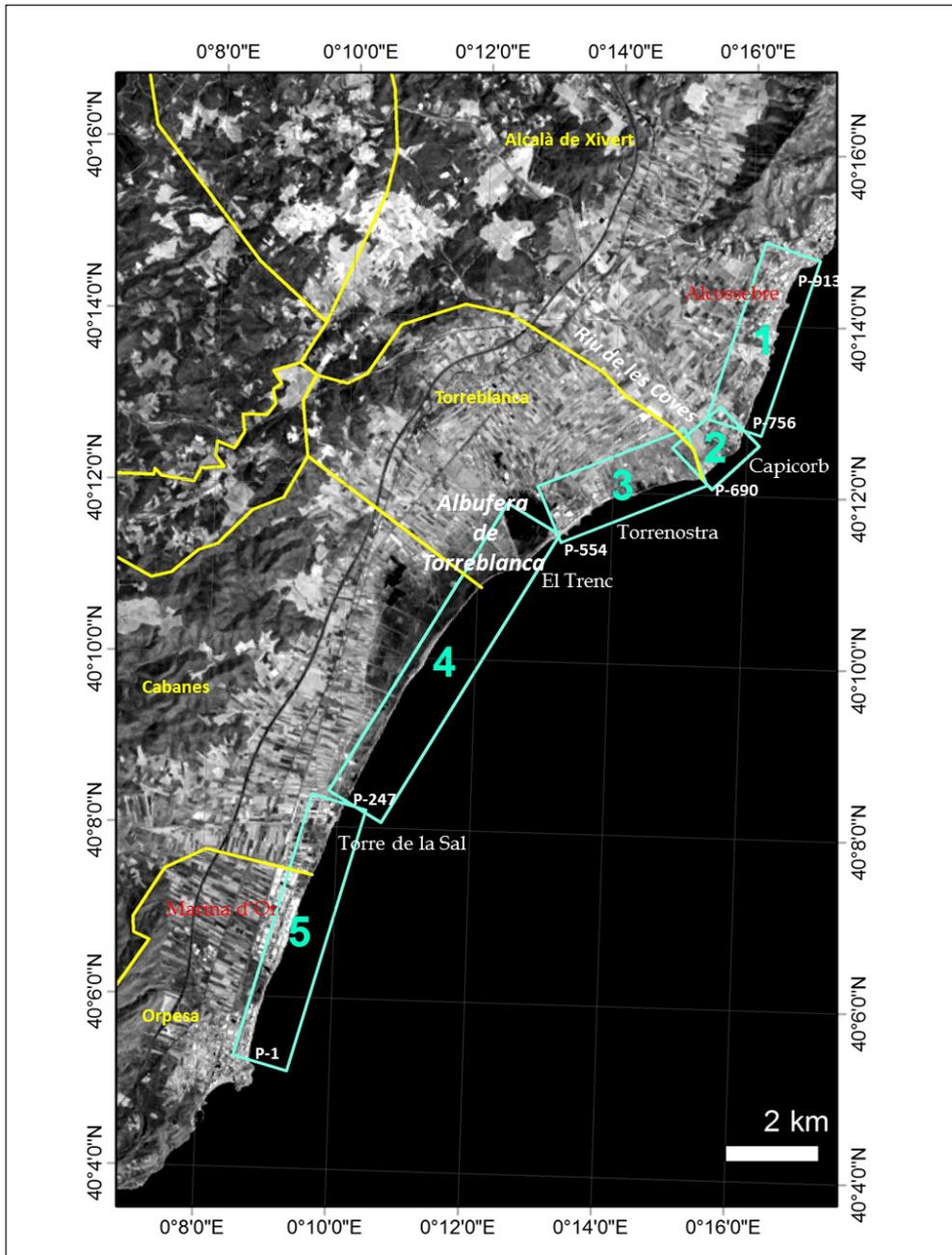


Figura 3. División en tramos de la franja costera de la Plana de Orpesa-Torreblanca. En amarillo los límites de los términos municipales.

- Tramo 5: desde el sur de l'albufera de Torreblanca hasta el cap d'Orpesa; presenta numerosas edificaciones a lo largo de la costa (perfiles del 1 al 246).

Para caracterizar los procesos de dinámica costera, se han analizado los datos de oleaje del punto SIMAR-2087122, de la base de datos de Puertos del Estado (<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>). A partir de dicha serie se han caracterizado los temporales, considerado únicamente las situaciones con una altura de ola significativa mayor a 2 m y que perdura al menos 12 h. Dicho criterio, definido por Mendoza y Jiménez (2008) para el entorno mediterráneo, ha sido utilizado previamente por Pardo-Pascual et al. (2014). Los resultados obtenidos indican que todo el sector está afectado por un régimen de oleaje similar, aunque modificado por la diferente orientación de la costa, sobre todo a partir de la protuberancia de Capicorb y, también por la existencia de elementos rocosos –en la mayor parte de los casos, eolianitas cuaternarias– en la orilla. La altura significativa de ola media es menor o igual a 1 m en más del 96% de los casos y el periodo más frecuente es de 4 segundos (Puertos del Estado, 2018). Del análisis de los datos de oleaje de 2017 se deduce que en el 1,8 % del tiempo se produjeron temporales. En el 75% de las veces el oleaje procedía del ENE y, por tanto, esta dirección es la responsable del transporte longitudinal de sedimentos más eficiente. Obviamente, las inflexiones de la costa imponen diferencias grandes en la velocidad y en la magnitud de este transporte. Por este motivo, los análisis evolutivos se han realizado por sectores atendiendo, fundamentalmente, a la orientación de la costa.

Con el fin de interpretar mejor los resultados, también se han incorporado las isobatas del área de estudio, con una equidistancia de 1 m, extraídas del Estudio Ecocartográfico realizado por el Ministerio para la Transición Ecológica entre 2009 y 2010 para las costas de Castellón (www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/ecocartografias/ecocartografia-castellon.aspx). Aportan información relevante sobre la pendiente antelitoral, que influye claramente sobre la dinámica litoral.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de los cambios sobre el conjunto de la zona de estudio

Los resultados de la tabla 2 muestran un predominio de la tendencia negativa en los cambios a lo largo de la zona de estudio, aunque existen fuertes diferencias espaciales (figs. 4 y 5). Los puntos con cambios más significativos son cuatro: i) la desembocadura del riu de les Coves, con fuertes incrementos muy localizados (sector 2, perfiles 736-745), (ii) una zona con muy fuertes avances.

Tabla 2. Estadísticos básicos de los tres parámetros analizados sobre los 914 perfiles realizados a lo largo los 22,8 km de costa estudiados.

	Media	Desviación estándar	Máximo	Mínimo
Tasa de cambio (m/año)	-0,14	0,51	2,44	-1,53
Cambio neto (m)	-1,81	28,82	149,67	-71,22
Cambio máximo registrado (m)	34,03	19,88	166,6	7,26

de la costa frente las urbanización de Torrenostrá (sector 3, perfiles 556-600), (iii) una zona de muy fuertes pérdidas al sur de dicha zona, que se alargan sobre la parte septentrional de la restinga de l'albufera de Torreblanca (sector 4, perfiles 440-505 y 533-547) y (iv) la zona más meridional, conocida como la playa del Morro de Gos, que se apoya sobre el cap d'Orpesa (sector 5, perfiles 1-59), con cambios máximos y netos positivos que oscilan entre los 25 y 50 m.

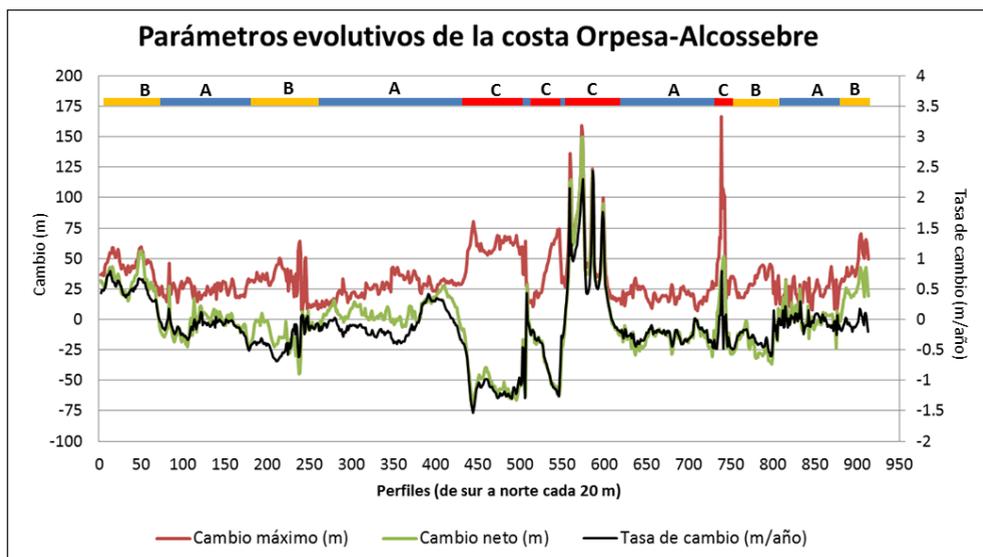


Figura 4. Cuantificación por perfiles (orientados de sur a norte, véase en la figura 3 la posición geográfica de cada uno de ellos) de los tres parámetros analizados: cambio máximo en el periodo estudiado, cambio neto (diferencia entre la fecha más antigua y reciente) y tasa de cambio expresada en m/año obtenida mediante ajuste. Se han diferenciado los tres tipos de sectores (A, B, C) atendiendo a la magnitud del cambio máximo observado. **A** señala las zonas con cambio máximo alrededor de 25 m, **B** aquellos que oscilan entre 25 y 50 m y **C** donde los cambios superan los 50 m.

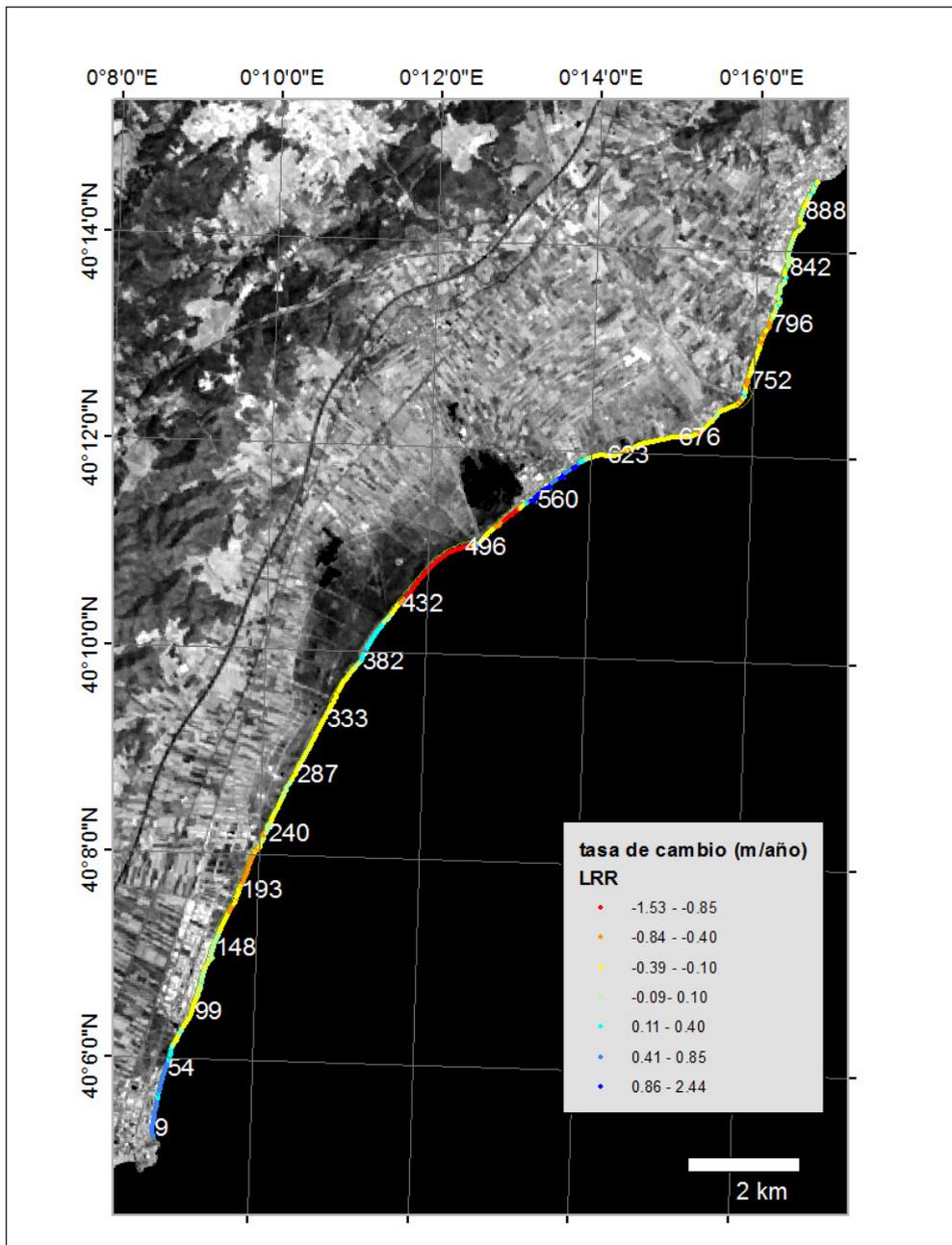


Figura 5. Mapa de la tasa de cambio registrada en las playas existentes entre Alcossebre (al norte) y Orpesa (al sur). Los números expresan la posición de los perfiles analizados.

En la figura 4 (ver numeración de perfiles en figura 5) se muestran para los distintos perfiles analizados los valores de tasa de cambio comparados con los del cambio máximo y neto. Como se puede observar, la línea de cambio neto y de tasa de cambio muestran tendencias similares si se exceptúan pequeños tramos en los que el cambio neto es ligeramente superior a la tasa.

El análisis de los cambios máximos permite reconocer tres tipos de segmentos costeros (figura 4), según el grado de movilidad registrado en el periodo estudiado: (A) segmentos básicamente estables con cambios máximos alrededor de los 25 m, (B) segmentos con cambios medios, que suelen oscilar entre los 25 y los 50 m (si bien algún perfil puede superar esta magnitud) y (C) segmentos cuya variación supera ampliamente los 50 m. Las zonas de tipo C se dan en tres circunstancias: a) sectores con una evolución claramente recesiva situados entre los espigones de Torrenostra y el sector septentrional de la albufera de Torreblanca (figura 4) (perfiles 520-550); b) áreas de carácter acumulativo, localizadas frente a la urbanización de Torrenostra (perfiles 550-600) y, c) la desembocadura del riu de les Coves (perfil 750), en el que el registro de marzo de 2015 detecta un fuerte avance provocado por el desarrollo de un pequeño delta que en junio ya había desaparecido.

En la figura 5 se muestra para el conjunto de la zona de estudio la tasa de cambio por perfil que permite reconocer que las máximas ganancias se dan en la zona de Torrenostra (alrededor del perfil 560) y las máximas pérdidas se dieron al sur de este mismo punto (entre los perfiles 432 y 560). En el resto de los sectores los cambios son mucho menos fuertes –ya sean positivos o negativos– si bien predominan las zonas con tasas ligeramente negativas (entre -0,39 y -0,1 m/año).

Los cambios promediados para la zona de estudio y para cada uno de los sectores diferenciados (figura 6) muestran que, si bien de forma global, la tendencia final ha sido ligeramente negativa para toda el área y el periodo de estudio, hay importantes diferencias espacio-temporales.

El análisis de la evolución general de la zona (línea negra de la figura 6) prueba que hasta 1985 la zona se mantuvo bastante estable, con un ligero avance en esta fecha (una media de 2,6 m respecto a la posición de 1956). Sin embargo, a partir de ese momento se aprecia un retroceso brusco entre 1991 y 2002 (el retroceso medio fue de 10,4 m). Con posterioridad a esta fecha se inicia un lento e inestable ensanchamiento de la playa ganándose 7,9 m hasta 2015, aunque no se alcanzó el nivel de la línea de costa de 1956.

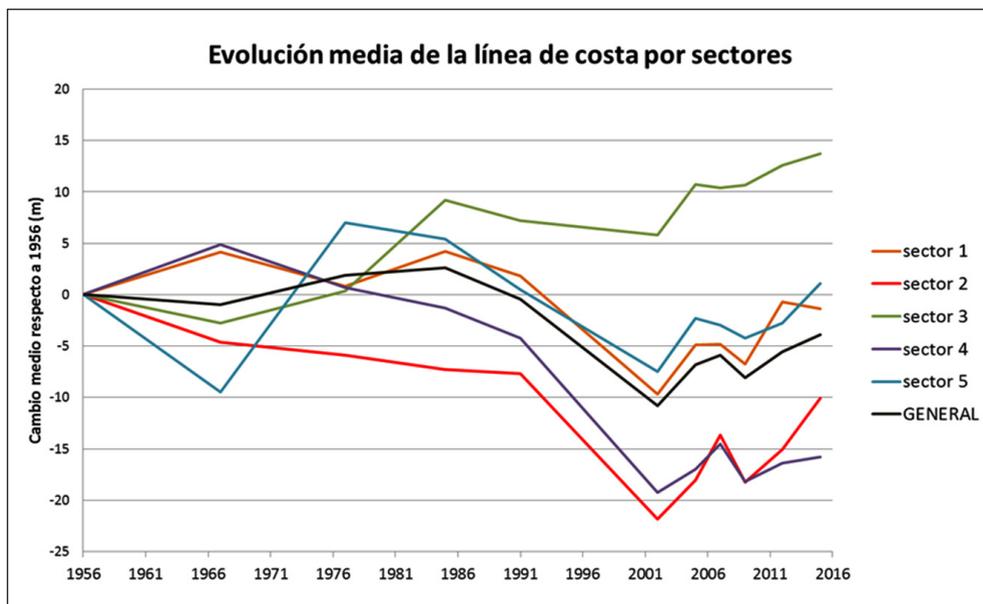


Figura 6. Evolución media de la línea de costa del conjunto de la zona de estudio y de cada uno de los cinco sectores diferenciados. Para el dato de 2015 se han promediado los valores entre los dos registros disponibles (marzo y junio).

El análisis por sectores permite reconocer diferencias espaciales significativas: la línea de costa en el sector 3 (Torreñostra) ha experimentado un claro avance, mientras que en los sectores 2 (sur de Capicorb) y 4 (parte de la marjal), el retroceso es muy marcado. Los sectores 1 (Alcossebre) y 5 (Orpesa) presentan cambios menos marcados y una tendencia final prácticamente estable. Sin embargo, llama la atención que, en todos los casos entre 1991 y 2002 hay un retroceso muy claro y posteriormente una lenta e inestable recuperación de la anchura de las playas.

4.2. Cambios en los sectores 1, 2 y 3

Un análisis detallado sobre cada uno de los segmentos permite reconocer, a su vez, una gran variabilidad interna. En la figura 7, se observa que en toda la parte norte –las playas del Carregador y de la Romana, junto con los acantilados bajos que las segmentan– no hay una tendencia evolutiva clara, como prueba un valor de r^2 sumamente bajo ($< 0,25$). Es en la parte meridional –playa Tropicana– donde se detectan tendencias erosivas cada vez más claras y, justo al norte de la desembocadura del riu de les Coves o Punta de Capicorb (figs. 7 y 8), antes de la inflexión de la costa, es donde encontramos una tendencia bien definida ($r^2 > 0,85$) y una tasa de cambio cercana a $-0,5$ m/año.

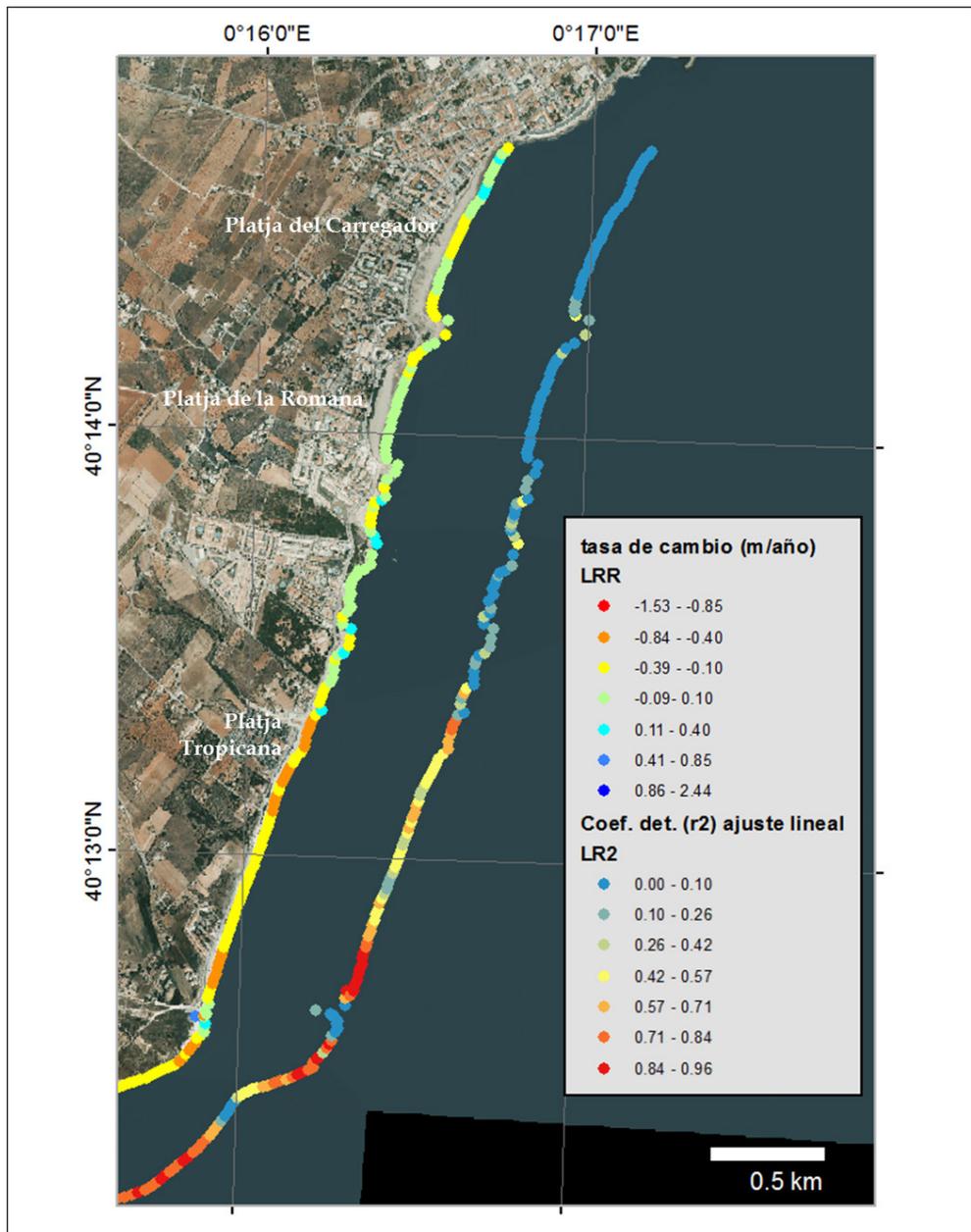


Figura 7. Tasa de cambio (izquierda) y grado de ajuste (derecha) definido por el coeficiente de determinación para cada uno de los perfiles analizados en los sectores 1 y 2. Los valores del coeficiente de determinación r^2 hacen referencia al ajuste en cada uno de los perfiles.

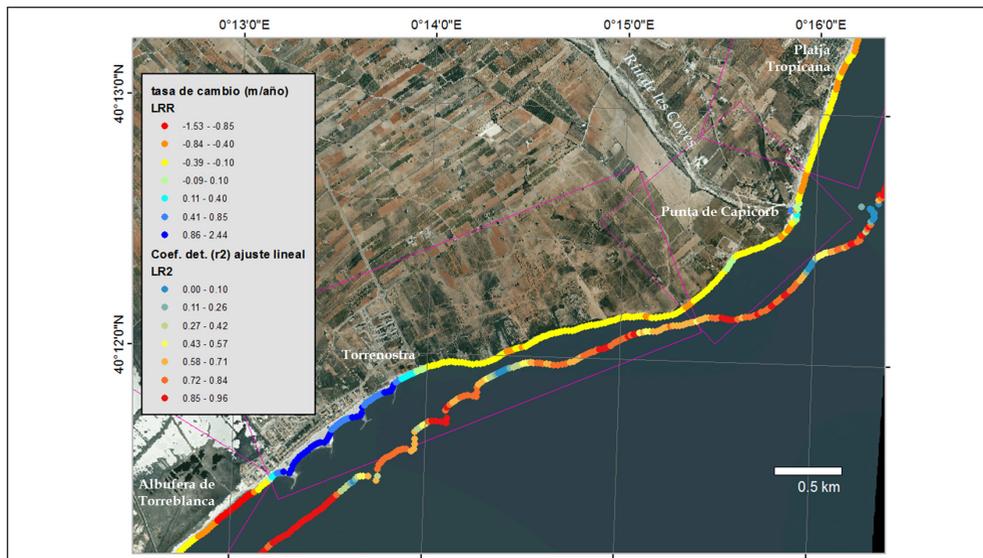


Figura 8. Tasas de cambio (en m/año) (izquierda) registradas en el periodo 1956-2015 y coeficiente de determinación (r^2) del ajuste lineal (derecha) en los sectores 2 y 3.

La desembocadura del riu de les Coves es, desde el punto de vista de su evolución, un entorno singular. En la figura 4 (perfil 750) se puede observar cómo ostenta el cambio máximo de toda la zona de estudio (166 m). La tasa de cambio es puntualmente positiva (en el perfil 750 se alcanzan tasas de 0,8 m/año), pero con un coeficiente de determinación muy bajo, de 0,1 (figura 8). Ello se debe a que en la desembocadura del río se producen acumulaciones puntuales de sedimentos durante las crecidas que modifican la línea de costa. Estos avances efímeros no consiguen frenar una dinámica globalmente negativa tanto al norte como al sur de la desembocadura.

En el tránsito entre el sector 2 y 3 (figura 8), desde el sur de Capicorb hasta Torrenostra, se aprecia una tendencia homogénea de un retroceso suave (-0,26 m/año de media) que, en la mayoría de los casos presenta un coeficiente de determinación relativamente elevado (el valor medio de r^2 es de 0,68). Asimismo, en las playas de Torrenostra se registra un fuerte avance (0,9 m/año de media frente a la zona urbanizada), acompañado de coeficientes de determinación muy dispares, con valores altos en algunos puntos que contrastan con otros especialmente bajos (el r^2 medio es de 0,6, pero con una desviación estándar de 0,25). Inmediatamente al sur de Torrenostra se aprecia una inversión en la tendencia, con una tasa de cambio claramente negativa (en los 350 m inmediatos a los espigones es de -1 m/año, con un coeficiente de determinación de 0,88), que se atenúa al sur de la urbanización (inicialmente es de -1m/año, pero progresivamente pasa a tasas más moderadas), si bien el coeficiente de determinación ($> 0,85$) se mantiene alto en todo el segmento.

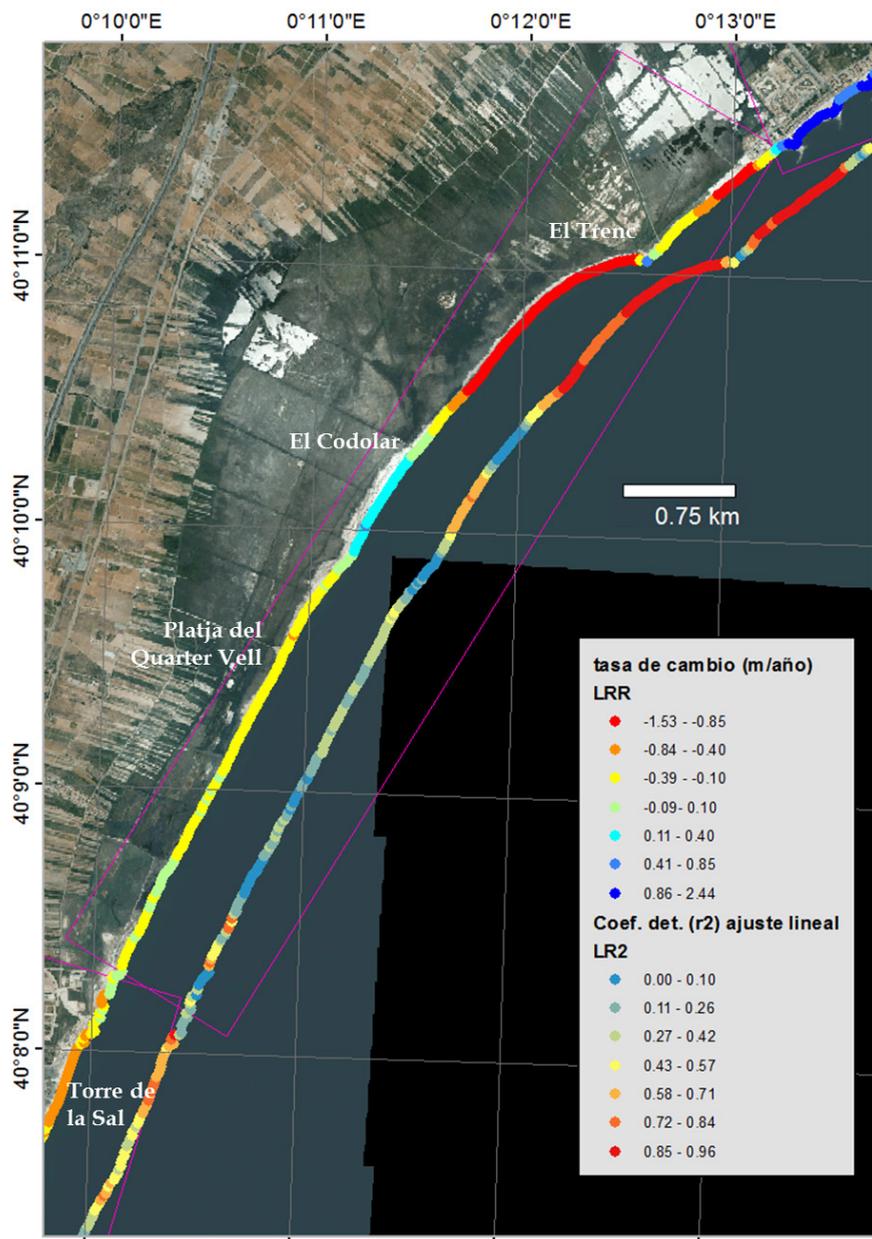


Figura 9. Tasa de cambio (m/año) (izquierda) y coeficiente de determinación (r^2) (derecha) en los perfiles del sector 4.

4.3. Los cambios en el sector 4 y 5

A lo largo del sector 4 (figura 9) aparecen tendencias evolutivas diferenciadas, con un punto de inflexión en la séquia del Trenc. En la parte septentrional (sur de Torrenostra), se observa un retroceso de la línea de costa por efecto de los espigones (más de 50 m, perfil 550, figura 4), aunque las pérdidas decrecen al desplazarnos hacia el sur y alejarnos de los espigones. La pequeña escollera que protege la bocana de la acequia frena el retroceso costero provocado por los espigones de Torrenostra, pero al sur genera una fuerte erosión en la restinga, con una textura de cantos muy gruesos. Al sur del Trenc, el retroceso es similar a lo largo de más de 1.400 m, con un valor máximo de 70 m. Hacia el sur la tendencia comienza a cambiar, aminorándose las pérdidas y pasando posteriormente a ganancias netas: en 660 m que separan los perfiles 444 y 411 se pasa de una pérdida neta de -71 m a una ganancia de 24 m.

Un análisis detallado de la evolución seguida por estos dos tramos (figura 10) muestra cómo en la zona de Torrenostra el ritmo erosivo se ha mantenido constante y con valores elevados entre 1967 y 2002. Al sur del Trenc, por el contrario, la tendencia erosiva es más débil durante el periodo 1967 y 1991, pero entre este último año y 2002 las pérdidas son mayores que en el segmento septentrional, por lo que los valores totales al final del periodo son incluso superiores. Parece claro que las causas del retroceso en ambos casos no responden al mismo tipo de proceso.

Como se ha comentado arriba, al sur del segmento erosivo del Trenc existe una pequeña zona de transición donde las pérdidas disminuyen y en el segmento del Codolar (figura 9), se aprecia una tendencia ligeramente acumulativa (0,29 m/año de media) clara y sostenida como evidencia el coeficiente de determinación (la media del r^2 es de 0,51). Al sur de este sector, el comportamiento es ligeramente erosivo o en muchos lugares estable. El coeficiente de determinación es bastante bajo en todo el segmento, lo que indica cierta variabilidad temporal, con alternancias de periodos erosivos seguidos de otros con ligeros avances de la playa. Así, los restos del antiguo cuartel de Carabineros (el Quarter Vell), construido en la segunda década del siglo XX y parcialmente derruido en 1989, aunque con paredes claramente visibles (Pardo-Pascual, 1991), unos años aparecen parcialmente emergidos y otros completamente sumergidos.

El sector 5 (figura 11) presenta tres segmentos claramente diferenciados. Al sur de Torre de la Sal la tendencia claramente erosiva se mantiene a lo largo de más de 500 m (tasa de cambio media de -0,54 m/año) aunque poco a poco se va haciendo menos clara y marcada. Más al sur, frente a las playas de Marina d'Or, predomina claramente la estabilidad y valores ligeramente positivos. Finalmente, en el extremo sur, en la playa del Morro de Gos, que se apoya sobre el cap d'Orpesa se aprecia una tendencia claramente positiva, con tasas de avance que superan el medio metro anual y con un elevado coeficiente de determinación (como promedio 0,6) que revela que la tendencia es bastante sostenida en el tiempo.

5. DISCUSIÓN

5.1. Sobre la magnitud, la distribución espacial de los cambios en la línea de costa y sus causas

Los resultados descritos muestran un retroceso generalizado de la línea de costa para toda la zona y el periodo de estudio –aunque con fuertes diferencias espacio-temporales–, lo que sugiere un sector con déficit estructural de sedimentos. Los cambios locales son de diferente naturaleza, dimensión y sentido, porque obedecen a causas diferentes. En algunos casos son bien conocidas y, en otros, únicamente podemos apuntar hipótesis explicativas que otros estudios deberán corroborar o refutar.

Los elementos artificiales que interrumpen el transporte longitudinal de sedimentos, constituyen la primera causa de alteración de la costa. Así, el fuerte avance observado en Torrenosta (sector 3), contrasta con la constancia documental existente de problemas erosivos en este antiguo caserío a principios del siglo XX (Obiol, 1989). Los espigones (el primero de ellos construido entre 1956 y 1965, tenía unos 40 m de longitud, aunque a partir de 1968 alcanzan hasta 400 m) y el aporte artificial de arenas de finales de los 80 y primeros de los 90 (Pardo-Pascual, 1991) explican tanto el avance en la cara al norte de los mismos como el retroceso sostenido en la cara sur (al menos hasta 2002) (figura 10), provocado por la interrupción del transporte longitudinal. Un efecto similar lo produce el cap d'Orpesa, una trampa natural que retiene sedimentos y puede explicar, en parte, el avance sostenido que se aprecia en la playa del Morro de Gos (figura 4).

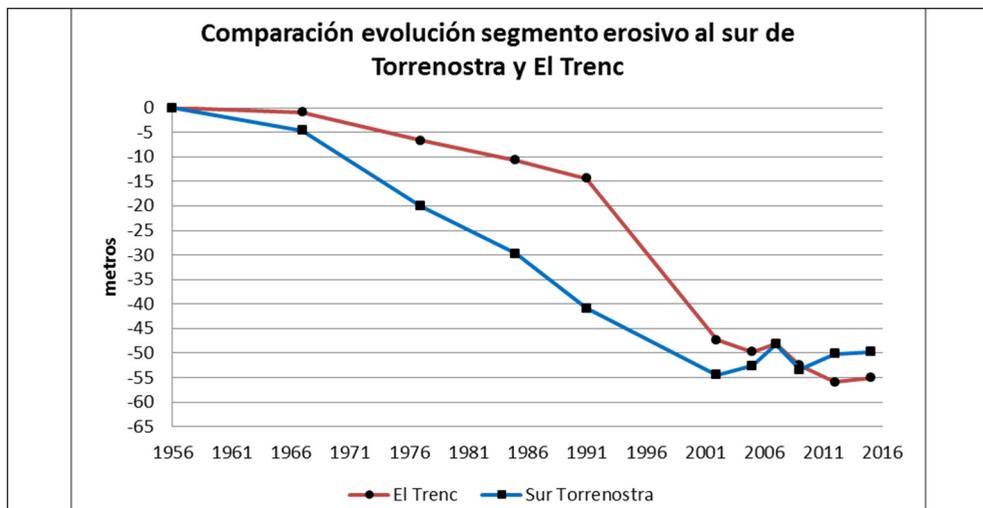


Figura 10. Cambio neto medio registrado entre los perfiles 535 y 550 (segmento erosivo al sur de Torrenosta) y los perfiles 444 y 506 (segmento erosivo del Trenc).

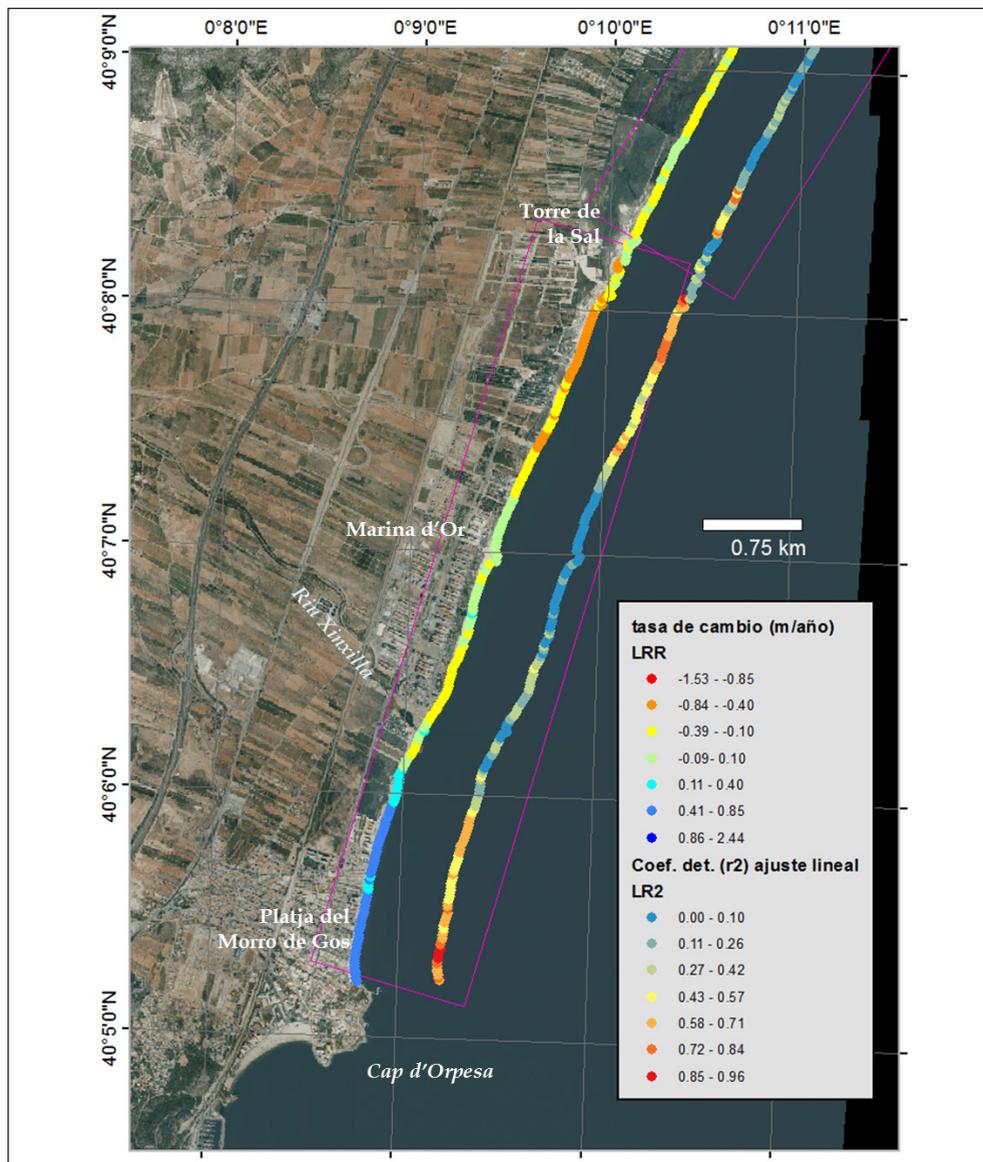


Figura 11. Tasa de cambio (m/año) (izquierda) y coeficiente de determinación (r^2) (derecha) en cada uno de los perfiles analizados en el sector 5 de la zona de estudio.

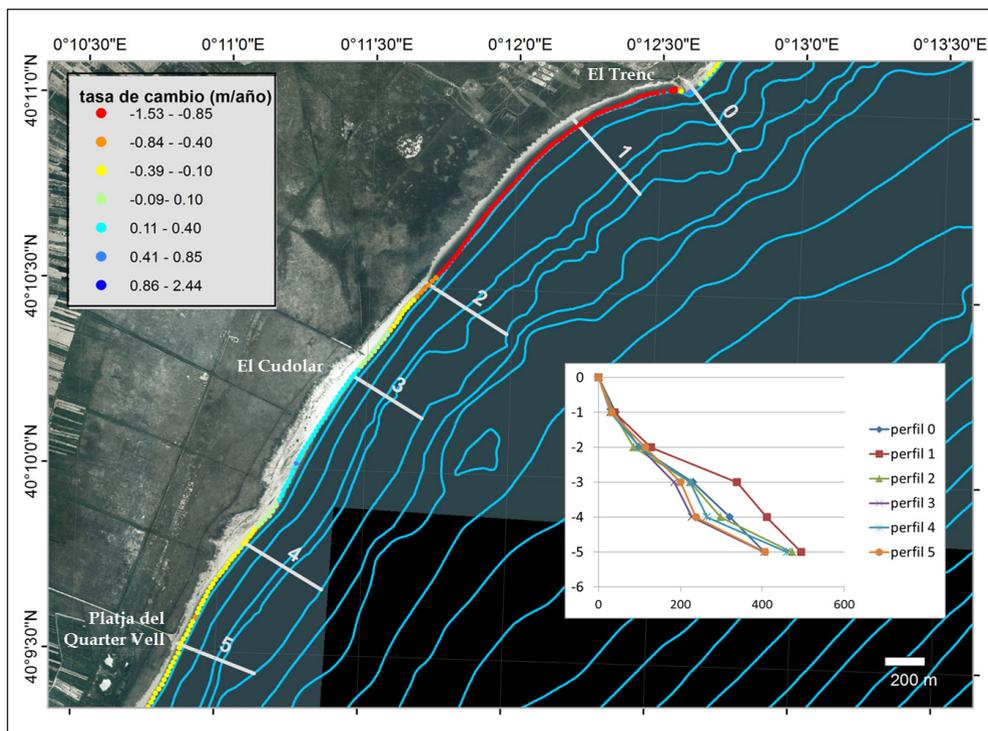


Figura 12. Isobatas y perfil batimétrico (hasta cota -5m) en seis perfiles seleccionados entre la Gola del Trenc y la playa del Quarter Vell.

La erosión observada al sur de los espigones de Torrenostra no se traslada deriva abajo debido a la retención que provocan las escolleras de defensa de la séquia del Trenc. Se trata de una pequeña estructura artificial –como un pequeño espigón de unos 50 m de longitud– que ha deetenido los procesos erosivos pero ha provocado un fuerte impacto erosivo hacia el sur. El análisis de las isobatas entre el Trenc y la playa del Quarter Vell resulta útil para entender la evolución y morfología de este tramo costero. En la figura 12 se han representado estas isobatas y seis perfiles que ayudan a interpretar la morfología hasta 5 m de profundidad. La fuerte erosión del primer sector se produce con una restinga muy estrecha formada por cantos de gran tamaño y coincide con unas isobatas irregulares –isobatas de -2 a -4 m–, que corresponden a depósitos litificados sumergidos. Múltiples trabajos previos (Sanjaume et al., 1990; Segura et al., 1993; Segura et al., 1997) han referido la existencia de escollos rocosos sumergidos frente a la restinga, que en muchos casos son playas fósiles y eolianitas cuaternarias. La fortísima erosión sufrida por la costa al sur del Trenc (en algunos lugares de hasta 70 m), provoca la migración de la restinga tierra adentro. En la figura 13 se compara la situación de 1956 respecto a 2017. Las imágenes muestran un retroceso tan fuerte que

la isobata de -1 m (figura 13 C) aparece tierra adentro en la imagen de 1956 (figura 13 B). También se observa cómo en 2017 (figura 13 C) aparecen una serie de abanicos de derrame (*washover fans*), en forma de acumulaciones blancas con formas festoneadas que no se reconocen en 1956. En diversas ortofotos estas formas se hacen especialmente visibles tras los grandes temporales, como los que se sucedieron entre noviembre de 2001 y mayo de 2002 o los más recientes de noviembre de 2015 y enero de 2017 (figura 13 C). Pasados unos años de estos grandes temporales las formas se desdibujan y apenas se reconocen. Ello sugiere que es durante estos episodios de gran energía repetitivos y duraderos (con una altura de ola que supera ampliamente los 3,5 m) cuando se forman estos abanicos que implican una migración tierra adentro de la restinga que aquí, es muy estrecha.

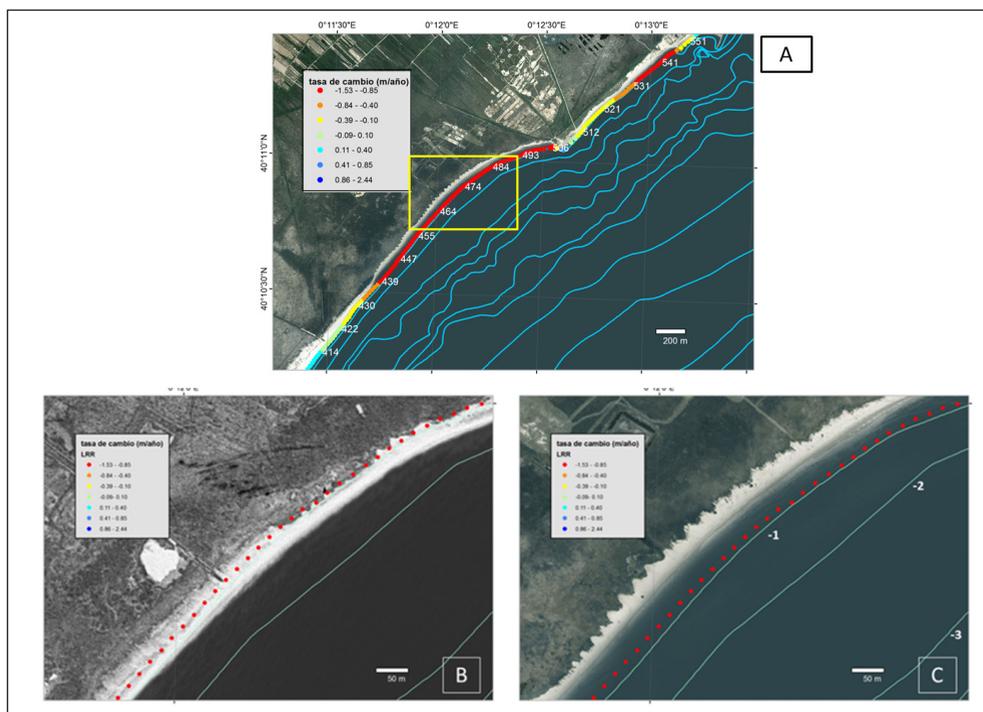


Figura 13. En **A** se muestra la tasa de cambio y batimetrías de 2009 en la zona del Trenc. El recuadro amarillo corresponde a la zona ampliada de las imágenes **B** (1956) y **C** (2017) (Fuente: servidor del ICV, http://www.icv.gva.es/auto/aplicaciones/icv_geocat/#/results). Sobre ambas imágenes se han dibujado las isobatas de -1 a -3 m y el símbolo con la tasa de cambio en cada perfil. Obsérvese que la isobata de -1 m en la ortofoto de 1956 aparece sobre la costa emergida evidenciando el fuerte retroceso sufrido en este segmento costero. En **C** se aprecian con nitidez los abanicos de derrame producidos por el último temporal de enero de 2017.

Más hacia el sur, la zona con tendencia acumulativa (figura 12) –de textura arenosa y con un incremento en la anchura de la restinga– corresponde al sector donde las isobatas -3 y -4 m se aproximan, justo entre dos protuberancias que describe la isobata de -4 m. El perfil 1 (donde mayor ha sido la erosión) entre los -2 y -3 m tiene menor pendiente que el resto y la isobata de -3 m está muy alejada de la costa (400 m). Por el contrario, en los perfiles 3, 4 y 5, la pendiente entre -2 y -4 m es más fuerte y, sobre todo la cota -4 m está mucho más cerca de la orilla (230 m). Las isobatas -3 y -4 m entre el perfil 2 y el 5, se aproximan indicando una pendiente muy fuerte (cercana a $1, 5^\circ$). Esta ruptura de pendiente podría corresponder a una alineación de fondos rocosos –probablemente las eolianitas que afloran en Torrenostrá, señaladas por Segura et al., 1993 y Sanjaume et al., 2019– que al ser resistentes actúan como una defensa natural de la costa, disipando la energía y aprovisionando de arena la playa. No hay que olvidar que este tramo también coincide con el cambio de textura de los sedimentos de la restinga, que pasa a ser de arenas y muy ancha (sobre todo a partir del perfil 3 de la figura 12) y también podría explicar la acumulación de arenas que encontramos en la playa del Quarter Vell. Más hacia el sur, las isobatas se separan de nuevo y la restinga vuelve a ser una cresta estrecha de cantos apilados.

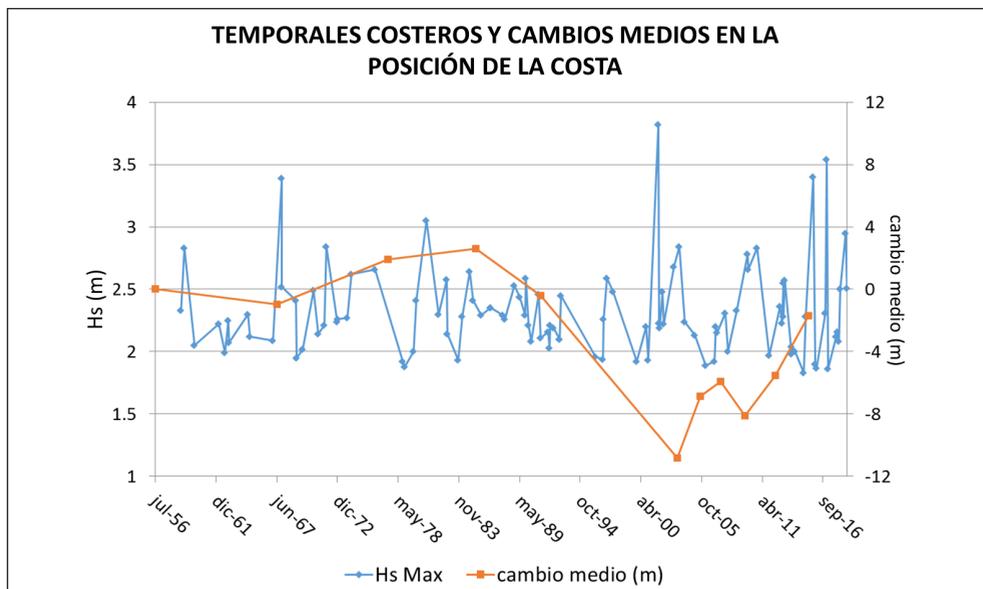


Figura 14. Situaciones en las que la altura significativa del oleaje ha superado 1,8 m y cambio medio de la línea de costa respecto a 1956. Los datos de oleaje están obtenidos del punto SI-MAR-2087122 de la base de datos de Puertos del Estado (<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>).

El efecto de los grandes temporales también se aprecia con nitidez en la evolución de toda la zona. Los resultados muestran que la posición de la costa de 2002, marca un punto de máximo retroceso en todos los sectores (figura 6), evidenciando el impacto de los mayores temporales registrados en la zona a finales de 2001 y principios de 2002 (figura 14). Incluso en el sector 3 que presenta una dinámica claramente acumulativa, el registro de 2002 marca una posición de retroceso claro. A partir de dicha fecha, en todos los lugares se aprecia una lenta pero nítida recuperación.

Otros estudios en la costa valenciana han advertido igualmente el efecto de los temporales de alta energía (Pardo-Pascual et al., 2014; Cabezas-Rabadán et al., 2019). Es interesante destacar, el desigual efecto que los temporales de 2001-2002 tuvieron en los cinco sectores (figura 6). En el sector 3, con un excedente sedimentario por el efecto de los espigones, su impacto fue mínimo y en el registro de 2005 la anchura de la playa ya era claramente mayor a la observada previamente al temporal. Sin embargo, no sucede lo mismo en los otros cuatro sectores (figura 6), y en aquellos con menor aprovisionamiento sedimentario (sectores 2 y 4), el impacto es todavía más exagerado, de manera que, en 2015, a pesar de la recuperación parcial, todavía no se había alcanzado la situación previa a los temporales. Otro aspecto interesante a resaltar es la coherencia entre la evolución observada y las señales morfológicas –escasa anchura de la restinga, existencia de turbas en el actual fondo sumergido de las playas– que evidencian que todo el sector ha sufrido una tendencia erosiva histórica (Sanjaume et al., 2019). La figura 6 muestra como entre 1956 y 1967 (el periodo con menor antropización directa) existen tendencias erosivas en los sectores 2, 3 y 5 pero son nítidamente acumulativas en los sectores 1 y 4. Estos cambios, en todo caso, son de escaso rango si se comparan los que se observan después. Más aún, viendo la respuesta del conjunto de los segmentos costeros tras los temporales –con la clara migración tierra adentro de la restinga que prueba el desarrollo de los abanicos de derrame– surge la duda de hasta qué punto el retroceso sería significativo sin grandes temporales. El comportamiento recesivo de la costa tras los temporales de 2001 y 2002 sugiere que será sobre todo durante estos grandes eventos energéticos cuando se producirán alteraciones sustanciales.

Por otra parte, es importante destacar los cambios acaecidos en la playa situada enfrente de Marina d'Or, en el sector 5. La tasa de cambio anual es muy baja, con valores prácticamente neutros y coeficientes de determinación mínimos. Sin embargo, en las fotografías aéreas (figura 15) se observa un cambio de textura importante: hasta 1997 se trataba de una playa labrada sobre niveles de arcillas compactas cuaternarias (abanico aluvial del Xinxilla), con numerosos afloramientos de eolianitas en la playa emergida y sumergida; con posterioridad a esta fecha, se observa una playa de arena, creada artificialmente. Aunque no tenemos datos exactos, Obiol (2003), a partir de la información proporcionada por la Generalitat Valenciana apuntaba pequeños vertidos de arena en Torreblanca (1.330 m^3) y en Orpesa (3.765 m^3) entre 1983 y 2002. La comparación fotográfica presentada en la figura 15 evidencia que

esta actividad antrópica ha contribuido, sin duda, a incrementar el aporte sedimentario y a cambiar el calibre de los materiales de las playas.



Figura 15. Evolución de la playa de Marina d'Or. Los vertidos de arena se han realizado para mejorar las condiciones de la playa para los usuarios de la macrourbanización. Los afloramientos rojizos de arcillas cuaternarias encostradas (1956) han servido para fijar la arena e incluso han formado pequeños tómbolos (2003).

Además, no hay que olvidar que los aportes sedimentarios del sector han procedido fundamentalmente de los barrancos y ramblas próximos (riu de les Coves, barranc de l'Estopet y el barranc de la Font del Campello-riu Xinxilla) o incluso del Ebro (Segura et al., 1993). Los cambios ambientales detectados en las ramblas cercanas muestran un déficit hidrosedimentario importante desde la segunda mitad del siglo XX (Segura-Beltran y Sanchis-Ibor, 2013) atribuido entre otros, a las oscilaciones climáticas, los cambios de usos del suelo y a las extracciones de áridos. Así, por ejemplo, en la rambla de Cervera –30 km al norte–, el déficit sedimentario se manifiesta de forma clara entre 1977-1991, periodo en el que se produce un fuerte estrechamiento y sobre todo, una fuerte incisión, coincidiendo con el periodo de mayores extracciones de áridos (entre 1980-1988). Estos cambios ambientales y antrópicos habrían provocado una disminución del aporte sedimentario fluvial al sistema costero, lo que encajaría con los resultados obtenidos en este trabajo: la línea de costa se mantuvo bastante estable hasta los años 90 (figura 6), tuvo un retroceso claro, entre 1991 y 2002 y una ligera recuperación posterior, aunque sin llegar a los valores iniciales. Esta secuencia temporal también ha sido observada en Italia, donde Alberico et al. (2018) detectan un retroceso genera-

lizado del delta del Volturno, con escasa erosión entre 1957 y 1962 y valores muy elevados entre 1962-1992, coincidiendo con la construcción de un embalse y una fuerte extracción de áridos. A partir de esta fecha y hasta 2012 observan una ralentización de los procesos erosivos e incluso una cierta tendencia deposicional en determinadas células costeras.

5.2. *Sobre cuestiones metodológicas*

Los resultados mostrados permiten detectar las tendencias dominantes a medio plazo dentro de la zona de estudio, diferenciar espacialmente la desigual respuesta observada y, establecer las causas principales de los cambios. La obtención de estos resultados ha sido posible al utilizar una serie temporal muy larga –sesenta años– durante la cual se advierten cambios realmente significativos. Probablemente la principal ventaja de utilizar fotografías aéreas es justamente esa capacidad de contemplar los cambios sobre períodos de tiempo largos. Dicha perspectiva permite, por ejemplo, reconocer cómo en alguno de los sectores analizados se percibía un retroceso de la costa incluso cuando no había una presión antrópica demasiado elevada. Esta capacidad de analizar series largas hace que el empleo de las series fotográficas siga teniendo plena vigencia actualmente, a pesar de algunas limitaciones que también resultan obvias.

En la bibliografía internacional (Ruggiero et al., 2005; Boak y Turner, 2005; Moore et al., 2006) se ha enfatizado sobre la falta de precisión que supone el empleo de la fotografía aérea para detectar los cambios en la morfología y la posición de la playa. Esta crítica se fundamenta en que la posición de la orilla es muy dependiente del nivel del mar instantáneo en el momento del registro de la foto. En entornos meso o macro mareales es un hándicap importante, pero en entornos micromareales como el mediterráneo, su impacto es mucho menor ya que las magnitudes de los cambios detectados superan, con mucho, las variaciones que provocan en estas costas con muy bajo rango mareal, las oscilaciones del nivel del mar. Desde nuestra perspectiva resulta mucho más limitativo disponer de pocos registros de la posición de la costa. El hecho de disponer de solo doce posiciones de la línea de costa no permite detectar todos los cambios que de verdad se producen en escalas cortas de tiempo. El registro de cambios resulta excesivamente simplificado respecto a la variabilidad morfológica real que se produce en estos ambientes. Así, por ejemplo, en marzo de 2015, en la desembocadura del riu de les Coves se formó un pequeño delta, que en junio ya había desaparecido. La secuencia evolutiva se pudo seguir a partir de las imágenes de satélite (Segura-Beltran y Pardo-Pascual, 2019), de elevada resolución temporal (Sentinel 2 y Landsat 8). Las mejoras en la precisión han permitido documentar el desarrollo y la evolución de este pequeño delta. Por tanto, en entornos como las costas mediterráneas valencianas, el hecho de utilizar como indicador de la costa la posición instantánea de la línea de costa no viene dada tanto por usar la línea agua-no agua, que quizá resultaría inexpresivo en entornos con mayor rango de marea, sino por usar un escaso número de líneas que, si bien permite detectar las grandes

tendencias evolutivas, deja fuera las variaciones significativas, pero de corta duración que ocurren en estas playas.

6. CONCLUSIONES

Los resultados presentados prueban que el análisis de líneas de costa extraídas de series fotográficas que cubren períodos de tiempo largos –seis décadas en este caso- en playas micromareales, son útiles para reconocer las principales tendencias evolutivas a largo plazo, aunque no pueden detectar los cambios intraanuales.

El análisis de doce líneas de costa ha corroborado que el segmento costero entre Alcosobre – Orpesa presenta una tendencia recesiva a mesoescala. Los yacimientos de la edad del Bronce y de época romana sumergidos, así como la aparición de turba dentro del mar, confirman esta tendencia en época histórica, asociada a cambios del nivel de mar. Sin embargo, el retroceso producido a lo largo del siglo XX, cabe atribuirlo al déficit hidrosedimentario detectado en las cuencas fluviales de la zona y que se relaciona con oscilaciones climáticas, cambios de usos del suelo y extracción de áridos.

Los cambios más significativos del periodo de estudio dependen tanto de factores naturales como artificiales. Entre los primeros cabe destacar el avance de la costa provocado por el promontorio del cap d'Orpesa y el aporte puntual de sedimentos tras una fuerte avenida fluvial del riu de les Coves, que hizo avanzar la costa de forma efímera. Entre los artificiales, hay que señalar el impacto de los espigones de Torrenostra y la escollera de la desembocadura de la séquia del Trenc que han provocado una cierta acumulación deriva arriba, un importante retroceso deriva abajo y una migración tierra adentro de la restinga de l'albufera de Torreblanca. A todo hay que sumar el impacto de los aportes artificiales de arena, que han hecho crecer las playas de Torrenostra y Orpesa.

En cuanto a la dinámica que gobierna estos cambios, cabe destacar la especial importancia que los grandes temporales –altura de ola significativa superior a 3,5 m y persistencia de varios días- tienen en la evolución de la costa. Su impacto rápido y contundente, dificulta el proceso de recuperación que es lento y condicionado por el balance sedimentario de cada playa. Con abundancia de sedimentos, la recuperación es bastante rápida, pero cuando escasean es sumamente lenta. El déficit sedimentario estructural dificulta la recuperación de la zona, que no llega a ser completa, lo que explica las tendencias recesivas. Además, durante esos grandes temporales se produce la migración tierra adentro de la restinga, con el consiguiente apilamiento de los cantos en la cresta y la formación de abanicos de derrame.

Otra cuestión importante es el papel que juega la morfología de los fondos antelitorales–isobatas de -1 a -5 m— que pueden frenar o incrementar la erosión. Así, los sectores con baja pendiente no disipan la energía de los grandes temporales, que destruyen afloramientos de playas fósiles de cantos, acumulándolos en la restinga y haciéndola retroceder (sectores septentrional y meridional de la restinga). Por el contrario, el sector con una fuerte pendiente

(posible alineación de dunas fósiles), corresponde a un escalón que disipa la energía. Probablemente la erosión de esta alineación de dunas aporta sedimento y justifica la existencia de una playa de arena bastante estable (sector central de la restinga, el Quarter Vell) entre dos tramos de restinga de cantos. Así pues, el estudio muestra un tramo de costa con un retroceso generalizado y sostenido en el tiempo, pero con una gran variabilidad espaciotemporal justificada por los factores locales que concurren en cada sector.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte de los proyectos de investigación CGL2013-44917-R, RESETOCOAST (CGL2015-69906-R) y EPHIMED (CGL2017-86839-C3-1-R) del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y están cofinanciados con fondos FEDER. Los autores agradecen las sugerencias de dos revisores anónimos que han mejorado notablemente el presente trabajo.

7. REFERENCIAS

- Alberico, I., Cavuoto, G., Di Fiore, V., Punzo, M., Tarallo, D., Pelosi, N., Ferraro, L. y Marsella, E. (2018): Historical maps and satellite images as tools for shoreline variations and territorial changes assessment: The case study of Volturno coastal plain (southern Italy). *Journal of Coastal Conservation*, 22(5), 919-937.
- Almonacid-Caballer, J. (2014): Extraction of Shorelines with Sub-Pixel Precision from Landsat Images (TM, ETM+, OLI) [Obtención de Líneas de Costa con Precisión Sub-Pixel a Partir de Imágenes Landsat (TM, ETM+ y OLI)]. Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain.
- Almonacid-Caballer, J., Sánchez-García, E., Pardo-Pascual, J. E., Balaguer-Beser, A. A. y Palomar-Vázquez, J. (2016): Evaluation of annual mean shoreline position deduced from landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*, 372, 79-88.
- Archetti, R., Schiaffi, C.F., Ferrari, M., Brignone y M., Rihouey, D. (2008): Video systems for coastal monitoring. Pranzini, E., Wetzel, L. (eds.). *Beach Eros* (pp. 101-109). Monit. Beachmed-e/OpTIMAL Proj.
- Boak, E. H., y Turner, I. L. (2005): Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688-703.
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J.E., Palomar-Vázquez, J.M, Almonacid-Caballer, J. y Fernández-Sarría, A. (Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J.E., Palomar-Vázquez, J., Almonacid-Caballer, J., Fernández-Sarría, A. (2019). Monitorización de la respuesta de playas Mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat. *GeoFocus*, n° 23. doi: 10.21138/GF.640.): Monitorizando la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat, *Geofocus*.

- Carmona, P., Pérez, J. M. R., y Solaz, M. I. (2014): Erosión costera y cambio ambiental en el humedal de Cabanes-Torreblanca (Castelló). Datos para una gestión sostenible. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 66, 161-180.
- Cenci, L., Disperati, L., Sousa, L. P., Phillips, M., y Alve, F. L. (2013): Geomatics for integrated coastal zone management: Multitemporal shoreline analysis and future regional perspective for the portuguese central region. *Journal of Coastal Research*, 65(sp2), 1349-1354.
- Davidson, M., Van Koningsveld, M., de Kruif, A., Rawson, J., Holman, R., Lamberti, A., Medina, R., Kroon, A. y Aarninkhof, S. (2007): The CoastView project: Developing video-derived Coastal State Indicators in support of coastal zone management. *Coastal Engineering*, 54, 463-475
- Del Río, L. y Gracia, F.J. (2008): Fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa, en *Actas de las Jornadas Técnicas "Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: análisis de la evolución de playas y dunas"*, 12.
- Fernández, A. (1988): El poblado ibérico de la Torre de la Sal (Ribera de Cabanes, Castellón): campaña de excavaciones 1985-1988. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología Castellonense*, 13, 227-274.
- Flors, E. (ed.) (2009): Torre la Sal (Ribera de Cabanes, Castellón). *Evolución del paisaje antrópico desde la prehistoria hasta el medioevo. Monografies de Prehistòria i Arqueologia Castellonenques*, 8, 606.
- Gares, P.; Wang, Y. y White, S.A. (2006): Using LIDAR to monitor a beach nourishment project at Wrightsville Beach, North Carolina, USA. *Journal of Coastal. Research*, 22(5), 1206-1219, doi: 10.2112/06A-0003.1
- Guillem, P. M., Martínez, R., Pérez, G., Pérez, R., y Fernández, J. (2005). El Prat de Cabanes (Cabanes, Castelló). Un jaciment prehistòric del III mil·lenni (aC). En J. Mateu i E. Sanjhaume (eds.): *Geomorfologia litoral i Quaternari. Homenatge al professor M. Rosselló i Verger* (pp.195-202), València, Universitat de València.
- Hobbs, P., Gibson, A., Jones, L., Poulton, C., Jenkins, G., Pearson, S. y Freeborough, K. (2010): Monitoring coastal change using terrestrial LiDAR (2010). In: C. Fleming, S. Marsh y J. M. Giles (eds.): *Elevation models for geoscience*, Geological Society of London, 345 (pp. 117-127), London. doi: <https://doi.org/10.1144/SP345.12>
- Islam, M. A., Hossain, M. S., Hasan, T., y Murshed, S. (2014): Shoreline changes along the Kutubdia Island, south east Bangladesh using digital shoreline analysis system. *Bangladesh Journal of Scientific Research*, 27(1), 99-108.
- Jabaloy-Sánchez, A., Lobo, F. J., Azor, A., Bárcenas, P., Fernández-Salas, L. M., del Río, V. D., y Pérez-Peña, J. V. (2010): Human-driven coastline changes in the Adra river deltaic system, southeast Spain. *Geomorphology*, 119(1-2), 9-22. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.004>.
- Kuleli, T., Guneroglu, A., Karsli, F., y Dihkan, M. (2011): Automatic detection of shoreline change on coastal ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Engineering*, 38(10), 1141-1149. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.05.006>.
- List, J.H. y Farris, A.S. (1999): Large-scale shoreline response to storms and fair weather, *Proceedings of Coastal Sediments '99*, Long Island, New York, pp. 1324-1337.

- Liu, Q., Trinder, J. C., y Turner, I. L. (2017): Automatic super-resolution shoreline change monitoring using Landsat archival data: A case study at Narrabeen–Collaroy beach, Australia. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(1), 016036.
- Mateu, J.F., Sanchis, C. y Ferri, M. (1999): El golf de València durant els segles XVI i XVII. In: Geoaqueologia i Quaternari litoral. Memorial María Pilar Fumanal (pp. 367-374), València, Universitat de València.
- Mateu, J. F. (1977): El factor antrópico en la transformación del prat d' Albalat. En: *Medio Físico, Desarrollo Regional y Geografía: V Coloquio de Geografía* (pp. 193-200), Granada, Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Granada.
- Mendoza, E. T., y Jimenez, J. A. (2008): Coastal storm classification on the Catalan littoral (NW Mediterranean). *Ingeniería Hidráulica en México*, 23(2), 21-32.
- Moore, L. J., Ruggiero, P., y List, J. H. (2006): Comparing mean high water and high water line shorelines: Should proxy-datum offsets be incorporated into shoreline change analysis? *Journal of Coastal Research*, 22(4), 894-905.
- MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, España) (1979): *Estudio de la dinámica litoral en la costa peninsular mediterránea y onubense. Provincias de Valencia, Castellón y Tarragona*, Laboratorio de Puertos Ramón Iribarren, Dirección General de Puertos y Costas, Subdirección General de Ordenación y Programación.
- Moussaid, J., Fora, A. A., Zourarah, B., Maanan, M., y Maanan, M. (2015): Using automatic computation to analyze the rate of shoreline change on the Kenitra coast, Morocco. *Ocean Engineering*, 102, 71-77.
- Obiol, E. (1989): Torrenostra: de caserío de pescadores a núcleo turístico, *Actas del XI Congreso Nacional de Geografía*, vol. 3 (332-343), Madrid, AGE y Universidad Complutense de Madrid.
- Obiol, E. (2003): La regeneración de playas como factor clave del avance del turismo valenciano. *Cuadernos de Geografía*, 73, 121-146.
- Ojeda Zújar, J. (2000): Métodos para el cálculo de la erosión costera. revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30, 103-118.
- Pardo-Pascual, J.E. (1991): *La erosión antrópica en el litoral valenciano*. València: Generalitat Valenciana. Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports.
- Pardo-Pascual, J.E., y Sanjaume, E. S. (2001): Análisis multiescalar de la evolución costera. *Cuadernos de Geografía*, 69, 95-125.
- Pardo-Pascual, J.E.; García-Asenjo, L.; Palomar-Vázquez, J. y Garrigues-Talens, P. (2005): New methods and tools to analyze beach-dune system evolution using a Real-Time Kinematic Global Positioning System and Geographic Information Systems. *Journal of Coastal Research, Spec. Issue 49*, 34–39.
- Pardo-Pascual, J. E., y Sanjaume, E. (2019): J. A. Morales (ed.) Beaches in Valencian coast. *The Spanish coastal systems* (pp. 209-236), Cham, Switzerland, Springer.
- Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., y Palomar-Vázquez, J. (2012): Automatic extraction of shorelines from landsat TM and ETM multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123, 1-11.

- Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., Palomar-Vázquez, J., y Rodrigo-Alemany, R. (2014): Evaluation of storm impact on sandy beaches of the gulf of Valencia using Landsat imagery series. *Geomorphology*, 214, 388-401.
- Pardo-Pascual, J., Sánchez-García, E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J., Priego de los Santos, Enrique, Fernández-Sarría, A., y Balaguer-Beser, Á. (2018): Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 326.
- Psuty, N.P. y Silvera, T.M. (2011): Tracking coastal geomorphological change: an application of protocols to collect geotemporal data sets at the national level in the US. *Journal of Coastal Research*, 64, 1253–1257.
- Rosselló, V. M. (1969): *El litoral valencià*. 2 toms. Valencia. L'Estel. Serie Taronja.
- Rosselló, V. M. (1993): Albuferas mediterráneas. *Cuadernos de Geografía*, 53, 35-64.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G. M., Gelfenbaum, G., y Voigt, B. (2005): Seasonal to interannual morphodynamics along a high-energy dissipative littoral cell. *Journal of Coastal Research*, 21 (3), 553-578.
- Sánchez-García, E., Balaguer-Beser, A., y Pardo-Pascual, J. E. (2017): C-Pro: A coastal projector monitoring system using terrestrial photogrammetry with a geometric horizon constraint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 255-273.
- Sánchez-García, E., Balaguer-Beser, A., Taborda, R. y Pardo-Pascual, J.E. (2016): Modelling landscape morphodynamics by terrestrial photogrammetry: an application to beach and fluvial systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XLI-B8: 1175–1182, <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-1175-2016>.
- Sánchez-García, E., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J.E., Almonacid- Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C. y Gómez-Pujol, L. (under review in *Coastal Engineering*). An efficient protocol for accurate and massive shoreline definition from mid-resolution satellite imagery.
- Sanchis, C. S. (2001): *Regadiu i canvi ambiental a l'albufera de valència*. València, Universitat de València.
- Sanjaume, E.; Segura, F. S. y Pardo-Pascual, J.E. (1990): Procesos y formas en una restinga en retroceso: El caso de la albufera de Torreblanca. *Actas I Reunión Nacional de Geomorfología: 17-20, SEG, Teruel*, 375-384.
- Sanjaume, E., Rosselló, V.M., Pardo-Pascual, J.E., Carmona, P., Segura, F. y López-García, M.J. (1996): Recent coastal changes in the Gulf of Valencia (Spain), *Zeitschrift für Geomorphologie*, 102, 95-118.
- Sanjaume, E. y Pardo-Pascual, J. E. (2005): Erosion by human impact on the Valencian coastline (E of Spain). *Journal of Coastal Research*, 49, 76-82.
- Sanjaume, E. y Pardo-Pascual, J.E. (2008): Cambios de tendencias recientes en la evolución costera del golfo de Valencia: Análisis espacialis y sedimentológicos. *Actas de las Jornadas Técnicas "Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: análisis de la evolución de playas y dunas*, 5-11.
- Sanjaume, E., Pardo-Pascual, J. E., y Segura-Beltran, F. (2019): Mediterranean coastal lagoons. In J. A. Morales: *The Spanish coastal systems* (pp. 237-267). Cham, Switzerland, Springer.

- Segura, F. S., Pardo-Pascual, J.E, y Sanjaume, E. S. (1993):.Aportaciones sobre el Cuaternario de la albufera de Torreblanca. *El Cuaternario en España y Portugal (227-234)*, Madrid, Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Segura, F, Pardo Pascual, J. E., y Sanjaume Saumell, E. (1997): Evolución cuaternaria de la albufera de Torreblanca. *Cuaternario y Geomorfología*, 11(1-2), 3-18.
- Segura, F, Sanjaume, E., Pardo-Pascual, J.E, y Riquelme, J. (2005): Canvis del nivell del mar en l'evolució del prat de Cabanes. En J. Mateu i E. Sanjaume (eds.): *Geomorfologia Litoral i Quaternari. Homenatge a V.M^a. Rosselló i Verger* (pp. 455-469). València, Universitat de València.
- Segura-Beltran, F y Sanchis-Ibor, C. (2013): Assessment of channel changes in a mediterranean ephemeral stream since the early twentieth century. the rambla de Cervera, eastern Spain. *Geomorphology*, 201, 199-214.
- Segura-Beltran, F y Pardo-Pascual, J. E. (2019): Fan deltas and floodplains in valencian coastal plains. In J. A. Morales: *The Spanish coastal systems* (pp. 489-516). Cham, Switzerland, Springer.
- Shrestha, R. L., Carter, W. E., Sartori, M., Luzum, B. J., y Slatton, K. C. (2005): Airborne laser swath mapping: Quantifying changes in sandy beaches over time scales of weeks to years. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(4), 222-232.
- Smeeckaert, J., Mallet, C., David, N., Chehata, N., y Ferraz, A. (2013): Large-scale classification of water areas using airborne topographic lidar data. *Remote sensing of environment*, 138, 134-148.
- Smith, G. L., y Zarillo, G. A. (1990): Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photographic and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research*, 6(1), 111-120.
- Stafford, D. B. (1971): *An aerial photographic technique for beach erosion surveys in North Carolina*, US Army Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum 36, 115 p.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L. y Ergul, A. (2009): *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0-an ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Cómo citar este artículo:

Pardo-Pascual, J.E., Roca Moya, R. y Segura-Beltran, F. (2019). Análisis de la evolución de la línea de costa entre Alcossebre y Orpesa a partir de fotografía aérea (1956-2015). *Cuadernos de Geografía*, 102, 39-72.

<https://doi.org/10.7203/CGUV.102.14511>



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

