

Anàlisi diacrònica (1956-2010) de la fletxa litoral de El Rompido (Huelva) a través de SIG: afecció antròpica en la seva evolució morfosedimentària

Cristian MESTRE-RUNGE, Javier PIERAS-SAGARDOY i Rafel ROSSELLÓ-MELIS

SHNB



SOCIETAT
D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES
BALEARS

Mestre-Runge, C., Javier Pieras-Sagardoy i Rosselló-Melis R. 2016. Anàlisi diacrònica (1956-2010) de la fletxa litoral de El Rompido (Huelva) a través de SIG: afecció antròpica en la seva evolució morfosedimentària. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 59: 129-145. ISSN 0212-260X. Palma de Mallorca.

La fletxa de El Rompido és una formació litoral situada a la costa de Huelva (Espanya), caracteritzada pel seu dinamisme sedimentari, condicionat per una sèrie de factors dinàmics. En el present article s'analitza l'evolució morfològica per al període 1956-2010 així com les actuacions antròpiques que incideixen en ella. Per tal de dur a terme aquesta anàlisi s'han cartografiat les superfícies de la fletxa dels anys 1956, 1977, 1984, 1998, 2001, 2004, 2007 i 2010. Fins el 1977 el ritme de creixement anual era de 40,4 m/any. A partir d'aquest i fins el 1998 el ritme disminueix a 23,7 m/any. Finalment per al període 1998-2008 el ritme és de 11,25 m/any. La utilització de diferents fonts d'informació i el seu tractament a un SIG ha facilitat el seu anàlisi integrat i la quantificació dels canvis en termes de superfície.

Paraules claus: Fletxa litoral, evolució dinàmica, SIG, actuacions antròpiques.

DIACHRONIC ANALYSIS (1956-2010) OF EL ROMPIDO SPIT (HUELVA) THROUGH A GIS. ANTHROPIC CONSEQUENCES IN ITS MORPHOSEDIMENTARY EVOLUTION. El Rompido spit is a sandy littoral body located on the coast of Huelva (southeast of Spain), characterized by its sedimentary dynamism and conditioned by diverse dynamic factors. In this paper the morphological evolution is analysed from 1956 to 2010, as well as the influence of the anthropic infrastructure existing near the spit. In order to carry the analysis out it has been mapped the spit surface of the following years: 1956, 1977, 1984, 1998, 2001, 2004, 2007 and 2010. Until 1977 the growth rate is 40,4 m/year. From this year to 1998 the growth rate was reduced to 23,7 m/year. Finally from 1998 to 2010 the rate decreased to 11,25 m/year. Different sort of data have been integrated in a GIS to facilitate the evolution of superficial changes.

Keywords: Littoral spit, dynamic evolution, GIS, anthropic infrastructures.

Cristian. MESTRE-RUNGE, e-mail, christian8945@hotmail.com Javier. PIERAS-SAGARDOY, e-mail, javier_pieras@hotmail.com i Rafel. ROSSELLÓ-MELIS, e-mail, rafel_rm@hotmail.com Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Carretera Valldemossa, km 7,5. 07122 Palma.

Autor de correspondència, rafel_rm@hotmail.com

Recepció del manuscrit: 7-nov-16; revisió acceptada:30-des-16.

Introducció

Les platges constitueixen el medi sedimentari costaner més dinàmic (Benavente *et al.*, 2015). En aquests ambients es desenvolupen estructures morfosedimentàries en forma de fletxa, caracteritzades per ser una platja unida a terra per un punt que creix aproximadament en la direcció de la costa abans de l'entrant, tendint a tancar-lo i, regularitzar el traçat costaner.

Els sistemes de fletxes litorals desenvolupats en el Sud peninsular, corresponen en general, al model de barreres progradants caracteritzats per l'existència de múltiples cordons de platges i crestes foredune (Clifton i Hunter, 1982). La seva generació està marcada per l'existència d'una corrent de deriva (Rodríguez *et al.*, 2000), degut a l'onatge i del vent, a més de les aportacions sedimentàries al·luvials i les marees, tot i que la importància relativa és diferent per a cada variable. Nogensmenys, existeixen altres variables que influeixen en l'estat morfodinàmic d'una platja i que no estan controlades exclusivament per la hidrodinàmica generada per les ones i marees. Aquestes estan relacionades amb les característiques locals i regionals on s'ha format i desenvolupat (Benavente *et al.*, 2015), pel que es podria considerar com a condicions o característiques estructurals.

Entre dites característiques destaca la proximitat a las àrees fonts de sediment, la disponibilitat del mateix (Benavente *et al.*, 2015). D'altra banda, l'actuació antròpica manifestada en presses, ports, dics..., es considera també una variable estructural que condiciona el desenvolupament de la formació, accelerant les tendències naturals.

El fet que les partícules sedimentàries dels sistemes arenosos presentin una no cohesió esdevé un factor important per la

variabilitat continua de la geometria d'aquests sistemes. Aquesta variabilitat es tradueix bé en retrogradació o bé en progradació, que en el present estudi s'analitza a partir d'un SIG. En base a García i Cáceres (2012) que apliquen l'eina Digital Shoreline System (DSAS), s'han establert els períodes d'estudi per tal de poder comparar els resultats de l'anàlisi diacrònic.

A través de l'estudi de Borrego *et al.* (1992), que estableix la relació entre actuacions antròpiques i el règim sedimentari costaner, s'aporten dades quantitatives que analitzen la relació. Ojeda i Vallejo (1995) realitzen un anàlisi morfomètric i estableixen dos models d'evolució marcant l'any 1980 com a data clau en el canvi de model. Utilitzen diferents fonts d'informació tractades amb els instruments SIG.

La fletxa de El Rompido

La fletxa litoral de El Rompido es situa al SW de la península Ibèrica a la costa central del Golf de Cadis, concretament a la desembocadura del riu Piedras (Lepe, Huelva) (Fig. 1). Aquest tram litoral subjeu en la influència i particularitat del context macroestructural, entre la placa africana i europea sotmeses a un permanent i inconclús procés d'aproximació (Aubounin *et al.*, 1980), que es manifesta en una activitat sísmica actual especialment important (Udias *et al.*, 1976).

Com a conseqüència d'aquesta compressió i posterior distensió tectònica – a començaments del Quaternari (Ojeda, 1988) – se'n deriven dues macroestructures. Per una banda, es troben els grabens de la Serralada Bètica (SE) i l'Altiplà Ibèric (NW), mentre que la depressió bètica es situa entremig. Aquest fet geològic

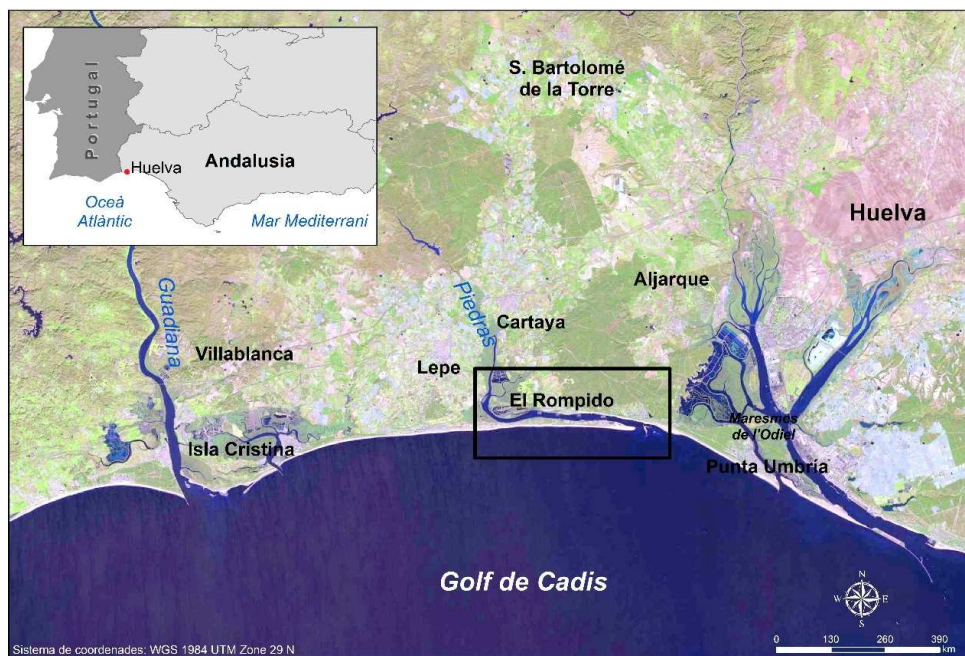


Fig. 1. Localització fletxa de El Rompido.

Fig. 1. Location of El Rompido spit.

determina la presència dels cursos fluvials, en el cas, la conca del Piedras.

En aquesta regió existeix una gran xarxa de fractures tan de component NS com d'EW, que deriven en una complexa tipologia litoral –maresmes, platges, penya-segats, fletxes litorals, etc.-, animada per una dinàmica litoral molt potent (Ojeda, 1988). Concretament, la zona del present estudi es troba situada entre les fractures NS corresponents als rius Tinto i Odiel i les fractures de component EW del sector Huelva-Algarve occidental.

Wright *et al.* (1979) apuntaren de la importància de subministrament sedimentari i dels condicionaments geològics en el comportament de les platges. La font de subministrament sedimentari de la part occidental del Golf de Cadis resideix en les aportacions del riu Guadiana, fet que pot

modificar la morfologia de la fletxa litoral en qüestió d'hores o dies. No obstant, els condicionaments geològics estableixen uns límits en les variacions morfològiques. A la zona de El Rompido les aportacions depenen també, a part de l'aportació al·luvial del Guadiana, d'altres factors tals com: erosió dels penya-segats circumdants i la presència d'arenas antelitorals (Bettencourt, 1985). Així mateix, l'extensió superficial, la seva disposició longitudinal i la complexa morfologia interna (canals, estuaris...) contribueixen, junt amb una major connexió amb les aigües marines a través de nombrosos canals dinamitzats per potents corrents de marea, a individualitzar un singular sector litoral d'un gran atractiu geomorfològic.

Així mateix, aquests factors han originat la formació singular de les illes-barrera. A

la proximitat de la desembocadura l'evolució d'aquestes illes barreres ha estat espectacular, fins arribar a tancar la major part dels canals de marea de les històriques barres. D'aquesta forma, s'han constituït les actuals maresmes, que les individualitzen, i conformà una continuada formació arenosa des de Isla Cristina fins a la fletxa de el Rompido, originalment una illa barrera més.

Factors dinàmics

Com indica Borrego *et al.* (1994), els processos hidrodinàmics tals com el règim mareal, onatge i aportacions fluvials són els que marquen les pautes de l'evolució sedimentària. A més, cal tenir en compte el factor eòlic i les aportacions sedimentàries provinents de la plataforma continental, que també condicionen al sistema.

Règim mareal

Pel que fa a l'amplitud de l'oscil·lació mareal i la seva repercussió en el perfil de la platja es distingeixen tres tipologies: micromareal amb una carrera de marea mitjana <1 m; mesomareal entre 1 i 3,5 m i macromareal per damunt 3,5 m (Hayes, 1979). L'àmbit d'estudi està sotmès a un règim de tipus mesomareal semidiürn amb una lleu desigualtat diària (Davies, 1964) i amb un interval mitjà de poc més de 2,075 m (mitjana anual establerta a partir de les dades extretes de <http://www.puertos.es/>). No obstant, en períodes de baixes pressions i temporals es poden produir sobreelevacions del nivell del mar superiors al nivell esmentat, arribant als 3,6 m durant les mareas vives (Borrego i Pendón, 1989). Tenint en compte que la macromareal es tradueix en un aplanament del perfil de la platja i que la micromareal –característic del mediterrani – es tradueix en una pendent del perfil més elevada (Benavente

et al., 2015) es conclou que la mesomareal presenta una pendent de perfil suavitzada.

Aquestes característiques atorguen un paper significatiu a la marea en els processos litorals a través de les corrents associades a aquesta, que s'intensifica a la línia de costa de El Rompido i a les maresmes del riu Piedras. Aquest moviment de marea és contrari a la propagació de la marea que puja en sentit SE-NW provinent de l'estret de Gibraltar (Pendón, 1999).

Règim d'onatge i el factor eòlic

La zona està exposada al pas de les coes de les borrasques atlàntiques, caracteritzada per la influència de vents del tercer quadrant (SW), que deriva en un onatge procedent del mateix component. D'aquesta forma, la zona es troba sotmesa a l'onatge de fons (swell) i disposa d'una gran superfície oceànica per produir l'onatge (fetch) a través d'aquestes baixes pressions. Molt associat a aquesta variable es troba la deriva litoral que, com a corrent induïda per l'onatge, la zona presenta una component energètica positiva cap el Llevant (Ojeda, 1988).

El vent de component W (mitjana establerta entre l'any 1958 i 2015, a partir de les dades extretes de <http://www.puertos.es/>) actua directe sobre la platja alta (backshore) de la fletxa, desglossat en NW i SW amb una velocitat mitjana de 5 ms⁻¹. La força eòlica fa que les partícules sòlides siguin fàcilment transportades degut a la seva pèrdua d'humitat. No obstant, la major part del transport sòlid de partícules fines es realitza per l'onatge (Pérez Mateos *et al.*, 1982) i per la deriva.

Vent i onatge dominants de component SW determinen una deriva litoral que discorre paral·lela en la línia de costa en sentit WE, arrossegant cap a la fletxa les

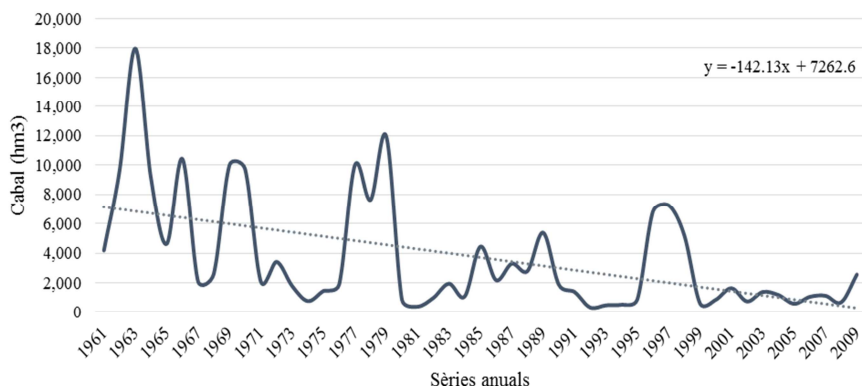


Fig. 2. Sèries anuals del cabal del riu Guadiana. Període entre 1961-2009. Font: Sistema Nacional de Infração de Recursos Hídricos de Portugal.

Fig. 2. Annuals series of the Guadiana flow rate. Period 1961-2009. Source: Sistema Nacional de Infração de Recursos Hídricos de Portugal.

aportacions al·luvials del riu Guadiana.

La zona queda relativament protegida de l'onatge, sobretot de component W degut a la morfologia litoral del sector més occidental – tram Cap St. Maria-Guadiana –. No obstant, queda desprotegit de l'onatge de component SW com a conseqüència d'un fetch atlàntic de gran recorregut oceànic, implicant que la deriva exerceixi sobre la mateixa línia de costa un grau d'obliquïtat de 45°, suposant una capacitat energètica i de transport màxima. Mentre que l'onatge de component SE és poc significatiu degut al seu escàs recorregut – proximitat a l'estret de Gibraltar-.

Aportacions fluvials

L'origen dels materials que conformen el litoral de Huelva és al·luvial, procedent del riu Guadiana (Da Silva i Fraïdias, 1997), volum de sediments del qual depèn directament del cabal que dugui el riu al llarg del seu recorregut i de la composició granulomètrica del sediment (Morales, 1995) citat a Da Silva i Fraïdias (1997). Segons la bibliografia consultada al

respecte, el volum de sediments fluvials aportats a la seva desembocadura varia. Morales (1995) l'estableix en 712.000 tn/any, mentre que el Servei d'Estudis d'Impacte Ambiental (SEIA, 1995) l'estableix en 636.042 tn/any (Da Silva i Fraïdias, 1997).

L'aportació fluvial mitjana és de 3709,28 hm³, per la sèrie d'anys compresa entre 1961-2009. Aquest valor és poc significatiu degut a la irregularitat en les aportacions, 330,67 hm³ (1992) com aportació mínima de la sèrie i, 17.983,23 hm³ (1961) com aportació màxima de la mateixa. Cal tenir en compte també, que la sèrie inclou anys als quals el cabal s'ha vist fortament disminuït per les preses construïdes i reforestacions (Confederación Hidrogràfica del Guadiana, 2015) que minimitzen processos erosius i acumulen més aigua precipitada. A més, es presenta un marcada estacionalitat en les aportacions líquides que es relacionen amb l'estacionalitat climàtica (Borrego *et al.*, 1994). Força d'aquests factors mostra una

tendència a la baixa d'aportacions al·luvials (Fig. 2).

Les característiques del sediment varien al llarg de la llera del Guadiana. A les zones altes, els valors de materials fins és molt elevat (84%), mentre a la desembocadura aquest representa un percentatge ínfim (8%). Pel que fa als materials arenosos evoluciona de manera inversa als fins, presentant valors baixos a les parts altes (16%) i elevats a la desembocadura (92%) (SEIA, 1995).

Per contra, el riu Piedras no aconsegueix canalitzar els sediments més gruixuts cap a la costa exposada, per presentar al seu tram final un escàs perfil longitudinal, prop del nucli urbà de Cartaya. Aquesta reduïda pendent origina que es formin petites illes de sediment degut a l'escassa velocitat de transport. Morales (com pers.) aquest afirma una quasi nul·la aportació sedimentària del Piedras al sistema costaner.

Aportació sedimentària oceànica

Respecte al paper que juga la plataforma continental, s'estén de forma suau fins els 100 metres de profunditat al llarg dels primers 60 km de costa. Cal destacar que representa una font de sediment, en el qual en aquest sector, segons dades del IGME hi ha present un substrat consolidat d'una xarxa de paleovalls actualment colmatats per sediments recents que en determinats sectors adquireixen espessors considerables (Ojeda, 1988).

Metodologia i materials

L'anàlisi morfodinàmic de la fletxa de El Rompido s'ha realitzat a través d'un SIG mitjançant el software ArcGis 10.1, i una

recerca qualitativa d'autors destacats esmentats a l'apartat introductor.

Pel que fa a l'anàlisi morfomètrica, s'han emprat ortofotografies dels anys 1956, 1977, 1984, 1998, 2001, 2004, 2007 i 2010 obtinguda de la *Red de Información Ambiental (REDIAM)* de la Junta de Andalusia. Degut a la manca de sèries temporals actualitzades, només s'han utilitzat les disponibles en línia, fins 2010.

A través de les ortofotografies s'ha procedit a la digitalització del perímetre de la formació de dita fletxa, que han permès dur a terme diversos anàlisis amb múltiples resultats (Figs. 3 i 4). S'han establert distints punts de control per estudiar la progració o la retrogració de la fletxa, localitzades a les següents coordenades UTM (Fig. 5):

-FA: X= -396081,96 Y= 4165715,11

-P: X= -393924,50 Y= 4165397,3

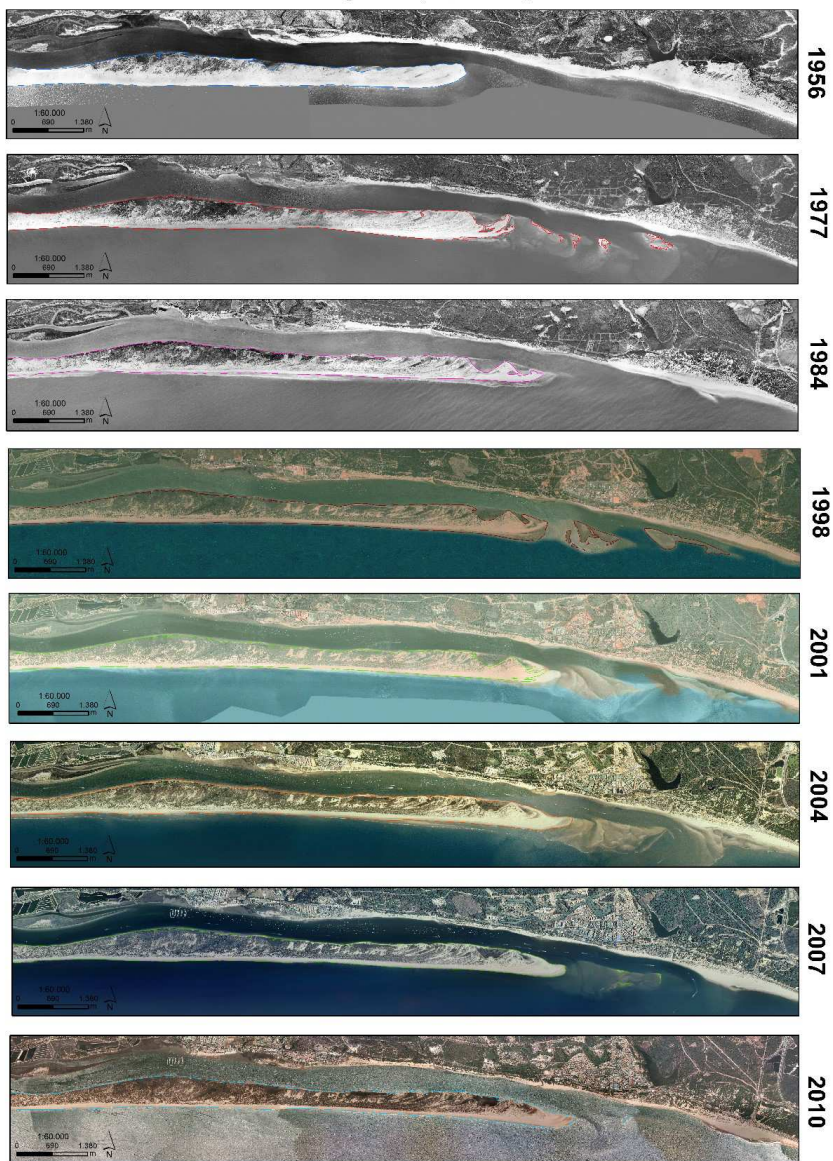
-C: X= -391736,28 Y= 4164999,9

L'evolució sedimentària de la fletxa s'ha calculat en funció del dinamisme d'un any respecte l'altre, és a dir, l'ortografia de 1977 respecte 1956 i successivament fins a finalitzar l'anàlisi diacrònica. D'aquesta manera s'ha calculat la progració o retrogració (m) i l'àrea (m²) de cada any digitalitzat (vegeu Fig. 6). S'han utilitzat aquests dos paràmetres per fer-les comparables amb altres estudis.

D'altra banda, per tal de corroborar l'efecte dels espigons sobre el règim sedimentari de la costa, s'han analitzat les direccions i altures significatives de l'onatge. Les dades s'han extret de la plana web puertos.es. Es tracta de 5 boies ubicades paral·lelament a la costa, d'O a E, s'enumeren:

- SIMAR 5026023
- SIMAR 5027023
- SIMAR 5028023
- SIMAR 5029023
- SIMAR 5030023

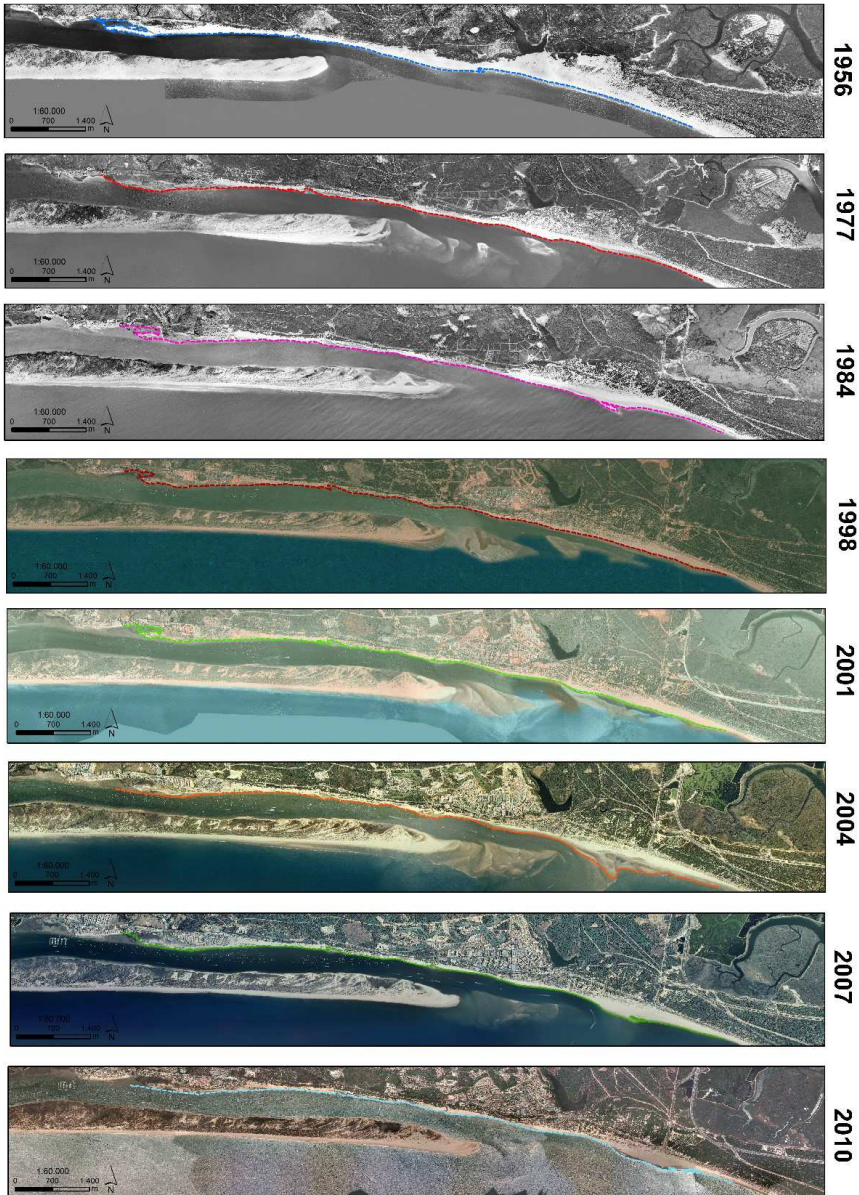
Evolució morfodinàmica de la fletxa litoral El Rompido (Huelva)



Sistema de coordenades geogràfiques: GCS_WGS_1984 Datum: D_WGS_1984

Fig. 3. Seqüències de l'evolució morfodinàmica de la fletxa de El Rompido.
Fig. 3. Morphodynamic evolution sequences of the El Rompido spit.

Evolució morfodinàmica del litoral del Portil *El Rompido (Huelva)*



Sistema de coordenades geogràfiques: GCS_WGS_1984 Datum: D_WGS_1984

Fig. 4. Seqüències de l'evolució morfodinàmica del litoral de El Portil.
Fig. 4. Morphodynamic evolution sequences of the El Portil coastline.



Fig. 5. Punts de control de l'anàlisi que permeten establir progració o retrogració de la fletxa.
Fig. 5. Monitoring points of the analysis which enable to establish progradation or retrogradation of the spit.

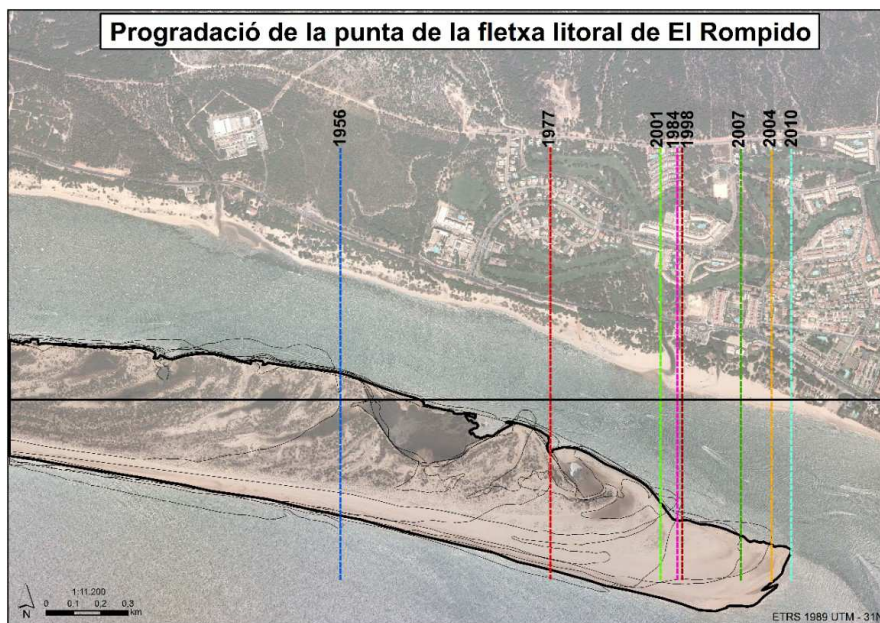


Fig. 6. Progració de la punta de la fletxa litoral de El Rompido.
Fig. 6. Peak's progradation of the El Rompido spit.

Els valors de les boies expressen la mitjana del període comprès entre l'any 1958 i 2010.

Degut a la importància que determinats autors donen a l'aportació sedimentària del Guadiana en el dinamisme de la fletxa, s'han tractat dades de cabals d'aquest riu,

Taula 1. Resultats en metres dels punts de control FA i P.

Table 1. Results of monitoring points FA and P in meters.

Anys	FA	P
1956	0	0
1977	166	769,42
1984	-119	464,79
1998	68	19,84
2001	-15	-82,55
2004	-0,3	409,41
2007	3	-113,02
2010	-7	185,75

extretes del servidor portuguès Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) amb l'objectiu de corroborar dita hipòtesi.

Resultats

A grans trets, segons els càlculs establerts, s'aprecia una evolució irregular de El Rompido. S'estableixen els següents resultats mesurats en metres, pels punts de control de la fletxa FA (façana atlàntica) i P (punta de la fletxa).

Analizant els resultats obtinguts (Taula 1) en general s'observa que la fletxa té una tendència progradant. No obstant, presenta anys de retrogradació. Pel que fa al punt de control FA, s'observa una retrogradació durant els anys 1984 respecte 1977 (-119 m); l'any 2001 respecte 1998 (-15 m); l'any 2004 respecte 2001 (-0,3 m) i l'any 2010 respecte 2007 (-7 m), mentre que durant els anys 1977 respecte 1956 (166 m); 1998 respecte 1984 (68 m) i l'any 2007 respecte 2004 (3 m) presenta una progradació. El punt de control P també presenta un desenvolupament irregular amb anys progradants i anys retrogradants. Quant els progradants són a l'any 1977 respecte 1956 (769,42 m); 1984 respecte 1977 (464,79

Taula 2. Resultats en metres del punt de control C.

Table 2. Results of monitoring point C in meters.

Anys	C
1956	0
1977	66
1984	104
1998	-113
2001	33
2004	18
2007	150
2010	-44

m); 1998 respecte 1984 (19,84 m); 2004 respecte 2001 (409,41 m) i l'any 2010 respecte 2007 (185,75 m). En canvi, la retrogradació succeeix entre l'any 2001 respecte 1998 (-82,55 m) i l'any 2007 respecte 2004 (-113,02 m)

Segons els càlculs establerts a la taula 2, la retrogradació de la costa continental s'esdevé durant els anys 1998 respecte 1984 (-113 m) i l'any 2010 respecte 2007 (-44 m). La resta d'anys presenten una progradació en major o menor mesura, destacant els anys 2007 respecte 2004, i 1984 respecte 1977 amb valors de 150 i 104 m respectivament.

Si es parla de creixement del punt de control P de la fletxa en m/any, cal destacar el període 2001-2004, on creix a un ritme de 136,5 m/any, seguit del període 1977-1984 amb 66,4 m/any i del 2007-2010 amb 61,9 m/any. En menor mesura creix durant els períodes 1956-1977 (36,6 m/any) i 1984-1998 (1,4 m/any). Per contra, durant els períodes 2007-2010 (-37,7 m/any) i 1998-2001 (-27,5 m/any) la fletxa decreix.

S'han establert tres períodes de creixement sobre el punt de control P. Durant el primer període establert entre 1956-1984 la fletxa creix 36,6 m/any, pel període 1977-1998 creix 23,07 m/any i pel període 1998-2007 augmenta 11,25 m/any.

Taula 3. Variació i àrea de la fletxa de El Rompido per anys analitzats.

Table 3. Variation and area of the El Rompido spit during analysed years.

Any	Àrea (m ²)	Variació %
1956	3.126.942	-
1977	3.546.614	13,4
1984	3.453.666	-2,6
1998	3.923.221	13,6
2001	3.569.792	-9
2004	4.099.597	14,8
2007	3.959.571	-3,4
2010	3.956.612	-0,1

Observant la taula 3, l'any que presenta una major àrea (m²) és el 2004, i menor àrea l'any 1956, amb una diferència d'ambdós de 972.655 m². Per tant, amb un període de 48 anys dita formació ha patit una augment del 31% en termes de superfície. No obstant, si analitzem l'evolució de l'àrea any per any s'aprecien variacions. Els percentatges de creixement més elevats són els períodes de 1977 respecte 1956 (13,4%); 1998 respecte 1984 (13,6%) i finalment 2004 respecte 2001 (14,8%). En canvi, els percentatges de retrocés de l'àrea són a l'any 2001 respecte 1998 (9%) i en menor mesura l'any 1984 respecte 1977 (2%) i 2007 respecte 2004 (3,4%). Tot i aquests valors percentuals cal tenir en compte que els períodes no són seqüencials, per tant, es fa difícil una comparació absoluta.

Discussió

Diversos estudis determinen la progradació de la fletxa de El Rompido. Borrego et al. (1992) analitzen l'evolució morfològica de la fletxa en dos períodes. Entre 1873 i 1956 estableixen una progradació de 30 m/any, mentre que en el període 1956-1973 creix 32 m/any, tot i no

Taula 4. Comparativa de l'evolució morfodinàmica, en tres períodes, presa del punt de control P entre l'anàlisi de García i Cáceres (2012) i el present estudi.

Table 4. Comparative of the morphodynamic evolution, in three periods, taken from the P check point between the Garcia & Cáceres (2012) and present analysis.

Taxa de canvi anual (m/any)		
Períodes	Anàlisi propi	García, D. i Cáceres, L.M. (2012)
1956 - 1977	36,6	40,4
1977 - 1998	23,07	27,3
1998 - 2008	11,25	26,6

ser constant any per any en ambdós casos analitzats. Així mateix, Ojeda, J i Vallejo, I (1995) confirmen l'anterior entre els anys 1943-1991 a través d'una anàlisi utilitzant diferents fonts de informació (cartografia, ortofotografia i imatges satèl·lit) a través d'un SIG.

D'altra banda, García i Cáceres (2012) analitzen a través Digital Shoreline Analysis System (DSAS) l'evolució per períodes intermedis (1956-1977, 1977-1998 i 1998-2008) destriant diferents sectors segons les taxes de canvi anual. Determinen que s'observa una clara tendència a un retrocés en el creixement de la fletxa. Els valors d'avanç en l'extrem de la fletxa han passat de 40,4 m/any en el període 1956-1977, a 27,3 m/any en el període 1977-1998 i 26,6 m/any en el període 1998-2008.

Com s'observa a la taula 4, els períodes de creixement presenten valors similars a García i Cáceres (2012), tot i que es produeix una variació més significativa durant el darrer període (1998-2008) de 15,25 m/any. No obstant, el període analitzat en el present article té en compte l'ortofotografia de l'any 2007 vers 2008. A més, s'actualitzà al període 2007-2010 establint un creixement de 61,9 m/any. Així com Ojeda i Vallejo (1995) estableixen que

Actuacions antròpiques per períodes			
Períodes	Creixement (m/any)	(A) Obres d'infraestructura costanera	(B) Regulació de les conques fluvials
1956 - 1977	1968		Presa riu Piedras
1977 - 1998	1979	Dic Port de Huelva	
	1981	Espigó J.Carlos I (Ria de Huelva)	
	1982	Espigó del Guadiana	
	1987	Espigó Pta. Umbría	
	1989-2003		Preses del sistema Chanza-Andévalo (Guadiana)
1998 - 2008	2002		Presa de Alqueva (Guadiana)

Taula 5. Actuacions antròpiques realitzades entre Isla Cristina (desembocadura del riu Guadiana) i l'espigó de Pta. Umbría (Huelva), i les preses del riu Piedras i Guadiana. Font: Borrego, J. Morales, J.A i Pendón, J.G (1992).

Table 5. Anthropic actions between Isla Cristina (Guadiana mouth) and Punta Umbría spigon (Huelva), Piedras and Guadiana water dams. Source: Borrego, J. Morales, J.A i Pendón, J.G (1992).

el ritme de creixement es redueix a 8 m/any a partir de la dècada dels 80, els resultats obtinguts també indiquen una reducció del ritme de creixement a 1,4 m/any entre el període 1984-1998. A més, aquest ritme s'agreuja al període 1998-2001, on es produeix una retrogradació de 27,5 m/any.

Davant aquesta evolució morfosedimentària de El Rompido, les intervencions antròpiques han intervingut en la formació i desenvolupament de la fletxa, de manera que han produït que la dinàmica costera sigui inestable. Seguint l'estudi realitzat per Borrego *et al.* (1992) s'identifiquen dues tipologies d'actuacions antròpiques que podrien esclarir les causes dels resultats obtinguts. A) Les obres de infraestructura costanera intervenen en els models de corrents i trànsit sedimentari costaner al interior i exterior de l'estuari (dics costaners, aqüicultura i piscifactoria i B) la regulació de les conques fluvials que afecten a la quantitat d'aportació sedimentària.

S'observa que a partir de la construcció de la presa del riu Piedras, es produeix el major creixement de dita formació. Es remarcable que durant aquest període de màxim creixement no hi hagi cap obra de

infraestructura costanera. D'aquesta manera es planteja la hipòtesi que les preses, sobretot ubicades en rius petits, no tenen una afecció a curt termini. No obstant, Borrego *et al.* (1992) defensen la hipòtesi que aquesta construcció potser sigui la responsable del important increment que es produeix en la velocitat de creixement de la fletxa, en el període 1973-1980. A l'afirmació d'aquests autors s'afegeix que la manca d'infraestructures costaneres, sobretot dics i espigons, podria explicar també els valors màxims de creixement. Les actuacions costaneres de 1979, 1981 i 1982 poden explicar la disminució en el ritme de creixement que es produeix entre l'any 1977 i 1984. A partir de les execucions en forma de preses al Guadiana, han originat que el ritme de creixement minvi, situant-se a un ritme de 11,25 m/any (Taula 5).

Cal tenir en compte les obres de dragats realitzats a l'estuari, que evidentment han tingut una afecció directa sobre el règim sedimentari de la zona d'estudi. Les conseqüències de totes aquestes actuacions tenen uns ritmes d'aparició diferents. Per tant, la magnitud d'aquest impacte ambiental roman encara desconegut. No obstant,



Fig. 7. Localització de les boies SIMAR. Intensitat i direcció de l'onatge. Font: Puertos.es.
Fig. 7. Location of the SIMAR buoys. Intensity and direction of the swell. Source: Puertos.es

s'ha produït una disminució de sediments entorn al 75,4%, comparació realitzada amb dades de 1956 i 1994 (SEIA, 1994).

Un factor que explica la disminució en el ritme de creixement de la fletxa és la construcció d'una sèrie d'espigons localitzats a la desembocadura del Guadiana. Aquests tenen com a conseqüència la modificació dels trens d'onatge que s'aproximen a la costa en refractar sobre el seu extrem rocós. D'aquesta manera, a Llevant del espigons, l'arribada de les ones comença a produir-se des del SE, invertint el sentit de transport d'arena al llarg de la costa per la deriva litoral (Morales, 2008).

A partir de l'anàlisi de les dades extretes de intensitat i direcció de l'onatge de les boies SIMAR, ubicades paral·lelament a la costa, i l'observació d'un lòbul frontal

submareal situat entre les desembocadures del Guadiana i de la ria Carreras (Isla Cristina), s'estableix la hipòtesi que l'espigó occidental de la desembocadura del Guadiana origina que l'onatge refracti. S'observa a la Fig. 7, un canvi de patró quant a la direcció de l'onatge d'W a E. En aquest sentit, la boia ubicada a l'extrem occident –desembocadura del Guadiana– presenta un onatge de component predominantment del SE, mentre les demés boies el presenten de SW.

Per tant, tenint en compte que les aportacions de materials marins transportats a través de la deriva litoral del Guadiana a la fletxa de El Rompido s'estableixen en 300.000 m³/any (data extreta de l'anàlisi preliminar de la vulnerabilitat de la costa Andalus a la possible pujada del nivell del mar associada al canvi climàtic -Conselleria

de Medi Ambient d'Andalusia, 2011-), es considera que aquest valor seria encara major si no s'hagués construït dit espigó, ja que el material sedimentari transportat pels trens d'ones que han refractat es dipositen en forma de lòbuls paral·leles a la línia de costa. Aquests lòbuls acabaran adossant-se a la platja per mitjà de l'onatge, que guanya la partida a les corrents mareals. Per corroborar el domini de l'onatge sobre la marea, ens remetem a l'anàlisi que duu a terme Morales (2013), on afirma que la posició actual dels baixos arenosos (La Gola) és controlada per l'onatge en haver-se canalitzat les marees artificialment mitjançant els espigons.

La desembocadures dels rius són de gran importància en l'equilibri de la costa per la gran quantitat de partícules sòlides que injecta al litoral (Almazán *et al.*, 2000). És important recordar que l'únic curs fluvial amb competència per transportar sediments arenosos cap a la costa exposada és el Guadiana.

Borrego *et al.* (1994) i Palazón i Navas (2015), manifesten una relació directa entre l'aportació sedimentaria i el cabal a diferents sistemes sedimentaris, afegint els darrers resultats quantitius de la correlació d'aquestes dues variables a través de l'anàlisi realitzada a la conca del riu Ebre. A més, per reafirmar la hipòtesi, Almazán *et al.* (2000) esmenten que les desembocadures dels rius són de gran importància en l'equilibri de la costa per la gran quantitat de partícules sòlides que injecta al litoral. Per demostrar que l'evolució morfosedimentaria de la fletxa de el Rompido es relaciona amb l'aportació al·luvial del Guadiana, aquest com l'únic curs fluvial amb competència per transportar sediments arenosos cap a el Rompido (Conselleria Medi Ambient d'Andalusia, 2011), s'han establert càlculs a partir de dades d'aportacions en hm³ del

cabal del Guadiana i dels metres de progradació o retrogradació obtinguts a través de l'eina SIG, establerts en el punt de control FA (Fig. 5). No obstant, no s'han utilitzat dades sedimentaries per la manca d'informació quantitativa.

Pel que fa a les dades d'aportacions del Guadiana, s'han calculat a partir de les dades de cabals anuals entre l'any 1961 i 2009 extretes a l'estació de Pulo do Lobo, situada en el Parc Natural de Do Vale do Guadiana, al curs baix del mateix. Cal afegir que les dades no coincideixen amb els períodes de les ortofotografies degut a la manca de les mateixes. Per calcular l'anomalia estadística de cada període es resta al cabal la mitjana de tot el període. Finalment, es sumen els valors d'anomalies per així extreure les anomalies acumulades, que es representa a través de la següent fórmula:

$$AE = Va - \bar{X}_T$$

A on:

AE = Anomalia estadística

Va = Valor anual (hm³)

\bar{X}_T = Mitjana de tots els anys

Per mitjà dels càlculs obtinguts d'ambdues variables s'observa a la Fig. 8 una correlació, tot i que a partir de l'any 1984 fins l'any 2001 disminueix el nivell de correlació. Aquest fet s'explica a partir de la retenció de sediment produïda per la refracció que generen els espigons sobre l'onatge. A partir d'aquí es dedueix la íntima relació entre el cabal i l'evolució de la fletxa, sobretot si atenem al període comprés entre 1961-1977, el qual presenta una perfecta correlació.

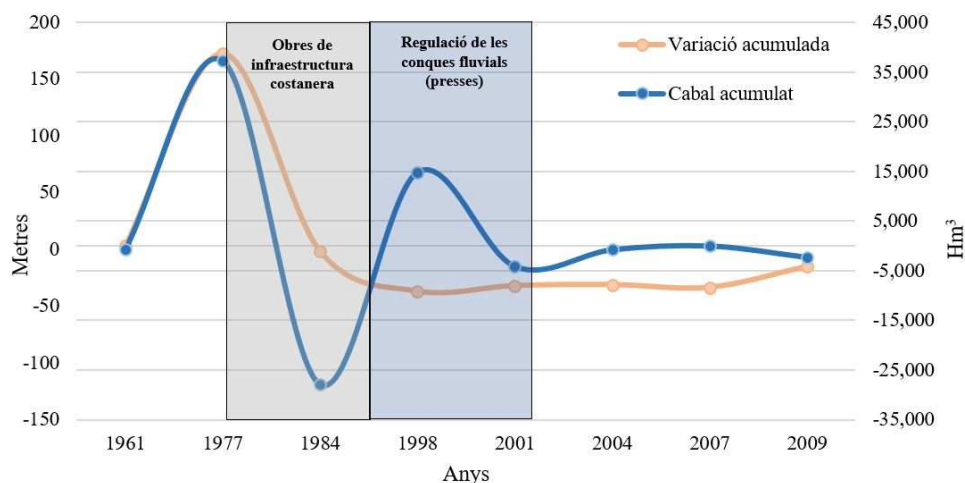


Fig. 8. Anàlisi de la correlació entre la variació acumulada en el creixement de la fletxa (Punt de control FA) i cabal acumulat del Guadiana establert a partir de dades extretes a l'estació de Pulo do Lobo amb codi 27L/01H (Portugal). El requadre representa les actuacions antròpiques que han distorsionat la correlació. Vegeu Fig. 11 corresponent a obres de infraestructura costanera i de la regulació de les conques fluvials. Font: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.

Fig. 8. Correlation analysis between accumulated variation of the spit's growth (FA monitoring point) and Guadiana's accumulated flow based on Pulo do Lobo's station data (code 27L/01H), in Portugal. The box represents anthropic actions which have disturbed this correlations. Check Fig. 11 regarding to coastline infrastructure and river basin regulation actions. Source: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.

Conclusions i consideracions finals

A la ubicació de la fletxa de El Rompido interaccionen règims mareal, eòlic, d'onatge i en particular les aportacions sedimentàries del Guadiana i que, a través de la deriva litoral amb direcció EW, han configurat la morfologia de la fletxa i les seves taxes de creixement longitudinal. Les anàlisis de progradació o retrogradació que s'han dut a terme confirmen els resultats d'altres autors, tot i haver utilitzat metodologies diferents. A través dels anàlisis realitzats se n'extreuen les següents conclusions:

-Entre el període 1956-1977 s'observa una perfecta correlació entre creixement morfosedimentari i el cabal aportat pel

Guadiana, degut a la manca d'infraestructura manifestada en dics, espigons, etc. al litoral circumdant.

-Els càlculs de cabals del Guadiana, els de retrogradació o progradació realitzats i l'anàlisi de les direccions i intensitat de l'onatge, reflecteixen una retenció de sediments important, fruit de la infraestructura antròpica construïda a partir de la dècada del 80.

-Com s'observa a la Fig. 2, el cabal del Guadiana té una tendència a la baixa, fet que conduirà a una disminució en l'aportació sedimentària que, juntament amb els espigons i dics, farà que a llarg termini la fletxa progradi menys o inclús retrogradi.

-Tot i la notable evolució dels SIG i la seva aplicació en la investigació aplicada, en aquest cas a una anàlisi de la dinàmica litoral, han sorgit una sèrie de dificultats metodològiques fruit implícit del rang mareal, que condiciona el resultat de la ortofotografia. Cal tenir en compte aquest fet de manera que s'han de considerar el resultats amb un nivell d'error.

Agraïments

Aquest document no hagués estat possible sense l'ajuda d'un gran nombre de persones, d'entre les quals es troben el Dr. Juan Antonio Morales i les seves didàctiques explicacions durant l'estada a la província de Huelva, els Dr. Miquel Mir Gual, Dr. Guillem X. Pons per la seva ajuda continuada, així com el Dr. Enrique Morán Tejeda i el Dr. Jorge Lorenzo Lacruz per la seva ajuda en la fase de tractaments de dades.

Referències bibliogràfiques

- Almazán, J. L., Palomino, C., & García, J. R. 2000. *Introducción a la dinámica de las formas costeras*. ETS. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
- Aubouin, J., Debemas, J, Latreille, M. 1980. *Geologie des chaines alpines issues de la Tethis*. Memoire du B.R.G.M. núm 115, pp. 356
- Benavente, J., Gracia, F. J., Del Río, L., Anuso, G., i Rodríguez-Ramírez, A. 2015. Caracterización morfodinámica de las playas españolas del Golfo de Cádiz. *Boletín Geológico y Minero*. 126 (2-3). 409-426.
- Bettencourt, P. 1985. *Geomorphologie et processus d'évolution recente de la cote sotavento* (Algarve, Portugal). Rapport, Univ. Bourdeaux I, pp. 77
- Borrego, J. i Morales, J.A. 2009. El litoral de Huelva. A: Facultad de Ciencias Experimentales de la Universidad de Huelva. *Geologia de Huelva*, 2ª Edición. Ed. Universidad de Huelva: Huelva. pp. 28-34.
- Borrego, J., i Pendón, J.G. 1989. Caracterización del ciclo mareal en la desembocadura del Río Piedras (Huelva). A: XII Congreso Nacional de Sedimentología. pp.97-100.
- Borrego, J.; Morales, J.A. i Pendón, J.G. 1992. Efectos derivados de las actuaciones antrópicas sobre los ritmos de crecimiento de la flecha litoral de El Rompido (Huelva). *Geogaceta*, 11: 89-92.
- Conselleria de Medi Ambient i Ordenació del Territori. Red de Información Ambiental de Andalucía. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam> [Consulta: 16 de març 2016]
- Da Sila, M. i Fraidiás, J. 1997. Modelo de gestión del estuario del río Guadiana. *Consejería de Medio Ambiente: Sevilla*. pp.109
- Davis, J.L. 1964. A morphogenetic approach to word shorelines. *Z. Geomorph.* 8:127-142.
- García, D. i Cáceres, L.M. 2012. "Análisis de la evolución de la flecha litoral del Rompido entre 1956 y 2009 mediante Digital Shoreline Analysis System (DSAS)" I Congreso Iberoamericano de Gestión Integrada de Áreas Litorales. *Gestión Integrada de Áreas Litorales (GIAL, 2012)*. Cadis: Universitat de Cadis.
- Govern d'Espanya. Puertos del Estado. <http://www.puertos.es/es-es> [Consulta: 23 de març 2016]
- Govern de Portugal. Sistema Nacional de Infomação de Recursos Hídricos. <http://snirh.pt/> [Consulta: 23 de març 2016]
- Hayes, M.O. 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. *Barrier islands*. pp.1-27.
- Hnuter, R. E. i Clifton, E.H. 1982. Cyclic deposits and hummocky cross-stratification of probable storm origin in Upper Cretaceous rocks of the Cape Sebastian area, southwestern Oregon. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 52, nº 1.
- Holgado, E. i Martín, J.L. 2005. *Régimen mareal de la ría de Huelva e incidencia de la posible rotura de la balsa de fosfoyesos. Diagnóstico de la calidad ambiental de la*

- ría de Huelva. Sevilla: Conselleria de Medi Ambient de la Junta d'Andalusia.
- Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN) 2010. Morfodinámica de playa y desembocadura. In: Ruiz, J. i Losada, M.A. Propuesta metodológica para diagnosticar y pronosticar las consecuencias de las actuaciones humanas en el Estuario del Guadalquivir.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España. Confederación Hidrográfica del Guadiana <http://www.chguadiana.es/> [Consulta: 16 de març 2016]
- Morales, J.A. 2008. La desembocadura del río Guadiana. A: Olías Álvarez, M., et al.: Geomorfología del Parque Nacional de Doñana. 2ª ed. Huelva : Universidad de Huelva. pp. 164-165.
- Morales, J.A. and Borrego, J. 2008. El litoral de Huelva: fisiografía y dinámica. A: Geología de Huelva. Lugares de interés geológico. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva. pp. 28-34.
- Ojeda, J. 1988. *Aplicaciones de la Teledetección a la dinámica litoral (Huelva): Geomorfología y ordenación litoral*. Tesis Doctoral. Univ. de Sevilla.
- Ojeda, J. 1988. Peculiaridades morfodinámicas de la fachada Ibérica del Golfo de Cádiz: Geomorfología Litoral. *Revista de Estudios Andaluces*, 10: 55-68.
- Ojeda, J. i Vallejo I. 1995. La flecha de El Rompido: análisis morfométrico y modelos de evolución durante el período 1943-1991. *Rev. Soc. Geol. España*, 8 (3): 229-237.
- Palazón, L. i Navas, A. 2015. Land use sediment production response under different climatic conditions in an alpine-prealpine catchment Department of Soil and Water. Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC). Spain: *Catena*, 137: 244-255.
- Pérez Mateos, J., Pinilla, A., Alcalá, L.; Alexandre, T. 1982. Mineralogía de los arenales costeros españoles. Tramo Málaga-Ayamonte. *Boletín Geológico y Minero*, 93: 1-18.
- Rodríguez-Ramírez, A., Cáceres, L.M. i Rodríguez-Vidal, J. 2000. Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral onubense (SO España). Geomorfología litoral. Procesos activos, Monografías SEG. 7:101-113.
- Udias, A., López, A. i Mezcua, J. 1976. Seismotectonic of the Azores-Alborán Region. *Tectonophysics*. 31: 259-289.
- Wright, L.D., Chappell, J., Thom, B.G., Bradshaw, M.P. and Cowell, P. 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: southeastern Australia. *Marine Geology*, 32: 105-140.