

JOSEP E. PARDO-PASCUAL^a
JAIME ALMONACID-CABALLER^a
DENYS GORKOVCHUK^a
JESÚS PALOMAR-VÁZQUEZ^a
CARLOS CABEZAS-RABADÁN^a

AVALUACIÓ DELS CANVIS VOLUMÈTRICS DE LES PLATGES I FRONT DUNAR ENTRE VALÈNCIA I CULLERA (2017-2022)

RESUM

La quantificació dels canvis volumètrics en els sistemes de platja i duna és essencial per a realitzar balanços sedimentaris en les cèl·lules sedimentàries costaneres i comprendre completament l'evolució de les platges. Ací s'examina el potencial de les sèries de fotografies aèries, originalment utilitzades per a crear ortofotos, en la monitoratge dels canvis volumètrics en platges i front dunar del sector costaner entre València i Cullera.

El treball demostra que aquestes fotografies aèries poden ser tractades, amb tècniques de fotogrametria actual, per a obtenir Models Digitals de Superfície (MDS). L'obtenció de 6 models, entre el 2017 i 2022, demostra que aqueixes fotografies aèries poden esdevindre una font d'informació tridimensional rigorosa i comparable als vols LiDAR alhora que milloren la resolució temporal de les dades tridimensionals disponibles.

Els models permeten caracteritzar tridimensionalment el sistema dunar i la platja emergida, així com analitzar els canvis experimentats per aquestes unitats costaneres al llarg del temps. La unió de la informació tridimensional i les mesures bidimensionals aporten una visió holística complementària a altres fonts d'informació morfològica. Pel que fa a l'impacte dels temporals sobre el front costaner, els

^a Grup de Cartografia GeoAmbiental i Teledetecció, Departament d'Enginyeria Cartogràfica, Geodèsia i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n, 46022 València. jepardo@cgf.upv.es

Fecha de recepción: 17-06-2024. Fecha de aceptación: 11-09-2024.

resultats evidencien el fort impacte del temporal Glòria, el qual generà pèrdues sedimentàries bastant elevades de les quals moltes zones no pareixen arribar a recuperar-se.

PARAULES CLAU: geomorfologia costanera, monitorització tridimensional, temporals costaners, erosió fotogrametria.

EVALUATION OF THE THREE-DIMENSIONAL CHANGES OF THE BEACH AND THE FOREDUNE BETWEEN VALENCIA AND CULLERA (2017-2022)

RESUM

Quantification of volumetric changes in beach and dune systems is essential to perform sedimentary balances in coastal sedimentary cells and to fully understand the beach evolution. This work examines the potential of series of aerial photographs, originally used to create orthophotographies, for monitoring beach and foredune volumetric changes over the coastal sector between València and Cullera.

This research demonstrates that these aerial photographs can be managed, with current photogrammetric techniques, in order to obtain Digital Surface Models (DSMs). As a result 6 DSMs were obtained between 2017 and 2022, which demonstrates that these aerial photographs can become a robust source of three-dimensional information comparable to LiDAR methods while improving the temporal resolution of the available three-dimensional data.

The models allow the volumetric characterization of the foredune and the emerged beach, as well as the analysis of the changes undergone by these coastal units over time. The combination of the three-dimensional information and two-dimensional measurements provide a holistic view complementary to other sources of morphological information. Regarding the effect of the storms on the coastal front, the results show the strong impact of the Storm Gloria, which generated significant sedimentary losses from which many coastal segments do not seem to be able to recover.

KEYWORDS: coastal geomorphology, three-dimensional monitoring, coastal storms, erosion, photogrammetry.

INTRODUCCIÓ

Les platges i les dunes canvien la seua morfologia amb un gran dinamisme a conseqüència de les condicions energètiques a les quals estan sotmeses (Ciavola i Coco, 2017), causant transports sedimentaris tant longitudinals com transversals a la costa (Burvingt et al., 2017). Els temporals costaners són moments claus que poden determinar l'evolució morfològica d'una zona determinada depenent de les diferents condicions a què està sotmesa i, òbviament, la magnitud i duració del mateix (Anfuso et al., 2020; Castle i Harley, 2020).

Les anàlisis fetes fins ara s'han focalitzat en la utilització d'indicadors útils com ara la posició de la línia de costa i els seus canvis (Boak i Turner, 2005). Aquest és un indicador útil per a caracteritzar la superfície de la platja i els seus canvis, cosa que permet caracteritzar la resposta de les platges a

esdeveniments disruptius puntuals com els temporals costaners (Cabezas-Rabadán et al., 2024), així com tendències evolutives al llarg de dècades (Briceño de Urbaneja et al., 2024). Tot i això, les línies de costa no permeten reconèixer les alteracions de caràcter volumètric que són les que quantifiquen amb major precisió la dimensió del fenomen ocorregut, així com l'entrada i eixida de sediment del sistema platja-duna.

Caracteritzar els canvis volumètrics sempre ha sigut una tasca complexa i difícil. La major part de les vegades, les estimacions de canvis volumètrics s'han fet a partir d'alçaments topogràfics o topobatimètrics, que resulten cars i rarament han cobert àrees molt àmplies ni períodes massa llargs (Psuty i Silveira et al., 2011). La disponibilitat de dades LiDAR ha resolt en part aquest problema, ja permeten cobrir i quantificar els canvis sobre àrees molt àmplies (Nijland et al., 2017). Per al cas espanyol disposem, de forma general, dels alçaments del Pla Nacional d'Ortofotografia Aèria (PNOA) amb dues campanyes disponibles actualment: la primera del 2009 i la segona, del 2015 a 2017 (segons l'àrea específica en què es treballa). Ara mateix està en procés una tercera campanya (amb vols fets durant 2023 i 2024) que serà accessible a partir de final de l'any 2024. Malgrat l'immens valor d'aquesta informació, la freqüència d'actualització temporal resulta insuficient per a poder fer una anàlisi sistemàtica de l'impacte dels fenòmens que afecten les zones costaneres, com ara les actuacions d'enginyeria costanera sobre les platges o els episodis de temporal que poden donar lloc a processos d'erosió/recuperació a una escala temporal de dies/mesos (Cabezas-Rabadán et al., 2019, Pardo-Pascual et al., 2021), inferior a la disponibilitat de dades LIDAR al PNOA i, per tant, resultaria impossible caracteritzar-los.

Durant la darrera dècada, hem assistit a una eclosió del desenvolupament de les tècniques fotogràmiques, no tan sols en el seu ús clàssic sinó també en el món de la visió artificial, coneguda com a *Structure from Motion* (SfM). El procés fotogràmtric consisteix en reconèixer automàticament els píxels homòlegs entre diferents fotogrames, la qual cosa permet saber la posició relativa entre ells (e. g., Pitman et al., 2024). Si, a més, es disposa de punts de control georreferenciats, el bloc de fotografies també podrà georreferenciar-se. Seguidament, la posició dels punts queda triangulada sobre el terreny mitjançant la seua projecció des de les diferents fotografies. Com des de més fotografies siga observat un mateix punt, més precisa és la seua posició triangulada, cosa que implica la necessitat i requisit que les fotografies observen el terreny amb molta superposició. L'aportació recent de la visió artificial ha sigut la correlació massiva de punts que permeten assimilar el resultat fotogràmtric a les dades LiDAR. Aquesta tècnica s'utilitza tant amb fotografies terrestres com aèries.

Fins ara, però, no s'havia explorat massa la utilització d'aquestes tècniques amb fotografia aèria clàssica, si bé hi ha hagut alguns intents (Ojeda et al., 2007). La nostra proposta consisteix a utilitzar aquesta tècnica sobre les sèries de fotografies aèries registrades per a generar les successives ortofotografies que anualment actualitza l'Institut Cartogràfic Valencià (ICV). Després d'uns primers assajos bàsics (vore Almonacid-Caballer et al., 2023, 2024) es va evidenciar que la tècnica era aplicable i que les precisions són comparables a les del LiDAR.

L'objectiu d'aquest treball és, per tant, caracteritzar, quantificar i cartografiar els canvis tridimensionals registrats anualment en el sistema platja-duna del tram València-Cullera des de 2017 fins a 2022 utilitzant les fotografies aèries que l'Institut Cartogràfic Valencià ha adquirit per generar les ortofotos

anuals. Per fer-ho aplicarem tècniques fotogramètriques per generar Models Digitals de Superfície anuals i proposarem una metodologia d'anàlisi i de quantificació dels canvis. Amb la informació deduïda s'analitzarà la resposta que cada tram ha tingut davant del temporal Glòria, i en quin grau i de quina forma s'està produint el procés de recuperació.

ZONA D'ESTUDI

El tram costaner estudiat és una zona de platges arenoses amb oscil·lacions de marea inferiors a 0,2 m i ones de grandària mitjana, amb altures significatives d'ona de 0,7 m de mitjana i un període mitjà d'ona de 4,2 s (Pardo-Pascual et al., 2022a). El segment analitzat es troba a la part central del Golf de València, una antiga cèl·lula sedimentària amb una marcada deriva litoral N-S condicionada per l'alta pressió antròpica associada a l'ús recreatiu de les platges, i per diferents construccions i actuacions antròpiques que condicionen la distribució del sediment. En l'actualitat, aquesta es troba subdividida per diferents obstacles al transport de sediments, entre els quals destaquen el port de València, un obstacle complet que defineix el límit nord de la zona d'estudi, i el Cap de Cullera, parcialment permeable i que marca el límit sud (figura 1).

Malgrat l'habitual baixa energia dels onatges, durant els episodis de temporals l'energia de les ones pot augmentar substancialment. El temporal Glòria ocorregut entre el 19 i el 22 de gener de 2020 va assolir el màxim la matinada del 22 de gener (altura d'ona significant, Hs majors de 7,5 m, figura 2) i va afectar fortament tot l'est d'Espanya. Aquest temporal va ser un esdeveniment notablement pertorbador, tenint en compte la seua grandària i impacte inusualment gran al Mediterrani occidental (Amores et al., 2020; Berdalet et al., 2020; De Alfonso et al., 2021).

Figura 1. Zona d'estudi en color verd, incloent les platges localitzades entre el port de València i el cap de Cullera

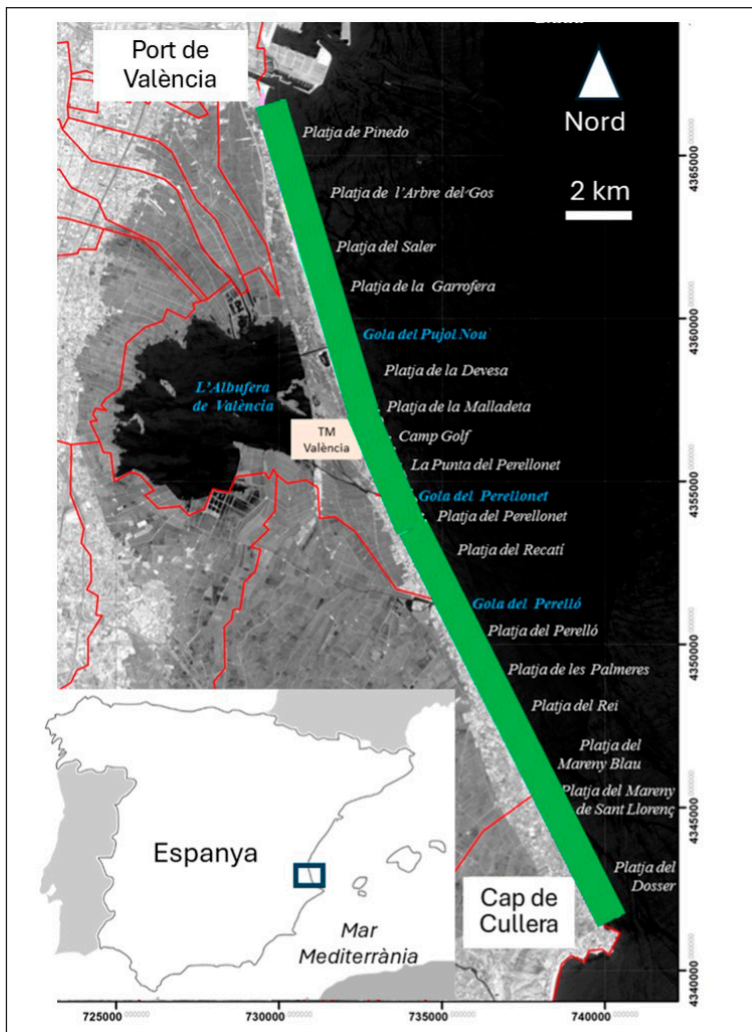
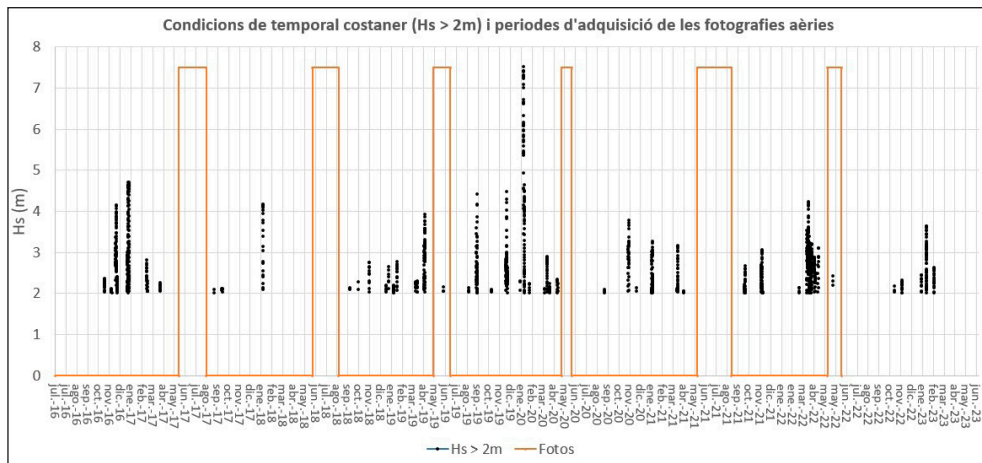


Figura 2. Dades d'altura d'onatge (Hs, en m) al llarg del període des de juliol de 2016 fins a juliol del punt SIMAR 2081112



Font: obtingut de la pàgina de Puertos del Estado (<https://www.puertos.es/>), on s'identifiquen les condicions de temporal amb $Hs > 2$ m. En taronja es mostren els períodes al llarg dels quals s'han adquirit les fotografies amb què s'han fet les ortofotos i que s'han emprat en aquests estudi per a crear els MDS.

METODOLOGIA

La metodologia desenvolupada segueix dos fases diferents: l'obtenció d'un MDS prou precís i la definició d'un protocol analític que permeta quantificar els canvis sobre trams costaners predefinitos. Al mateix temps, es distingeixen els dos ambients essencials que hi trobem a la zona d'estudi, el front dunar i la platja.

Obtenció de models digitals de superfície

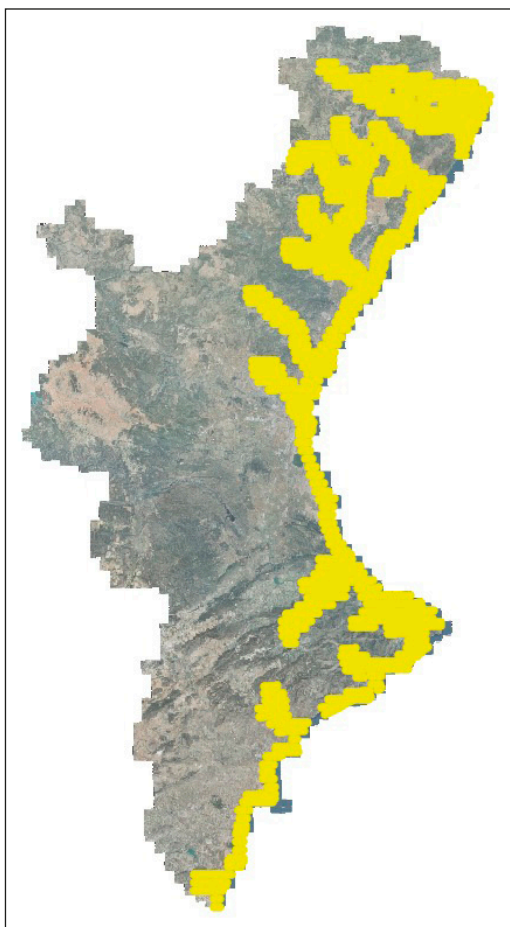
Per a aconseguir aquests objectius se segueixen tres fases diferents, que passen per (a) l'ajust del bloc fotogramètric amb què obtindre els models de superfícies, (b) un procés de refinament local per a millorar la precisió altimètrica dels esmentats models, i (c) l'emascament de la zona de mar.

Ajust del bloc fotogramètric i creació del model de superfícies

Quant a l'obtenció dels models, s'ha treballat amb informació fotogràfica i dades auxiliars subministrades per l'Institut Cartogràfic Valencià (ICV). Des de 2017, l'ICV ha fet vols fotogramètrics de la Comunitat Valenciana per a l'elaboració d'una ortofotografia anual (<https://icv.gva.es/va/ortofotos>). La novetat del present projecte és l'aprofitament de les fotografies adquirides per a crear les ortofotos i obtindre un nou producte per al qual no estaven originalment pensades: els MDS. S'ha treballat sobre una àrea molt ampla, com és tota la costa valenciana i algunes de les valls dels principals cursos fluvials (figura 3), i sobre sis sèries de registres, les que van des del 2017 fins al 2022 (figura 2). Treballar sobre

un territori tan gran permet ajustar millor els models fotogramètrics i aconseguir uns resultats més robustos. Les fotografies aèries presenten un solapament longitudinal i transversal sempre major al 60 i 30 %, respectivament.

Figura 3. Zona ocupada per les dades subministrades (visualitzada pel model de superfícies de 2019) superposada a l'ortofotografia de la Comunitat Valenciana



Cada sèrie anual es compon de més de 2.000 fotogrames (taula 1) que s'han processat per separat. Cada vol ha sigut processat sense ser dividit en zones d'anàlisi o d'interès, sinó sobre la totalitat de la zona amb dades disponibles per guanyar, d'aquesta forma, major robustesa en el model final. De fet, el processament conjunt de cada vol anual és més costós computacionalment, però permet un millor ajust dels paràmetres de distorsió d'una mateixa càmera que haja format part de l'adquisició de tota la zona i, paral·lelament, dona continuïtat al conjunt de cada model anual.

Taula 1. Número de fotogrames utilitzats en cadascun dels vols anuals gestionats

Any	N.º fotogrames
2017	2418
2018	2264
2019	2271
2020	2498
2021	2297
2022	2249

Les fotografies han sigut subministrades per l'ICV, amb els paràmetres d'orientació inicial que s'han emprat. Ara bé, aquesta informació resulta insuficient per a generar models 3D acurats i, per això, s'ha requerit afegir punts de control, per tal d'ajustar l'orientació de totes les fotografies. Òbviament, aquests punts de control han hagut de complir la condició d'haver-se mantingut estables al llarg del temps. La informació altimètrica dels punts de control s'ha obtingut dels darrers alçaments LiDAR associats al PNOA, que al territori valencià són del 2015 i 2017 (segons la província en què es treballa). Així mateix, per a l'any 2015 també s'ha disposat una ortofotografia associada al PNOA. Per aquest motiu, s'han escollit uns 500 punts de control i se'ls ha donat cota amb el model d'elevacions obtingut del LIDAR que s'emprarà com a referència.

El procés fotogramètric s'ha fet emprant el *software* Agisoft Metashape, amb què s'han orientat els fotogrames i s'ha generat un primer producte tridimensional de tot el territori per cada any. El producte 3D obtingut ha sigut un MDS ràster d'1 m de resolució que considerarem provisional. Per tal de verificar la seua qualitat, s'ha fet una primera avaluació de la precisió emprant els punts de control de l'ajust fotogramètric. En la taula 2 es mostren els estadístics que evidencien la correcció del MDS obtingut. En ella, es quantifiquen les desviacions estàndard del posicionament planimètric i altimètric.

Taula 2. Desviacions típiques dels punts de control (valors en metres)

Any	Desv. est. XY (m)	Desv. est. Z (m)
2017	0.282	0.378
2018	0.244	0.317
2019	0.278	0.348
2020	0.241	0.284
2021	0.250	0.287
2022	0.241	0.284

Els valors proven que els MDS provisionals són bàsicament correctes amb errors en altimetria lleugerament per damunt dels que es poden obtenir de sistemes estàndard com és el LIDAR. A nivell planimètric, s'ha verificat uns resultats molt acurats, però a nivell altimètric veiem que l'error més gros es relaciona amb el fet que, localment, hi ha àrees que estan globalment per damunt i d'altres enfonsades respecte a la posició real. Per aqueixa raó cal aplicar una correcció de caràcter més local que assegure que els models són comparables entre ells i respecte als models de referència obtinguts dels vols LiDAR del PNOA.

Correcció dels MDS a escala local

Amb la finalitat de corregir biaixos geogràfics que hi trobem a escala local es proposa fer una comprovació massiva de punts que sabem que s'han mantingut altimètricament estables al llarg del període estudiat (en aquest cas, entre 2015, any del vol LIDAR que emprarem com a referència fins al 2022, últim dels anys estudiats). Les anàlisis en aquesta fase ja es centren únicament en la zona d'interés que ara s'està analitzant, és a dir, entre València i el cap de Cullera.

Considerem que la major part de les carreteres i vials que hi ha al territori no han variat la seua altitud i, per tant, es poden emprar per a fer les anàlisis massives. A partir de la cartografia 1/5.000 del ICV (<https://icv.gva.es/va/cv05>), s'han seleccionat els eixos dels vials i s'ha extret un punt cada 5 m de manera que hem pogut disposar de més de 45.000 punts de control. En ells s'ha mesurat, per un costat, l'altitud al Model Digital d'Elevacions (MDE) obtingut a partir de les dades LIDAR del PNOA adquirides en 2015 i també en cadascun dels 6 MDS obtinguts fotogramètricament. Els resultats (taula 3), centrats en l'estudi de la zona que ací s'analitzarà, és a dir, el tram València-Cullera, mostren uns biaixos sempre menors als 15 cm i sempre dins d'unes desviacions típiques menors a 26 cm.

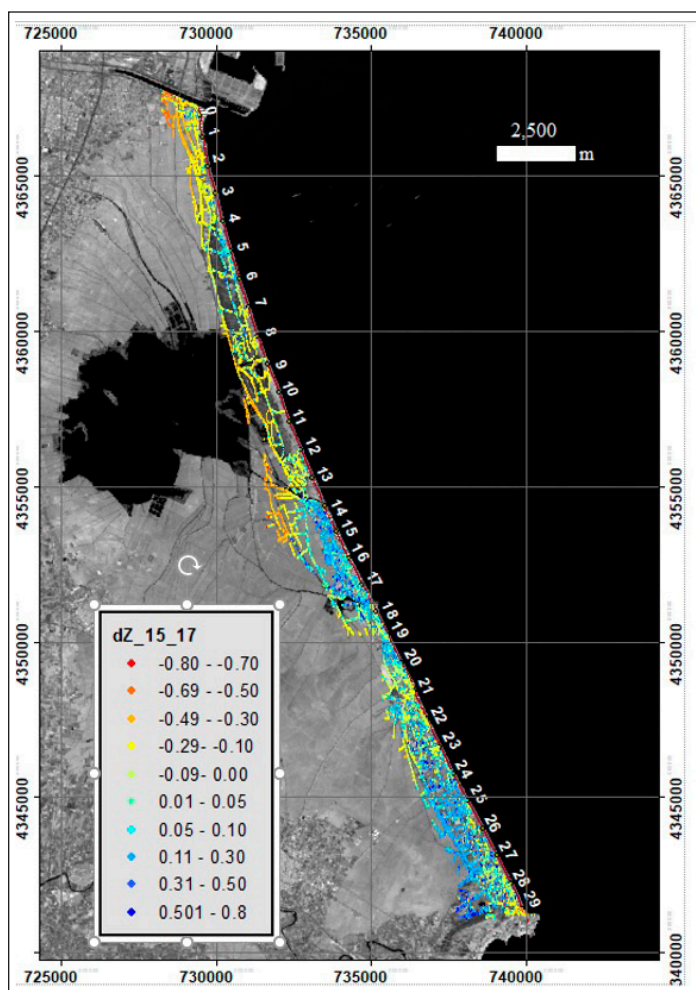
Taula 3. Estadístics bàsics de control dels errors avaluats (en metres) en el tram València-Cullera abans de fer qualsevol correcció local

Any	Punts	Biaix	Desv. est.	RMSE
2017	45065	-0.026	0.227	0.229
2018	45065	0.117	0.188	0.222
2019	45065	0.069	0.208	0.219
2020	45065	0.115	0.187	0.219
2021	45065	0.074	0.185	0.199
2022	45065	0.048	0.191	0.196

L'anàlisi de les divergències de les cotes en els punts de vials emprats ha permès observar biaixos desigualment repartits, però amb una clara distribució geogràfica. És a dir, hi ha zones on els errors són positius i d'altres en què aquests són negatius. Encara que els biaixos mitjans (taula 3) queden per davall de la desviació típica, la seua particularització a la zona d'estudi invita a entendre que no és una

condició constant en tot el territori ni una component aleatòria, sinó que presenta una tendència espacial. A la figura 4 apareixen els aproximadament 45.000 punts de control situats sobre els vials de la zona d'estudi, i amb el seu color s'indica la magnitud i el sentit de l'error respecte al model altimètric de referència. S'aprecien errors negatius (tons rogencs) relativament alts a la part nord-occidental, tocant a la desembocadura del nou llit del Túria, que contrasta amb altres àrees on veiem errors positius (tons blavosos), com passa a la part meridional, ja al terme de Cullera.

Figura. 4. Distribució d'errors mesurats sobre els vials



Els diferents colors representen la magnitud de la diferència altimètrica (expressada en metres). S'aprecien biaixos geogràfics de manera que, en alguns llocs, els nous models estan per damunt dels considerats com a referència i en altres per davall.

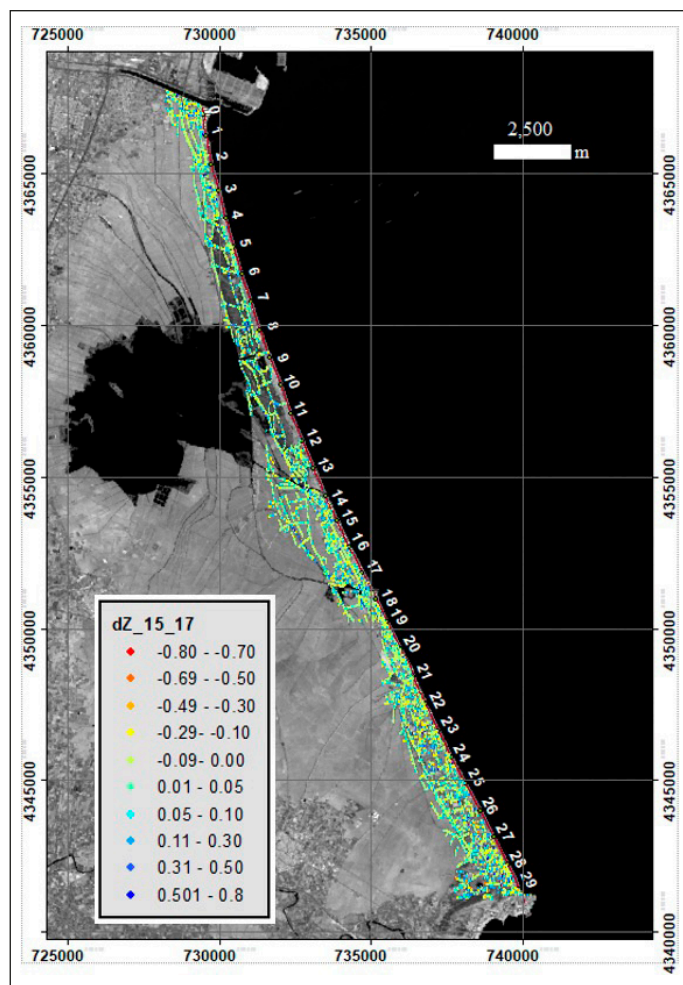
Per minimitzar aquests biaixos, així com el seu efecte en el càlcul dels volums posteriors, s'han creat models correctors de superfície. És a dir, les diferències de cota entre el Lidar de referència i cada MDS al llarg dels vials ha sigut emprat per a crear uns models de superfície d'error mitjançant tècniques geoestadístiques com el *kriging* ordinari. Cada nou model d'errors (un per cada any analitzat) s'ha restat als MDS anuals obtinguts per fotogrametria i s'han obtingut uns nous MDS definitius, on ha quedat minimitzada qualsevol desviació sistemàtica de naturalesa geogràfica, tal com queda evidenciat a la figura 5. Aquests nous models, a més, milloren substancialment la precisió global, com demostren els estadístics generals que es presenten a la taula 4, amb precisions millors, fins i tot, a les esperables amb la tecnologia LIDAR. Aquests MDS seran, per tant, la font d'informació altimètrica que s'emprarà per a quantificar els canvis a la platja i en el front dunar.

Taula 4. Estadístics bàsics de control dels errors avaluats (en metres) en el tram València-Cullera posterior a la correcció local

Any	Punts	Biaix	Desv. est.	RMSE
2017	45065	0.000	0.134	0.134
2018	45065	0.000	0.127	0.127
2019	45065	0.000	0.134	0.134
2020	45065	0.001	0.125	0.125
2021	45065	0.000	0.137	0.137
2022	45065	0.000	0.128	0.128

Potser sorprén per què s'empren els MDS, que recordem, són models amb les altituds del terreny tot considerant els elements que hi ha sobre el terra, com ara cases, vegetació, infraestructures. Generalment, quan es pretenen avaluar canvis en el terreny, s'utilitzen el Models Digitals d'Elevacions (MDE) que només recullen la informació altimètrica del terra. La raó per a emprar els MDS es troba en la dificultat de derivar els MDE a partir dels MDS quan partim d'una informació obtinguda per fotogrametria. A diferència del que passa quan es treballa amb dades LIDAR, on alguns dels punts registrats arriben a terra, ací no passa així, ja que només es registra una única dada altimètrica per píxel. Per aquesta raó, no es poden aplicar els filtres estàndard que s'utilitzen per a diferenciar el terreny dels elements que hi ha sobre ell. De tota manera, en treballar a la platja o enfront de la duna és evident que hi ha molt poca vegetació que provoqe errades. Sí que és cert, però, que l'efecte de persones a la platja no es pot resoldre i, per tant, serà un error que s'arrossegarà amb aquesta font d'informació.

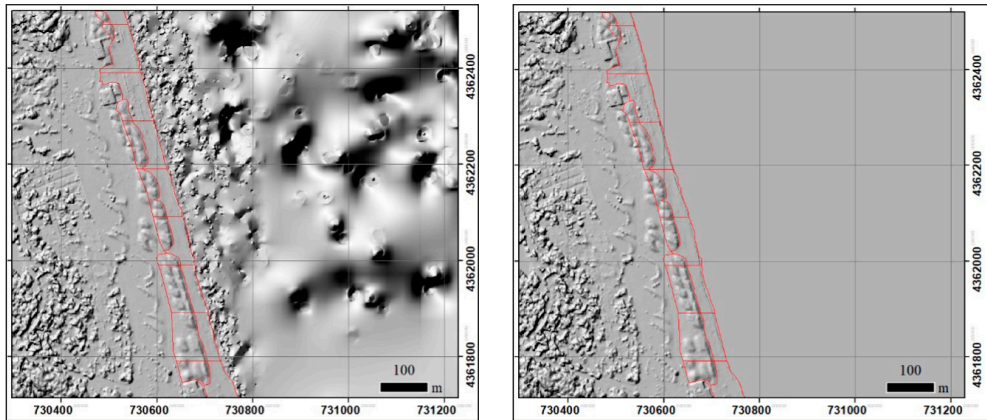
Figura 5. Distribució d'errors mesurats una vegada aplicada la correcció local



Mètode per computar sistemàticament els canvis en platja i duna

Abans de mesurar els canvis entre els successius MDS anuals s'ha d'eliminar la informació de la zona marina, ja que les altituds allí obtingudes són clarament errònies tal com prova la figura 6. Aquests errors a la zona marina es deuen al fet que el procediment fotogramètric localitza punts homòlegs en diferents fotografies per a triangular la seua posició en l'espai tridimensional. És necessari, per tant, que els punts homòlegs no es moguen durant el temps transcorregut entre les fotografies. Dins la mar, amb l'efecte de les ones, no es compleix aquesta condició i, per això, les cotes a la part aquàtica dels MDS s'han de considerar erronis i cal eliminar-los (figura 6).

Figura 6. Detall de l'efecte erroni de la fotogrametria en l'espai de mar i com es corregeix amb l'emascament



Per a fer-ho, per cada any processat i analitzat s'ha fotointerpretat la línia de costa i s'ha creat un polígon que cobreix la zona marina i que ha sigut emprat per a emmascarar la mar i donar-li un valor constant igual a zero. Així, s'arriba a un conjunt de models de superfícies amb resolució d'1 metre per píxel. Cada píxel representa l'altitud del terreny i permet, en comparar-los, calcular els canvis volumètrics haguts entre les dates dels diferents vols.

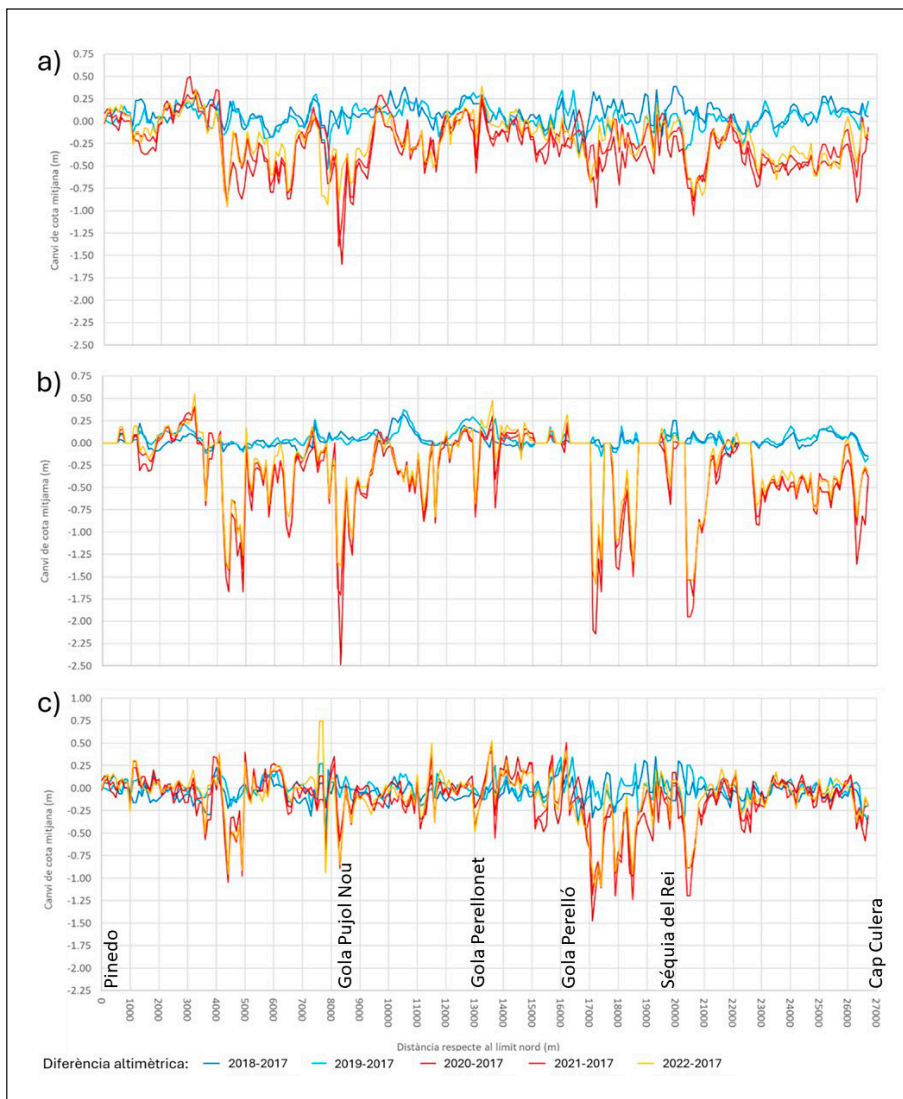
L'anàlisi de canvis volumètrics s'ha fet de forma sistemàtica sobre unitats geogràfiques predefinides i separant els dos ambients diferents que hi trobem: el front dunar i la platja emergida, tal com es pot observar amb les línies roges que apareixen a la figura 6. Aquesta anàlisi incorpora dos problemes associats a la mobilitat d'aquests ambients: per un costat, la del límit marí entre les successives fotografies i, per un altre, la del límit del front dunar. La mobilitat instantània del límit marí entre successives fotografies condiciona la zona que podrà triangular-se per a traure el MDS. La mobilitat del front dunar es deu a la forta erosió associada sobretot als efectes del temporal Glòria i que fa canviar l'espai ocupat per duna i platja. S'ha de dir que, en aquest estudi, focalitzem la nostra atenció exclusivament en la dinàmica costanera i, per tant, no analitzem els conjunts dunars totalment, sinó només el front dunar que és el que es pot veure afectat directament per l'onatge. Per això, hem determinat un límit interior que constreny l'espai límit terra endins. D'altra banda, el límit de les dunes amb la platja ha quedat establert sobre el MDS de 2017 i es manté constant per a tot l'estudi. Així, si els canvis (guanys o pèrdues) que hi trobarem en anys successius sempre es contrastaran respecte a aqueixa primera data (2017). Els càlculs del volum s'han anat fent per trams longitudinals d'uns 100 m de longitud, com s'aprecia en la figura 6.

RESULTATS I DISCUSSIÓ

En la figura 7 es presenten els canvis registrats en cadascun dels anys estudiats respecte a la situació en 2017. D'una banda, es mostren els canvis globals del conjunt del sistema platja-duna (7a), és a dir,

considerant tant la platja com el front dunar en cadascuna de les unitats d'uns 100 m de longitud en què s'ha dividit la zona d'estudi. D'altra banda, es presenten els canvis només en les dunes (7b), així com només considerant la platja emergida (7c). En tons blaus es presenten els canvis registrats abans del temporal Glòria i, en tons càlids, els ocorreguts després. Els resultats evidencien el fort impacte d'aquest fenomen i com, passats ja tres anys, les pèrdues encara són bastant elevades.

Figura 7. Canvis (respecte a 2017) de l'elevació mitjana a) sobre tot el sistema platja-duna; b) només sobre la duna; i c) només sobre la platja emergida

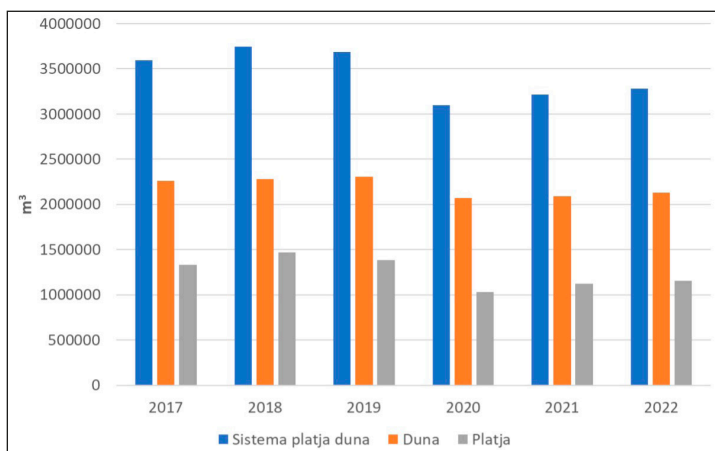


En la taula 5 es presenten el volum total mesurat en cadascun dels anys i el percentatge que això suposa respecte a la situació de 2017. Aquestes dades permeten observar com, durant els anys 2018 i 2019, hi hagué un lleuger increment de material mentre que l'any 2020 hi hagué una forta pèrdua seguida d'una progressiva recuperació (figura 8). També s'aprecia que, si bé el canvi després de 2020 afectà a tots els ambients (duna i platja), els processos de recuperació són clars en la platja però molt més lleugers a les dunes. Aquest fet és perfectament lògic, ja que, perquè s'inicié el procés de recuperació de la duna, necessàriament s'ha d'haver creat un excipient ja a la platja seca de manera que el vent pugui arrossegar l'arena i acumular-la a la duna.

Taula 5. Volum total (m³) existent cada any analitzat en tota la zona d'estudi i percentatge (%) de canvi respecte a 2017 (valors majors a 100 indiquen acumulació, inferior erosió)

	Sistema platja duna		Duna		Platja	
	Volum total (m³)	Percentatge canvi	Volum total (m³)	Percentatge canvi	Volum total (m³)	Percentatge canvi
2017	3.594.461	100,00	2.262.163	100,00	1.332.298	100,00
2018	3.748.073	104,27	2.281.083	100,84	1.466.990	110,11
2019	3.686.084	102,55	2.304.003	101,85	1.382.080	103,74
2020	3.097.440	86,17	2.068.646	91,45	1.028.794	77,22
2021	3.214.701	89,43	2.090.609	92,42	1.124.091	84,37
2022	3.279.232	91,23	2.126.958	94,02	1.152.274	86,49

Figura 8. Volums totals registrats en cadascun dels anys estudiats diferenciant la duna i la platja, i també el conjunt del sistema platja-duna



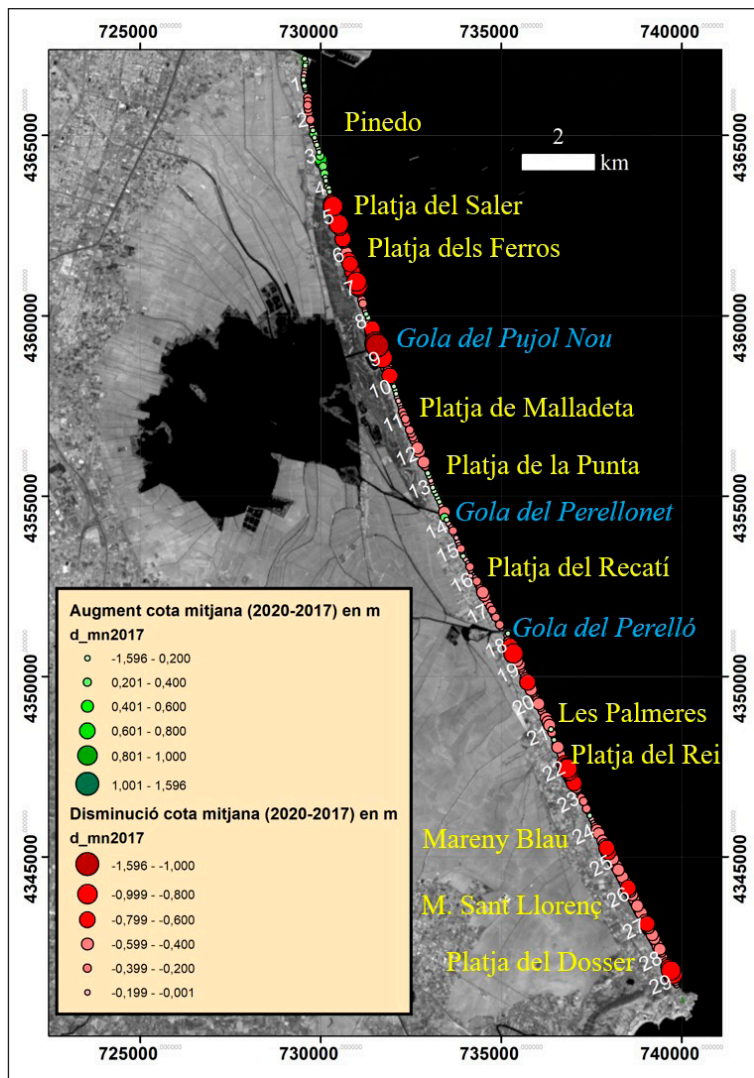
Aquests fets ja s'havien observat en treballs preliminars realitzats a aquesta zona (Pardo-Pascual et al., 2022b) però no amb el grau de seguretat amb què ara es pot reafirmar al poder disposar de més dades. Un treball anterior basat en tres alçaments topogràfics fets amb LiDAR exclusivament sobre la Devesa del Saler (Pardo-Pascual et al., 2021) també evidenciava aquesta realitat que ara podem confirmar de forma clara sobre tota la restinga que tanca l'Albufera de València.

De tot el que s'ha presentat resulta evident que els canvis més importants es detecten immediatament després del temporal Gloria i que presenten unes diferències geogràfiques molt importants (figura 7). Així, quan es cartografien els canvis (distingint guanys i pèrdues) registrats entre 2017 i 2020 (figura 9) es pot observar que els majors canvis es troben a la Platja del Saler i del Ferros, així com al nord i sud de la gola del Pujol Nou. Les platges i dunes que hi ha entre les goles del Pujol i del Perellonet registren, excepte la zona de la Brava (immediata al Pujol), unes pèrdues molt més moderades. De fet, a la zona de la Punta es detecten guanys. Entre la gola del Perellonet i la del Perelló les pèrdues, si bé generalitzades, no són tan grans com més al nord i al sud. Així, al sud del Perelló tornem a trobar pèrdues molt fortes. Al sud de la platja del Rei, també trobem una zona greument afectada que segueix cap al sud per les platges dels Marenys Blau, de Sant Llorenç i la platja del Dosser. Això coincideix amb les anàlisis fetes amb l'estudi de línies de costa derivades de les imatges de satèl·lit (Pardo-Pascual et al., 2022a,c). En aquestes anàlisis es destacava l'aparent contradicció que àrees potencialment acumulatives (per estar recolzades sobre el promontori calcari del Cap de Cullera) hagen mantingut una dinàmica fortament erosiva, sobretot després del cicle de grans temporals culminats pel Glòria que hi hagué entre els estius de 2019 i 2020.

Tots aquests resultats evidencien la mancança de sediment d'aquesta cèl·lula sedimentària costanera deguda, en part, a la interrupció del transport longitudinal de sediments provocat pels dics del port de València des de fa dècades. A més, els rius, especialment el Túria, aporten menys sediments al sistema platja-duna. Finalment, aquests resultats proven que els grans temporals, com el Glòria, marquen fites clau en la dinàmica evolutiva d'un sector com el que estem estudiant.

La història morfoodinàmica recent de les platges i dunes que hi ha entre València i Cullera és un exemple paradigmàtic dels problemes als quals ens hem d'anar enfrontant cada vegada més com a societat. Estem davant d'una realitat en què àrees on històricament ha predominat l'acumulació de sediments arenosos (Sanjaume, 1985) –almenys des del màxim flandrià fins fa menys de cent anys–, ara es veuen immerses en una dinàmica erosiva creixent a causa d'alteracions humanes, tant dins del sistema litoral (com són els ports i el espigons) com fora d'aquest (com les alteracions en la dinàmica sedimentària fluvial). A això s'afegeixen els canvis en les condicions marines, on les situacions de temporals de gran energia són cada vegada més freqüents i virulents, fet que molts autors associen als efectes del canvi climàtic a les costes (Sweet et al., 2014, 2022, Oppenheimer et al., 2019).

Figura 9. Mapa dels canvis al sistema platja-duna entre l'any 2017 i el 2020



CONCLUSIONS

L'aportació metodològica d'aquest treball demostra que l'ús de sèries de fotografies aèries recents (i futures) ens pot proporcionar dades rigoroses per a quantificar i monitorar els efectes de les intervencions costaneres. Recentment, la zona d'estudi ha rebut l'aportació de més de 3 milions de metres cúbics d'arena, cosa que, previsiblement, modificarà significativament l'evolució de la costa durant els pròxims

anys o dècades. Disposar de mètodes eficients i precisos per a mesurar aquests canvis i avaluar l'impacte real d'aquestes accions és clau per a fer valoracions rigoroses i decidir, si és possible, l'èxit o el fracàs d'aquestes intervencions sobre el sistema costaner.

AGRAÏMENTS

Aquesta recerca està suportada pel projecte SIMONPLA integrat dins del programa ThinkinAzul del Ministeri de Ciència i Innovació amb fons de la Unió Europea NextGenerationEU (PRTR-c17.11) i la Generalitat Valenciana, el contracte de M. Salas (Programa de Requalificació) pel Ministeri d'Universitats finançat per la UE-NextGenerationEU i la beca Primers Projectes d'Investigació (PAID-06-22) del Vicerectorat d'Investigació de la Universitat Politècnica de València (UPV). Els autors agraeixen a l'Institut Cartogràfic Valencià la cessió de les fotografies aèries i les seues dades auxiliars que han estat la font d'informació primària bàsica del present estudi.

REFERÈNCIES

- Almonacid-Caballer, J., Gorkovchuk, D., Palomar-Vázquez, J., Cabezas-Rabadán, C., & Pardo-Pascual, J. E. (2024). Monitorización tridimensional del sistema playa-duna del norte de Cullera (Valencia) mediante fotografías aéreas. XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades para un Crecimiento Azul, 653-656, 4-7 junio, Cádiz.
- Almonacid-Caballer, J., Gorkovchuk, D., Palomar-Vázquez, J., & Pardo-Pascual, J. E. (2023). Posibilidades y limitaciones de las fotografías aéreas adquiridas para la generación de ortofotos como fuente de información documental 3D. Ejemplo de aplicación en la Rambla de la Viuda (2017-2021). En I Jornadas de Morfodinámica Fluvial y Observación de Sedimentos en Ríos (MorFOS): Jornada anual de I-D-i en inundaciones, 15 y 16 de noviembre del 2023. Zaragoza-España.
- Amores, A., Marcos, M., Carrió, D. S., & Gómez-Pujol, L. (2020). Coastal impacts of Storm Gloria (January 2020) over the north-western Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), 1955-1968.
- Anfuso, G., Loureiro, C., Taouati, M., Smyth, T., & Jackson, D. (2020). Spatial Variability of Beach Impact from Post-Tropical Cyclone Katia (2011) on Northern Ireland's North Coast. *Water*, 12(5), 1380. <https://doi.org/10.3390/w12051380>
- Berdalet, E., Marrasé, C., & Pelegrí, J. L. (2020). Resumen sobre la Formación y Consecuencias de la Borrasca Gloria (19-24 enero 2020). (ICM) Informes y documentos de trabajo, 38 pp. doi: 10.20350/digitalCSIC/12496
- Boak, E. H. & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of coastal research*, 21(4), 688-703.
- Briceño de Urbaneja, I. C., Pardo-Pascual, J. E., Cabezas-Rabadán, C., Aguirre, C., Martínez, C., Pérez-Martínez, W., & Palomar-Vázquez, J. (2024). Characterization of Multi-Decadal Beach Changes in Cartagena Bay (Valparaíso, Chile) from Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 16(13), 2360.

- Burvingt, O., Masselink, G., Russell, P., & Scott, T. (2017). Classification of beach response to extreme storms. *Geomorphology*, 295, 722-737.
- Castelle, B. & Harley, M. (2020). Extreme events: impact and recovery. En *Sandy beach morphodynamics* (pp. 533-556). Elsevier.
- Ciavola, P. & Coco, G. (Eds.). (2017). *Coastal storms: processes and impacts*. John Wiley Sons.
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., Roch-Talens, A., & Guillén, J. (2024). Satellite observations of storm erosion and recovery of the Ebro Delta coastline, NE Spain. *Coastal Engineering*, 188, 104451.
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Fernández-Sarría, A. (2019). Characterizing beach changes using high-frequency Sentinel-2 derived shorelines on the Valencian coast (Spanish Mediterranean). *Science of the Total Environment*, 691, 216-231.
- De Alfonso, M., Lin-Ye, J., García-Valdecasas, J. M., Pérez-Rubio, S., Luna, M. Y., Santos-Muñoz, D., & Álvarez-Fanjul, E. (2021). Storm Gloria: sea state evolution based on in situ measurements and modeled data and its impact on extreme values. *Frontiers in Marine Science*, 8, 646873.
- Nijland, W., Reshitnyk, L. Y., Starzomski, B. M., Reynolds, J. D., Darimont, C. T., & Nelson, T. A. (2017). Deriving rich coastal morphology and shore zone classification from LIDAR terrain models. *Journal of Coastal Research*, 33(4), 949-958.
- Ojeda Zújar, J., Vallejo Villalta, L.I., Hernández Calvento, L., & Álvarez Francoso, J. I. (2007). Fotogrametría digital y lidar como fuentes de información en geomorfología litoral (marismas mareales y sistemas dunares): el potencial de su análisis espacial a través de SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 44, 215-233.
- Oppenheimer, et al. (2019). Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. En Pörtner, H.-O. et al. (eds.). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 321-445). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Pardo-Pascual, J. E., Cabezas-Rabadán, C., & Palomar-Vázquez, J. (2021). Anàlisi dels canvis morfològics del cordó dunar i les platges de la Devesa del Saler a conseqüència del temporal Gloria. En Vicenç, M. Rosselló, *geògraf, als seus 90 anys* (pp. 393-418). Publicacions de la Universitat de València. ISBN:978-84-9133-428-6.
- Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2022a). Estudio de los cambios de posición de la línea de costa en las playas del segmento València - Cullera (1984-2020) a partir de imágenes de satélite de resolución media de libre acceso. *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*, 108, 79-104. DOI: 10.7203/CGUV.108.23828.
- Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2022b). Monitorización tridimensional del impacto del temporal Gloriasobre el frente dunar de las playas de la Devesa del Saler (Valencia). En *XI Jornadas de Geomorfología Litoral. Galicia 2022: Actas: Santiago de Compostela, 27-29 de julio de 2022* (pp. 223-227). Servicio de Publicaciones.
- Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Cabezas-Rabadán, C., (2022c). Analysis of the morphological changes of the beaches along the segment València - Cullera (E Spain) from satellite-derived shorelines. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 48. DOI: 10.18172/cig.5215.

- Pitman, S. J., Coco, G., Hart, D. E., & Shulmeister, J. (2024). Observations of beach cusp morphodynamics on a composite beach. *Geomorphology*, 447, 109026.
- Psuty, N. P. & Silveira, 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*, 1253-1257.
- Sweet, W. V. & Park, J. (2014). From the extreme to the mean: Acceleration and tipping points of coastal inundation from sea level rise. *Earth's Future*, 2, 579-600, DOI: 10.1002/2014EF000272.
- Sweet, W. V., et al. (2022). *Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States: Updated Mean Projections and Extreme Water Level Probabilities Along U.S. Coastlines*. NOAA Technical Report NOS 01. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD, 111 pp. <https://oceanservice.noaa.gov/hazards/sealevelrise/noaa-nostechrpt01-global-regional-SLR-scenarios-US.pdf>

Cómo citar este artículo:

Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Gorkovchuk, D., Palomar-Vázquez, J. & Cabezas-Rabadán, C. (2024). Avaluació dels canvis volumètrics de les platges i front dunar entre València i Cullera (2017-2022). *Cuadernos de Geografía*, 112, 175-194.

<https://doi.org/10.7203/CGUV.112.29267>



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