

Treball final de Màster

# EVOLUCIÓ MORFOLÒGICA DE LA PLATJA DE BOGATELL (BARCELONA)

Autor: Manel Salvador

Tutors externs: Ruth Durán i Jorge Guillén (Institut de Ciències del Mar, CSIC)

Tutor intern: Ariadna Just

## Resum

L'erosió costanera planteja reptes significatius per a les platges urbanes i requereix solucions que combinin la construcció d'estructures de protecció amb mesures de regeneració del litoral. Aquest estudi investiga l'evolució morfològica d'una platja urbana encaixada en presència d'espigons submergits i obres de regeneració, analitzant el seu efecte en la mitigació de l'erosió costanera i la restauració del perfil de platja.

Mitjançant l'anàlisi de campanyes topo-batimètriques utilitzant un projecte de GIS, s'avaluen els canvis temporals a la morfologia costanera en relació amb el diferent impacte de l'onatge en funció de la implementació d'espigons submergits i projectes d'aportacions de sediments. S'analitza la influència d'aquests elements a l'estabilitat del perfil de platja i als canvis de volum de sediment.

Els resultats revelen una evolució morfològica dinàmica i altament influenciada per les estructures de protecció i regeneració. S'observa una acumulació de sediments a la part interna dels espigons submergits, cosa que indica l'eficàcia d'aquestes estructures per reduir la pèrdua de sediment cap a zones de més profunditat. Tot i això, s'identifiquen efectes col·laterals, com la redistribució de sediments.

Les obres de regeneració, en combinació amb l'espigó submergit, han estabilitzat força la platja i la protegeixen contra l'erosió. Tot i això, es ressalta la importància de la gestió activa i el monitoratge continu per abordar possibles impactes no desitjats i ajustar les estratègies a mesura que evoluciona la morfologia costanera.

Aquest estudi ofereix una comprensió detallada de la interacció entre espigons submergits, obres de regeneració i l'evolució morfològica d'una platja urbana. Les troballes informen la planificació i el disseny de futurs projectes de gestió costanera, destacant la necessitat d'enfocaments integrats que considerin tant les estructures de protecció com les mesures de restauració per abordar eficaçment l'erosió costanera en entorns urbans.

### Paraules clau

Platges urbanes, estructures de protecció, mesures de regeneració, evolució morfològica, erosió costanera · perfil de platja, gestió costanera

## Abstract

Coastal erosion poses significant challenges for urban beaches and requires engineering solutions that combine the construction of protective structures with coastal regeneration measures. This study investigates the morphological evolution of an enclosed urban beach in the presence of submerged breakwaters and regeneration works, analysing their effect on the mitigation of coastal erosion and the restoration of the beach profile.

Through an analysis of topo-bathymetric campaigns, the temporal changes in the coastal morphology are evaluated in relation to the implementation of submerged breakwaters and sediment contribution projects. The influence of these elements on the stability of the beach profile and changes in sediment volume is analysed.

The results reveal a dynamic morphological evolution highly influenced by protection and regeneration structures. Sediment accumulation is observed upstream of submerged breakwaters, indicating the effectiveness of these structures in reducing localized erosion. However, collateral effects are identified, such as the redistribution of sediments.

The regeneration works, in combination with the submerged breakwaters, demonstrate a significant contribution to the restoration of the beach profile and protection against erosion. However, it highlights the importance of active management and continuous monitoring to address potential unintended impacts and adjust strategies as coastal morphology evolves.

This study provides a detailed understanding of the interaction between submerged breakwaters, regeneration works and the morphological evolution of an urban beach. The findings inform the planning and design of future coastal management projects, highlighting the need for integrated approaches that consider both protective structures and restoration measures to effectively address coastal erosion in urban settings.

#### Keywords

Urban beaches, protective structures, regeneration measures, morphological evolution, coastal erosion, beach profiles, coastal management

## **Introducció**

La costa és una zona de transició entre el continent i el mar, caracteritzada per un elevat dinamisme i condicionada per una sèrie de processos relacionats amb l'onatge, els vents, les mareas i les corrents oceàniques. Tots aquests factors modifiquen de forma continuada la morfologia del litoral. D'altra banda, l'impacte de l'activitat humana, incloent-hi la urbanització del sòl, la construcció d'infraestructures costaneres i, indirectament, l'augment del nivell del mar provocat pel canvi climàtic, esdevenen factors que alteren els fluxos i la morfologia dels ambients sedimentaris costaners.

Les platges situades en entorns urbans esdevenen bens naturals i recreatius que proporcionen nombrosos beneficis a les comunitats costaneres. Tot i això, aquestes platges enfronten un seguit de desafiaments significatius a causa de l'erosió litoral, un fenomen natural que s'ha exacerbat en les últimes dècades a causa de les intervencions humanes i del esmentat canvi climàtic (IPCC, 2023).

L'erosió litoral és un procés complex que causa el retrocés de les línies costaneres i provoca una disminució en la superfície i el volum de sediment de les zones emergides. En el context de les platges urbanes, on la pressió humana i el desenvolupament infraestructural són alts, l'erosió litoral planteja reptes addicionals i les seves conseqüències poden ser irreversibles tant pel medi ambient com per a les comunitats locals (Jiménez, et al. 2011).

Un dels fenòmens que afecten a les platges encaixades és el procés de basculació, entès com un procés de rotació de la línia de costa. És un fenomen natural que afecta constantment les platges i que és degut a la direcció del transport longitudinal de sediment en funció de la orientació de l'onatge. Els processos de basculació inclouen tant l'erosió com l'acumulació de sediments a diferents àrees de la platja, són processos dinàmics i poden variar al llarg de l'any a causa de la direcció d'aproximació de l'onatge. És important entendre i gestionar aquests processos per preservar les platges i la importància ecològica, turística i recreativa. En algunes àrees, es poden

implementar mesures de gestió costanera, com ara la construcció d'estructures de retenció de sorra o la revegetació de dunes, per ajudar a mantenir un equilibri en el procés de basculació i protegir les platges de l'erosió.

En aquest context, l'objectiu general d'aquest treball és analitzar, mitjançant tècniques de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG), els canvis morfològics d'una platja de la ciutat de Barcelona (Bogatell) a una escala de dècades i determinar les principals causes d'aquesta evolució. Per assolir els objectius establerts, en primer lloc s'examinaran els factors que influeixen en l'evolució litoral, quantificant els processos de sedimentació/erosió i les seves implicacions morfo-dinàmiques, i l'impacte de la construcció d'infraestructures costaneres.

Aquest estudi es basa en l'anàlisi de dades topo-batimètriques obtingudes en la platja de Bogatell (Barcelona) en 16 campanyes des de l'any 2003 fins l'any 2022, utilitzant dues metodologies basades en Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG), per tal de comprendre els efectes dels processos naturals (temporals) i de les activitats humanes en la dinàmica de les platges localitzades en entorns urbans, com és el cas de la ciutat de Barcelona. Per dur a terme aquest anàlisi s'han desenvolupat dues metodologies: 1) una metodologia per transsectes que permet fer un anàlisi per seccions de platja al llarg del temps, i 2) una metodologia a partir de diferències de profunditat entre campanyes anuals que permet detectar canvis morfològics interanuals més generals en la totalitat de la zona d'estudi.

Els perfils topo-batimètrics són una eina que permet estudiar els processos que afecten la costa, com l'erosió costanera, la sedimentació, l'acció de les onades i els corrents marins. Són essencials per analitzar l'evolució i els canvis en el temps, ja que ajuden a predir possibles perills naturals i a dissenyar mesures de protecció costaneres.

Per un altre banda, els mapes de diferències d'elevació anuals permeten detectar canvis morfològics a nivell de superfície i fer un monitoratge de quina és l'evolució temporal d'una àrea determinada pel que fa a la seva morfologia. És una eina de gran utilitat per aquelles platges on s'han dut a terme actuacions "dures", com la construcció d'un espigó, i es vol fer un seguiment de quin és l'impacte de l'actuació en el morfo-dinamisme local.

Per al desenvolupament d'aquest treball es considera prioritari alinear-se dintre de la perspectiva dels Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS). S'analitza l'impacte de l'erosió costanera en diversos aspectes relacionats amb els ODS, com la conservació dels ecosistemes marins i costaners (ODS 14), la protecció de les infraestructures i les comunitats costaneres (ODS 9 i 11), l'adaptació al canvi climàtic (ODS 13), entre d'altres. A més, es destaquen les oportunitats i les estratègies per abordar la vulnerabilitat del litoral de manera integrada i sostenible, en línia amb l'Agenda 2030.

La justificació de la investigació científica sobre l'erosió litoral en la base dels objectius de desenvolupament sostenible rau en la necessitat d'abordar aquest desafiament des d'una perspectiva integral i sostenible. En considerar els ODS relacionats, com ara l'ODS 14, 9, 11 i 13, podem impulsar solucions i estratègies que promoguin la conservació dels ecosistemes costaners, la protecció de les infraestructures i les comunitats, i l'adaptació al canvi climàtic, contribuint així a l'èxit de l'Agenda 2030.

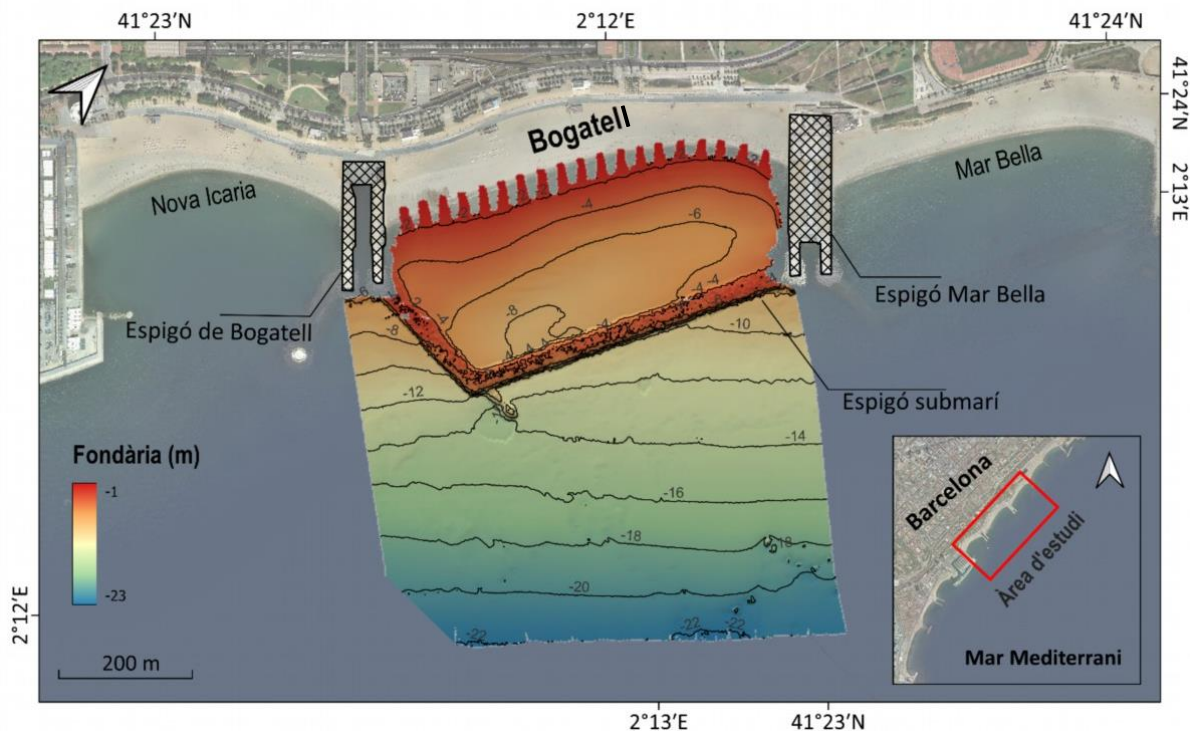
## **Zona d'estudi: Platja de Bogatell**

Durant la Barcelona del segle XX, bona part de la línia costanera estava ocupada per activitats portuàries i industrials. Tot i això, amb la celebració dels Jocs Olímpics l'estiu de 1992, la ciutat va experimentar una transformació significativa. Es va dur a terme un projecte de renovació urbana que va incloure la recuperació de les platges i la seva integració a la vida quotidiana dels barcelonins i al creixent sector turístic. Es van realitzar

grans obres per netejar i incrementar el valor de les platges de la ciutat. Van fer-se aportaments de sorra d'altres zones per eixamplar i estendre les platges existents, creant així una costa més àmplia i atractiva.

Les platges de Barcelona han patit una transformació morfològica, passant d'un escenari històric d'àmplies platges obertes dominades pel transport longitudinal, a petites platges encaixades per estructures de protecció costanera, on conseqüentment dominen els processos de basculació de sediment. Les platges de la ciutat presenten una regressió durant els últims 20 anys, deguda al seu balanç sedimentari negatiu causat per l'absència d'aportacions naturals de sediment (Guillén & Simarro, 2022).

La platja de Bogatell ( $41^{\circ}23'38.42''N$ ,  $2^{\circ}12'25.40''E$ ), situada en el entorn urbà de la ciutat de Barcelona, és la platja que ens ocupa en aquest treball (Figura 1). Contigua amb la platja de Nova Icaria i la Mar Bella, es troba encaixada per dos espigons: l'espigó de Bogatell i l'espigó de la Mar Bella, localitzats al sud-oest i al nord-est respectivament. Alhora, disposa d'un espigó submergit, situat a 250 m de la línia de costa i paral·lel a aquesta, amb una longitud total de 458 m (Figura 1). És una platja de sorra amb una longitud total de 625 m, una amplada mitja de 32 m i una superfície total de 18.676 m<sup>2</sup>. Presenta una profunditat de tancament de 6.35 metres, entesa com aquella profunditat a partir de la qual l'acció de l'onatge deixa de ser una component significativa en el transport de sediment d'una platja o zona costanera particular (CIIRC, 2010). Presenta una distribució mitjana de la mida de gra de 390  $\mu\text{m}$  (CIIRC, 2010) i un comportament evolutiu de naturalesa erosiva, amb una pèrdua anual de 2.4 metres de línia de costa durant el període 1995-2004 (CIIRC, 2010).



**Figura 1** Zona d'estudi. Batimetria amb isòbates amb una equidistància de 2 metres. Font de dades: Ortofoto de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) 2022. Model Digital del Terreny obtingut a partir de la campanya batimètrica del octubre de 2022, proporcionada per l'Ajuntament de Barcelona

Pel que fa a les condicions hidrodinàmiques de la zona, la component mareal és poc determinant en aquesta part del Mediterrani, convertint l'onatge en la força hidrodinàmica principal. L'altura d'ona significativa mitjana és de 0.72 m (estadística obtinguda a partir de la boia II de Barcelona, pel període 2003-2022, del portal web *Puertos del Estado*) amb altures significatives màximes que poden superar els 7 m.



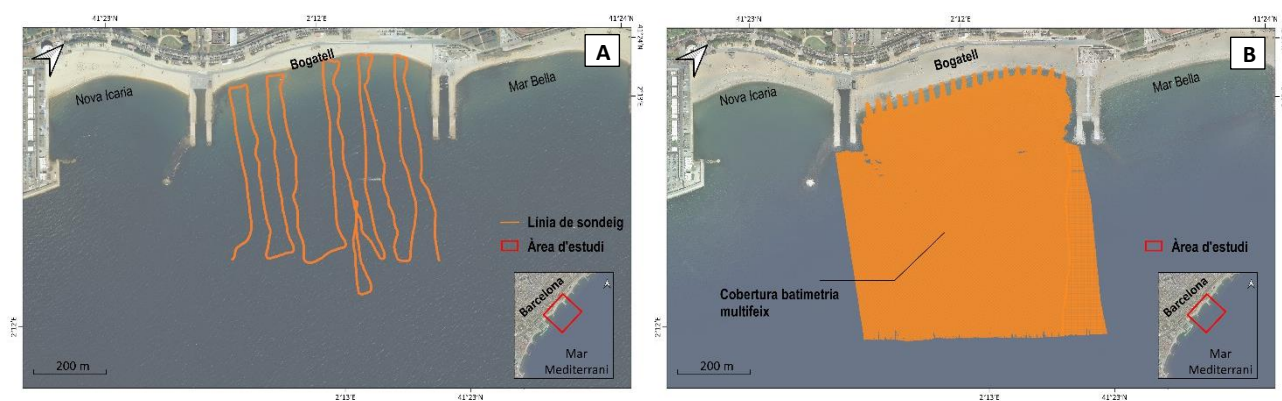
Per contrarestar la tendència erosiva de la platja s'han efectuat diferents regeneracions artificials de sorra els últims vint anys. La més important va ser l'any 2010, quan es va produir un important aportament artificial de sediment de 70.000 m<sup>3</sup>. A més, a l'any 2011 es va construir un espigó submergit paral·lel a la platja, tancant tot el seu perímetre (Figura 1). Aquestes mesures van efectuar-se amb l'objectiu de frenar la creixent pèrdua de sediment que patia la platja. Posteriorment, s'ha observat una basculació estacional de la platja, cap a ponent a l'estiu i a llevant a l'hivern, i un canvi de pendent del fons i acumulació de sorra en la base del dic, el què feia perdre alçada efectiva als dics (Barcelona Regional, 2016).

A la Figura 1 es mostra la platja de Bogatell analitzada en aquest estudi, amb una cobertura topo-batimètrica corresponent a la campanya oceanogràfica realitzada per Barcelona Regional l'any 2022.

## Fonts de dades: Campanyes topo-batimètriques

Les dades topo-batimètriques de l'Ajuntament de Barcelona han sigut proporcionades per Barcelona Regional. L'adquisició de les dades topogràfiques associades a la platja emergida, s'han obtingut a partir d'un Sistema de Posició Global (GPS) operat per un topògraf des de terra. Per altre banda, per a l'adquisició de dades batimètriques es va utilitzar un sistema de batimetria mono-feix embarcat en un vaixell pel període 2003-2009, i multi-feix pel període 2010-2022.

El sistema de batimetria mono-feix és una tècnica utilitzada per mesurar la profunditat de la columna d'aigua i caracteritzar la morfologia del fons marí. El terme "mono-feix" fa referència al fet que aquest sistema utilitza un sol feix de so per realitzar els mesuraments. Tot i que el sistema de batimetria mono-feix ha sigut àmpliament utilitzat i proporciona informació valuosa sobre la topografia del fons marí, la principal limitació és que només pot obtenir mesuraments en una línia directa des del transductor cap al fons (Figura 2A). Això significa que per cobrir una àrea més àmplia, són necessàries múltiples línies de mesurament, cosa que pot portar temps i requerir un mapeig minuciós. Per a àrees més grans i mapeigs més detallats, s'utilitzen sistemes de batimetria multi-feix (Figura 2B) que són més ràpids i precisos, ja que utilitzen múltiples feixos per a la captació de dades i per tant l'abast dels mesuraments es més ampli.



**Figura 2** A) Línia de sondeig per a la campanya batimètrica de mono-feix de l'any 2005. Mapa base: ortofotografia ICGC 2006. B) Cobertura batimètrica multi-feix per la campanya d'octubre de l'any 2022. Mapa base: ortofotografia ICGC 2022.

Per a l'adquisició de les dades topo-batimètriques a partir d'un sistema mono-feix, s'ha deixat un espaiat aproximat de 100 metres. A la figura 2A i 2B pot observar-se la diferència de cobertura que presenten les campanyes mono-feix prèvies a l'any 2010, en comparació a les campanyes multi-feix posteriors a l'any 2009.

La selecció de les campanyes anuals s'ha efectuat en funció de la disponibilitat i qualitat de les dades. Les clapes temporals dins del període 2003-2022 són degudes a una manca de dades o a una mala qualitat d'aquestes.

Les dades de les campanyes topo-batimètriques del període 2003-2015 van adquirir-se en el sistema de referència ED50, mentre que les dades de les campanyes topo-batimètriques del període 2016-2022 van adquirir-se en el sistema de referència ETRS-89. S'ha dut a terme una transformació de les campanyes amb un sistema de referència ED50, al sistema de referència ETRS-89, per tal de visualitzar i treballar amb les dades del projecte en un mateix sistema de referència (veure Taula 1).

<b>Campanyes Topo-Batimètriques: Bogatell</b>				
Any	Mes	Sistema d'adquisició	DATUM	Resolució (m)
2003	Novembre	Monofeix	ED50	-
2006	Novembre			-
2007	Juny			-
2010	Juliol			10
2011	Juliol			10
2012	Març			10
2013	Septembre			10
2014	Octubre	Multifeix	ETRS89	1
2015	Octubre			1
2016	Octubre			1
2017	-			1
2018	Octubre			1
2019	Octubre			1
2020	Septembre			1
2021	Septembre			1
2022	Octubre			1

**Taula 1.** Característiques de les campanyes topo-batimètriques

Cal destacar la diferència de resolucions entre les dades de batimetria multi-feix relatives al període 2010-2022, on les dades del sub-període 2010-2013 presenten una resolució de deu píxels per metre, mentre que les dades del període 2014-2022 presenten una resolució d'un píxel per metre (veure Taula 1).

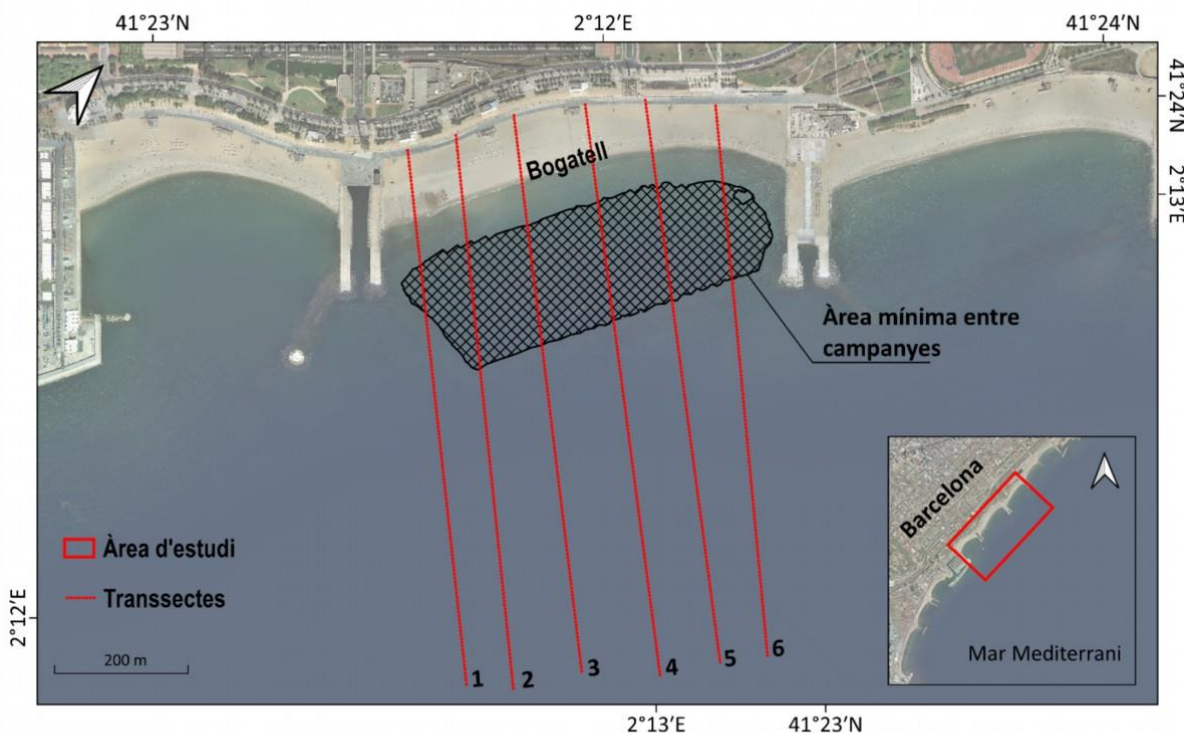
Les ortofotografies utilitzades com a mapa base han sigut proporcionades per l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC).

## Metodologia

S'ha dut a terme un anàlisi de les variacions morfològiques de la platja de Bogatell pel període 2003-2022, mitjançant eines SIG, concretament el programari de lliure ús QGIS.

Per dur a terme aquest anàlisi s'han emprat dues metodologies: una metodologia per transsectes de la que s'obté com a producte perfils de platja al llarg del temps (Figura 3), i una comparativa de tota la superfície de la platja submergida aplicada a les batimetries multi-feix, de la que s'obté com a producte mapes de diferències de profunditat (Figura 3).

Les diferències topo-batimètriques s'han calculat en el àrea comú per a totes les campanyes a partir de la digitalització d'una màscara que estableix l'àrea mínima d'anàlisi entre campanyes (Figura 3).



**Figura 3** Representació dels transectes emprats per a la metodologia d'anàlisi per perfils de platja, i de l'àrea mínima entre campanyes emprada per a la metodologia d'anàlisi per diferències de profunditat. Mapa base: ortofotografia ICGC 2022.

### Anàlisi per perfils de platja

En primer lloc, mitjançant QGIS, s'han digitalitzat sis perfils teòrics amb un espai aproximat de 100 m. Per a la digitalització dels perfils, es va seguir com a criteri cercar la màxima proximitat possible entre les dades de les campanyes batimètriques i els perfils teòrics, de manera que la distància entre les dades de les campanyes i els perfils fos mínima. Aquests perfils teòrics es van digitalitzar mitjançant una eina de geo-processament anomenada 'Generar punts' que converteix les línies en punts amb una equidistància de 1 m.

En segon lloc, es va fer servir un script per trobar la distància mínima entre els punts de les campanyes i els transectes digitalitzats, assignant el valor de profunditat dels punts topo-batimètrics més propers, als punts dels perfils teòrics. L'script utilitzat es basa en llenguatge Python i ha estat desenvolupat pel Departament de Geociències Marines del Institut de Ciències del Mar. L'script trasllada les profunditats dels punts més pròxims al perfil generant una sèrie de punts amb informació batimètrica distribuïda de forma no homogènia al llarg del perfil. Una vegada traslladats els valors de profunditat al perfil, s'interpolava entre els punts per obtenir una distribució de punts homogènia al llarg del perfil amb una equidistància de 1 m. Finalment, l'script interpola el valors de profunditat entre els punts dels transectes teòrics, per tal de convertir aquests punts que formen els transectes en seccions contínues en els eixos XYZ.

El producte final d'aquest anàlisi són 6 perfils de platja al llarg del període 2003-2022. Abans de representar gràficament els transectes en forma de seccions topo-batimètriques, s'ha dut a terme un processat de les dades per eliminar aquells valors de profunditat erronis.

Pel càlcul de la variabilitat de les nostres dades temporals al llarg de l'espai s'ha emprat la funció estadística desviació estàndard. Pel càlcul de la tendència evolutiva dels perfils s'ha emprat la funció estadística de la pendent de la recta de regressió lineal formada a partir de les dades de profunditat.

### Mapes de diferència de profunditat

Per l'anàlisi de les diferències de profunditat anuals s'han *rasteritzat* les dades vectorials de batimetria corresponents al període 2010-2022. El període 2003-2009 no s'ha sotmès a aquesta metodologia degut a la naturalesa de les dades mono-feix (Taula 1), ja que no permeten fer un càlcul fiable dels canvis de volum de sediment sense una exagerada interpolació de les dades (veure l'apartat de fonts de dades).

En primer lloc, s'han transformat aquelles campanyes amb un sistema de referència ED50 al sistema de referència ETRS89 per tal de treballar totes les dades amb el mateix sistema de referència i que aquest sigui l'oficial en el moment de l'execució d'aquest treball. Una vegada transformades les dades vectorials, s'han rasteritzat en unitats georeferenciades.

Tot seguit, s'ha fet un càlcul interanual dels canvis d'elevació d'una campanya batimètrica a un altre a partir de l'eina 'calculadora de camp ràster' del programari QGIS, a partir de la qual s'ha restat els ràster de dos anys consecutius, obtenint com a resultat una variació de fondària extrapolable a zones d'erosió on ha sigut negativa, i zones d'acreció on ha sigut positiva.

Per a la representació dels ràster resultants s'ha aplicat una simbologia en la que s'han renderitzat les bandes dels raster en 'pseudocolor mono-banda', per tal de visualitzar-les mitjançant una rampa de colors continua. S'ha escollit una rampa de colors que va del verd al vermell passant per un color neutre. El color verd està associat a aquells punts on s'ha produït una disminució de la fondària (acreció) en el període analitzat, mentre que el color vermell està associat a aquells punts on s'ha produït un augment de la fondària (erosió). El color neutre beix està associat a aquelles zones on la variació de la fondària dins del període analitzat és propera a zero (poca variació), amb un rang de 0.1-(-0.1) metres.

S'han tallat els ràster a partir d'una mascara vectorial sense la superfície de l'espigó, per tal d'eliminar aquests valors 'artificials' corresponents a la pròpia fondària de l'espigó en comptes dels valors de la profunditat del fons marí.

Per a l'obtenció de dades quantitatives a partir dels ràster resultants en primer lloc, s'ha buscat l'àrea mínima comuna entre les campanyes analitzades i s'han suprimit els períodes 2010-2011 i 2011-2012, degut a que reduïen notablement l'àrea mínima entre campanyes. Un cop establerta l'àrea mínima, s'ha aplicat una mascara amb aquesta superfície per a tots els ràster que representen els canvis de profunditat interanuals i s'ha utilitzat l'eina de geoprocessament 'volum de superfície ràster'. A partir d'un algoritme, aquesta eina calcula el volum, l'àrea total i el nombre total de píxels analitzats. Si es fan servir els mètodes 'Compte només sobre nivell base' o 'Compte només sota nivell base', llavors l'àrea i el compte de píxels calculats només inclouen píxels que estan sobre o sota el nivell base especificat respectivament, en el nostre cas el nivell de base és 0, es a dir que no hi ha hagut variació. D'aquesta manera, pot calcular-se els píxels que estan per sobre del nivell de base, corresponents al volum d'acreció, i els píxels que estan per sota del nivell de base, corresponents al volum d'erosió.

## **Resultats: Evolució morfològica**

Com s'ha comentat amb anterioritat, l'estudi de l'evolució morfològica de la platja de Bogatell pel període 2003-2022 s'ha dut a terme a partir de dos anàlisis mitjançant Sistemes de Informació Geogràfica (SIG): 1) Anàlisi a partir de perfils de platja pel període 2003-2022 i 2) Anàlisi a partir de mapes de canvis d'elevació pel període 2010-2022.

### Perfils de platja

Per a l'anàlisi de l'evolució morfològica a partir de perfils de platja, s'ha dividit la franja temporal 2003-2022, en dos sub-períodes: 1) el període previ a la construcció de l'espigó submergit (2003-2011), situant la construcció de l'espigó l'any 2011 com a punt de referència pel final de l'anàlisi d'aquest subperíode; i 2) el període posterior a la



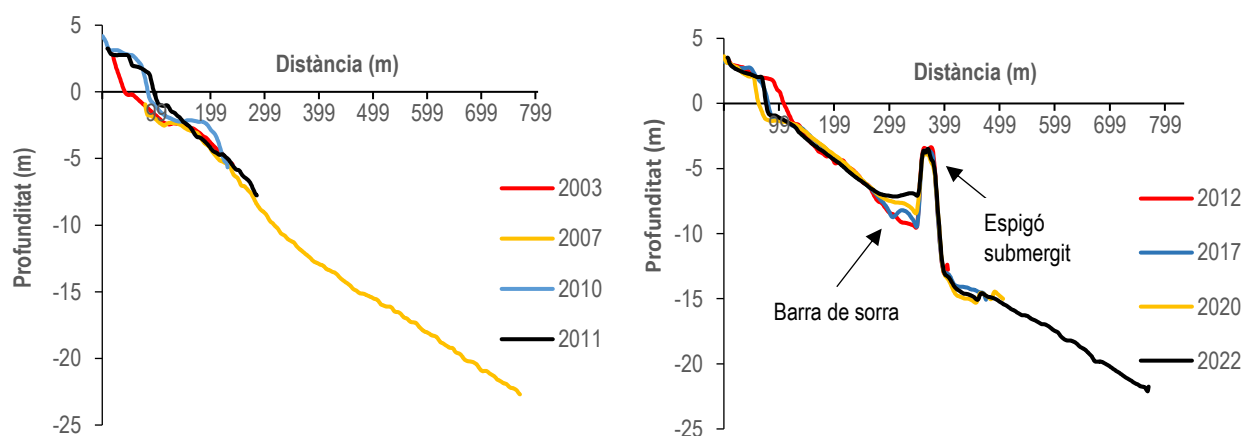
construcció d'aquest mateix espigó (2011-2022). S'ha dividit l'anàlisi a partir d'aquest succés ja que la construcció de l'espigó altera notablement la morfologia del fons marí i cal caracteritzar per separat ambdós períodes, ja que la configuració de la platja canvia totalment.

Els sis transectes es troben numerats del 1 al 6 de SO a NE (veure Figura 3). En els annexos 1 s'exposen tots els perfils de platja descrits a continuació.

Pel període 2003-2011 s'observa una gran variabilitat en els perfils de platja a la zona més proximal, disminuint aquesta variabilitat a mesura que ens allunyem de la línia de costa. A partir dels tres metres de fondària, s'observa l'acumulació de sediment en forma de barres naturals, especialment evident en els transectes 2, 3 i 4 (Annexo 1).

L'any 2010 s'observa un increment en l'acumulació de sediment, tant a la platja emergida en els primers 50 metres de perfil, i a la zona més distal del perfil a 100 metres de la línia de costa. Aquesta acumulació es deguda a l'obra d'aportament de sediment realitzada l'any 2010 a la platja de Bogatell amb un total de 70.000 m<sup>3</sup> de sorra. L'any 2011 s'observa la redistribució del material aportat l'any 2010, veient-se reflectit en el retrocés de la línia de costa i en la variabilitat dels perfils durant aquests períodes. La construcció de l'espigó submergit l'any 2011 marca el final del sub-període 2003-2011 analitzat.

En el període 2011-2022 s'observa un retrocés en els perfils de platja corresponents a la platja emergida. A 350 m de distància al llarg dels transectes, s'observa una acumulació de sediment al peu de l'espigó submergit (Figura 4). Passat l'espigó submergit, l'evolució dels perfils és més estable i no s'observa una variació significativa.



**Figura 4** Perfils de platja del transecte 2 pel període 2003-2011 a l'esquerra i pel període 2012-2022 a la dreta. En el període 2012-2022 s'observa l'acumulació de sediment al peu de l'espigó submergit

La desviació típica ens dona informació sobre la variabilitat dels perfils al llarg del període analitzat. La variació anual ens permet veure quina és la tendència evolutiva al llarg dels perfils. En els annexos 2 es representa la desviació típica i la variació anual dels perfils, pel període 2003-2022, pels 6 transectes analitzats. En els primers 60 metres dels transectes trobem valors màxims de 1.5 m en la variabilitat dels perfils i taxes amb un guany de 0.17 m/any en els perfils corresponents a la platja emergida (Figura 5). Aquesta elevada variabilitat a fondàries baixes de menys de 3 metres esta associada a barres naturals de sorra. Aquestes barres són obliqües a la línia de costa, amb l'extrem nord més pròxim a la costa.

A mesura que ens allunyem de la línia de costa, la variabilitat dels perfils disminueix conjuntament amb la taxa de variació anual (pròxima a zero). Al aproximar-nos a l'espigó submergit, trobem un segon màxim en la variabilitat

dels perfils i en les taxes de variació anuals, amb un guany pròxim als 0.15 m/any. Aquest augment de la variabilitat és deguda a la presència de l'espigó submergit, que acumula el sediment en la seva base.

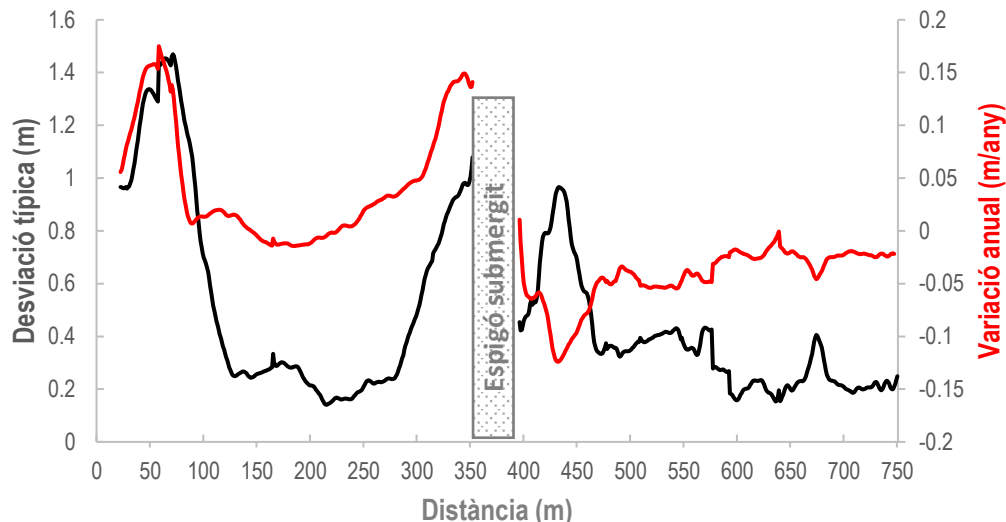


Figura 5 Desviació típica i variació anual dels perfils de platja pel transecte 2 en el període 2003-2022

#### Mapes de diferència de profunditat

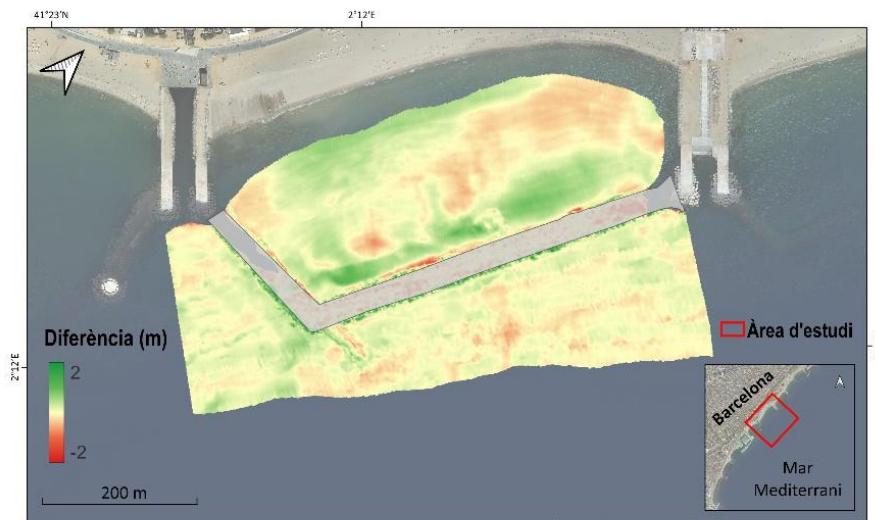
Els mapes on es representen els canvis d'elevació pel període 2010-2022 s'exposen a l'Annex 3. Recordar que, s'ha fet una comparativa anual a partir de batimetries, on les zones de color verd estan associades a una disminució de la profunditat (acreció), mentre que les zones de color vermell estan associades a un augment de la profunditat (erosió).

- En el període 2010-2011 s'observa una zona d'erosió pròxima a l'espigó de la Mar bella situat al nord-est, que incrementa en aproximar-se a la línia de costa. A la resta de la platja, a mesura que ens aproximem a la línia de costa, observem una zona d'acreció.
- En el període 2011-2012 s'observa una zona d'erosió pròxima a la línia de costa i una absència de zones d'acreció.
- En el període 2012-2013 s'observa una zona d'erosió pròxima a l'espigó de la Mar Bella situat al nord-est. S'observa una zona d'acreció al sud-oest pròxima a la línia de costa.
- En el període 2013-2014 s'observa una zona d'acreció al nord-est pròxima a la línia de costa i una zona d'erosió pròxima a la línia de costa al sud-oest.
- En el període 2014-2015 s'observa una zona d'erosió resseguint el perímetre de la línia de costa. S'observa una zona d'acreció pròxima a l'espigó submergit, resseguint el seu perímetre.
- En el període 2015-2016 s'observa una zona d'erosió al sud-oest pròxima a la línia de costa.
- En el període 2016-2017 s'observa una zona d'acreció pròxima a la paret interna de l'espigó submergit, resseguint el seu perímetre. S'observa una zona d'erosió al nord-est pròxima a la línia de costa.
- En el període 2018-2019 s'observa una zona d'erosió al sud-oest pròxima a la línia de costa.
- En el període 2019-2020 s'observa una zona d'erosió al nord-est, pròxima a la línia de costa. S'observa una zona d'acreció pròxima a la paret interna de l'espigó submergit, resseguint el seu perímetre. A 300 metres de la línia de costa s'observen zones erosives per darrere de l'espigó submergit.

- En el període 2020-2021 s'observa una zona d'acreció pròxima a la paret interna de l'espigó submergit, resseguint el seu perímetre. S'observa una zona d'acreció al sud-oest pròxima a la línia de costa.
- En el període 2021-2022 s'observa una zona d'erosió al sud-oest pròxima a la línia de costa. S'observa una zona d'acreció pròxima a la paret interna de l'espigó submergit, resseguint el seu perímetre.

En les tendències generals del període 2010-2022 analitzat, s'observa una basculació interanual de la platja, i l'acumulació de sediments al peu de l'espigó submergit, especialment en el període interanual 2016-2017 (Figura 6). L'alçada d'aquesta acumulació de sorra va incrementant anualment fins l'any 2022.

### 2016-2017



**Figura 6** Diferència de profunditat pel període 2016-2017. Es representa en verd la superfície corresponent a aquelles zones on s'ha produït un guany en sediment (pèrdua de fondària) i en vermell la superfície on s'ha produït una pèrdua de sediment (increment de fondària)

La Taula 2 recull els valors d'acreció, erosió i el balanç anual pels períodes interanuals analitzats dins del període 2012-2022. La tendència general en la variació anual del volum de sediments és positiva, amb un guany de sediments de 1426 m<sup>3</sup>/any. Destaquen els períodes 2012-2013, 2015-2016, 2018-2019 i 2019-2020 per presentar un balanç anual negatiu amb pèrdues de volum de sediments. El balanç net negatiu corresponent al període 2012-2013 correspon a un període de temporals (Barcelona Regional, 2016). El balanç negatiu del període 2019-2020 correspon amb l'acció del temporal Gloria, el més energètic que ha impactat sobre el litoral català. En el període 2020-2021 s'observa una recuperació amb un balanç net positiu.

### Variació de volum anual

Període anual	Volum (m <sup>3</sup> )		
	Acreció	Erosió	Balanç
2012-2013	6480	23965	-17485
2013-2014	7278	5784	1494
2014-2015	7352	5663	1689
2015-2016	1618	6363	-4745
2016-2017	15596	5826	9770
2017-2018	15163	1272	13891
2018-2019	3213	7753	-4540
2019-2020	11631	13135	-1504
2020-2021	11874	1647	10227
2021-2022	10909	7793	3116
<b>Tendència (m<sup>3</sup>/any)</b>	<b>1426</b>		

**Taula 2.** Anàlisi de la variació interanual de volums a partir de les dades de variació de profunditat

## Discussió

Les platges de les ciutats costaneres a la Mar Mediterrània experimenten una aflluència turística significativa, cosa que resulta en un impacte considerable a causa de l'activitat humana. Un exemple destacat és Barcelona, on les platges constitueixen un dels atractius més grans de la ciutat. En els darrers anys, s'han fet esforços per preservar aquest apreciat recurs, altament valorat pel sector turístic. La gestió de les platges barcelonines s'orienta cap a l'optimització de l'espai disponible pels banyistes, assegurant-ne l'ús per a fins recreatius, i alhora salvaguardant les infraestructures urbanes a l'abast de l'acció de l'onatge i els temporals. Això inclou la protecció del passeig marítim i una varietat d'establiments de restauració que es troben a prop de la platja.

La platja de Bogatell, localitzada a la ciutat de Barcelona, esdevé un exemple de platja urbana on s'han implementat diverses estratègies de gestió costanera per contrarestar la disminució progressiva de la seva superfície funcional. Entre les mesures adoptades s'inclouen la construcció de dos espigons que encaixen a la platja, la construcció d'un espigó submergit que tenca el seu perímetre i l'execució d'obres d'aportació de sediment per recuperar la superfície perduda al mar. Aquestes iniciatives tenen com a fi segmentar la línia costanera i disminuir el desplaçament de sediment entre les platges urbanes, accions que resulten en una reducció de l'energia de l'onatge.

En les últimes dècades s'ha posat de manifest com aquestes accions han canviat de manera dràstica la configuració costanera de la platja (Ojeda & Guillén., 2006; Barcelona Regional 2016; Guillén i Simarro, 2022), veient-se clarament reflectit en els perfils topo-batimètrics analitzats en aquest treball.

Els aportaments artificials de sediment poden ser una mesura de regeneració útil si es combina amb d'altres mesures de protecció "dures" com poden ser la construcció de dics. Després d'una regeneració, la platja presenta una tendència erosiva fins arribar a una situació d'equilibri. La platja emergida pateix una ràpida pèrdua de superfície que s'alenteix fins arribar a una situació d'equilibri (Guillén i Simarro, 2022). Aquest fenomen s'ha vist reflectit en l'anàlisi dels perfils de platja i els canvis de volum posteriors a l'aportament artificial de sediment realitzat l'any 2010, observant-se el retrocés de la línia de costa i la pèrdua de superfície de la platja seca.

La construcció de l'espigó submergit l'any 2011, va produir la desaparició de les barres naturals i la seva funció com a elements dissipadors de l'energia de l'onatge va ser substituïda parcialment pel mateix dic (Guillén i Simarro, 2022). A partir dels informes de Barcelona Regional (2016) i l'anàlisi d'aquest treball, s'ha observat l'acumulació de sediments en la base de l'espigó submergit. Aquesta acumulació de material ha resultat en una disminució del pendent de platja i conseqüentment, en una possible alteració del comportament morfodinàmic de

la mateixa. Aquest treball posa en manifest la necessitat de mesures paliatives, com la mobilització artificial de sediment, per prevenir el rebliment de l'estructura i alimentar la superfície de platja seca en retrocés amb aquest material acumulat a la base de l'espigó.

Els espigons submergits com a mesures de protecció costanera són una opció interessant, ja que mantenen la funció de protecció però redueixen l'impacte paisatgístic que suposa la seva presència en una platja afectada notablement pel sector turístic (Silva et al., 2017). Tot i això, cal fer un seguiment, i manteniment si escau, de l'evolució d'aquesta estructura en un ambient morfo-dinàmicament actiu.

Els perfils de platja i els mapes de canvis d'elevació són productes cartogràfics de gran utilitat per a la monitorització d'elements de protecció costanera com ho són els dics (Short, 2006). Juguen un paper crucial en la gestió costanera en proporcionar informació detallada sobre la forma i morfologia d'una platja. Esdevenen una eina crucial per detectar tendències d'erosió o acumulació de sediments i prendre mesures preventives o correctives en resposta a aquests canvis. Alhora proporcionen informació essencial per planificar i dissenyar estructures costaneres, com ara dics, espigons, passejos marítics i altres elements de protecció costanera. La comprensió de la forma de la platja i la dinàmica ajuda a determinar la ubicació i les dimensions adequades d'aquestes estructures. Coneixent la forma de la platja i com canvia amb el temps, es poden identificar àrees susceptibles a l'erosió costanera, la inundació i altres riscos naturals. Això és especialment rellevant en la gestió de desastres naturals i en la planificació de respostes d'emergència. La informació que proporcionen és essencial per planificar el desenvolupament urbà i turístic a zones costaneres. Ajuda a determinar àrees adequades per a construcció, així com a preveure la influència del turisme a la línia de costa i la necessitat d'infraestructures recreatives. Tot i això, és una eina que pot presentar certes mancances, ja que les característiques i l'adquisició de les dades han anat evolucionat al llarg del temps, conjuntament amb la seva qualitat. Dificultant un anàlisi a llarg termini amb la mateixa metodologia de treball. La tendència positiva amb un guany de sediment de 1426 m<sup>3</sup>/any (Taula 2) presenta algunes limitacions, ja que el càlcul d'aquesta tendència s'ha efectuat a partir de l'anàlisi de l'àrea mínima entre campanyes, quedant excloses la topografia i part de la batimetria de la platja. Caldria tenir unes dades constants en el espai i el temps.

Els temporals, també coneguts com a tempestes o esdeveniments climàtics extrems, tenen un paper significatiu en la gestió costanera i poden tenir un impacte important en l'erosió costanera (Durán et al., 2016). Són un fenomen que cal analitzar de manera independent, ja que poden reduir dràsticament la superfície de la platja emergida en un curt període de temps. Després d'un temporal acostuma a haver-hi una recuperació natural de la platja, tal i com s'observa després dels períodes erosius analitzats en el treball, com és el cas del temporal Gloria, l'esdeveniment climàtic extremal més gran enregistrat a les nostres costes al gener del 2020 (Sancho-García et al., 2021).

Les platges urbanes com la de Bogatell enfronten desafiaments cada cop més urgents a causa de l'erosió costanera i els impactes del canvi climàtic. Aquests desafiaments inclouen l'augment del nivell del mar, la intensificació de tempestes i temporals i l'alteració dels patrons climàtics. Tot i això, les comunitats costaneres estan implementant estratègies innovadores per fer front a aquests problemes i protegir les seves platges urbanes. Tot i ser una opció complicada en entorns fortament urbanitzats, com és el cas de la platja de Bogatell situada en un nucli urbà densament poblat com Barcelona, la creació o l'enfortiment de barreres naturals, com ara dunes costaneres, ajuda a absorbir l'energia de les onades i a reduir l'erosió. L'ampliació de la zona marítima és una mesura de gran utilitat per mitigar els efectes de l'erosió costanera durant esdeveniments climàtics extrems. Sempre que les condicions siguin adients, cal posar sobre la taula alternatives sostenibles per fer front a l'erosió costanera i deixar de banda actuacions "dures".

## Conclusions

Després d'un anàlisi dels factors interrelacionats que influeixen l'evolució de l'estat morfològic de la platja de Bogatell, és evident que cal una comprensió integral i mesures eficients per abordar aquest desafiament crucial en la gestió costanera. Es destaca la importància d'una acció coordinada i sostenible per preservar i protegir les nostres valuoses zones costaneres en un entorn de canvi climàtic constant. Les conclusions derivades d'aquesta recerca són:



- Canvis significatius en els perfils batimètrics del període 2003-2011 respecte el període 2011-2022 per la implementació d'actuacions com les obres de regeneració i la construcció del dic submergit
- Barres de sorra naturals presents en el subperíode 2003-2011, substituïdes per la construcció de l'espigó submergit
- Recuperació del equilibri morfodinàmic de la platja gràcies a la implementació de les obres de regeneració i la construcció del dic submergit
- Pèrdua parcial del material aportat després d'una obra de regeneració i posterior recuperació de l'equilibri morfodinàmic
- Acumulació de sediment a la base del dic submergit, alterant el pendent de platja i el comportament morfodinàmic de la mateixa
- Tendència positiva en l'àrea analitzada a partir dels canvis de volum en el període 2012-2022 amb un guany de 1426 m<sup>3</sup>/any

Les actuacions implementades fins l'actualitat han mantingut la superfície útil de la platja, tot i que serà necessari un monitoreig i la implementació de noves mesures per pal·liar el creixent nivell del mar a llarg termini i la colmatació del dic submergit a curt termini.

## Bibliografia

- Barcelona Regional, 2016. Seguiment topo-batimètric de les platges de Barcelona. Balanç campanyes maig/octubre 2015-maig 2016. Informe tècnic Ajuntament de Barcelona. 58 p.
- Durán R., Guillén J., Ruiz, A., Jiménez J.A., Sagristà E., 2016. Morphological changes, beach inundation, and overwash caused by an extreme storm on a low-lying embayed beach bounded by a dune system (NW Mediterranean). *Geomorphology* 274, 129-142
- Ojeda, E., Guillén, J. i Ribas, F., 2007. Bar and shoreline coupling in artificial embayed beaches. *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering* vol. 3, 2714- 2725.
- Ojeda E., Guillén J., 2006. Monitoring beach nourishment based on detailed observations with video measurements. *Journal of Coastal Research* 48, 100-106.
- Sancho-García A., Guillén J., Ojeda E., Piccardo D., 2008. Inundación de las playas de Barcelona durante temporales. *Geo-Temas* 10, 583-586.
- Sancho-García A., Guillén J., Ojeda E., 2013. Shoreline reshaping of an embayed beach during storms after protection Works. *GeoMarine Letters* 33, 159-172
- Guillén J., Simarro G., 2022. La dinàmica sedimentària actual de les platges de Barcelona (2021-2020)
- Wright L.D., Short A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology* 56, 93-118
- Sancho-García A., Guillén J., Gracia V., Carlota A., Rubio-Nicolás B., 2021. The Use of News Information Published in Newspapers to Estimate the Impact of Coastal Storms at a Regional Scale. *Journal of Marine Science and Engineering* 9, 497. <https://doi.org/10.3390/jmse9050497>
- Silva, R., Almeida, A., Ribeiro, A., & Castro, M. (2017). Evaluation of design criteria for the rehabilitation of a Portuguese breakwater. *Ocean Engineering*, 133, 36-45.
- Short, A. D. (2006). Beaches and their future. *Geographical Review*, 96(4), 603-611

Pagán, J. I., Aragonés, L., Tenza-Abril, A. J., & Pallarés, P. (2016). The influence of anthropic actions on the evolution of an urban beach: Case study of Marineta Cassiana beach, Spain. *Science of the Total Environment*, 559, 242-255.

José A. Jiménez, Vicenç Gracia, Herminia I. Valdemoro, E. Tonatiuh Mendoza, Agustín Sánchez-Arcilla. Managing erosion-induced problems in NW Mediterranean urban beaches. *Ocean & Coastal Management*, Volume 54, Issue 12, 2011, Pages 907-918, ISSN 0964-5691, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.003>.

Ojeda E. , Guillén J. (2008). *Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches*. *Marine Geology*, 253, 51-62. (doi: 10.1016/j.margeo.2008.03.010)

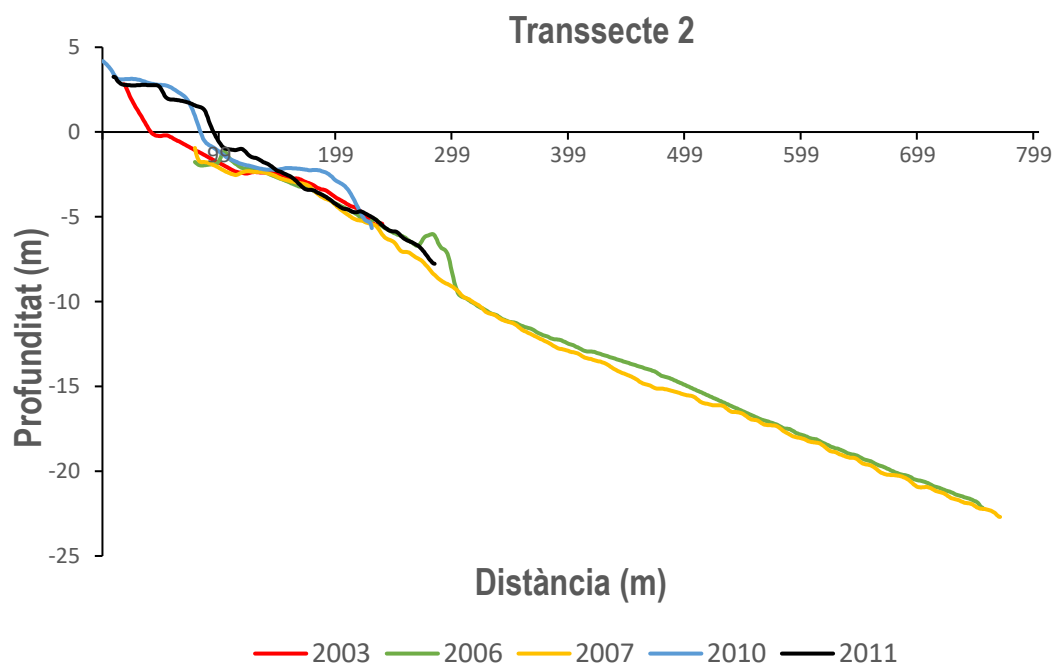
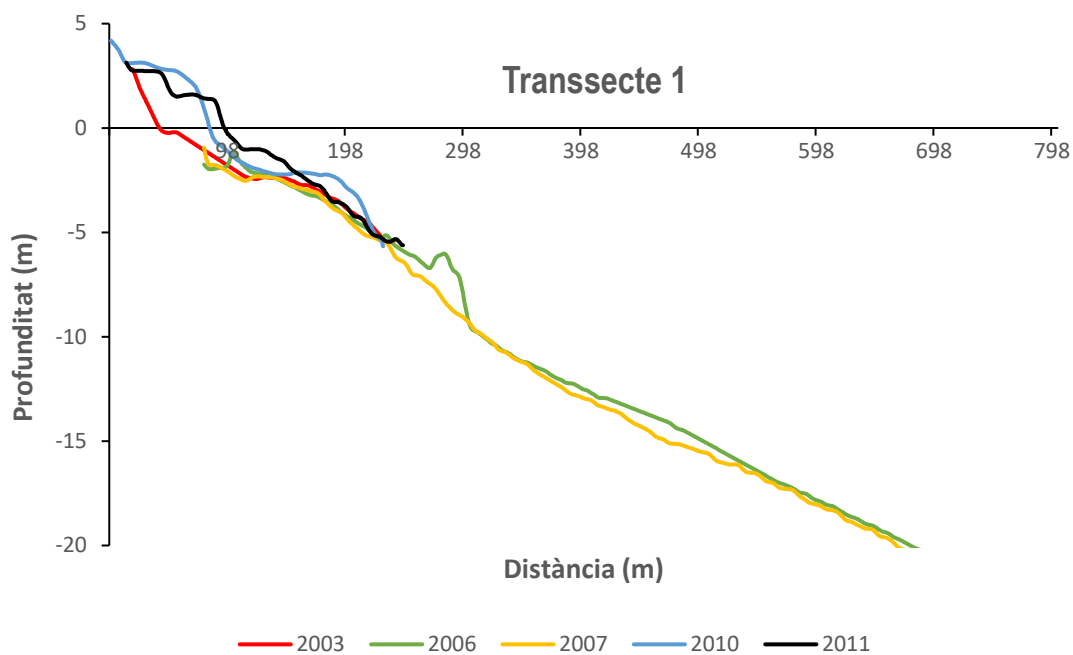
CIIRC. (2010). *Estat de la Zona Costanera a Catalunya*, Departament Política Territorial i Obres Públiques, Barcelona, Availableonline:<<http://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Serveis/Riscos-geologics-i-geotecnica/Dinamicade-la-costa/Llibre-verd-de-l-Estat-de-la-zona-costanera-a-Catalunya-2010>>. (accessed on January 2017).

IPCC. Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 976

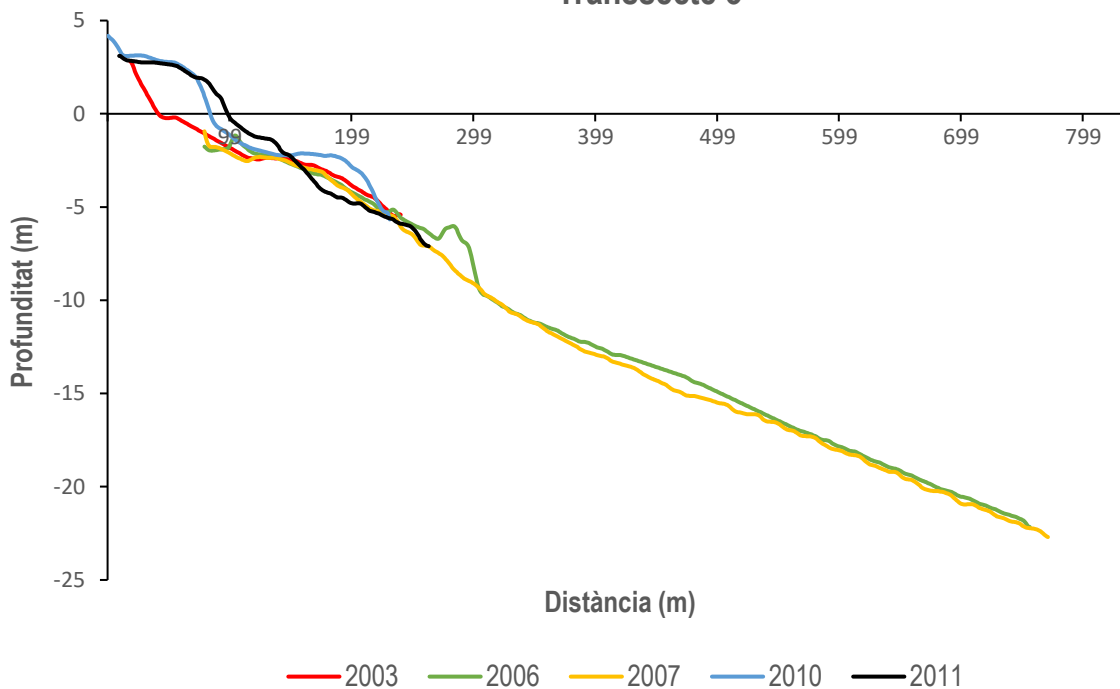
## Annexos

### Annex 1. Perfils de platja

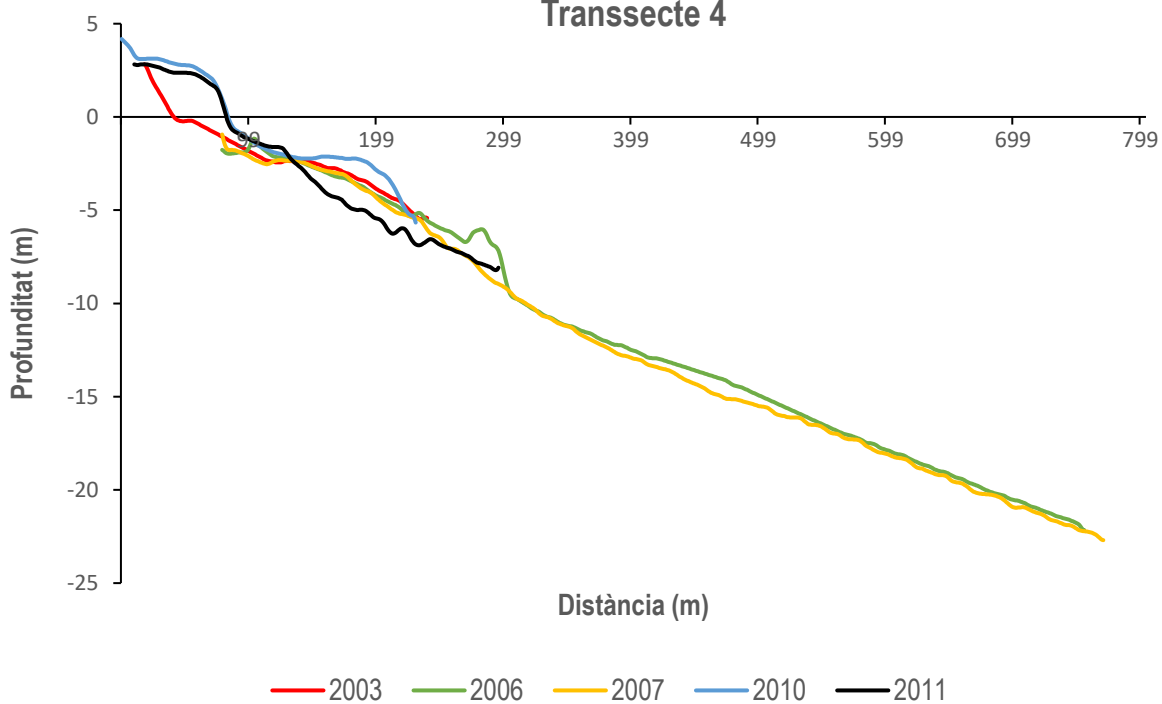
Periode 2003-2010



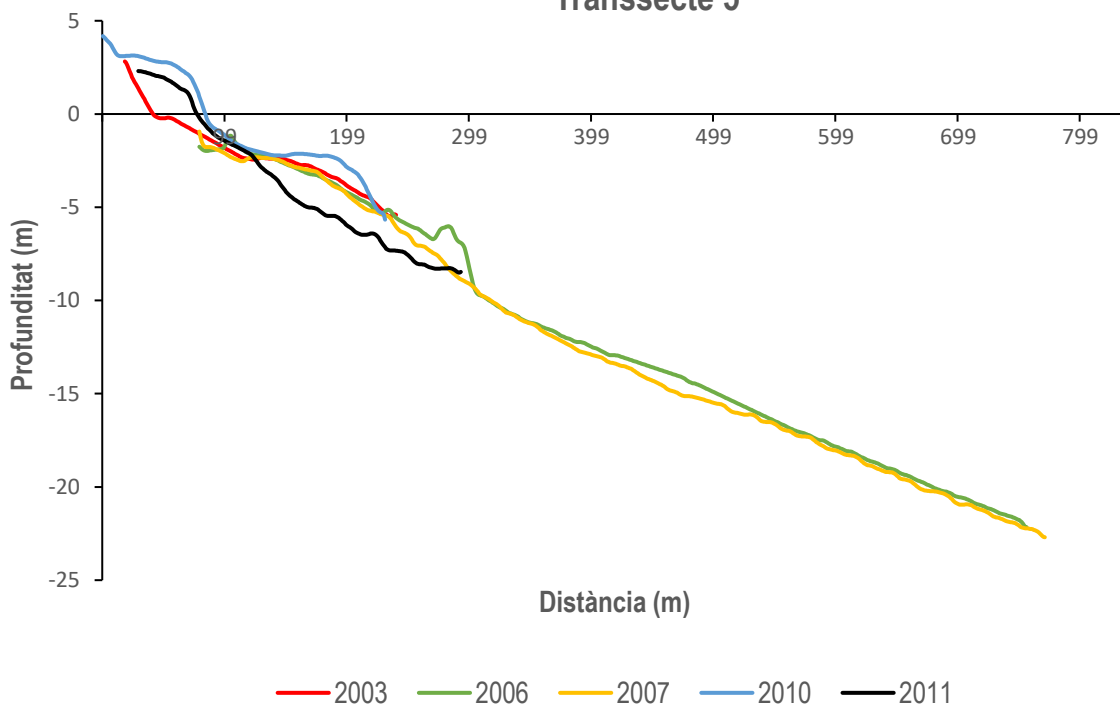
### Transsecte 3



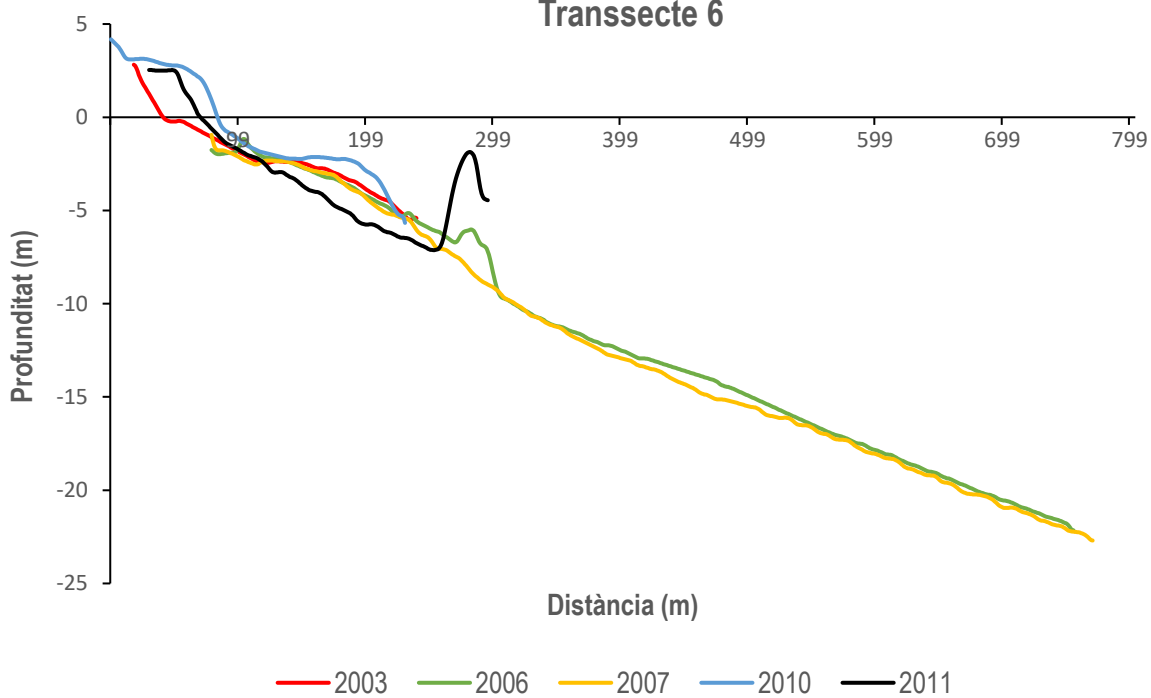
### Transsecte 4



### Transsecte 5



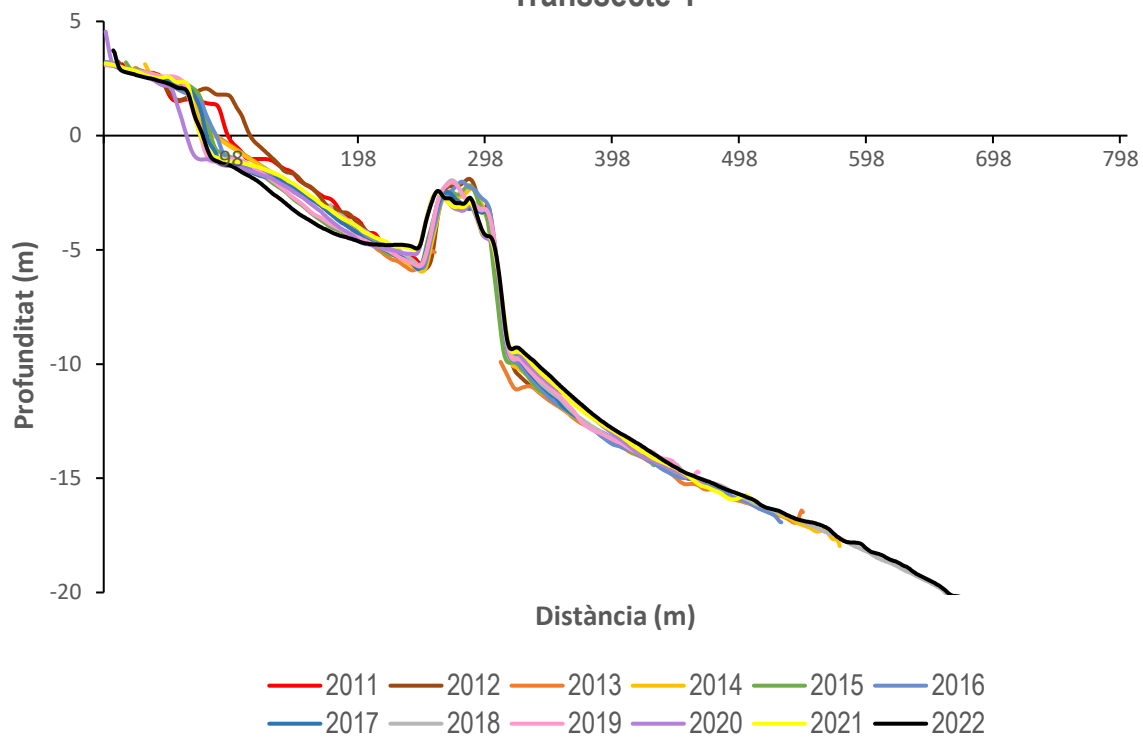
### Transsecte 6



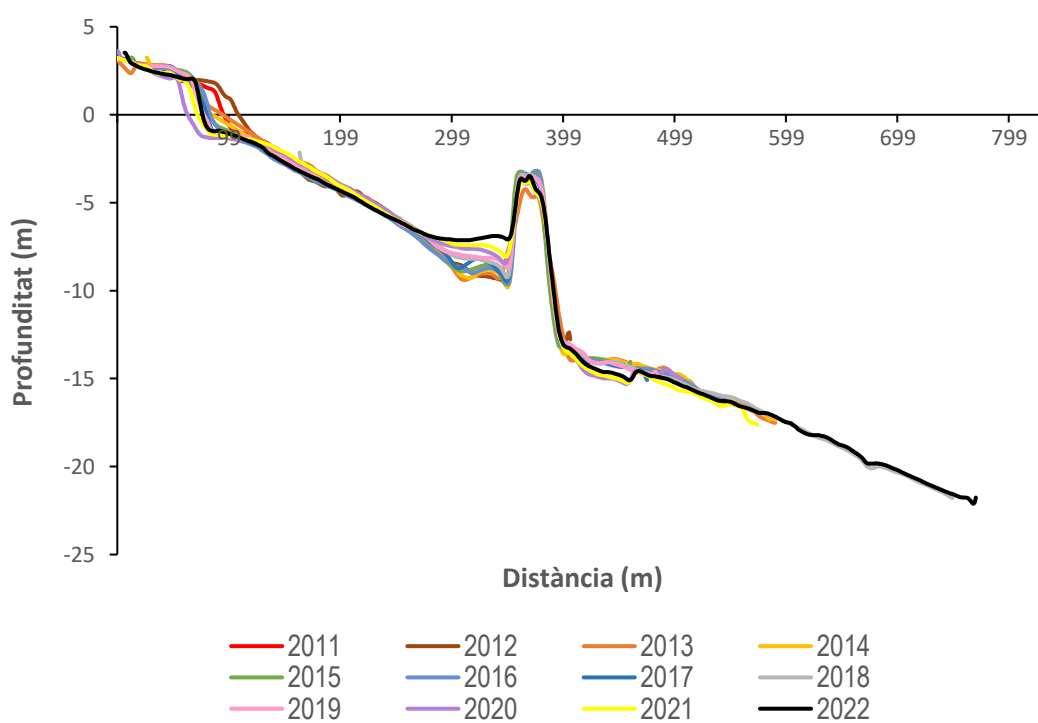


### Període 2011-2022

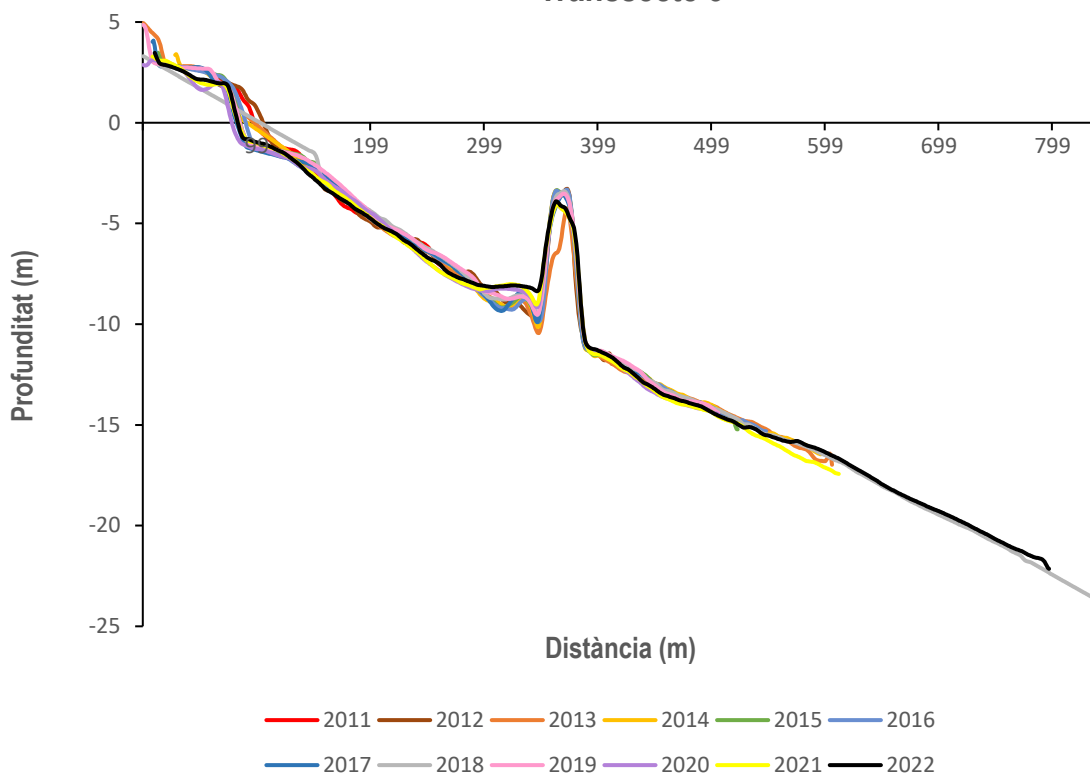
#### Transsecte 1



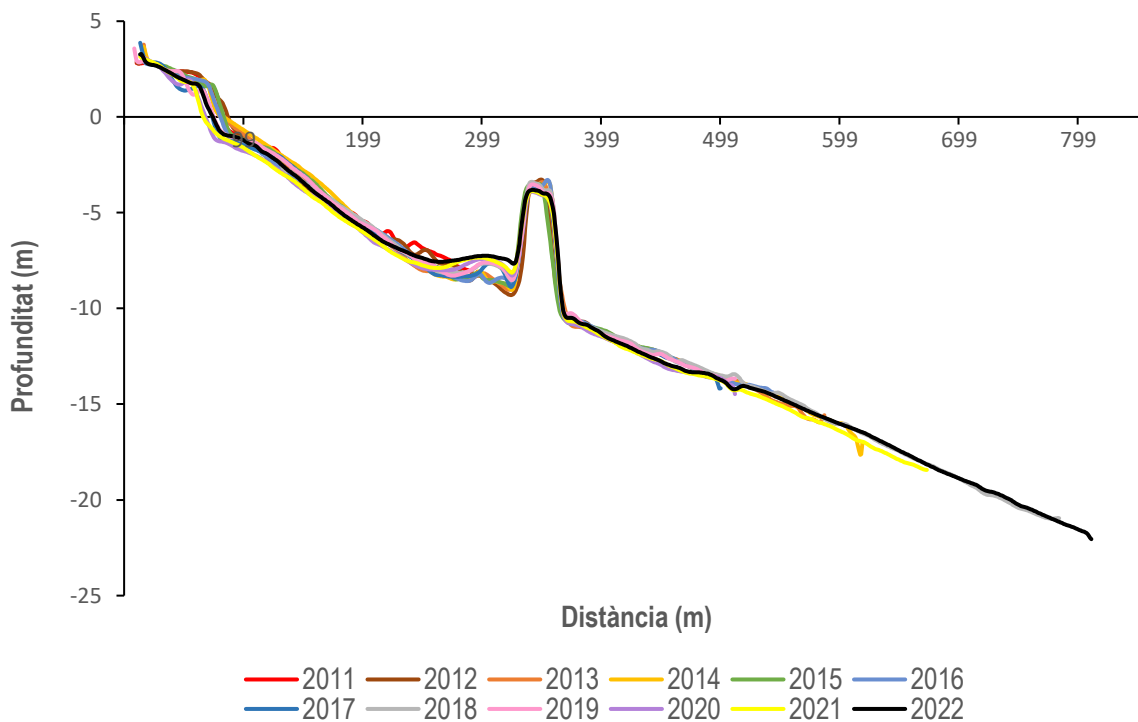
#### Transsecte 2



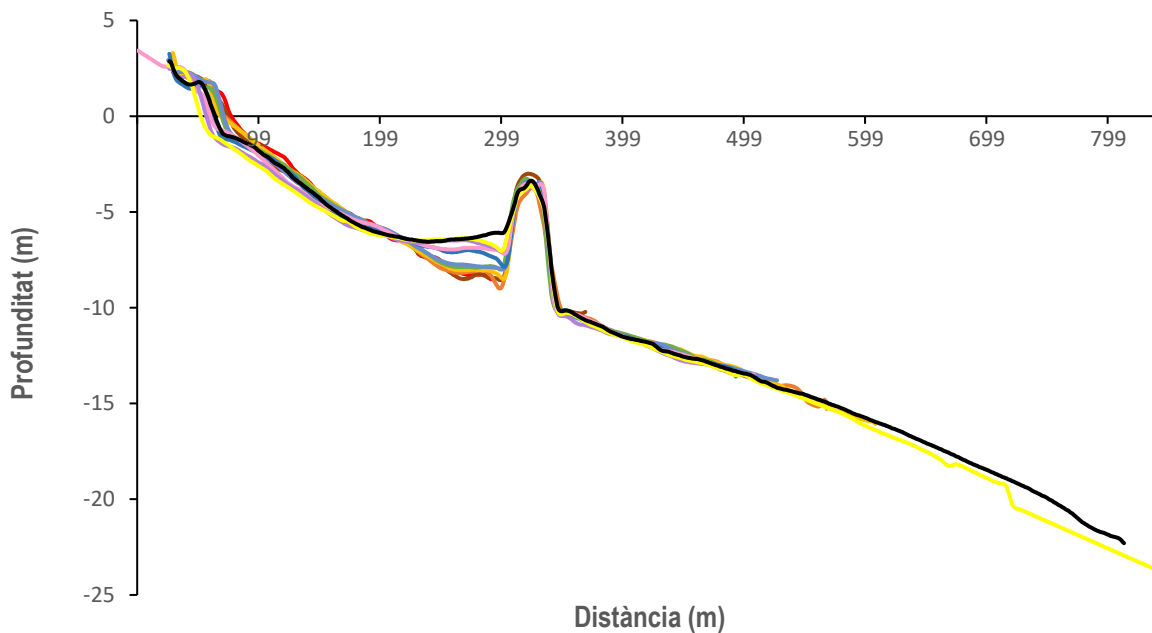
### Transsecte 3



### Transsecte 4

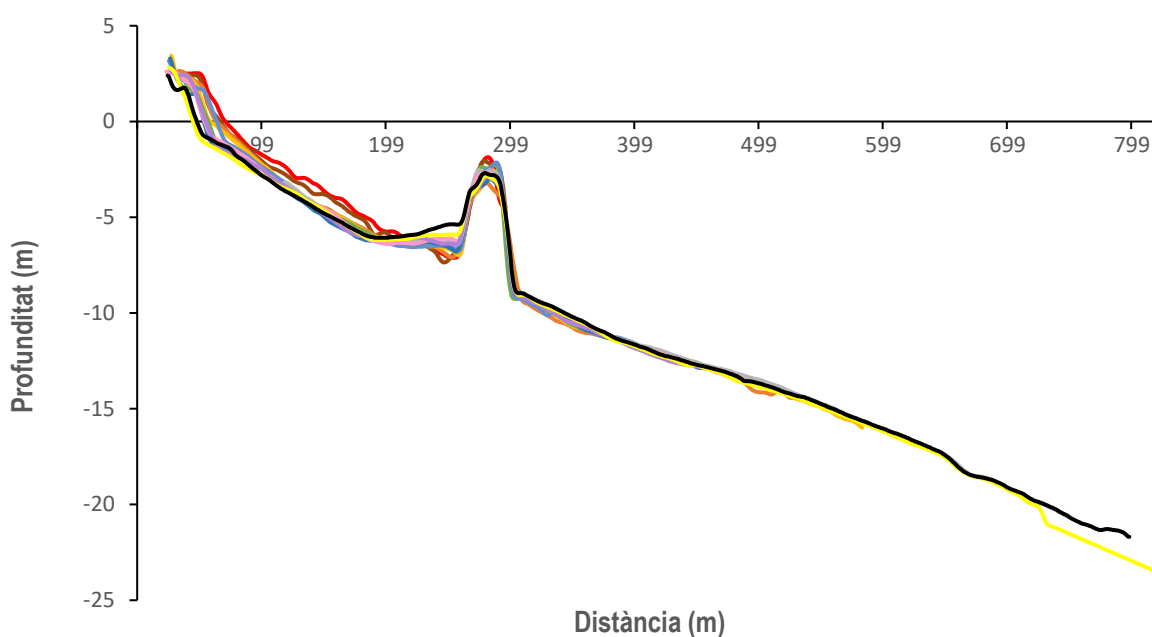


### Transecte 5



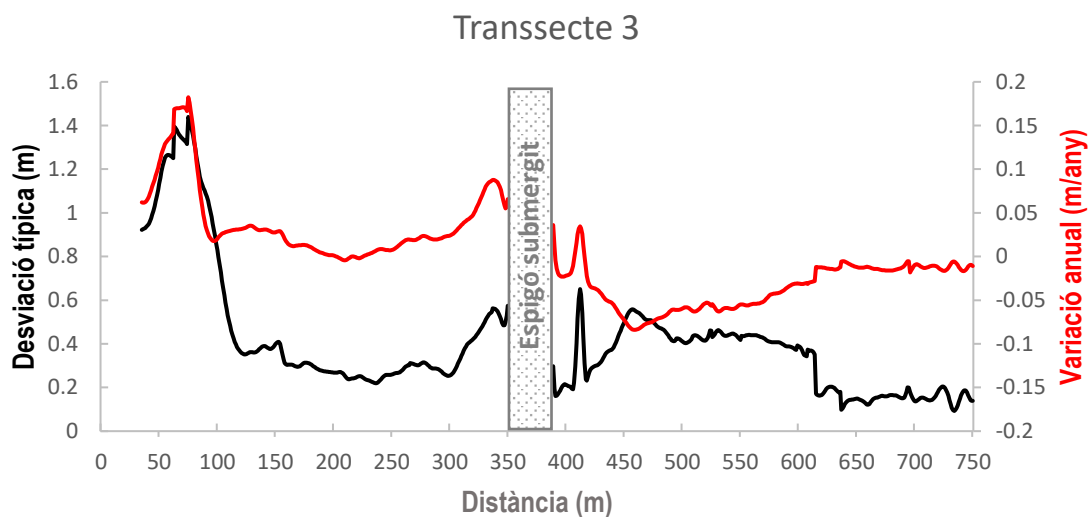
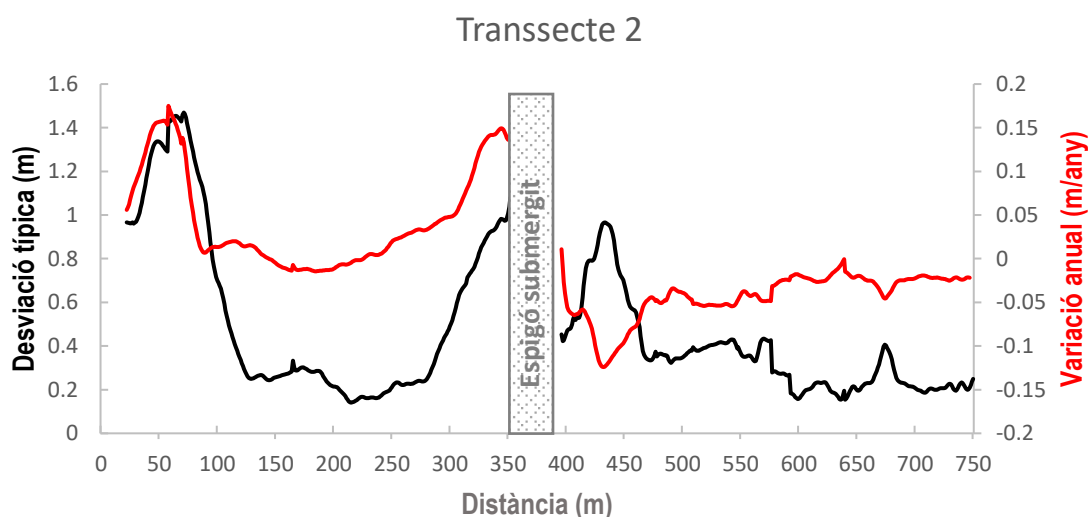
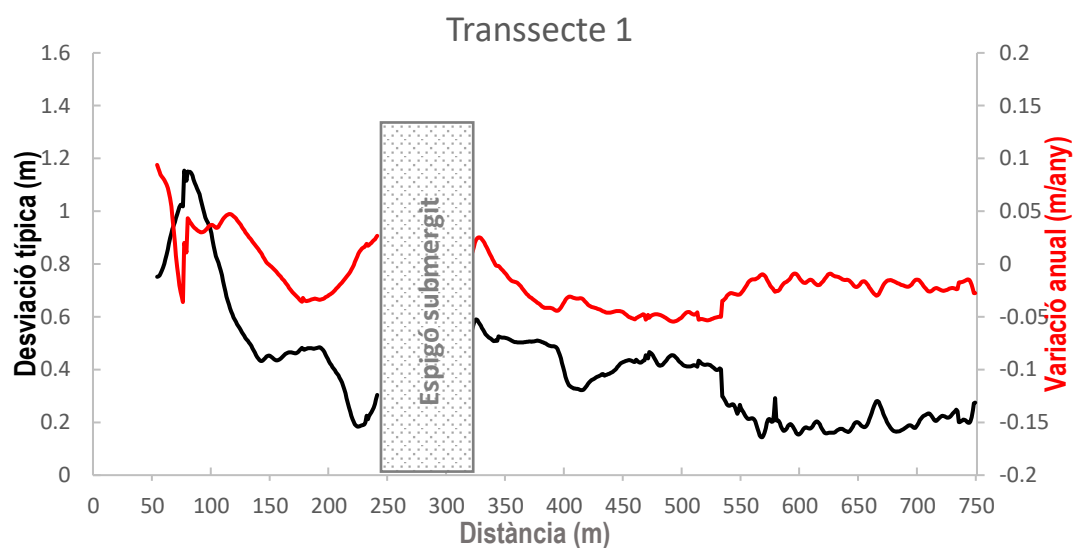
— 2011 — 2012 — 2013 — 2014 — 2015 — 2016  
— 2017 — 2019 — 2020 — 2021 — 2022

### Transecte 6

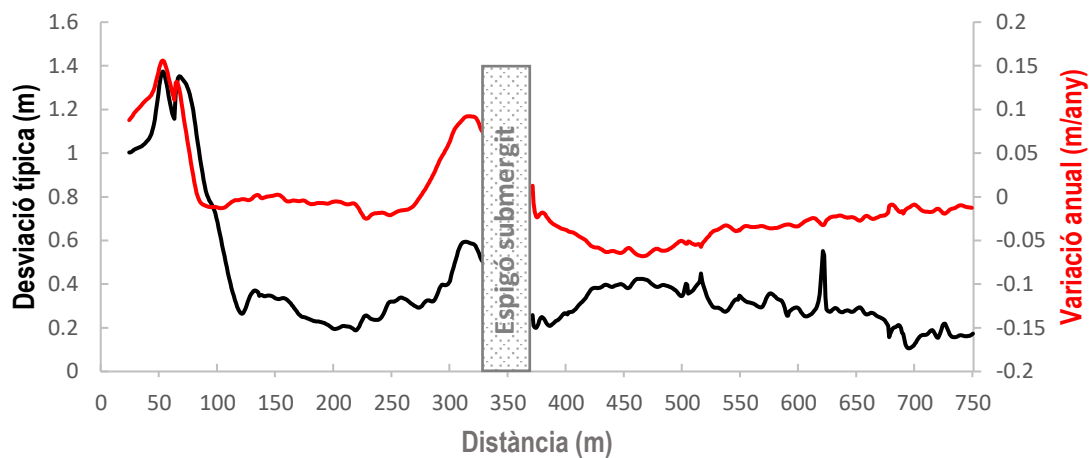


— 2011 — 2012 — 2013 — 2014 — 2015 — 2016  
— 2017 — 2018 — 2019 — 2020 — 2021 — 2022

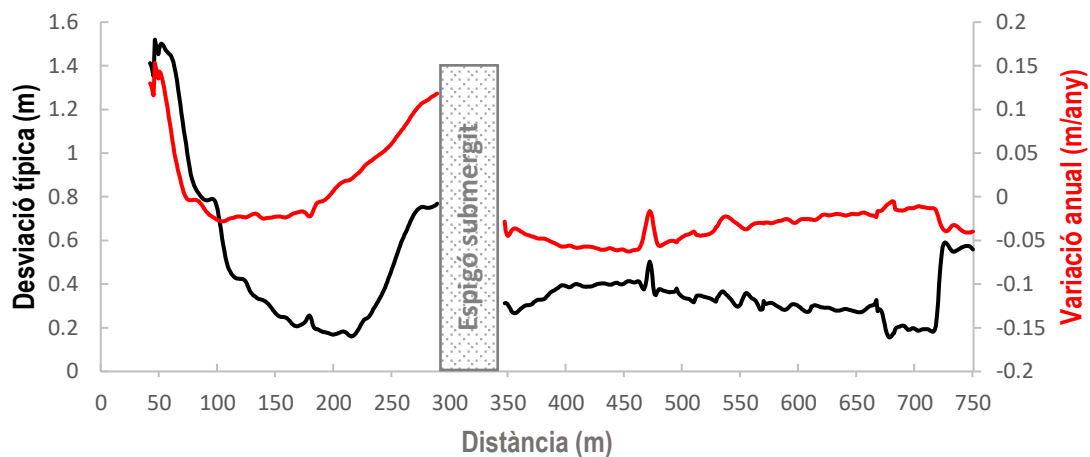
**Annex 2. Desviació típica i variació anual dels perfils de platja**



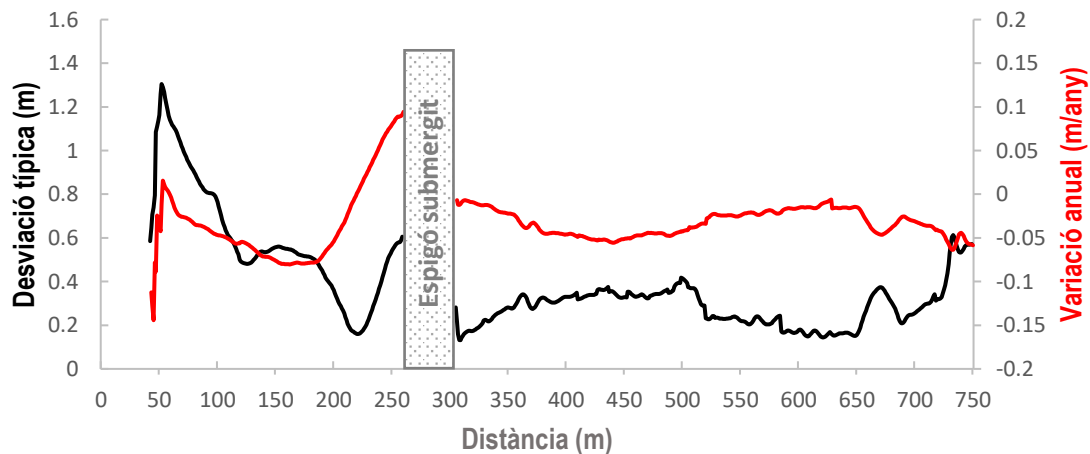
Transsecte 4



Transsecte 5



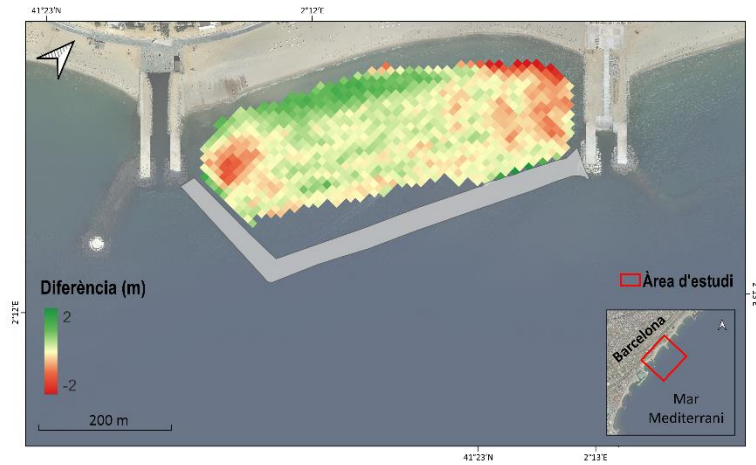
Transsecte 6



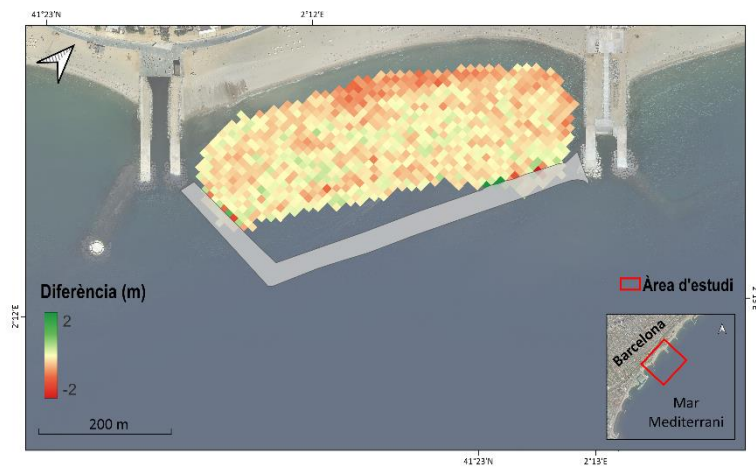


### Annex 3. Diferència d'elevació campanyes batimètriques (2010-2022)

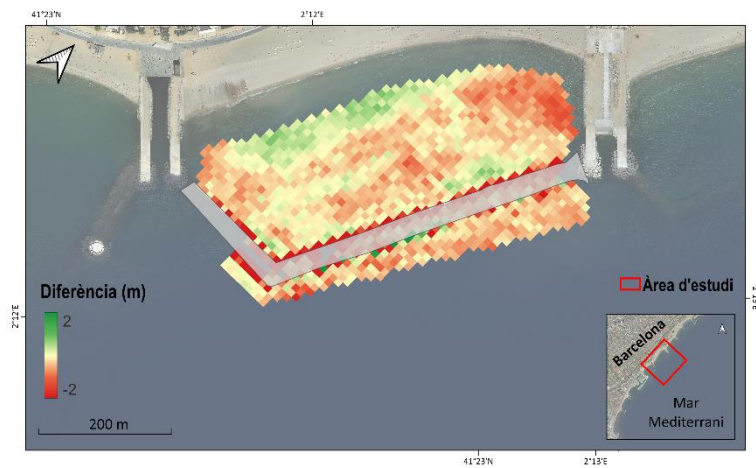
2010-2011



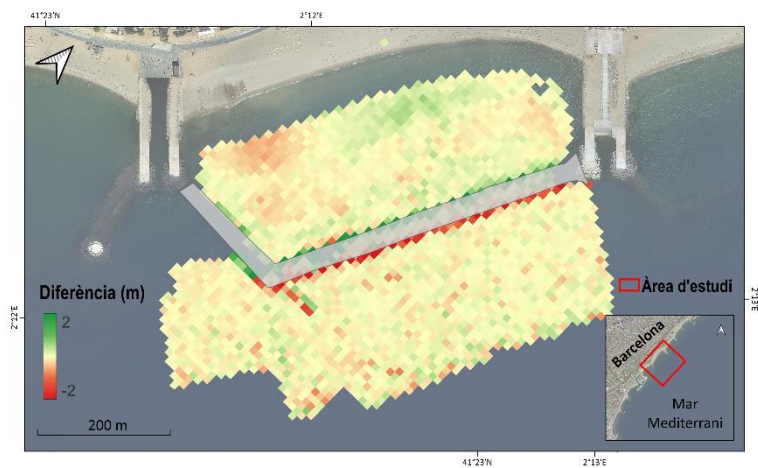
2011-2012



2012-2013



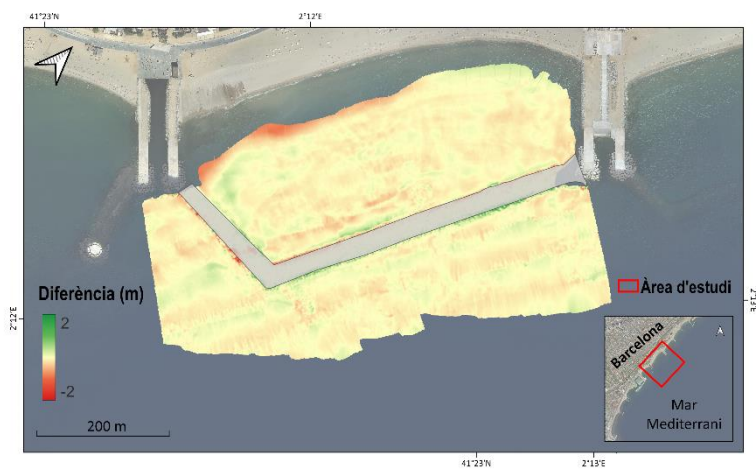
### 2013-2014



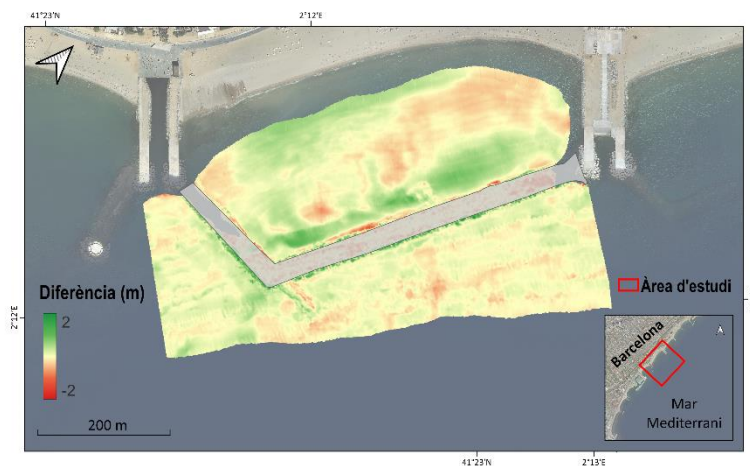
### 2014-2015



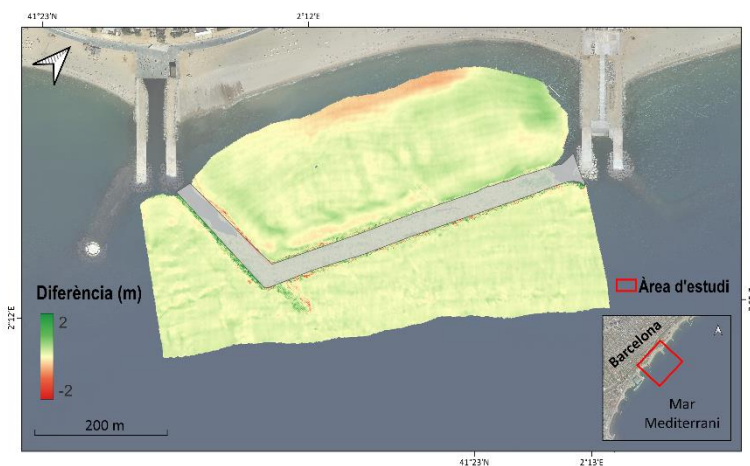
### 2015-2016



### 2016-2017



### 2017-2018

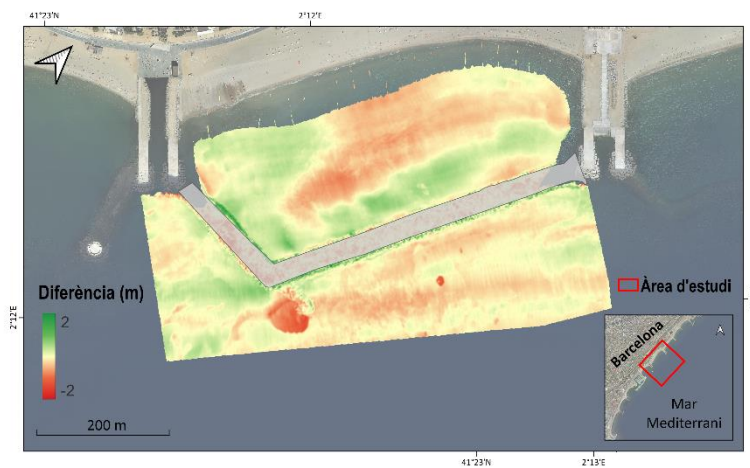


### 2018-2019

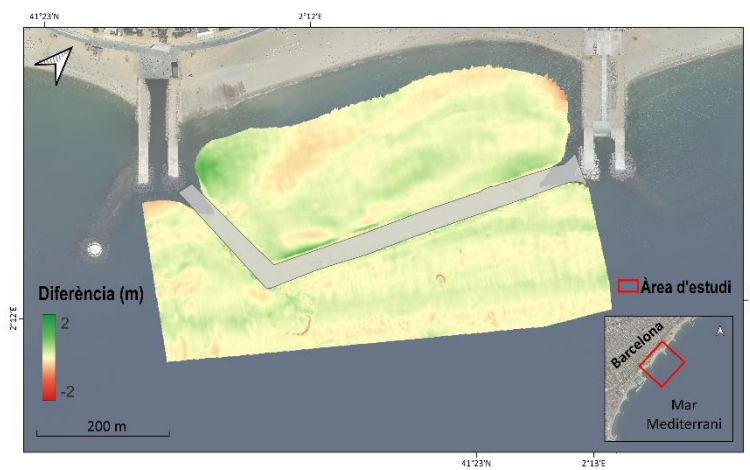




### 2019-2020



### 2020-2021



### 2021-2022

