

2

VISIÓ DES DE L'ENGINYERIA DE L'EVOLUCIÓ RECENT DE LA COSTA DE SITGES

Pere-Andreu Ubach de Fuentes

Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Resum

La construcció del port de les Anquines al costat de l'hotel Terramar va desestabilitzar l'equilibri de la dinàmica de sediments a la badia de Sitges en dificultar l'arribada de nous sediments aportats per la riera de Ribes. Les intervencions subsegüents d'enginyeria costanera fetes amb la intenció d'estabilitzar la badia de Sitges han acabat configurant una morfologia segmentada de la badia fins a fer-la irreconeixible.

Tot i que aquest conjunt d'esculleres han aconseguit els efectes perseguits a curt termini, també han enrigidit la resposta dinàmica de la badia de Sitges, cosa que ha dificultat encara més l'arribada de nous sediments. Sitges no és una excepció en la tendència generalitzada de pèrdua de sediments a les costes europees. En aquest context, la platja de la badia de Sitges es veu seriosament amenaçada i la construcció irregular del seu passeig marítim ha propiciat que dos dels segments de platja pràcticament hagin desaparegut. Cal actuar de manera decidida per a revertir aquesta tendència partint d'un coneixement precís dels fenòmens que regeixen la dinàmica de la badia de Sitges tant a escala local com a escala regional.

Resumen

La construcción del puerto de Les Anquines junto al hotel Terramar desestabilizó el equilibrio de la dinámica de sedimentos en la bahía de Sitges al dificultar la llegada de nuevos sedimentos aportados por la riera de Ribes. Las subsiguientes intervenciones de ingeniería costera realizadas con la intención de estabilizar la bahía de Sitges han ido configurando una morfología segmentada hasta hacerla irreconocible. Si bien este conjunto de escolleras ha logrado los efectos perseguidos a corto plazo, también han rigidizado la respuesta dinámica de la bahía de Sitges, dificultando todavía más la llegada de nuevos sedimentos.

Sitges no es una excepción en la tendencia generalizada de pérdida de sedimentos en las costas europeas. En este contexto, la playa de la bahía de Sitges se ve seriamente amenazada, y la irregular construcción de su paseo marítimo ha propiciado que dos de los segmentos de playa prácticamente hayan desaparecido. Es preciso actuar de manera decidida para revertir esta tendencia partiendo de un conocimiento preciso de los fenómenos que rigen la dinámica de la bahía de Sitges, tanto a escala local como a escala regional.

Abstract

The construction of the harbour of Les Anquines, next to the Terramar Hotel, caused an imbalance in the sediment dynamics of the bay of Sitges, blocking the arrival of new sediments carried by the Ribes river. The subsequent coastal

engineering works carried out with the aim of stabilising the bay of Sitges have, as a whole, configured a segmented morphology of the bay of Sitges to the point of making it unrecognisable. Although these breakwaters have achieved the desired effects sought after in the short term, they have also stiffened the dynamic response of the bay of Sitges, further hindering the arrival of new sediments.

Sitges is no exception to the general trend of coastal erosion in Europe. In this context, the bay of Sitges is in serious danger, to the extent that the irregular configuration of its coastline has contributed to the virtual disappearance of two sections of beach. Decisive action is needed to reverse this trend, based on an accurate knowledge and understanding of the driving phenomena that drive the sediment dynamics of the bay of Sitges, both at local and regional scales.

Context geomorfològic

Les platges de Sitges pateixen un problema d'erosió crònic que no és exclusiu de Sitges, sinó que afecta tot el litoral de Catalunya, i es pot afirmar que tota la Mediterrània septentrional i també la major part de la costa europea (mar Negra, mar Cantàbrica, mar del Nord i mar Bàltica), d'acord amb l'informe *Eurosió* (2004: 12). Les causes d'aquest problema són conegudes: construcció de preses als rius que retenen l'aportació de sediments pels principals rius, urbanització intensa de la façana litoral que fixa el terreny i, consegüentment, també limita l'aportació de sediments de les rieres, i construcció de ports que alteren la dinàmica litoral del transport de sediments.

Les dues primeres causes (regulació dels règims fluvials i urbanització de la façana litoral) afecten el sistema litoral minvant l'aportació de nous sediments. La tercera causa afecta la dinàmica litoral del transport de sediments.

Sense l'aportació de nous sediments, el sistema litoral va perdent sediments de manera natural, perquè aquests es van dipositant cada cop en cotes més profundes del fons marí per efecte dels temporals i de la gravetat.

La confluència d'intenses pressions d'usos sobre el litoral del nostre territori ens hauria d'obligar a conèixer en profunditat la dinàmica dels fenòmens que regeixen el litoral a l'hora de prendre decisions sobre les actuacions que incideixen en aquest importantíssim àmbit del nostre territori.

Adicionalment, la dinàmica litoral de Sitges també està afectada per una actuació de caràcter híbrid. És a dir, és una actuació de regulació del règim fluvial del riu Llobregat i alhora és una obra costanera que incideix en la distribució dels sediments a la costa. Em refereixo al desviament de la desembocadura del riu Llobregat (fruit de l'ampliació del port de Barcelona) i la consegüent construcció d'un espigó al marge dret de la desembocadura del riu per a evitar que, en cas de crescuda, el riu pugui inundar l'aeroport de Barcelona. La construcció d'aquest espigó fa que el riu Llobregat

mantingui la velocitat de l'aigua molt més enllà de la seva desembocadura, prevenint que pugui dipositar els sediments que arrossega a la línia de costa (Prats, Martín-Vide i Ferrer-Boix, 2021: 142-143). En lloc d'això, aquests sediments es dipositen a gran profunditat, d'on no poden tornar al sistema costaner.

Sense aportació de nous sediments per part del riu Llobregat, els municipis costaners que es beneficiaven d'aquestes aportacions (el Prat de Llobregat, Gavà, Castelldefels, Sitges i Vilanova) patiran gradualment i progressivament els efectes de la manca de nous sediments en forma d'una erosió sostinguda.

Tot i això, Sitges disposa d'altres cursos fluvials capaços d'aportar sediments, en menor mesura, al seu litoral: des del riu subterrani de la Falconera (la seva capacitat de transport de sediments és desconeguda), fins a la riera de Ribes, passant per les múltiples rieres que recorren el massís del Garraf i el nucli històric de Sitges, com les de Vallcarca, d'Aiguadolç, de Sant Sebastià o de la Bassa Rodona.

Evolució històrica de les construccions a la costa

Durant la segona meitat del segle xx a Sitges s'han fet tot un seguit d'obres marítimes que han tingut incidència en la seva dinàmica litoral (vegeu les figures 1, 2, 3 i 4).

El 1913 es va construir El Chiringuito sobre la platja de Sitges (vegeu la figura 3). El 1932 es van inaugurar la piscina i el Casino Platja d'Or (actualment, Club de Mar de Sitges), construïts directament sobre la platja de Sitges (Artigues, 2023). Aquestes dues construccions foren les primeres que enrigidiren la platja de Sitges.

La primera obra marítima de Sitges va ser el port industrial de Vallcarca, l'any 1924. Però, atesa la distància fins als nuclis urbans de Sitges i de Garraf, els efectes de la seva construcció en la dinàmica litoral no es fan evidents de manera directa.

La primera obra marítima que es va construir en l'entorn de la badia de Sitges va ser el port de les Anquines (vegeu la figura 5), davant de l'hotel Terramar, entre els anys 1923 i 1933. Es va inaugurar l'any 1933. Aquesta obra redueix els sediments aportats per la riera de Ribes i transportats cap a les platges de Sitges per l'onatge de ponent i de sud. En la figura 6, feta als anys quaranta, es pot veure que l'amplada de la platja de la badia de Sitges s'havia reduït considerablement, minvant la protecció natural de la façana litoral de Sitges.

Pocs anys més tard, el 1949, hi va haver un seguit de temporals (Alegre, 2015) que van malmetre gran part de la façana marítima de Sitges i les autoritats van construir amb caràcter d'urgència un mur d'escullera de protecció (vegeu les figures 8 i 9) des d'El Chiringuito fins a la piscina del Club Marítimo Playa de Oro (que el 1942 va heretar les estructures del Casino Platja d'Or i el 1952 es va convertir en el Club de Mar).

Aquest mur d'escullera de protecció de la façana marítima va esdevenir el precursor del mur actual del passeig marítim.



Figura 1. Configuració actual de la badia de Sitges (Alegre, 2015).



Figura 2. Fotografia de la platja de Sitges i la platja de Sant Sebastià abans de la construcció de l'hotel Terramar (Alegre, 2015).



Figura 3. Fotografia de l'estat de la platja de Sitges abans de la construcció de l'hotel Terramar (Alegre, 2015).



Figura 4. Fotografia de la platja de Sitges abans de la construcció de l'hotel Terramar. Es pot veure que el desenvolupament urbanístic de la franja litoral encara era escàs i hi havia molts camps de conreu (Alegre, 2015).



Figura 5. Fotografia del port de l'hotel Terramar amb la formació de la platja de les Anquines (Alegre, 2015).



Figura 6. Fotografia dels anys quaranta de la platja de Sitges, amb el port de les Anquines ja construït. S'hi pot observar la reducció general de sorra a la platja (Alegre, 2015).

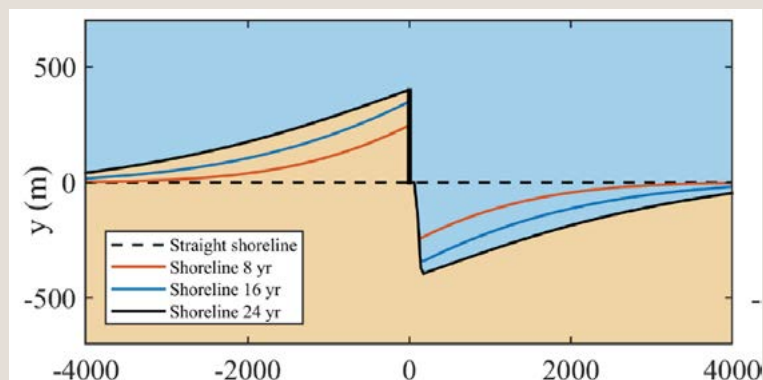


Figura 7. Efecte de la presència d'un espigó perpendicular en l'evolució de la línia de costa. En aquest esquema la direcció del transport longitudinal dominant és d'esquerra a dreta. Es pot apreciar com a la banda esquerra de l'espigó (aigües amunt) es produeix una acumulació de sediments, mentre que a la banda dreta de l'espigó (aigües avall) es produeix un retrocés de la línia de costa per la pèrdua gradual de sediments; respecte a la posició original de la línia de costa marcada per la línia de punts (Chi, Zhang i Zheng, 2023: 6).



Figura 8. Mur d'escullera de protecció del passeig (Alegre, 2015).



Figura 9. Fotografia del que als anys seixanta encara quedava del mur d'escullera de protecció del passeig (Alegre, 2015).

L'any 1953 es van construir els espigons perpendiculars del carrer de Sant Pere i de la Punta de l'Església (per aquest ordre), davant l'evident pèrdua de sediments a la costa.

Com que la platja de la Fragata (encaixada entre els espigons del carrer de Sant Pere i de la Punta de l'Església) constitueix una trampa de sorres molt efectiva per la disposició obliqua convergent dels dos espigons, la resta de la badia de Sitges va veure accelerat el retrocés de la línia de costa i això va forçar que en la dècada dels seixanta es construïssin la resta d'espigons, sense oblidar mai la progressiva transformació del sòl rural en sòl urbà.

Cal dir que l'enginyeria costanera de l'època assumia que els espigons perpendiculars alenteixen el transport longitudinal de sorres, ja que acumulen sediments a la banda aigües amunt del transport longitudinal dominant i produeixen erosió aigües avall de la posició de l'espigó (veure Figura 7), tot creant la necessitat de construir successius espigons en la direcció del corrent longitudinal dominant. Això es reflecteix en el cas de la badia de Sitges, on es va continuar construint espigons per a estabilitzar tota la badia. Amb el matís que l'espai entre els successius espigons es va anar fent més gran a mesura que s'anaven construint els espigons, en un esforç per a minimitzar el cost de la inversió en aquestes infraestructures.

Entre el 1973 i el 1975 es va construir el port d'Aiguadolç. I el 1986 es va inaugurar Port Ginesta. El 1990 es va aprovar la concessió per la construcció del port del Club Nàutic Garraf. De tots, Port Ginesta és el que ha causat l'afectació més important, ja que la retenció de sediments que genera ha fet créixer de manera molt important la platja del Baix Llobregat, a Castelldefels (ortofotografies del vol americà (sèrie B) 1956-1957; «Visor SIDL», 2024), tot frenant el transport de sediments al llarg dels penya-segats del Garraf.

Posteriorment, l'enginyeria costanera va constatar que l'acumulació de sediments que es produïa a la banda aigües amunt dels espigons perpendiculars fa que el peu de la platja (la part submergida de la platja) avanci i, per tant, l'espigó submergit perdi efectivitat en l'objectiu d'alentir el transport longitudinal de sediments. És per aquest motiu que el 1984 es van transformar els espigons més nous per a adoptar la tipologia d'espigons en L i paral·lels, amb les illetes intermèdies. Els espigons paral·lels intervenen en la dinàmica litoral de manera diferent a com ho fan els perpendiculars. Els espigons paral·lels, en lloc de constituir un obstacle al transport longitudinal de sediments, aturen completament l'energia de les onades i impossibiliten que puguin transportar els sediments situats a l'ombra dels espigons (tant pel que fa al transport longitudinal com al transversal).

Dissortadament, la construcció d'un espigó paral·lel continu a tot el llarg de la costa que s'ha de protegir no és factible, ja que llavors s'impossibilitaria la renovació de l'aigua a la zona protegida i la qualitat de l'aigua es veuria afectada greument. És

per això que cal dissenyar separacions entre segments d'espigons paral·lels. I, com més grans són les separacions, més s'abarateix la inversió en els espigons paral·lels, però també queda desprotegit el segment de costa situat entre les ombres dels segments d'espigons. A Sitges aquest dilema es va resoldre amb la construcció de conjunts d'illetes intermèdies entre els espigons paral·lels, per a evitar la desprotecció completa del passeig en l'espai entre espigons, però minimitzant el cost de la inversió, ja que les illetes estan situades més a prop del passeig que els espigons i, per tant, a menys profunditat.

Dinàmica litoral de la badia de Sitges

L'empresa ALATEC (1999) va fer un estudi per al Ministeri de Medi Ambient sobre la dinàmica costanera de la badia de Sitges i va concloure que aquest espai té un transport longitudinal de sediments lleugerament divergent, però, en qualsevol cas, amb un cabal molt petit. Aquest resultat de transport longitudinal molt equilibrat és també consistent amb l'estudi de la dinàmica litoral fer per MARCIGLOB (Castañeda i Escartín, 2017: 58-67) amb motiu del projecte de l'espigó submergit de la platja de Sant Sebastià. Tanmateix, en una badia sense espigons, el transport longitudinal hauria de tenir caràcter convergent (si de cas), però no pot ser divergent.

En tots els casos, el cabal de transport longitudinal de sediments estimat pels diferents estudis és tan petit que està dins del marge d'error de les eines d'anàlisi utilitzades. Això ens fa concloure que el fet que els sediments es transportin cap a un costat o cap a un altre depèn sobretot de la predominança, en un any determinat, dels climes d'onatge d'una direcció o d'una altra (Ubach, 2019).

S'ha de dir que el resultat d'aquests estudis no pot considerar la presència dels espigons, que acaben limitant el transport longitudinal efectiu. Però, en qualsevol cas, la conclusió que se'n deriva és que el transport longitudinal no és el que condiciona el balanç sedimentari de la badia de Sitges. I, per tant, ens hem de fixar més aviat en el transport transversal.

Pel que fa al transport transversal, el balanç entre el transport cap a terra i el transport cap al mar és molt complicat d'estudiar analíticament perquè el fenomen del transport cap a terra és molt complex. Però podem constatar, per diferents indicadors i evidències, que hi ha un transport net cap al mar i que el dèficit de sediments no se substitueix completament per nous sediments que puguin arribar o bé per les rieres de les conques internes o bé per transport longitudinal des dels extrems de la badia de Sitges.

Efectes dels espigons i del passeig en la dinàmica litoral de la badia de Sitges

Ja s'ha constatat que la disposició obliqua convergent dels espigons perpendiculars del carrer de Sant Pere i de la Punta de l'Església constitueixen una trampa de sorres molt efectiva, que impedeix que aquests sediments puguin tornar a la resta de platges de la badia de Sitges.

També constitueixen trampes de sorra molt efectives els espigons paral·lels situats a la platja de la Barra i a la platja de Terramar. El port de les Anquines també ha acumulat sediments des de la seva construcció i actualment està reblert excepte la seva bocana.

El port de les Anquines està situat en un petit sortint de la costa contigu al delta de la riera de Ribes que si no rep una aportació regular de sediments des de terra com la rep el delta, és impossible que sostingui una platja de manera natural. La seva construcció dificulta l'arribada de sediments aportats per la riera de Ribes a les platges de la badia de Sitges perquè per a arribar-hi han de ser transportats a una profunditat superior a la del dic d'abric del port de les Anquines, i després han de tornar des d'aquesta profunditat.

La construcció dels següents espigons paral·lels de les platges de Terramar i de la Barra manté aquest obstacle perquè els sediments puguin tornar a les platges de la badia de Sitges, ja que s'han de mantenir durant més temps a aquesta profunditat i, per tant, s'incrementen les possibilitats que els temporals se'ls enduguin a profunditats de les quals no poden tornar.

L'espigó en *L* de la platja de la Barra altera l'equilibri general esmentat en l'apartat anterior pel que fa al transport longitudinal, i és que els sediments poden passar de la platja de la Riera Xica a la platja de la Barra, però no en sentit contrari. Això fa que la platja de la Riera Xica es vagi buidant de sediments de manera progressiva.

La platja de l'Estanyol és la següent i també va perdent sediments de manera progressiva, perquè la solució contínua natural que requereixen les corbes batimètriques més enllà de la influència dels espigons (perpendiculars o paral·lels) vincula totes les platges entre si, de manera que si la platja de la Riera Xica perd sediments, llavors la platja de l'Estanyol li n'haurà de cedir.

El fenomen es repeteix entre la platja de la Bassa Rodona i la platja de l'Estanyol, amb l'agreujant que, fruit de la construcció del mur del passeig (sobre l'antiga escullera de protecció) en una posició quaranta metres més avançada respecte a la posició del passeig a la platja de l'Estanyol, la platja de la Bassa Rodona es queda sense sorra quaranta metres abans que la platja de l'Estanyol.

Apunt final

Actualment les platges segueixen patint un procés de regressió. De manera desigual, però generalitzada. I malgrat les múltiples actuacions de regeneració amb recàrrega de sorra mitjançant draga els anys 1994, 2000, 2002, 2004, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 i 2018, la platja de la badia de Sitges no ha tornat a tenir mai l'aspecte que tenia abans de la intensa ocupació del territori, perquè les forces que regeixen la seva dinàmica litoral han canviat de manera fonamental. Cal una actuació que intervingui sobre els fonaments de la dinàmica litoral per a poder revertir aquesta tendència.

BIBLIOGRAFIA

ALATEC (1999). *Proyecto de acondicionamiento de la fachada marítima de Sitges*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Costas [inèdit].

ALEGRE, J. M. (2015). «Els temporals de 1949». *El Sitges que estimo* [blog], 4 de novembre de 2015. URL: <https://lovesitges.blogspot.com/>.

ARMY MAP SERVICE (1956-1957). «Ortofotos del Vuelo Americano Serie B». Madrid: Instituto Geográfico Nacional. URL: <https://pnoa.ign.es/pnoa-imagen/vuelos-y-ortofotos-historicas>.

ARTIGAS, B. (2023). «La piscina Maria Teresa, el Casino Platja d'Or, el Club de Mar i el Kansas de Sitges». *Criticart* [blog], 11 de gener de 2023. URL: <https://criticartt.blogspot.com>.

CASTAÑEDA, A. M.; ESCARTÍN, F. J. (2019). «Estudio de impacto ambiental». A: *Proyecto de estabilización de la playa de Sant Sebastià; T.M. de Sitges (Barcelona)*. Barcelona: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

CHI, S.; ZHANG, C.; ZHENG, J. (2023). «Sandy shoreline recovery ability after breakwater removal». *Frontiers in Marine Science*. doi: 10.3389/fmars.2023.1191386

EUROSION (2004). «Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. Part II – Maps and Statistics» [informe tècnic]. Brusselles: European Comission. URL: <http://www.euroSION.org/>.

PRATS, A.; MARTÍN-VIDE, J. P.; FERRER-BOIX, C. (2021). «Regressió del delta del Llobregat: efecte de les obres d'enginyeria al riu d'ençà del segle XIX». *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*, núm. 107, p. 123-148.

UBACH, P.-A. (2019). *Allegacions al projecte de l'espigó submergit de la platja de Sant Sebastià T.M. Sitges*. Barcelona: Demarcación de Costas en Cataluña [inèdit].

«VISOR SIDL». Barcelona: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2024. URL: <https://visors.icgc.cat/sidl>.

17

SIMULACIÓ COMPUTACIONAL DEL NAUFRAGI D'UNA EMBARCACIÓ DEL SEGLE XVII EN AIGÜES DEL TERME MUNICIPAL DE SITGES

David Brun Tarragó

Graduat en Enginyeria d'Obres Públiques

Ignacio Valero López

Enginyer de camins, canals i ports, CIMNE

Resum

Es presenta un treball de caràcter científic docent que s'ha desenvolupat conjuntament amb un estudiant del Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya i investigadors del Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria (CIMNE). Descriu la factibilitat que les restes trobades davant de les costes de Sitges pertanyin efectivament a un *brúlot* usat en la batalla de Barcelona del 1642. Per la seva morfologia, la hipòtesi és creïble. Usant tècniques de simulació computacional i treballant amb diferents hipòtesis consistents en relació amb els materials que van poder formar la brea del vaixell a l'època descrita, s'arriba a la conclusió que, efectivament, el derelict pot correspondre al del brúlot indicat.

Resumen

Se presenta un trabajo de carácter científico-docente que se ha desarrollado conjuntamente por un estudiante del DECA/UPC e investigadores del CIMNE. Describe la factibilidad de que los restos encontrados frente a las costas de Sitges pertenezcan efectivamente a un brulote usado en la batalla de Barcelona en el siglo XVII. Por su morfología, la hipótesis es creíble. Usando técnicas de simulación computacional y trabajando bajo diferentes hipótesis consistentes respecto a los materiales que pudieron formar la brea del buque en la época descrita, se llega a la conclusión de que, efectivamente, el pecio puede corresponder al del brulote indicado.

Abstract

This is an educational scientific work, developed in collaboration with a DECA/UPC student and CIMNE researchers. It describes the possibility that the remains found off the coast of Sitges actually belong to a fire ship that took part in the Battle of Barcelona in the 17th century. Its morphology makes this hypothesis credible. Using computer simulation techniques and working with various consistent hypotheses about the materials that could have formed the ship's hull at the time described, it is concluded that the wreck could correspond to that of the aforementioned fire ship.

Breu introducció

L'abril de l'any 2015 un equip d'arqueòlegs de Sitges va trobar les restes del que sembla un antic *brûlot* implicat en la batalla de Barcelona del 1642. Els *brûlots* eren navilis carregats amb materials explosius que es llançaven contra altres embarcacions amb el propòsit d'incendiar-les.

Les restes trobades al fons marí corresponen a una brea d'origen vegetal, un material amb una viscositat molt elevada. (Figura 1)

La troballa es fa al fons marí de Sitges, un municipi costaner de la província de Barcelona i, concretament, de la comarca del Garraf. Se situa uns quaranta quilòmetres al sud de la capital catalana.

Els *brûlots*, armes navals

La mida dels *brûlots* depenia del carregament amb què s'equipaven. Pel que fa al material explosiu o inflamable, s'usaven barrils plens de pols de carbó, quitrà, greix animal i compostos químics com el salnitre, una barreja de nitrat de potassi i nitrat de sodi.

També s'utilitzaven bales de canó, trossos de roca o materials similars compactats en altres compartiments, de tal manera que amb les explosions tots aquests elements sortissin projectats a mode de metralla, així s'augmentava el radi del dany provocat.

Amb els mètodes descrits prèviament el dany era instantani, però s'utilitzaven altres recursos per a provocar explosions retardades, com ara substàncies inflamables i que, a més, eren molt adherents, fet que dificultava l'extinció de l'incendi per part dels tripulants del vaixell assetjat. (Figura 2)

Simulació computacional. Aplicació al cas

L'aplicació de la física i la matemàtica en situacions del món real introdueix problemes que no poden ser resolts de manera analítica o amb una exactitud tolerable.

En una simulació computacional és important delimitar l'objecte d'estudi i definir els resultats o les solucions que s'espera obtenir. És transcendental acotar aquests elements perquè, si no es fa l'estudi, l'anàlisi numèrica es pot allargar indefinidament a causa de les diferents conclusions que van apareixent durant les simulacions.

La designació de les variables es va fer separant en diferents instants els fets narrats en l'apartat del context històric:

- a) Estat 1: el *brûlot* es troba en flames, amb total seguretat encastat a *El Guisa*.
- b) Estat 2: desplaçament del lloc d'impacte fins a la zona del jaciment.
- c) Estat 3: transcurs dels anys fins a l'actualitat.

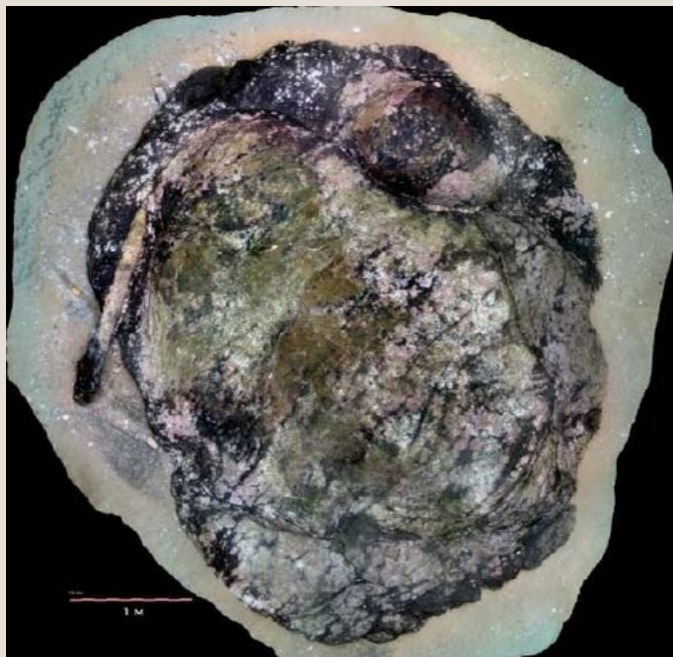


Figura 1. Massa de brea trobada a la llera marina.



Figura 2. Tall d'un brûlot en llibres d'història.

a) Estat 1: ens trobem en l'instant inicial, quan el *brûlot* ha topat amb El Guisa. El navili està completament carregat de material explosiu i inflamable. Es produeixen explosions que poden provocar una pèrdua de volum del material. Cal tenir en compte que tant el *brûlot* com el galió francès difícilment poden navegar i són conduïts pel vent i, especialment, pel corrent marí i l'onatge.

b) Estat 2: el *brûlot* es consumeix a causa de les flames mentre va navegant lliurement. La brea es troba en estat líquid i la temperatura és molt elevada. Es pot observar que les variables predominants són: la viscositat del material, el gradient de temperatura i el corrent marí, que va estretament relacionat amb el vent.

Cal esmentar que en aquest instant hi ha dues possibles hipòtesis: el *brûlot* embarranca a la riba o, per contra, s'enfonsa abans d'arribar-hi.

Aquest aspecte és molt important i l'estat 2 es bifurca en:

b1) Estat 2.1 (embarrancant).

Perquè un navili quedi encallat o embarranqui, el seu calat ha de ser igual o superior a la profunditat del mar. En aquest cas, es podria trobar la batimetria de l'època o fer un estudi per a determinar-la i comparar-la amb la profunditat de la mar, d'aquesta manera es podria establir quin calat tenia el *brûlot*. Si es conegués el calat, es podrien determinar les dimensions de la nau. Aquestes dimensions no s'especifiquen en la bibliografia referent al conflicte i serien una dada important per a conèixer factors com ara la capacitat de càrrega, l'estructura, el pes, el material utilitzat.

b2) Estat 2.2 (enfonsament). En aquesta segona opció el *brûlot* s'enfonsa completament abans d'arribar a la riba. El material es diposita al fons marí, probablement tancat a la cambra de combustió. En aquest cas, seria important conèixer el temps mitjà que trigaria a enfonsar-se un navili amb aquestes característiques i comparar-ho amb les narracions històriques per aclarir si l'enfonsament va ser o no possible.

c) Estat 3: finalment, el material es troba al llit marí. A mesura que es va refredant, la viscositat augmenta fins pràcticament solidificar-se en la forma actual. La temperatura de l'aigua en aquest instant és fonamental, ja que és la que determinarà quant de temps triga el material a solidificar-se. Com més temps tarda, més modificacions actuen sobre la brea, ja que la viscositat encara serà prou baixa per a modelar el material. (Taula 1)

Les variables que s'utilitzaran en la simulació són les següents: (Taula 2)

1. Viscositat

2. Geometria

Amb les dades de la taula anterior s'elaborarà un gràfic i s'obtindrà una expressió que permeti relacionar la viscositat amb la temperatura. Per a això es grafiaran les dades

	Estat 1	Estat 2.1	Estat 2.2	Estat 3
Viscositat				X
Geometria				X
Batimetria		X		
Corrent marí / Onatge	X	X	X	
Vent		X	X	
Temperatura de l'aigua				X
Temperatura de la brea	X	X	X	X
Densitat	X	X	X	X

Taula 1. Variables.

Material no.	Material type	Temperature, °C	Viscosity, cp		Ratio of calculated to measured value
			calculated	measured	
1	low insoluble road tar	5	9.2×10^5	1.04×10^7	0.09
		70	190	243	0.8
		130	5.5	10.9	0.5
2	high insoluble road tar	5	4.8×10^6	2.7×10^7	0.2
		65	300	627	0.5
		135	8.6	13.5	0.6
5	low viscosity pitch (straight-run)	35	1.3×10^8	8.1×10^7	1.6
		75	2.1×10^4	1.4×10^4	1.5
		150	32	27	1.2
17	hard pitch	90	2.7×10^6	4.0×10^6	0.7
		150	1.9×10^3	2.2×10^3	0.9
		199	130	154	0.8
		224	56	67	0.8

Taula 2. Consideracions sobre la viscositat.

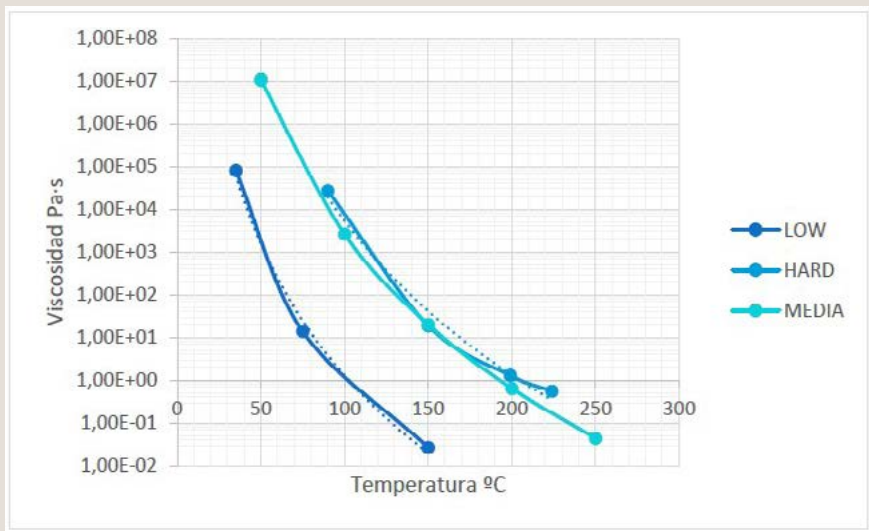


Figura 3. Viscositat usada per a la simulació computacional.

tant de la brea de baixa viscositat, «low», com de la d'alta viscositat, «hard». En color gris es representa el valor mitjà entre les dues brees, que és el valor que es farà servir en les simulacions. (Figura 3)

Els avantatges de la simulació computacional són els següents:

- En estudiar problemes complexos l'anàlisi analítica no és viable o requereix una infraestructura no disponible.
- Fer un estudi d'alternatives amb variacions controlades és impossible en un entorn real.
- La formulació del model es pot modificar o ampliar parcialment per a adaptar-lo a un altre problema de característiques similars.
- I els desavantatges són aquests:
- De vegades no es pot validar el model; en aquest cas, les conclusions són estimacions de la realitat que en cap cas es poden prendre com a tal.
- El desenvolupament i la validació de models numèrics requereixen una gran quantitat de recursos humans i tecnològics.
- La realització d'un gran nombre d'assaigs implica un major temps de computació i cost econòmic.

La simulació es pot dividir en tres fases clarament diferenciades entre si: (Figures 4 i 5)

- Pre procés
- Càlcul
- Postprocés

Conclusions

S'ha posat en dubte el fet que la troballa de la platja de Sitges es tracti del *brûlot* de Marsay o, almenys, de les restes d'un navili enfonsat.

Aquesta possible troballa ha desencadenat la recerca dels altres navilis involucrats en la batalla de Barcelona, considerats veritables tresors arqueològics.

De l'estudi fet, a partir de les condicions numèriques i de coneixement dels materials descrites s'estima que el *brûlot* va quedar embarrancat aproximadament en la posició en què s'han trobat les restes. Tanmateix, en aquell moment la temperatura del material era elevada i, per tant, la viscositat era baixa.

Es creu, i s'indica en l'epígraf següent, que el seguiment d'algunes pautes per a un futur estudi poden resultar, juntament amb certes tècniques de detecció disponibles al mercat, permetrà millorar força el coneixement sobre la troballa.

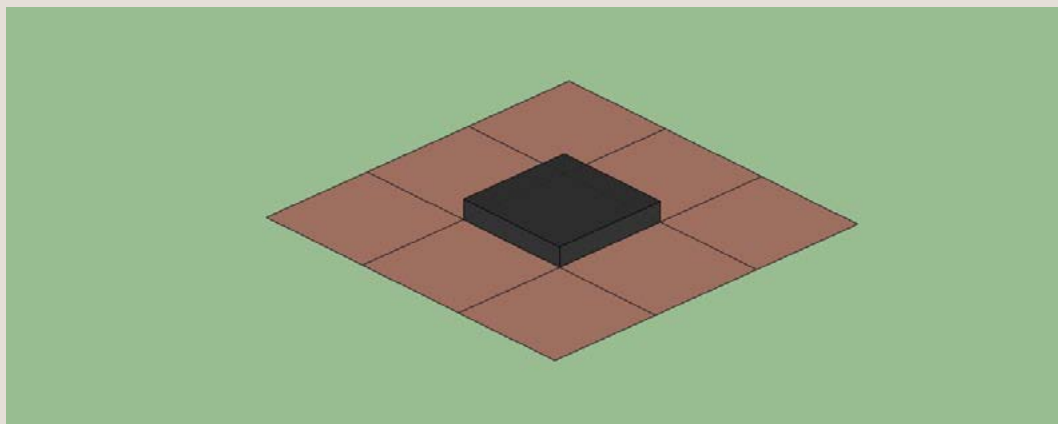


Figura 4. Model matemàtic base per a dur a terme la simulació.

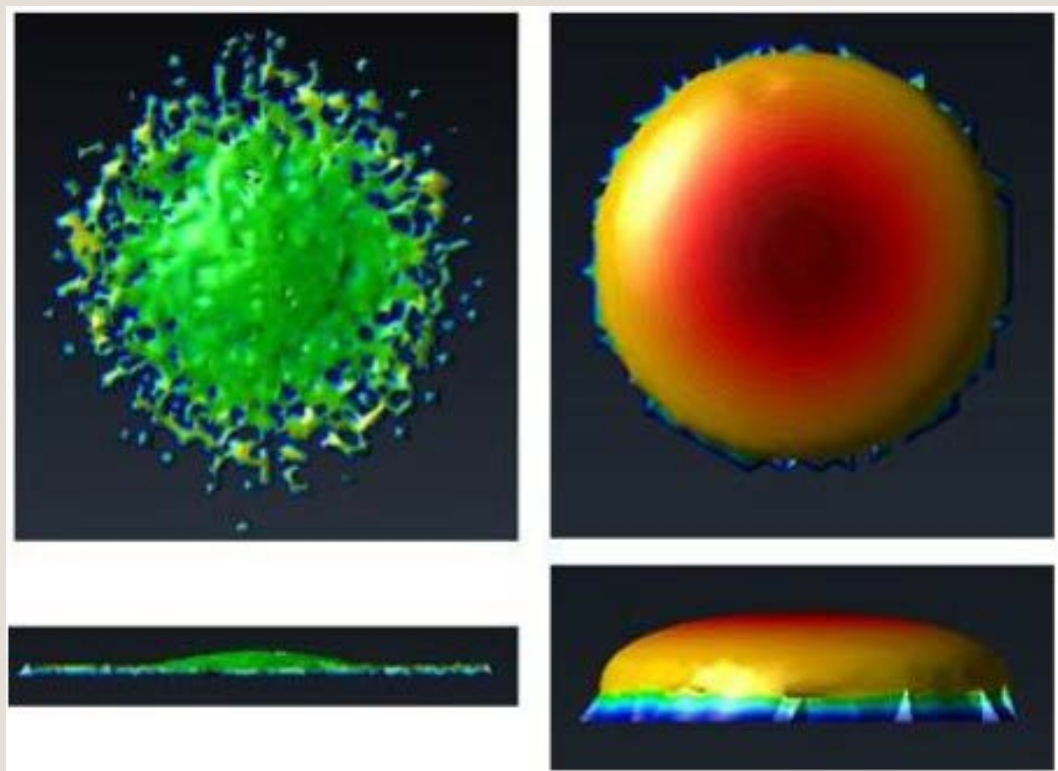


Figura 5. Resultats del postprocés de la simulació.

Línies possibles d'estudi futur del cas

En aquest treball es fa un apropament a una proposta de programa d'actuació en la recerca de *brûlots* amb l'objecte d'acotar zones en les quals potencialment es podrien trobar restes de vaixells d'interès rellevant.

La idea fora elaborar una eina o un programa que pugui servir de referència per a trobar altres possibles volums de brea. S'adoptarà com a referència l'enfonsament d'una massa de brea genèrica i s'enfonsaran una sèrie de masses a diferent altura per a poder establir geometries i relacions. Per a poder filtrar-les en cas de cerca amb les tècniques esmentades anteriorment.

Esbossem el que podria ser un mètode alternatiu per a la recerca d'aquests tresors a partir de la recerca de les restes de *brûlots*.

La idea principal consisteix a simular enfonsaments i crear patrons i geometries de brea. Sabent com haurien de ser aquests supòsits de restes de naufragis, s'utilitzaria un dels diversos mètodes que existeixen avui en dia per a rastrejar la localització d'aquestes *taques* al fons marí. Aquestes tècniques tenen un cost operatiu clarament inferior a una prospecció subaquàtica i presenten una eficiència clarament més gran:

Teledetecció satel·litària: la teledetecció és una tecnologia recent, encara en procés de desenvolupament, que utilitza imatges de satèl·lit per a posteriorment processar-les i obtenir imatges que a primera vista l'ull humà no pot detectar. En l'actualitat ja s'estan usant aquestes tècniques per a la recerca de derelictes.

Ús de drons: la proliferació de tècniques basades en drons proporciona un accés ràpid i relativament econòmic a l'espai aeri i permet obtenir dades d'observació de la terra caracteritzades per una alta resolució espacial i per la seva disponibilitat.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. IZQUIERDO TUGAS, Pere (2016). *Memòria de la revisió de la carta subaquàtica de Sitges*. Memòries d'Intervenció Arqueològica. CALAIX. Generalitat de Catalunya.
- [2]. WOOD, L. J.; DOWNER, M. (1965). «Viscosity/temperature equations for coal tar pitches and refined tars». *Journal of Applied Chemistry*, vol. 15, issue 9, p. 431-438.
- [3]. HILLE, Karl B. (2016). «Satellites and shipwrecks: Landsat satellite detects shipwrecks in coastal waters». NASA.