



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Aplicació de Nature Base Solutions
al Delta de l'Ebre.**

**Diferents solucions i adaptacions a
diferents escales**

Treball realitzat per:
Judith Molero Lorenzo

Dirigit per:
**Iván Cáceres Rabionet
i Agustín Sanchez-Arcilla Conejo**

Grau en:
Ciències i Tecnologies del Mar

Barcelona, 27 de setembre de 2022

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental
EHMA – Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRAÏMENTS

Aquest treball de fi de grau marca el punt final del meu pas pel Grau en Ciències i Tecnologies del Mar, elaborat a la Facultat de Camins, Canals i Ports de Barcelona a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). El qual mai hauria succeït si en César Mösso no hagués tret endavant aquest grau, es per això que en primer lloc vull agrair-li, tant a ell com a tots els professors que l'han fet possible. D'altre banda, agrair també al meu tutor de TFG, Ivan Càceres, per la seva ajuda i per guiar-me en tot moment dient-me si anava o no en bon camí.

Així com agrair a la família que he trobat a la universitat, tant a la classe, com al despatx de la Delegació d'Alumnes de l'Escola de Camins, com amb els veïns de la Delegació d'Alumnes de Telecom. Els quals han estat imprescindibles per donar-me ànims quan em faltaven. En darrer lloc, però no menys important, agrair a la meva família, a la meva mare i al meu pare per ser-hi sempre, així com al meu germà i als meus nebots, per donar-me una empenta d'alegria sempre que em feia falta.

Durant el procés de fer el TFG he hagut de viure una de les pitjors experiències que crec que viure mai, la pèrdua d'una persona que confiava cegament en mi i donat que aquest treball marca el meu punt final del grau, t'ho dedico a tu yayo.

RESUM

El retrocés que pateix el Delta de l'Ebre des de ja fa anys, així com les grans amenaces a les quals s'enfronta donat el Canvi Climàtic, per l'augment del nivell del mar i les tempestes de mar, cada cop més freqüents, suposa una gran preocupació pel seu futur, per part dels científics i la societat en general. Donades però, les últimes investigacions en Nature based Solutions (NbS), solucions basades en la natura, sembla que aquestes poden ajudar a mitigar els efectes que aquest ecosistema està patint.

Arran de tot això, en el present treball s'ha elaborat un estudi de totes les NbS que s'han trobat com a recomanables per encarar la protecció costanera. Les que es plantegen en aquest són: els esculls d'ostres, els esculls de corall, els aiguamolls, les herbes marines, les dunes, les illes barrera i els manglars. De totes aquestes s'ha fet una explicació de com són, la seva distribució a nivell global i els beneficis que aporten entre d'altres.

Un cop dut a terme l'estudi previ sobre les NbS, s'ha plantejat la construcció d'un escull d'ostres a través d'una low crest reef (LCR). S'ha fet un estudi de diferents zones del Delta de l'Ebre que actualment es consideren de les més afectades per l'erosió i s'ha decidit elaborar el disseny de la LCR per la Platja de Buda.

Finalment s'han extret resultats del coeficient de transmissió de les onades que es donarien en el cas que s'implementés una LCR submergida o emergida i s'ha vist com afectaria aquesta a la erosivitat de la zona i a la línia de la costa. S'ha conclòs que els millors resultats obtinguts per la LCR plantejada, en el cas de la Platja de Buda, son els que es donen per una estructura emergida de 0.01 metres de francbord, amb una amplada de 3 m, col·locada a 4 m de profunditat, a una distància de la costa de 420 m i amb una orientació de 123,75°.

Paraules clau; Nature based Solutions (NbS), Delta de l'Ebre, Coeficient de Transmissió (K_t), Low Crest Reef (LCR)

RESUMEN

El retroceso que sufre el Delta del Ebro, de hace ya años, así como las grandes amenazas a las que se enfrenta dado el Cambio Climático, por el aumento del nivel del mar y las tormentas marines, cada vez más frecuentes, supone una gran preocupación por parte de los científicos y de la sociedad en general, por el futuro de este. Dadas las últimas investigaciones en Nature based Solutions (NbS), soluciones basadas en la naturaleza, parece ser que estas pueden ayudar a mitigar los efectos que este ecosistema está sufriendo.

A raíz de todo esto, en el presente trabajo se ha elaborado un estudio de todas las NbS que se han creído las más recomendables para afrontar la protección costera. Las que se plantean són: los arrecifes de ostras, los arrecifes de coral, los humedales, los pastos marinos, las dunas, las illas barrera y los manglares. De todas estas se ha explicado como són, su distribución a nivel global i los beneficios que aportan entre otros.

Una vez llevado a cabo el estudio previo sobre las NbS, se ha planteado la construcción de un arrecife de ostras a través de una low crest reef (LCR). Se ha hecho un estudio de diferentes zonas del Delta del Ebro que se consideran como de las mas afectades por la erosión y se ha decidido elaborar el diseño de la LCR para la Playa de Buda.

Finalmente se han extraído los resultados del coeficiente de transmisión de las olas que se daría en caso de que se implementara la LCR sumergida o emergida y se ha visto como afectaría esta a la erosividad de la zona y a la línea de la costa. Se ha concluido que los mejores resultados obtenidos para la LCR planteada en el caso de la Playa de Buda, son los obtenidos para una estructura emergida de 0.01 metros de francobordo, de ancho igual a 3 m, colocada a 4 m de profundidad, a una distancia de la costa de 420 m i con una orientación de 123, 75°.

Palabras clave; Nature based Solutions (NbS), Delta del Ebro, Coeficiente de Transmisión (K_t), Low Crest Reef (LCR)

ABSTRACT

The setback that the Ebro delta is suffering for the last years, and the threats it faces given Climate Change, due to sea level rise and sea storms, which are becoming increasingly frequent, generates a great concern for the scientific community and for the society, about his future. Given the latest research in Nature based Solutions (NbS), it seems that all these can contribute to mitigate the effects that these ecosystems are suffering.

As a result of all this, in the present work, a study has been proposed with all the NbS that are most recommendable to deal with coastal protection. The NbS considered are: oyster reefs, coral reefs, wetlands, seagrasses, dunes, barrier islands, and mangroves. An explanation of how they are, their global distributions and the benefits that they bring.

Once the previous study on the NbS is carried out, the construction of an oyster reef through a low crest reef (LCR) is considered. The study has been made for different areas of the Ebro delta that are currently considered to be the most affected by erosion and it has been decided to develop the design of the LCR for Buda's beach.

Finally, results have been extracted for the wave transmission coefficient that would occur if a submerged or surface LCR is implemented. It has been seen how this would affect the erosivity of the area and the coastline. It has been concluded that the best results obtained by the proposed LCR, in the case of the beach of Buda, is an emergent structure of 0.01 meters of freeboard, with a width of 3 m, placed at a depth of 4 m, in a distance from the coast of 420 m and with an orientation of 123.75° .

Key words; Nature based Solutions (NbS), Ebro Delta, Transmission coefficient (K_t), Low Crest Reef (LCR)

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	- 1 -
1.1. MOTIVACIÓ.....	- 1 -
1.2. OBJECTIUS.....	- 2 -
1.3. SITUACIÓ ACTUAL.....	- 2 -
1.4. HIDRODINÀMICA	- 3 -
2. SOLUCIONS BASEDES EN LA NATURA	- 10 -
2.1. ESTAT DE L'ART.....	- 10 -
2.2. DIFERÈNCIA AMB ELS MÈTODES TRADICIONALS	- 12 -
2.3. TIPUS DE NBS.....	- 13 -
3. ZONA D'ESTUDI	- 55 -
3.1. ANÀLISI DE LES SUBZONES D'ESTUDI	- 57 -
4. NBS PROPOSADES	- 64 -
4.1. AVALUACIÓ DE LES PROPOSTES	- 64 -
4.2. PARÀMETRES DE SEGUIMENT INDICATIUS.....	- 65 -
5. CAS D'ESTUDI	- 66 -
5.1. PLANTEJAMENT DE LA LCR.....	- 68 -
5.2. RESULTATS.....	- 71 -
5.3. ANÀLISI DELS RESULTATS	- 80 -
6. DISCUSSIÓ	- 83 -
7. CONCLUSIONS	- 84 -
7.1. TREBALL FUTUR	- 85 -
8. BIBLIOGRAFIA	- 86 -

LLISTAT DE FIGURES

Figura 1. Terminologia del perfil de platja. Font: Shore Protection Manual 1984	- 3 -
Figura 2. Esquema d'una onada. Font: Dean & Dalrymple, 1991	- 4 -
Figura 3. Refracció de les onades. Font: surfertoday.com	- 5 -
Figura 4. Difracció. Font: arizona.edu	- 6 -
Figura 5. Ona incident i ona transmesa una cop ha passat per l'estructura. Font : Elaboració pròpia.	- 7 -
Figura 6. Tipus d'ona en funció al número d'Iribarren. Font: Caceres, 2022	- 8 -
Figura 7. Dibuix conceptual dels processos que es donen prop de costa. Font: Van der Zanden, 2016	- 9 -
Figura 8. Living shorelines. Font: NOAA.gov	- 11 -
Figura 9. Escull d'ostres natural. Font:pewtrusts.org	- 13 -
Figura 10. Oyster life cycle. Font: Stokes et al., 2012	- 14 -
Figura 11. Escull de cultiu plantat en alt relleu. Font: Stokes et al., 2012	- 16 -
Figura 12. Dissenys de cultiu contingut. Font: Stokes et al., 2012	- 17 -
Figura 13. Dissenys d'escull de formigó prefabricats. Font: Stokes et al., 2012	- 18 -
Figura 14. L'estat global dels esculls d'ostres a les badies i ecoregions. Font: Beck et al., 2011	- 19 -
Figura 15. Correlació entre el coeficient de transmissió (K_t) i el francbord (R_c)	- 22 -
Figura 16. Escull de corall a Maldives. Font:newscientist.com	- 23 -
Figura 17. Distribució dels esculls de corall a escala global. Font: Ahlenius, UNED/GRID-Arendal	- 24 -
Figura 18: The 3 Types of Coral Reef Formations Found in the Ocean Font: researchgate.com	- 25 -
Figura 19. Aiguamolls del Delta de l'Ebre. Font: Catalunya.com	- 27 -
Figura 20. Disposició de la "salt marsh" amb sis compartiments amb fang barrejat al metre superior i el contingut de fang previst. Font: Baptist, et al., 2021	- 34 -
Figura 21. Model digital del terreny de la marisma experimental basat en mesures LiDAR. MHW = Mean High Water (1,4 m + NAP).	- 35 -
Figura 22. Petita praderia de posidònia oceànica al nord de, Sicília. Font: Elaboració propia	- 37 -
Figura 23. Distribució global de la posidònia i les 6 bioregions diferents. Font: Short et al., 2007	- 38 -
Figura 24. Esquema d'un ramet de fanerogama marina. Font:Jorge Terrados, IMEDEA (CSIC-UIB)	- 41 -
Figura 25. Cicle de vida de la posidònia relacionat amb l'estacionalitat. Font: atlasposidonia.com	- 42 -

<i>Figura 26. Cicle de vida de la posidonia oceanica. Font: Jorge Terrados, IMEDEA (CSIC-UIB)</i>	_____	- 43 -
<i>Figura 27. Dunes a la platja de Pals. Font: Elaboració propia</i>	_____	- 45 -
<i>Figura 28. Asimetria de les dunes. Font: Caceres, 2022</i>	_____	- 46 -
<i>Figura 29. Diatribució global de costes dunars. Font: Martinez et al., 2003</i>	_____	- 46 -
<i>Figura 30. Duna parabolica. Font: Cáceres, 2021.</i>	_____	- 47 -
<i>Figura 31. Barrier Island. Font: nps.gov</i>	_____	- 49 -
<i>Figura 32. Distribució de les illes barrera. Font: Hayes 1979.</i>	_____	- 50 -
<i>Figura 33. Manglar al riu Sierpe, Costa Rica. Font: IUCN</i>	_____	- 52 -
<i>Figura 34. Distribució global dels manglars. Font: National Geographic Magazine 2007-</i>		53 -
<i>Figura 35. Zones d'estudi Delta de l'Ebre. Font: Elaboració pròpia</i>	_____	- 57 -
<i>Figura 36. Batimetria de la Platja de la Marquesa. Font: Elaboració pròpia, dades de Navionics.</i>	_____	- 58 -
<i>Figura 37. Rosa d'onatge i direcció de la Platja de la Marquesa, Punt SIMAR (2094129) . Font: Puertos del Estado</i>	_____	- 59 -
<i>Figura 38. Batimetria de la Platja de Buda. Font: Elaboració pròpia, dades de Navionics.</i>	_____	- 60 -
<i>Figura 39. Rosa d'onatge i direcció de la Platja de Buda, punt SIMAR (2094128). Font: Puertos del Estado</i>	_____	- 61 -
<i>Figura 40. Batimetria de la Platja del Trabucador. Font: Elaboració pròpia, dades de Navionics.</i>	_____	- 62 -
<i>Figura 41. Rosa d'onatge i direcció de la Platja del Trabucador, punt SIMAR (2093127). Font: Puertos del Estado</i>	_____	- 63 -
<i>Figura 42. Distribució que serpara les regions d'erosió i acreció per dades de camp. Font: Larson et al, 1991.</i>	_____	- 70 -

LLISTAT DE TAULES

<i>Taula 1. Dades i paràmetres Platja de Buda. Font: Elaboració pròpia.</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Taula 2. Període de Pic (Tp) - Altura Significant (Hs) en % de la Platja de Buda de Gener 1958 - Abril 2022</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Taula 3. Altura Significant (Hs) - Direcció de l'onatge en % de la Platja de Buda de Gener 1958 - Abril 2022</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Taula 4. Paràmetres necessaris per poder calcular Kt per Angremond et al (1996) i Seabrook et al (1998). Font: Elaboració pròpia</i>	<i>- 69 -</i>
<i>Taula 5. Kt i Ht calculades per una estructura emergida amb Rc = 0.01 m en un escenari amb Hs = 0.81 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Taula 6. Kt i Ht calculades per una estructura emergida amb Rc = 0.01 m en un escenari amb Hs = 3.12 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Taula 7. Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb Rc = - 0.5 m en un escenari amb Hs = 0.81 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Taula 8. Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb Rc = -0.5 m en un escenari amb Hs = 3.12 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Taula 9. Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb Rc = - 1.0 m en un escenari amb Hs = 0.81 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Taula 10. Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb Rc = -1.0 m en un escenari amb Hs = 3.12 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Taula 11. Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb Rc = - 1.25 m en un escenari amb Hs = 0.81 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Taula 12. Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb Rc = -1.25 m en un escenari amb Hs = 3.12 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Taula 13. Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb Rc = - 1.5 m en un escenari amb Hs = 0.81 m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	<i>- 75 -</i>

Taula 14. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.5$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 75 -
Taula 15. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -0.5$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 76 -
Taula 16. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -0.5$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 76 -
Taula 17. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.0$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 77 -
Taula 18. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.0$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 77 -
Taula 19. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.25$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 78 -
Taula 20. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.25$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 78 -
Taula 21. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.5$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 79 -
Taula 22. <i>Kt i Ht calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.5$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 79 -
Taula 23. <i>. Taula resum dels paràmetres obtinguts per cada fórmula, dins els intervals de confiança marcats en blau. Font : Elaboració pròpia.</i>	- 80 -
Taula 24. <i>Números de Dean obtinguts per l'estructura emergida amb $R_c = 0.01$ m i amb $H_s = 0.81$ m i $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond et al.,(1996). Font : Elaboració pròpia.</i>	- 81 -
Taula 25. <i>Números de Dean obtinguts per l'estructura submergida amb $R_c = -0.5$ m i amb $H_s = 0.81$ m i $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond et al.,(1996) i Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia</i>	- 82 -

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Motivació

Donada la situació actual d'emergència climàtica, ens trobem davant de la necessitat de cercar solucions que perdurin en el temps per poder conservar i protegir les nostres costes. En especial aquelles zones deltaïques com el Delta de l'Ebre entre d'altres, que experimenten grans pressions davant episodis de temporals extrems cada vegada més freqüents com el que va succeir durant el Glòria, al gener de 2020. Així doncs, es vol elaborar un estudi de diferents propostes de protecció sostenibles basades en la natura.

La protecció de la costa sempre ha sigut encarada amb estructures rígides antròpiques i en molts casos perjudicials per a l'ecosistema. És per això que en aquest cas es volen proposar diferents solucions, que no tan sols, no perjudiquin l'ecosistema, sinó que alhora el beneficiïn, fent augmentar el benestar d'aquest i prioritzant les solucions ambientals davant de les tradicionals i l'antropogenització dels ecosistemes.

El que es pretén doncs, tenint en compte totes les alternatives de les quals disposem avui en dia, és protegir el Delta de l'Ebre, un delta que es troba situat entre les dues comarques de Baix Ebre i Montsià, a la província de Tarragona, Catalunya. Aquest és de gran importància ambiental, així com tots els espais que presenta, tractant-se d'un ambient marcat per aiguamolls, badies, arrossars, fangars i l'emblemàtica platja barrera del Trabucador. Així doncs, conservar-lo i protegir-lo sembla més viable que mai. Construint amb la natura i fent servir la natura per reconstruir i conservar alhora que per estimular l'autòcton ecosistema que tenim al Delta de l'Ebre.

1.2. Objectius

El principal objectiu d'aquest treball és la cerca i avaluació de diferents NbS pel Delta de l'Ebre donada la seva situació d'erosió i gran preocupació per part dels científics pel seu futur. Per poder avaluar aquestes NbS es buscarà la resposta a les següents preguntes:

- Quines són les diferents opcions basades en la natura que s'estan proposant per la protecció costanera arreu del món?
- Quins són els reptes actuals i futurs als quals es podria veure sotmès aquest sistema deltaic?
- Quin efecte tenen les solucions trobades, envers els beneficis que cada ecosistema aporta a la societat?
- És possible reduir la regressió que està patint el Delta?
- Com haurien d'aplicar-se aquestes solucions al Delta?

1.3. Situació actual

Donat l'augment del nivell del mar, el qual presenta amenaces severes davant de zones costaneres més exposades, així com l'augment d'esdeveniments meteorològics extrems i els fenòmens a escala global com els vents extremals.

Així com, tenint present la regressió que aquest està patint el Delta, per falta de sediments, donat que el 99% dels sediments que haurien d'arribar al Delta, queden atrapats en els embassaments pels quals passa durant el seu camí fins que arriba a la costa (Rovira et al. 2015).

Es presenta la necessitat de protegir la costa de manera immediata i durant un llarg període de temps. Donat que, totes les conseqüències que ja està provocant el canvi climàtic, afectaran de manera més severa, a mesura que avancen els anys, als ecosistemes costaners. Així com afectarà l'augment del nivell del mar davant d'un Delta que es troba en regressió per no rebre tot l'aport sedimentari que hauria de rebre de manera natural, quelcom provocarà una situació cada vegada més crítica, com ja es porta veient en els últims anys.

1.4. Hidrodinàmica

Amb aquest treball es busca fer un recull de les diferents solucions basades en la natura i veure com aquestes poden protegir les nostres costes. En específic mirar de trobar diferents solucions per la protecció del Delta de l'Ebre. Així doncs, és inevitable introduir alguns coneixements d'hidrodinàmica necessaris per entendre la física que es troba darrere de la interacció mar-costa.

En primer lloc, és necessari visualitzar alguns termes descriptius que ens ajudaran a entendre com arriben les onades a la costa, on trenquen i com afecten sobre aquesta.

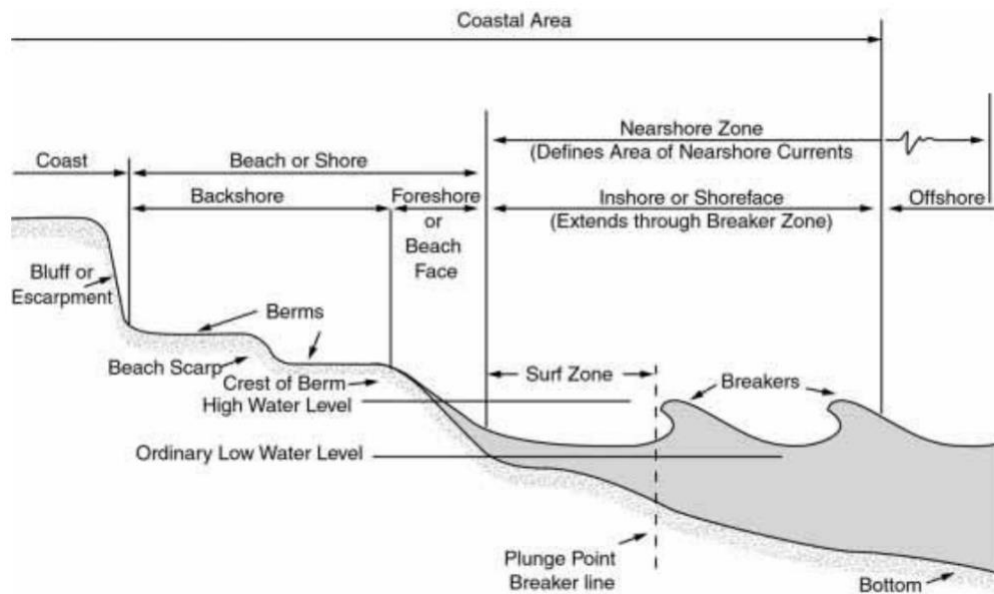


Figura 1. Terminologia del perfil de platja. Font: Shore Protection Manual 1984

Totes les platges arreu del món segueixen un perfil similar al que podem observar a la figura 1. Aquesta es divideix en 4 grans parts: les aigües més llunyanes i fondes "offshore". La zona propera a la línia de la costa "nearshore", on es dona el trencament de l'onatge i inclou la zona de surf. La zona de la platja o línia de costa "beach or shore", on es dona el run-up, el run-down i on es troba la berma de la platja. Finalment trobem la costa, en la qual ja no arriben els moviments oscil·latoris de l'aigua.

Les onades són les principals impulsors dels processos que es donen a la línia de la costa. Aquestes són generades principalment per l'acció del vent i donen lloc al transport d'energia. L'energia que arriba a les aigües someres es dissipa a la zona de surf (figura 1), la qual pot ser molt gran i pot generar molts problemes a la línia de la costa.

L'energia de les onades està relacionada amb el quadrat de la seva alçada. Tenint en compte que la fórmula de l'energia és la següent

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

E = energia d'ona
 ρ = densitat de l'aigua
g = força de la gravetat
H² = alçada d'ona al quadrat

Una onada d'1 metre d'alçada té una energia per unitat d'àrea d'aproximadament 1250 J/m². Si aquesta tingués un període de 6 segons, entrarien 10 onades per minut, quelcom produirà l'entrada de 4000 W a la zona de surf per metre de costa (Dean & Dalrymple, 2001).

La forma més senzilla d'una onada és definida per la teoria de les ones lineals (Airy, 1845), la qual es mostra a la figura 2, que suposa que una ona es propaga en positiu en direcció (x), d'esquerra a dreta. En aquesta podem observar la longitud d'ona (L), l'alçada d'ona (H), l'amplitud (a), la profunditat (h) i la superfície de l'aigua ($\eta(x, t)$).

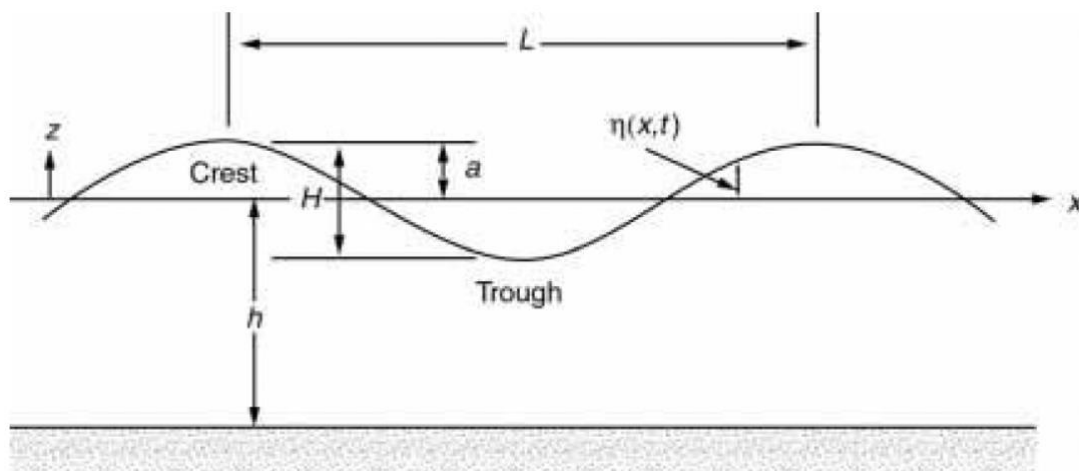


Figura 2. Esquema d'una onada. Font: Dean & Dalrymple, 1991

Podem entendre la refracció en funció de la celeritat de l'onatge, la qual depèn de la profunditat, donant-se a major profunditat, major celeritat, en el moment en el qual dos punts situats a la mateixa distància de l'ona, estiguin situats amb una profunditat diferent. L'ona aleshores, experimentarà una distorsió de la direcció, ja que, al punt en el qual hi hagi més profunditat, es desplaçarà a major velocitat que al punt on hi ha menys.

Quan l'onatge es troba sotmès a la refracció, tendeix a establir-se paral·lel a les línies batimètriques i a concentrar la seva energia als caps, alhora que tendeix a reduir la intensitat als golfs. Només en el cas en el qual l'onada i les batimetries siguin completament paral·leles no es presentarà refracció.

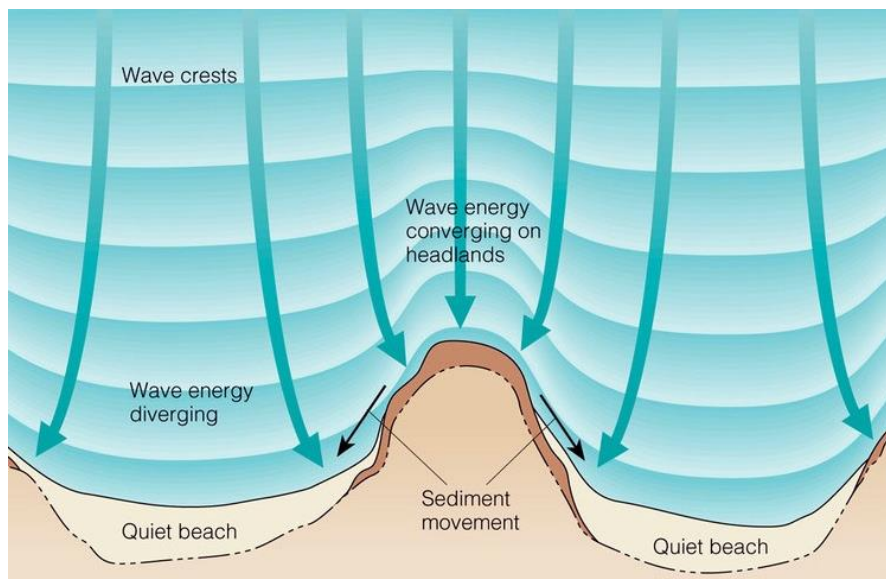


Figura 3. Refracció de les onades. Font: surfertoday.com

Un altre efecte a tenir en compte és el Shoaling, que es produeix quan les onades comencen a notar el fons i per tant a incrementar el seu peralt. Quelcom ve donat pel començament de la no-linealitat i acaba provocant el trencament de les onades.

D'altra banda, existeix la difracció, la qual es produeix quan es donen canvis sobtats d'alçada d'ona, donats quan aquestes es troben amb un objecte que impedeix l'entrada parcial de l'onatge amb total normalitat, com podria ser un dic amb una fuita o un seguit d'espigons paral·lels a la costa. Així doncs, la cessió d'energia provoquen canvis de direcció d'ona en el front de l'onada, fent que aquella part de l'energia que entra arribi a la costa en forma de semicercle com podem observar a la figura 4.



Figura 4. Difracció. Font: arizona.edu

La reflexió és el procés que es dona quan les ones topen amb un obstacle, aleshores aquestes poden resultar reflexades de manera total o parcial. El poder de la reflexió dominant ve donat per l'índex del poder reflexant de l'obstacle, el qual és defineix com la divisió entre l'alçada de l'ona reflexada i l'alçada de l'ona incident. Donant-se en molts casos el sobreposament de les ones reflexades sobre les incidents i generant un transport de sediment major, donada la gran energia a la que està sent sotmès aquest punt. Així i tot, que una onada presenti un índex igual a zero, no vol dir que l'energia hagi sigut totalment dissipada, ja que l'onada pot transmetre's a través de l'obstacle.

El coeficient de transmissió (K_t) s'utilitza en física i enginyeria elèctrica quan es considera la propagació de les ones en un medi que conté discontinuïtats. Aquest descriu l'amplitud, la intensitat o la potència total d'una ona transmesa en relació amb l'ona incident. El que ens proporcionarà aquest coeficient de les ones que trobem al mar, és saber com ha afectat una estructura a les ones incidents. Així com amb aquest paràmetre podrem saber com seran aquestes una vegada han passat per l'estructura, ja que la K_t es defineix com : $K_t = \frac{H_t}{H_i}$, on la H_i i H_t són l'alçada de l'ona incident i transmesa. Aquesta té un rang de $0 < K_t < 1$, per al qual un valor de 0 no implica cap transmissió i un valor d'1 implica transmissió completa (Pilarczyk, et al., 2003).

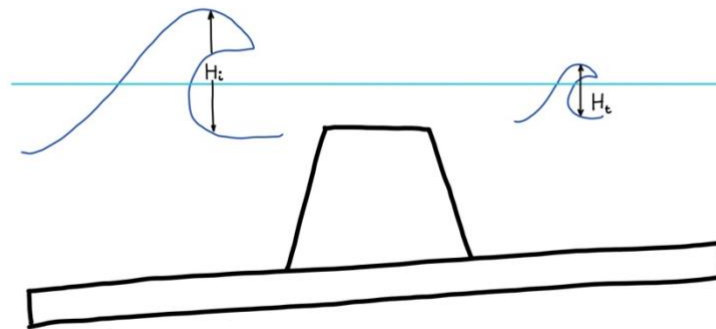


Figura 5. Ona incident i ona transmesa una cop ha passat per l'estructura. Font : Elaboració pròpia.

El trencament de les onades a aigües fondes es dona a causa de l'excés d'energia, en canvi, a aigües poc fondes les ones trenquen un cop es tornen inestables. A aigües properes a la costa, el procés de trencament de les onades té un paper crucial en la morfodinàmica costanera, com ara en les tendències d'acreció o erosió i el desenvolupament i la dinàmica de les barres i els "rip currents" propers a la costa.

La forma del trencament de l'onatge es defineix a partir del número d'Iribarren

$$\xi = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H/L_0}}$$

ξ = número d'Iribarren
 β = pendent de la platja
 H = alçada d'ona
 L_0 = longitud d'ona

A partir d'aquest número es defineixen els tipus d'ona que es poden donar a costa com podem observar a la figura 6.

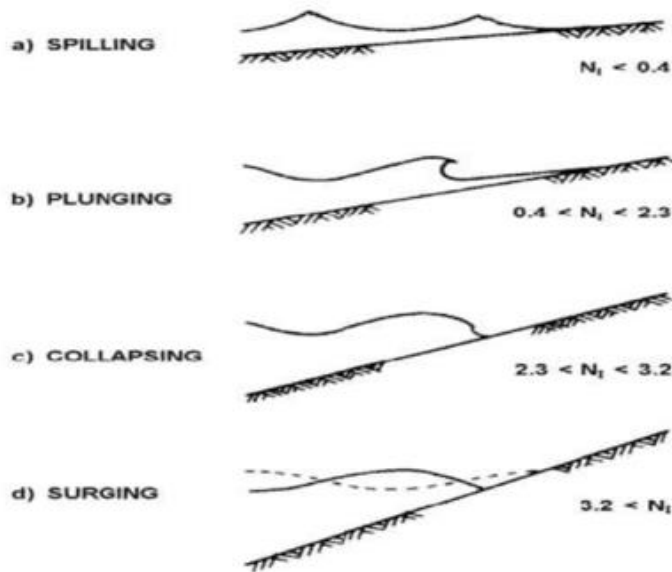


Figura 6. Tipus d'ona en funció al número d'Iribarren. Font: Caceres, 2022

El set-up es defineix com l'elevació del nivell mitjà de l'aigua que es dona a la línia de la costa a causa del trencament de les onades a la zona de surf. El començament de la no-linealitat de l'onatge al començar a notar el terra, provoca la peraltació de l'onatge, seguidament del trencament, el qual provoca un transport d'aigua cap a la zona de surf. Quan aquesta aigua arriba a la línia de la costa i s'acumula, generant el set up. El qual genera un gradient de pressió cap a mar obert, que es el terme impulsor de l'undertow. Així doncs, quant més gran sigui el gradient de pressió al set up, retornarà en forma d'undertow, en funció a la pressió a la qual es trobi aquest a la zona de swash, generant-se un major undertow com major sigui el set up.

La zona de swash es la part que queda intermitentment submergida i emergida entre el run up i el run down de les onades, començant on acaba la zona de surf i on mor el run-up marcant el final on les onades arriben a la seva màxima pujada i retorna el run-down provocat per les onades i els vores. Aquesta part de la platja es veu afectada de manera intermitent per les successives onades que travessen aquesta zona en zig-zag. En aquesta zona també es produeix el set-up, ja explicat anteriorment. Aquesta àrea en conseqüència a totes les interaccions que succeeixen en ella, és on es dona el major transport de sediments.

A la figura 7 podem observar com els factors de shoaling, trencament i la dinàmica a la zona de swash es produeixen un seguit de l'altre des que l'ona arriba, comença a notar el terra i, per tant, es peralta, trenca i seguidament comença a entrar a la zona de swash produint el set-up i el run-up.

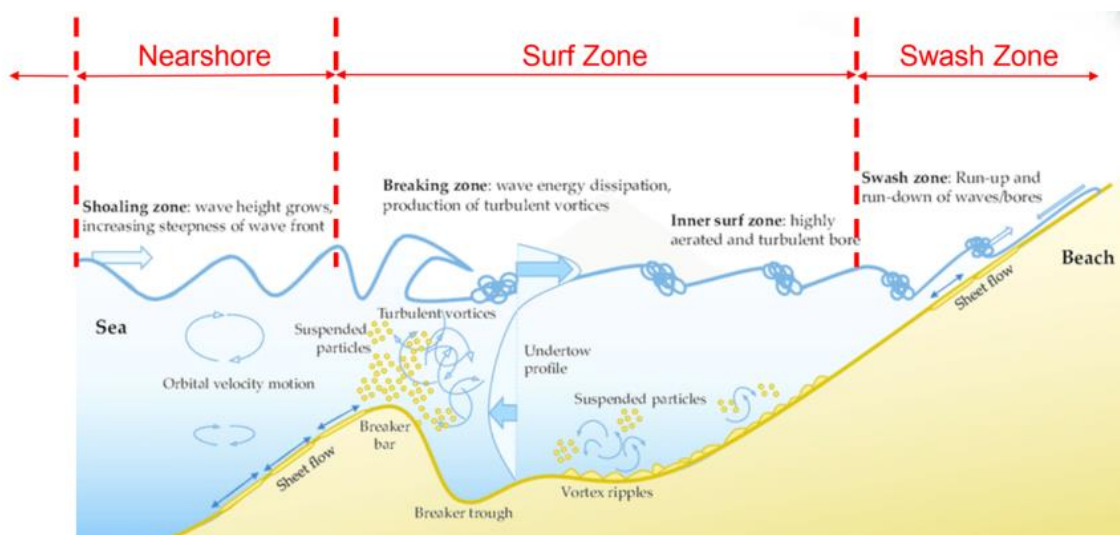


Figura 7. Dibuix conceptual dels processos que es donen prop de costa. Font: Van der Zanden, 2016

2. SOLUCIONS BASADES EN LA NATURA

Les solucions basades en la natura, poden complementar o substituir les tradicionals estratègies de defensa costanera. Aquestes són més sostenibles, redueixen l'impacte ambiental i aporten beneficis addicionals a nivell social i econòmic.

Es defineixen com a forma innovadora de dissenyar sistemes de defensa costanera específics, integrats i de manera sostenible. En comptes de construir estructures sòlides i tradicionals a la natura, l'objectiu que tenen és poder treballar amb la natura, restaurant o optimitzant la protecció natural del medi, utilitzant processos naturals ja existents o construint amb materials naturals. Aquestes construccions només poden ser realitzades amb la col·laboració interdisciplinària per part d'enginyers, ecologistes, habitants i polítics.

Des d'una perspectiva enginyeril, això implica que les construccions basades en la natura, han de ser resilents i adaptables a un entorn canviant. Tot i així, s'ha de prioritzar la conservació de l'ecosistema existent sense fer-lo malbé, sinó tot el contrari, intentar estimular la restauració d'aquest. Alhora, aquest tipus de solucions necessiten ser econòmicament competitives així com tenir un compromís polític al darrere i crear una millor qualitat de vida pels habitants de l'entorn.

2.1. Estat de l'art

Al 2008 el terme NbS va se introduït a un informe de The World Bank, seguidament al 2009 la Unió Internacional per la Conservació de la Natura (IUCN) juntament amb Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (UNFCCC), va publicar el primer paper científic que tractava de manera específica les NbS. D'aleshores fins al 2015, aquestes es van anar coneixent a nivell mundial, però de manera discreta. És al 2016, a partir de l'agenda d'estratègia d'investigació i innovació (SRIA), presentada pel col·laborador de l'UE, BiodivERsA, quan aleshores es va començar a veure un gran augment de les publicacions envers les NbS, donat que aquesta agenda es va focalitzar en les NbS. Des de aleshores fins al dia d'avui, les NbS han estat un tema d'actualitat i de molt interès per part de tota la comunitat científica.

Es cert però que si parlem d'aplicació d'aquestes a tot el món trobem que als Estats Units d'Amèrica (EUA) és on més actuacions d'NbS s'han fet de tot el món. Als EUA però, és refereixen a elles també com a living shorelines, traduït com a línia de la costa viva. Entenen les living shorelines com un terme ampli que engloba una sèrie de tècniques d'estabilització de la línia de costa al llarg d'estuaris, badies, afluents i altres línies de costa protegides.

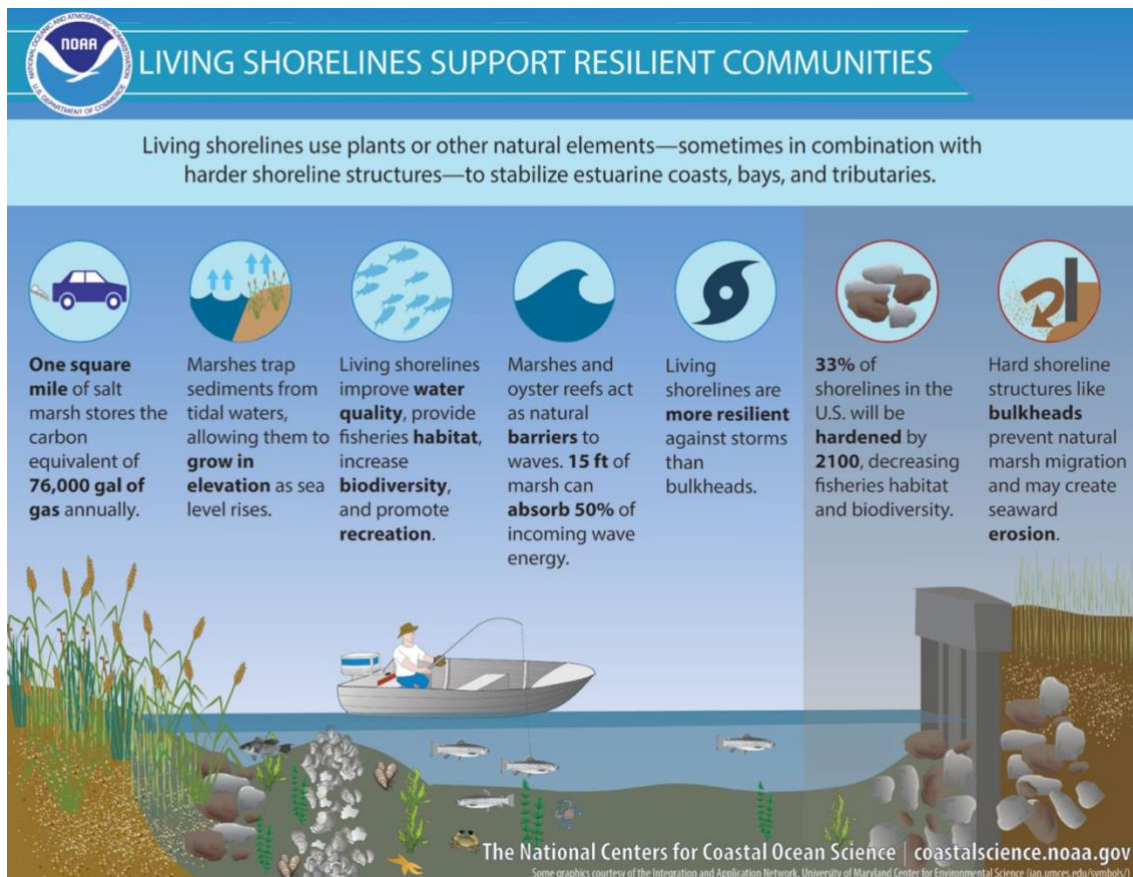


Figura 8. Living shorelines. Font: NOAA.gov

Incorporant vegetació natural o altres elements suaus i naturals vius sols o en combinació amb algun tipus d'estructura costanera més dura, com ara esculls d'ostres, llindars de roca o fusta gran ancorada per a més estabilitat. Les costes vives connecten la terra i l'aigua per estabilitzar la línia de costa, reduir l'erosió i proporcionar serveis ecosistèmics, com un hàbitat valuós, que milloren la resiliència costanera.

2.2. Diferència amb els mètodes tradicionals

Les infraestructures tradicionals, més sòlides i específiques que són utilitzades, no proveeixen un suficient temps de durada (resiliència) en molts dels casos per poder protegir la costa durant un llarg període de temps. En canvi, el fet d'utilitzar processos i recursos naturals per reduir l'erosió de la costa i al mateix temps les inundacions, produeix alhora beneficis per la societat i els seus interessos econòmics.

Les construccions tradicionals són inadequades per llargs terminis de temps, ja que han estat creades per solucionar problemes locals per un temps reduït i avui en dia es requereixen estructures pensades per poder perdurar durant més temps. Encara més, tenint en compte que el canvi climàtic és una problemàtica que esdevindrà de llarga durada. A part, en molts casos aquestes infraestructures tradicionals provoquen l'increment de l'erosió, la reflexió entre altres inconvenients, quelcom contradictori al que es busca amb les NbS. És per això que la incapacitat de les estructures tradicionals per adaptar-se al clima canviant, corrobora que és necessària la cerca de solucions de protecció costanera sostenibles.

Les NbS en comparació amb les estructures de defensa costanera tradicionals ofereixen moltes oportunitats interessants en l'àmbit econòmic, incrementant la pesca i el turisme. Així com en l'àmbit ambiental, creant i protegint la natura. Al mateix temps que en l'àmbit social, millorant la salut vital de les persones que viuen prop de les costes així com creant llocs de treball.

Aquestes, han començat a ser considerades com a alternatives des de la passada dècada. Tot i que avui en dia provoquen moltes incerteses pels enginyers, alhora que pels ecòlegs. Per poder investigar sobre les NbS és important la feina tant dels enginyers com dels ecòlegs, així com la de l'empresa privada com la dels governs.

2.3. Tipus de NbS

2.3.1. Esculls d'ostres

Les ostres viuen en aigües costaneres salades o salobres, s'agrupen sobre closques més velles, roques, molls o qualsevol superfície dura i submergida. Les closques s'adhereixen entre elles a mesura que creixen, d'aquesta manera és com es van formant els esculls d'ostres, els quals proporcionen hàbitat per altres animals i plantes marines.



Figura 9. Escull d'ostres natural. Font: pewtrusts.org

El cicle de vida de les ostres comença amb individus adults, mascles i femelles que alliberen espermatozoides i òvuls a l'aigua, on es produeix la fecundació. Els ous fecundats eclosionen ràpidament en larves, també anomenades “veliger” o, més freqüentment, “spat”. Durant dues setmanes, les larves suren lliurement, s'alimenten de plàncton i depenen del vent i els corrents fins que troben una superfície sòlida i atractiva on adherir-se. Allà creixeran i passaran la resta de la seva vida. Les larves d'ostres trien aquesta ubicació en funció de les condicions físiques (fermesa i textura) i químiques (emeses per les closques d'ostres adultes) (Brumbaugh et al., 2006; Zivkovik, 2010). Com que l'ostra no tindrà una altra oportunitat de moure's, és fonamental trobar un lloc que garanteixi la seva supervivència i desenvolupament fins a l'edat adulta. Roques, closques velles, restes i molls acumulen ostres que creixen juntes, closca sobre closca, i a mesura que l'escull pren forma, es converteix en un excel·lent refugi per a molts organismes marins.

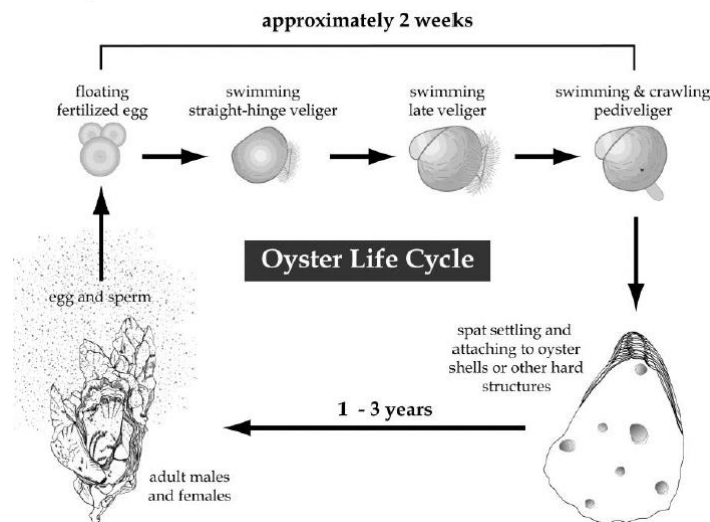


Figura 10. Oyster life cycle. Font: Stokes et al., 2012

Beneficis dels esculls d'ostres

Els esculls d'ostres produeixen molts beneficis per l'ecosistema, la societat i l'economia entre els quals trobem com a principals els següents:

- Ecosistema: els esculls d'ostres creen i proporcionen un hàbitat important per a centenars d'espècies, ja que sobre ells s'hi instal·len organismes com els musclos, els percebes i les anemones de mar, creant una gran font d'aliments per a peixos, invertebrats i marisc de gran valor comercial (NOAA,2022).
- Economia pesquera: creen una zona de cultiu i collita d'ostres que generen un gran valor econòmic, així com propicien hàbitat a invertebrats i marisc, el qual fa que aquestes estiguin a l'abast de la població per extreure recurs alimentari i beneficis econòmics per la societat. Així doncs, augmenten la producció pesquera, donant per exemple als EUA més de 200.000 llocs de treball i 2.400 milions de dòlars en la indústria pesquera (Gordon et al., 2011). Quan els esculls d'ostres només s'utilitzen com a recurs econòmic per l'explotació de les ostres comercials, es poden degradar. En canvi, quan es restauren i es gestionen com a recurs sostenible, els esculls d'ostres i l'hàbitat que proporcionen poden aportar molts més beneficis per l'economia local.

- Aigua neta: Les ostres són un component crucial per la salut global dels oceans. Donat que aquests animals filtren l'excés de nitrogen i altres contaminants químics de l'aigua, proporcionant el mateix servei que realitzen plantes de tractament d'aigües residuals de cost elevat (Newell et al., 2005; Piehler i Smyth, 2011). Això és degut al fet que les ostres s'alimenten a partir de la filtració d'algues, quelcom produeix que netegin l'aigua circumdant, actuant com a filtre natural. Donant com a resultat unes aigües més clares i netes, creant un fons estable i un hàbitat segur i nutritiu per altres espècies com els crancs, vieires i peixos juvenils.
- Protecció costanera: Els esculls d'ostres serveixen com a barreres naturals, ja que redueixen l'energia de les ones, evitant l'erosió i fortificant les zones humides que proporcionen una valuosa protecció davant les inundacions i les onades de tempesta (Coen et al., 2007; Scyphers et al., 2011).

Aplicació d'esculls d'ostres com a NbS

Existeixen diferents formes de construir, conservar i restaurar esculls d'ostres perquè actuïn com a NbS. L'element més important en la restauració dels esculls d'ostres, és construir un substrat que atragui les larves d'ostres. Alhora ha de ser prou alt per evitar que les ostres s'enfonsin al sediment. Un substrat que imiti un escull d'ostres natural, és essencial per maximitzar el creixement i establir la protecció de la costa (DeQuattro, 2011; Graham, 2011; Schulte et al., 2009). Es poden construir a la zona intermareal, entre la marea alta i la marea baixa, trobant-se submergides en marea baixa i emergides en marea alta; o a la zona submareal, les quals quedaran sempre per sota de la superfície de l'aigua.

La construcció d'esculls d'ostres es pot agrupar en tres categories:

I. Esculls de cultiu plantat en alt relleu

També anomenats com esculls cultch, són materials triturats anomenats cultch, que s'amunteguen amb una alçada de mínim 0,3 metres per així augmentar el reclutament d'ostres joves i així mantenir les ostres per sobre el sediment (Lipcius, 2011). El cultch en moltes ocasions es tracta de closques d'ostres, ja que aquestes proporcionen textura i emeten senyals químics que atrauen les larves d'ostres per així augmentar el reclutament. En cas d'escassetat de closques, s'utilitzen roques triturades de tipus calcari, granit o bé formigó, vist que s'ha demostrat que aquests són substitutius comparables i en alguns casos s'afegeix una capa de closques per augmentar el reclutament. Els esculls de cultiu es creen amb més freqüència a les zones submareals, encara que no a més de 3 a 5 metres sota la superfície (Lipcius, 2011). Per construir aquests esculls, es transporten grans quantitats de cultch en barcasses fins al lloc del projecte i després fan servir excavadores, grues o mànegues d'aigua d'alta pressió per empènyer el material per la borda.



Figura 11. Escull de cultiu plantat en alt relleu. Font: Stokes et al., 2012

II. Escull de cultiu contingut

Els esculls de cultch contingut proporcionen una base més estructurada i es construeixen amb diversos contenidors plens de cultch. Localitzats habitualment a les zones intermareals, els esculls continguts més bàsics consisteixen en bosses de malla de closques d'ostres (oyster mat) amuntegades unes sobre les altres. A vegades s'instal·la un revestiment de bosses d'ostres (mesh bags) sobre l'escull de cultiu de pedra calcària per aconseguir un aspecte més natural a prop dels fronts marítims residencials (DeQuattro, 2011). Per obtenir una estructura més sòlida, s'utilitzen gàbies de malla de filferro anomenades gabions tant a les zones intermareals com a les submareals. Aquests gabions s'omplen de petxines i llast, després s'apilen i es connecten per construir estructures tridimensionals robustes. Altres tècniques com les estores d'ostres creen substrats de baix relleu amb closques d'ostres lligades a quadrícules geotèxtils ancorades (Birch, 2011). Alguns dels dissenys més actuals combinen gabions amb bosses d'ostres o malles d'ostres. Un disseny fet per Hesco Delta Unit consta de gabions folrats de malles d'ostres farcits de terra per a llast i bosses d'ostres a l'exterior per al cultiu. A mesura que les herbes marines arrelen i creixen al sòl, les unitats reforcen la línia de costa. Altres unitats anomenades ReefBlks estan fetes de barres d'armadura soldades en prismes triangulars que tenen malles i bosses d'ostres. Aquestes unitats s'ajunten en zones intermareals per crear una barrera lineal entrelaçada i paral·lela a la costa.



Figura 12. Dissenys de cultiu contingut. Font: Stokes et al., 2012

III. Escull de formigó prefabricat.

Els esculls d'ostres de formigó prefabricat es construeixen mitjançant una sèrie d'estructures de formigó prefabricades, que estan dissenyades per imitar els esculls d'ostres naturals. En alguns casos, la mescla de formigó s'enforteix amb un additiu per augmentar el reclutament d'ostres. Els dos dissenys més comuns són el "Reef Balls" i l'"OysterBreak". Les "Reef Balls" són monticles buits de formigó amb diversos forats que proporcionen punts de fixació per al reclutament d'ostres. Existeixen diverses mides, que permeten versatilitat en diversos ambients marins que poden anar des d'estuaris fins a aigües obertes. L'OysterBreak és un sistema de grans anells de formigó apilables que són capaços d'apilar-se a diverses alçades. Tant els Reef Balls, com els OysterBreak estan dissenyats tant per estuaris com per aigües més fondes amb més energia d'onatge (Turley, 2011).



Figura 13. Disseny d'escull de formigó prefabricats. Font: Stokes et al., 2012

Distribució i estat dels esculls d'ostres

El 85% dels esculls d'ostres arreu del món s'han perdut durant els darrers 200 anys (Beck et al., 2011). La figura 14 presenta l'estat global dels esculls d'ostres a les badies i ecoregions estudiades per Beck et al., 2011. Les qualificacions de condicions han estat de: bona, justa, dolenta i funcionalment extingits. Aquestes qualificacions es basen en el percentatge d'abundància actual i l'abundància històrica d'esculls d'ostres restants: menys del 50% perdut (bo), 50% a 89% perdut (just), 90% a 99% perdut (pobre), més del 99% perdut (funcionalment extingit).

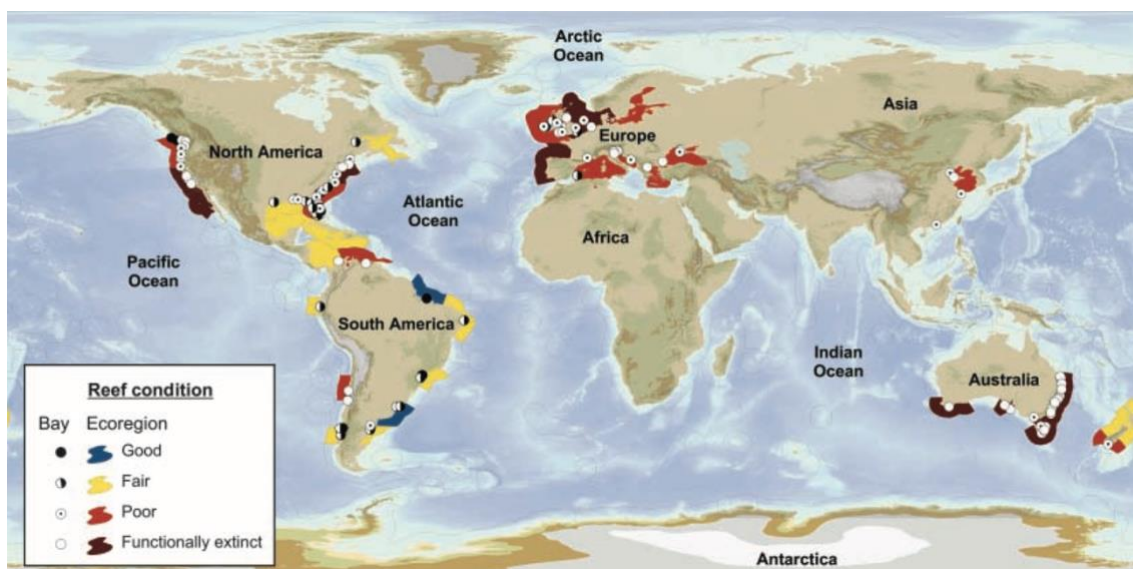


Figura 14. L'estat global dels esculls d'ostres a les badies i ecoregions. Font: Beck et al., 2011

Aquest estudi va realitzar la caracterització de la situació dels diferents esculls que es trobaven a 144 badies i 44 ecoregions, amb la intenció de conèixer el seu estat i mirar de conservar i reconstruir el màxim nombre d'esculls possibles. Donat que, les ostres han estat treballant com a enginyeres del seu ecosistema des de fa molts anys (Lenihan and Peterson 1998), aportant alhora protecció costanera a la societat, beneficis econòmics i una gran biodiversitat.

Algunes de les amenaces que han fet malbé i poden seguir perjudicant els ecosistemes d'ostres són les següents:

- Esdeveniments naturals de caràcter climàtic i atmosfèric
- La contaminació
- Els depredadors autòctons

- La sobreexplotació històrica
- Les pràctiques de pesca destructives
- La collita de closques d'ostres per a la construcció de camins
- L'ús de la draga per collir ostres
- La introducció d'espècies marines no autòctones
- El desenvolupament costaner urbà
- L'alteració de la hidrologia natural amb la creació dels canals i vies de navegació
- L'excés de nitrogen per la fertilització de les terres agrícoles

Així doncs, les amenaces a les quals s'enfronten els esculls d'ostres són contínues i tot i que es facin esforços per protegir-les i restaurar-les, correm el perill de perdre els beneficis que aquests ofereixen.

Cas d'estudi d'esculls d'ostres com a NbS

Morris et al., 2021 presenta un cas d'estudi de la utilització d'esculls d'ostres com a NbS. En aquest estudi es planteja la caracterització de l'atenuació de les onades per una costa amb esculls d'ostres orientals (*Crassostrea virginica*) en desenvolupament. Per avaluar les tendències de l'atenuació a diferents entorns i tipus d'escull. Tenint també en compte les limitacions ecològiques de les ostres per caracteritzar l'equilibri esperat entre l'atenuació i la persistència dels esculls. Es van avaluar 15 esculls a 5 localitzacions diferents i es va avaluar l'atenuació de les onades en relació amb la durada de la inundació de l'escull.

L'estudi en qüestió va utilitzar sensors de pressió per obtenir les alçades d'ona de cada una de les zones d'estudi. Amb les quals es va calcular el coeficient de transmissió. Aquest es va definir com la relació entre l'alçada de l'ona mesurada i la prevista, on l'alçada de l'ona prevista era la limitació de l'alçada de l'onada de fons o trencament.

(Eq. 7; Haynes 2018) $\rightarrow K_t = \frac{H_{s,on}}{H_{s,pred}}$

K_t = coeficient de transmissió
 $H_{s,on}$ = alçada d'ona a la part posterior de la Nbs
 $H_{s,pred}$ = alçada d'ona prevista

El coeficient de transmissió de les ones (K_t) té en compte els canvis potencials en l'alçada de les ones a causa del shoaling i la ruptura, però no altres processos que no es podrien controlar en aquest estudi (per exemple, la refracció i la difracció). El processament es va donar com a resultat dades horàries per a la profunditat de l'aigua, l'alçada significativa de l'ona per cada sensor de pressió, el període de l'ona i el coeficient de transmissió de les ones durant el període en què els sensors de pressió estaven sota l'aigua.

El francbord es va mesurar com la diferència entre la cresta de l'escull i la superfície lliure del nivell del mar. Donant valors positius quan es troba emergit i negatius quan està submergit. La durada de la inundació es va calcular com el percentatge de temps que es va submergir tot l'escull durant el període d'estudi. La diferència entre l'elevació de la cresta de l'escull i el nivell de l'aigua es va utilitzar per calcular el percentatge de temps que es va inundar la cresta de l'escull. Els esculls es van classificar en $>50\%$ o $<50\%$ inundats.

També es van comparar els pendents de regressió entre les altures significatives de les onades mesurades i previstes a terra per als controls i els esculls d'ostres en funció de la durada, l'amplada i el material de construcció de l'escull. A més, es van comparar les alçades de les onades als controls, als esculls d'ostres i a les formacions de roca o els esculls d'ostres naturals.

A la figura 15 podem observar les dades de K_t que es van obtenir en funció del seu francbord (R_c) per als esculls d'ostres que tenien una durada d'inundació inferior o $>50\%$. Un valor de transmissió d'ona <1 indica una reducció de l'alçada de l'ona. Un valor de francbord positiu o negatiu indica que l'escull està emergit o submergit, respectivament. L'àrea ombrejada és l'interval de confiança del 95%.

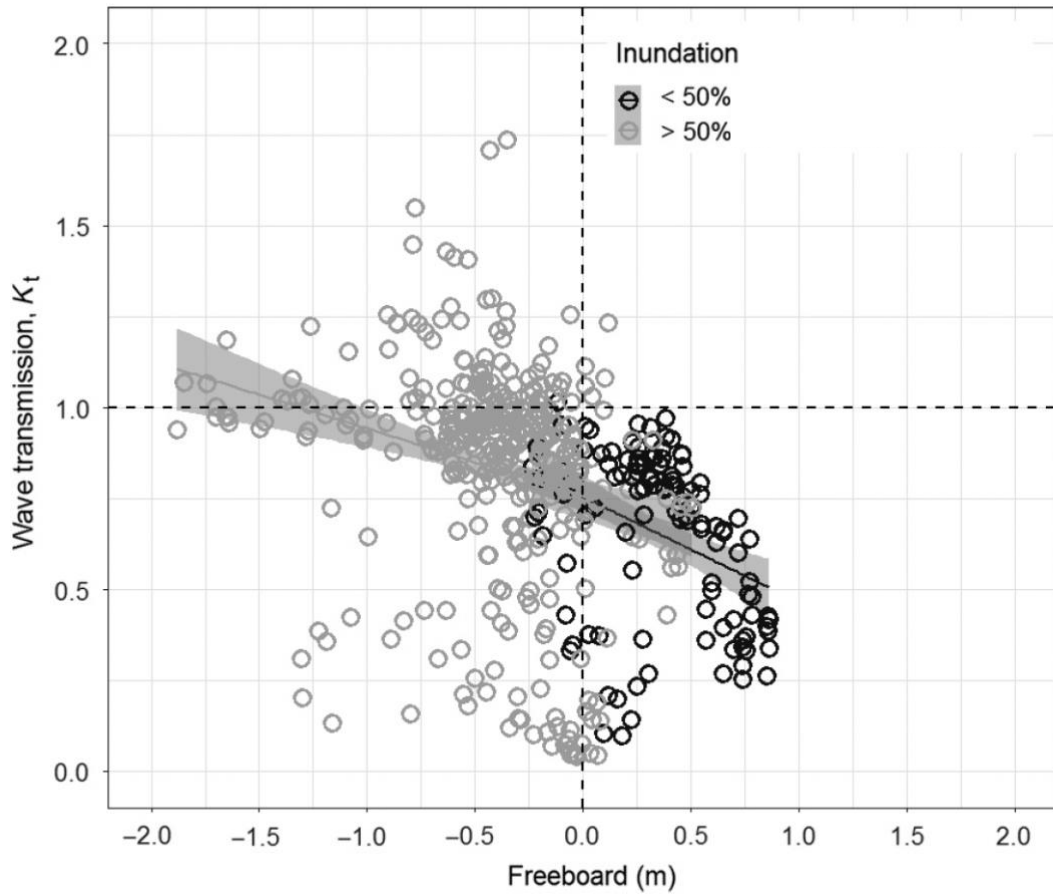


Figura 15. Correlació entre el coeficient de transmissió (K_t) i el francbord (R_c)

Finalment es va extreure que la transmissió de les onades era més gran per aquells esculls que superen el 50% d'inundació en comparació amb les que no superen aquest 50%. Pel que fa l'atenuació també augmenta conjuntament amb l'amplada de l'escull.

2.3.2. Esculls de corall

Els esculls de corall són estructures subaquàtiques formades per carbonat de calci secretat pels mateixos coralls, grups diversos d'animals invertebrats de la família dels cnidaris. Es tracta d'un dels ecosistemes més diversos de la Terra, i tot i que ocupen menys de l'1% de la superfície total dels oceans, són l'hàbitat del 25% de totes les espècies marines. Alhora són especialment vulnerables als efectes de les activitats humanes, com ara la contaminació, el canvi climàtic, la sedimentació i la pesca (NOAA, 2022)



Figura 16. Escull de corall a Maldives. Font:newsscientist.com

Existeixen dos grans grups de coralls, els Hermatípics, que contribueixen a la construcció de l'escull aportant carbonat càlcic dels seus esquelets, i els Ahermatípics, espècies que no contribueixen a la construcció de l'escull. (Gazo, 2020). Es troben sobretot en aigües tropicals poc fondes. On el rang de temperatura oscil·la entre 18-36°C, amb un rang òptim entre 26-28°C a 30° N/S Equador. També hi ha, tot i que en menor escala, coralls d'aigües fondes i coralls d'aigües fredes.

Distribució i estat dels esculls de corall

Els esculls de corall són rars al llarg de les costes occidentals de Sud Amèrica i Àfrica, donada la importància de la surgència i de les fortes corrents costaneres fredes, que redueixen les temperatures de l'aigua en aquestes zones per les corrents de Califòrnia, Perú, Benguela i Canàries. Es troben poques formacions al llarg de la costa del Sud d'Àsia, des de l'extrem oriental de l'Índia (Madras) fins a les fronteres de Bangla Desh i Birmania. També són rars al llarg de la costa nord-est d'Amèrica del Sud i la costa de Bangla Desh, pel drenatge d'aigua dels rius Amazones i Ganges.

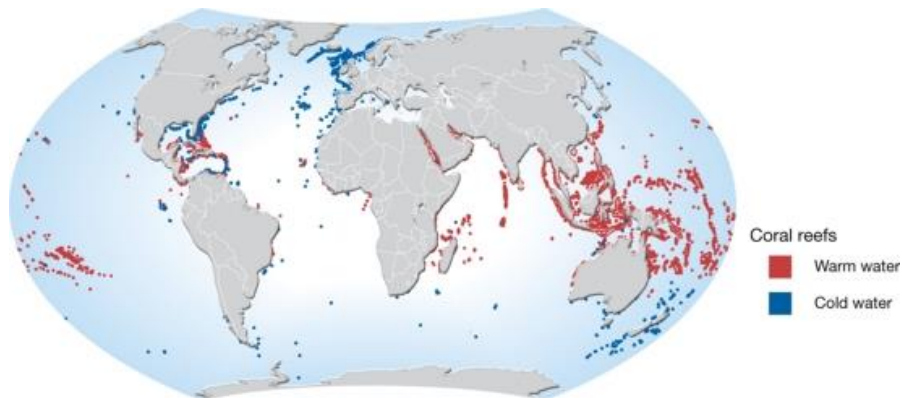


Figura 17. Distribució dels esculls de corall a escala global. Font: Ahlenius, UNED/GRID-Arendal

Pràcticament, totes les espècies dels esculls de corall tenen algues, cianobacteris, dinoflagel·lats procloròfits amb els quals fan simbiosi. La qual beneficia a l'animal subministrant-li carboni reduït, proporcionant-li respiració a baix cost i conservació de recursos metabòlics, així com una major taxa de creixement, reproducció i una major taxa de calcificació, extreuen components tòxics per algues i ajuden a la conservació de nutrients. Les zooxantel·les, una de les algues que viuen en simbiosi amb els coralls, obtenen subministrament de CO₂ i nutrients de manteniment així com es protegeix dels UV gràcies a l'animal, alhora que es manté una alta densitat de població amb el mateix genotip donat que l'hoste es troba sota unes condicions ambientals uniformes (Gazo, 2020).

Les principals formacions que es donen de manera natural es poden dividir en 3 tipus:

- Escull litoral “Fringing reef”, creix al llarg del litoral formant una plana de poca profunditat composta de corall mort i sorra. Al marge de la línia costanera, zona de creixement actiu, situada generalment a molt poca distància de la costa.
- Escull barrera “barrier reef”, similar en estructura als esculls litorals. Envoltan illes i es troben exposats a l'energia d'onatge. Les condicions de les aigües properes canvien a causa d'un escalfament, fent que es produeixi una substitució dels coralls per algues.
- Atoll, anell d'escull al voltant d'illes de poca alçada envoltant una llacuna “lagoon”, creixent al voltant del cràter d'un volcà submarí.

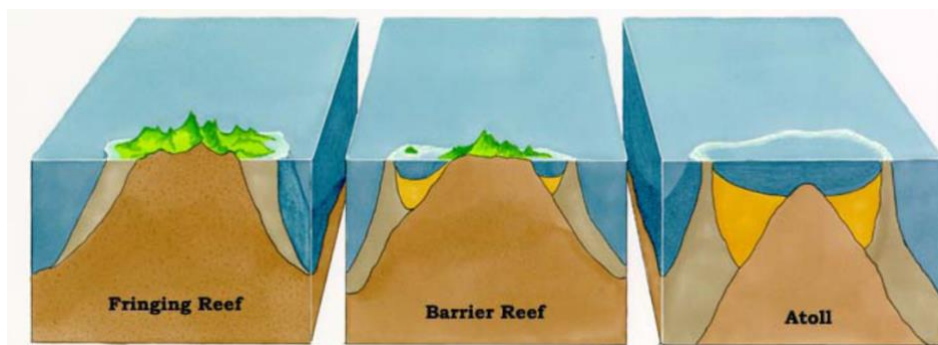


Figura 18: The 3 Types of Coral Reef Formations Found in the Ocean Font: researchgate.com

Els coralls presenten una diversitat morfològica i de colors molt elevada, tot i això, estan limitats bàsicament per la disponibilitat de llum, el pendent del substrat i l'onatge que incideix sobre ells. Són plans i robustos aquells que es troben més exposats a l'energia de l'onatge i altres tenint unes estructures superficials en forma de planta, amb branques llargues adaptades per captar la màxima llum possible.

Els coralls arborescents són petits pòlips amb una superfície molt gran per captar la màxima llum possible i produeixen ells mateixos gran part de la matèria orgànica que consumeixen. En canvi, els coralls més robustos són més grans i tenen superfícies petites per evitar ser arrossegades pels grans onatges. Com es pot observar, aquestes formacions actuen com a grans barreres protectores allà on es troben, tenint un paper important en la protecció de la costa envers l'erosió.

Ferrario et al. (2014) va comparar la rendibilitat de costos de la restauració dels esculls de corall amb la construcció d'un dic tradicional equivalent que donaria lloc a l'atenuació de les onades. Aquesta anàlisi va mostrar que els costos tradicionals de construcció de l'escullera oscil·laven entre els 456 i els 188.817 dòlars per metre, mentre que els costos organitzatius de la restauració dels esculls de corall oscil·laven entre els 20 i els 155.000 dòlars per metre. Aquests valors són coherents amb l'anàlisi recent de Kramer (2016), que va concloure que la restauració dels esculls era un dels mètodes més rendibles.

Tot i això, hem de tenir en compte que aquests estan sotmesos a moltes pressions que amenacen la seva supervivència. Un dels problemes més importants és la substitució dels coralls per algues a causa de l'augment de temperatura de l'aigua. Aquests canvis de condicions també han donat lloc a la proliferació d'espècies molt perjudicials per als coralls. D'altra banda, hi ha diferents esdeveniments que provoquen el "bleaching" i permet el recobriment del corall per algues i invertebrats de creixement ràpid, quelcom fa que la recuperació de l'escull afectat sigui pràcticament impossible.

La introducció d'esculls coral·lins en zones no naturals no sembla però una opció viable de fer donada la seva vulnerabilitat davant de canvis de temperatura i acidificació. Tot i que, com s'ha vist, la restauració i conservació de les zones on es troben de manera natural és imprescindible i més viable que les formacions de formigó.

2.3.3. Aiguamolls

Els aiguamolls es defineixen com grans extensions de terra impermeables i planeres, les quals tenen el sòl saturat d'aigua de manera estacional o permanent. Són una part fonamental del sistema natural i ofereixen enormes beneficis per als ecosistemes i les comunitats costaneres. Ens proporcionen aigua neta, protecció contra inundacions i pesca abundant entre d'altres.

Donat que es tracta de llocs inundats, aquestes provoquen processos anòxics que fan que la darrera capa que trobem al fons de l'aiguamoll, abans del sòl, sigui anòxica. Quelcom fa que la vegetació que podem trobar en aquestes zones sigui molt característica, ja que no totes les plantes poden sobreviure davant aquestes condicions. La vegetació que presenta, acostumen a ser plantes aquàtiques adaptades a sòls anòxics únics, vegetació que pot tolerar sòls humits i baixos nivells d'oxigen a les arrels.



Figura 19. Aiguamolls del Delta de l'Ebre. Font: Catalunya.com

Els aiguamolls es troben a tot el món i l'aigua saturada en aquests sòls pot ser dolça si es troba prop de rius, salada si es troba prop la costa o salobre en cas que es trobin prop d'estuaris. La biota de la zona varia segons el tipus d'aigua, el grau de saturació, el clima i el règim fluvial. Tot i això, les condicions de protecció de les diferents extensions davant l'erosió i les inundacions fan més o menys la mateixa funció en tots els tipus de biòtop.

Aquests ecosistemes es consideren d'entre els més diversos en l'àmbit biològic donat que serveixen com a habitat de molts animals i vegetals, donant gran importància als ocells.

Les zones humides costaneres inclouen totes les zones humides de les conques hidrològiques costaneres. Els tipus d'aiguamolls costaners inclouen: maresmes salades, pantans d'aigua dolça, llits d'herbes marines, pantans de manglars i pantans boscosos.

Els principals tipus d'aiguamolls es classifiquen en funció de la vegetació i/o font d'aigua. Per una banda, hi ha els aiguamolls en els quals dominen les canyes, herbes i altres herbes de baixa mida. També trobem els anomenats pantans, en els quals dominen arbres i arbustos.

Una altra classificació de les zones humides/ aiguamolls es fa en funció a la seva font d'aigua: aiguamolls litorals "wetlands" (aigua de mar), estuaris "estuaries" (aigua de mar i riu), planes inundables "floodplains" (excés d'aigua de rius o llacs desbordats), "springs, seeps and fens" (aigua subterrània que emergeix a la superfície) i "bogs and vernal ponds" (aigua de pluja o desglaç).

Tot i haver-hi aquests dos tipus de formes per classificar-los, la seva classificació sembla complicada donat que, en molts casos, les fonts d'aigua són diverses i el tipus de vegetació també.

Els aiguamolls costaners aporten beneficis considerables, anomenats serveis ecosistèmics, que afecten la nostra vida diària. Proporcionen aigua potable neta, protecció contra inundacions, oportunitats recreatives, així com un hàbitat important per a la pesca comercial i recreativa.

Beneficis dels aiguamolls

Els beneficis que proporcionen segons la NOAA són:

- La pesca sostenible: Molts tipus de peixos, des del salmó fins al llobarro ratllat, així com la llagosta, les gambes, les ostres i els crancs, depenen dels aiguamolls costaners per als llocs on viure, alimentar-se o reproduir-se. Els aiguamolls costaners són alguns dels ecosistemes més productius de la Terra. La quantitat i qualitat del marisc està directament relacionada amb la qualitat i l'extensió dels hàbitats dels aiguamolls.
- Turisme i oci: Els aiguamolls ofereixen innumbrables oportunitats d'esbarjo, des de la caça i la pesca, fins al senderisme i l'observació de la fauna. Els visitants de les platges i els hàbitats costaners són un important motor econòmic per a les comunitats locals, ja que donen suport a ingressos substancials i al creixement laboral. Al proporcionar llocs de desove, aliment i refugi per als peixos joves, els aiguamolls també donen suport a una indústria pesquera, recreativa i estable.
- Aigua neta: Els aiguamolls actuen com a purificadors naturals de l'aigua, filtrant els sediments i absorbint la contaminació. L'escorrentia de superfícies dures com el formigó i l'asfalt és una de les principals causes de contaminació de l'aigua. El desenvolupament i l'agricultura aporten nutrients addicionals, pesticides i llum a les vies fluvials locals. Els aiguamolls atrapen i filtren aquestes impureses, mantenint rius, badies i platges sanes.
- Protecció davant d'inundacions i tempestes: Els aiguamolls actuen com a esponges naturals, absorbint i emmagatzemant temporalment les aigües de les inundacions. Frenant una part de les aigües i alentint la velocitat amb la qual aquesta entra a un riu o rierol. Els aiguamolls poden reduir la gravetat de les inundacions i l'erosió. Aquests també poden reduir l'alçada de la inundació, protegint les persones, les propietats, les infraestructures i l'agricultura dels danys devastadors. Aquesta protecció estalvia grans despeses econòmiques a les comunitats costaneres vulnerables.

- Carboni blau costaner: Les maresmes salades, les herbes marines i els manglars tenen un paper important a l'hora d'abordar el canvi climàtic, eliminant els gasos d'efecte hivernacle com el diòxid de carboni de l'atmosfera i emmagatzemant-los a les plantes i al sòl. El carboni blau costaner és el terme utilitzat per al carboni que s'emmagatzema en aquests hàbitats. Els esforços per conservar els hàbitats costaners tenen un paper crucial a l'hora de preservar el carboni blau costaner, prevenir l'alliberament de carboni a l'atmosfera i reduir els efectes del canvi climàtic.
- Producció d'energia: A molts llocs com als EUA la producció de petroli i la producció de gas natural s'origina, es transporta o es processa a aiguamolls costaners.

Costanza et al. (1997) van demostrar l'eficàcia de les zones humides costaneres per reduir els danys esperats per inundacions induïdes per huracans. Els resultats van mostrar que: la creació d'un aiguamoll d'1 ha, en el model que va crear equivalia a un augment mitjà de 33.000 dòlars EUA en els costos dels danys causats per tempestes, en el cas que aquest no s'hagués fet. El valor anual dels aiguamolls costaners oscil·lava entre els 250 i els 51.000 dòlars EUA $ha^{-1}\cdot any^{-1}$, amb una mitjana de 8240 dòlars $ha^{-1}\cdot any^{-1}$. Es va aproximar que els aiguamolls costaners dels EUA proporcionen actualment 23.200 milions de dòlars a l'any en serveis de defensa contra tempestes. Així doncs, van arribar a la conclusió que els aiguamolls costaners proporcionen protecció, que es mantenen per la natura i que són molt més econòmics que els dics construïts.

Aplicació d'aiguamolls com a NbS

Construir aiguamolls és una pràctica que es porta fent des de ja fa molts anys, en concret la construcció de zones humides per al tractament d'aigües pluvials.

La majoria dels aiguamolls construïts als EUA i Europa són sistemes de flux horitzontal basats en terra o grava i plantats amb *T. latifolia* i/o *P. australis*. S'utilitzen per tractar aigües residuals urbanes, domèstiques i industrials (Cooper et al., 1996; Kadlec i Knight, 1996; Scholz, 2003; Scholz et al., 2005), i també s'han utilitzat pel tractament passiu d'aigües residuals de mines. (Mays i Edwards, 2001; Mungur et al., 1997). Donat que aquests actuen com a biofiltre i poden eliminar una sèrie de contaminants com ara: matèria orgànica, nutrients, patògens i metalls pesants de l'aigua. Els aiguamolls estan dissenyats per eliminar tant els contaminants de l'aigua, com els sòlids en suspensió, la matèria orgànica i nutrients com el nitrogen i el fòsfor. Així com tots els tipus de patògens, com ara bacteris, virus i protozous.

Tot i que per tractar aigües pluvials, s'han aplicat diversos mètodes convencionals com les depuradores, la majoria de tecnologies no són rendibles o són massa complexes. Els aiguamolls són un mitjà sostenible per tractar les aigües pluvials i demostren ser més econòmics pel que fa a la construcció i el manteniment, així com més eficients energèticament que els sistemes tradicionals (Kadlec et al., 2000; Scholz et al., 2005). A més, els aiguamolls milloren la biodiversitat (Cooper et al., 1996; Scholz i Trepel, 2004).

En contrast amb els aiguamolls amb flux horitzontal, els aiguamolls de flux vertical són plans, intermitentment inundats i drenats, per tant permeten que l'aire ompli els porus del sòl de l'aiguamoll (Cooper et al., 1996; Gervin i Brix, 2001; Green et al., 1998). Tot i que s'ha reconegut que aquest tipus solen tenir eficiències d'eliminació més elevades pel que fa als contaminants orgànics i nutrients en comparació amb els aiguamolls de flux horitzontal, la desnitrificació és menys eficient en els sistemes de flux vertical (Luederits et al., 2001). Quan l'aiguamoll està sec, l'oxigen permetrà entrar a la capa superior restes i sorra, això afavorirà l'eliminació dels contaminants orgànics.

Cas d'estudi d'un aiguamoll com a NbS

Gràcies a tots els estudis realitzats en la construcció d'aiguamolls pel tractament d'aigües residuals urbanes, domèstiques i industrials, avui en dia és possible l'aplicació dels aiguamolls com a NbS, específicament com a defensa costanera.

Baptist, et al., 2021, presenta un cas d'estudi en el qual es proposa l'elaboració d'una platja i de dos aiguamolls com a NbS per garantir la protecció de la costa. Seguint el marc SES regional, un sistema que combina dades socials, econòmiques, governamentals i ecològiques alhora que considera els serveis ecosistèmics a la societat (Berkes i Folke., 1998, Binder et al., 2013, Ostrom, 2007)

Els principals objectius de l'estudi van ser:

- Avaluar els processos de les parts interessades en la realització d'un projecte en el qual es van construir una platja i dues zones humides.
- Avaluar com s'havia complert la solució local proposada respecte al SES regional.
- Elaborar l'experiment de camp per construir un aiguamoll que estudia la barreja de fang i sorra en diferents proporcions i estimular el desenvolupament de la vegetació.

Altres qüestions que va voler englobar l'estudi, van ser les de presentar els coneixements pràctics i les qüestions apreses sobre la construcció d'aquest aiguamoll.

- *fins a quin contingut de fang s'ha d'enriquir el llit sorrenc original per tal d'aconseguir les condicions adequades per a la vegetació de l'aiguamoll?*
- *fins a quin punt la composició del llit afecta la formació de rierols de marea en un pantà construït?*
- *fins a quin punt la sembra amb espècies pioneres pot impulsar el desenvolupament de la vegetació?*

El projecte es va desenvolupar a l'estuari de l'Ems, el qual es troba a la part nord-est dels Països Baixos i la part nord-oest d'Alemanya.

Es van construir dues preses d'escullera, una per a cada salina, per tal d'oferir refugi de les onades. Posteriorment, es va aixecar el nivell del llit en el lloc de les salines projectades amb sorra obtinguda d'un dragatge. El nou nivell del llit es va establir a 1,20 m per sobre del "Dutch Ordnance Level" (NAP) amb pendent ascendent fins a 1,70 m + NAP. L'alçada d'inundació òptima per a les espècies pioneres és al voltant del nivell alt mitjà d'aigua, que es troba a 1,40 m + NAP en aquest lloc. El rang meso-mareal semidiürn mitjà local era de 3,06 m i la concentració mitjana anual de sediments en suspensió era de 90 mg/l. El llit elevat inicialment consistia en sorra amb un contingut de fang inferior al 0,5% (partícules <63 µm; llim i argila). Tot i que l'envasament natural durant la inundació enriqueix gradualment el llit amb sediment fi, un llit sorrenc pobre en nutrients no evocarà un desenvolupament ràpid de la vegetació, que era un objectiu explícit de l'estudi.

En primer lloc, per provar l'efecte de l'enriquiment del fang en el desenvolupament morfològic i biològic de les mareas, van dissenyar un experiment de camp en el què el primer metre superior del llit es va barrejar amb fang. Al jaciment experimental de 15 ha van crear sis compartiments delimitats amb engonals permeables com podem veure a la figura 20. En els quals el fang es barrejava amb sorra en dos blocs duplicats de tres continguts de fang previstos del 5%, 20% i 50%.

Per als compartiments del 5% es va col·locar una capa de 8 cm de terra a sobre de la sorra i es va barrejar. Per als compartiments del 20% es va eliminar una capa de 30 cm de sorra i es va substituir amb terra i posteriorment es va barrejar. Per als compartiments del 50% es va eliminar una capa d'1 m de sorra, es va substituir per 80 cm de terra i es va cobrir amb una capa portant de 20 cm de sorra per a les màquines pesades, i posteriorment es va barrejar.

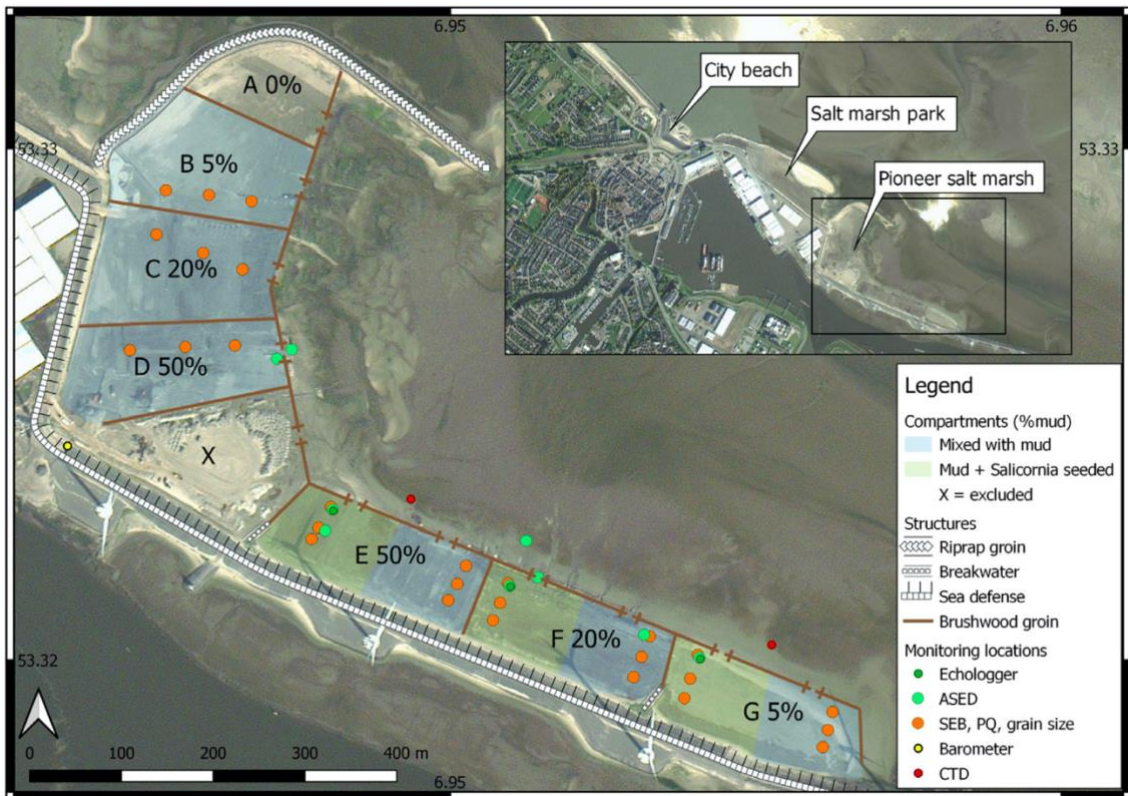


Figura 20. Disposició de la "salt marsh" amb sis compartiments amb fang barrejat al metre superior i el contingut de fang previst. Font: Baptist, et al., 2021

El contingut de fang resultant als compartiments B, C i D a través del primer metre superior del llit sorrenc va ser de mitjana \pm del $9 \pm 6\%$, $25 \pm 14\%$ i $47 \pm 11\%$, respectivament. Els compartiments E, F i G tenien de mitjana un $48 \pm 12\%$, $25 \pm 14\%$ i $7 \pm 8\%$ de fang barrejat a través del llit sorrenc.

En segon lloc, és va dur a terme un programa d'observació de camp, el qual va ser dissenyat per determinar el desenvolupament espacial i temporal de la interacció entre la morfologia i la vegetació. Es van controlar les taxes de sedimentació i erosió, la composició dels sediments, el desenvolupament de les rieres de marea, l'alçada del llit, la freqüència d'inundació, la cobertura vegetal i la densitat de plantes de marisma. Alguns dels instruments utilitzats en el camp van ser un dron amb un sistema LiDAR integrat, un conductivity, temperature and pressure sensor (CTD) en combinació amb un baròmetre, barres de sedimentació-erosió (SEB), i un Acoustic Surface Elevation Dynamics sensor (ASED), que mesurava la dinàmica d'elevació de superfície acústica.

L'elevació mitjana de la "salt marsh" es trobava per sobre de la Mean High Water (MHW). Durant les observacions es va produir una inundació completa de la zona humida aproximadament 70 vegades. Les parcel·les de seguiment es van inundar de mitjana una vegada al dia i la freqüència d'inundació va disminuir a un cop cada quatre dies per a les parcel·les de terra.

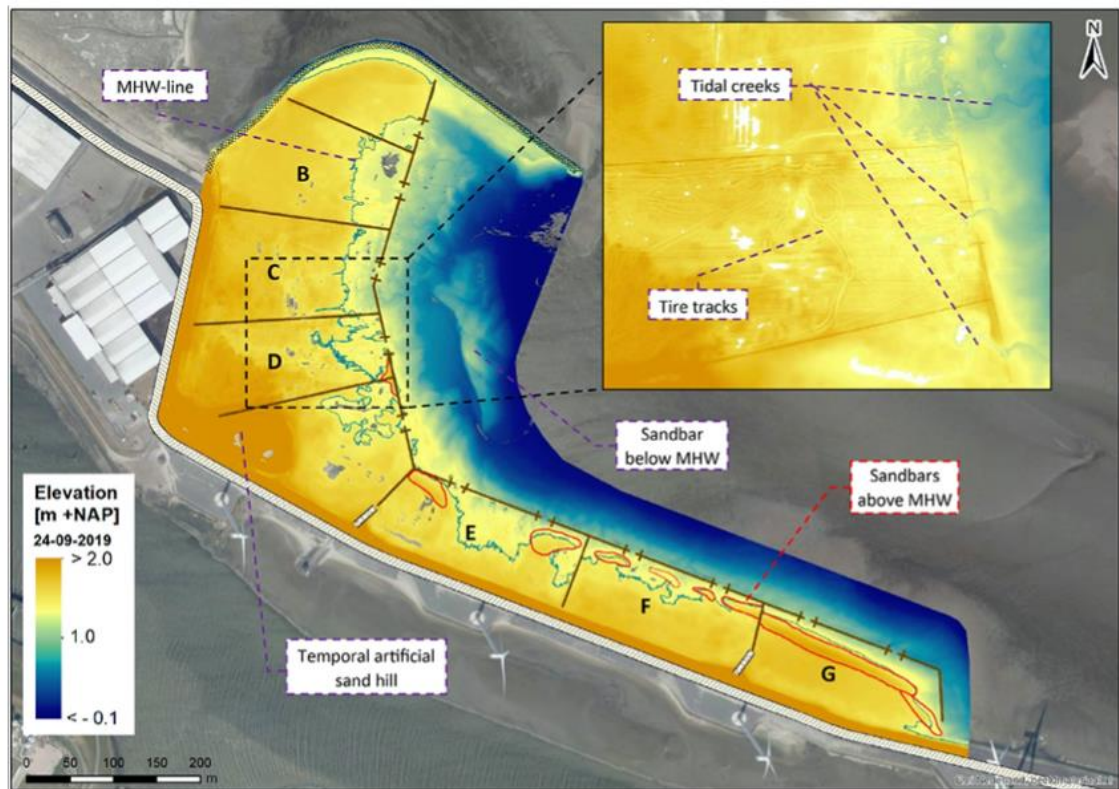


Figura 21. Model digital del terreny de la marisma experimental basat en mesures LiDAR. MHW = Mean High Water (1,4 m + NAP).

Les mesures amb ASED van mostrar que, localment, el nivell del fons va augmentar durant la temporada de creixement, amb una sedimentació de l'ordre d'1 a 2 cm, però es va observar erosió de l'ordre de 2 a 6 cm fora de la temporada de creixement. La dinàmica del nivell de llit dins dels diferents compartiments, on la vegetació es va poder establir, va ser limitada durant el període de mesura de 2 anys.

En tercer lloc, es van sembrar fragments de plantes de *Salicornia sp.* a la meitat dels tres compartiments sud: E, F i G. El nombre de plantes *Salicornia sp.* va començar a augmentar 1,5 mesos després de la sembra, aquesta va augmentar significativament el nombre de plantes així com les zones amb el contingut de fang més alt, van mostrar el major nombre de plantes de *Salicornia sp.* La cobertura vegetal total de la marisma va augmentar del $10,7 \pm 1,6\%$ a $29,0 \pm 2,6\%$ l'any següent. D'altra banda l'entrada de llavors naturals va ser alta i va ajudar al creixement de la vegetació de la zona humida.

Com a conclusions van demostrar que barrejar sorra amb un 25% de fang augmenta la cobertura vegetal i la riquesa d'espècies. Que la barreja amb continguts més elevats de fang dificulta la maquinària pesada necessària per construir un aiguamoll fangós. I que la sembra amb fragments de plantes de *Salicornia sp.* inicia la colonització.

També van mostrar que la incorporació d'una solució local basada en la natura en un sistema socioecològic regional amb els seus actors associats i objectius polítics millora molt les possibilitats d'execució del projecte.

2.3.4. Herbes marines

Les herbes marines, praderies o "seagrasses" en anglès, són plantes submarines que van evolucionar a partir de plantes terrestres i que són semblants a aquestes, ja que tenen fulles, flors, llavors, arrels i teixits connectius. A diferència de les plantes terrestres, però, no tenen tiges fortes per aguantar, sinó que s'ajuden de la flotabilitat de l'aigua que les envolta.



Figura 22. Petita praderia de posidònia oceànica al nord de, Sicília. Font: Elaboració pròpia

Les herbes marines són una font d'aliment i un hàbitat molt important per a la vida salvatge, donant suport a una comunitat diversa d'organismes, com ara peixos, pops, tortugues marines, gambes, crancs blaus, ostres, esponges, eriçons de mar, anemones, cloïsses, calamars i sirènids entre altres espècies. Les herbes marines són anomenades com "els pulmons del mar" perquè alliberen oxigen a l'aigua mitjançant el procés de la fotosíntesi.

Les herbes marines són molt sensibles a la qualitat de l'aigua i són un indicador de la salut global dels ecosistemes costaners. Com que produeixen energia mitjançant la fotosíntesi, ho fan millor on l'aigua és prou clara per permetre que la llum del sol penetri. La contaminació, la sedimentació, l'excés de nutrients, les tempestes, les malalties, el pasturatge excessiu per part dels herbívors i sobretot les àmfores dels vaixells i altres accions humanes representen amenaces per aquestes.

Distribució de les herbes marines

Actualment, existeixen menys de 60 espècies d'herbes marines a tot el món i es troben àmpliament distribuïdes al llarg de les costes temperades i tropicals. On coexisteixen diverses espècies a totes les regions en les quals es troben (Short et al., 2007).

En la figura 23, podem observar la distribució global de les herbes marines mostrada com a punts blaus (dades de 2005 UNEP-WCMC) i bioregions geogràfiques: 1. Atlàntic Nord temperat, 2. Atlàntic tropical, 3. Mediterrani, 4. Pacífic nord temperat, 5. Indopacífic tropical, 6. Oceans Australs temperats (Short et al., 2007).

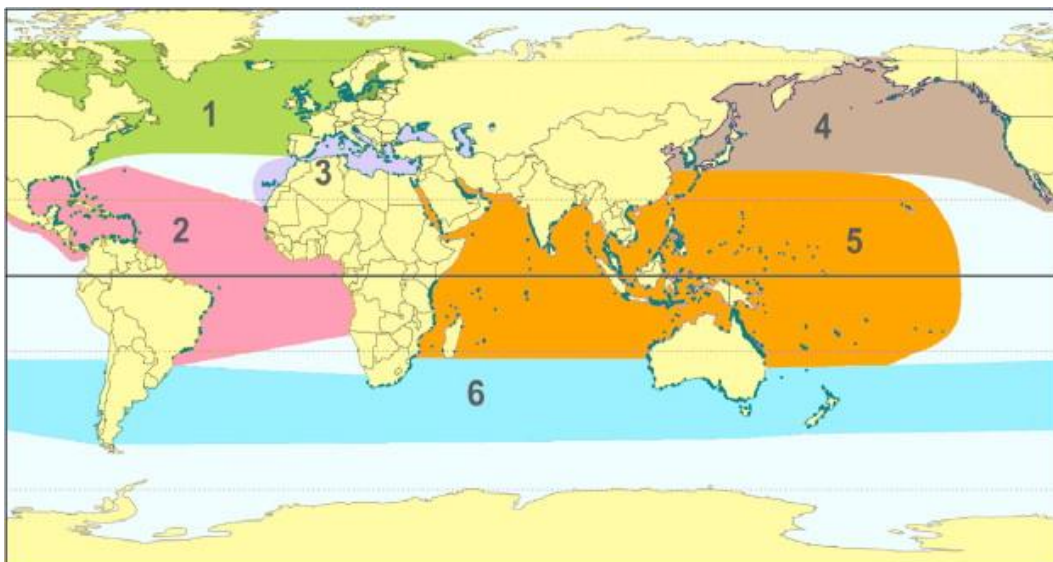


Figura 23. Distribució global de la posidonia i les 6 bioregions diferents. Font: Short et al., 2007

Beneficis de les herbes marines

Les herbes marines presenten nombrosos beneficis a l'ecosistema:

- Ecosistema: Aquestes creen un ecosistema on viuen i s'alimenten un gran nombre d'espècies, des de petits peixos i juvenils d'espècies més grans, invertebrats com crancs, gambes i altres petits crustacis, rèptils com les tortugues, taurons, mol·luscs, esponges i fins a mamífers com els dugongs i els manatís.
- Aigua neta: Per cada metre quadrat d'herbes marines es produeixen 10 litres d'oxigen cada dia a través de la fotosíntesi. Millorant la qualitat de l'aigua absorbint CO₂ i oxigenant tots els mars i oceans en els quals es troben. Les fulles absorbeixen nutrients i alenteixen el flux de l'aigua capturant sorra i brutícia. Així com les arrels atrapen sediment i ajuden a millorar la claredat de l'aigua. Alhora les arrels absorbeixen nutrients i els alliberen a l'aigua a través de les seves fulles.
- Protecció davant inundacions i tempestes: L'estabilització de sediments per pastures marines constitueix un mecanisme indirecte de protecció costanera (Christianen et al., 2013). Tant la reducció dels corrents com l'atenuació de les ones per les herbes marines no només augmenten les taxes de sedimentació als prats, sinó que també disminueixen el potencial de resuspensió (Bouma et al., 2005, Hemminga i Duarte, 2000, Madsen et al., 2001). A més, el sistema rizoidal de pastures marines contribueix a l'estabilització dels sediments i al control de l'erosió costanera (Barbier et al., 2011).
- Economia a la societat: Generant una costa de qualitat amb aigües cristal·lines que atrau el turisme. Així com un ecosistema molt més ric en espècies que ajuda a l'economia pesquera.

- Carboni blau costaner: són capaces de capturar i emmagatzemar una gran quantitat de carboni de l'atmosfera. Les herbes marines prenen carboni de l'aigua per construir les seves fulles i arrels. A mesura que parts de les plantes marines i els organismes associats moren i es descomponen, poden acumular-se al fons marí i quedar enterrats, atrapats en el sediment. S'ha estimat que d'aquesta manera els prats d'herbes marines del món poden capturar fins a 83 milions de tones de carboni cada any. Tot i que les herbes marines ocupen només el 0,1% del fons oceànic total, s'estima que són responsables de fins a l'11% del carboni orgànic enterrat a l'oceà.

Les zones que no tenen pastures marines són vulnerables a l'acció intensa de les ones dels corrents i les tempestes. L'extens sistema d'arrels de les herbes marines, que s'estén tant verticalment com horitzontalment, ajuda a estabilitzar el fons marí d'una manera similar a com les herbes terrestres prevenen l'erosió del sòl. Sense herbes marines per disminuir la força dels corrents al fons, les platges i la societat poden patir més danys per les tempestes.

Els ecosistemes de pastures marines aporten un benefici complementari: són capaços de protegir la costa mitjançant un mecanisme indirecte relacionat amb la seva capacitat d'estabilitzar i mantenir sediments en zones poc profundes. A més, a diferència de les estructures artificials, l'adaptació natural al canvi climàtic és possible per a les herbes marines, cosa que al seu torn significa que són capaços de mantenir de manera natural els seus serveis de protecció costanera (Borsje et al., 2011).

Aplicació d'herbes marines com a NbS

Les herbes marines com a NbS és una de les metodologies que més s'està aplicant i plantejant en el mar Mediterrani. Específicament la pràctica que es du a terme per tal d'utilitzar les praderes marines com a solució basada en la natura és la replantació d'aquestes en zones en les quals hi havia aquesta planta i per motius diversos ha desaparegut. Al Mediterrani s'està duent a terme aquesta pràctica amb Posidònia Oceànica, una fanerògama endèmica d'aquest mar i la més abundant.

Cas d'estudi replantació d'herbes marines (*posidònia oceànica*) com a NbS

L'any 2012 l'Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (CSIC-IMEDEA) va començar un estudi fent ús de les llavors de posidònia per veure si permetien la restauració de zones de Mallorca on aquesta havia estat degradada.

Abans d'entrar en detall en l'estudi que es va produir, és essencial entendre aquesta planta superior i com funcionen els mecanismes de reproducció de les angiospermes. La posidònia, així com la resta d'angiospermes marines disposen de dos mecanismes de reproducció, el vegetatiu i el sexual donant lloc a fragments i plàntules de manera respectiva.

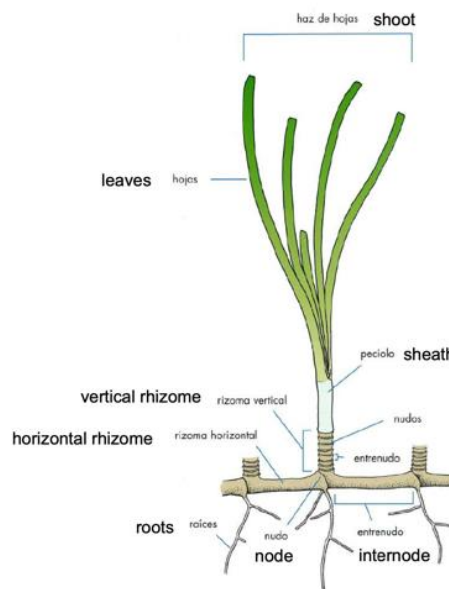


Figura 24. Esquema d'un ramet de fanerogama marina. Font: Jorge Terrados, IMEDEA (CSIC-UIB)

La reproducció vegetativa consisteix en la formació de clons, mitjançant l'elongació i ramificació dels rizomes horitzontals, el creixement de feixos sobre ells i la fragmentació dels rizomes a conseqüència de l'onatge o de la mort de les parts més velles per formar els clons. Aquest procés, també conegut com a "fragmentació vegetativa", representa el principal mecanisme responsable del manteniment de les praderies i la seva expansió (Duarte & Sand Jensen, 1990). Per aquest mecanisme es produeixen fragments de planta adulta, trossos de rizoma amb un o més feixos foliars i arrels, aptes per al plantat.

La posidònia compta amb rizomes de creixement horitzontal sobre els quals creixen els feixos que donen lloc als rizomes verticals. Els horitzontals donen millors taxes de creixement que els verticals, presentant (1-6 cm/any) els horitzontals davant de (0,1-4 cm/any) els verticals (Hemminga & Duarte, 2000).

D'altra banda l'estacionalitat de plantació és de vital importància, els resultats obtinguts d'estudis indiquen que la replantació a la tardor amb fragments de praderes fondes amb dos o més feixos, donen millors resultats que les produïdes a l'estiu amb fragments de praderes someres i amb només un feix (Genot, Caye, Meinesz, & Orlandini, 1994; Meinesz et al., 1992; Molenaar & Meinesz, 1992). Mantenir els fragments a aquaris en condicions controlades permet descartar aquelles plantes que es troben en pitjors condicions i mostren supervivències majors (60-100%) davant dels que són trasplantats directament (25-80%) (Meinesz, et al., 1993).

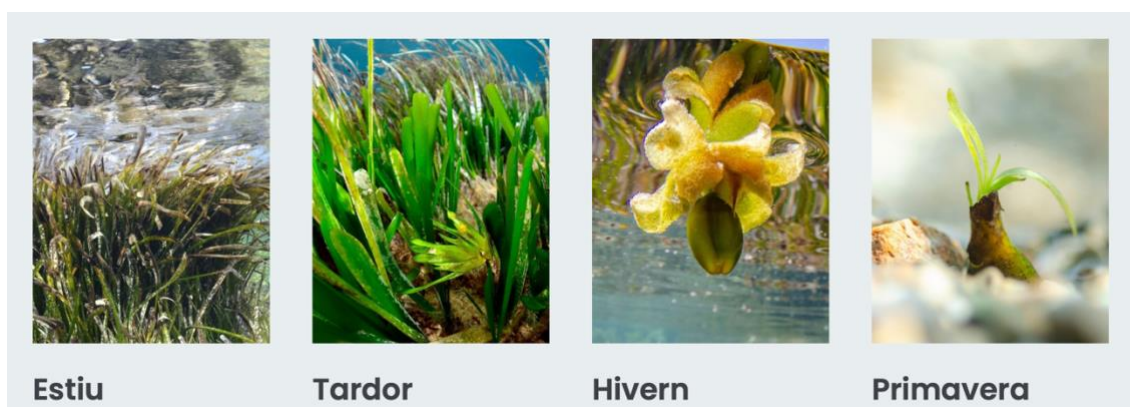


Figura 25. Cicle de vida de la posidònia relacionat amb l'estacionalitat. Font: atlasposidonia.com

La supervivència de fragments amb diversos feixos en cultiu és del 80-100% durant els primers 4 mesos (Balestri et al., 2011; Marín- Guirao et al., 2011) i es va reduint de mica en mica: 67-68% 12 mesos després, 36-56% 24 mesos després i 42%, 34 mesos després (Balestri et al., 2011; Meinesz et al., 1991). Els fragments amb un únic feix vertical tenen supervivències menors en cultiu (41% després de 7 mesos en cultiu) encara que els supervivents són capaços de generar arrels noves i de tornar a rizomes d'hàbit de creixement horitzontal amb ramificacions (el 68% dels supervivents poden estar ramificats després de dos anys de cultiu) (Meinesz et al., 1991).

La reproducció sexual, és mitjançant la qual es produeixen nous individus, anomenats plàntules, aptes per al plantat. Les plàntules es produeixen mitjançant la germinació d'una llavor provinent del fruit a conseqüència d'una flor pol·linitzada. Aquest mecanisme introdueix variabilitat genètica a la pradera i permet la colonització de noves àrees mitjançant la dispersió de fruits, llavors o plàntules per les corrents. La producció de llavors ha estat constatada en les 58 espècies d'angiospermes marines identificades. Entre elles, trobem espècies les llavors de les quals tenen un període de latència. D'altres, com les del gènere *Posidònia*, la germinació de la qual comença en el moment en què la llavor es desprèn del fruit (Orth et al., 2000). El fet que les llavors de *Posidònia oceànica* no tinguin període de latència, té conseqüències en el desenvolupament de projectes de restauració, ja que impossibilita la creació de bancs de llavors o el seu emmagatzematge (Belzunce et al., 2008) fins al moment adequat per al plantat .



Figura 26. Cicle de vida de la *posidonia oceànica*. Font: Jorge Terrados, IMEDEA (CSIC-UIB)

Tot i que l'ús de plàntules per la restauració és més complex donada la irregularitat no predictable dels esdeveniments de flotació i, per tant, la producció de llavors. La facilitat de manipulació de les llavors, la reducció de costos logístics i l'elevat índex de supervivència sent de 75-80% sobre mata després del primer any (Balestri et al., 1998; Domínguez et al., 2012) i de 44-70% després de 36 mesos de la plantació (Balestri et al., 1998; Terrados et al., 2013), fan aquest mètode molt viable en projectes de replantació.

A l'estudi de l'IMEDEA-CSIC, després d'avaluar les diferents tècniques de replantació conegudes, van portar a terme proves per veure la supervivència i desenvolupament de les plàntules sobre mata morta i sobre pradera viva, amb i sense ancoratge artificial. Com a resultat es va determinar que la mata morta era el substrat més adequat per la replantació de plànules i es van descartar els sistemes d'ancoratge artificial, ja que aquests no proveïen millores significatives per la supervivència de les plàntules.

Es va fer un estudi de les condicions ambientals de la zona en la qual es produiria la plantació, tenint en compte la qualitat de l'aigua, la disponibilitat de llum, el tipus de substrat, la caracterització dels sediments a nivell granulomètric i de matèria orgànica, la batimetria, la comunitat circumdant i l'hidrodinamisme. Després d'això es va fer una col·lecta tant de fragments com de llavors per portar-los a aquaris i cultivar-los de manera artificial amb les condicions òptimes establertes a tots els aquaris i per cada tipus de cultiu. D'aquests cultius es va fer un seguiment cada 2 o 3 dies i així s'anaven eliminant aquelles plàntules o fragments morts i deteriorats.

Una vegada els cultius ja eren fragments de planta adulta i llavors amb arrels desenvolupades es va procedir a la trasplantació, amb el seu respectiu etiquetatge, control de la ubicació i disposició per fer possible el seguiment de la seva supervivència i desenvolupament. Alhora es va desplegar mesures per la reducció de la bioturbació mitjançant xarxes i malles, quelcom redueix l'accés a organismes bentònics.

Econòmicament, la restauració de les praderies d'angiospermes, resulta dels projectes més costosos amb un cost estimat de 383.672 \$/ha, sent alhora dels projectes que menys èxit obtenen amb dades del 38% de supervivència del material trasplantant (Bayraktarov et al., 2015). Així i tot com ja hem dit abans, aquest tipus de projectes per la restauració d'aquests ecosistemes són els que més interès estan generant donada la gran importància que tenen pel control de l'erosió, el segrestament de carboni i la depuració natural de l'aigua. (Barbier et al., 2011; Greiner et al., 2013).

2.3.5. Dunes

Les dunes són acumulacions sorrenques generades per la dinàmica eòlica. En el seu estat inicial presenten dimensions centimètriques i van creixent a mesura que els arriba prou alimentació sorrenca.



Figura 27. Dunes a la platja de Pals. Font: Elaboració pròpia

Les dunes tenen morfologies molt variades i, com assenyala Kuhlman 1960, el seu origen, el qual fa referència al vent i disponibilitat de sediments del lloc on es troben, és més important que la seva escala. No obstant això, des d'un punt de vista quantitatiu, encara existeixen actualment controvèrsies sobre quin és el límit inferior que permet diferenciar una estructura sedimentària tipus "ripple" d'una duna pròpiament dita.

Es consideren com a ripples aquells que tenen una longitud d'ona de fins a 3-4 metres, es formen com ondulacions perpendiculars al vent i en el seu cas el transport es dona per saltació. Mentre que les dunes poden arribar a una longitud d'ona de fins a 500 metres, en aquest cas el sediment es transporta per saltació o reptació, acumulant-se a la cresta de la duna.

Les dunes tenen forma asimètrica, la qual indica la direcció predominant del vent en aquella zona com podem observar a la figura 28.

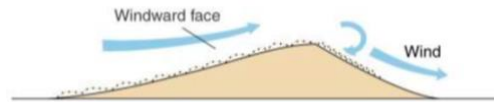


Figura 28. Asimetria de les dunes. Font: Caceres, 2022

Les acumulacions eòliques es generen en un ampli espectre climàtic, en l'àmbit continental, encara que hi ha acumulacions eòliques en climes freds a les costes àrtiques amb predomini de processos periglaciars (Sanjaume & Tolgensbakk, 2009) i de neu a les costes glacials, així com a les zones tropicals humides, les majors extensions dunars es donen en climes desèrtics. Donat que allà els forts vents, l'aridesa i la manca de vegetació entre d'altres, generen molts sediments susceptibles de ser transportats. Tot i així ens centrarem en les dunes costaneres.

Distribució de les dunes

Les costes dunars estan presents al llarg de les costes de tot el món, a totes les zones climàtiques, com podem observar a la figura 29. Algunes espècies de vegetació tenen una tolerància climàtica àmplia, però generalment predominen les espècies que s'adapten específicament a determinades condicions climàtiques (Doing, 1985).

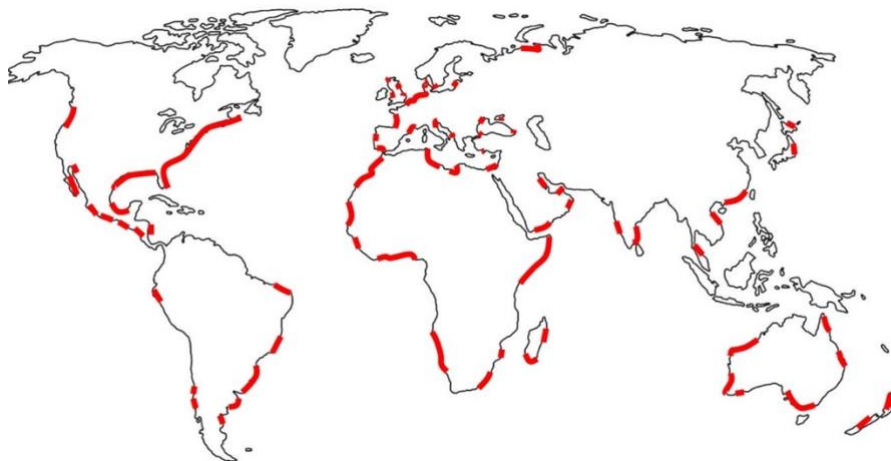


Figura 29. Distribució global de costes dunars. Font: Martinez et al., 2003

Classificació i tipus de dunes

Existeixen moltes classificacions morfodinàmiques en les que les dunes s'ordenen per la seva forma i relació amb els vents que les formen, especialment per la seva relació de transport net de sediments. D'altra banda el grau de cobertura vegetal i l'erosió de les mateixes, induïda per la dinàmica marina, l'activitat humana o l'animal, introdueix formes complexes als cordills dunars costaners, per la qual cosa no es possible recolzar-se en una classificació única.

Els tipus de dunes que trobem a zones costaneres són les dunes parabòliques. Les quals tenen forma de "U" o de "V" com podem observar a la figura 30, donat que la humitat reté el sediment a les puntes, mentre que el vent mou la part central, les puntes d'aquestes indiquen la direcció contrària del vent, migren cap a terra i normalment presenten vegetació.

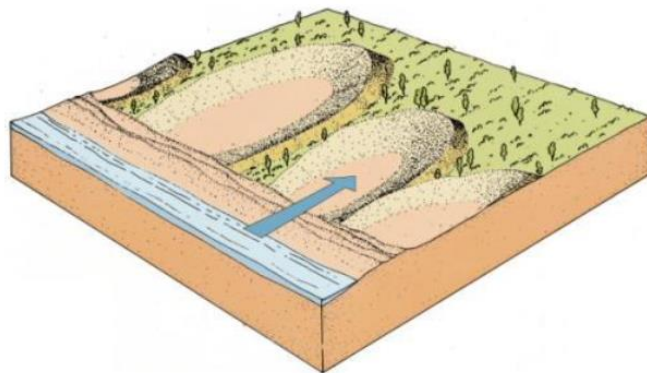


Figura 30. Duna parabòlica. Font: Cáceres, 2021.

Beneficis de les dunes

Tant les dunes, en menor mesura, com les costes dunars, en major mesura aporten beneficis molt importants a les nostres costes:

- Protecció costanera: Proporcionen un futur subministrament de sorra per mantenir les platges, protegir les nostres costes de l'erosió costanera i proporcionar protecció contra les inundacions. Aquestes seran de gran ajuda de cara al futur per poder mantenir les platges estables tenint en compte com el canvi climàtic farà augmentar el nivell del mar, així com l'erosió a les costes.
- Ecosistema: Les dunes de sorra també són un hàbitat vital per a una gran quantitat de fauna poc comuna, com ara una varietat de flors silvestres, ocells i insectes que requereixen un hàbitat de sorra nua per sobreviure.

2.3.6. Illes barrera

Una illa barrera és un dipòsit de sorra en constant canvi que es forma paral·lel a la costa. Les illes de barrera es formen a mesura que les ones dipositen repetidament sediments paral·lels a la línia de costa. A mesura que el vent i les onades canvien segons els patrons meteorològics i les característiques geogràfiques locals, aquestes illes es mouen, erosionen i creixen constantment. Fins i tot poden desaparèixer del tot.



Figura 31. Barrier Island. Font: nps.gov

Generalment, estan separades del continent per rieres de marea, badies i llacunes. Les platges i els sistemes de dunes de sorra es formen al costat de l'illa davant de l'oceà; el costat que mira a la costa sovint conté aiguamolls, planes de marea i boscos marins.

Les cadenes d'illes barrera tendeixen a formar-se prop dels deltes fluvials i en zones amb poca activitat tectònica i un terreny costaner relativament pla. Els penya-segats rocosos i les plaques tectòniques canviant, juntament amb altres característiques del terreny i les marees, impedeixen que s'hi formin illes barrera.

Malauradament, les illes de barrera estan desapareixent a un ritme alarmant. L'erosió pot ser causada per activitats humanes com el trànsit de vaixells, els dics durs i els projectes d'infraestructures, fins i tot aquells llunyans al riu. Els projectes de pressa i dragatge de sediments poden afectar significativament la quantitat de sorra i sediment disponible per enfortir les illes barrera. Els efectes del canvi climàtic, inclòs l'augment ràpid del nivell del mar i els esdeveniments meteorològics extrems, també poden provocar o empitjorar l'erosió d'aquestes.

Distribució de les illes barrera

Les illes barrera es desenvolupen en qualsevol entorn geològic que tingui molts sediments, agents per transportar-lo i un lloc on es pugui acumular.

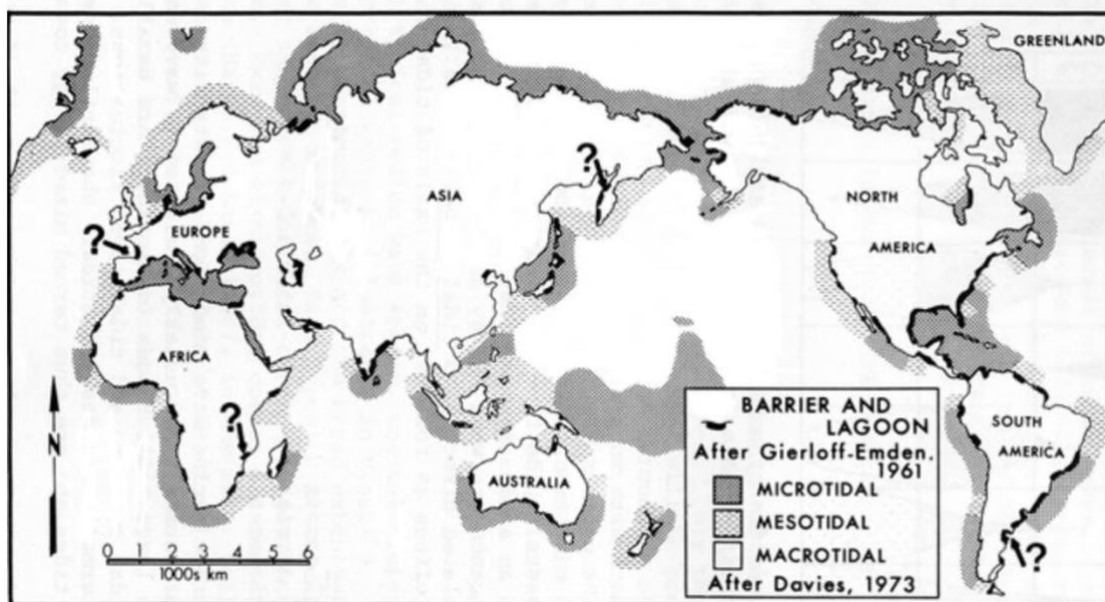


Figura 32. Distribució de les illes barrera. Font: Hayes 1979.

Beneficis de les illes barrera

Les illes barrera tenen beneficis diversos, però entre tots ells, els més importants són els de protecció costanera:

- Protecció costanera: Aquestes illes són fonamentals per protegir les comunitats costaneres i els ecosistemes del clima extrem. Les dunes i herbes de les platges que trobem a les illes barrera absorbeixen l'energia de les ones abans que l'onada arribi al continent. En general, això significa una onada de tempesta més petita i menys inundacions a la costa.
- Ecosistema: Aquestes zones són un hàbitat important per a les aus marines, els peixos, el marisc i les tortugues marines. Donat que engloben zones com platges, aiguamolls i dunes, i per tant, també tots els seus beneficis.
- Economia local: Les illes barrera proporcionen les condicions òptimes per la reproducció de marisc, quelcom les converteix en santuaris de marisc que aporten economia pesquera a la societat. D'altra banda, són espais naturals molt vistosos pel turisme, quelcom aporta també un gran benefici econòmic a la població de la zona.
- Aigua neta: Els ocells que podem trobar en aquestes zones fan de filtradors naturals dels contaminants que arriben a la costa, així com els aiguamolls i les llacunes que es formen, que ajuden a millorar la qualitat de l'aigua.

2.3.7. Manglars

Els manglars són un grup d'arbres i arbustos que viuen a la zona intermareal costanera. Existeixen 80 espècies diferents de manglars, les quals trobem en zones amb un sòl baix en oxigen, on les aigües de moviment lent permeten que s'acumulin sediments fins.



Figura 33. Manglar al riu Sierpe, Costa Rica. Font: IUCN

Molts boscos de manglars es poden reconèixer pel seu dens embolcall d'arrels. Aquesta xarxa d'arrels permet als arbres fer front a la pujada i la baixada diària de les mareas, la qual cosa significa que la majoria dels manglars s'inunden almenys dues vegades al dia. Les arrels també frenen el moviment de les aigües de la marea, fent que els sediments quedin atrapats i consolidin el fons fangós.

Els boscos de manglars estableixen la costa, reduint l'erosió de les onades de tempesta, corrents, onades i mareas. El complex sistema d'arrels dels manglars també fa que aquests boscos siguin atractius per als peixos i altres organismes que busquen menjar i refugi dels depredadors.

Els manglars són probablement la vegetació més coneguda respecte a vegetació amb capacitats de protecció costanera. Donat que, durant condicions de tempesta, el bosc de manglar pot reduir l'energia de les ones fins a un 79% a una distància de 141 m (Horstman et al., 2014). Aquesta atenuació de les ones és produïda principalment per la pèrdua d'energia a causa de l'augment del coeficient d'arrossegament per la vegetació (Ondiviela et al., 2014). D'altra banda, les pèrdues d'energia a causa de la dissipació viscosa al fons i a la fricció del fons, són notablement més altes a l'interior dels manglars. Finalment, el corrent de marea es redueix a través de les arrels dels manglars. Aquest corrent reduït en combinació amb l'augment de l'atrapament de sediments per la vegetació protegeix la costa de l'erosió.

Distribució dels manglars

Els manglars es troben aproximadament a la meitat dels països del món com podem observar a la figura 34. Aquests només creixen a latituds tropicals i subtropicals prop de l'equador, donat que no poden sobreviure a temperatures de congelació. Quelcom delimita la seva distribució en 30° al nord i al sud de l'Equador.

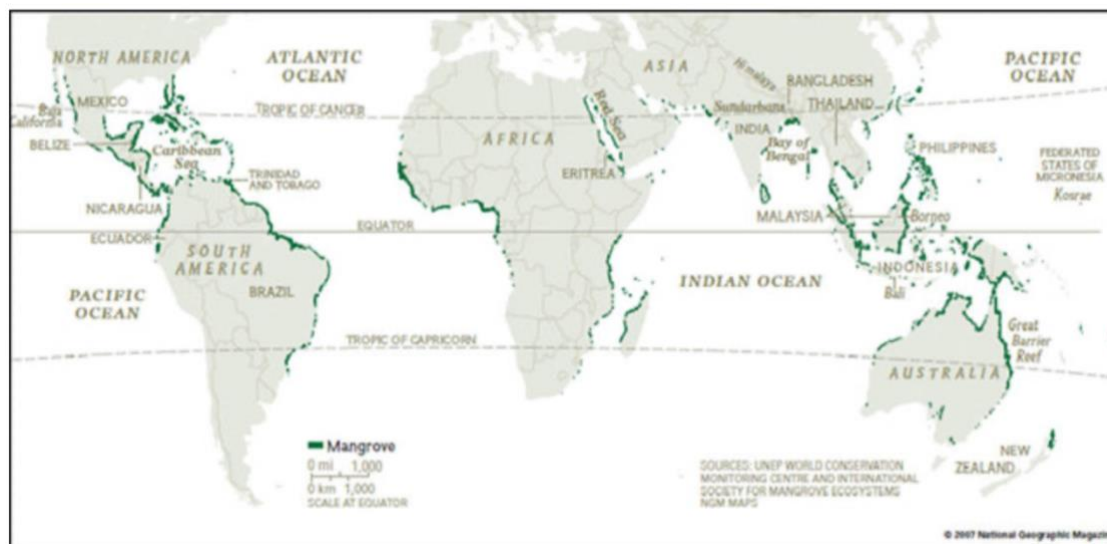


Figura 34. Distribució global dels manglars. Font: National Geographic Magazine 2007

Beneficis dels manglars

Els manglars aporten una quantitat de beneficis rellevants per totes les societats on es troben:

- Ecosistema: els manglars proporcionen refugi a una gran varietat d'espècies de fauna, com ara ocells, cérvols i abelles de mel. En especial pels ocells costaners, ja que serveixen com a zones de nidificació de moltes espècies. Fins i tot quan es tracta de manglars morts, proporcionen zones de descans pels ocells.
- Economia pesquera: proporcionen un hàbitat de viver per a molts peixos i mariscs comercials i, per tant, contribueixen a l'abundància local de marisc. Protegeixen espècies que són la base de moltes indústries pesqueres, per exemple, en el cas de Florida aquests proporcionen 7.600 milions de dòlars i donen feina a 109.000 persones.
- Protecció costanera: els boscos de manglars estableixen la línia de costa reduint l'erosió causada per onades de tempesta, corrents, onades i marees. Així com la torba dels manglars absorbeix aigua durant les pluges intenses i les onades de tempesta, reduint les possibilitats d'inundacions costaneres.
- Aigua neta: protegeixen la qualitat de l'aigua eliminant els nutrients i els contaminants de l'escorrentia de les aigües pluvials abans que arribin als hàbitats d'herbes marines i als esculls de corall.

3. ZONA D'ESTUDI

La conca Mediterrània es troba amb dos factors fonamentals que afecten les zones humides, aquests són els canvis al nivell del mar i les precipitacions, els quals són molt variables en l'espai i el temps (Ibañez & Caiola, 2021). Es tracta d'una regió amb clima micromareal amb una marea astronòmica que varia entre 20 i 30 cm. Tot i que les marees meteorològiques són molt més altes que les anteriors, havent registrat a Venècia onades de fins a 2 metres (Ibañez et al., 2002). Molts dels aiguamolls costaners que es troben al Mediterrani només s'inunden durant aquestes marees altes.

Donant-se els nivells mínims del mar durant l'estiu o l'hivern, quan la regió es troba sotmesa a altes pressions atmosfèriques. Així com el nivell màxim del mar a la tardor, quan es produeixen també les precipitacions.

La majoria dels aiguamolls litorals mediterranis es troben en zones deltaïques que, en molts sentits, presenten característiques oposades als estuaris clàssics. Els deltes sobresurten al mar i les seves desembocadures estan dominades pels rius, mentre que els estuaris típics són entrades costaneres més dominades per les marees.

Els aiguamolls de marees solen aparèixer als estuaris de les planes costaneres (no presents a la Mediterrània) i al llarg de les costes de les badies, on hi ha tant activitat de marea com influència fluvial, la qual cosa condueix a un estret acoblament entre les zones humides i les masses d'aigua adjacents. A la Mediterrània, les llacunes costaneres solen dominar les zones humides costaneres, amb poca influència dels rius. Les desembocadures dels rius a la Mediterrània són típicament estuaris de falca salina (Ibañez et al. 1997) associats amb deltes. Es considera que les zones costaneres més amenaçades pel canvi climàtic seran les costes baixes que inclouen deltes, platges, illes barrera, aiguamolls costaners, estuaris i illes (Nicholls et al. 2007; Courchamp et al. 2014; López-Dóriga & Jiménez 2020). Com és el cas de moltes zones de Catalunya, entre elles el Delta de l'Ebre.

El Delta de l'Ebre és la major zona humida de Catalunya amb una superfície de 320 km². Es tracta d'un espai Natural Protegit, Parc Natural, Reserva Natural Parcial, Xarxa Natura 2000: Zones Especials de Conservació (ZEC), Zones Especials de Protecció per a les Aus (ZEPA)

És un espai singular de Catalunya, amb una gran varietat d'ambients, marcats pel riu, les platges o les llacunes. Es tracta d'un hàbitat aquàtic important i presenta una riquíssima varietat d'ambients que dota la població de recursos econòmics basats en els arrossars, la pesca, l'agricultura, la ramaderia, la caça i el turisme. La confluència del medi marí i del continental afavoreix una elevada diversitat d'espècies de peixos. Pel que fa als ocells, han estat citades més de 400 espècies i aplega algunes de les colònies de cria d'ocells marins més rellevants de la Mediterrània. La flora presenta 764 espècies.

El delta de l'Ebre va ser plenament funcional com a sistema deltaic fins a la construcció d'uns 200 embassaments durant el segle passat i l'ús creixent de l'aigua a la conca per al regadiu (Ibañez et al. 1996). Això es va accelerar als anys 60, sobretot arran de la construcció dels embassaments de Mequinensa i Riba-roja a la conca baixa de l'Ebre, que retenen el 99% dels sediments (Rovira et al. 2015), i l'expansió del regadiu que va provocar una reducció substancial del cabal del riu Ebre (40%). Aquesta reducció de les aportacions d'aigua i sediments a la costa va desencadenar un procés d'erosió costanera, a més d'altres impactes físics, ecològics i socioeconòmics (Ibañez et al. 2020).

La taxa actual d'augment del nivell del mar eustàtic (RSLR) és de 3 mm any⁻¹, i això continuarà accelerant-se durant el segle XXI (Ibañez & Caiola, 2021). S'estima que la taxa de RSLR a finals del segle XXI estarà entre 0,6 i 1 m, el que significa que el 50% del delta estarà per sota del nivell mitjà del mar (Sayol i Marcos 2018).

D'altra banda, la taxa de retrocés litoral és de 2-3 m any⁻¹ a la majoria de les zones. Tot i que hi ha algunes zones on és de l'ordre de 3 m any⁻¹ com és el cas de la platja de la Marquesa i la del Trabucador. També que l'illa de Buda és la que ha rebut la major erosió de tot el Delta.

3.1. Anàlisi de les subzones d'estudi

Donat que la platja de la Marquesa, la del Trabucador i la zona de l'Illa de Buda es troben entre les més perjudicades per l'erosió alhora que de les més exposades als climes extrems que s'estan donant cada cop més sovint.

Alhora aquestes tres zones són prou representatives, ja que dues es troben als extrems del Delta i una a la part central com podem observar a la figura 35.

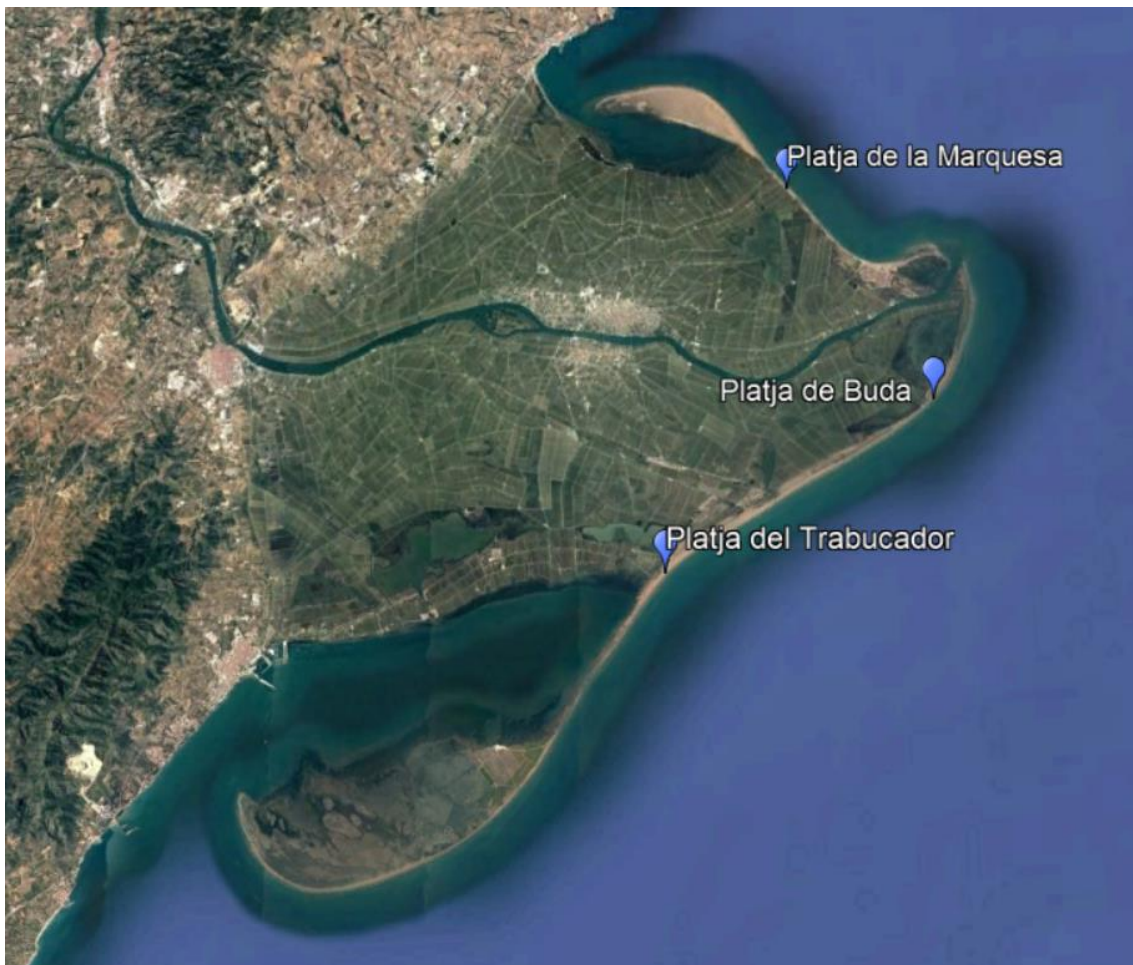


Figura 35. Zones d'estudi Delta de l'Ebre. Font: Elaboració pròpia

Seguidament es presenta la descripció general, la morfodinàmica i la hidrodinàmica que trobem a cadascuna d'aquestes zones, informació extreta del llibre verd de l'estat de la costa catalana (2010).

3.1.1. Platja de la Marquesa

Platja de la Marquesa: Tarragona, Baix Ebre, Deltebre, Platja de la Marquesa, Tram 2, Codi Llibre Verd de la Costa Catalana: BEDE027.

Localització UTM: 314366 4514329

La Platja de la Marquesa, és una platja amb sorra fina, una orientació de 144° respecte al Nord (N), Nord-est (NE), amb una longitud de 1208 m amb una amplada mitjana, màxima i mínima de 90 m, 124 m o 56 m respectivament omplint una superfície de 105698 m². L'alçada mínima que té la berma és d'1.038 m, la màxima d'1.47 m, amb una mitja de 1.42 m i té un pendent mitjà de 0.05%. La batimetria es pot veure a la figura 36.

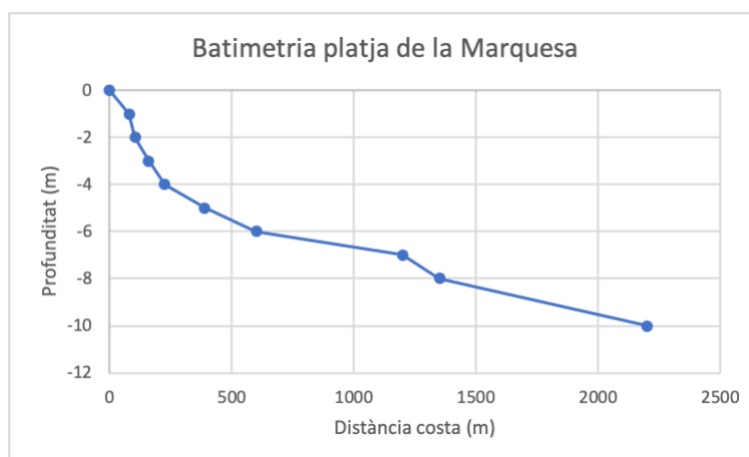


Figura 36. Batimetria de la Platja de la Marquesa. Font: Elaboració pròpia, dades de Navionics.

Pel que fa al sediment, la seva composició és de sorra de color torrat fosc, amb un 1.6% de sorra molt fina, un 90.1% de sorra fina i un 8.3% de sorra mitjana. Té una d_{50} (mida mitjana del gra del sediment) de 0.203 mm i un rang de diàmetre de la partícula de sediment de 70 μm a 500 μm .

Respecte a la descripció morfodinàmica, la Platja de la Marquesa és una platja oberta, amb una profunditat de tancament de 8.07 m i unes taxes de transport longitudinal net, brut i cap a ponent de -579150 m³/a, 640748 m³/a i 30798 m³/a.

Aquesta platja té un onatge amb alçada significant mitja de 0.81 m i un període de pic mitjà de 5.24 s. La direcció d'onatge més freqüent és de 90° E amb un 20.5% i la direcció de flux d'energia resultant és de 80°. L'alçada significant amb un període de retorn de 10 anys és de 5.57 m i amb un període de 100 anys és de 7.39 m.

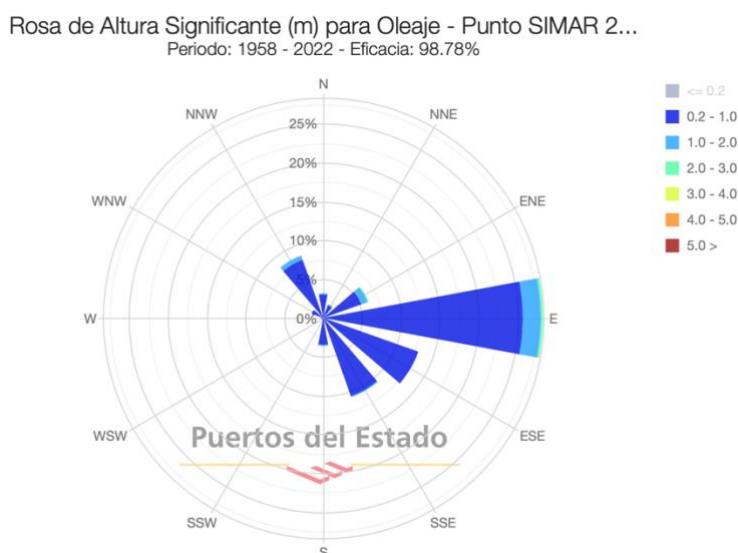


Figura 37. Rosa d'onatge i direcció de la Platja de la Marquesa, Punt SIMAR (2094129). Font: Puertos del Estado

L'alçada d'ona segueix un patró de valors més baixos de maig a agost, període principalment d'estiu. Obtenint els valors màxims els mesos de novembre a gener, principalment d'hivern, posant especial èmfasi al mes de gener. Amb alçades màximes obtingudes els mesos de març, abril, setembre i octubre prou elevades. Cal tenir en compte que aquesta aproximació s'ha obtingut amb dades d'alçada màxima mensual del 2019 al 2022, i que durant aquest període el mes de gener de 2020 va succeir el temporal Gloria i el mes de gener de 2021 la borrasca el Filomena. Dos esdeveniments climàtics extrems que van afectar de forma severa la costa (Puertos del Estado, 2022).

El nivell del mar té un rang de 0.44 m, per període de retorn de 10 anys és de 0.54 m i amb un període de 100 anys és de 0.75 m.

3.1.2. Platja de Buda

Platja de Buda: Tarragona, Montsià, Sant Jaume d'Enveja, Platja de Buda, Tram 2, Codi Llibre Verd de la Costa Catalana: MOSJ022.

Localització UTM: 319864 4508007

La Platja de Buda, és una platja amb sorra fina, una orientació de 110° respecte al Nord (N), Nord-est (NE), amb una longitud de 4459 m amb una amplada mitjana, màxima i mínima de 74 m, 97 m o 59 m respectivament omplint una superfície de 306906 m^2 . L'alçada mínima que té la berma és d'0.78 m i té un pendent mitjà de 0.06%. La batimetria es pot veure a la figura 38.

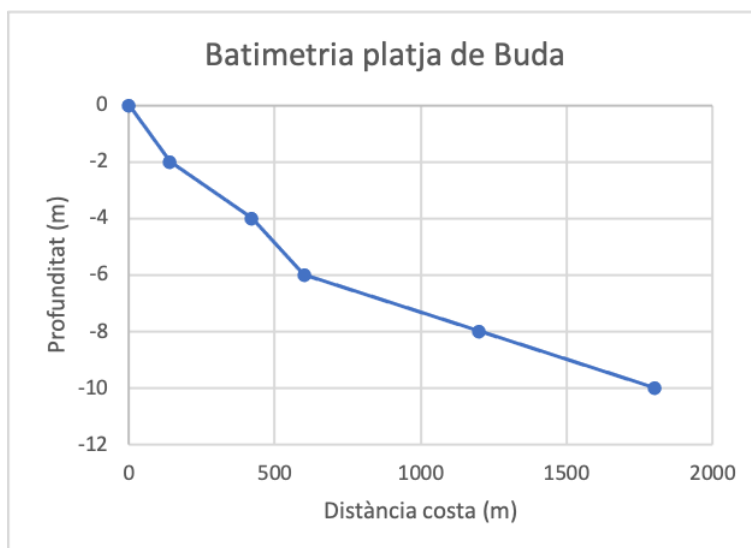


Figura 38. Batimetria de la Platja de Buda. Font: Elaboració pròpia, dades de Navionics.

Pel que fa al sediment, la seva composició és de sorra de color torrat fosc, amb un 1.5% de sorra molt fina, un 90.7% de sorra fina i un 7.8% de sorra mitjana. Té una d_{50} (mida mitjana del gra del sediment) de 0.200 mm i un rang de diàmetre de la partícula de sediment de $90 \mu\text{m}$ a $600 \mu\text{m}$.

Respecte a la descripció morfodinàmica, la Platja de Buda és una platja oberta, amb una profunditat de tancament de 8.07 m i unes taxes de transport longitudinal net, brut i cap a ponent de $270023 \text{ m}^3/\text{a}$, $636239 \text{ m}^3/\text{a}$ i $453131 \text{ m}^3/\text{a}$.

Aquesta platja té un onatge amb alçada significant mitja de 0.81 m i un període de pic mitjà de 5.24 s. La direcció d'onatge més freqüent és de 90° E amb un 20.5% i la direcció de flux d'energia resultant és de 80°, però com podem observar a la figura 39, la direcció de l'onatge en aquest cas també acostuma a ser SSE (Puertos del Estado, 2022). L'alçada significant amb un període de retorn de 10 anys és de 5.57 m i amb un període de 100 anys és de 7.39 m.

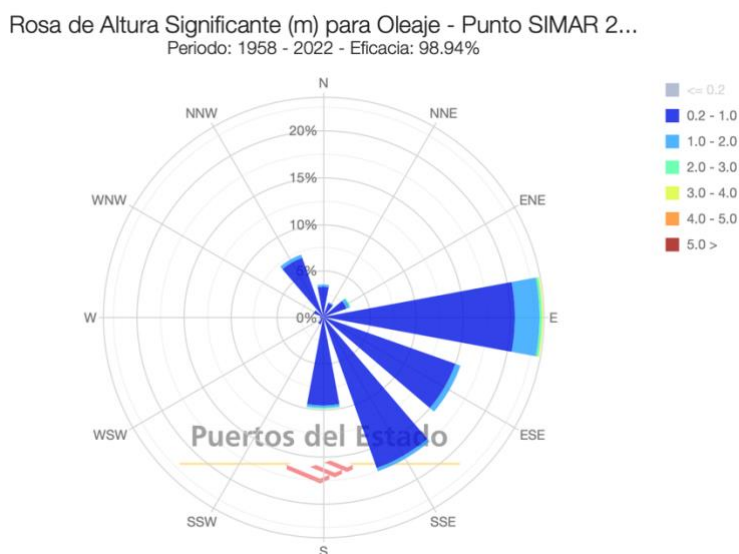


Figura 39. Rosa d'onatge i direcció de la Platja de Buda, punt SIMAR (2094128). Font: Puertos del Estado

L'alçada d'ona segueix un patró de valors més baixos de maig a agost, període principalment d'estiu. Obtenint els valors màxims els mesos de setembre a abril, donant-se les alçades màximes al mes de gener. Cal tenir en compte que aquesta aproximació s'ha obtingut amb dades d'alçada màxima mensual del 2019 al 2022, i que durant aquest període el mes de gener de 2020 va succeir el temporal Gloria i el mes de gener de 2021 la borrasca el Filomena. Dos esdeveniments climàtics extrems que van afectar de forma severa la costa (Puertos del Estado, 2022).

El nivell del mar té un rang de 0.44 m, per període de retorn de 10 anys és de 0.54 m i amb un període de 100 anys és de 0.75 m.

3.1.3. Platja del Trabucador

Platja del Trabucador: Tarragona, Montsià, Sant Carles de la Ràpita, Platja del Trabucador, Tram 2, Codi Llibre Verd de la Costa Catalana: MOSC017.

Localització UTM: 306949 4497200

La Platja del Trabucador, és una platja amb sorra fina, una orientació de $55/64^{\circ}$ respecte al Nord (N), Nord-est (NE), amb una longitud de 8132 m amb una amplada mitjana, màxima i mínima de 69 m, 130 m o 34 m respectivament omplint una superfície de 105698m^2 . L'alçada mínima que té la berma és de 2.01/0.61 m, la màxima de -/1.15 m, amb una mitja de -/1.1 m i té un pendent mitjà de 0.06/0.07%. La batimetria es pot veure a la figura 40.

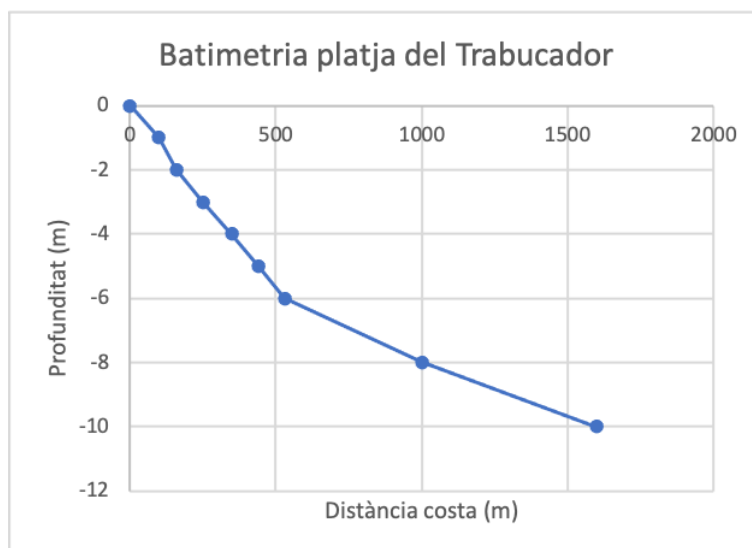


Figura 40. Batimetria de la Platja del Trabucador. Font: Elaboració pròpia, dades de Navionics.

En quant al sediment, la seva composició és de sorra de color torrat fosc, amb un 0.4% de sorra molt fina, un 73% de sorra fina i un 26.6% de sorra mitjana. Té una d_{50} (mida mitjana del gra del sediment) de 0.225 mm i un rang de diàmetre de la partícula de sediment de $105\ \mu\text{m}$ a $600\ \mu\text{m}$.

Pel que fa a la descripció morfodinàmica, la Platja del Trabucador és una platja oberta, amb una profunditat de tancament de 8.07 m i unes taxes de transport longitudinal net, brut i cap a ponent de $470862\ \text{m}^3/\text{a}$, $858806\ \text{m}^3/\text{a}$ i $664834\ \text{m}^3/\text{a}$.

Aquesta platja té un onatge amb alçada significant mitja de 0.81 m i un període de pic mitjà de 5.24 s. La direcció d'onatge més freqüent és de 90° E amb un 20.5% i la direcció de flux d'energia resultant és de 80°, però com podem observar a la figura 41, la direcció de l'onatge en aquest cas acostuma a ser ESE, seguidament de SSE i E (Puertos del Estado, 2022). L'alçada significant amb un període de retorn de 10 anys és de 5.57 m i amb un període de 100 anys és de 7.39 m.

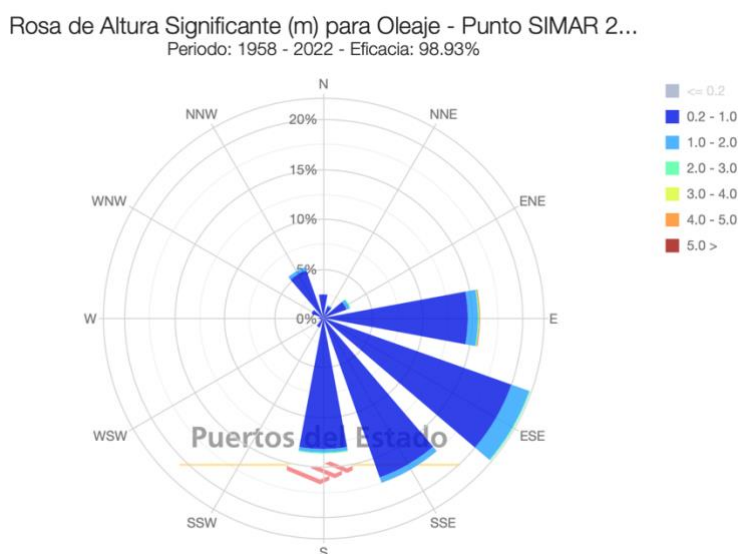


Figura 41. Rosa d'onatge i direcció de la Platja del Trabucador, punt SIMAR (2093127). Font: Puertos del Estado

L'alçada d'ona segueix un patró de valors més baixos de maig a agost, període principalment d'estiu. Obtenint els valors màxims els mesos de setembre a abril, donant-se les alçades màximes al mes de gener. Cal tenir en compte que aquesta aproximació s'ha obtingut amb dades d'alçada màxima mensual del 2019 al 2022, i que durant aquest període el mes de gener de 2020 va succeir el temporal Gloria i el mes de gener de 2021 la borrasca el Filomena. Dos esdeveniments climàtics extrems que van afectar de forma severa la costa (Puertos del Estado, 2022).

El nivell del mar té un rang de 0.44 m, per període de retorn de 10 anys és de 0.54 m i amb un període de 100 anys és de 0.75 m.

4. NbS PROPOSADES

4.1. Avaluació de les propostes

Vistes totes les opcions de NbS a l'apartat 2.3. i tenint en compte les casuístiques concretes del Mediterrani, semblaria que algunes opcions com la dels esculls de corall, els manglars quedarien fora de la normalitat que es presenta al Mediterrani. Tot i que és cert, que els coralls al Mediterrani segueixen existint en alguns indrets, el seu estat és actualment molt crític a causa de la contaminació, l'acidificació i l'augment de les temperatures que està experimentant. D'altra banda els manglars queden descartats donat que aquests no han estat mai distribuïts a la conca, i que aquesta es troba a més de 30° de l'Equador, quelcom fa pensar que no es reunarien les condicions tropicals que aquests necessiten per sobreviure.

Si ens centrem més específicament en les casuístiques del cas d'un delta, que rep, o hauria de rebre un aport de sediment constant, tot i que les herbes marines, en específic la posidònia, és una de les NbS que més s'estan proposant pel Mediterrani, la plantació i la supervivència d'aquests es veuria totalment compromesa per el soterrament constant de les zones de replantació.

El més adequat per aquest cas doncs, tenint en compte la morfologia del Delta de l'Ebre i els ambients naturals que ja té seria la conservació i reconstrucció dels aiguamolls que actualment hi han o hi havia de forma natural, a partir de la transferència de sediments que queden atrapats als embassaments de Mequinensa i Ribarroja, els quals haurien d'arribar al Delta de l'Ebre de forma natural si aquests no s'haguessin elaborat als anys 60 (Caiola, 2022). Aquesta acció però, ja s'està intentant desenvolupar-se per part de la Generalitat i s'està fent un estudi.

Un altre bona opció podria ser la construcció d'una illa barrera, seguint el mateix procediment que en el cas dels aiguamolls, portar sediments dels embassaments i depositant-los davant de la costa. Així com la conservació i la reconstrucció de les zones dunars que hi ha al Delta, seguint també la metodologia esmentada per aiguamolls i illes barrera.

D'altra banda, els esculls d'ostres semblen una opció viable per la zona del Delta, donat que les ostres, formen part de l'ecosistema natural del Delta, en específic la ostra arrissada del Delta, *Crassostrea Gigas*, una ostra molt versàtil que pot arribar a trobar-se fins a 40 metres de profunditat adherida a sols rocosos i fermes, fins a sols arenosos a poca profunditat. Quelcom dona marge de llibertat alhora de construir un escull d'ostres. Donada doncs, la immediatesa amb la que necessita el Delta una solució per restablir el seu equilibri, construir un escull d'ostres sembla l'opció més adequada.

Aquesta és plantejarà com una Low Crest Reef (LCR), traduït com un escull de cresta baixa, provinent de Low Crest Structures (LCS) estructures de cresta baixa i submergides, les quals estan començant a ser cada vegada més utilitzades per la protecció costanera.

Aquestes, tenen com a propòsit reduir la càrrega hidràulica alhora que mantenint l'equilibri dinàmic de la línia de costa. Per això han estat dissenyades per permetre la transmissió d'una certa quantitat d'energia de l'ona sobre l'estructura mitjançant el desbordament i també una mica de transmissió a través de l'estructura porosa, en estructures emergides, o el trencament de l'ona i la dissipació d'energia a la cresta poc profunda, en estructures submergides (Pilarczyk, et al., 2003).

4.2. Paràmetres de seguiment indicatius

El que es busca es crear una LCR amb un coeficient de transmissió de les onades (K_t) baix. Així doncs un dels paràmetres de seguiment indicatius serà la K_t , alhora que el numero de Dean Ω , ja que el principal objectiu de la NbS es reduir l'erosió de la costa, quelcom podrem saber si s'aconsegueix amb un numero de Dean per sota de 3.2, que ens indicarà una menor o nul·la capacitat d'energia de l'onatge en la platja protegida.

D'altre banda també s'haurà de veure la resposta que dona la costa davant els l'escull d'ostres i quins efectes pot generar, donat que aquestes estructures poden donar lloc a tombolos o sortints en funció de la distància de la costa a que es trobi i la longitud de l'estructura.

5. CAS D'ESTUDI

L'estudi de la LCR finalment és farà per la Platja de Buda, donada que aquesta es troba a la part central del Delta de l'Ebre, alhora que és la part que més sobresurt de totes tres zones vistes anteriorment.

Aquest estudi s'ha basat, fonamentalment, en dos paràmetres no constants. L'alçada d'ona significant (H_s) i el període pic (T_p) per un escenari present i per un escenari de tempesta amb període de retorn (T_r) de 10 i de 100 anys.

La H_s per la platja de Buda en l'escenari present i els futurs amb T_r 10 i T_r 100 (Llibre verd, 2010). Així com els T_p (Llibre verd, 2010) i els T_p d'escenaris amb T_r 10 i T_r 100, els quals van ser obtinguts a partir d'una regressió no lineal i aplicant el α obtingut de la mateixa, a la fórmula recomanada per Puertos del Estado per aconseguir el període de pic amb un grau de llibertat : $T_p = \alpha \cdot H_s^{0,5}$. Com la longitud d'ona a aigües fondes (L_o) calculada per cada escenari ,el pendent de la platja (β), el diàmetre mitjà dels sediment (D_{50}) (Llibre verd, 2010) i la velocitat de caiguda del sediment (w_s) (Caceres, 2022) els podem observar a la taula 1.

	Present	T_R 10 anys	T_R 100 anys
H_s (m)	0,81	5,57	7,39
T_p (s)	5,24	13,11	15,10
L_o (m)	42,82	268,27	355,93
β (°)	0,06		
D_{50} (mm)	0,200		
W_s (m/s)	0,025		

Taula 1. Dades i paràmetres Platja de Buda. Font: Elaboració pròpia.

Donat que la LCR es plantejarà per la Platja de Buda i que s'ha detectat que la direcció de les onades que rebia aquesta, entre el Llibre verd (2010) i Puertos del Estado (2022) era una mica diferent, s'han extret dades històriques més precises de Puertos del Estado per tal de comprovar quina era la direcció d'onades majoritària en aquesta Platja.

En primer lloc podem visualitzar a la taula 2, el percentatge que es dona de cada d'alçada d'ona vs. el període pic d'aquestes. En la qual podem observar que la major part de les onades es donen de ≤ 0.5 metres, seguides de les que es troben per sota d'1 metre. Així com el període pic de les onades més freqüent és el que es troba per sota de 4 segons, seguides de les onades amb període pic per sota de 3 segons.

Hs (m)	Tp (s)											Total
	$\leq 1,0$	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	> 10,0	
$\leq 0,5$	0,004	1,085	17,680	16,988	12,167	10,677	7,484	3,244	1,350	0,560	0,170	71,409
1,0			2,093	2,875	3,564	4,547	4,115	3,048	1,625	0,889	0,394	23,150
1,5			0,002	0,200	0,339	0,513	0,872	0,673	0,558	0,423	0,282	3,861
2,0				0,004	0,072	0,028	0,225	0,287	0,185	0,184	0,117	1,101
2,5					0,004	0,012	0,011	0,086	0,085	0,047	0,034	0,278
3,0						0,003		0,013	0,049	0,019	0,031	0,116
3,5								0,002	0,015	0,015	0,013	0,045
4,0									0,003	0,009	0,009	0,020
4,5										0,004	0,005	0,009
5,0											0,008	0,008
> 5,0											0,004	0,004
Total	0,004	1,085	19,775	20,067	16,146	15,780	12,707	7,353	3,868	2,150	1,066	100%

Taula 2. Període de Pic (Tp) - Altura Significat (Hs) en % de la Platja de Buda de Gener 1958 - Abril 2022

En segon lloc podem visualitzar a la taula 3, el percentatge que es dona de cada direcció vs. l'alçada d'ona d'aquestes. En aquesta podem observar de nou que la major part de les onades es donen de ≤ 0.5 metres seguides de les onades que es troben per sota d'1 metre. Així com la direcció majoritària d'aquestes és de E (90°), seguides de les SSE ($157,5^\circ$)

Direcció	Hs (m)	Hs (m)											Total	
		$\leq 0,2$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0		> 5,0
CALMAS		17,455												17,455
N	0,0		1,826	0,647	0,094	0,011	0,001							2,580
NNE	22,5		0,794	0,377	0,073	0,006								1,250
NE	45,0		0,750	0,452	0,094	0,006	0,002							1,305
ENE	67,5		1,389	1,255	0,344	0,126	0,031	0,017	0,007	0,002		0,001		3,172
E	90,0		9,311	6,850	1,603	0,524	0,134	0,064	0,020	0,012	0,006	0,005	0,002	18,529
ESE	112,5		9,436	3,654	0,565	0,247	0,074	0,027	0,017	0,006	0,003	0,002	0,002	14,032
SE	135,0		7,628	1,454	0,106	0,021	0,005	0,001						9,215
SSE	157,5		10,713	3,568	0,304	0,029	0,002							14,616
S	180,0		5,410	1,399	0,212	0,050	0,015	0,003						7,090
SSW	202,5		0,712	0,290	0,060	0,006								1,068
SW	225,0		0,187	0,060	0,002									0,250
WSW	247,5		0,177	0,044	0,004									0,225
W	270,0		0,223	0,063	0,006									0,293
WNW	292,5		0,354	0,122	0,008									0,485
NW	315,0		1,307	0,966	0,086	0,016	0,002	0,001						2,378
NNW	337,5		3,812	1,889	0,289	0,053	0,011	0,002						6,057
Total		17,455	54,028	23,090	3,851	1,098	0,277	0,115	0,045	0,020	0,009	0,008	0,004	100%

Taula 3. Altura Significat (Hs) - Direcció de l'onatge en % de la Platja de Buda de Gener 1958 - Abril 2022

5.1. Plantejament de la LCR

El que es busca amb la LCR és trobar una K_t que redueixi l'erosivitat de la zona i que no provoqui respostes negatives sobre la línia de la costa com podria ser la creació de tombolos o sortints.

Entenem la K_t com la divisió entre l'alçada de l'ona incident (H_i) i la transmesa (H_t) (fig 40). En la qual prendrem com a H_i la H_s

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}$$

Aquesta serà calculada amb diferents formules que defineixen aquesta en funció de paràmetres com: el francbord de l'escull d'ostres (R_c o d_s), l'ample d'aquest (B), el diàmetre mig dels materials de la LCR (D_{50a}), la pendent de la LCR (α), el número d'Iribarren (ξ) l'alçada d'ona (H_s), el període pic (T_p) i la longitud d'ona local (L) i a aigües fondes (L_o). Per així poder saber l'alçada transmesa una vegada incorporada la LCR i veure com aquesta estructura atenuarà les onades que arribin a la costa.

S'avaluarà la possibilitat de que l'estructura sigui emergida o submergida. Ambdues compostades o cobertes d'ostra arribada del Delta, *Crassostrea Gigas*.

Per la emergida es proposa una estructura de tipus escull de cultiu plantat en alt relleu, amb un francbord positiu de 0,01 metres, la qual es plantejaria per una profunditat de 4 metres.

Per extreure la K_t es farà servir la formula de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). En aquest cas, com es tracta d'una estructura d'ostres, s'utilitzarà l'equació proposada per estructures permeables.

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_{si}} + \left(\frac{B}{H_{si}}\right)^{-0.31} * (1 - e^{-0.5\xi}) * 0.64 \qquad \xi = \frac{\tan(\alpha)}{H_i/L_o^{0.5}}$$

Per la submergida es proposa una estructura de tipus escull de formigó prefabricat, en particular les Reef balls, donada la gran versatilitat que aquestes presenten per adaptar-se. En aquest cas es proposaran per francbords negatius de -0.5, -1 i -1,5 metres, per una profunditat de 4 metres.

En aquest cas s'utilitzarà també la formula de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996), també per estructures permeable. Alhora que la formula de Seabrook & Hall (1998) per comprovar els resultats de K_t .

$$K_t = 1 - \left(e^{-0.65\left(\frac{d_s}{H_i}\right) - 1.09\left(\frac{H_i}{B}\right)} + 0.047\left(\frac{B d_s}{L D_{50a}}\right) - 0.067\left(\frac{d_s H_i}{B D_{50a}}\right) \right)$$

Com ambdues estructures es plantejaran per 4 metres, considerem que les alçades d'ona que es donen per Tr 10 i 100 anys ja hauran trencat anteriorment per profunditat, abans de que arribin a l'estructura. Així doncs és farà només un estudi d'onades incidents de com a màxim 3.12 metres, en comptes de per l'alçada d'ona prevista per una Tr 10 i 100, tenint en compte el criteri de rotura estandard de McCowan (1891) que diu: $H_b = 0,78 \cdot h_b$. Sent H_b la profunditat a la que trencarà i h_b la profunditat a la que es trobarà l'onada (4 metres), ja que és on col·locarem l'estructura.

En la taula 4, podem observar els paràmetres necessaris per tal de calcular K_t tant per Angremond et al., (1996) com per Seabrook & Hall (1998).

	$H_s = 0,81 \text{ m}$	$H_s = 3,12 \text{ m}$
Tp (s)	5,24	8,27
Lo (m)	42,82	106,67
L (m)	29,6	54,4
α	0,5	
D_{50a} (m)	0,30	

Taula 4. Paràmetres necessaris per poder calcular K_t per Angremond et al (1996) i Seabrook et al (1998).
Font: Elaboració pròpia

Una vegada obtinguts els paràmetres de K_t per cadascuna de les propostes, s'extraurà l'alçada d'ona prevista per així poder calcular el paràmetre o nombre adimensional de la caiguda del gra, també anomenat número de Dean (figura 45) assabentant-nos així de l'erosivitat de la platja i sabent l'estat en el que es trobarà a partir del criteri de Dean (1977). En la part esquerra de la figura també apareix el criteri de Larson & Kraus (1989), que ve a donar la mateixa informació que el de Dean, però en aquest cas s'ha decidit aplicar el de Dean.

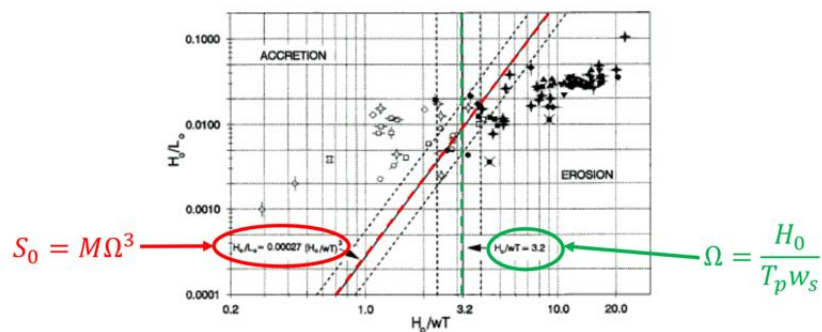


Figura 42. Distribució que separa les regions d'erosió i accreió per dades de camp. Font: Larson et al, 1991.

Per últim, mirarem si aquesta LCR provocarà afectacions sobre la línia de la costa, com podria ser la creació de tombolos o sortints, això dependrà de la longitud de l'estructura (L_B) i de la distància a la que estigui de la costa (X_B).

En el cas de la LCR emergida segons Ahrens & Cox (1990) si la divisió entre $L_B / X_B < 0.27$, es considerarà que no es presenten canvis en la costa.

Per la submergida segons Black & Andrews, (2001) no hi haurà canvis en la costa per $L_B / X_B \leq 0.1$

5.2. Resultats

Per la estructura emergida de tipus escull de cultiu plantat en alt relleu amb un francbord (R_c) positiu de 0.01 m, la qual s'ha plantejat per 4 amplades (B) diferents de 0.5, 1, 2 i 3 m. S'han obtingut els diferents resultats a partir de la fórmula de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996) i s'han marcat en vermell aquells que sortien del rang de K_t que van marcar, així com les H_t extretes d'aquests resultats:

Per $R_c = 0.01$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = 0,01$ m		
B	K_t	H_t
0,5	0,636	0,515
1,0	0,512	0,414
2,0	0,412	0,333
3,0	0,363	0,294

Taula 5. K_t i H_t calculades per una estructura emergida amb $R_c = 0.01$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = 0,01$ m		
B	K_t	H_t
0,5	0,899	2,805
1,0	0,725	2,262
2,0	0,584	1,823
3,0	0,515	1,607

Taula 6. K_t i H_t calculades per una estructura emergida amb $R_c = 0.01$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

Per la estructura submergida de tipus escull de formigó prefabricat (ReefBalls) pels francbords (R_c) negatius de -0.5, -1.0, -1.25 i -1.5 m, les quals s'han plantejat per 4 amplades (B) diferents de 0.5, 1.0, 2.0 i 3.0 m. S'han obtingut els diferents resultats a partir de la fórmula de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996):

Per $R_c = -0.5$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = -0,5$ m		
B	K_t	H_t
0,5	0,888	0,719
1,0	0,764	0,618
2,0	0,664	0,537
3,0	0,614	0,498

Taula 7. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -0.5$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = -0,5$ m		
B	K_t	H_t
0,5	0,964	3,009
1,0	0,790	2,466
2,0	0,649	2,027
3,0	0,580	1,811

Taula 8. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -0.5$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

Per $R_c = -1.0$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = -1,0$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,135	0,919
1,0	1,011	0,818
2,0	0,911	0,737
3,0	0,861	0,698

Taula 9. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.0$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = -1,0$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,028	3,209
1,0	0,854	2,666
2,0	0,714	2,227
3,0	0,644	2,011

Taula 10. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.0$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

Per $R_c = -1.25$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = -1,25$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,258	1,019
1,0	1,134	0,918
2,0	1,034	0,837
3,0	0,985	0,798

Taula 11. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.25$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = -1,25$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,060	3,309
1,0	0,886	2,766
2,0	0,746	2,327
3,0	0,676	2,111

Taula 12. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.25$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

Per $R_c = -1.5$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = -1,5$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,381	1,119
1,0	1,258	1,018
2,0	1,157	0,937
3,0	1,108	0,898

Taula 13. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.5$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = -1,5$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,092	3,409
1,0	0,918	2,866
2,0	0,778	2,427
3,0	0,708	2,211

Taula 14. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.5$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond & Vander Meer & de Jong (1996). Font : Elaboració pròpia.

Per l'estructura submergida de tipus escull de formigó prefabricat (ReefBalls) pels francbords (R_c) negatius de -0.5, -1.0, -1.25 i -1.5 m, les quals s'han plantejat per 4 amplades (B) diferents de 0.5, 1.0, 2.0 i 3.0. S'han obtingut també resultats a partir de la fórmula de Seabrook & Hall (1998) i s'han marcat en vermell aquells que sortien del rang de K_t que van marcar, així com les H_t extretes d'aquests resultats::

Per $R_c = -0,5$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = -0,5$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,065	0,862
1,0	0,810	0,656
2,0	0,609	0,493
3,0	0,523	0,423

Taula 15. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -0.5$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = -0,5$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,695	5,288
1,0	1,316	4,108
2,0	1,006	3,141
3,0	0,821	2,563

Taula 16. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -0.5$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.

Per $R_c = -1.0$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = -1,0$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,282	1,038
1,0	0,990	0,802
2,0	0,791	0,641
3,0	0,710	0,575

Taula 17. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.0$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = -1,0$ m		
B	K_t	H_t
0,5	2,391	7,460
1,0	1,666	5,200
2,0	1,194	3,726
3,0	0,962	3,002

Taula 18. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.0$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.

Per $R_c = -1.25$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = -1,25$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,386	1,122
1,0	1,067	0,864
2,0	0,863	0,699
3,0	0,782	0,633

Taula 19. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.25$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = -1,25$ m		
B	K_t	H_t
0,5	2,739	8,546
1,0	1,841	5,746
2,0	1,287	4,017
3,0	1,031	3,218

Taula 20. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.25$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.

Per $R_c = -1.5$ m

$H_s = 0,81$ m		
$R_c = -1,5$ m		
B	K_t	H_t
0,5	1,487	1,204
1,0	1,139	0,922
2,0	0,926	0,750
3,0	0,843	0,682

Taula 21. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.5$ m en un escenari amb $H_s = 0.81$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.

$H_s = 3,12$ m		
$R_c = -1,5$ m		
B	K_t	H_t
0,5	3,087	9,632
1,0	2,016	6,291
2,0	1,380	4,306
3,0	1,099	3,431

Taula 22. K_t i H_t calculades per una estructura submergida amb $R_c = -1.5$ m en un escenari amb $H_s = 3.12$ m. A partir de Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia.

5.3. Anàlisi dels resultats

Tenint en compte les limitacions d'algunes formules com és el cas de Angremond et al., 1996. En que K_t s'ha de trobar entre els valors: $0.075 < K_t, < 0.80$. Així com en el cas de Seabrook & Hall (1998) el qual diu que, es recomana tenir precaució a l'hora d'aplicar equació fora dels intervals de variables següents.

$$0 \leq \frac{B \cdot R_c}{L \cdot D_{50}} \leq 7.08 \quad \text{i} \quad 0 \leq \frac{R_c \cdot H_i}{B \cdot D_{50}} \leq 2.14$$

Trobem que els resultats obtinguts, que es donen dins els valors de confiança són els que podem observar a la següent taula marcats en blau, a l'esquerra pels resultats obtinguts per Angremond et al., (1996) i a la dreta els obtinguts per Seabrook & Hall (1998).

Emergida			Submergida		
Rc = 0.01			Rc = 0.5		
B	Hs = 0,81	Hs = 3,12	B	Hs = 0,81	Hs = 3,12
0.5			0.5		
1.0			1.0		
2.0			2.0		
3.0			3.0		
Submergida			Rc = 1.0		
Rc = -0.5			0.5		
0.5			1.0		
1.0			2.0		
2.0			3.0		
3.0			Rc = 1.25		
Rc = -1.0			0.5		
0.5			1.0		
1.0			2.0		
2.0			3.0		
3.0			Rc = 1.5		
Rc = -1.25			0.5		
0.5			1.0		
1.0			2.0		
2.0			3.0		
3.0			Rc = -1.5		
Rc = -1.5			0.5		
0.5			1.0		
1.0			2.0		
2.0			3.0		
3.0					

Taula 23. Taula resum dels paràmetres obtinguts per cada fórmula, dins els intervals de confiança marcats en blau.
Font : Elaboració pròpia.

Totes aquelles propostes de LCR que han donat resultats fora dels intervals de confiança els ignorarem, així com els valors de les H_t que es donen per aquests, ja que són valors obtinguts amb resultats per K_t fora del límit marcat per Angremond et al., (1996) i amb valors fora dels intervals de les variables limitades per Seabrook & Hall (1998).

Així doncs calcularem el número de Dean que es donaria a la platja per la LCR emergida amb $R_c = 0,01$ m i amplada de 1, 2 i 3 m, per preveure de manera aproximada si aquesta platja presentarà erosivitat. També mirarem la resposta que donarà la costa amb la col·locació de la LCR. Per altre banda farem el mateix procés per la LCR submergida amb $R_c = -0,5$ m i d'amplada igual a 3 m, ja que es la única que dona valors acceptables per ambdues formules.

Per la LCR emergida podem observar els números de Dean que hem extret a partir de les H_t que es donaven per ambdós escenaris, per una $H_s = 0,81$ m i una $H_s = 3,12$ m en la taula 24, en la qual podem observar que el menor número de Dean es dona per la LCR amb una amplada igual a 3 m.

B	Número de Dean (Ω)	
	$H_s = 0,81$ m	$H_s = 3,12$ m
1,0	3,167	17,267
2,0	2,549	13,922
3,0	2,244	12,274

Taula 24. Números de Dean obtinguts per l'estructura emergida amb $R_c = 0.01$ m i amb $H_s = 0.81$ m i $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond et al.,(1996). Font : Elaboració pròpia

Com podem observar, tots els resultats per l'escenari amb $H_s = 0,81$ m donen per sota de 3.2, que es el marca el criteri de Dean (1977), com una platja amb acreció probable pels amples de LCR de 1 i 2 m, i acreció altament probable per la LCR de 3 m d'ample. Que ve a ser tot el contrari a una platja erosiva. Ja que aquesta és defineix com l'acumulació de sediments, dipositats per processos naturals de flux de fluids. Els resultats per l'escenari que marca per $H_s = 3,12$ m, donen un escenari d'erosió, més reduït que si no hi hagués la LCR, però encara i així hi haurà erosió altament probable.

Segons la batimetria de la Platja de Buda, els 4 m de profunditat els trobarem a 420 m de distància de la costa. En aquest cas la LCR es planteja de 100 m de llarg, sent aquesta la L_B i la X_B de 420, obtindríem un valor de 0.23, segons Ahrens & Cox (1990) si la divisió entre $L_B / X_B < 0.27$, es considerarà que no es presenten canvis en la costa.

Per la LCR submergida podem observar els números de Dean que hem extret a partir de les H_t que es donaven per ambdós formules per una $R_c = -0,5$ m i una amplada igual a 3 m i per ambdós escenaris, per una $H_s = 0,81$ m i una $H_s = 3,12$ m en la taula 25, en la qual podem observar que el número de Dean dona per la LCR amb una amplada igual a 3 m.

	Número de Dean (Ω)	
	$H_s = 0,81$ m	$H_s = 3,12$ m
Angremond et al., (1996)	3,801	13,832
Seabrook & Hall (1998)	3,236	12,401

Taula 25. Números de Dean obtinguts per l'estructura submergida amb $R_c = -0.5$ m i amb $H_s = 0.81$ m i $H_s = 3.12$ m. A partir de Angremond et al.,(1996) i Seabrook & Hall (1998). Font : Elaboració pròpia

Com podem observar, tots dos resultats per l'escenari amb $H_s = 0,81$ m donen per sobre de 3.2, que es el marca el criteri de Dean (1977), com una platja amb erosió probable. Els resultats per l'escenari que marca per $H_s = 3,12$ m, donen un escenari d'erosió, més reduït també que si no hi hagués la LCR, però encara i així amb erosió altament probable.

En aquest cas la LCR es planteja de 45 m de llarg, sent aquesta la L_B i la X_B de 420 m, obtindríem un valor de 0.10, segons Black & Andrews (2001) si la divisió entre $L_B / X_B \leq 0.1$, es considerarà que no es presenten canvis en la costa.

En darrer lloc, vist que les onades arriben amb direcció E (90°), seguides de les SSE ($157,5^\circ$). Es planteja col·locar l'estructura amb una orientació mitja entre aquestes dues direccions, la qual seria de $123,75^\circ$, bastant paral·lela a la costa tenint en compte que aquest té una orientació de 110° , segons Llibre verd (2010).

6. DISCUSSIÓ

Els resultats de K_t obtinguts per la LCR emergida amb R_c de 0,01 m i ample igual a 3 m, són els més reduïts que es donen entre totes les K_t calculades. Fins i tot els càlculs per la mateixa canviant l'ample per un d'igual a 2 m, són més reduïts per una $H_s = 0,81$ m. Que els efectuats per l'estructura submergida seguint la fórmula de Angremond, et al., (1996) i a molt poca diferència del efectuats per $H_s = 3,12$ m.

En conseqüència els resultats de H_t també donen valors menors per la LCR emergida amb R_c de 0,01 m i un ample de 3 m. Equiparant resultats de la LCR emergida de 1 metre d'ample amb la LCR submergida de 3 m d'ample.

Pel que fa a l'erosivitat, cap resultat obtingut per la LCR submergida sembla evitar l'erosió de la zona, en canvi la LCR emergida si que planteja escenaris acresius per la $H_s = 0,81$ m, i tot i que per $H_s = 3,12$ m planteja escenaris erosius, aquests són bastant menys erosius que els que planteja l'estructura submergida.

És important tenir en compte que cap de les dues LCR proposades, ni l'emergida ni la submergida, provocarien respostes negatives per part de la línia de la costa. Però cal notar que l'estructura emergida al ser plantejada de major longitud, tindrà un poder major de protecció que l'estructura submergida, plantejada de menys per la meitat de longitud que l'altre, per evitar aquestes respostes negatives per part de la línia de la costa.

En darrer lloc, però no menys important, cal recordar que la creació d'aquesta estructura alhora que vol evitar l'erosió de la costa, pretén afavorir la biodiversitat de l'ecosistema marí amb la creació de l'escull d'ostres. El qual com s'ha vist en l'estudi de Morris et al., (2021), els esculls d'ostres que es troben menys del 50% del temps fora de l'aigua acostumen a afavorir la supervivència d'aquestes. Qüestió que és donarà en el cas que és decidís fer una LCR emergida.

7. CONCLUSIONS

La protecció de la costa plantejada amb NbS és sense dubte una opció factible per encarar la protecció de les costes en un futur proper i incert, el qual hem d'encarar amb l'ajuda de la natura. Com hem vist, aquestes actuen de manera eficaç davant dels reptes socials, que s'adapten a la dimensió que sigui necessària en cada cas, que donen lloc a la millora de la biodiversitat i els ecosistemes, alhora que són econòmicament viables si comparem els costos en danys que ens evitaríem de reparar, al cost de la NbS i davant de tot són sostenibles i respectuoses amb el medi ambient.

Així doncs, veient els resultats i el que hem discutit, sembla, que una de les opcions per poder conservar i protegir el Delta de l'Ebre, alhora que beneficiar l'ecosistema, el benestar de la població i l'economia de la mateixa. És la creació d'una LCR de tipus escull de cultiu plantat en alt relleu, a partir de *Crassostrea Gigas*, amb un Rc de 0,01 m i un ample de 3 m. Dipositada a la distància de la costa de 420 m, a una profunditat de 4 m i amb una orientació de 123,75° entre ESE i SE.

Es considera que aquesta, tot i que es emergida, no afectaria de manera negativa a la visual del paisatge, ni de manera negativa a l'economia del turisme, donat que es troba a molta distància de la costa i el que pretén es també donar una estabilitat a les zones de platja de la zona. Per tant en qualsevol cas afavoriria l'economia del turisme, així com aportaria una economia pesquera produïda de l'aprofitament de les ostres per la venda de les mateixes, sempre amb responsabilitat sense produir una sobrepesca que podria degenerar la LCR.

Finalment, podem dir que existeixen moltes NbS amb les capacitats suficients per poder solucionar algunes de les problemàtiques a les que el Delta de l'Ebre s'enfronta avui en dia i ho haurà de seguir fent en el futur. Però gràcies a l'aplicació de diverses NbS, que per una banda retornin els sediments al Delta i per un altre donin protecció costanera com la LCR. Tant la societat, com l'economia i l'ecosistema podrien fer front a totes les conseqüències que comportarà el canvi climàtic d'una manera més amable i menys agressiva.

7.1. Treball futur

Realitzant l'estudi, han sorgit tant dubtes com idees per possibles ampliacions de l'estudi, que en aquest cas quedarien fora d'aquest treball, però que són considerables i importants per complementar i millorar l'estudi ja fet.

- Modelatge numèric per poder visualitzar les prediccions obtingudes.
- Estudi de la reflexió que provocaria la LCR i veure els efectes que aquesta causaria.
- Proves a laboratori a un petit canal d'onatge per veure els resultats de K_t obtinguts per cadascuna de les LCR proposades
- Aplicació real de la LCR proposada com a prova pilot per veure si compleix les funcions que s'esperen.
- Estudi de les altres dues zones proposades com a zones més vulnerables del Delta de l'Ebre
- Aplicació de la LCR per les altres zones.

8. BIBLIOGRAFÍA

Airy, G.B., (1845). "Tides and Waves," Encyclopaedia Metropolitana, London, J.J. Griffin.

Angremond, K., Van der Meer, J.W., and de Jong, R.J., 1996, Wave transmission at low-crested structures, 25th Int. Conf. on Coastal Eng., Orlando, Florida.

Balestri, E., Piazzzi, L., & Cinelli, F. (1998). Survival and growth of transplanted and natural seedlings of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in a damaged coastal area. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 228, 209–225. [http://doi.org/10.1016/S0022-0981\(98\)00027-6](http://doi.org/10.1016/S0022-0981(98)00027-6)

Balestri, E., Vallerini, F., & Lardicci, C. (2011). Storm-generated fragments of the seagrass *Posidonia oceanica* from beach wrack - A potential source of transplants for restoration. *Biological Conservation*, 144(5), 1644–1654. <http://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.02.020>

Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C.J., Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R., (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol. Monogr.* 81 (2), 169–193

Bayraktarov, E., Saunders, M. I., Abdullah, S., Mills, M., Beher, J., Possingham, H. P. Lovelock, C. E. (2015). The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications*, 26 (January 2016), 1055–1074. <http://doi.org/10.1890/15-1077.1>

Beck, Michael W., Robert D. Brumbaugh, Laura Airoidi, Alvar Carranza, Loren D. Coen, Christine Crawford, Omar Defeo, Graham J. Edgar, Boze Hancock, Matthew C. Kay, Hunter S. Lenihan, Mark W. Luckenbach, Caitlyn L. Toropova, Guofan Zhang, and Ximing Guo. (2011). "Oyster Reefs at Risk and Recommendations

Belzunce, M., Navarro, R. M., & Rapoport, H. F. (2008). *Posidonia oceanica* seeds from drift origin: Viability, germination and early plantlet development. *Botanica Marina*, 51(1), 1–9. <http://doi.org/10.1515/BOT.2008.005>

Berkes, F. Folke, C Linking Social and Ecological systems: Management Practices and Social Mechanisms For Building Resilience, Cambridge University Press, 1998.

Binder, C.R. Hinkel, J. Bots, P.W.G. Pahl-Wostl, C. (2013). Frameworks for analyzing social-ecological systems, *Ecol. Soc.* 18 26, doi:10.5751/ES-05551-180426.

Birch, Ann. (2011). Coastal Restoration Director, TNC Florida. Personal communication to Shawn Stokes with CGGC Research Staff. December 15, 2011.

Borsje, B.W., van Wesenbeeck, B.K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T.J., van Katwijk, M.M., de Vries, M.B., (2011). How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecol. Eng.* 37, 113–122.

Bouma, T.J., De Vries, M.B., Low, E., Peralta, G., Tanczos, I.C., van de Koppel, J., Herman, P.M.J., (2005). Trade-offs Related to ecosystem engineering: a case study on stiffness of emerging macrophytes. *Ecology* 86 (8), 2187–2199.

Brumbaugh, Robert D., Michael W. Beck, Loren D. Coen, Leslie Craig, and Polly Hicks. (2006). *A Practitioners' Guide to the Design and Monitoring of Shellfish Restoration Projects: An Ecosystems Services Approach*. Arlington, VA: The Nature Conservancy. http://www.habitat.noaa.gov/pdf/tncnoaa_shellfish_hotlinks_final.pdf.

Caiola, N. (2021). Personal communication in tutorial class for Climate Change class for the degree of Sciences and Technologies of the Sea. April of 2020

Christianen, M.J.A., van Belzen, J., Herman, P.M.J., van Katwijk, M.M., Lamers, L.P.M., van Leent, P.J.M., Bouma, T.J., (2013). Low-canopy seagrass beds still provide important coastal protection services. *PLoS ONE* 8 (5).

Coen, Loren D., Robert D. Brumbaugh, David Bushek, Ray Grizzle, Mark w. Luckenbach, Martin H. Posey, Sean P. Powers, and S. Gregory Tolley. (2007). "Ecosystem services related to oyster restoration." *Marine Ecology Progress Series*, 341: 303-307.

Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B., Shutes, R.B.E., (1996). *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. WRc, Swindon, UK

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260.

Courchamp, F., Hoffmann, B. D., Russell, J. C., Leclerc, C., and Bellard, C. (2014). Climate change, sea-level rise, and conservation: keeping island biodiversity afloat. *Trends in Ecology & Evolution* 29(3), 127–130. doi:10.1016/J.TREE.2014.01.001

Dean, Robert G & Dalrymple, Robert A (2001). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press.

DeQuattro, Jeff. (2011). *Coastal Projects Manager*, The Nature Conservancy. Personal communication to Shawn Stokes with CGGC Research Staff. December 5, 2011.

Doing, H. 1985. Coastal fore-dunes zonation and succession in various parts of the world. *Vegetatio*, 61:65-75.

Domínguez, M., Celdrán, D., Muñoz-Vera, A., Infantes, E., Martínez-Baños, P., Marín, A., & Terrados, J. (2012). Experimental Evaluation of the Restoration Capacity of a Fish-Farm Impacted Area with *Posidonia oceanica* (L.) Delile

Seedlings. *Restoration Ecology*, 20 (2), 180–187. <http://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00762.x>

Duarte, C. M., Sand-Jensen, K. (1990). Seagrass colonization: patch formation and patch growth In *Cymodocea nodosa*. *Mar. Ecol. Prog. Ser* 65. 193-200

Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C., Airoidi, L., (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Comm.* 5, 1–9.

Gazo, M (2020). Professor of Marine Ecology, Universitat Politècnica de Catalunya. Personal communication. April of 2020.

Genot, I., Caye, G., Meinesz, A., & Orlandini, M. (1994). Role of chlorophyll and carbohydrate contents in survival of *Posidonia oceanica* cuttings transplanted to different depths. *Marine Biology*, 119, 23–29. <http://doi.org/10.1007/BF00350102>

Gervin, L., Brix, H., (2001). Reduction of nutrients from combined sewer overflows and lake water in a vertical-flow constructed wetland system. *Water Sci. Technol.* 44 (11e12), 171e176

Gordon, Kate, Jeffry Buchanan and Phillip Singerman. (2011). *Beyond Recovery: Moving the Gulf Coast Toward a Sustainable Future*. Washington, DC: Center for American Progress and Oxfam America. February 2011. http://www.americanprogress.org/issues/2011/02/pdf/beyond_recovery.pdf

Green, M., Friedler, E., Safrai, I., (1998). Enhancing nitrification in vertical-flow constructed wetlands utilizing a passive air pump. *Water Res.* 32 (12), 3513e3520.

Greiner, J. T., McGlathery, K. J., Gunnell, J., & McKee, B. A. (2013). Seagrass Restoration Enhances ‘Blue Carbon’ Sequestration in Coastal Waters. *PLoS ONE*, 8(8), 1–8. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0072469>

Haynes, K. M. (2018). Field measurements of boat wake attenuation in coastal salt marshes. University of South Alabama. MSc thesis.

Hemminga, M., Duarte, C.M., (2000). Seagrass ecology. Cambridge University Press, Cambridge (United Kingdom).

Horstman, M. Dohmen-Janssen, C. M. Narra, P. M. F. van den Berg, N. J. F. Siemerink, M., and Hulscher, S. J. M. H. (2014). "Wave attenuation in mangroves: A quantitative approach to field observations," *Coast. Eng.*, vol. 94, pp. 47–62, 2014.

Ibañez, C., Prat, N., and Canicio, A. (1996). Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary. *Regulated Rivers* 12(1), 51–62. doi:10.1002/(SICI)1099-1646(199601)12:1,51::AID-RRR376.3.0.CO;2-I

Ibañez, C., Canicio, A., Day, J. W., and Curcó, A. (1997). Morphologic development, relative sea level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebro Delta, Spain. *Journal of Coastal Conservation* 3(1), 191. doi:10.1007/BF02905244

Ibañez, C., Curcó, A., Day, J. W., and Prat, N. (2002). Structure and productivity of microtidal Mediterranean coastal marshes. In 'Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology'. (Eds M. P. Weinstein and D. A. Kreeger.) pp. 107–136. (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, Netherlands.)

Ibañez, C., Caiola, N., and Belmar, O. (2020). Environmental flows in the lower Ebro River and Delta: current status and guidelines for a holistic approach. *Water* 12(10), 2670. doi:10.3390/W12102670

Ibañez, C. & Caiola, N. (2021). Sea-level rise, marine storms and the resilience of Mediterranean coastal wetlands: lessons learned from the Ebro Delta. *Marine and Freshwater Research*. <https://doi.org/10.1071/MF21140>

Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2010). Llibre Verd de l'Estat de la zona costanera de Catalunya.

Kadlec, R.H., Knight, R.L., (1996). Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Kadlec, R., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Haberl, R., (2000). Constructed Wetlands for Pollution Control, International Water Association (IWA) Specialist Group 'Use of Macrophytes for Water Pollution Control,' Scientific and Technical Report Number 8. IWA Publishing, London, UK

Kramer, P.A., (2016). Coastal Defense Services Provided by Coral Reefs.

Krystian W. Pilarczyk, Rijkswaterstaat (2003) Design of low-crested (submerged) structures.. 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo, Sri Lanka.

Kuhlman, H. (1960). The terminology of the geo-aeolian environment especially in relation to Danish landscapes. *Geografisk Tidsskrift*, 59, 70-88.

Lenihan HS, Peterson CH. (1998). How habitat degradation through fishery disturbance enhances impacts of hypoxia on oyster reefs. *Ecological Applications* 8: 128–140.

Lipcius, Romuald. (2011). Professor of Marine Sciences, Virginia Institute of Marine Science. Personal communication to Shawn Stokes with CGGC Research Staff. November 28, 2011.

López-Dóriga, U., and Jiménez, J. A. (2020). Impact of relative sea-level rise on low-lying coastal areas of Catalonia, NW Mediterranean, Spain. *Water* 12(11), 3252. doi:10.3390/W12113252

Luederits, V., Eckert, E., Lange-Weber, M., Lange, A., (2001). Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical-flow and horizontal-flow constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 18 (2), 157e171

Madsen, J.D., Chambers, P.A., James, W.F., Koch, E.W., Westlake, D.F., (2001). The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia* 444, 71–84.

Marín-Guirao, L., Sandoval-Gil, J. M., Ruíz, J. M., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2011). Photosynthesis, growth and survival of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* in response to simulated salinity increases in a laboratory mesocosm system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(2), 286–296. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.01.003>

Martin J. Baptist, P. Dankers, J. Cleveringa, L. Sittoni, P.W.J.M. Willemsen, M.E.B. van Puijenbroek, B.M.L. de Vries, J.R.F.W. Leuven, L. Coumou, H. Kramer, K. Elschot, Salt marsh construction as a nature-based solution in an estuarine social-ecological system, *Nature-Based Solutions*, Volume 1, 2021, 100005, ISSN 2772-4115, <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100005>.

Mays, P.A., Edwards, G.S., (2001). Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage. *Ecol. Eng.* 16 (4), 487e500

Meinesz, A., Caye, G., Loquès, F., & Molenaar, H. (1991). Growth and development in culture of orthotropic rhizomes of *Posidonia oceanica*. *Aquatic Botany*, 39, 367–377. [http://doi.org/10.1016/0304-3770\(91\)90010-3](http://doi.org/10.1016/0304-3770(91)90010-3)

Meinesz, A., Molenaar, H., Bellone, E., & Loques, F. (1992). Vegetative reproduction in *Posidonia oceanica*: I Effects of rhizome length and transplantation season in orthotropic shoots. *Marine Ecology*, 13 (2), 163– 174. <http://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1992.tb00348.x>

Meinesz, A., Molenaar, H., & Caye, G. (1993). Transplantations de phanerogames marines en Mediterranee. *Bolletino di oceanologia teorica ed applicata*, 11(3–4), 183–190.

Molenaar, H., & Meinesz, A. (1992). Vegetative reproduction in *Posidonia oceanica*. II Effects of depth changes on trasplanted orthotropic shoots. *Marine Ecology*, 13 (2), 175–185. <http://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1992.tb00348.x>

Morris, R. L., M. K. La Peyre, B. M. Webb, D. A. Marshall, D. M. Bilkovic, J. Cebrian, G. McClenachan, K. M. Kibler, L. J. Walters, D. Bushek, E. L. Sparks, N. A. Temple, J. Moody, K. Angstadt, J. Goff, M. Boswell, P. Sacks, and S. E. Swearer. (2021). Large-scale variation in wave attenuation of oyster reef living shorelines and the influence of inundation duration. *Ecological Applications* 31(6):e02382. [10. 1002/eap.2382](https://doi.org/10.1002/eap.2382)

Mungur, A.S., Shutes, R.B.E., Revitt, D.M., House, M.A., (1997). An assessment of metal reduction by laboratory-scale wetlands. *Water Sci. Technol.* 35 (5), 125e133

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), (2022) <https://www.noaa.gov>

Newell, RIE, TR Fisher, RR Holyoke, and JC Cornwell. (2005). Influence of Eastern Oysters on Nitrogen and Phosphorus Regeneration in Chesapeake Bay, USA. In *The Comparative Roles of Suspension Feeders in Ecosystems* (Vol. 47 NATO Science Series IV - Earth and Environmental Sciences, pp. 93-120). Netherlands: Springer.

Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V. R., Codignotto, J. O., Hay, J. E., McLean, R. F., Ragoonaden, S., and Woodroffe, C. D. (2007). Coastal systems and low-lying areas. In 'Climatic Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change'. Cambridge University Press.

Ondiviela, B et al., (2014). "The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate," *Coast. Eng.*, vol. 87, pp. 158–168.

Orth, R. J., Harwell, M. C., Bailey, E. M., Bartholomew, A., Jawad, J. T., Lombana, A. V, ... Woods, H. E. (2000). A review of issues in seagrass seed dormancy and germination: implications for conservation and restoration. *Marine Ecology Progress Series*, 200, 277–288. <http://doi.org/10.3354/meps200277>

Ostrom, E (2007). A diagnostic approach for going beyond panacees, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104 15181–15187, doi:10.1073/pnas.0702288104.

Piehl, M.F and A.R. Smyth. (2011). "Habitat-specific distinctions in estuarine denitrification affect both ecosystem function and services." *Ecosphere*, 2(1): 1-16.

Puertos del Estado. (2022) Clima medio de oleaje. Nodo SIMAR 2094128. https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/medios/MED_1_8_2094128.pdf

Rovira, A., Ibáñez, C., and Martín-Vide, J. P. (2015). Suspended sediment load at the lowermost Ebro River (Catalonia, Spain). *Quaternary International* 388, 188–198. doi:10.1016/J.QUAINT.2015.05.035

Sanjaume, E. & Tolgensbakk, J. (2009). Beach ridges from the Varanger Peninsula (Arctic Norwegian coast): Characteristics and significance, *Geomorphology*, 104, 82 –92.

Sayol, J. M., and Marcos, M. (2018). Assessing flood risk under sea level rise and extreme sea levels scenarios: application to the Ebro Delta (Spain). *Journal of Geophysical Research – D. Oceans* 123(2), 794–811. doi:10.1002/2017JC013355

Scholz, M., (2003). Performance predictions of mature experimental constructed wetlands, which treat urban water receiving high loads of lead and copper. *Wat. Res.* 37 (6), 1270e1277

Scholz, M., Trepel, M., (2004). Water quality characteristics of vegetated groundwater-fed ditches in a riparian peatland. *Sci. Total Environ.* 332 (1e3), 109e122

Scholz, M., Morgan, R., Picher, A., (2005). Stormwater resources development and management in Glasgow: two case studies. *Int. J. Environ. Stud.* 62 (3), 263e282.

Schulte, David M., Russell P. Burke and Romuald N. Lipcius. (2009). "Unprecedented Restoration of a Native Oyster Metapopulation." *Science*, 325: 1124-1128.

Scyphers, Steven B., Sean P. Powers, Kenneth L. Heck Jr., and Dorothy Byron. (2011). "Oyster Reefs as Natural Breakwaters Mitigate Shoreline Loss and Facilitate Fisheries." *Plos One*, 6(8): 1-12.

Seabrook, S.R. and Hall, K.R., 1998, Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters, 26th Int. Conf. On Coastal Eng., Copenhagen.

Short, F. Carruthers, T. Dennison, W. Waycott, M Global seagrass Distribution and diversity: A bioregional model, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Volume 350, Issues 1–2, 2007, Pages 3-20, ISSN 0022-0981, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.012>.

Stokes S., Wunderink S., Lowe M., Gereffi G (2012) Restoring Gulf Oyster Reefs. Opportunities for Innovation. Duke. Center of globalization, governance & competitiveness.

Terrados, J., Marín, A., & Celdrán, D. (2013). Use of *Posidonia oceanica* seedlings from beach-cast fruits for seagrass planting. *Botanica Marina*, 56(2), 185–195. <http://doi.org/10.1515/bot-2012-0200>

Tom Wild, Tiago Freitas & Sofie Vandewoestijne (2020). Nature-Based Solutions: State of the Art in EU-funded Projects European Commission

Turley, Michael. (2011). C.E.O., Wafarer Technologies. Personal communication to Shawn Stokes with CGGC Research Staff. November 30, 2011.

Zivkovik, Bora. (2010). Ecology, Conservation, and Restoration of Oyster Reefs in North Carolina. Science in the Triangle Retrieved December 7, 2011, from <http://scienceinthetriangle.org/2010/01/ecology-conservation-and-restoration-of-oyster-reefs-in-north-carolina/>.