



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio del efecto del clima marítimo sobre la extensión de las praderas de posidonia oceánica usando técnicas de IA en la costa de Denia. Aplicación a la regeneración de un tramo de la playa de Les Marines (Alicante)

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Asparuhova Danova, Mishel

Tutor/a: Medina Folgado, Josep Ramon

Cotutor/a: Escudero Castillo, Mireille del Carmen

Cotutor/a externo: Monserrat Aranda, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Estudio del efecto del clima marítimo sobre la extensión de las praderas de posidonia oceánica usando técnicas de IA en la costa de Denia. Aplicación a la regeneración de un tramo de la playa de Les Marines (Alicante)

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Autora:

Mishel Asparuhova Danova

Para la obtención del:

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Tutores:

Josep Ramon Medina Folgado

Mireille del Carmen Escudero Castillo

Carlos Monserrat Aranda

Curso 2024-2025





ÍNDICE GENERAL

MEMORIA.....	4
RESUMEN	14
1 INTRODUCCIÓN.....	15
2 CASO DE ESTUDIO	25
3 CLIMA MARÍTIMO	61
4 METODOLOGÍA: MODELOS NUMÉRICOS Y TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	78
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
6 PROPUESTA DE SOLUCIONES.....	105
7 VALORACIÓN ECONÓMICA.....	141
8 CONCLUSIONES	144
9 REFERENCIAS.....	146
ANEJOS	154



MEMORIA



ÍNDICE DE LA MEMORIA

MEMORIA.....	4
RESUMEN	14
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Introducción	15
1.2 Contexto y antecedentes	16
1.3 Distribución de praderas de fanerógamas marinas	18
1.3.1 <i>Posidonia oceanica</i>	18
1.3.2 <i>Cymodocea nodosa</i>	20
1.4 Estructura del documento	25
2 CASO DE ESTUDIO	25
2.1 Zona de estudio	25
2.2 Evolución línea de costa.....	30
2.3 Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT)	35
2.4 Intervenciones antrópicas.....	40
2.5 Dinámica litoral	41
2.6 Batimetría.....	43
2.7 Topografía	45
2.8 Geología y Geotecnia.....	46
2.8.1 Geología del área de estudio.....	46
2.8.2 Geotecnia y propiedades del subsuelo.....	48
2.8.3 Morfología litoral	49
2.9 Climatología	50
2.9.1 Temperaturas medias y variaciones estacionales	50
2.9.2 Precipitaciones	52
2.9.3 Viento	53
2.10 Cambio climático.....	53
2.10.1 El paso del temporal Gloria por las playas de Denia	54
2.10.2 Escenarios de retroceso costero en ausencia de medidas de adaptación.....	57
2.11 Legislación vigente.....	60
3 CLIMA MARÍTIMO	61
3.1 Nivel del mar.....	61
3.2 Niveles de referencia.....	63
3.3 Base de datos de oleaje	64



3.3.1	Régimen de vientos	65
3.4	Caracterización del oleaje	67
3.4.1	Estadísticos básicos del oleaje	67
3.4.2	Régimen medio de oleaje.....	72
3.4.3	Régimen extremal del oleaje	76
4	METODOLOGÍA: MODELOS NUMÉRICOS Y TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	78
4.1	Modelo de propagación del oleaje WAPO	78
4.1.1	Estructura del modelo de propagación.....	78
4.1.2	Ficheros y parámetros de entrada	80
4.1.3	Ficheros de salida	82
4.1.4	Condiciones de oleaje simuladas y estructura del mallado	82
4.2	Red Neuronal Artificial (“Artificial Neural Network” ANN)	84
4.2.1	Tratamiento de los datos	86
4.2.2	Capa entrada (Ni)	89
4.2.3	Número de neuronas ocultas (Nh).....	89
4.2.4	Función de pérdida.....	90
4.2.5	Algoritmo de entrenamiento	90
4.2.6	Función de activación.....	91
4.2.7	Evaluación del rendimiento.....	92
4.2.8	Arquitectura final de la red.....	93
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
5.1	Resultados obtenidos de la propagación del oleaje.....	95
5.1.1	Régimen medio de oleaje: condiciones normales	96
5.1.2	Régimen extremal de oleaje: condiciones de temporal	98
5.1.3	Conclusiones parciales	102
5.2	Resultados de la Red Neuronal Artificial (ANN)	103
6	PROPUESTA DE SOLUCIONES.....	105
6.1	Diseño de estructura homogénea de baja cota (HLCS).....	105
6.1.1	El Cubípedo como elemento de protección costera.....	105
6.1.2	Criterios de diseño y emplazamiento.....	107
6.1.3	Vida útil y altura de ola de cálculo	107
6.1.4	Dimensiones de los Cubípedos y sección tipo	113
6.1.5	Malla de colocación	119
6.1.6	Ubicación del dique.....	121



6.1.7	Evaluación comparativa de alternativas de actuación.....	122
6.1.8	Señalización y balizamiento.....	132
6.2	Regeneración del sistema dunar y alimentación artificial	134
6.2.1	Extracción, transporte y acopio del material de alimentación superficial..	135
6.2.2	Estimación del volumen de arena necesario para la alimentación artificial	138
7	VALORACIÓN ECONÓMICA.....	141
7.1	Descripción de los capítulos.....	141
7.2	Valoración económica final	143
7.3	Presupuesto base de licitación.....	144
8	CONCLUSIONES	144
9	REFERENCIAS.....	146
	ANEJOS	154
	ANEJO I: DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA	156
	ANEJO 2: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	166
	ANEJO 3: PLANOS.....	169

Índice de figuras

<i>Figura 1: Cymodocea nodosa y Posidonia oceanica.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2: El impacto de diques superficiales sobre las praderas marinas. Puerto de Mazarrón (Murcia) en la década de 1950 (izda.) y en la actualidad (dcha.; ortofoto de 2009).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3: Área de distribución de Posidonia oceanica (en verde) en España.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4: Morfología general de la Posidonia oceanica.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5: Arribazones de Posidonia en la orilla del mar en la playa de Les Marines.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6: Área de distribución de Cymodocea nodosa (en naranja) en España.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7: Morfología general de la Posidonia oceanica.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8: Cymodocea nodosa.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9: Distribución de Posidonia oceanica (en rojo) y Cymodocea nodosa (en amarillo) a lo largo de la Costa Valenciana.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10: Distribución de praderas de fanerógamas marinas en el litoral del municipio de Denia, C.V., según la cartografía oficial aprobada en el Decreto 64/2022, de 20 de mayo, del Consell.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 11: Localización zona de estudio.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12: Municipio de Denia y su franja litoral norte.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13: Playas en el tramo estudiado entre la Punta dels Molins y la Punta del Raset.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14: Distribución de praderas en el tramo estudiado.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 15: Densidad de haces de praderas de Posidonia oceanica en el periodo 2002-2013 (S = estación somera, P = estación profunda).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 16: Ortofoto de 1957, Playa de Les Marines – Blay Beach.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 17: Ortofoto de 2021, Playa de Les Marines – Blay Beach.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18: Línea de costa, 2025, Playa de Les Marines – Blay Beach.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 19: Evolución línea de costa 2009- 2024 entre la Punta dels Molins y Playa de Les Bovetes. Fuente: Elaboración propia en Google Earth.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 20: Evolución línea de costa 2009 -2024 entre la playa de Les Bovetes y el Barranco del Alter. Fuente: Elaboración propia en Google Earth.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 21: Evolución línea de costa 2009 -2024 - Playa de Les Marines.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 22: Evolución línea de costa 2009 -2024 Playa de Les Marines – Blay Beach.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 23: Evolución línea de costa 2009 -2024 - Playa de Les Marines – Playa de Les Albaranes. Fuente: Elaboración propia en Google Earth.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 24: Evolución línea de costa 2009 -2024 - Playa de la Punta del Raset.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 25: Esquema de limitaciones y servidumbres sobre los terrenos colindantes.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 26: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Bovetes.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 27: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Marines (1).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 28: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Marines (2).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 29: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Marines (3).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 30: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Marines (4).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 31: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Albaranes.</i>	<i>39</i>

Figura 32: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de La Punta del Raset.....	39
Figura 33: Transporte longitudinal de sedimentos en la costa de Denia.	42
Figura 34: Tasas medias de cambio de anchura de las playas (1984-2024).	43
Figura 35: Batimetría de la zona de estudio.....	44
Figura 36: Batimetría de la zona de estudio. Detalle.	44
Figura 37: Batimetría de la zona de estudio.....	45
Figura 38: Mapa topográfico en la zona de estudio.	46
Figura 39: Mapa topográfico en la zona de estudio. Detalle.....	46
Figura 40: Mapa geológico de la Hoja 796 (Gandía), a escala 1:50.000.....	47
Figura 41: Leyenda del mapa geológico.	47
Figura 42: Mapa Geotécnico general.....	48
Figura 43: Criterios de clasificación.	49
Figura 44: Leyenda del mapa geotécnico general.	49
Figura 45: Bloques diagrama con la morfología de la costa de Dénia,	50
Figura 46: Clasificación Climática de Köppen-Geiger en la península Ibérica, Baleares y Canarias (1981 – 2010).....	51
Figura 47: Temperatura máxima y mínima promedio en Denia.....	51
Figura 48: Precipitación media anual en la península Ibérica, Baleares y Canarias (1981 – 2010).....	52
Figura 49: Alturas de ola registradas en el periodo 2019-2021.....	55
Figura 50: Comparativa de líneas de costa sobre ortofoto de 2024.....	55
Figura 51: Comparativa de líneas de costa sobre ortofoto de junio de 2018.....	55
Figura 52: Comparativa de líneas de costa sobre ortofoto de marzo de 2020.....	56
Figura 53: El mar entra en las viviendas de la playa de Les Marines de Denia (Alicante).....	57
Figura 54: Varios vecinos intentan retirar sus vehículos por la subida de la marea en Denia (Alicante). Fuente: País, E. (2020, 23 de enero). La borrasca Gloria, en imágenes. El País.	57
Figura 55: El temporal golpeando los muros en la zona del Blay Beach.	57
Figura 56: Escenarios de retroceso de la línea de costa de la playa de Les Bovetes.	59
Figura 57: Escenarios de retroceso de la línea de costa de la playa de Les Marines.	59
Figura 58: Escenarios de retroceso de la línea de costa de la playa de Les Albaranes y la playa de la Punta del Raset.....	59
Figura 59: Ubicación del mareógrafo de Gandía.....	62
Figura 60: Evolución del nivel del mar registrado por el mareógrafo de Gandía (2007–2025).	62
Figura 61: Relación entre la altura de ola significativa (Hs) y la marea meteorológica (2007-2025).	63
Figura 62: Esquema datum mareógrafo REDMAR Gandía y referencia del nivel del mar.....	63
Figura 63: Ubicación Boya de Valencia y punto SIMAR 2085107.	65
Figura 64: Distribución conjunta de dirección y velocidad media (anual).....	66
Figura 65: Rosa de viento anual.	67
Figura 66: Serie de altura de ola significativa, 1958-2025.....	67

<i>Figura 67: Distribución de alturas de ola.</i>	68
<i>Figura 68: Probabilidad de excedencia.</i>	69
<i>Figura 69: Rosa anual de altura de ola significativa.</i>	69
<i>Figura 70: Rosas de altura de ola significativa para cada estación del año.</i>	70
<i>Figura 71: Probabilidad conjunta Hs/Dirección – anual.</i>	71
<i>Figura 72: Probabilidad conjunta Hs/Tp – anual.</i>	71
<i>Figura 73: Régimen medio anual escalar de oleaje.</i>	72
<i>Figura 74: Altura de ola significativa del régimen medio anual direccional del oleaje.</i>	73
<i>Figura 75: Distribución del periodo pico (1958-2025).</i>	74
<i>Figura 76: Diagrama de dispersión Hs vs. Tp.</i>	75
<i>Figura 77: Mapa de calor 2D.</i>	75
<i>Figura 78: Gráfico 3D de densidad conjunta.</i>	76
<i>Figura 79: Régimen extremal de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia.</i>	77
<i>Figura 80: Rosa de altura de ola significativa de temporales - anual.</i>	77
<i>Figura 81: Batimetría utilizada para la propagación del oleaje. Situación actual – dique exento.</i>	80
<i>Figura 82: Batimetría utilizada para la propagación del oleaje. Situación anterior – dique exento y espigones.</i>	81
<i>Figura 83: Fichero con las condiciones generales de entrada al modelo de propagación.</i>	81
<i>Figura 84: Criterio de signos del ángulo de entrada del oleaje en la malla de propagación del WAPO4.</i>	82
<i>Figura 85: Esquema Red Neuronal Artificial.</i>	85
<i>Figura 86: Influencia de las variables sobre las praderas.</i>	88
<i>Figura 87: Distribución de los datos.</i>	89
<i>Figura 88: Esquema de matriz de confusión.</i>	92
<i>Figura 89: Arquitectura final de la Red Neuronal Artificial.</i>	94
<i>Figura 90: Matrices de confusión del modelo del conjunto de prueba en función</i>	95
<i>Figura 91: Inicio (A) y final (B) del tramo a regenerar.</i>	95
<i>Figura 92: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 1$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s.</i>	96
<i>Figura 93: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 1$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.</i>	96
<i>Figura 94: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 1$ m, dirección ENE y periodo (T).</i>	97
<i>Figura 95: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 1$ m, dirección E y periodo (T) de 7 s.</i>	97
<i>Figura 96: Resultados de situación II con altura de ola con $H = 1$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s.</i>	98
<i>Figura 97: Resultados de situación II con altura de ola con $H = 1$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.</i>	98
<i>Figura 98: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 2$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s.</i>	99

<i>Figura 99: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 2$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.</i>	99
<i>Figura 100: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 2$ m, dirección ENE y periodo (T) de 7 s.</i>	100
<i>Figura 101: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 2$ m, dirección NNE y periodo (T) de 7 s.</i>	100
<i>Figura 102: Resultados de situación I con alturas de ola con $H = 3$ m, dirección NE y periodo (T) de 8 s.</i>	101
<i>Figura 103: Resultados de situación I con alturas de ola con $H = 4$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.</i>	101
<i>Figura 104: Resultados de situación I con alturas de ola con $H = 5$ m, dirección NE y periodo (T) de 10 s.</i>	101
<i>Figura 105: Resultados de situación II con altura de ola con $H = 2$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s.</i>	102
<i>Figura 106: Resultados de situación II con altura de ola con $H = 2$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.</i>	102
<i>Figura 107: Condición límite para la Posidonia oceanica en el plano $\tau - H_{rms}/h$</i>	103
<i>Figura 108: Cubípedo a escala real. Fotos tomadas en el campus de la UPV.</i>	106
<i>Figura 109: Régimen extremal direccional de oleaje. Boya de Valencia.</i>	109
<i>Figura 110: Ábaco para obtención de coeficientes de refracción y asomeramiento.</i>	110
<i>Figura 111: Resultados con altura de ola $H = 2$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s, en comparación con vista aérea de Google Earth con la batimetría (azul claro) y las praderas de Posidonia (rojo) y Cymodocea (amarillo).</i>	111
<i>Figura 112: Detalle de la zona más afectada. Vista aérea de Google Earth con la batimetría (azul claro) y las praderas de Posidonia (rojo) y Cymodocea (amarillo).</i>	111
<i>Figura 113: Canal de oleaje, LPC-UPV.</i>	114
<i>Figura 114: Malla triangular y malla cuadrada utilizadas en los ensayos.</i>	114
<i>Figura 115: Ejemplo de modelos ensayados en el LPC, UPV. Proyectos HOLOBREAK y HOLOBRACE.</i>	115
<i>Figura 116: Resultados de modelos ensayados (LPC, UPV. Proyectos HOLOBREAK y HOLOBRACE).</i>	115
<i>Figura 117: Resultados del ensayo sobre el modelo 14, tronco (izq.), morros (der.).</i>	116
<i>Figura 118: Sección tipo.</i>	117
<i>Figura 119: Relación entre las dimensiones características del Cubípedo en función del parámetro L.</i>	118
<i>Figura 120: Dimensiones del Cubípedo a utilizar para el dique (en metros).</i>	118
<i>Figura 121: Malla cuadrada de colocación.</i>	120
<i>Figura 122: Malla cuadrada a utilizar.</i>	120
<i>Figura 123: Sección transversal final (cotas en metros).</i>	121
<i>Figura 124: Esquema de la respuesta de la costa ante la construcción de dique exento.</i>	121

<i>Figura 125: Esquema de la respuesta de la costa ante la construcción de un grupo de diques.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 126: Energía de oleaje en situación actual, $H = 1\text{ m}$, $T = 7\text{ s}$, NE.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 127: Energía de oleaje en situación actual, $H = 2\text{ m}$, $T = 9\text{ s}$, NE.</i>	<i>124</i>
<i>Figura 128: Energía de oleaje con dique largo continuo, $H = 1\text{ m}$, $T = 7\text{ s}$, NE.</i>	<i>125</i>
<i>Figura 129: Energía de oleaje con dique largo continuo, $H = 2\text{ m}$, $T = 9\text{ s}$, NE.</i>	<i>125</i>
<i>Figura 130: Energía de oleaje con dique corto, $H = 1\text{ m}$, $T = 7\text{ s}$, NE.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 131: Energía de oleaje con dique corto, $H = 1\text{ m}$, $T = 7\text{ s}$, NE.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 132: Energía de oleaje con dos diques cortos, $H = 1\text{ m}$, $T = 7\text{ s}$, NE.</i>	<i>128</i>
<i>Figura 133: Energía de oleaje con dos diques cortos, $H = 2\text{ m}$, $T = 9\text{ s}$, NE.</i>	<i>128</i>
<i>Figura 134: Energía de oleaje con tres diques cortos, $H = 1\text{ m}$, $T = 7\text{ s}$, NE.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 135: Energía de oleaje con tres diques cortos, $H = 2\text{ m}$, $T = 9\text{ s}$, NE.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 136: Baliza fija dique sumergido existente.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 137: Marca especial a instalar.</i>	<i>134</i>
<i>Figura 138: Localización del canal de entrada del buque draga y zona de acopio temporal de arena.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 139: Ficha de Playa Les Marines.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 140: Diseño del perfil de la playa.....</i>	<i>139</i>



Índice de tablas

<i>Tabla 1: Escenarios climáticos sobre el retroceso costero.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 2: Velocidad Media (Ve) - Dirección de Procedencia en %.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 3: Tabla Periodo de Pico (Tp) - Altura Significante (Hs) en %.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 4: Casos simulados para condiciones de oleaje de régimen medio.</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 5: Casos simulados para condiciones de oleaje extremal.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 6: Balanceo de datos.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 7: IRE y vida útil mínima en función del tipo de obra para áreas litorales (izq.) e ISA y probabilidad conjunta de fallo en función del tipo de obra para áreas litorales (der.).</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 8: Condiciones geométricas para la formación de tómbolos en la costa.</i>	<i>122</i>

RESUMEN

El presente estudio con título “Estudio del efecto del clima marítimo sobre la extensión de las praderas de *Posidonia oceanica* usando técnicas de IA en la costa de Denia. Aplicación a la regeneración de un tramo de la playa de Les Marines (Denia, Alicante)” se redacta como Trabajo de Fin de Máster para la obtención del título en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos por la alumna Mishel Asparuhova Danova.

El objetivo principal del trabajo es definir un procedimiento para determinar el límite superior (upper limit) de distribución de las praderas de *Posidonia oceanica* en la costa de Denia que sea aplicable en otros lugares no tan bien estudiados. Para ello se emplean modelos numéricos y técnicas de inteligencia artificial que permiten analizar la influencia del clima marítimo, la hidrodinámica y la presencia de obras costeras. Como aplicación práctica, se propone una solución de regeneración de playa y defensa de un tramo de la playa de Les Marines, el más afectado por procesos de erosión en la zona, integrando criterios ecológicos que garanticen la conservación de los ecosistemas marinos.

El estudio se desarrolla como parte del proyecto postdoctoral 101109919-SEGRALCS con título “Predictive tool of seagrass health to optimize the design of low crested structures in the Mediterranean Sea” (en español, “Herramienta predictiva de la salud de las praderas marinas para optimizar el diseño de estructuras de baja cota de coronación”), financiado por la Unión Europea bajo el programa de becas postdoctorales Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA) y desarrollado en el grupo de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València (Escudero et al., 2024).

El hallazgo principal de este trabajo es una condición límite definida por la altura de ola media y la profundidad local, que determina a partir de qué zona puede desarrollarse la pradera de *Posidonia oceanica*. Este resultado ofrece un criterio práctico, extrapolable y de fácil aplicación en otras zonas del litoral, y, permite prevenir que la construcción de obras costeras comprometa el hábitat de las praderas marinas.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La erosión costera es un problema generalizado que se va agravando día tras día debido a la acumulación de sedimentos en las barreras fluviales (presas) y litorales (diques) más los efectos de la subida del nivel medio del mar debido al cambio climático; hacen falta medidas urgentes y efectivas (Tourlioti et al., 2021) para enfrentarse a la erosión de muchas playas que tienen un gran valor económico, social y ambiental. La erosión de las playas es un problema que afecta a la economía, a la gente y a los ecosistemas, especialmente en zonas como el mar Mediterráneo, donde hay numerosas playas con problemática similar que necesitan atención y actuación. Para mitigar la erosión se suelen implementar soluciones que utilizan la construcción de estructuras convencionales de cota baja como espigones o diques exentos. Los diseños de dichas estructuras se adaptan lo máximo posible al entorno marino intentando crear un espacio acogedor para que las especies marinas puedan vivir y desarrollarse. La respuesta de la morfología costera está condicionada por las dimensiones y la distancia a la costa de los diques exentos cuya función hidrodinámica principal consiste en atenuar la energía de las olas entrantes a través de la interacción ola-estructura, generando un patrón de corrientes resultante que favorece la deposición de sedimentos en su zona de sombra. A lo largo del tiempo, se han ido desarrollando diferentes diseños de estructuras buscando la forma óptima de contener los sedimentos y fomentar el asentamiento y colonización de especies marinas en las estructuras imitando arrecifes naturales.

En Europa existen cuatro principales especies de praderas marinas, dos de las cuales se pueden encontrar en el mar Mediterráneo: la *Posidonia oceanica* y la *Cymodocea nodosa*. Ambas reaccionan de manera distinta a factores como el clima, sedimentos, densidad de brotes, perturbaciones, entre otros.

El cambio climático, el oleaje y las corrientes influyen directamente en su distribución. Algunas especies pueden adaptarse al enterramiento moderado o a la erosión ajustando su crecimiento, mientras que otras son más sensibles.

En la distribución de las praderas marinas se distinguen dos límites fundamentales que definen las profundidades en las que pueden desarrollarse. En la literatura se conoce como límite inferior (lower limit) el correspondiente a las profundidades máximas alcanzadas por las praderas, mientras que el límite superior (upper limit) representa las profundidades más someras a las que se pueden encontrar. Actualmente, se sabe que el límite inferior está sujeto a la transparencia que presenta el agua y la disponibilidad de luz para la fotosíntesis, situándose a profundidades de entre 25 y 40 metros en el Mediterráneo. En cuanto al límite superior, hay diversas investigaciones que demuestran la influencia que tiene la acción de oleaje sobre las plantas. Infantes et al. (2009) demostraron que, cuando las velocidades orbitales en el fondo superan ciertos umbrales, las plantas son arrancadas, lo que impide la expansión de la pradera hacia la costa. A pesar de estos avances, de momento no existe una condición límite bien definida que sirva de referencia. En este contexto, el presente trabajo se centra precisamente a establecer

dicha condición límite, con el fin de delimitar con mayor precisión la zona de presencia de las praderas de *Posidonia oceanica* y contribuir así a su protección.

Con el objetivo de identificar el umbral a partir del cual las raíces de las praderas marinas quedan enterradas o se desprenden del fondo marino, se realiza una evaluación detallada mediante redes neuronales para detectar cuáles son las variables más importantes que pueden causar rotura o arranque de haces, y poder prevenir estos daños ante futuros escenarios de cambio climático, así como considerar dichos factores en el diseño óptimo de estructuras costeras.

Este trabajo tiene como objetivo general implementar soluciones que favorezcan la regeneración de la playa y la conservación de praderas marinas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* en el tramo costero del municipio de Denia. En esta línea, el estudio también persigue los siguientes objetivos específicos:

- Proteger las praderas marinas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*.
- Definir la condición límite que determina el límite superior de distribución de las praderas de *Posidonia oceanica*.
- Proteger y recrecer la playa para favorecer su uso lúdico.
- Diseñar una estructura de rompeolas que minimice el impacto sobre las praderas marinas.
- Regenerar la playa como soporte para el desarrollo de los ecosistemas costeros.
- Reconstruir el sistema dunar para mejorar la protección natural del litoral.

El tramo concreto en el que se centra este estudio forma parte del litoral del municipio de Denia, en la zona meridional de la Comunidad Valenciana, España. Se trata de una franja costera de aproximadamente seis kilómetros de longitud, elegida por la abundancia de praderas marinas. En esta zona predomina la distribución de *Posidonia oceanica*, acompañada en menor proporción por *Cymodocea nodosa*.

El análisis se centra en estudiar cómo las condiciones hidrodinámicas como el oleaje, las corrientes y la dinámica sedimentaria influyen en la distribución y evolución de estas especies. Se busca definir qué condición límite separa la zona de presencia de las praderas de aquella donde debido a distintas variables las plantas resultan arrancadas. Para ello se emplea el modelo numérico WAPO que permite simular la respuesta hidrodinámica del entorno costero. Por otro lado, se usa el modelo numérico XBeach y mediante técnicas de inteligencia artificial (redes neuronales artificiales) se evalúan patrones de comportamiento y adaptación de las fanerógamas marinas.

1.2 Contexto y antecedentes

Las praderas marinas son plantas marinas con flores y raíces que cercen formando densas praderas y tienen una serie de funciones ecológicas clave para los ecosistemas marinos. Se consideran especies ingenieras (Coleman & Williams, 2002) ya que sirven de hábitat a cientos de especies, regulan la calidad del agua, protegen el litoral contra la erosión, retienen los sedimentos y tienen la capacidad de absorber el carbono de forma eficiente.

En Europa se reconocen principalmente cuatro tipos de praderas marinas formadas por las especies *Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa*, *Zostera marina* y *Zostera noltii*, ya que son las más comunes y extensas. Sin embargo, en las costas españolas se identifican cinco especies de angiospermas marinas, añadiendo *Halophila decipiens*, que, aunque no forma grandes praderas, están presente en regiones específicas como Canarias (Ruiz et al., 2015). Estas plantas pueden crecer desde la zona intermareal de la costa hasta profundidades de 50 a 60 metros. En el Mediterráneo se pueden encontrar las primeras dos especies: *Cymodocea nodosa* y *Posidonia oceanica*. La forma en que responden al entorno varía según la especie, ya que cada una reacciona de manera diferente a los cambios ambientales. Estas diferencias se deben a la sensibilidad específica de cada especie frente a estos condicionantes. La *Posidonia oceanica* es una especie longeva de crecimiento muy lento, mientras que la *Cymodocea nodosa* crece a un ritmo mucho más rápido y puede mantenerse incluso bajo perturbaciones considerables (Ivajnsič et al., 2022).

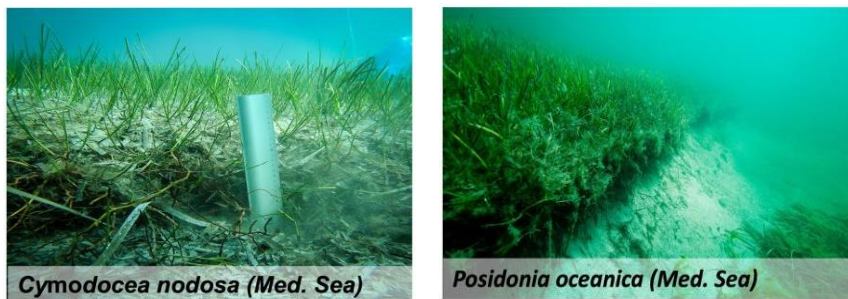


Figura 1: *Cymodocea nodosa* y *Posidonia oceanica*.

Fuente: Infantes, E. (2022)

Condiciones como el aumento de la temperatura del agua, el cambio climático, la hidrodinámica de la zona (olas, mareas y corrientes) tienen gran importancia en la distribución de las praderas marinas (de Boer, 2007; Duarte et al., 2008). Corrientes muy fuertes u olas intensas pueden dañar las plantas marinas o dificultar la aparición de nuevos brotes. Además, la erosión y la dinámica de los sedimentos pueden influir en el crecimiento de las praderas marinas. Algunas especies como *Posidonia oceanica* o *Cymodocea nodosa* tienen cierta capacidad de adaptación, ya que pueden tolerar un enterramiento moderado de arena o procesos erosivos ajustando la longitud de sus brotes verticales (Bonamano et al., 2021)

En la Figura 2, a continuación, se ve claramente la transformación que ha sufrido el litoral en las últimas décadas y el impacto que han tenido las infraestructuras costeras sobre los ecosistemas marinos. Las fotografías corresponden al puerto de Mazarrón (Murcia), en dos momentos distintos: una imagen de la década de 1950 (izquierda) y una ortofoto de 2009 (derecha). En ellas se aprecia la pérdida de una superficie considerable de la pradera de *Posidonia oceanica*, como consecuencia directa de la construcción del puerto y de los diques que conforman la playa artificial.



Figura 2: El impacto de diques superficiales sobre las praderas marinas. Puerto de Mazarrón (Murcia) en la década de 1950 (izda.) y en la actualidad (dcha.; ortofoto de 2009).

Fuente: www.cartomur.com

En este contexto, resaltar la importancia de proteger las praderas marinas es fundamental no solo para conservar el ecosistema marino, sino también para proteger las playas. Es por ello que este estudio se centra en analizar el efecto que tiene la hidrodinámica sobre las especies de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*.

1.3 Distribución de praderas de fanerógamas marinas

1.3.1 *Posidonia oceanica*

La *Posidonia oceanica* es una planta marina que habita exclusivamente las aguas del Mar Mediterráneo y hoy en día se encuentra en peligro de extinción. Su nombre proviene de Poseidón, el dios griego del mar y también se conoce como “hierba de Neptunodit”.

Esta planta forma praderas extensas en los fondos arenosos cerca de la costa, aunque a veces se puede encontrar en fondos rocosos también. Se desarrolla en ambientes costeros de aguas abiertas donde la salinidad se mantiene constante. Se considera, por tanto, una especie estenohalina, con escasa tolerancia a las variaciones de salinidad (MITERD, 2024). Esta sensibilidad limita su presencia en entornos con salinidades fluctuantes, como desembocaduras de ríos o zonas hipersalinas del Mediterráneo. La superficie total ocupada por esta especie asciende a 1 159 km² (Figura 3), lo que supone aproximadamente el 70,9% del total de praderas marinas registradas en el litoral español (Ruiz et al., 2015).



Figura 3: Área de distribución de *Posidonia oceanica* (en verde) en España.

Fuente: Ruiz et al. (2015), Atlas de las praderas marinas de España.

Las condiciones necesarias para el buen desarrollo de la planta son aguas limpias, bien oxigenadas y transparencia que es lo que define hasta qué profundidad se pueden encontrar. Normalmente habita profundidades máximas (o límite inferior) de hasta 35 metros.

La *Posidonia oceanica* se caracteriza con tener hojas, raíces, tallos, flores, frutos y semillas (Figura 4). Se reproduce mediante semillas y rizomas lo que la define como una fanerógama marina. Las hojas de la *Posidonia oceanica* son alargadas y estrechas, crecen en grupos de 4 a 8 en el extremo de los rizomas y forman haces. Los rizomas se extienden horizontalmente sobre el fondo y de ellos crecen rizomas verticales. Este tipo de crecimiento de las raíces en dos direcciones permite la colonización del sustrato y ayuda a evitar al enterramiento de la planta. Horizontalmente, las raíces pueden llegar hasta 15 cm de longitud, y junto con el crecimiento vertical, aumentan la altura compensando la continua sedimentación.

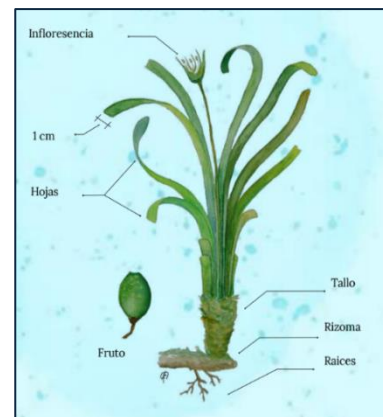


Figura 4: Morfología general de la *Posidonia oceanica*.

Fuente: Medina, Tintoré y Duarte (2001).

El crecimiento de la *Posidonia* es un proceso muy lento, la floración ocurre en otoño, aunque no todos los años, y su reproducción tiene lugar en primavera. Sin embargo, el fruto de la *posidonia* contiene una sola semilla lo que limita su capacidad de regeneración. Por lo tanto, la regresión de estas praderas resulta muy preocupante.

La *Posidonia oceanica* sirve de refugio para una serie de especies de flora y fauna y tiene un papel fundamental en el ecosistema mediterráneo. Entre los peces

que habitan estas praderas, se encuentran el dentón (*Dentex dentex*), la dorada (*Sparus aurata*), la salpa (*Sarpa salpa*), diversas especies de sargos (*Diplodus spp.*) y serranos (*Serranus spp.*), así como la doncella (*Coris julis*), el falso abadejo (*Epinephelus costae*) y los caballitos de mar (*Hippocampus spp.*) (Zubak, Kruschel, & Schultz, 2017). Los crustáceos también están presentes en este hábitat, destacando el camarón (*Hippolyte inermis*) y distintas especies de cangrejos. En cuanto a los equinodermos, se pueden observar varias especies de estrellas de mar, como la estrella de mar roja (*Echinaster sepositus*), así como holoturias o pepinos de mar (*Holothuria tubulosa*) y erizos (*Paracentrotus lividus* y *Sphaerechinus granularis*). Los moluscos forman otra parte importante de la biodiversidad de estas praderas. Se pueden encontrar una gran variedad de gasterópodos y cefalópodos, entre ellos la sepia (*Sepia officinalis*) y el pulpo (*Octopus vulgaris*) (Holzknecht & Albano, 2022). Además, destaca la presencia de la nacra (*Pinna nobilis*), un bivalvo protegido que puede alcanzar un gran tamaño. Dentro del grupo de los anélidos, se encuentra el (*Spirografis spallanzani*). Asimismo, sobre las hojas y rizomas de *Posidonia oceanica* habitan diversas esponjas, briozoos y algas, contribuyendo a la complejidad y riqueza de este ecosistema marino.

La importancia de la *Posidonia oceanica* se debe a que, gracias a sus raíces, permite la retención de la arena y la fijación de los sedimentos. Por otra parte, sus hojas, al ser tan largas, reducen la velocidad de las corrientes y disipan la energía de las olas antes de que lleguen a la costa. Además, los arribazones (Figura 5), que son los restos de la *Posidonia oceanica* que llegan a la orilla, pueden tener usos en ganadería. Sin embargo, su retirada sistemática por motivos estéticos o turísticos conlleva también la eliminación de la arena que queda adherida a los restos vegetales, lo que puede favorecer la regresión de la línea de costa y afectar negativamente a la estabilidad del sistema playa-duna (Medina, Tintoré & Duarte, 2001; ROP, 2001).



Figura 5: Arribazones de *Posidonia* en la orilla del mar en la playa de Les Marines.

Fuente: Elaboración propia.

1.3.2 *Cymodocea nodosa*

La *Cymodocea nodosa* es una planta marina angiosperma (fanerógama marina) de la familia *Cymodoceaceae* también conocida como “seba”. Su nombre

científico proviene de “Cimódoce” que es una de las ninfas del mar en la mitología griega, y nodosa hace referencia a la presencia de nudos en sus rizomas.

En España se distribuye por el litoral mediterráneo peninsular (desde Catalunya hasta Almería) incluyendo Baleares, así como en la costa del Golfo de Cádiz y en las islas Canarias. La superficie total que ocupa en aguas españolas se ha estimado en unos 362 km² (Ruiz et al., 2015), lo que la convierte en la segunda especie en extensión después de la *Posidonia oceanica*. (Figura 6)



Figura 6: Área de distribución de *Cymodocea nodosa* (en naranja) en España.

Fuente: Ruiz et al. (2015), Atlas de las praderas marinas de España.

Es una especie fotófila que requiere aguas relativamente transparentes que permitan una adecuada penetración de luz solar para llevar a cabo la fotosíntesis. En el mar Mediterráneo suele encontrarse en fondos arenosos poco profundos desde 0 metros (límite superior) hasta entre 15 y 36 metros (límite inferior).

Al igual que la *Posidonia oceanica*, presenta raíces, tallos y hojas bien definidas (Figura 7). Los tallos son rizomas delgados que crecen horizontalmente bajo el sustrato arenoso formando largas cintas o estolones subterráneos y suelen estar enterrados, por lo que a veces se confunden con las raíces. A partir de los rizomas se desarrollan numerosas raíces que permiten la fijación de la planta al sustrato y facilitan la absorción de nutrientes del sedimento. Hacia la superficie, desde los rizomas crecen cortos tallos al final de los que salen haces de hojas planas. Su longitud oscila entre los 20 y 45 centímetros y tienen un ancho de 4-5 milímetros. El color es

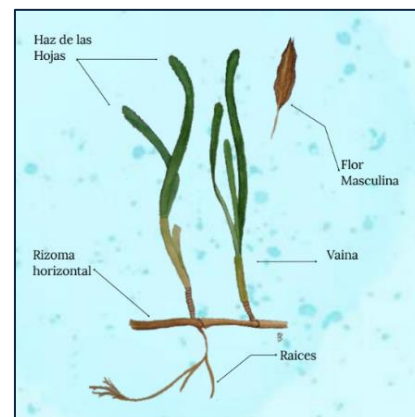


Figura 7: Morfología general de la *Posidonia oceanica*.

Fuente: Ecologistas en Acción (2021).

verde vivo o verde grisáceo según la edad de la planta. La especie produce flores de tamaño pequeño que recuerdan la forma de las espigas. En comparación con la *Posidonia oceanica*, la *Cymodocea nodosa* tiene hojas más estrechas y rizomas más finos.

Por otro lado, a diferencia de la *Posidonia oceanica*, la floración de la *Cymodocea nodosa* se produce en primavera y la maduración de los frutos durante el verano. Tras su caída al fondo marino, las semillas permanecen enterradas en el sedimento, donde posteriormente se inicia el periodo de latencia que puede extenderse durante al menos nueve meses antes de germinar. Además, la reproducción en esta especie es relativamente más frecuente comparada con la de la *Posidonia oceanica*.

La *Cymodocea nodosa* es menos vulnerable y resiste más a cambios de las condiciones circundantes que la *Posidonia oceanica*. Cuando se producen enterramientos parciales de la planta, sus rizomas pueden crecer verticalmente a través de la arena acumulada buscando salir a superficie. Sin embargo, si el enterramiento ocurre muy rápido, las plantas quedan atrapadas y mueren. Por lo contrario, si se produce una fuerte erosión esta puede dejar las raíces expuestas y desestabilizar la pradera. Es por todo ello que la seba tiende a formar manchas aisladas ya que el desplazamiento del sustrato arenoso impide a largo plazo la formación de una cubierta continua. En general, la *Cymodocea nodosa* es una planta resiliente y tras perturbaciones sufridas suele producir más semillas de forma que deja un banco de semillas dormidas en el sedimento que vuelven a germinar y recolonizar más tarde cuando las condiciones vuelven a ser adecuadas. Es precisamente gracias a esta estrategia mixta, basada en una reproducción vegetativa continua junto con eventos reproductivos masivos tras perturbaciones, la que permite que las praderas de *Cymodocea nodosa* persistan en el tiempo, a pesar de la dinámica cambiante del hábitat arenoso en el que se desarrollan (Figura 8).



Figura 8: *Cymodocea nodosa*.

Fuente: Seba (*Cymodocea nodosa*), Canal Mar Menor.

Las praderas de *Cymodocea nodosa* son hábitats de alta biodiversidad debido a su estructura tridimensional - con rizomas entrelazados bajo el sedimento y un denso dosel de hojas sobre el fondo - proporciona refugio, alimento y área de cría para multitud de organismos marinos. Entre los invertebrados, destacan diversas especies de crustáceos que se localizan en el sustrato y entre las hojas. También son

frecuentes los pequeños cangrejos y camarones, y una notable diversidad de moluscos, entre los que se incluyen bivalvos enterrados, gasterópodos, babosas marinas y cefalópodos como la sepia (*Sepia officinalis*) o el pulpo común (*Octopus vulgaris*), que aprovechan la cobertura vegetal para ocultarse (MITECO, 2008).

Las hojas de la *Cymodocea nodosa* sirven de sustrato para las algas, briozoos e invertebrados sésiles, que a su vez constituyen una fuente de alimento para organismos de niveles tróficos superiores. Además, las praderas actúan como zonas de cría, ya que muchas especies de peces utilizan este entorno durante sus fases juveniles. Entre ellos se encuentran los aterínidos (como *Atherina boyeri*), góbidos (por ejemplo, *Pomatoschistus spp.*), mugílidos (como *Liza aurata*), y signátidos, destacando el pez pipa (*Syngnathus abaster*). Asimismo, se ha documentado la presencia del fartet (*Aphanius iberus*), especie endémica y en peligro, que encuentra en estos hábitats condiciones adecuadas para su reproducción (Espino et al., 2015; Espino et al., 2022).

Durante la época reproductiva muchas especies utilizan las praderas como lugar de puesta. Por ejemplo, las sepias y calamares, cuyos huevos se adhieren a las hojas, así como de múltiples peces litorales que depositan allí sus huevas.

Las praderas tienen otra función muy importante, porque al realizar la fotosíntesis, la planta actúa como un pulmón marino, absorbiendo el dióxido de carbono (CO₂) y liberando oxígeno durante las horas de luz. De esta forma favorece la respiración de peces e invertebrados mejorando la calidad de las aguas marinas.

Adicionalmente, la *Cymodocea nodosa* funciona como un sumidero natural de carbono que al capturar el CO₂, lo almacena tanto en su biomasa como en forma de materia orgánica acumulada en el sedimento. Este mecanismo forma parte del llamado carbono azul, un componente esencial en la mitigación del cambio climático. Diversos estudios han demostrado que las praderas de *Cymodocea nodosa*, junto con las de *Posidonia oceanica*, tienen un papel destacado en la fijación de carbono y la atenuación de la acidificación oceánica en regiones como el mar Mediterráneo (Hendriks et al., 2022).

Otra función clave es la capacidad que tiene la especie de actuar como estabilizador de los sedimentos. Los rizomas y las raíces conforman un entramado denso que fija la arena, disminuyendo la erosión provocada por las corrientes y el oleaje. De este modo, estas praderas actúan como rompeolas naturales, contribuyendo a la protección del litoral, a la retención de arena en las playas adyacentes y a la estabilidad del fondo marino. A su vez, las plantas tienen la capacidad de absorber nutrientes disueltos como nitrógeno y fósforo, lo que ayuda a evitar procesos de eutrofización. En ausencia de estas praderas, el ecosistema puede verse alterado por proliferaciones de fitoplancton o algas nocivas, lo que implica un deterioro de la calidad ambiental.

Es por todo ello que, las praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*, desempeñan un papel clave en el equilibrio ecológico de las zonas costeras. Sin embargo, estas praderas se encuentran sometidas a diversas amenazas que comprometen su integridad y el importante papel que desempeñan en los

ecosistemas costeros. Entre las presiones más relevantes destacan los vertidos de aguas residuales no depuradas, que deterioran la calidad del agua y afectan a los procesos de fotosíntesis y crecimiento (Ruiz et al., 2015). La extracción de arenas del lecho marino y la alimentación artificial de playas en las proximidades de las praderas alteran la dinámica sedimentaria, favoreciendo procesos de enterramiento excesivo o erosión que pueden llevar al deterioro de las colonias (Bonamano et al., 2021). Asimismo, la pesca de arrastre en fondos inferiores a 50 metros de profundidad daña directamente el sustrato y los rizomas, mientras que los anclajes de embarcaciones deportivas generan impactos físicos sobre los haces y rizomas. Finalmente, la expansión de especies invasoras como *Caulerpa taxifolia* supone una competencia directa por el espacio y los recursos, incrementando el riesgo de regresión de las praderas (de Boer, 2007).

Además, la erosión de las playas, inducida por barreras fluviales como presas y estructuras litorales como diques, interrumpe el transporte natural de sedimentos hacia la costa, reduciendo el aporte de arena y afectando el límite superior (upper limit) de las praderas marinas, que queda más expuesto a los efectos del oleaje y los procesos erosivos. A su vez, factores como el aumento de la turbidez reducen la transparencia del agua, limitan la penetración de luz y afectan al límite inferior (lower limit) de distribución de las praderas.

La necesidad de conservar estos hábitats cobra especial relevancia ante propuestas recientes actuación en el litoral de Denia. En el marco de los planes del Ministerio para la Transición Ecológica, se propuso el proyecto de “*Recuperación del tramo de costa comprendido entre el Puerto de Denia y el río Girona (T.M. de Denia, Alicante)*”, orientado a la regeneración del litoral mediante aportes de arena y la construcción de espigones. A pesar de la necesidad de actuar contra la erosión de las playas y de haber sido aprobado inicialmente mediante Declaración de Impacto Ambiental favorable (BOE-A-2025-5496), el proyecto fue finalmente rechazado con la Resolución de 7 de marzo de 2025 de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, publicada en el BOE núm. 5496, por no contemplar adecuadamente la significativa presencia de praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* en la zona afectada, ya que las soluciones propuestas invadían áreas protegidas cartografiadas oficialmente. La resolución ambiental negativa, publicada en el BOE núm. 5496 (2025), destacó además que todas las alternativas planteadas incumplían el Decreto 64/2022, al no respetar los hábitats delimitados en la Orden 18/2023. Este caso es un ejemplo claro de la importancia que tiene considerar de forma explícita los ecosistemas marinos en la planificación de intervenciones costeras, especialmente en contextos ecológicamente sensibles como el litoral de Denia.

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster ofrece una aproximación técnica que complementa este tipo de intervenciones. Mediante el uso de modelos numéricos y técnicas IA de redes neuronales artificiales, se analizan los efectos del oleaje y las corrientes, y se delimita el límite superior (upper limit) alcanzado por la pradera de *Posidonia oceanica*, con el objetivo de que este sea respetado en las propuestas de intervención. A partir de estos análisis, se proponen una serie de

medidas y soluciones que permiten compatibilizar la regeneración de la playa con la protección del ecosistema frente a procesos erosivos.

1.4 Estructura del documento

Tras esta introducción, donde se introduce la problemática de la erosión costera, se contextualiza la importancia ecológica de las praderas de fanerógamas marinas y se definen los objetivos del trabajo, el capítulo 2 se centra en la descripción detallada del caso de estudio, correspondiente al tramo litoral comprendido entre la Punta dels Molins y el Puerto de Denia, analizando sus características físicas, ambientales y socioeconómicas, así como su evolución histórica y presión antrópica. El capítulo 3 se dedica al análisis del clima marítimo, con especial atención al régimen de oleaje, el nivel del mar y el viento, elementos fundamentales para comprender la dinámica costera. En el capítulo 4 se presenta la metodología empleada, que combina modelos numéricos como WAPO y XBeach con técnicas de inteligencia artificial, en particular, redes neuronales artificiales, para simular y evaluar el comportamiento del sistema costero. Los resultados obtenidos se recogen en el capítulo 5, donde se analiza la respuesta de la playa ante diferentes condiciones hidrodinámicas, tanto en régimen medio como en episodios extremos. En el capítulo 6 se proponen soluciones técnicas para mitigar los efectos de la erosión, incluyendo el diseño de diques de baja cota con Cubípodos, la regeneración del sistema dunar y la alimentación artificial de la playa, priorizando siempre la compatibilidad ecológica. El capítulo 7 ofrece una valoración económica de las actuaciones propuestas desglosando los diferentes costes. En el capítulo 8 se presentan las conclusiones del estudio, destacando los principales hallazgos y recomendaciones. Finalmente, el capítulo 9 recoge las referencias bibliográficas utilizadas.

El documento se completa con una serie de anejos que incluyen documentación fotográfica, la relación que tiene el trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030, y, planos técnicos que complementan el estudio desarrollado.

2 CASO DE ESTUDIO

2.1 Zona de estudio

La selección del tramo de estudio se ha llevado a cabo a partir de un análisis previo de la distribución de fanerógamas marinas en la costa del mar Mediterráneo, utilizando cartografía actualizada proporcionada por el Instituto Español de Oceanografía (IEO) y herramientas de visualización geoespacial (Figura 9), la cual concuerda en gran medida con la cartografía oficial recogida en la Orden 18/2023, de 30 de junio, por la que se aprueba la cartografía oficial de praderas de fanerógamas marinas en la Comunidad Valenciana (Figura 10).

En la costa española, se encuentran ambas especies de fanerógamas marinas, objeto de este estudio: *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*. En la costa de la Comunidad Valenciana, la distribución de estas praderas es considerablemente densa, tal como se muestra en la Figura 9, siendo especialmente significativa en el litoral de la provincia de Alicante, al sur de la región.

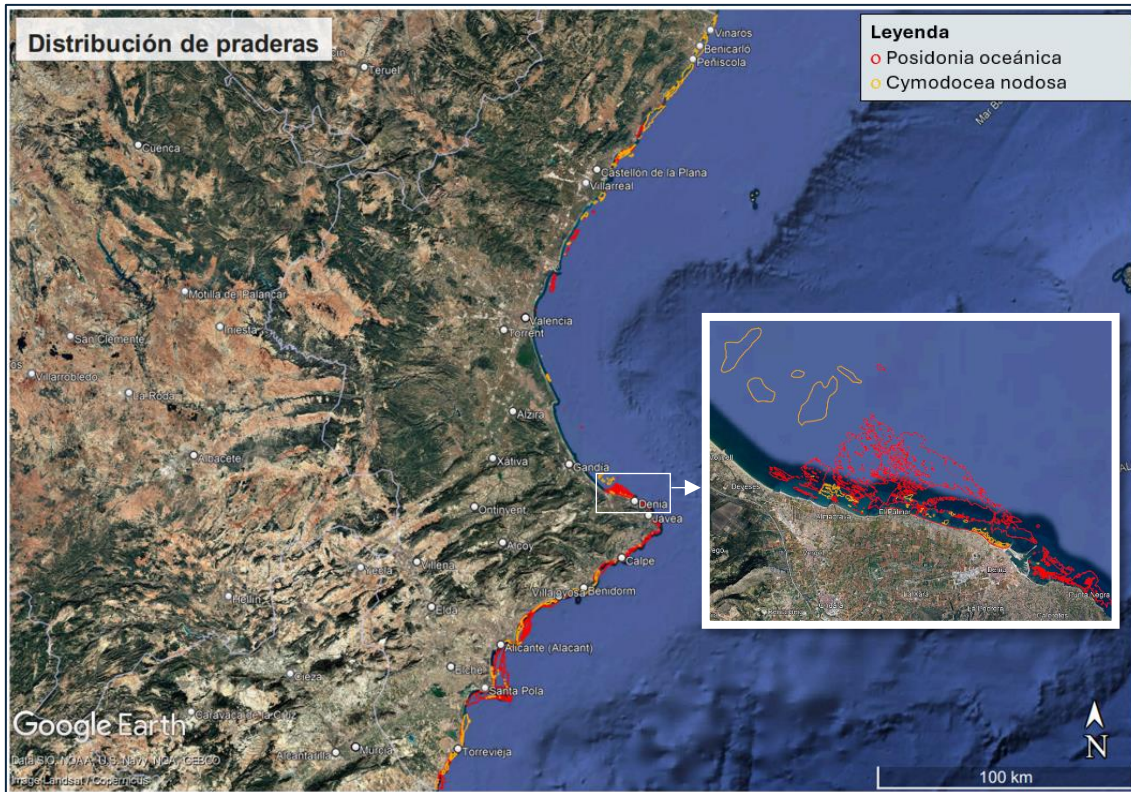


Figura 9: Distribución de Posidonia oceánica (en rojo) y Cymodocea nodosa (en amarillo) a lo largo de la Costa Valenciana.

Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía del IEO.

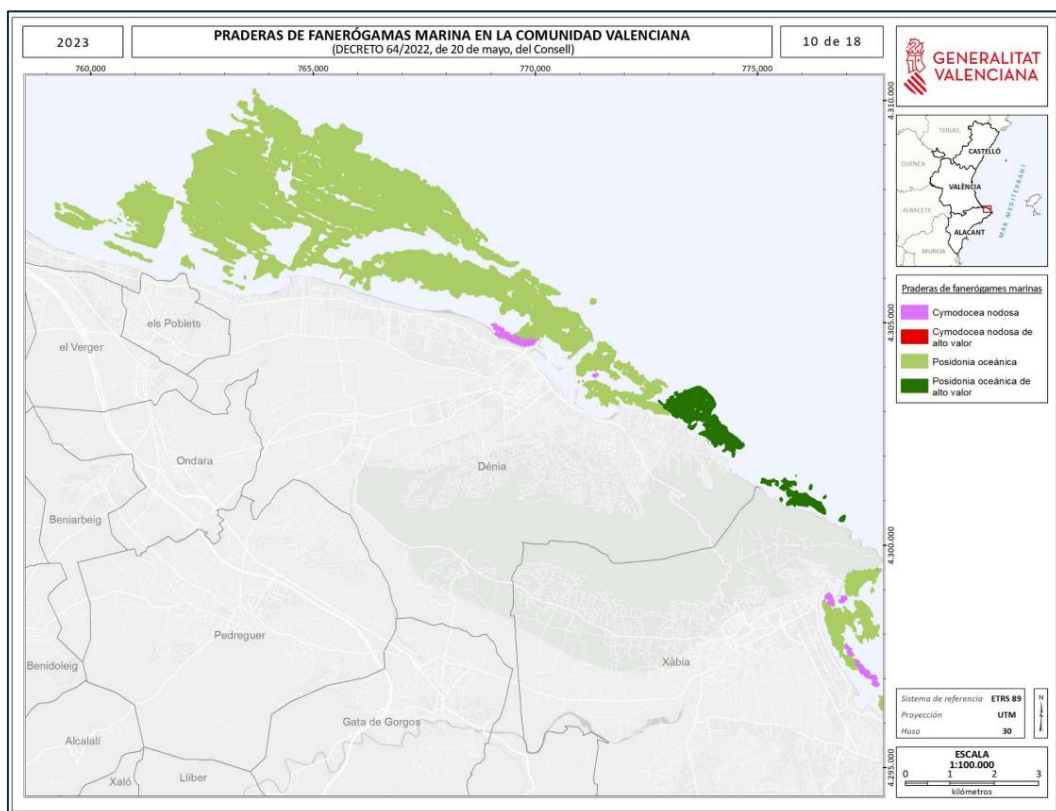


Figura 10: Distribución de praderas de fanerógamas marinas en el litoral del municipio de Denia, C.V., según la cartografía oficial aprobada en el Decreto 64/2022, de 20 de mayo, del Consell.

Fuente: Orden 18/2023, de 30 de junio, Generalitat Valenciana.

Para la selección del tramo de estudio se ha buscado una zona costera que presente diversas problemáticas ambientales y geomorfológicas, como procesos de erosión activa, reducción del ancho de playa, degradación del sistema dunar y presencia de estructuras costeras abandonadas o deterioradas que alteran la dinámica natural del litoral (ver ANEJO I: DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA). El criterio clave en esta elección ha sido la presencia confirmada de praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*, esenciales para el análisis del comportamiento de estas especies frente a las condiciones hidrodinámicas del entorno.

La zona de tramo costero objeto de este estudio se encuentra en el municipio de Denia, perteneciente a la comarca de la Marina Alta, en la provincia de Alicante (Figura 11).

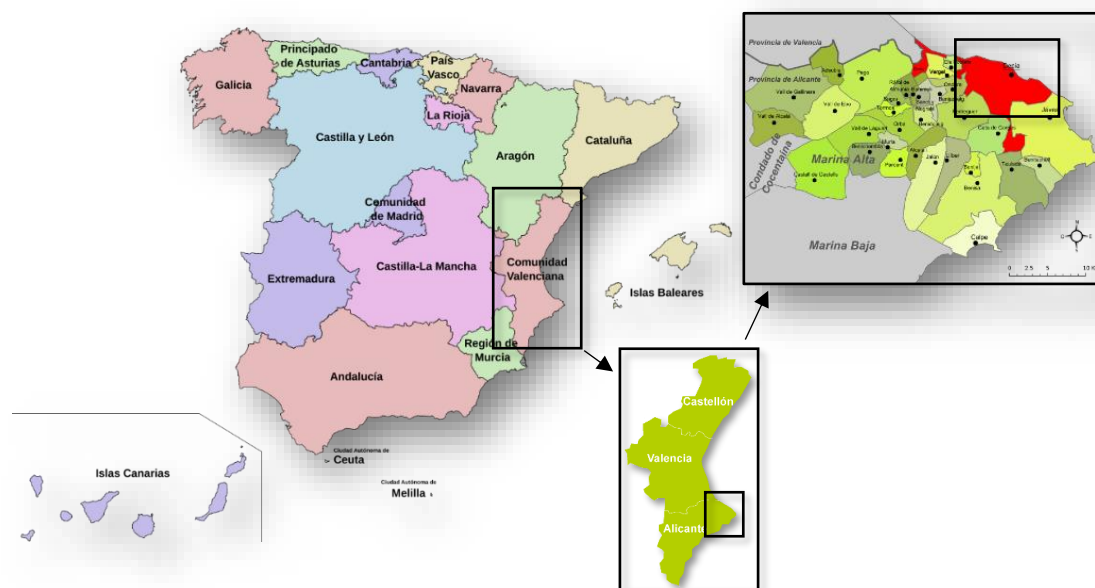


Figura 11: Localización zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

La ciudad de Denia cuenta con 45622 habitantes (INE - Instituto Nacional de Estadística, 2023). Es un lugar de alto valor turístico donde en la época de verano el número de habitantes puede llegar a quintuplicarse.

El tramo analizado abarca la franja litoral comprendida entre la Punta dels Molins, al norte, y la Punta del Raset, al sur. Esta última marca el extremo norte del puerto de Denia y el inicio de las playas de Les Marines. En la Figura 12 a continuación se puede ver la ubicación exacta del tramo seleccionado para este estudio.



Figura 12: Municipio de Denia y su franja litoral norte.

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Dentro de este tramo se incluyen, en sentido norte-sur, la Playa de les Bovetes, la Playa de les Marines y la Playa de la Punta del Raset (Figura 13).

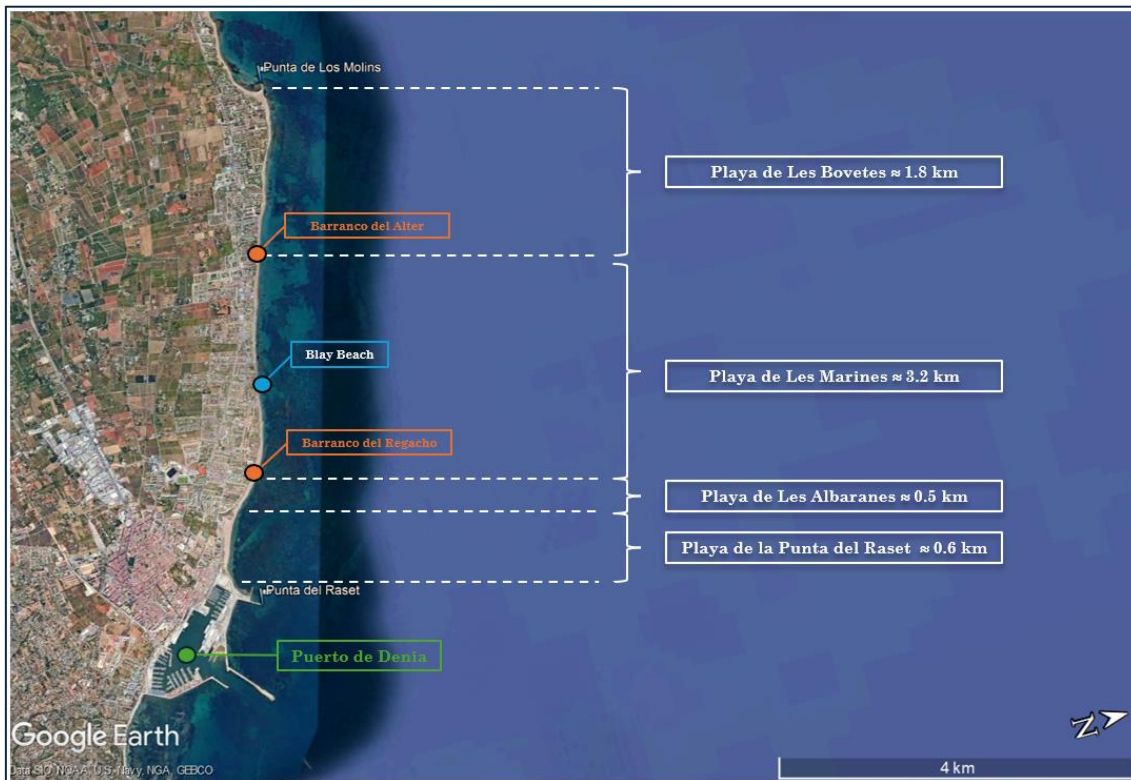


Figura 13: Playas en el tramo estudiado entre la Punta dels Molins y la Punta del Raset.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

Estas playas se caracterizan por tener un perfil de costa rectilíneo, arenoso y de pendiente suave, lo que las hace especialmente vulnerables a procesos de erosión. Además, presentan un elevado grado de urbanización y un uso turístico muy

intensivo durante los meses de verano. Sin embargo, a pesar de la presión antrópica, en el medio marino hay un ecosistema abundante en fanerógamas marinas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* lo que lo convierte en una zona de alto valor ecológico (Figura 14). Gracias a esta combinación de factores físicos, ambientales y antrópicos este tramo es idóneo para el estudio de la interacción entre la hidrodinámica costera y la conservación de estos ecosistemas amenazados.

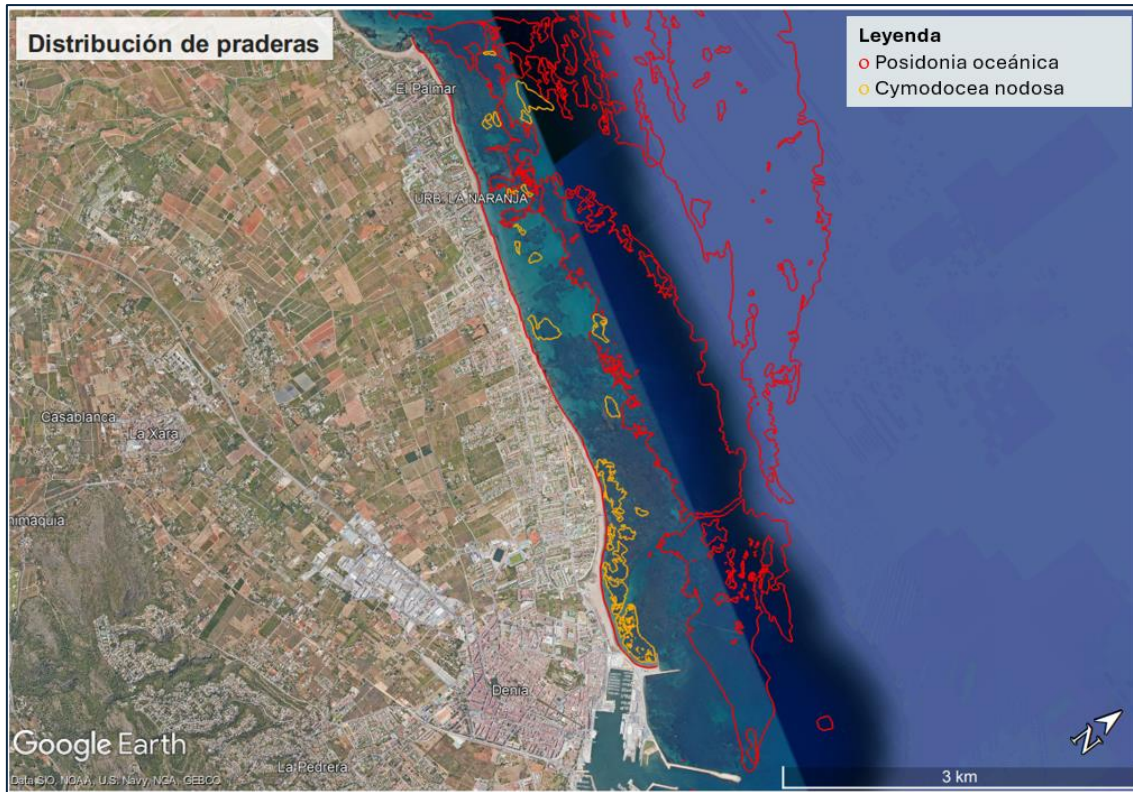


Figura 14: Distribución de praderas en el tramo estudiado.

Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía del IEO.

En la figura a continuación (Figura 15) se recogen datos promedio en praderas de *Posidonia oceanica* en el periodo 2002-2013 sobre la densidad de los haces por m² que se encuentran a lo largo de la costa valenciana.

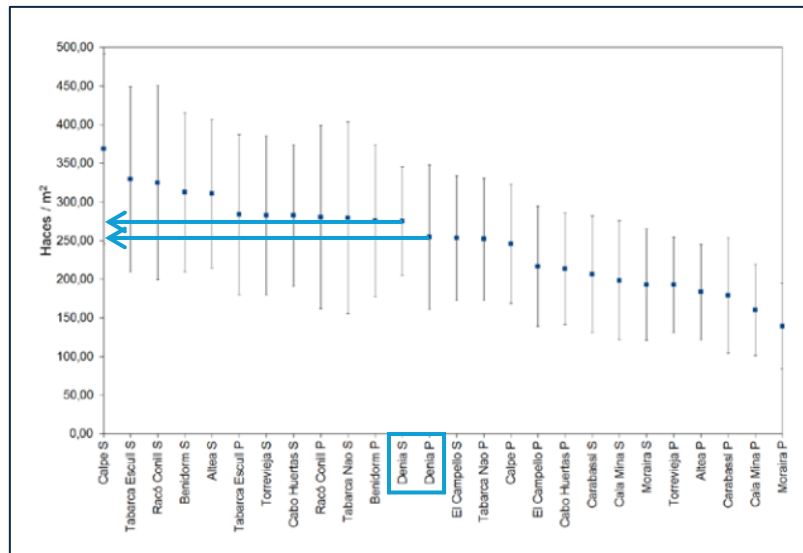


Figura 15: Densidad de haces de praderas de *Posidonia oceanica* en el periodo 2002-2013 (S = estación somera, P = estación profunda).

Fuente: Ruiz et al. (2015), Atlas de las praderas marinas de España.

Los rangos de densidad variaron entre 139 haces/m² de la estación profunda de Moraira, y los 369 haces/m² de la estación somera de Calpe. La cobertura es más variable en función de la heterogeneidad del sustrato, así en las estaciones ubicadas próximas a cabos o acantilados es menor debido a la presencia de sustratos rocosos; por contra, en las estaciones más profundas tiende a ser superior, al ser más homogéneo el sustrato blando (Ruiz et al., 2015).

En Denia la densidad oscila entre los 250 y 275 haces por m². En particular, en la estación somera, la densidad media alcanza los 275 haces/m². Este valor la posiciona entre las zonas con densidad moderadamente alta del litoral, lo cual sugiere una pradera bien establecida en aguas poco profundas (Ruiz et al., 2015).

2.2 Evolución línea de costa

La presión urbanística ha tenido un impacto muy importante en la preservación de la playa en la zona de Les Marines. En las figuras a continuación se puede ver una comparativa de la evolución de la línea de costa utilizando ortofotos de 1957 y la más reciente de 2021 obtenidas a partir de datos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea). Además, se incluye una imagen de Google Earth del 2025 para dar una visión del estado de la zona hoy en día.

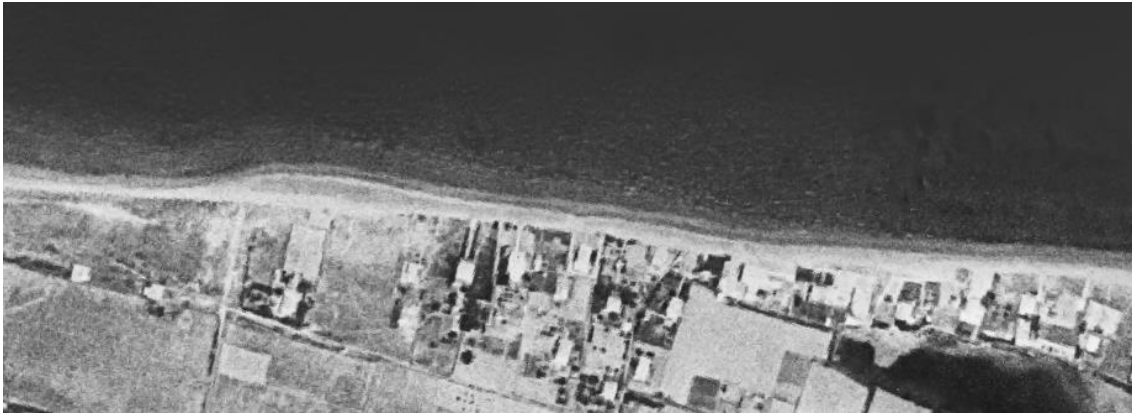


Figura 16: Ortofoto de 1957, Playa de Les Marines – Blay Beach.

Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de datos del PNOA.



Figura 17: Ortofoto de 2021, Playa de Les Marines – Blay Beach.

Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de datos del PNOA.



Figura 18: Línea de costa, 2025, Playa de Les Marines – Blay Beach.

Fuente: Google Earth.

En las figuras se puede observar claramente cómo, con los años, la playa ha ido desapareciendo, y actualmente casi no queda rastro de ella. Mientras que en los años 60 existía una playa con un ancho que variaba entre 10 y 15 metros, hoy en día, lo que se encuentra es un muro de contención diseñado para proteger las parcelas existentes del riesgo de derrumbamiento.

En la siguiente secuencia de figuras, se observa la evolución de la línea de costa a lo largo de los 15 últimos años. La dirección del análisis es de norte a sur, es

decir, desde la Punta dels Molins hasta la Punta del Raset. Cada una de las líneas representa la posición de la línea de costa en diferentes años, lo que permite visualizar los cambios morfológicos sufridos en el litoral a lo largo del tiempo:

- 2009 (verde)
- 2013 (cian)
- 2016 (amarillo)
- 2018 (magenta)
- 2020 (azul)
- 2024 (rojo)



Figura 19: Evolución línea de costa 2009- 2024 entre la Punta dels Molins y Playa de Les Bovetes.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.



Figura 20: Evolución línea de costa 2009 -2024 entre la playa de Les Bovetes y el Barranco del Alter.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.



Figura 21: Evolución línea de costa 2009 -2024 - Playa de Les Marines.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.



Figura 22: Evolución línea de costa 2009 -2024 Playa de Les Marines – Blay Beach.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.



Figura 23: Evolución línea de costa 2009 -2024 - Playa de Les Marines – Playa de Les Albaranes.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.



Figura 24: Evolución línea de costa 2009 -2024 - Playa de la Punta del Raset.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

2.3 Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT)

La Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de Costas detalla los bienes que integran el dominio público marítimo-terrestre (DPMT) incluyendo la ribera del mar y de las rías, las playas, las aguas interiores, el mar territorial y los recursos naturales de la zona económica exclusiva y de la plataforma continental. Estos dominios deben ser respetados ante cualquier intervención para proteger el medio ambiente, prevenir riesgos, ordenar el territorio de manera sostenible y garantizar el acceso público. El límite de la Servidumbre de Protección (SP) a su lado es una franja de terreno contigua al DPMT que tiene restricciones con el objetivo de garantizar la conservación del litoral y evitar su degradación (Figura 25). La línea de servidumbre de protección se extiende 100 metros tierra adentro desde la línea de DPMT en zonas no urbanizadas, pudiendo ser ampliada hasta 200 metros en casos específicos. En el caso de zonas urbanas consolidadas antes del 1988 esta franja se reduce a 20 metros. En la zona de servidumbre se prohíbe la construcción de nuevas viviendas y otras edificaciones permanentes, se permite desarrollar infraestructuras para el uso público del litoral y se regula el uso de actividades comerciales y recreativas.

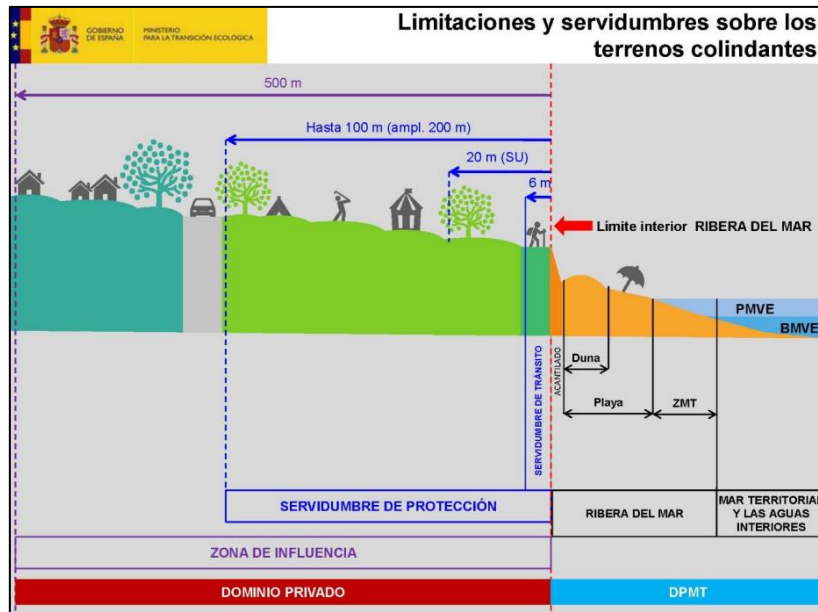


Figura 25: Esquema de limitaciones y servidumbres sobre los terrenos colindantes.

Fuente: MITECO.

En las siete siguientes figuras se visualizan los límites del dominio público marítimo-terrestre, en el tramo objeto de estudio, que se han obtenido a partir de capas en formato “kmz” proporcionadas por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Es importante destacar que se encuentra en trámite la aprobación de nuevos límites del DPMT y de la Servidumbre de Protección (SP), lo que podría afectar la delimitación actual de estas zonas.



Figura 26: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Bovetes.

Fuente: Google Earth.



Figura 27: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Marines (1).

Fuente: Google Earth.

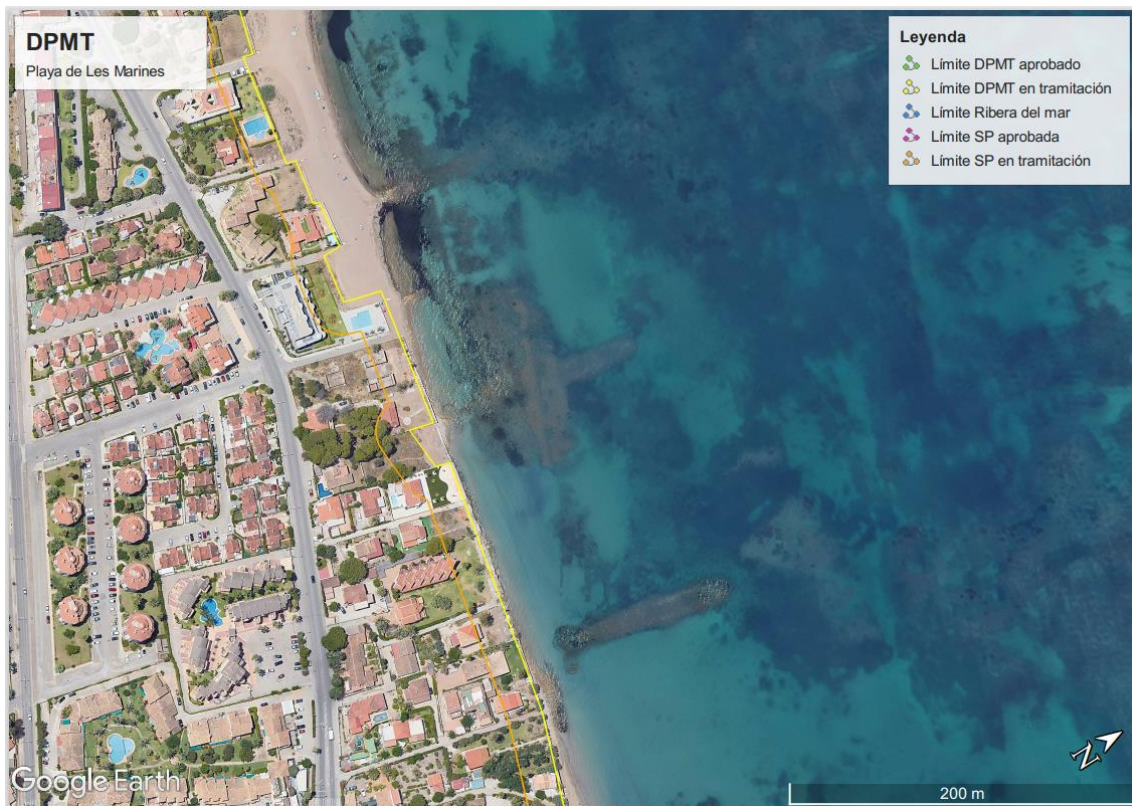


Figura 28: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Marines (2).

Fuente: Google Earth.



Figura 29: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Marines (3).

Fuente: Google Earth.



Figura 30: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Marines (4).

Fuente: Google Earth.



Figura 31: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de Les Albaranes.

Fuente: Google Earth.



Figura 32: Dominio público marítimo-terrestre – Playa de La Punta del Raset.

Fuente: Google Earth.

Como se puede ver, en la mayor parte del tramo existen edificaciones que si se aprueba el nuevo deslinde, actualmente en tramitación, quedarían en la franja entre el DPMT y la SP. Hoy en día, según la Ley de Costas dichas construcciones no se consideran ilegales, pero sí fuera de ordenación si han sido construidas previo a 1988. Esto implica que no pueden ser ampliadas o cambiadas de uso, permitiéndose únicamente obras de mantenimiento. Si se aprueba el nuevo deslinde, este modificaría los límites y las edificaciones que se encuentran en esta zona sufrirían cambios.

En todo el tramo de estudio la presión urbanística es muy alta y afecta negativamente a la costa. En algunas zonas, las propiedades privadas han ocupado terrenos de la playa. Asimismo, la ausencia de un paseo marítimo es otra evidencia de la elevada ocupación del espacio costero, donde se ha perdido la franja del frente litoral y el espacio funcional necesario para el desarrollo de la dinámica natural de los sedimentos, el oleaje y las dunas. Como consecuencia, la falta de espacio permite que el oleaje impacte directamente sobre algunos límites de parcelas poniéndolas en riesgo.

2.4 Intervenciones antrópicas

Las playas que quedan en el tramo estudiado que son la Playa de les Bovetes, la Playa de les Marines y la Playa del Raset han sufrido problemas de erosión a lo largo de los años debido a varios factores tanto naturales como humanos.

A continuación, se recoge la información del “*Proyecto de recuperación de la playa de Les Deveses, T.M. Dénia (Alicante)*”, adjudicado a la empresa Iberport Consulting, S.A. en el año 2012, sobre de las actuaciones realizadas a lo largo de los años y cómo éstas han afectado a la dinámica litoral **del tramo estudiado**.

- Construcción espigón Punta dels Molins (1965-1971): como resultado de la construcción del espigón, se produce un **aumento** en la acumulación de sedimento aguas arriba del mismo en dirección del transporte SE-NW.
- Construcción de diez espigones cortos en Les Marines en la década de 1970: la ejecución de estas obras provocó un **descenso brusco** en las tasas de transporte de sedimentos en comparación con los años anteriores. Si antiguamente los volúmenes transportados alcanzaban los 40 000 m³/año, a consecuencia de las obras, se redujeron a menos de 20 000 m³/año.
- Construcción de un dique exento en Les Marines y aportación de 50 000 m³ de arena en Les Marines (1985-1986): la construcción del dique conllevó a una gran captación de arena.
- Retirada de los 10 espigones de Les Marines en el año 1986: esta actuación se realizó porque se consideraba que los espigones captaban parte del sedimento transportado en dirección SE-NW y su eliminación modificó las tasas de transporte facilitando el desplazamiento de material hacia el noroeste.
- Desmantelamiento del dique exento en el año 1990: solo 5 años tras la construcción del dique exento en Les Marines, se decidió retirarlo. Eso provocó la movilización de material acumulado y gran parte de los sedimentos fue transportado en la dirección SE-NW para alimentar playas aguas abajo

Parte del material sobrepasó el dique de El Molins y continuó hacia la Punta de L'Estanyó.

- Aportación de 700 000 m³ de arena en Les Marines – Blay Beach en el año 1988: esta intervención, junto con la construcción del dique exento en el año 1985, provocó un incremento en las tasas de transporte en la zona, alcanzando un máximo de 70 000 m³/año.
- Aportación de 10 000 m³ de arena en Les Marines - Blay Beach en el año 2006.
- Aportación de 10 000 m³ de arena en Les Marines en el año 2008.
- Aportación de 5 000 m³ de arena en Les Marines - Blay Beach en el año 2009.
- Aportación de 29 040 m³ de arena en Les Marines en el año 2010.
- Aportación de 3 250 m³ de arena en Les Marines - Blay Beach en el año 2012.
- Aportación de 5 500 m³ de arena en Les Marines - Blay Beach en el año 2016. (Marín & Marín, 2016)

En conjunto, a lo largo de todos estos años se ha aportado un volumen aproximado de 763 000 m³ de arena en Blay Beach, destacando especialmente la actuación de 1988, que fue la más importante. Sin embargo, desde entonces no se han llevado a cabo nuevas actuaciones de esta magnitud

2.5 Dinámica litoral

En este apartado se estudia el transporte sólido litoral en el tramo costero analizado. El transporte de sedimentos es un elemento clave para caracterizar el comportamiento morfodinámico del litoral e identificar las zonas con procesos predominantes de erosión o acreción, así como las posibles barreras que afectan al transporte longitudinal de materiales.

A lo largo de la historia, ha habido gran aporte de sedimentos al litoral gracias a los ríos que desembocan en esta zona, como es el río Racons o el río Girona. Aunque de forma secundaria, también contribuyen el barranco de La Alberca, el barranco de l'Alter, el barranco del Nap y los barrancos del Regacho, todos ellos integrados en la subcuenca de la Marina Alta, que forma parte de la Cuenca Hidrográfica del Júcar. Sin embargo, el río Girona destaca como el único cauce con un funcionamiento hidrológico relevante para la dinámica costera. En su tramo bajo, el río ha formado una amplia llanura aluvial y abanicos pleistocenos y holocenos que desembocan en la punta de La Almadraba, configurando un importante aporte sedimentario en el pasado.

No obstante, una serie de actuaciones que tuvieron lugar a partir de mediados de siglos XX, hicieron que empezara una regresión costera progresiva. Un ejemplo es la construcción de la presa de Isbert en el año 1945 que frenó el aporte de sedimentos procedentes del río Girona. Además, en el año 1973 se llevó a cabo una extracción masiva de áridos en la playa de La Almadraba para usarlos en el relleno de una plataforma de una fábrica en el Verger. Esta actuación generó una regresión de la línea de costa y afectó prácticamente todas las playas de Les Marines incluyendo el tramo entre la Punta dels Molins hasta el puerto. (Afectados Ley de Costas Denia, 2025)

El transporte longitudinal de sedimentos en esta zona ha variado como consecuencia de la pérdida de aportes fluviales, construcción de obras costeras, edificaciones y en general, la intervención humana. En las proximidades de Denia se ubica un punto nodal de deriva en la desembocadura del río Racons que marca el límite norte de la ciudad. Al norte de este punto, la dirección del transporte sólido litoral va de noroeste a sureste, mientras que en el litoral de Denia el transporte va en sentido contrario, de sureste a noroeste (SE -> NW). De esta forma, a lo largo de Les Marines, el transporte sólido litoral tiende a desplazarse desde el puerto de Denia hacia Punta dels Molins y zonas más al norte (Figura 33).

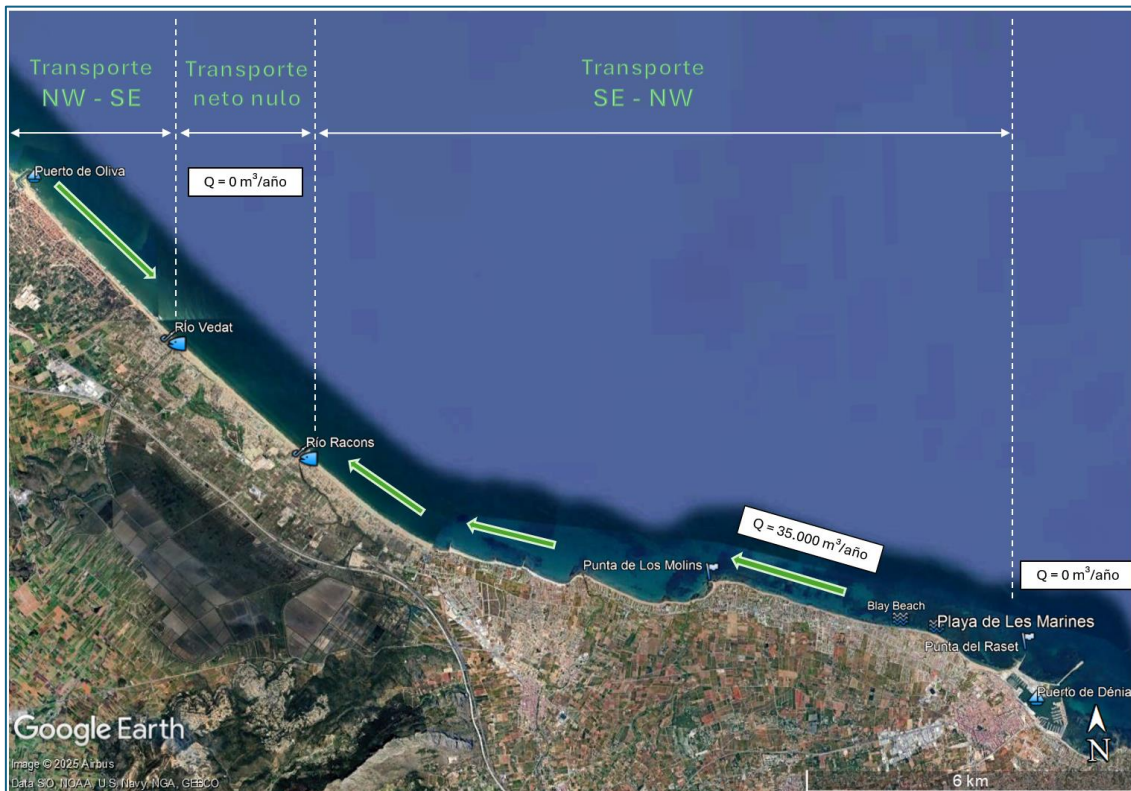


Figura 33: Transporte longitudinal de sedimentos en la costa de Denia.

Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto de recuperación de la playa de Les Deveses, 2018.

Según el Proyecto de recuperación de la playa de Les Deveses, T.M. Dénia de 2018, el volumen de sedimentos transportados de forma natural en los tramos centrales del litoral se estima en un máximo de unos 35000 m³/año, aunque varía dependiendo de la ubicación. Cerca del puerto, la tasa disminuye debido a la acumulación local, y en la zona nodal, se reduce casi a cero. Se han realizado estudios del balance sedimentario entre los años 1956 y 2012 que muestran que las tasas de transporte litoral se han mantenido elevadas, sin embargo, la falta de aportes naturales ha llevado a que el movimiento de arena sea procedente de la propia erosión de la costa y dunas existentes.

En el mapa extraído del visor cartográfico de la Generalitat Valenciana, se representan las tasas medias de cambio del ancho de playa en el tramo costero de Denia durante el periodo 1984–2024, expresadas en metros por año (m/año). Los datos reflejan una clara tendencia a la regresión del litoral en múltiples sectores,

especialmente en playas como Les Marines, donde se ha registrado una pérdida de sedimentos más pronunciada (Figura 34).

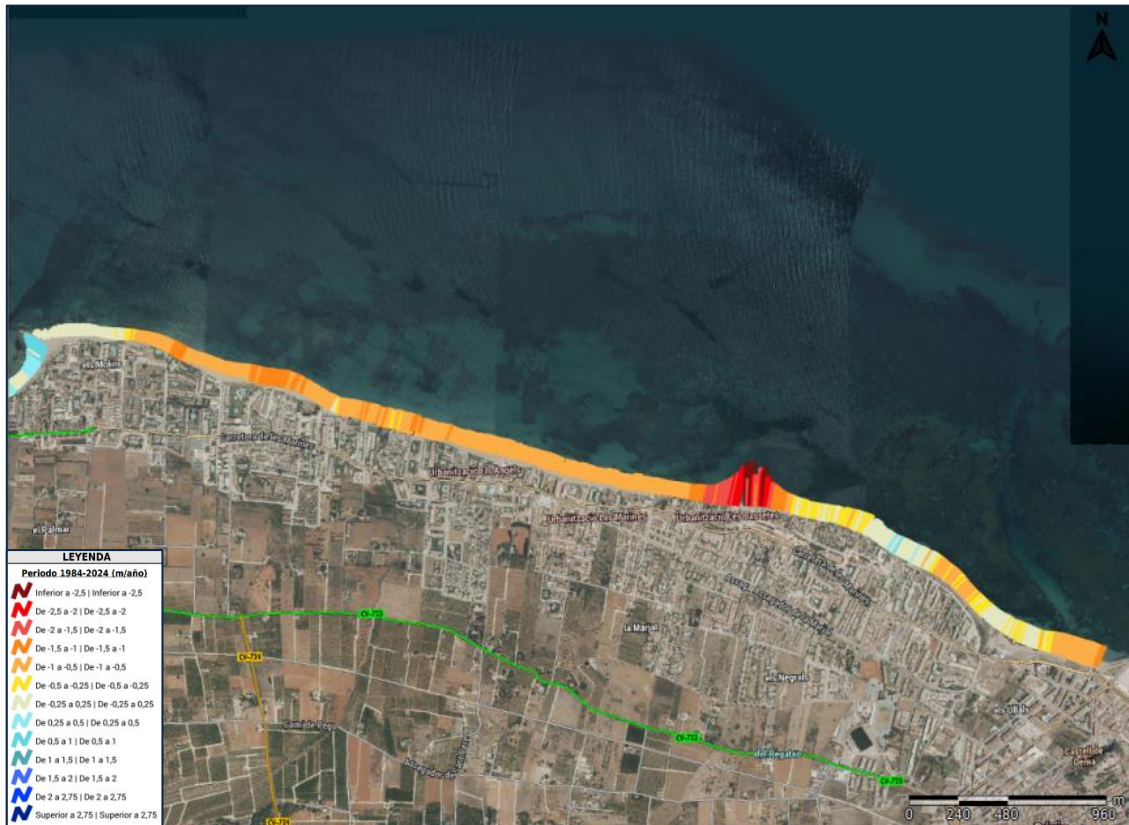


Figura 34: Tasas medias de cambio de anchura de las playas (1984-2024).

Fuente: Visor GVA.

2.6 Batimetría

Para realizar este trabajo se utiliza la batimetría que proporciona el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Mediante estos datos se analiza la profundidad y la morfología del fondo marino en la zona de estudio que es fundamental para entender la dinámica litoral. Además, es necesaria para modelizar la propagación del oleaje y posteriormente diseñar los rompeolas y elegir el mejor lugar para colocarlos. Se utiliza la Ecocartografía del litoral de la provincia de Valencia del año 2007 para cubrir la zona de estudio.

Sin embargo, para obtener una primera aproximación de la batimetría en la zona de estudio, se ha utilizado el visor cartográfico proporcionado por Navionics (Figura 35, Figura 36). La información obtenida muestra una pendiente submarina moderada, con un rápido aumento de profundidad desde la línea de costa hasta alcanzar entre 20 y 40 metros en pocos cientos de metros. Esta configuración indica la presencia de una plataforma continental estrecha, lo que influye directamente en la dinámica del oleaje y en los procesos de transporte de sedimentos. En las proximidades del puerto de Denia, la acumulación de isóbatas sugiere un talud abrupto, cuya interacción con las estructuras costeras puede modificar el régimen hidrodinámico y sedimentario. Estos cambios son especialmente relevantes para las praderas marinas, ya que *Posidonia oceanica* prefiere zonas con sustratos estables y

poco dinámicos, mientras que *Cymodocea nodosa* puede desarrollarse en fondos más móviles y sujetos a mayor perturbación (Bonamano et al., 2021; Ivajnsiĉ et al., 2022).

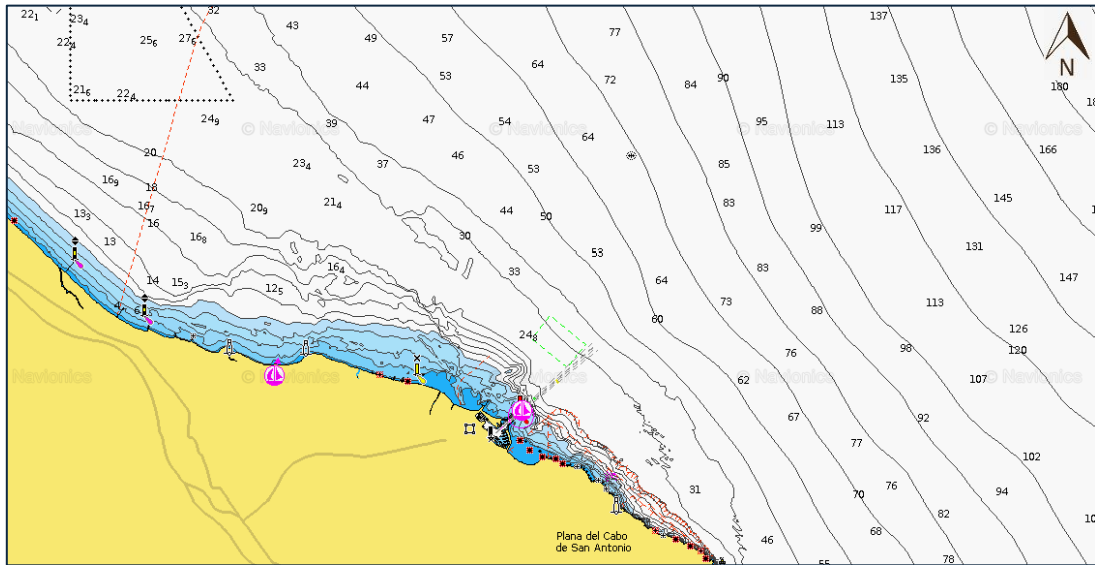


Figura 35: Batimetría de la zona de estudio.

Fuente: Navionics.

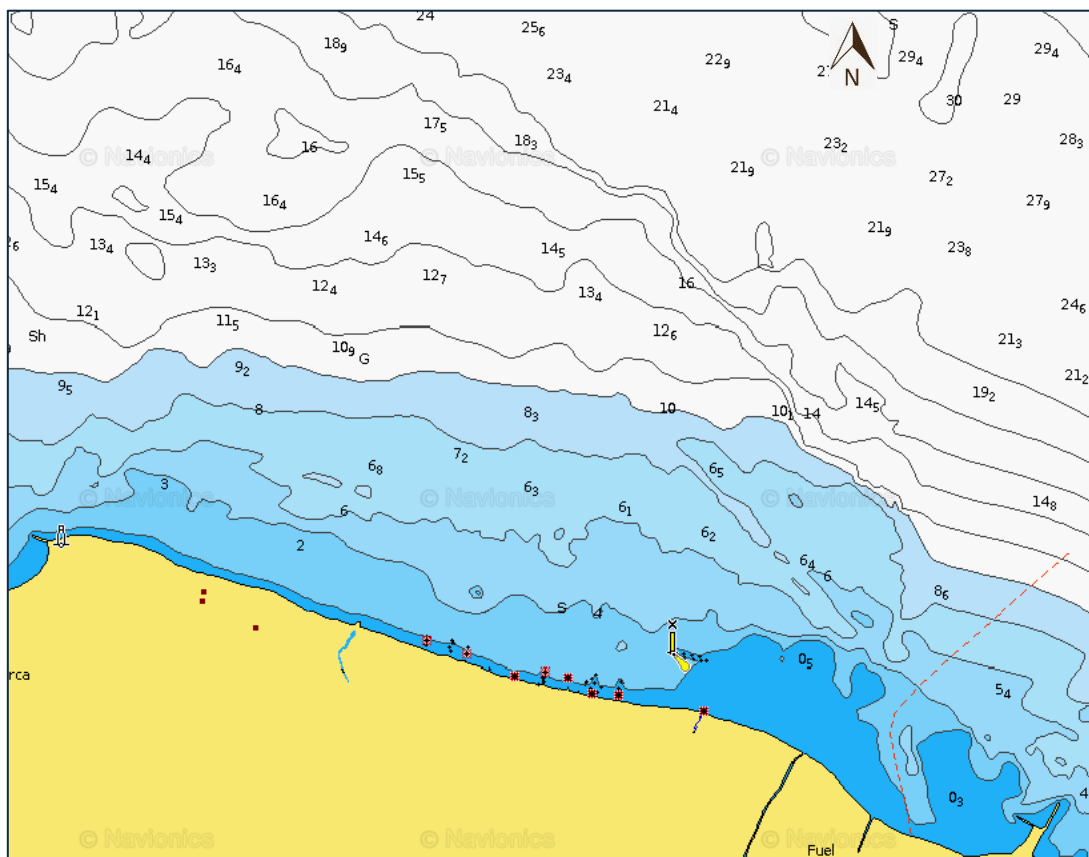


Figura 36: Batimetría de la zona de estudio. Detalle.

Fuente: Navionics.

En la figura siguiente (Figura 37) se muestra la batimetría utilizada finalmente en el análisis, obtenida a partir de las capas oficiales de MITECO y visualizada mediante el software Google Earth.

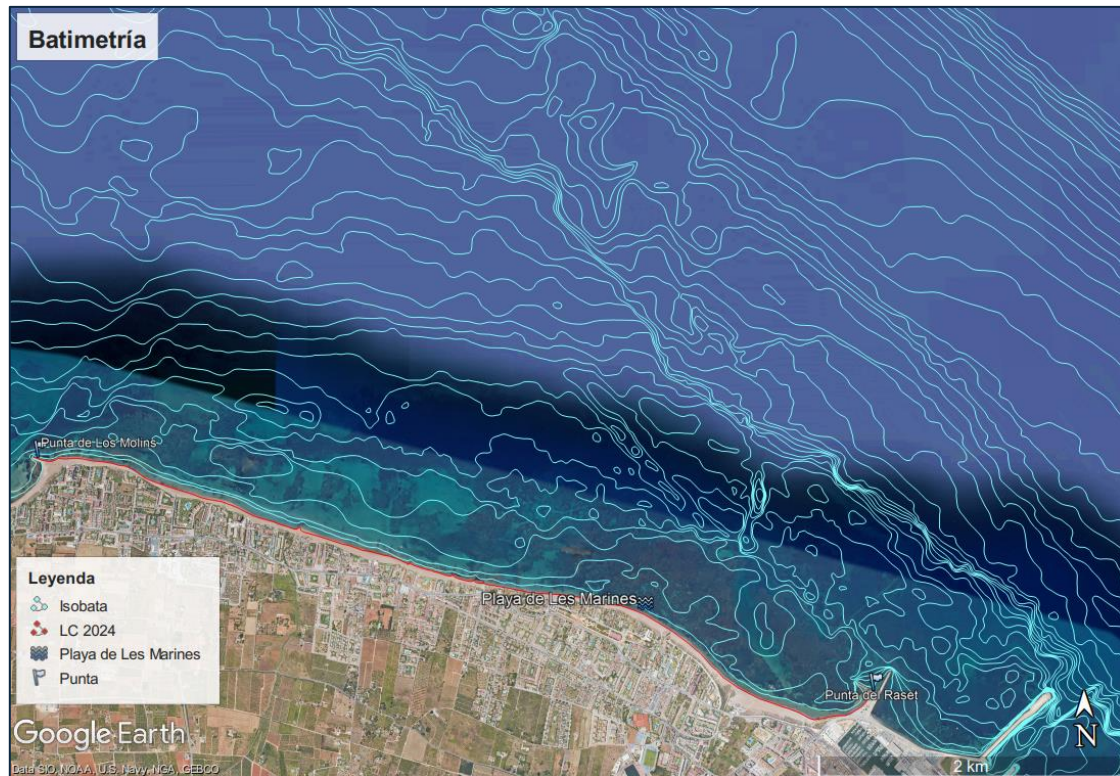


Figura 37: Batimetría de la zona de estudio.

Fuente: Google Earth.

2.7 Topografía

La información topográfica de la zona de estudio ha sido obtenida mediante el visor Iberpix del Instituto Geográfico Nacional, lo que ha permitido identificar las variaciones altimétricas y la morfología del terreno costero (Figura 38, Figura 39).

La topografía en el tramo estudiado se caracteriza por tener una franja litoral principalmente llana, lo cual ha favorecido históricamente el desarrollo de playas extensas y la ocupación urbana. Esta franja llana contrasta con el relieve pronunciado que aparece al sur del puerto, donde se alza el macizo del Montgó. Estas características topográficas influyen directamente en la dinámica sedimentaria y en la circulación de las corrientes litorales, condicionando la acumulación y erosión de sedimentos. Además, las pendientes suaves en la zona de estudio favorecen la formación y estabilidad de praderas marinas, aunque también las hacen vulnerables a los efectos de las infraestructuras costeras y eventos extremos.

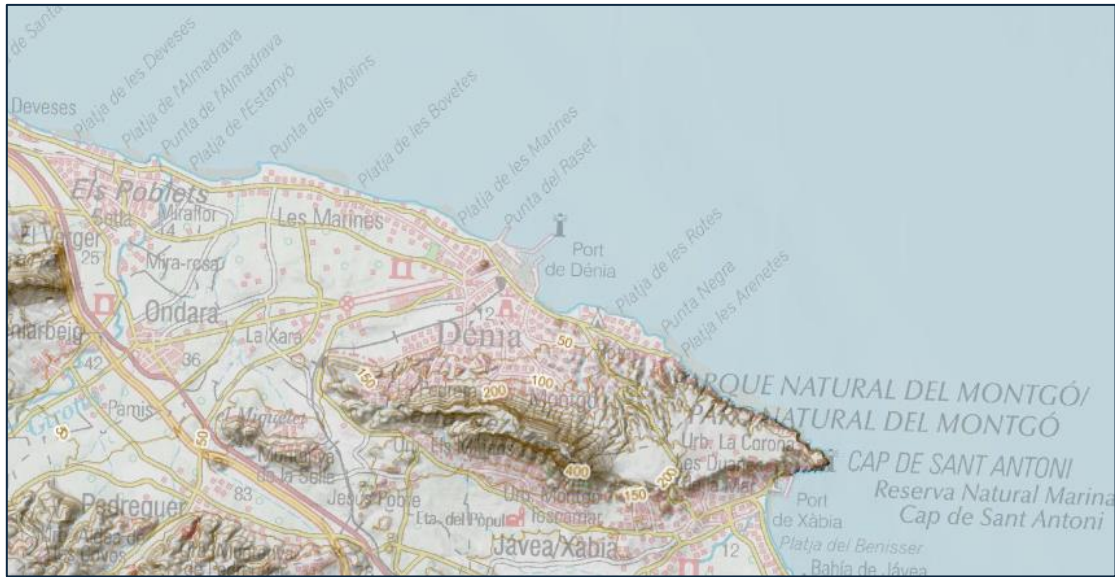


Figura 38: Mapa topográfico en la zona de estudio.

Fuente: Visor Iberpix, IGN.



Figura 39: Mapa topográfico en la zona de estudio. Detalle.

Fuente: Visor Iberpix, IGN.

2.8 Geología y Geotecnia

Este apartado tiene como objetivo analizar las características geológicas, geotécnicas y morfológicas del tramo costero comprendido entre la Punta dels Molins y el Puerto de Denia, en la Comunidad Valenciana. El propósito es establecer las condiciones del subsuelo marino y terrestre que influyen en la dinámica litoral y la estabilidad de los ecosistemas costeros, especialmente las praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*.

2.8.1 Geología del área de estudio

Para conocer la geología de la zona se consulta al Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 proporcionado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), concretamente la Hoja 796 (30-31). En esta hoja se representan diversas unidades litoestratigráficas que caracterizan el subsuelo de la región de Gandía,

incluyendo el tramo costero comprendido entre la Punta dels Molins y el Puerto de Denia, que constituye la zona del presente estudio (Figura 40, Figura 41).

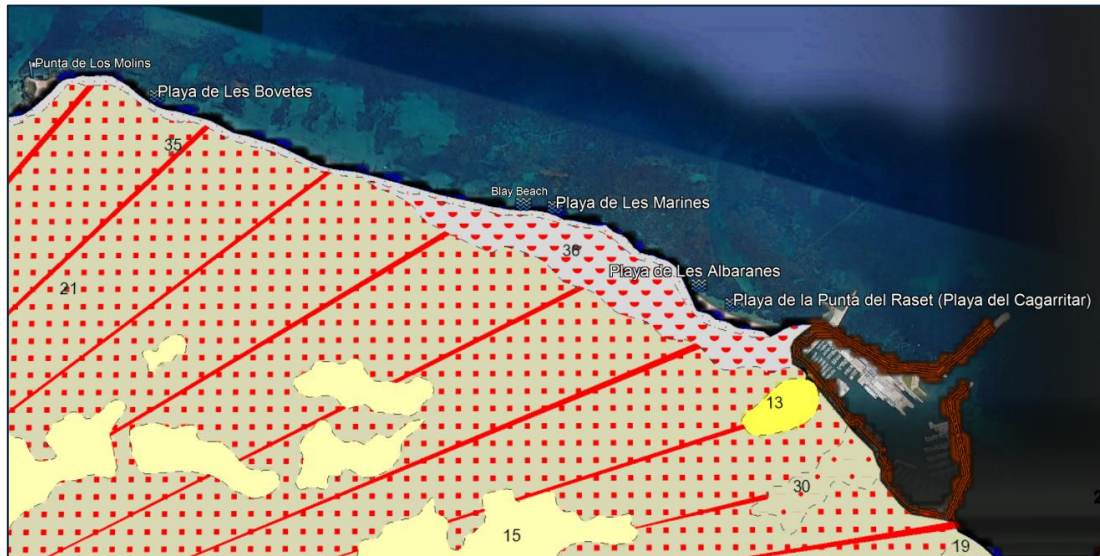


Figura 40: Mapa geológico de la Hoja 796 (Gandía), a escala 1:50.000.

Fuente: IGME, 1975.

CUATERNARIO	PLEISTOCENO	HOLOCENO	39	38	37	36	35	34	33	39 Terraza 2m. Arenas, limos y cantos
		SUPERIOR	32	31	30	29	28	27	26	25
	MEDIO	23	22	21	20	19	18	17	16	37 Terraza 10m. Arenas, limos y cantos
	INFERIOR	15	14	13	12	11	10	9	8	36 Dunas: Arenas sin fijar
										35 Playa: Arenas con conchas y cordón litoral
										34 Aluvial-colluvial: Cantos angulosos y redondeados
										33 Aluvial: Depósitos de fondo de rambla
										32 Depósito marino: Arenas grises con fauna
										31 Conos de deyección: Cantos subangulosos matriz arcillo-arenosa
										30 Derrame de glacia: Arcillas pardas con algunos cantos
										29 Limos de inundación: Limos arenosos y grisáceos
										28 Coluvión moderno: Cantos angulosos y arcillas
										27 Abanico aluvial: Arenas arcillosas con

Figura 41: Leyenda del mapa geológico.

Fuente: IGME, 1973.

Según esta cartografía, el tramo en estudio está caracterizado por la presencia de depósitos cuaternarios, relacionados con ambientes litorales activos y con formaciones dunares residuales. Las principales unidades litoestratigráficas presentes en la zona son las siguientes (IGME, 1973):

- Unidad 35 – Playa: Arenas con conchas y cordón litoral (Cuaternario – Holoceno)

Se extiende a lo largo de las playas de Les Bovetes, Les Marines, Les Albaranes y la Punta del Raset. Son depósitos de arenas sueltas, de naturaleza bioclástica, altamente móviles y permeables. Representan el sustrato más superficial, directamente influenciado por la acción del oleaje y el viento.

- Unidad 36 – Dunas: Arenas sin fijar (Cuaternario - Holoceno)

Corresponde a zonas con acumulaciones arenosas situadas por detrás del frente de playa. Estas dunas carecen de fijación vegetal significativa, lo que las hace vulnerables a la erosión eólica.

- Unidad 21 – Glacis de acumulación: Niveles de arcillas y cantos con costras discontinuas (Cuaternario – Pleistoceno medio)

Asociada a antiguas superficies de acumulación continental, esta unidad combina materiales finos con fragmentos gruesos, y puede presentar horizontes endurecidos de difícil excavación.

2.8.2 Geotecnia y propiedades del subsuelo

El análisis geotécnico se ha basado en el Mapa Geotécnico General Hoja 64 (ALCOY) a escala 1:200.000 del IGME. Los suelos superficiales presentan una baja cohesión y alta permeabilidad, características típicas de las arenas de playa, lo que los hace susceptibles a procesos de erosión y transporte sedimentario. Es importante tener en consideración estas propiedades para evaluar la viabilidad de intervenciones de regeneración dunar y la implementación de estructuras de defensa costera. En la Figura 42 a continuación se puede ver el extracto del mapa geológico en la zona de estudio:

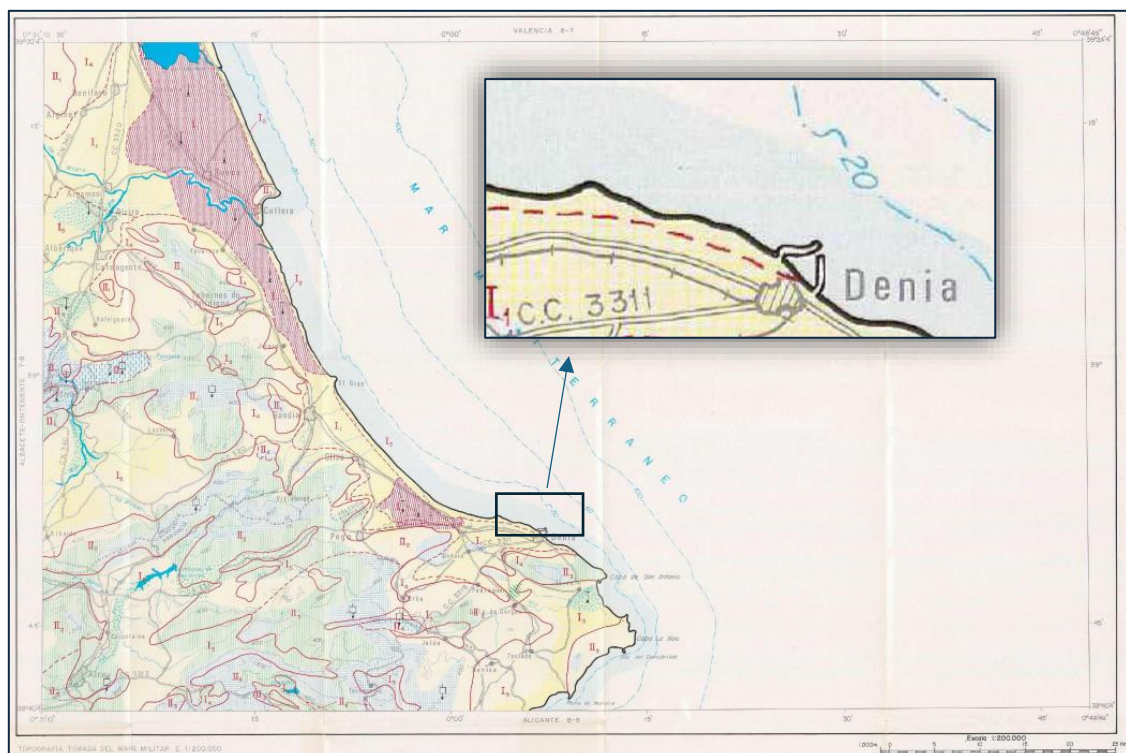


Figura 42: Mapa Geotécnico general.

Fuente: IGME, 1973.

CRITERIOS DE CLASIFICACION										
CONDICIONES CONSTRUCTIVAS	PROBLEMAS "TIPO" EXISTENTES		CONCURRENCIA DE 2 PROBLEMAS "TIPO"				CONCURRENCIA DE 3 PROBLEMAS "TIPO"	CONCURRENCIA DE 4 PROBLEMAS "TIPO"	PROBLEMAS GEOTECNICOS	NOTACION
Muy Favorables.	Litológicos	Geomorfológicos	Litológicos y Geomorfológicos	Geomorfológicos e Hidrológicos	Geomorfológicos y Geotécnicos	Litológicos, Geomorfológicos e Hidrológicos	Litológicos, Geomorfológicos y Geotécnicos (p.d.)	Litológicos, Geomorfológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	De Capacidad de Carga.	↓
Favorables.	Hidrológicos	Litológicos e Hidrológicos	Litológicos y Geotécnicos	Geomorfológicos y Geotécnicos	Litológicos, Geomorfológicos y Geotécnicos (p.d.)	Litológicos, Geomorfológicos y Geotécnicos (p.d.)	Litológicos, Geomorfológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	De Anclajes.	↓	
Aceptables.	Geotécnicos (p.d.)	Litológicos y Geotécnicos (p.d.)	Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	Geomorfológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	Geomorfológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	Geomorfológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	Geomorfológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	Geotécnicos Varios.	↓	
Desfavorables.										
Muy Desfavorables.										

Figura 43: Criterios de clasificación.

Fuente: IGME, 1973.

LEYENDA							
CONDICIONES CONSTRUCTIVAS FAVORABLES		CONDICIONES CONSTRUCTIVAS ACEPTABLES		CONDICIONES CONSTRUCTIVAS DESFAVORABLES		CONDICIONES CONSTRUCTIVAS MUY DESFAVORABLES	
	Zonas sin problemas específicos aparentes. Problemas muy localizados de tipo Hidrológico, Geotécnico y Litológico.		Problemas de tipo Litológico.		Problemas de tipo Geomorfológico.		Problemas de tipo Litológico, Geotécnicos e Hidrológicos.
	Problemas de tipo Geomorfológico.		Problemas de tipo Geomorfológico.		Problemas de tipo Geomorfológico y Geotécnico.		
	Problemas de tipo Hidrológico.		Problemas de tipo Hidrológico y Geotécnicos.		Problemas de tipo Geotécnico e Hidrológico.		
	Problemas de tipo Hidrológico y Geomorfológico.		Problemas de tipo Hidrológico y Geomorfológico.		Problemas de tipo Litológico y Geotécnico.		

Figura 44: Leyenda del mapa geotécnico general.

Fuente: IGME, 1973.

Según la leyenda del mapa y los criterios de clasificación, el terreno en la zona de estudio representado en color amarillo claro corresponde a suelos sin problemas específicos aparentes. Aunque pueden presentar ciertas limitaciones menores de tipo hidrológico o litológico, estas no condicionan de forma significativa su comportamiento geotécnico. Por tanto, se consideran áreas idóneas para la ejecución de soluciones blandas, como regeneraciones dunares o revegetación estabilizadora, sin que sea necesario recurrir a cimentaciones especiales o tratamientos del terreno.

2.8.3 Morfología litoral

Según el Estudio de Paisaje del Plan General Estructural de Denia (Ayuntamiento de Denia, 2022), la costa de Denia se caracteriza por ser una costa baja con una tendencia subsidente, lo que ha favorecido el desarrollo de formaciones de restinga-albufera y llanos aluviales. Estos ambientes están alimentados por la escorrentía de ríos como el Girona, formando extensos glaciares de poca pendiente que permiten la instalación de ambientes de marjal. En el tramo litoral, se identifican las siguientes unidades morfológicas:

- Playas arenosas: Extensas y de pendiente suave, formadas por la acumulación de sedimentos aportados por los ríos y el mar.
- Dunas costeras: Formaciones de arena modeladas por el viento, que actúan como barreras naturales contra la erosión y el avance del mar.

- Marjales: Zonas húmedas situadas tierra adentro, resultado de la acumulación de agua en depresiones del terreno, que desempeñan un papel crucial en la biodiversidad y la protección costera.
- Restingas: Barras de arena que se forman paralelas a la costa, creando lagunas o albuferas entre ellas y la línea de costa.

Además, la presencia de una restinga fósil (barrera litoral formada por arenas comentadas) sumergida frente a la actual playa de Les Marines (Figura 45) en Denia que construye los bajos de El Caball y L'Androna dificulta la acumulación litoral, contribuyendo a los procesos erosivos actuales. (García, 2005)

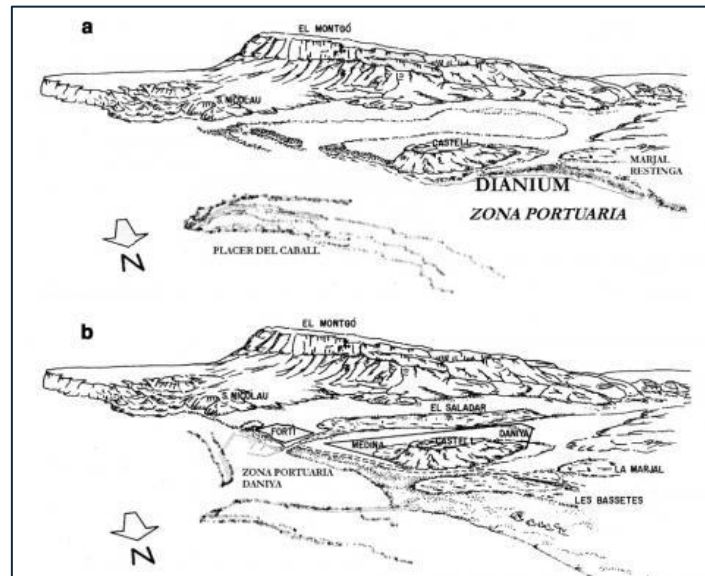


Figura 45: Bloques diagrama con la morfología de la costa de Dénia, a: Época romana altoimperial. b: Época altomedieval.

Fuente: García, 2005.

2.9 Climatología

El clima en una región costera se determina por la influencia mutua de factores atmosféricos y marítimos que influyen en la variabilidad térmica y el régimen de precipitaciones. En este apartado se analiza la climatología de la zona de estudio, considerando la temperatura media anual, sus variaciones según cada estación del año y los patrones de precipitación. Es importante estudiar estos elementos y su evolución ya que están directamente relacionados con el cambio climático y pueden influir en la dinámica litoral, afectando procesos como la erosión costera y la estabilidad de los ecosistemas marinos.

2.9.1 Temperaturas medias y variaciones estacionales

Para caracterizar correctamente el clima en la zona, se ha recorrido al documento “Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2016)” donde se ha utilizado la clasificación climática de Köppen para identificar el clima en cada región de España (Figura 46). Aunque fue formulada hace aproximadamente un siglo, esta clasificación sigue siendo ampliamente empleada en estudios climatológicos a nivel mundial. Su método se basa en los valores medios mensuales de precipitación y temperatura para definir las diferentes categorías climáticas. De

acuerdo con el mapa anteriormente mencionado, el clima en la zona de estudio de la costa valenciana se clasifica como Csa. Esto indica un clima templado con veranos secos y cálidos, caracterizado por una disminución significativa de la precipitación durante el verano. Este tipo de clima es característico de la región mediterránea.

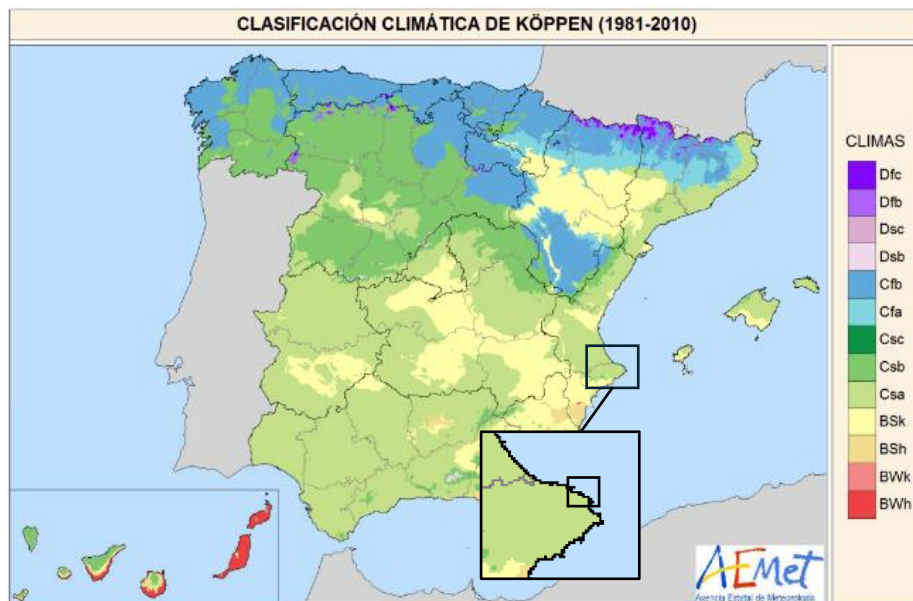


Figura 46: Clasificación Climática de Köppen-Geiger en la península Ibérica, Baleares y Canarias (1981 – 2010).

Fuente: AEMet

A lo largo del año, en Denia la temperatura generalmente oscila entre los 9 °C y 28 °C y raras veces baja a menos de 5 °C o sube a más de 30 °C (Figura 47). Los veranos suelen ser cálidos con presencia de brisas marinas que suavizan el calor, mientras que los inviernos se caracterizan por ser frescos y parcialmente nublados.

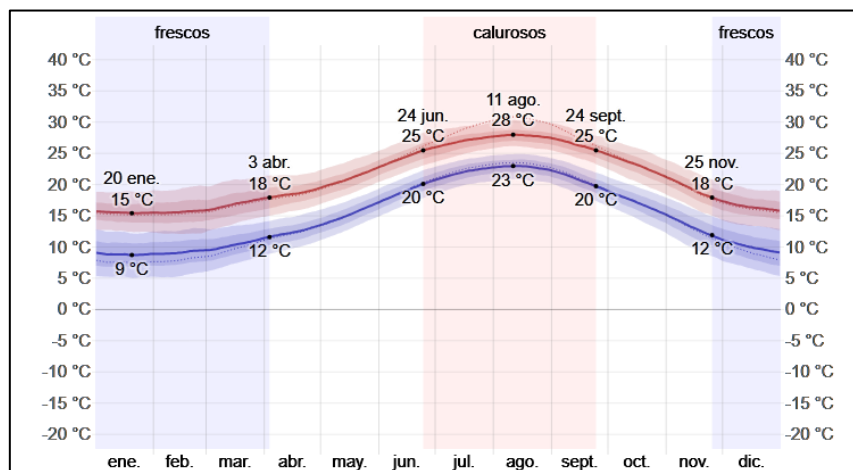


Figura 47: Temperatura máxima y mínima promedio en Denia.

Fuente: Weather Spark.

Cabe destacar que el año 2024 ha sido excepcionalmente cálido a nivel de todo el país con una temperatura media de 15 °C en la España peninsular, superando en 1,1 °C la media anual del período de referencia 1991-2020. Se posiciona como el tercer año más cálido desde el inicio de los registros en 1961, solo por detrás de 2022 y 2023. (AEMet, 2024). Este incremento de las temperaturas refuerza la evidencia del

cambio climático, reflejando un patrón sostenido de calentamiento global que impacta en la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos. El año ha sido mayoritariamente seco en la provincia de Alicante con una temperatura media anual de 20 °C.

2.9.2 Precipitaciones

En la región de Denia, la temporada de lluvia dura 9,5 meses, del 20 de agosto al 5 de junio, con un intervalo móvil de 31 días de lluvia de por lo menos 13 milímetros. El mes con más lluvia en Denia es octubre, con un promedio de 46 milímetros de precipitaciones. El periodo del año sin lluvia dura 2,5 meses, del 5 de junio al 20 de agosto. El mes con menos lluvia en Denia es julio, con un promedio de 4 milímetros de lluvia. (Weather Spark, 2025)

La precipitación media anual, al igual que el clima, se puede conocer a partir de los mapas que proporciona AEMet. Como se puede ver en la Figura 48, la zona de estudio registra una precipitación media anual que oscila entre los 700 y 800 mm. Estos valores indican que en dicha región se experimentan lluvias que podrían clasificarse como escasas o dentro del rango normal. Sin embargo, durante los meses de otoño e invierno (septiembre-marzo) que son las estaciones más lluviosas con picos en octubre y noviembre se pueden observar fenómenos como la gota fría o DANA que se caracterizan con lluvias intensas en periodos cortos.

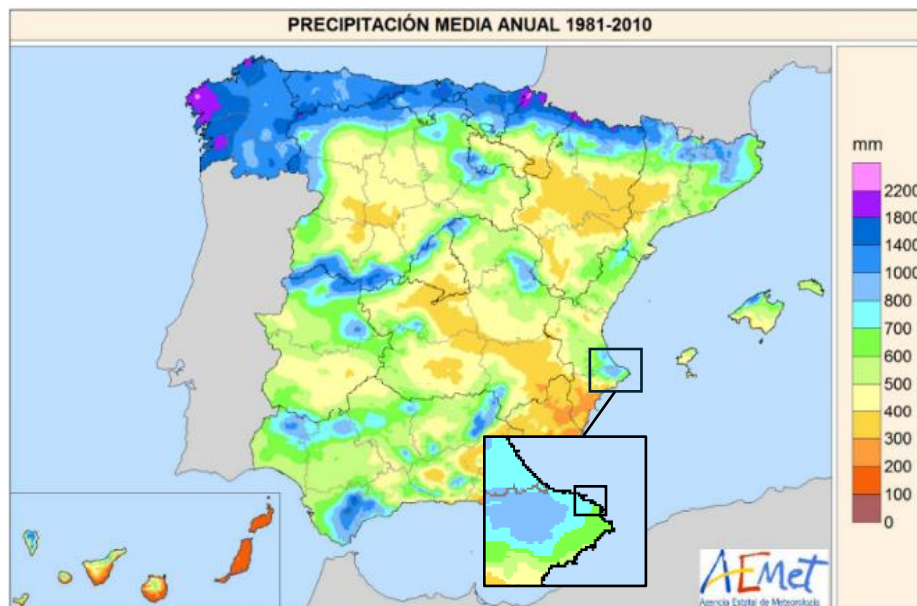


Figura 48: Precipitación media anual en la península Ibérica, Baleares y Canarias (1981 – 2010).

Fuente: AEMet

En general, la zona de la comarca de la Marina Alta suele presentar mayores precipitaciones que el resto de la provincia de Alicante debido a su relieve. Las principales formaciones montañosas en la comarca son:

- Montgó (753 m): El macizo más representativo de la zona, situado entre Denia y Jávea. Forma parte del Parque Natural del Montgó.

- Sierra de Segària (508 m): Ubicada entre los municipios de Ondara, Benimeli y El Verger, es una alineación montañosa de menor altitud, pero con gran valor ecológico.
- Sierra de Bernia (1.128 m): Localizada en el suroeste de la Marina Alta, separa esta comarca de la Marina Baixa y es una barrera orográfica clave en la distribución de precipitaciones.

Esta configuración geográfica que combina zonas montañosas y zonas costeras facilita la interacción entre las masas de aire frío descendentes desde los sistemas montañosos del interior y las corrientes cálidas y húmedas provenientes del Mediterráneo. La diferencia en temperaturas favorece la condensación del vapor de agua e intensifica los episodios de precipitación.

2.9.3 Viento

En Denia, la velocidad promedio del viento por hora varía a lo largo del año, con máximos y mínimos bien definidos.

- Periodo más ventoso: del 20 de octubre al 23 de abril (6,1 meses), con velocidades promedio superiores a 15,7 km/h.
 - Mes más ventoso: diciembre (18,1 km/h).
- Periodo más calmado: del 23 de abril al 20 de octubre (5,9 meses).
 - Mes más calmado: julio (13,3 km/h).

La dirección del viento también varía durante el año:

- Del norte: principalmente en marzo y abril.
- Del oeste: entre octubre y febrero.
- Del este: de mayo a octubre, con un máximo del 44 % en julio.

2.10 Cambio climático

Actualmente, el conocimiento sobre los efectos del cambio climático en las praderas marinas es todavía bastante limitado, porque muchas de las predicciones que se han realizado se basan en modelos con cierto grado de incertidumbre.

En la costa mediterránea española, se ha registrado un incremento de mortalidad de *Posidonia oceanica* en las Islas Baleares relacionados con eventos extremos de calentamiento, según estudios de Díaz-Almela et al. (2007) y Marbà & Duarte (2010). Sin embargo, para las praderas que habitan la costa levantina no se han visto las mismas tendencias, lo que sugiere un patrón regional (Guillén et al., 2013a; Ruiz et al., 2014). Por otro lado, el aumento de temperatura puede reducir la producción foliar y el crecimiento de los rizomas de *Posidonia oceanica* (Mayot et al., 2005), así como intensificar los procesos de anoxia en los sedimentos (García et al., 2012).

Aparte del calentamiento, hay otros fenómenos como el aumento en la frecuencia e intensidad de temporales, la elevación del nivel del mar y los cambios en la salinidad o turbidez del agua que podrían afectar negativamente a las distintas especies. No obstante, las praderas marinas también desempeñan un papel

fundamental como sumideros de carbono, lo que las convierte en elementos clave para las estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático (Pergent et al., 2012, 2014). Por ello, su conservación es una prioridad no solo desde una perspectiva ecológica, sino también como herramienta activa frente a la crisis climática actual.

2.10.1 El paso del temporal Gloria por las playas de Denia

El cambio climático está produciendo alteraciones significativas en los patrones meteorológicos y oceánicos con efectos directos sobre los ecosistemas costeros. Uno de los impactos más preocupantes es el aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, como temporales o elevaciones del nivel del mar, que amenazan tanto a los sistemas naturales como a las infraestructuras costeras. Un posible ejemplo de este tipo de fenómenos fue el temporal Gloria, que ocurrió en enero de 2020, que afectó gravemente al litoral mediterráneo español. Aunque no se puede atribuir directamente un evento extremo concreto al cambio climático, la mayoría de los estudios coinciden en que el calentamiento global está aumentando la frecuencia y la intensidad de este tipo de fenómenos.

En 2020 el temporal Gloria afectó gravemente a gran parte del litoral mediterráneo español, concretamente, entre los días 19 y 23 de enero. El temporal fue una combinación entre oleaje intenso, lluvias persistentes y vientos muy fuertes que afectaron a infraestructuras costeras, provocaron inundaciones y agravaron el estado de los ecosistemas litorales.

Este temporal ha sido considerado el episodio más intenso registrado de mar y viento en la comarca de la Marina Alta (periodo de retorno superior a 100 años en Figura 79). Durante su paso, se registraron rachas de viento de hasta 135 km/h y olas que superaron los 9 metros de altura de ola significativa, provocando graves daños en el litoral, especialmente en las playas del municipio de Denia (García & García, 2020).

En la zona de Denia, el día 20 de enero a las 4:00 h, el punto SIMAR 2085107 registró una altura de ola significativa (Hs) de 9,93 metros. Mediante datos horarios proporcionados por Puertos del Estado, se ha elaborado el gráfico que se muestra a continuación y se puede ver claramente el impacto del temporal Gloria que causó alturas de ola excepcionalmente altas y poco frecuentes para la región en comparación con el registro de olas durante los años anterior y posterior de 2020.

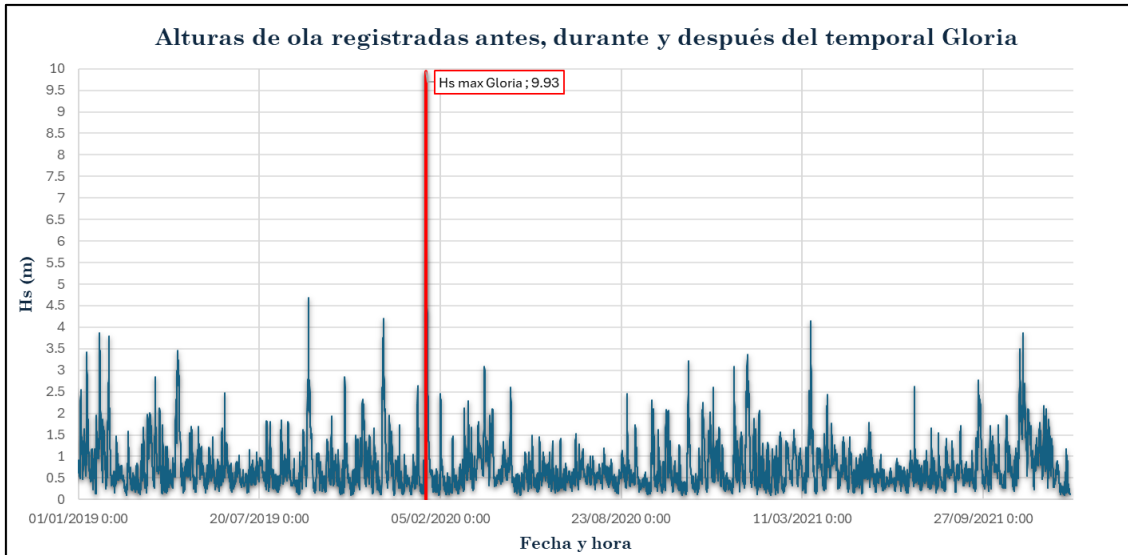


Figura 49: Alturas de ola registradas en el periodo 2019-2021.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos horarios SIMAR 2085107.

La zona más afectada en el tramo ente la Punta dels Molins y la Punta del Raset ha sido la playa de Les Marines, precisamente la playa Blay Beach. Esta es conocida por su ya de por sí reducido ancho de playa que, tras el temporal, ha disminuido aún más, llegando a desaparecer en algunas partes. En las imágenes satelitales a continuación se muestra cómo ha cambiado la línea de costa en la playa Blay Beach en el periodo entre junio de 2018 y marzo de 2020.

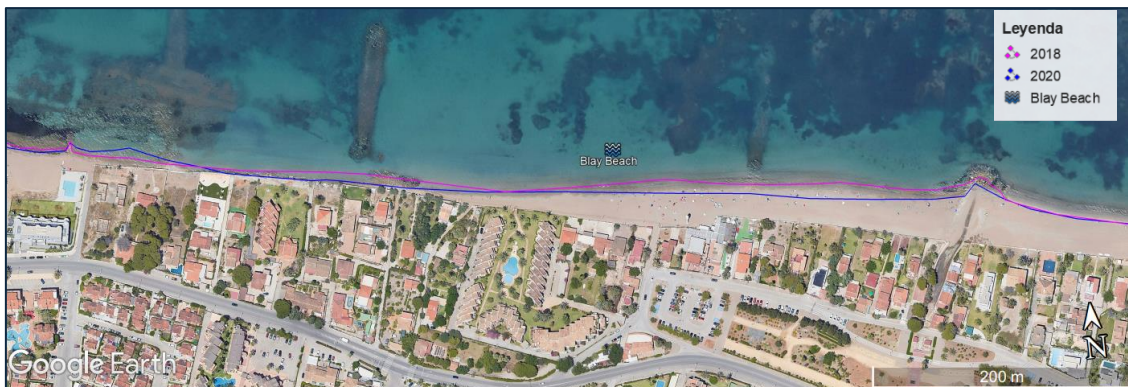


Figura 50: Comparativa de líneas de costa sobre ortofoto de 2024.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

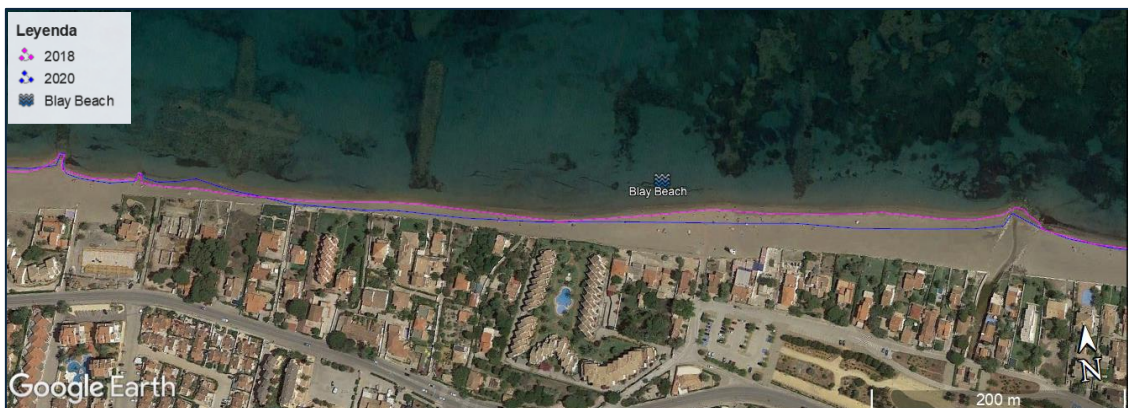


Figura 51: Comparativa de líneas de costa sobre ortofoto de junio de 2018.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

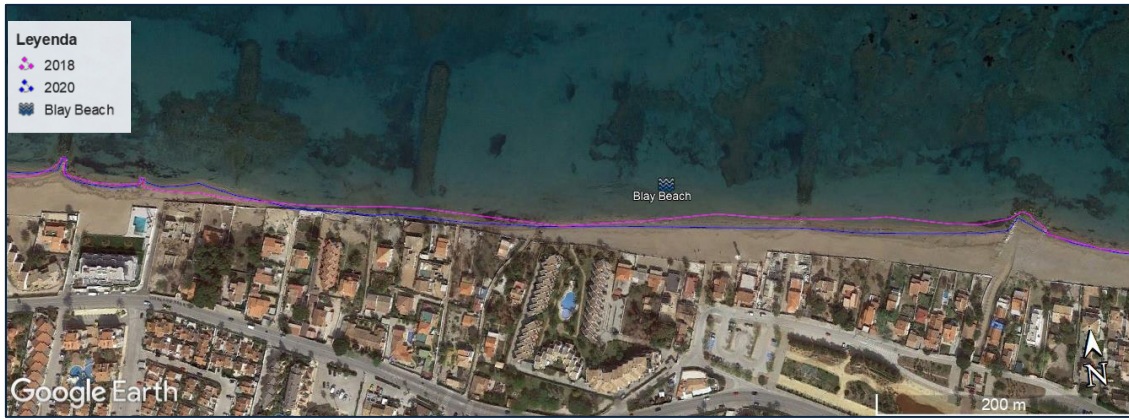


Figura 52: Comparativa de líneas de costa sobre ortofoto de marzo de 2020.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

En general en todas las playas el temporal ocasionó el retroceso de la línea de costa con procesos de erosión que llegaron a superar los 10 metros de ancho en algunos tramos. En cuanto a los daños provocados en cada una de las playas, estos se describen a continuación:

- **Playa de Les Bovetes:** durante los días del temporal toneladas de sedimento fueron desplazadas y la playa llegó a desaparecer. Además, equipamientos de uso público como duchas, lavapiés, tramos de pasarelas de madera y accesos fueron destrozados.
- **Playa de Les Marines:** gran parte de la playa quedó inundada hasta el día siguiente del temporal. Zonas adyacentes a la playa como la carretera de Les Marines también quedaron inundadas. Las consecuencias incluyeron numerosos árboles caídos, farolas derribadas, señales arrancadas, comercios inundados y otros daños en el entorno urbano próximo a la playa. Incluso, varios vehículos quedaron atrapados en montículos de arena en su intento de llegar a la playa. Por otro lado, en la zona de Blay Beach, el temporal causó graves daños en las edificaciones de primera línea de la playa derribando los muros de algunas viviendas.
- **Playa de Punta del Raset:** es la playa más cercana al centro de Denia por lo que fue una de las zonas más afectadas por el temporal. El mar sobrepasó completamente la playa, llegando hasta las calles, rotondas y locales comerciales, provocando daños en restaurantes, viviendas e instalaciones públicas. Equipamientos como torres de vigilancia, contenedores y señalización marítima fueron arrastrados o destruidos. La playa quedó en muy mal estado, con la arena desplazada hacia el interior urbano.



Figura 53: El mar entra en las viviendas de la playa de Les Marines de Denia (Alicante).

Fuente: País, E. (2020, 23 de enero). La borrasca Gloria, en imágenes. El País.



Figura 54: Varios vecinos intentan retirar sus vehículos por la subida de la marea en Denia (Alicante).

Fuente: País, E. (2020, 23 de enero). La borrasca Gloria, en imágenes. El País.



Figura 55: El temporal golpeando los muros en la zona del Blay Beach.

Fuente: García & García, 2020.

2.10.2 Escenarios de retroceso costero en ausencia de medidas de adaptación

Para evaluar la posible evolución de la línea de costa en la playa de Les Marines ante escenarios futuros de cambio climático, se ha utilizado la cartografía oficial del programa PIMA Adapta, elaborada por la Conselleria de Medio Ambiente, Infraestructuras y Territorio de la Generalitat Valenciana. Esta fuente proporciona una caracterización detallada del retroceso costero esperado en caso de no implementarse medidas de adaptación, bajo distintos escenarios climáticos definidos por los modelos RCP (Representative Concentration Pathways).

Se consideran seis combinaciones que incluyen horizontes temporales a 2050 y 2100, bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, y percentiles 50 y 95 de retroceso. La escala del análisis es 1:25.000 y permite una evaluación espacialmente precisa del impacto previsto sobre la línea de costa. El escenario RCP 4.5 supone una estabilización moderada de las emisiones, mientras que el RCP 8.5 representa un aumento continuado y elevado de las mismas. Por su parte, el percentil 95 refleja una situación más conservadora, en la que solo un 5% de los modelos climáticos proyectan retrocesos superiores. La Tabla 1 resume los seis escenarios considerados, que permiten anticipar la evolución de la línea de costa bajo distintas condiciones climáticas y plazos temporales.

Tabla 1: Escenarios climáticos sobre el retroceso costero.

Fuente: Elaboración propia.

Escenario	Año	RCP	Percentil	Descripción
1	2050	RCP 4.5	50 (medio)	Escenario moderado a corto plazo
2	2050	RCP 4.5	95 (extremo)	Escenario extremo a corto plazo
3	2100	RCP 4.5	50 (medio)	Escenario moderado a largo plazo
4	2100	RCP 4.5	95 (extremo)	Escenario extremo a corto plazo
5	2100	RCP 8.5	50 (medio)	Escenario moderado con altas emisiones
6	2100	RCP 8.5	95 (extremo)	Escenario extremo con altas emisiones

En las siguientes figuras se muestran estos escenarios superpuestos sobre la zona de estudio.

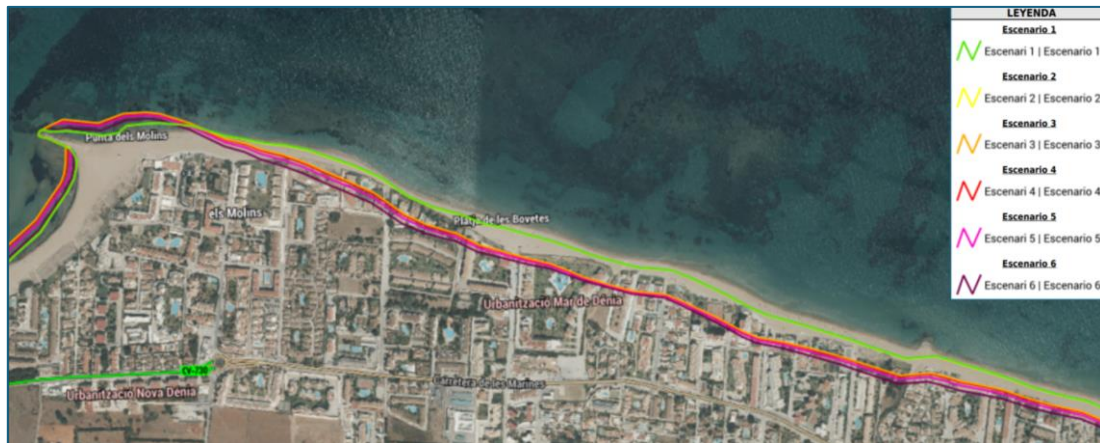


Figura 56: Escenarios de retroceso de la línea de costa de la playa de Les Bovetes.

Fuente: Visor GVA.



Figura 57: Escenarios de retroceso de la línea de costa de la playa de Les Marines.

Fuente: Visor GVA.



Figura 58: Escenarios de retroceso de la línea de costa de la playa de Les Albaranes y la playa de la Punta del Raset.

Fuente: Visor GVA.

2.11 Legislación vigente

La *Posidonia oceanica* está protegida por la Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, conocida como Directiva Hábitats, donde las praderas de *Posidonia oceanica*, consideradas de interés prioritario y por lo tanto objeto de protección especial, están incluidas en el Anexo I de tipos de hábitats naturales de interés comunitario cuya conservación requiere la designación de Zonas Especiales de Conservación (ZEC).

En el marco jurídico español, la protección de las fanerógamas marinas se refuerza a través de varias normativas:

- Ley 42/2007, del Patrimonio Natural y la Biodiversidad (BOE n.º 299, de 14 de diciembre de 2007) que establece el marco legal para la conservación del patrimonio natural en España y sustituye a la Ley 27 de marzo, de la Conservación de los espacios naturales y de la flora y fauna silvestre (BOE n.º 74, de 28 de marzo de 1989).
- Real Decreto 1997/1995, de 7 de diciembre (BOE n.º 130 de 28 de diciembre de 1995) por el que se establecen medidas para contribuir a garantizar la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. Protege indirectamente a *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* al incluir sus hábitats (praderas de fanerógamas marinas) como hábitats prioritarios.
- Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero (BOE n.º 46, de 23 de febrero de 2011) establece el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial, en el que se incluye específicamente a la *Posidonia oceanica* y la *Cymodocea nodosa*, lo que implica una protección reforzada frente a cualquier actividad que pueda suponer su deterioro o destrucción.

Además, a nivel internacional, la *Posidonia oceanica* está incluida en el Anexo del Convenio de Berna que enumera especies de flora estrictamente protegidas. Aunque la *Cymodocea nodosa* no se menciona específicamente, la protección de sus hábitats se aborda de manera general en el convenio. El Convenio de Berna es un tratado internacional adoptado el 19 de septiembre de 1979 en Berna, Suiza, con el objetivo de conservar la vida silvestre y los hábitats naturales en Europa con nombre oficial "Convenio relativo a la conservación de la vida silvestre y del medio natural en Europa", y entró en vigor en 1982.

Finalmente, a nivel autonómico, cabe señalar la Orden 18/2023, de 30 de junio, de la Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica, por la que se aprueba la cartografía oficial de praderas de fanerógamas marinas en la Comunidad Valenciana (disponible en Visor GVA), herramienta fundamental para su protección efectiva y la planificación territorial (Generalitat Valenciana, 2023).

3 CLIMA MARÍTIMO

En este apartado se analiza el clima marítimo que predomina en la zona de Denia, Comunidad Valenciana. El clima marítimo abarca un conjunto de condiciones físicas del mar con sus correspondientes características que definen el entorno marino. A continuación, se enumeran las diferentes variables que se analizan:

- Oleaje: se estudian la altura significativa de ola, periodo y la dirección predominante tanto en condiciones medias, como en condiciones extremas.
- Nivel del mar: se consideran las mareas astronómicas y meteorológicas.
- Viento: se evalúa la velocidad y la dirección predominante.

Estos datos son esenciales para entender la dinámica costera, a partir de ellos se eligen las condiciones de contorno y los datos de entrada para el modelo en WAPO que se usa para simular la evolución de la morfodinámica del litoral y cómo influyen en la distribución de las praderas de *Posidonia oceanica*.

Los aspectos fundamentales del clima marítimo que se abordan en este apartado se estudian a partir de datos proporcionados por Puertos del Estado, que incluyen registros históricos de oleaje disponibles por mediciones realizadas con boyas en aguas profundas y series sintéticas generadas por modelos numéricos del sistema SIMAR.

3.1 Nivel del mar

El nivel del mar se define como la posición media de la superficie libre del mar cuyas oscilaciones son causadas por movimientos de largo periodo debidos a las mareas meteorológicas y astronómicas. Las mareas meteorológicas son las debidas a las variaciones de la presión atmosférica y la acción del viento. Las mareas astronómicas son periódicas y producen ascensos y descensos del nivel del mar como respuesta a las acciones del Sol y la Luna y otros astros (ROM 3.1-99).

Para el análisis de la marea astronómica y la marea meteorológica, se han empleado los datos proporcionados por Puertos del Estado. El conjunto de datos REDMAR está formado por mediciones obtenidas a partir de la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado. Esta red tiene como fin monitorizar los datos del nivel del mar y generar series históricas para su posterior análisis. En este caso se ha recurrido al mareógrafo de Gandía ubicado en el puerto, como más cercano a la zona estudiada.

En la Figura 59 se pueden ver detalles de la ubicación. Los datos obtenidos corresponden al nivel del mar por horas, abarcando el periodo comprendido entre julio de 2007 y febrero de 2025.



Figura 59: Ubicación del mareógrafo de Gandía.

Fuente: Puertos del Estado, 2025

Con el objetivo de caracterizar la variabilidad del nivel del mar en la zona de estudio, se han graficado las mediciones realizadas por el mareógrafo de Gandía durante el periodo 2007-2025 (Figura 60). Los valores están expresados en metros respecto al Cero REDMAR. Se puede ver que las oscilaciones son regulares, lo que refleja el carácter cíclico de las mareas y una amplitud de aproximadamente $\pm 0,4$ m con respecto al nivel medio. Los picos se deben a fenómenos meteorológicos que pueden ser temporales y borrascas. Además, se ha calculado la carrera de marea máxima, que es la diferencia entre el valor más alto y el valor más bajo registrados del nivel del mar, siendo esta de 1,01 metros.

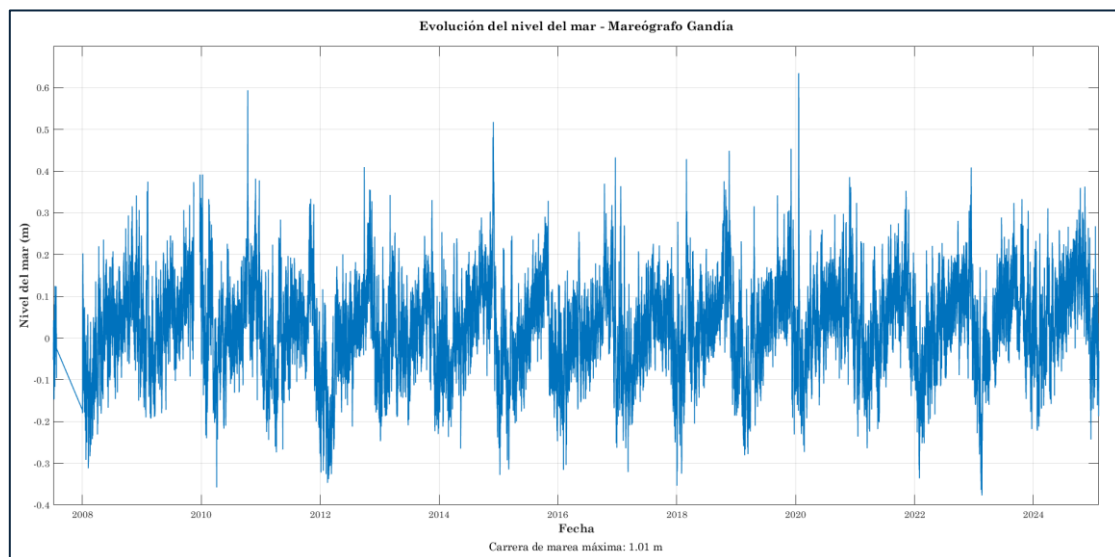


Figura 60: Evolución del nivel del mar registrado por el mareógrafo de Gandía (2007–2025).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Puertos del Estado, 2025.

Adicionalmente, se ha analizado la relación entre la marea meteorológica y la altura de ola significativa (H_s). La Figura 61 presenta un diagrama de dispersión correspondiente al periodo 2007–2025, en el que se aprecia una ligera tendencia ascendente, indicando que los valores más altos de H_s tienden a coincidir con aumentos en la marea meteorológica. Esta relación muestra que los eventos de oleaje elevado suelen ir acompañados de una subida del nivel de la mar debida a

condiciones meteorológicas, como el viento fuerte o la baja presión atmosférica. Cuando esto ocurre el impacto sobre la costa puede ser mayor, lo que podría afectar la estabilidad de las praderas marinas y hacer más vulnerables los ecosistemas costeros.

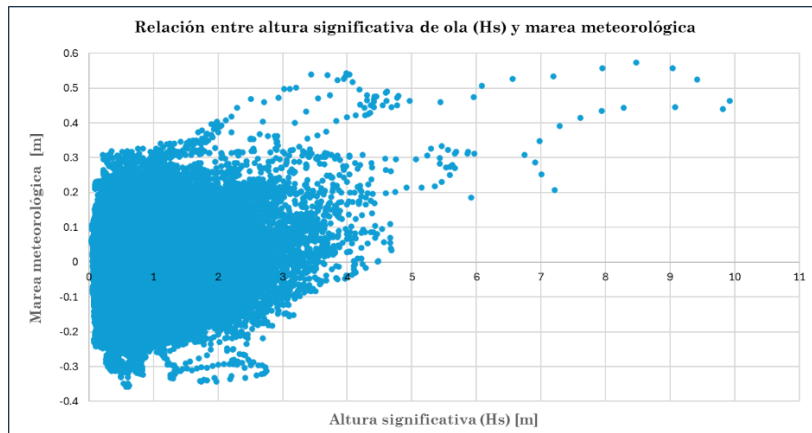


Figura 61: Relación entre la altura de ola significativa (H_s) y la marea meteorológica (2007-2025).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Puertos del Estado, 2025.

3.2 Niveles de referencia

El mareógrafo de Gandía está situado a unos 200 m del Muelle sur, junto con la rampa ro ro. El clavo geodésico más cercano es “Nuevo mareógrafo”. El cero del puerto (cero del mareógrafo) está a 1,726 m bajo dicho clavo y el NMMA a 1,865 m.

Según el informe de Puertos del Estado, en el caso de Gandía, el cero hidrográfico coincide con la mínima bajamar astronómica (BMMI) calculada para el puerto por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM).

En este caso, el nivel de la mínima bajamar astronómica es de -0,16 m como se puede ver en el esquema de la

Figura 62. Por lo que, el cero hidrográfico se encuentra 1,886 m bajo el clavo.

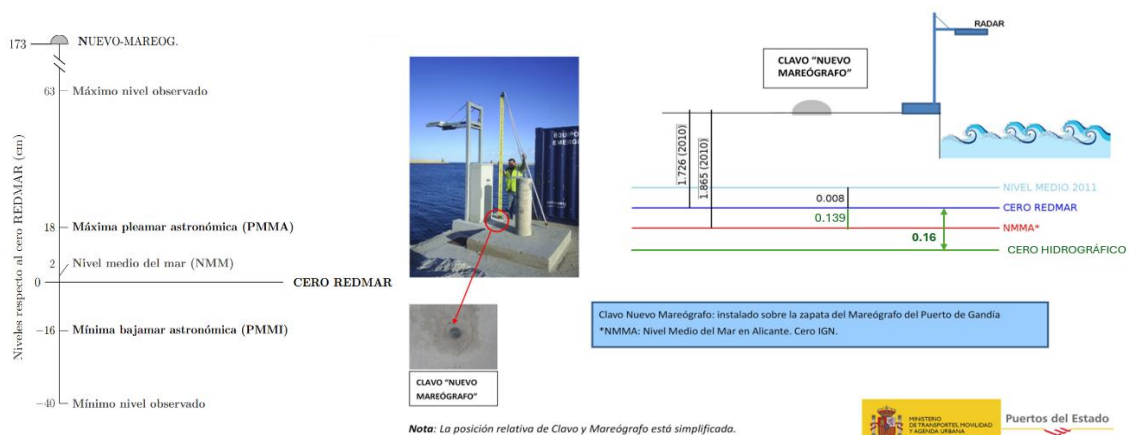


Figura 62: Esquema datum mareógrafo REDMAR Gandía y referencia del nivel del mar.

Fuente: Puertos del Estado, 2025.

3.3 Base de datos de oleaje

Con el fin de hacer un estudio completo del oleaje en la zona de Denia, se utilizan dos fuentes de datos complementarios de información: datos observados y datos modelados. Por un lado, los registros históricos de la boya de Valencia, perteneciente a la Red de Boyas de Puertos del Estado, que proporciona información horaria desde septiembre de 2005 hasta febrero de 2025. Y, por otro lado, datos del punto SIMAR (Sistema Integrado de Información del Medio Ambiente Marino) que están formados por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico, por lo que, son datos simulados que no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Los resultados obtenidos se basan en la aplicación de modelo de predicción de tercer orden (WAM). Este modelo de predicción de oleaje se emplea para caracterizar el régimen medio del clima marítimo anual, abarcando tanto condiciones de calma como de tormenta. Es un modelo híbrido que resuelve la ecuación bidimensional del transporte de energía del espectro de oleaje, considerando tres procesos clave:

- La generación del oleaje inducido por el viento.
- La interacción no lineal entre olas.
- La disipación energética por rotura en aguas profundas, fricción con el fondo y percolación en zonas someras.

En este caso se utilizan los datos del punto SIMAR 2085107 cuya serie tiene una cobertura más extensa y que se encuentra más próximo al área de estudio, con datos desde enero de 1958 hasta febrero de 2025, con un total de 67 años.

Las coordenadas del punto SIMAR 2085107 son:

- Longitud: 0,083° E
- Latitud: 38,917° N
- Profundidad: Indefinida

Por otro lado, la boya seleccionada para el estudio es la de Valencia (Figura 63) que es de tipo direccional, ya que las otras dos (Boya Costera de Valencia I y Boya Costera de Valencia II) que se encuentran en cercanía, son boyas de tipo escalar que no proporcionan información sobre la dirección del oleaje.

Las coordenadas de la Boya de Valencia son:

- Longitud: 0,20° E
- Latitud: 39,51° N
- Profundidad: 260 m

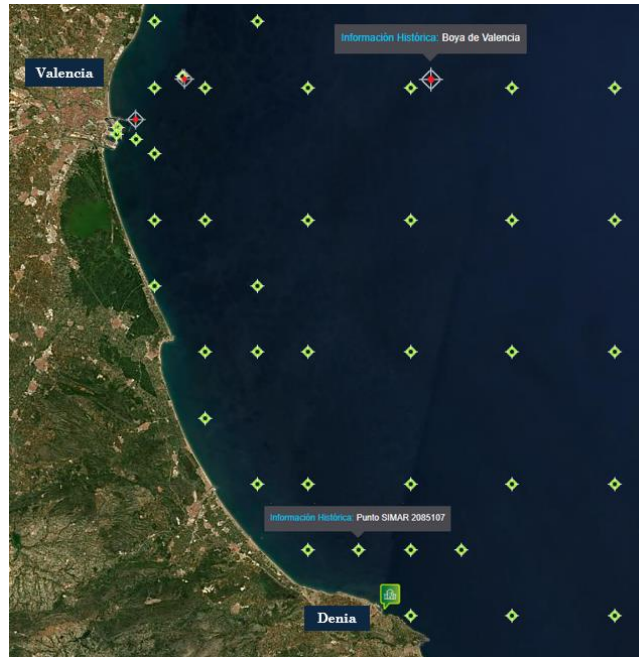


Figura 63: Ubicación Boya de Valencia y punto SIMAR 2085107.

Fuente: Puertos del Estado, 2025.

3.3.1 Régimen de vientos

El análisis del régimen de vientos resulta fundamental para la caracterización del clima marítimo, ya que el viento constituye el principal agente generador del oleaje en zonas costeras. En el caso de estudio, se han analizado series temporales de viento obtenidas a partir de bases de datos de Puertos del Estado. El modelo atmosférico utilizado para generar los campos de vientos ha cambiado a lo largo del tiempo. Hasta octubre de 2018 se utilizó el modelo HIRLAM de AEMET, un modelo atmosférico mesoescalar e hidrostático. A partir de ese año, la AEMET sustituyó HIRLAM por el HARMONIE-AROME, modelo de mesoescala, no hidrostático, con mayor resolución espacial que su predecesor. Los datos de viento facilitados corresponden a una altura de 10 metros de altura sobre el nivel medio del mar, y no reproducen efectos geográficos.

Con los datos del nodo SIMAR 2085107 se ha obtenido la distribución conjunta de la dirección de procedencia y velocidad media del viento en m/s para el periodo 1958–2024. En la Figura 64 se representan gráficamente estas distribuciones, observándose que las velocidades más frecuentes se sitúan entre 2 y 6 m/s.

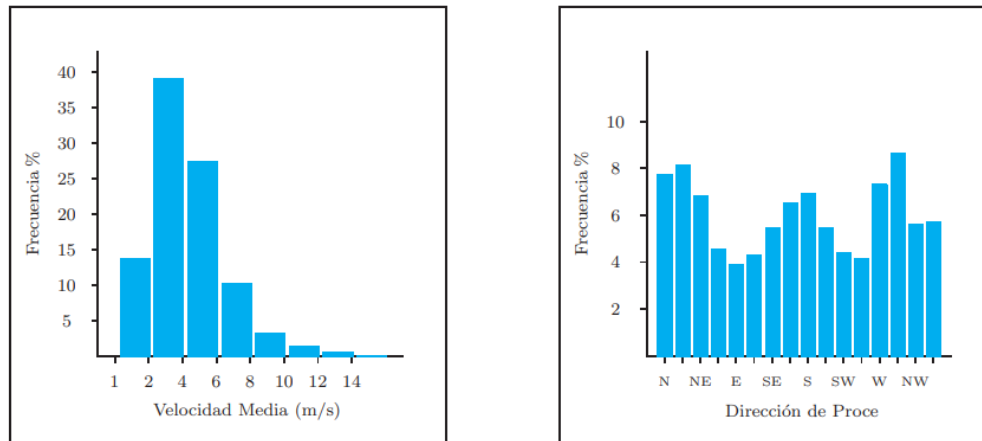


Figura 64: Distribución conjunta de dirección y velocidad media (anual).

Fuente: Puertos del Estado, 2025.

Esta información se detalla numéricamente en la Tabla 2, donde se recoge el porcentaje de ocurrencia de cada combinación de dirección y velocidad, permitiendo identificar no solo las direcciones dominantes del viento, sino también su intensidad más habitual.

Tabla 2: Velocidad Media (Ve) - Dirección de Procedencia en %.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de punto SIMAR 2085107 Puertos del Estado, 2025.

Dirección	Ve (m/s)									Total
	< 1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	>14,0	
Calmas	4,985									4,985
N 0		0,982	3,499	2,090	0,694	0,245	0,105	0,036	0,023	7,674
NNE 22,5		0,985	3,170	2,204	0,998	0,407	0,193	0,065	0,026	8,048
NE 45		0,961	2,829	1,766	0,693	0,289	0,119	0,038	0,025	6,720
ENE 67,5		0,891	2,218	1,022	0,271	0,102	0,037	0,016	0,006	4,563
E 90		0,813	2,098	0,768	0,123	0,04	0,009	0,002		3,853
ESE 112,5		0,742	2,024	1,080	0,258	0,095	0,006	0,001		4,206
SE 135		0,801	2,244	1,768	0,468	0,119	0,005			5,405
SSE 157,5		0,890	2,353	2,105	0,954	0,183	0,010			6,495
S 180		0,949	2,773	2,183	0,791	0,193	0,032	0,004		6,925
SSW 202,5		0,859	2,406	1,512	0,430	0,129	0,029	0,007		5,372
SW 225		0,840	2,197	1,097	0,247	0,027	0,003			4,411
WSW 247,5		0,737	1,783	1,202	0,30	0,056	0,015	0,004		4,097
W 270		0,768	2,166	2,381	1,175	0,549	0,211	0,066	0,021	7,337
WNW 292,5		0,718	2,357	3,060	1,597	0,494	0,280	0,126	0,051	8,683
NW 315		0,830	2,314	1,641	0,475	0,147	0,064	0,038	0,015	5,524
NNW 337,5		0,886	2,758	1,424	0,399	0,141	0,053	0,030	0,011	5,702
Total	4,985	13,652	39,189	27,303	9,873	3,216	1,171	0,433	0,178	100%

La Figura 65 muestra la rosa de vientos correspondiente al periodo analizado, en la que se representa la frecuencia de ocurrencia del viento según su dirección de procedencia. Se observa un claro predominio de los vientos provenientes del Oeste-

Noroeste (WNW), con una frecuencia aproximada del 8,5%, seguidos por los sectores Noreste-Norte (NNE) con un 8% y Norte (N) con un 7,8%.

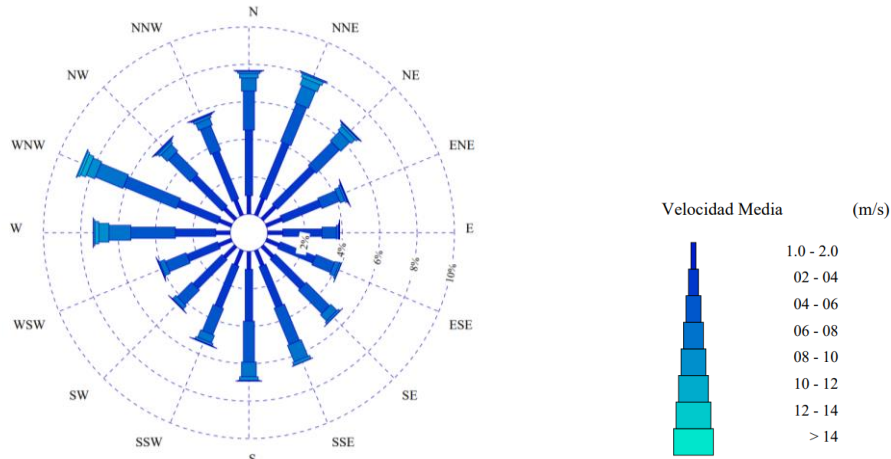


Figura 65: Rosa de viento anual.

Fuente: Puertos del Estado, 2025.

3.4 Caracterización del oleaje

En este apartado se presentan algunos estadísticos básicos del oleaje como son el histograma, la función de distribución de la altura de ola significativa y el periodo pico. Con ellos se analiza:

- La frecuencia de ocurrencia de determinados valores de altura de ola y periodo.
- Rosas de oleaje - anual y estacional, que permiten conocer las direcciones de oleaje predominantes durante el año y también en las distintas estaciones.
- El régimen medio y extremal del oleaje.

3.4.1 Estadísticos básicos del oleaje

La serie de altura de ola significativa para el periodo comprendido entre enero de 1958 y febrero de 2025 es la que se muestra a continuación (Figura 66):

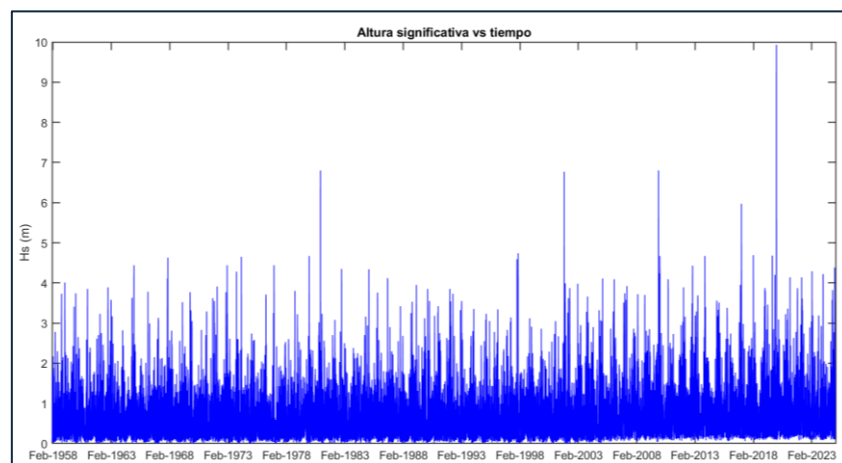


Figura 66: Serie de altura de ola significativa, 1958-2025.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Puertos del Estado, 2025.

Para evaluar mejor el comportamiento del oleaje y su impacto es importante calcular cuál es la altura de ola más probable y la probabilidad de excedencia. La altura de ola más probable hace referencia a la altura de ola que ocurre con mayor frecuencia durante un periodo de observación.

En el histograma a continuación (Figura 67), obtenido con los datos del punto SIMAR, se observa que la altura de ola más común y probable es de 0,3 metros con una frecuencia del 29%.

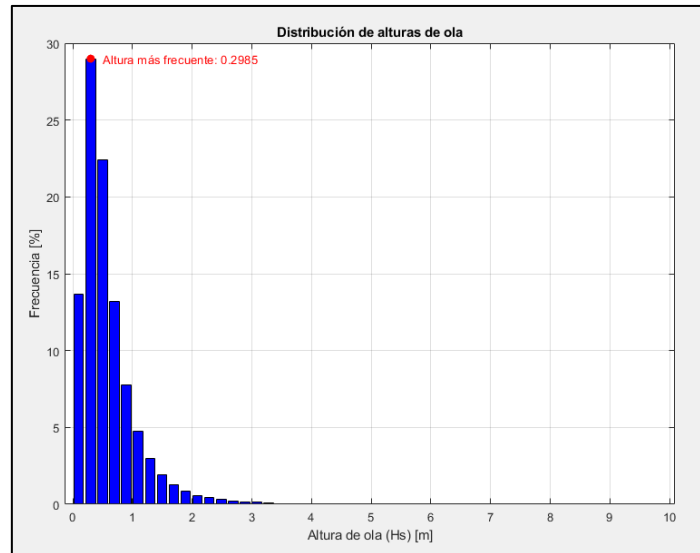


Figura 67: Distribución de alturas de ola.

Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad de excedencia describe la probabilidad de que una ola determinada sea superior a un valor específico. Una probabilidad de excedencia alta indica que las olas de esa altura o mayores son comunes mientras que una probabilidad baja indica que son poco frecuentes. Esta herramienta permite identificar eventos de olas extremas y prevenir daños a largo plazo por fenómenos marinos extremos.

En este caso, como se puede ver en el gráfico de la Figura 68, las olas de al menos 0,1 metros son extremadamente comunes y aparecen en el 95% de las observaciones. Al final de la curva hay varios puntos dispersos que corresponden a alturas de ola grandes y raras de entre 7 y 10 metros de altura que son poco frecuentes y ocurren en menos del 10% de los casos. Estos últimos, son esenciales a considerar para los escenarios de régimen extremo ya que, aunque tienen baja probabilidad de ocurrir, cuando lo hacen, sus impactos pueden ser significativos.

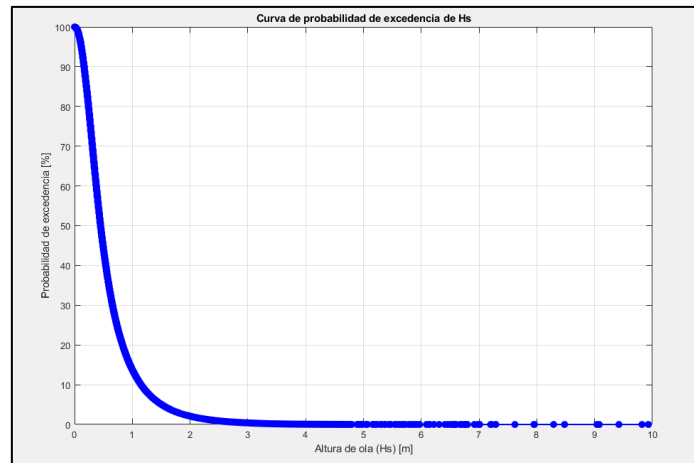


Figura 68: Probabilidad de excedencia.

Fuente: Elaboración propia.

La rosa de oleaje anual se muestra en la Figura 69, donde se observa la clara dominancia de oleaje precedente del noreste (NE) con una alta frecuencia de olas en el rango de 0,5 a 1,5 metros, seguida por el estenordeste (ENE), el estesudeste (ESE) y el este (E), de mayor a menor frecuencia respectivamente.

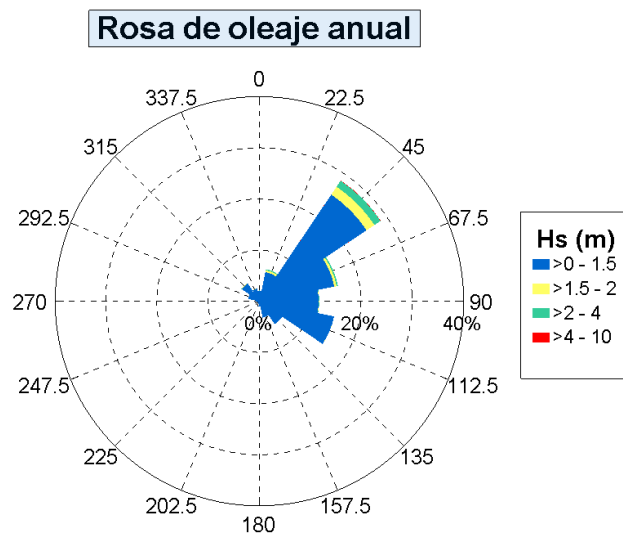


Figura 69: Rosa anual de altura de ola significativa.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Puertos del Estado, 2025.

Las rosas de oleaje correspondientes a cada estación son las siguientes:

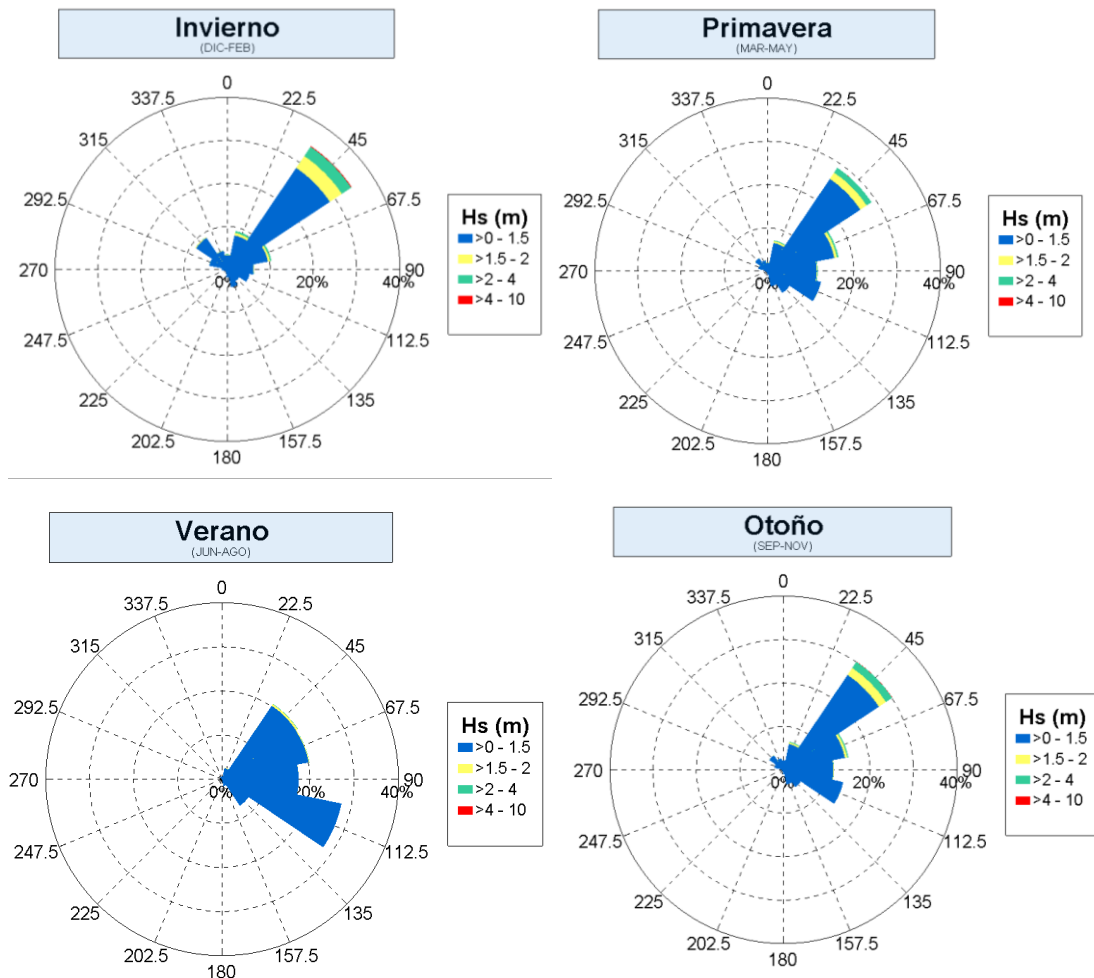


Figura 70: Rosas de altura de ola significativa para cada estación del año.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Puertos del Estado, 2025.

Las direcciones que caracterizan el oleaje en aguas profundas son: NNE, NE, ENE, E, ESE y SE. Como se puede ver, destaca la dominancia de alturas de ola significativas inferiores a 1,5 m durante todo el año. En invierno el oleaje proviene principalmente del (NE) lo cual es típico del Mediterráneo durante episodios de viento o borrascas. Se observan los mayores valores de altura de ola del año, con alturas superiores a 2 m e incluso algunos casos con valores superiores a 4 m, pudiendo alcanzar los 10 metros. A continuación, en primavera la dirección dominante es similar al invierno con oleaje desde el NE-ENE. Sin embargo, la altura de ola es ligeramente menor que en invierno principalmente de 1,5 – 2m, alcanzando 4 metros en algunos casos. En verano se observa un cambio de patrón, con más eventos provenientes del este-sudeste (ESE), seguidos por el noreste (NE), generalmente con una altura de ola menor a 1,5 m, siendo el periodo más calmado. En otoño vuelve a predominar la dirección NE-ENE y alturas de ola en ocasiones, mayores a 1,5 – 2 m.

Analizando la probabilidad conjunta de altura de ola significativa (Hs) condicionada a un valor determinado de dirección, se obtiene el siguiente gráfico (Figura 71):

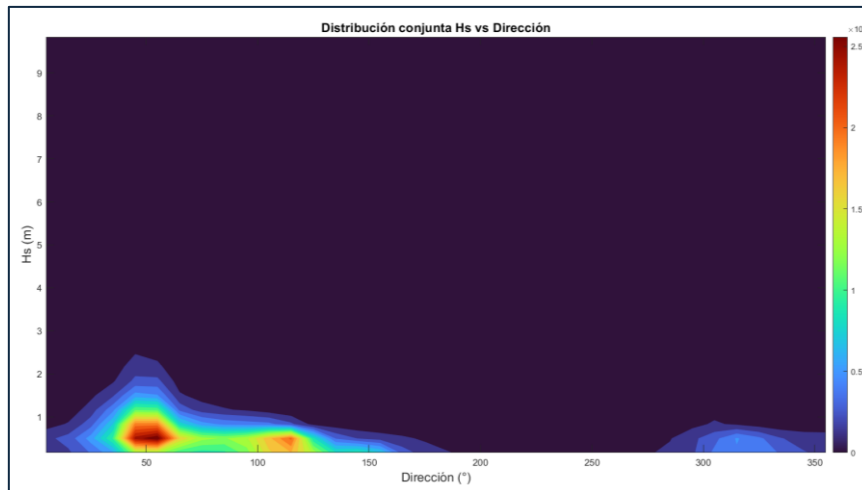


Figura 71: Probabilidad conjunta Hs/Dirección – anual.

Fuente: Elaboración propia.

Domina el oleaje en el sector comprendido entre 40° y 70°, lo que indica que la mayoría de las olas llegan desde el noreste (NE) y estenordeste (ENE). En cuanto a las alturas, las más frecuentes están entre 0,5 y 2 metros.

Por otro lado, en la Figura 72 se presenta también la distribución conjunta de la altura significativa del oleaje (Hs) y el periodo pico (Tp).

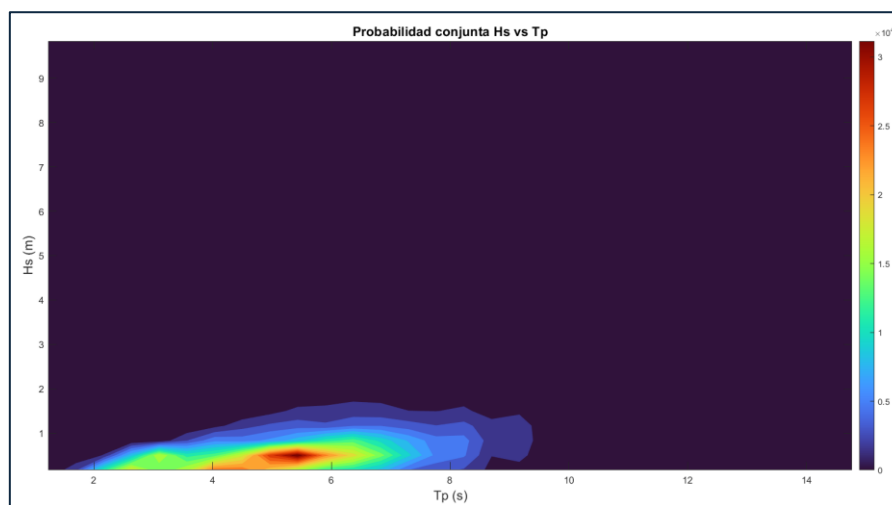


Figura 72: Probabilidad conjunta Hs/Tp – anual.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la mayoría de los registros se concentran en el rango de 0,5 a 1,5 metros de altura significativa, con valores de Tp comprendidos entre 5 y 7 segundos. Por lo tanto, al tener esta combinación de parámetros, el oleaje predominante en la zona de estudio se caracteriza por ser de baja energía y con periodos relativamente cortos a moderados. Asimismo, se aprecia una tendencia entre ambos parámetros: a mayor altura significativa, el periodo pico también tiende a incrementarse, lo cual es consistente con el comportamiento físico esperado del oleaje en aguas profundas. No obstante, esta tendencia no es lineal ni uniforme.

3.4.2 Régimen medio de oleaje

3.4.2.1 Régimen medio anual escalar

El régimen medio anual de oleaje permite conocer las condiciones medias anuales de oleaje, y se obtiene mediante la aplicación CAROL V1.0 (programa implementado en el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria) a la serie de datos disponible. Tras realizar el ajuste de la función de distribución de altura de ola significativa y periodo medio con la mayor parte del conjunto de datos (10-99,5 %) mediante el Método de ajuste gráfico del papel probabilístico, la que proporciona un mejor ajuste es la función Log-Normal, con un coeficiente de correlación R^2 de 0,9991, superior a 0,99, lo que indica un buen ajuste de la función de distribución teórica a los datos experimentales.

La función de distribución Log-Normal está expresada por la siguiente ecuación:

$$y = F(x) = 1/(\sqrt{2\pi}\sigma^*) \int_0^x 1/x \exp \left[-1/2((\log x - \mu^*)/\sigma^*)^2 \right] dx$$

Donde:

- μ^* : es el parámetro de localización, o media de la distribución normal original.
- σ^* : es el parámetro de escala, o desviación típica de la distribución normal original.

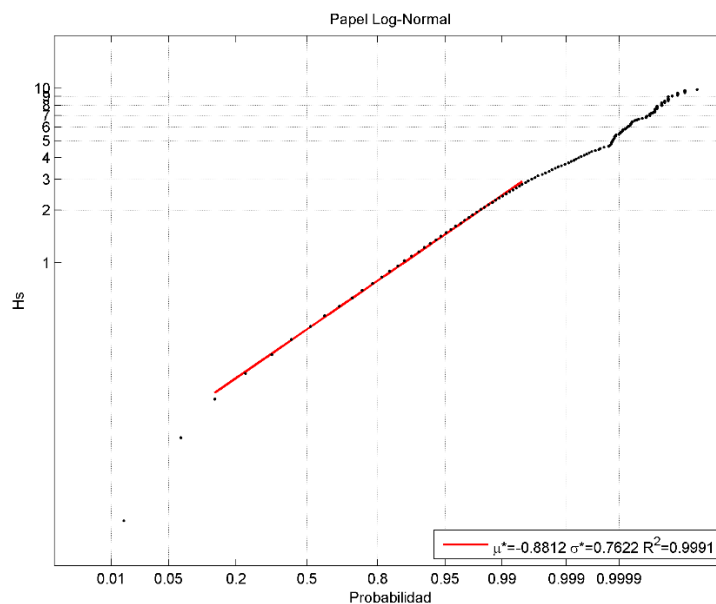


Figura 73: Régimen medio anual escalar de oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2 Frecuencia conjunta de altura significativa y periodo pico

La Tabla 3, muestra la relación del periodo de pico con la altura de ola significativa, donde la mayor probabilidad se atribuye a la altura del oleaje igual a 0,5 y 1 metro y periodo de pico igual a 5 y 6 segundos.

Tabla 3: Tabla Periodo de Pico (Tp) - Altura Significante (Hs) en %.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de punto SIMAR 2085107 Puertos del Estado, 2025.

Hs (m)	Tp (s)											Total
	≤1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	>10,0	
≤ 0,5	0,833	8,637	9,451	13,302	12,476	6,962	3,071	1,191	0,423	0,086		56,432
1,0	0,002	0,264	3,135	4,091	8,253	7,571	3,847	1,837	0,721	0,236		29,957
1,5		0,001	0,041	1,035	1,689	1,956	1,626	1,173	0,686	0,367		8,574
2,0				0,044	0,504	0,740	0,554	0,496	0,338	0,271		2,947
2,5					0,042	0,305	0,314	0,201	0,156	0,171		1,189
3,0					0,001	0,041	0,174	0,131	0,077	0,073		0,497
3,5						0,001	0,061	0,090	0,068	0,029		0,249
4,0							0,005	0,039	0,030	0,019		0,093
4,5								0,007	0,014	0,016		0,037
5,0								0,002	0,005	0,006		0,013
> 5,0										0,014		0,014
Total	0,835	8,902	12,627	18,472	22,965	17,576	9,652	5,167	2,518	1,288		100,00%

3.4.2.3 Régimen medio anual direccional

En la siguiente tabla se presenta la altura de ola significativa del régimen medio anual direccional del oleaje.

Variable medida: Hs					
direcciones(*)	prob. direccion	Hs _{50%}	Hs _{90%}	Hs _{99%}	Hs ₁₂
N	0.0219	0.4000	1.1300	2.2800	2.9900
NNE	0.0586	0.5800	1.4500	2.6300	3.6644
NE	0.2905	0.7100	1.6000	3.0800	4.2737
ENE	0.1515	0.5200	1.1500	2.2800	3.1696
E	0.1222	0.4200	0.8500	1.5600	2.4300
ESE	0.1453	0.3600	0.6400	0.9400	1.2700
SE	0.0578	0.2500	0.5100	0.7900	0.9800
SSE	0.0317	0.2100	0.4600	0.7300	0.9003
S	0.0105	0.3000	0.5100	0.8200	1.1500
SSW	0.0049	0.2900	0.4300	0.6470	1.1455
SW	0.0036	0.3000	0.4400	0.7215	0.9500
WSW	0.0039	0.2900	0.4600	0.8300	1.3248
W	0.0071	0.3000	0.5900	1.0583	1.4338
WNW	0.0209	0.3900	0.9000	1.4400	1.9672
NW	0.0445	0.3700	0.8900	1.6500	2.1100
NNW	0.0249	0.3300	0.7150	1.7960	2.5103

Figura 74: Altura de ola significativa del régimen medio anual direccional del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

El periodo pico es un indicador importante de la energía de un espectro de oleaje que está relacionado con la longitud de onda y la energía de las olas. En el histograma de la Figura 75 se representa la distribución del periodo pico en segundos para el periodo comprendido entre enero de 1958 y febrero de 2025.

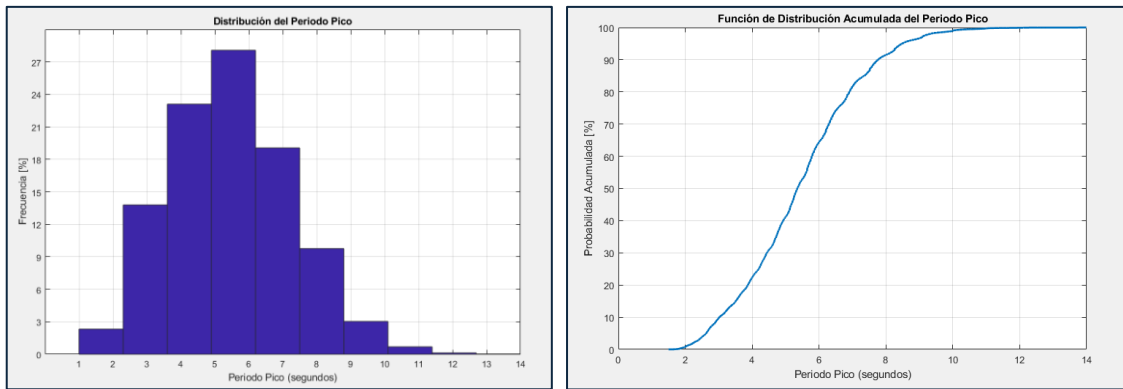


Figura 75: Distribución del periodo pico (1958-2025).

Fuente: Elaboración propia.

El periodo pico más frecuente está alrededor de 5-6 segundos con una frecuencia de aproximadamente 27%. La distribución tiene una forma asimétrica con mayor presencia de periodos pico bajos. Los periodos por encima de los 9 segundos son poco frecuentes. Cabe destacar que la predominancia de periodos de pico más cortos se asocia a mar de viento (vientos locales) que generan más turbulencia en la zona de rompiente y esto puede favorecer la suspensión de sedimentos y la erosión en las playas. Generalmente, los periodos cortos generan mayor número de impactos en las estructuras y es importante tenerlo en consideración a la hora de diseñar estructuras como diques, espigones, etc.

El periodo pico tiene influencia directa sobre las praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* con afección sobre la estabilidad y la capacidad de supervivencia de las especies. Con periodos de pico cortos de entre 4 y 7 segundos las praderas pueden reducir la erosión y amortiguar la fuerza del oleaje, además, favorecen la retención de los sedimentos y así ayudan a mantener la estabilidad del hábitat. Sin embargo, cuando la energía del oleaje aumenta debido a eventos más extremos, las praderas pueden sufrir degradaciones y exponer la costa a una mayor erosión. La *Cymodocea nodosa* es más vulnerable al oleaje de mayor periodo pico ya que sus raíces son más superficiales y se desprenden más fácilmente en condiciones de alta turbulencia y generalmente se ubica en zonas de arena móvil que se remueve más fácilmente por oleaje de periodo corto. En cuanto a la *Posidonia oceanica*, sus rizomas (tallos enterrados en el sedimento) son más gruesos y anclan mejor el sustrato junto con su capacidad de formar mats (estructuras compactas de raíces y sedimentos) que protegen el lecho marino.

3.4.2.4 Relación entre la altura de ola significativa y el periodo pico

Para analizar el comportamiento conjunto de los principales parámetros del oleaje, la altura de ola significativa (H_s) y el periodo pico (T_p), se representa la relación que hay entre ellos.

En el diagrama de dispersión (Figura 76) se puede ver claramente como a medida que aumenta la altura de oleaje, también aumenta el periodo pico. No obstante, debido a la existencia de distintos eventos que suceden a la vez, como puede ser oleajes de fondo combinados con oleajes locales, la relación no es lineal.

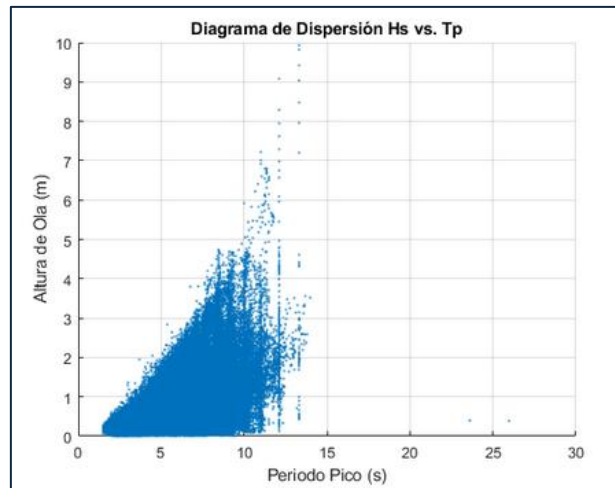


Figura 76: Diagrama de dispersión H_s vs. T_p .

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en el mapa de calor (Figura 77) destaca la frecuencia con la que se pueden ver alturas de ola de entre 0,5 y 2 metros y periodos pico de entre 3 y 8 segundos. Este sería el régimen habitual de oleaje en la zona. En cuanto a la frecuencia relativa de aparición de combinaciones entre uno y otro parámetro, se puede ver que el más común es altura de ola 1 m y periodo pico de aproximadamente 5,5 s.

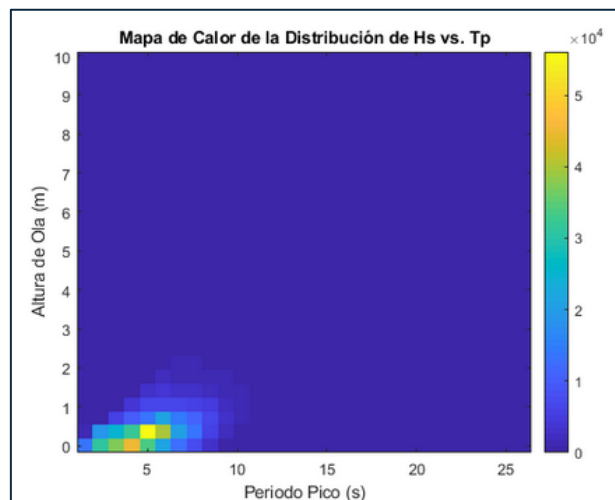


Figura 77: Mapa de calor 2D.

Fuente: Elaboración propia.

La visualización tridimensional (Figura 78) permite además identificar de forma clara la distribución porcentual de las distintas combinaciones posibles entre H_s y T_p , así como detectar zonas de baja frecuencia que pueden corresponder a eventos extremos. Aunque poco frecuentes, estos eventos pueden tener una gran relevancia en el diseño de estructuras y en la evaluación de riesgos costeros, por lo que no deben ser descartados en el análisis.

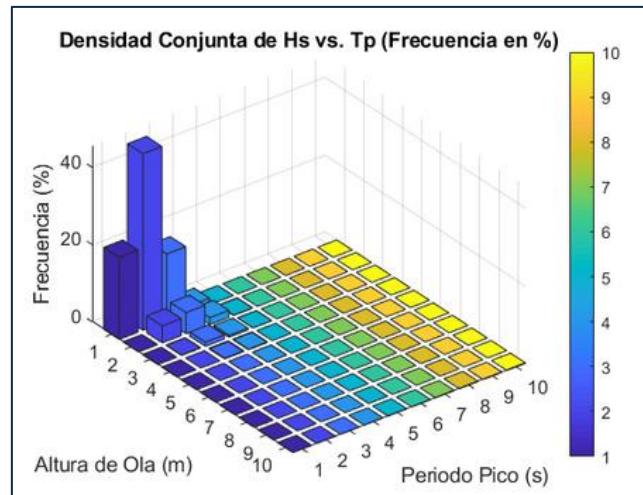


Figura 78: Gráfico 3D de densidad conjunta.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Régimen extremal del oleaje

El análisis del régimen extremal del oleaje permite caracterizar estadísticamente los valores máximos de altura significativa de ola (H_s), fundamentales para el diseño de estructuras costeras y la evaluación de impactos sobre las praderas marinas. Para ello, se ha utilizado la aplicación CAROL V1.0, al igual que en el caso del régimen medio.

El método POT (Peaks Over Threshold), de excedencias sobre un umbral, ofrece un ajuste adecuado de la función de distribución teórica a los valores experimentales (Figura 79). En este caso el método POT considera como extremos los datos que quedan por encima del umbral $H_{s99.5\%} = 2,87$ m, y selecciona el valor máximo del pico. A partir de la función de distribución de extremos ajustada mediante POT, es posible estimar la altura de ola significativa correspondiente a distintos periodos de retorno. En este caso se consideran temporales severos aquellos eventos con $H_s \geq 4,0$ m ($Tr \approx 10$ años) y eventos extremos aquellos con $H_s \geq 6,0$ m ($Tr \approx 100$ años). La máxima altura de ola significativa estimada por retro-análisis frente a la costa de Denia es de $H_s = 9,93$ m durante el temporal Gloria en 2020 (dentro del círculo rojo de la Figura 79).

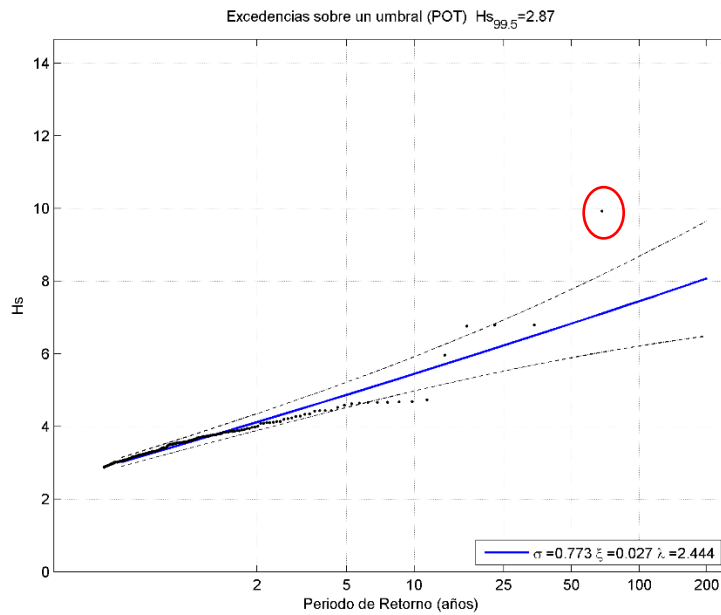


Figura 79: Régimen extremal de altura de ola significativa. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, la rosa de temporales anual (Figura 80) permite identificar la direccionalidad predominante del oleaje extremo. Los eventos de temporal se han definido como aquellos con $H_s \geq 2$ m, y su análisis revela tres sectores dominantes de incidencia: noreste (NE), estenordeste (ENE) y, en menor medida, nor-noreste (NNE). La mayoría de las tormentas presentan alturas de ola entre 2 y 4 metros, si bien se identifican también episodios más energéticos con H_s superiores a 4 m, representando condiciones de mayor severidad llegando hasta los 10 metros de altura de ola significativa (H_s).

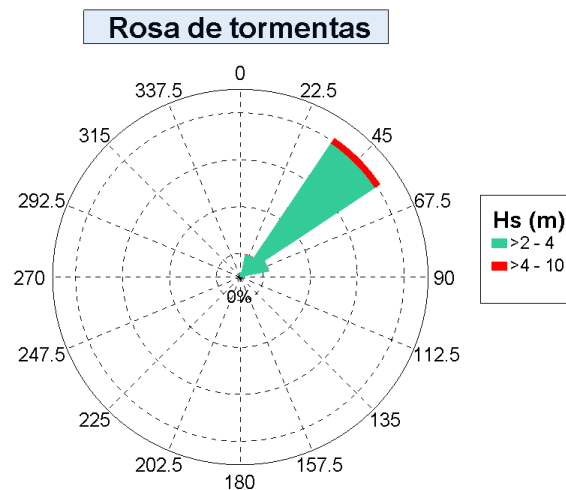


Figura 80: Rosa de altura de ola significativa de temporales - anual. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Puertos del Estado, 2025.

4 METODOLOGÍA: MODELOS NUMÉRICOS Y TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

4.1 Modelo de propagación del oleaje WAPO

El oleaje en su propagación hacia la costa sufre diferentes procesos de transformación tales como refracción, asomeramiento, disipación de energía por fricción debido al efecto del fondo o por rotura del oleaje y turbulencia; y fenómenos de reflexión y difracción si las olas interactúan con algún obstáculo, como es el caso de las estructuras artificiales como diques o espigones. Como resultado de estos fenómenos la altura de ola y dirección de las mismas son modificadas, y de ellas depende la respuesta final de la línea de costa a causa de las corrientes litorales generadas y transporte de sedimentos resultante. Estos efectos tienen una influencia directa sobre el estado ecológico del entorno sumergido, especialmente sobre las praderas marinas de *Cymodocea nodosa* y *Posidonia oceanica*, cuya distribución y estabilidad están directamente ligadas a las condiciones hidrodinámicas del entorno.

El modelo numérico que se utiliza para la propagación del oleaje es el modelo numérico de simulación hidrodinámico WAPO (Silva et al., 2005). Este modelo permite simular la evolución del oleaje desde mar abierto hasta zonas próximas a la costa, utilizando oleaje monocromático. Esta aproximación permite visualizar con mayor claridad los patrones de perturbación, como los procesos de reflexión y difracción del oleaje en su interacción tanto con estructuras costeras (como diques o espigones) como con elementos naturales del entorno (praderas marinas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* en este caso), a diferencia de otros modelos numéricos de propagación de oleaje.

En los siguientes apartados se presenta la estructura general del modelo numérico de propagación utilizado. Además, se detalla el fundamento teórico e hipótesis en que se basa, los ficheros y parámetros de entrada necesarios para su ejecución, y los ficheros de salida resultantes de la simulación con las características del oleaje propagado.

4.1.1 Estructura del modelo de propagación

El modelo WAPO (WAVE Propagation On the coast) se ha desarrollado para calcular la propagación de trenes de ondas monocromáticos sobre un fondo variable. Resuelve la ecuación elíptica de pendiente suave modificada en dos dimensiones (Silva et al., 2005). Es un modelo basado en la ecuación modificada de la pendiente suave (MMSE) desarrollada por Massel (1993), Chamberlain and Porter (1995), Kirby and Dalrymple (1994) y Losada, Silva et al. (1996b), la cual considera ciertos términos de segundo orden y permite representar con mayor precisión la propagación del oleaje en presencia de batimetrías complicadas y sin la restricción de “fondo suave” (inferior a 1:3) correspondiente a la ecuación de la pendiente suave (MSE). El desarrollo de la ecuación modificada de la pendiente suave (Silva, Salles et al. 2002b) supone flujo incompresible, homogéneo e irrotacional donde las olas se propagan sobre un fondo impermeable continuo $h(x,y)$, siendo x e y las coordenadas cartesianas horizontales. Además, considera campo de oleaje generado por viento, disipación de

energía debido a fricción por fondo y rotura del oleaje, y la gravedad como fuerza restauradora de las olas al romper el oleaje.

La ecuación de gobierno es:

$$\nabla_h^2 \Phi + (\partial^2 \Phi) / (\partial z^2) = 0 \quad -h(x, y) \leq z \leq 0$$

Donde:

- z es la coordenada vertical, positiva hacia arriba y el nivel $z=0$ se encuentra en el nivel medio del mar
- $\Phi(x, y, z, t)$ es el potencial de velocidades que describe el flujo
- t es el tiempo
- $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$

El desarrollo de la ecuación modificada de la pendiente suave se basa en la teoría lineal o de Stokes, y las condiciones de frontera son:

1. Condiciones dinámica y cinemática de superficie libre:

$$\eta = -1/g \partial \Phi / \partial t = -1/g \partial \varphi / \partial t \quad \text{en } z = 0$$

$$\partial \Phi / \partial z - \partial \eta / \partial t = \partial \varphi / \partial z - \partial \eta / \partial t = 0 \quad \text{en } z = 0$$

2. Condición de impermeabilidad en el fondo:

$$w = \partial \Phi / \partial z + \nabla_h h \cdot \nabla_h \Phi = 0 \quad z = -h(x, y)$$

La presión, p , está dada por la ecuación linealizada de Bernoulli:

$$p = -1/\rho (\partial \Phi / \partial z + gz) \quad -h \leq z \leq 0$$

Chamberlain y Porter 1995 resolvió el problema planteado y obtuvo la siguiente ecuación modificada de la pendiente suave:

$$\nabla_h \cdot (I \nabla_h \phi) + (k^2 I + r(h)) \phi = 0$$

A esta ecuación le incorpora la pérdida de energía mediante un término disipativo y queda como:

$$\nabla_h \cdot (I \nabla_h \phi) + ((k^2 - i\sigma W) I + r(h)) \phi = 0$$

Donde:

- W es el término disipativo
- σ es la frecuencia angular
- T es el periodo
- H_B es la altura de ola de rotura

Como condiciones de frontera en los contornos se tienen: condición general de radiación al infinito, frontera abierta o parcialmente reflejante.

La implementación numérica de la ecuación modificada de pendiente suave se ha llevado a cabo mediante el método de diferencias finitas con una aproximación de segundo orden, salvo en la evaluación del oleaje incidente en las fronteras con fondo variable, donde se ha empleado una aproximación de cuarto orden.

4.1.2 Ficheros y parámetros de entrada

El modelo numérico WAPO ha sido desarrollado en el lenguaje de programación Fortran 77, seleccionado por su robustez y alta portabilidad entre plataformas. La estructura del modelo se compone principalmente de tres subprogramas: BWAPO4, WAPO4 y OLUCA-UNAM, las cuales son gestionadas y ejecutadas desde el módulo principal MWAPO4.

En este apartado se describen los ficheros y parámetros de entrada necesarios para la correcta ejecución del modelo numérico WAPO.

4.1.2.1 Fichero con la batimetría

Los ficheros que contienen la batimetría para la propagación del oleaje en la malla tienen formato “.grd”. En este caso hay dos ficheros de batimetría ya que uno contiene las líneas batimétricas y el dique exento que fue construido en 1985-1986 y sigue existiendo hoy en día en la costa a la altura de la playa Les Marines. El otro fichero contiene, además, los diez espigones que fueron construidos en la década de los 1970 y retirados un par de años más tarde. Los archivos con la batimetría tienen de nombre “MIBAT.grd”.

En la Figura 81 y Figura 82 a continuación se puede ver la batimetría utilizada en el caso del dique exento correspondiente a la situación actual y la batimetría con los espigones que existían antiguamente.

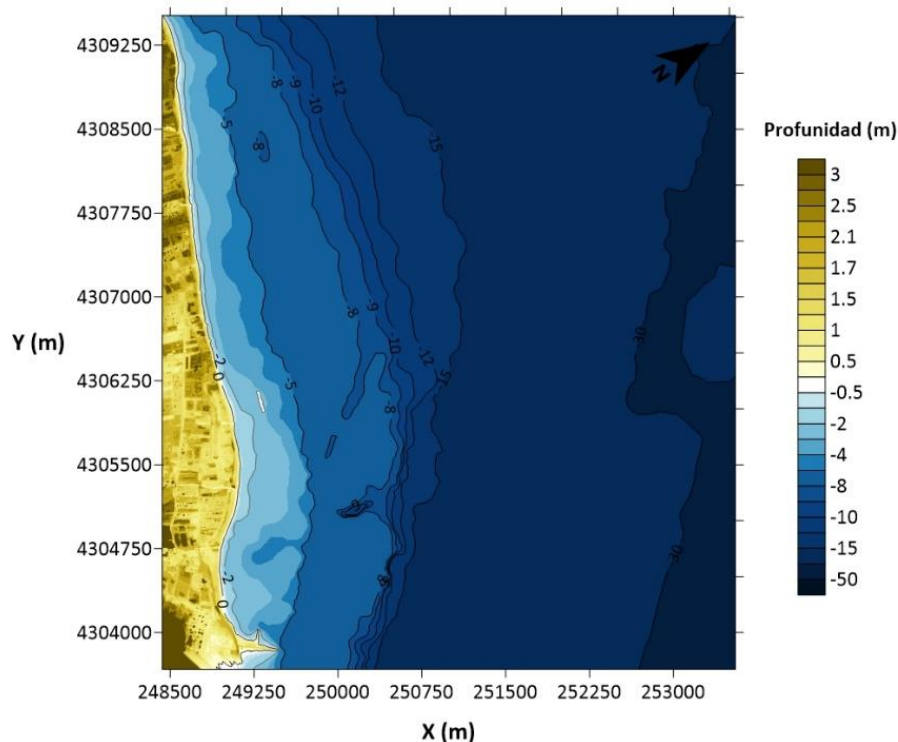


Figura 81: Batimetría utilizada para la propagación del oleaje. Situación actual – dique exento.

Fuente: Elaboración propia.

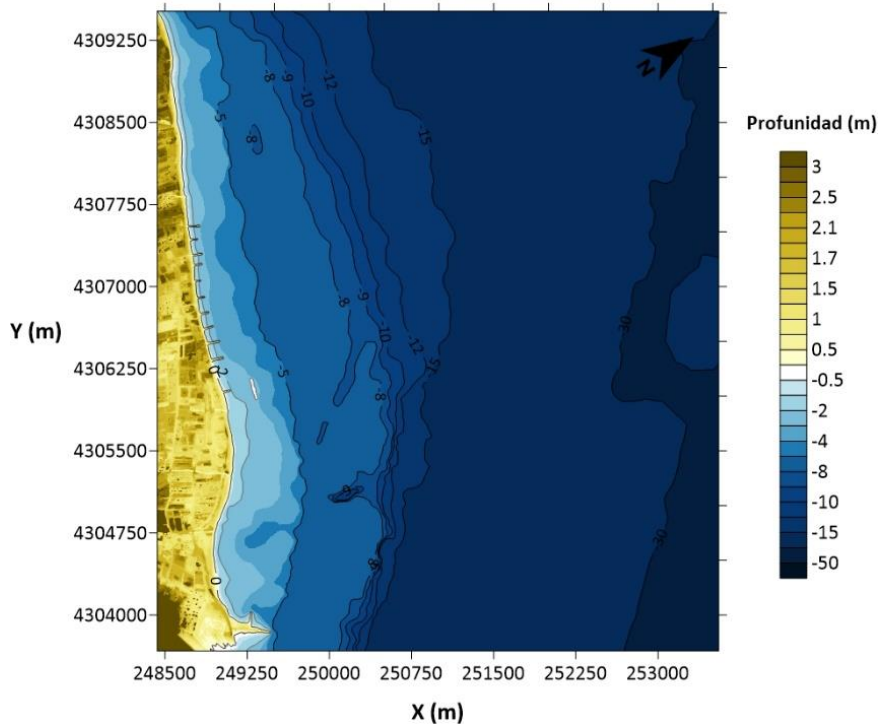


Figura 82: Batimetría utilizada para la propagación del oleaje. Situación anterior – dique exento y espigones.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2 Fichero con las condiciones generales de entrada

Los ficheros que contienen las características que definen el oleaje simulado tienen extensión “.inp”. Concretamente, se definen por la amplitud de la ola, el periodo, la frontera de entrada del oleaje en la malla de cálculo y el ángulo que forma la dirección de entrada del oleaje con la normal al contorno. Un ejemplo de la ventana donde se definen dichas características se puede ver en la Figura 83.

```

MIOTWAP.INP: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
PRIMERAS PRUEBAS DE LA NUEVA VERSION - JUNIO DE 2009 -
FRONTERAS DE FORZADO WAPO (1=NORTE,2=OESTE,3=ESTE,4=SUR), WAPO+REFDIF(5,6,7,8)
3 CLAVES: REFDIF(11=NORTE,12=OESTE,13=ESTE,14=SUR)
7 PERIOD (SEC)
0.5 INCIDENT WAVE AMPLITUDE
-18 ANGLE
1 BREAKING (YES = 1, NO = 0)
1 WAVENUMBER APPROXIMATION (LINEAR=1, HEDGES = 2)
.2 MINIMUM WATER DEPTH CONSIDER AS A WATER
0. TIDAL LEVEL (M)
1 NUMBER OF DIFFERENTS FRICTION AREAS
.0 1 1 402 1691 ,VALUE AND RECTANGULAR COORDINATES
1 NUMBER OF DIFFERENTS REFLECTION COEF. AREAS TOP
.0 1 1691 ,VALUE AND RECTANGULAR COORDINATES
1 NUMBER OF DIFFERENTS REFLECTION COEF. AREAS LEFT
.0 1 402 ,VALUE AND RECTANGULAR COORDINATES
1 NUMBER OF DIFFERENTS REFLECTION COEF. AREAS RIGHT
.0 1 402 ,VALUE AND RECTANGULAR COORDINATES
1 NUMBER OF DIFFERENTS REFLECTION COEF AREAS BOTTOM
.0 1 1691 VALUE AND RECTANGULAR COORDINATES
1 NUMBER OF DIFFERENTS REFLECTION COEF AREAS BOTTOM
0.3 1 1 974 854 VALUE AND RECTANGULAR COORDINATES
0 -1 SI LOS DATOS DE FRICCION ENTRAN POR MALLA
MALLA_FRI.GRD MALLA CON LAS CLAVES DE FRICCION (14 CARACTERES MAX)
CLAVE_FRI.TXT CLAVE QUE RELACIONAN VALORES (14 CARACTERES MAX)

```

Figura 83: Fichero con las condiciones generales de entrada al modelo de propagación.

Fuente: Elaboración propia a partir del fichero inp de WAPO.

También en este fichero se decide la consideración o no del proceso de rotura del oleaje y fricción del fondo, tipo de aproximación del número de onda, profundidad del agua mínima a tener en cuenta y elevación del nivel del mar por marea. En este caso los contornos de frontera de las mallas son totalmente absorbentes y el oleaje entra por el contorno Este. La profundidad debe ser uniforme a lo largo de todo el contorno por donde entra el oleaje.

A continuación, se define el criterio de signos que sigue el ángulo de entrada del oleaje en el contorno (Figura 84).

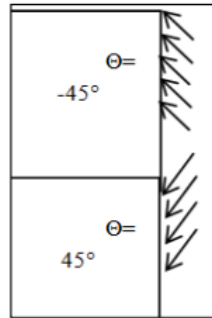


Figura 84: Criterio de signos del ángulo de entrada del oleaje en la malla de propagación del WAPO4.

4.1.3 Ficheros de salida

La información relevante del oleaje propagado se obtiene principalmente en dos ficheros, de extensión “grd”, de los cuales uno recoge valores de la altura de ola máxima del oleaje propagado y el otro contiene resultados de la superficie libre del mar instantánea.

4.1.4 Condiciones de oleaje simuladas y estructura del mallado

Se analizan las condiciones hidrodinámicas tanto en régimen medio de oleaje como en situación extrema de tormenta o eventos meteorológicos extraordinarios. El tipo de oleaje a simular es monocromático ya que, como se ha comentado anteriormente, es más simple y claro para analizar fenómenos físicos como perturbaciones u obstáculos por su condición de oleaje en promedio más energética que la espectral. Los casos de oleaje se han seleccionado de acuerdo con las condiciones de clima marítimo que pueden afectar a la zona de estudio con mayor frecuencia e intensidad, en el caso de tormentas.

De las seis direcciones principales que caracterizan el oleaje en aguas profundas, NNE, NE, ENE, E, ESE y SE, las direcciones que mayor repercusión tienen sobre el litoral de estudio por su situación y los procesos de transformación que sufre el oleaje en su propagación son NE, ENE, E y NNE.

Para la construcción de la malla de cálculo, es necesario girar la batimetría de la zona de forma que el contorno de entrada del oleaje tenga profundidad uniforme y el ángulo de incidencia del oleaje no supere los límites, establecidos para el funcionamiento óptimo de los modelos de propagación. Por lo tanto, la malla se ha girado 63° en sentido horario respecto al punto de giro:

- X = 249279,6380
- Y = 4304025,8270

4.1.4.1 Condiciones simuladas para régimen medio de oleaje

Los valores que se emplean de altura de ola (H) y periodo (T) en la simulación se toman directamente de los valores de altura de ola significativa (Hs) y periodo de pico (Ts) del régimen medio.

Las alturas de ola que se han escogido para la simulación del régimen medio de oleaje son las que se consideran más representativas y de una alta frecuencia. Por lo tanto, en este caso son las de 1 m con una amplitud de 0,5 y para periodos de 7 s y 9 s.

En la Tabla 4 a continuación se e pueden ver todos los casos simulados con las direcciones analizadas:

Tabla 4: Casos simulados para condiciones de oleaje de régimen medio.

Fuente: Elaboración propia.

Situación	H (m)	Amplitud (m)	T (s)	Dirección
I. Situación actual: Dique exento	1	0.5	7	NE, ENE, E
			9	NE
II. Situación: Dique exento y espigones	1	0.5	7	NE
			9	

En total se simulan 6 casos de oleaje en condiciones normales o régimen medio de oleaje.

La malla empleada es de celdas cuadradas y cubre una extensión aproximada de 6 km a lo largo de la línea de costa y se extiende unos 5 km mar adentro. La resolución utilizada es de 6 m ya que permite reproducir de forma adecuada la longitud de onda de las ondas propagadas teniendo en cuenta la capacidad del modelo (1000 x 1000 nodos).

Dimensiones de la malla:

- Longitud a lo largo de la costa: 5,84 km
- Longitud dirección mar adentro: 5,12 km
- Nodos: 855 x 975 en x e y, respectivamente, 833625 en total.

4.1.4.2 Condiciones simuladas para escenarios de tormenta

Según el análisis realizado en el apartado correspondiente al clima marítimo, el oleaje que se considera como oleaje de tormenta de alta energía es todo aquel que tiene una altura de ola significativa igual o mayor a 2 metros. Por lo tanto, los casos seleccionados para la simulación del oleaje de tormenta son los que se detallan en la Tabla 5 a continuación:

Tabla 5: Casos simulados para condiciones de oleaje extremal.

Fuente: Elaboración propia.

Situación	H (m)	Amplitud (m)	T (s)	Dirección
I. Situación actual: Dique exento	2	1	7	NE, ENE, NNE
			9	NE

	3	1.5	8	
	4	2	9	NE
	5	2.5	10	
II. Situación: Dique exento y espigones			7	
	2	1	9	NE

En total se simulan 9 casos de oleaje en condiciones de tormenta, que sumado a los 6 casos correspondientes a oleaje normal resulta en un total de 15 situaciones marítimas modeladas.

La malla utilizada en la propagación del oleaje en estos casos de tormenta coincide con la del régimen medio simulado.

4.2 Red Neuronal Artificial (“Artificial Neural Network” ANN)

Las Redes Neuronales Artificiales (ANN) son modelos computacionales inspirados en el funcionamiento de las redes biológicas del sistema nervioso humano (Schmidgall, 2024). Su estructura está formada por neuronas o nodos, organizadas en capas y conectadas entre sí mediante pesos establecidos. Cada conexión pondera la información que fluye a través de la red, la cual se transforma mediante funciones de activación que pueden introducir no linealidad en el modelo. El proceso de entrenamiento, que es un proceso interno, consiste en ajustar iterativamente estos pesos para que las salidas generadas se aproximen a los valores esperados, minimizando el error. De este modo, las ANN son capaces de aprender patrones complejos y no lineales presentes en los datos y generalizar a nuevos casos (Goodfellow et al., 2016). Estas características las convierte en una herramienta especialmente útil para problemas predictivos en numerosos campos que requieren análisis avanzados, como la ingeniería, la medicina, la economía o el transporte (Abiodun et al., 2018), consolidándose como una de las técnicas más relevantes dentro de la Inteligencia Artificial (IA). Entre sus aplicaciones más habituales se encuentran la clasificación de patrones, la regresión, la predicción de series temporales, la detección de anomalías o el reconocimiento de imágenes.

En el presente trabajo, las ANN se emplean como una herramienta predictiva para estimar el límite superior de distribución de la *Posidonia oceanica*, integrando múltiples variables hidrodinámicas derivadas del modelo numérico XBeach. De este modo, se aprovecha su capacidad para reconocer patrones complejos y umbrales críticos en la respuesta de la pradera, permitiendo generar resultados útiles para la conservación y la gestión costera. Para la implementación y el entrenamiento del modelo se utiliza el software MATLAB, aprovechando sus librerías específicas para redes neuronales, que permiten configurar la arquitectura y evaluar el rendimiento de las predicciones.

En general, existen diversas arquitecturas de redes neuronales artificiales, cuya elección depende del tipo de problema y la naturaleza de los datos. Entre las más habituales se encuentran el Perceptrón, las redes de avance directo (Feedforward), las redes convolucionales (CNN) y las redes recurrentes (RNN), cada una con aplicaciones específicas en clasificación, regresión, procesamiento de datos

espaciales o series temporales. No obstante, en este estudio se emplea arquitectura de tipo Perceptrón que está compuesta por una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Esta configuración resulta suficiente para captar las relaciones complejas entre las variables hidrodinámicas y la distribución de la pradera, sin necesidad de recurrir a arquitecturas más complejas.

A continuación, se describen los elementos principales que conforman el diseño de la red neuronal artificial utilizada (Figura 85).

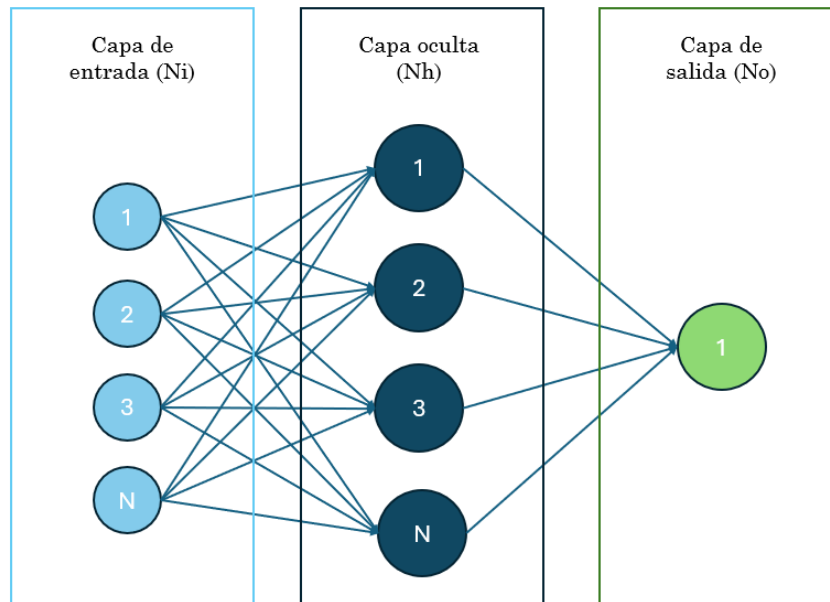


Figura 85: Esquema Red Neuronal Artificial.

Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se encuentra la capa de entrada (N_i), compuesta por tantas neuronas como variables predictoras se utilicen en el modelo. Cada una de estas neuronas transmite la información a la siguiente capa a través de conexiones ponderadas.

Posteriormente, la información se procesa en una o varias capas ocultas (N_h), formadas por un conjunto de neuronas ocultas. Su función es aplicar transformaciones lineales o no lineales a los datos de entrada, combinando las variables y extrayendo patrones complejos. El número de capas ocultas y de neuronas en cada una no está predefinido, sino que debe determinarse en función del problema a resolver, evaluando la capacidad de aprendizaje del modelo y el riesgo de sobreajuste.

Finalmente, se encuentra la capa de salida (N_o), que contiene un número de neuronas dependiente del tipo de problema. En el caso de problemas de clasificación binaria o de regresión, la capa de salida suele estar compuesta por una única neurona. En clasificación binaria, la salida se interpreta como una probabilidad de pertenencia a una de las dos clases, y la decisión final se establece aplicando un umbral de clasificación, habitualmente fijado en 0,5. En cambio, en los problemas de regresión, la neurona de salida devuelve un valor continuo, que no presenta restricciones de rango y representa directamente la variable objetivo a predecir. Por

último, en los problemas de clasificación multiclase, la capa de salida incluye tantas neuronas como categorías existan, asignando una probabilidad a cada una de ellas mediante funciones de activación como softmax.

En los apartados siguientes se explican en detalle las características del diseño de la red utilizada en este trabajo como es el número de neuronas utilizado en este caso, el algoritmo de entrenamiento, la función de activación, etc.

4.2.1 Tratamiento de los datos

La base de datos empleada en este estudio forma parte del conjunto de resultados del proyecto SEGRALCS (WP3-SEGRALCS, <https://zenodo.org/records/14583119>). Los datos se han obtenido utilizando el modelo numérico XBeach (Roelvink et al. 2010), que es un modelo morfodinámico de propagación de oleaje que permite estimar en la posición que ocupa la pradera la hidrodinámica asociada a las diferentes condiciones de clima marítimo que caracterizan la zona de interés.

Según el análisis del clima marítimo realizado a partir de la base de datos SIMAR 2085107, con registros horarios entre 1958 y 2025, se identificaron 79 casos de simulación. Estos corresponden a las direcciones predominantes en la zona de estudio (NNE, NE y ENE) y a condiciones de oleaje moderado-alto, caracterizadas por alturas significantes superiores a 1 m y periodos pico desde 7 s hasta los valores máximos registrados en cada dirección. El oleaje se ha propagado desde aguas profundas hacia aguas someras, permitiendo conocer los valores locales de las variables de interés.

La base de datos final a utilizar está compuesta por un total de 391880 registros, cada uno de los cuales contiene información sobre las siguientes variables:

- Coordenada UTM X (m) (perpendicular a la costa)
- Coordenada UTM Y (m) (paralela a la costa)
- Profundidad (m): distancia vertical desde la superficie libre hasta el fondo marino.
- Presencia o ausencia de Posidonia: variable que indica si existe pradera en el nodo (1 = presencia, 0 = ausencia).
- Hrms: Valor máximo de la altura de ola media cuadrática (m) de los 79 casos de oleaje.
- Taub: Valor máximo de la tensión tangencial en el fondo (N/m^2) de los 79 casos de oleaje.
- Ue: Valor máximo de la velocidad Euleriana, que corresponde a la velocidad de las corrientes inducidas por el oleaje (m/s), de los 79 casos de oleaje.
- Urms: Valor máximo de la velocidad orbital de las partículas de oleaje, promedio en la columna de agua (m/s) de los 79 casos de oleaje.
- Ubrms: Valor máximo de la velocidad orbital de las partículas de oleaje estimado en el fondo (m/s) de los 79 casos de oleaje.

La base de datos representa la cartografía real de la costa de Denia, en la que se identifican tanto los puntos con presencia como con ausencia de *Posidonia*

oceanica. Antes de emplear los datos, se realiza un tratamiento previo que consiste en determinar para cada coordenada Y la profundidad mínima a la que aparece *Posidonia*. A partir de este umbral, se considera que mar adentro todos los puntos deberían contener pradera (1); en los casos en que no se detecta, ello puede deberse a una insuficiente transparencia del agua o a que la vegetación ha sido arrancada o degradada, pero se entiende que la especie debería estar presente. En cambio, a profundidades menores a dicho límite se deja el valor de ausencia (0). Por otro lado, se eliminan los datos anómalos o erróneos, como por ejemplo registros con profundidades positivas que no son físicamente coherentes.

Una vez realizado el tratamiento previo de los datos, del total de datos disponibles, la mayor parte corresponde a puntos con presencia de *Posidonia oceanica*, lo que origina un desbalance de clases. Si no se corrige, este desequilibrio puede sesgar el entrenamiento de la red neuronal hacia la categoría mayoritaria, disminuyendo su capacidad de identificar correctamente las zonas donde la pradera está presente. Para solventar este problema, se procede a equilibrar la base de datos, de modo que el número de casos de presencia y ausencia resulte equilibrado. Este proceso, denominado balanceo de datos, permite que el modelo disponga de un conjunto de entrenamiento más representativo y que las predicciones no estén condicionadas por la desproporción inicial. La igualación de registros se realiza mediante una selección aleatoria de las muestras de presencia, garantizando así la consistencia del conjunto de datos final. En la Tabla 6 a continuación se puede consultar el número final de datos a utilizar tras hacer el balanceo de datos.

Tabla 6: Balanceo de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Datos iniciales		
Total datos	391880	100%
Presencia POS	346696	88,5%
Ausencia POS	45184	11,5%
Datos finales		
Total datos	48114	100%
Presencia POS	24057	50%
Ausencia POS	24057	50%

Una vez equilibrada la base de datos, se procede a un análisis gráfico con el objetivo de identificar qué variables presentan una mayor influencia en la distribución de las praderas de *Posidonia oceanica*. En concreto, se evalúa cuál de las variables muestran una tendencia creciente conforme disminuye la profundidad hacia la costa.

En los gráficos que se presentan a continuación (Figura 86) se ilustran las variables Hrms, Ue, Tau, Urms y Ubrms, junto con el índice de rotura Hrms/h, que

expresa la relación entre la altura media cuadrática de la ola y la profundidad. Este índice constituye un parámetro que sirve para identificar las condiciones de rotura del oleaje, ya que refleja en qué medida la energía de la ola se encuentra limitada por la profundidad del fondo marino.

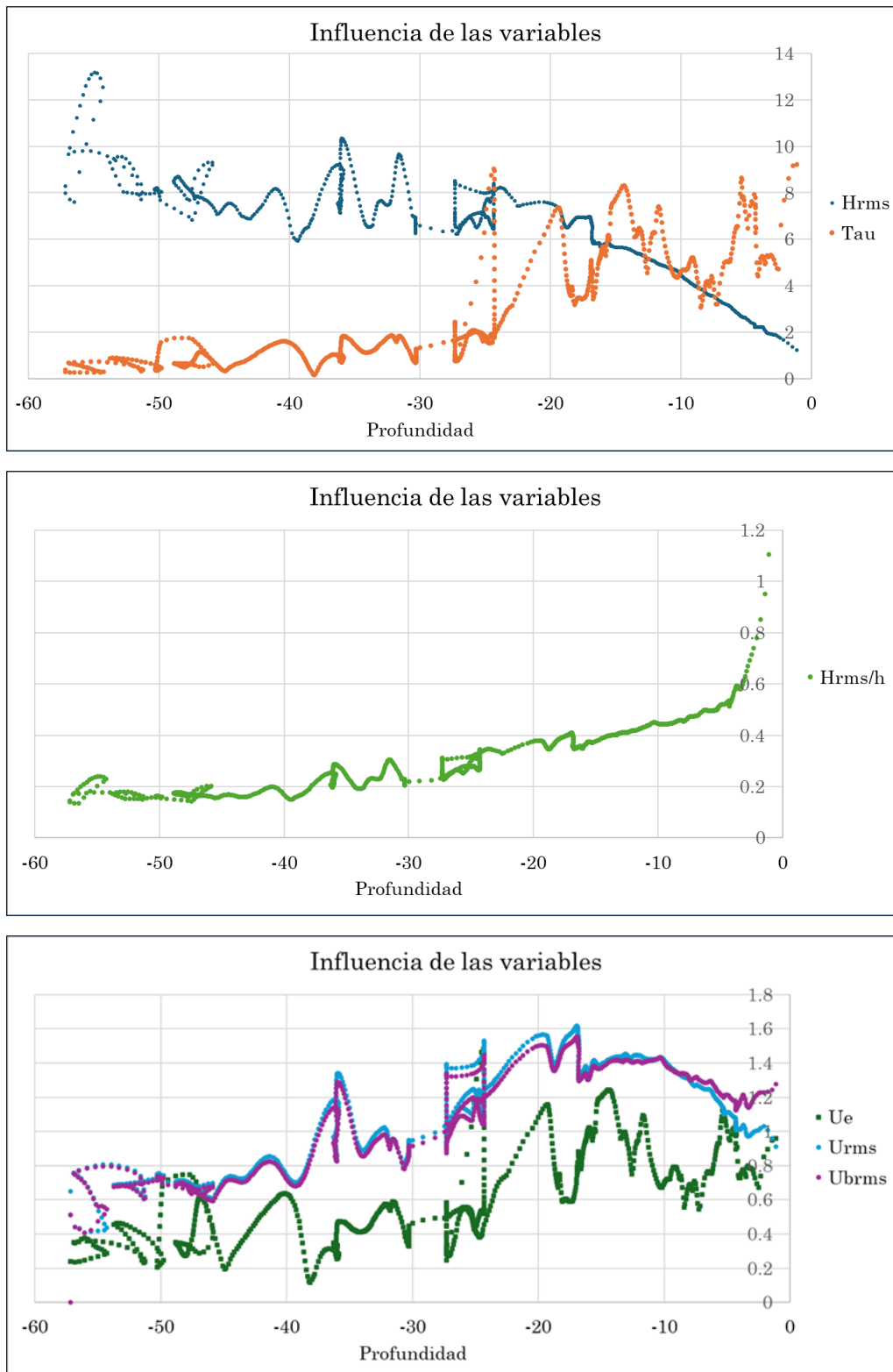


Figura 86: Influencia de las variables sobre las praderas.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a la diferencia de órdenes de magnitud entre las variables, se han representado en gráficos separados para facilitar su interpretación: por un lado, Hrms y Tau, y, por otro, las velocidades Ue, Urms y Ubrms, y finalmente el índice adimensional Hrms/h.

Como se observa, las variables de velocidad (Ue, Urms y Ubrms) tienden a disminuir progresivamente a medida que la profundidad se reduce, lo cual indica que el flujo orbital de las olas pierde intensidad conforme se aproxima a la zona somera. Por el contrario, la tensión tangencial en el fondo (Tau) y el índice de rotura Hrms/h aumentan hacia la costa. Esto se traduce a que, aunque la energía del oleaje se disipa en forma de pérdida de velocidad, esta se transfiere al fondo marino en forma de mayor esfuerzo tangencial. Por lo tanto, este estudio se centra en el análisis de las variables Tau y Hrms, representada a través del índice Hrms/h, mediante una red neuronal artificial con el objetivo de definir el límite superior de la distribución de la pradera de *Posidonia oceanica*.

Con el fin de entrenar la red neuronal, tras balancear los datos y eliminar los anómalos, los registros finales se distribuyen aleatoriamente en tres subconjuntos: un 70% se destina al entrenamiento para ajustar los parámetros internos de la red; un 15% se reserva para la validación, que permite monitorizar el rendimiento durante el proceso de aprendizaje y prevenir el sobreajuste; y el 15% restante se asigna para prueba, con el fin de evaluar de forma objetiva la capacidad predictiva del modelo sobre datos no utilizados en el entrenamiento (Figura 87).

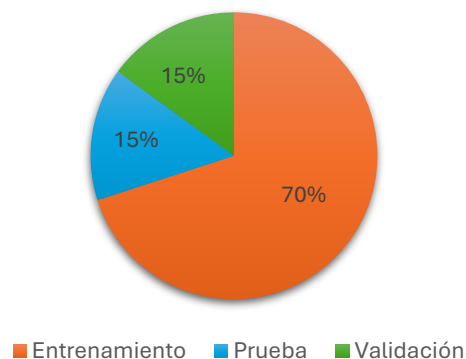


Figura 87: Distribución de los datos.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Capa entrada (N_i)

Esta primera capa contiene las variables con los que se dispone para el entrenamiento de la red. En este estudio dichas variables son la tensión tangencial en el fondo (Tau) y la altura de ola media cuadrática (Hrms) representada en el índice de rotura (Hrms/h).

4.2.3 Número de neuronas ocultas (N_h)

El número de neuronas ocultas en el diseño de una red neuronal es un aspecto clave, porque este parámetro condiciona la capacidad que tiene el modelo de aprender. Si el número de neuronas ocultas no es suficiente, esto limita la complejidad de las relaciones que la red es capaz de representar. Por otro lado, un

número excesivo de neuronas puede incrementar el riesgo de sobreajuste y aumentar el coste computacional sin aportar mejoras significativas.

Normalmente, existen diferentes fórmulas heurísticas para estimar el número de neuronas ocultas a partir del número de variables de entrada, de salida o del tamaño de la base de datos. Estas aproximaciones resultan útiles cuando se dispone de conjuntos de datos limitados, ya que ayudan a evitar el sobreajuste del modelo. Sin embargo, en este estudio la base de datos contiene un volumen muy elevado de registros, lo que reduce la aplicabilidad de dichas fórmulas. Por este motivo, se optó por realizar pruebas comparativas con diferentes configuraciones. En este estudio se ensayaron redes con 10, 15, 20, 50 y 100 neuronas ocultas, comprobándose que no existían diferencias significativas en el rendimiento del modelo. Por lo tanto, se ha optado por arquitectura con 10 neuronas ocultas, al considerarse suficiente para alcanzar resultados satisfactorios y, al mismo tiempo, reducir la complejidad computacional.

4.2.4 Función de pérdida

Para el entrenamiento de redes neuronales, elegir la función de pérdida es un punto clave, ya que esta función permite cuantificar la discrepancia entre los valores reales y las salidas predichas por el modelo. En este trabajo se emplea el Error Cuadrático Medio (MSE) como función de pérdida principal, debido a la naturaleza del problema planteado.

Esta función calcula la media de los cuadrados de las diferencias entre valores reales y predichos, penalizando de forma más severa los errores de gran magnitud y proporcionando un gradiente suave y continuo para la optimización. La expresión de la función es la que se muestra a continuación:

$$MSE = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - p_i)^2$$

Donde:

- y_i es la clasificación real de la variable objetivo
- p_i es la probabilidad estimada del modelo
- N es el número total de observaciones

4.2.5 Algoritmo de entrenamiento

Elegir la función de entrenamiento es otro aspecto fundamental para garantizar el aprendizaje eficiente del modelo. Dicha función determina el algoritmo mediante el cual se actualizan los pesos y sesgos de la red a partir de los errores calculados en cada ciclo de entrenamiento. Existen varios algoritmos disponibles, cada uno con características específicas que los hacen más o menos adecuados en función del tipo de problema, la cantidad y calidad de los datos, la complejidad del modelo y la función de pérdida seleccionada. Entre ellos se encuentran:

- Levenberg–Marquardt (TRAINLM): Utilizado en tareas de clasificación y regresión por su rápida convergencia. Es muy eficaz cuando se dispone de un número moderado de parámetros y datos, y, además, es compatible con

funciones de error basadas en el MSE. Su principal limitación es el elevado consumo de memoria.

- Bayesian Regularization (TRAINBR): Es recomendado para problemas de clasificación probabilística o para conjuntos de datos reducidos y con bajo nivel de ruido. Introduce un término de regularización bayesiana que mejora la capacidad de generalización del modelo. Emplea también el MSE como función de error.
- Conjugate Gradient Backpropagation (TRAINSGB): adecuado para problemas de clasificación y regresión con muchas variables y funciones objetivo no lineales. Puede utilizar tanto el MSE como la entropía cruzada, lo que lo hace versátil para salidas categóricas. Presenta buena convergencia y eficiencia computacional.
- Resilient Backpropagation (TRAINRP): diseñado para mejorar la estabilidad del entrenamiento en casos donde los gradientes presentan alta variabilidad. Ajusta los pesos en función del signo del gradiente en lugar de su magnitud, lo que lo hace especialmente robusto.
- Quasi-Newton (TRAINBFG): derivado de métodos de optimización lineal, ofrece alto rendimiento en precisión para clasificación y regresión, aunque su uso está limitado por la elevada demanda de memoria y el menor rendimiento en bases de datos de gran tamaño. Emplea habitualmente la entropía cruzada como función de pérdida.
- Gradient Descent con momento (TRAINFP): combina el descenso de gradiente con técnicas de aceleración basadas en el momento y en el ajuste dinámico de la tasa de aprendizaje. Es adecuado en problemas con funciones complejas o con alto nivel de ruido.

Tras varias pruebas realizadas con distintas funciones de entrenamiento, en este trabajo se ha optado por utilizar la función Levenberg–Marquardt (TRAINLM), ya que ofrece una convergencia rápida y buenos resultados con el conjunto de datos disponible.

4.2.6 Función de activación

Las funciones de activación introducen la no linealidad necesaria para que el modelo pueda representar y aprender relaciones complejas entre las variables de entrada y salida. Estas funciones se aplican a la salida de cada neurona y determinan cómo se propaga la señal hacia las siguientes capas. La elección de la función de activación depende del tipo de problema a resolver (clasificación o regresión), de la estructura de la red y de la naturaleza de los datos empleados.

Entre las más utilizadas se encuentran:

- Lineal (Purelin): Es apropiada para problemas de regresión.
- Softmax; Convierte un vector de activación en una distribución de probabilidad y resulta idónea en clasificación multiclase.
- Sigmoidal (Logsig): Es empleada en clasificación binaria al transformar las salidas en el rango [0, 1].

- Tangente hiperbólica (Tansig): Ajusta los valores en el rango [-1, 1] y se utiliza frecuentemente en capas ocultas para mejorar la estabilidad.
- Rectified Linear Unit (ReLU): Por su simplicidad computacional y eficacia se ha consolidado como una de las más empleadas en redes modernas, al devolver valores nulos para entradas negativas y mantener las positivas sin alteración.

En este trabajo como punto de partida se establece que al menos una de las neuronas de la capa oculta debería ser una función lineal (Purelin), con el fin de facilitar el ajuste de los datos en caso de que alguna variable presentara un comportamiento predominantemente lineal. Mientras que, el resto de las neuronas en la capa oculta, usan función sigmoideal de tipo tangente hiperbólica (Tansig), ya que ésta es capaz de modelar relaciones no lineales complejas y por la ventaja de centrar los valores de salida en el rango [-1, 1], mejorando la estabilidad numérica y acelera la convergencia durante el entrenamiento.

Respecto a la capa de salida, se utiliza la función sigmoideal logística (Logsig), ya que transforma las salidas en valores comprendidos entre 0 y 1, lo que permite interpretarlas directamente como probabilidades. Esta característica la hace especialmente adecuada para problemas de clasificación binaria, como es este caso, donde el objetivo es diferenciar entre la presencia (1) y la ausencia (0) de *Posidonia oceanica* en cada punto analizado.

4.2.7 Evaluación del rendimiento

Con el objetivo de evaluar el rendimiento de la red, se utiliza como método la matriz de confusión que es una de las herramientas más empleadas en el análisis de modelos de clasificación dentro del ámbito del Machine Learning. Este método permite comparar las predicciones del modelo con los valores reales de la variable objetivo, resumiendo los resultados en formato matricial.

La matriz tiene dimensiones $N \times N$, donde N es el número de clases consideradas en el problema. Las filas representan las clases reales, mientras que las columnas corresponden a las clases predichas por el modelo. En el caso de un problema de clasificación binaria, como se tiene en este caso, la diagonal principal contiene los aciertos del modelo: los verdaderos positivos (VP) y los verdaderos negativos (VN). Fuera de la diagonal se encuentran los errores: los falsos positivos (FP), es decir, casos clasificados como presencia de *Posidonia* cuando en realidad no la hay, y los falsos negativos (FN), correspondientes a situaciones en las que el modelo no detecta la pradera estando realmente presente (Figura 88).

		Predicción	
		Negativo	Positivo
Realidad	Negativo	VN (Verdaderos Negativos)	FP (Falsos Positivos)
	Positivo	FN (Falsos Negativos)	VP (Verdaderos Positivos)

Figura 88: Esquema de matriz de confusión.

Fuente: Elaboración propia.

A través de esta matriz se pueden derivar diferentes métricas de evaluación que cuantifican el rendimiento del modelo, tales como:

- Precisión global (proporción de predicciones positivas correctas; sin tener en cuenta los falsos negativos):

$$\text{Precisión} = \frac{VP}{VP + FP}$$

- Exactitud (acierto general del modelo):

$$\text{Exactitud} = \frac{VP + VN}{N}$$

- Especificidad (cantidad de casos negativos identificados correctamente):

$$\text{Especificidad} = \frac{VN}{FP + VN}$$

- Tasa de verdaderos positivos / sensibilidad (porcentaje de positivos reales correctamente clasificados):

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VP}{VP + FN}$$

- Tasa de falsos positivos (proporción de negativos que se han clasificado erróneamente como positivos):

$$TFP = 1 - \text{Especificidad} = \frac{FP}{FP + VN}$$

Estas métricas permiten comprobar hasta qué punto la red neuronal es capaz de predecir correctamente la distribución la *Posidonia oceanica* y evaluar la fiabilidad de los resultados.

4.2.8 Arquitectura final de la red

Finalmente, la arquitectura de la red neuronal artificial definida en este estudio está compuesta por 10 neuronas en la capa oculta, de las cuales una utiliza una función de activación lineal (Purelin) y la otra, la función tangente hiperbólica (Tansig). La capa de salida se reduce a una única neurona destinada a la clasificación binaria, cuya función de activación corresponde a una sigmoideal logística (Logsig), adecuada para diferenciar entre la presencia y la ausencia de *Posidonia oceanica* (Figura 89).

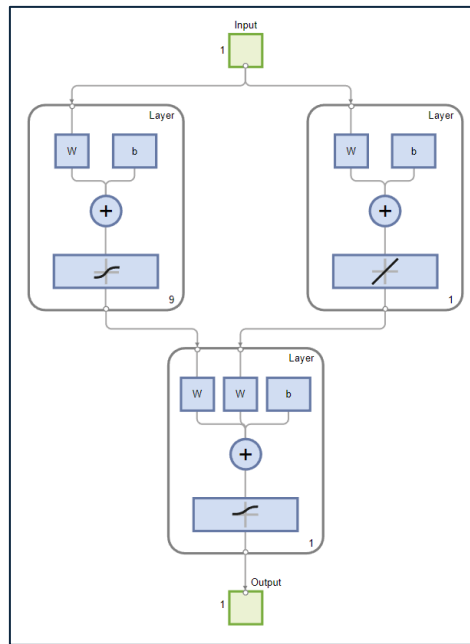


Figura 89: Arquitectura final de la Red Neuronal Artificial.

Fuente: Matlab.

Como se ha comentado anteriormente, los datos para entrenar la red representan un 70%, los de validación un 15% y los de validación del modelo (test) un 15%. Con el fin de comprobar que la arquitectura de red diseñada es robusta y la óptima escogida, se analiza su rendimiento utilizando distribuciones aleatorias de los datos. Para cada nueva distribución de datos se repite el proceso de entrenamiento y se calcula la precisión en función de los verdaderos positivos (VP) y verdaderos negativos (VN) sobre el total de datos. En total se analizan 6 distribuciones diferentes y como se puede ver en la Figura 90, los valores de los VP y VN son muy similares en todos los casos. En general, el número de falsos positivos (FP) registrado en las distintas distribuciones está entre 226 y 279 casos, mientras que los falsos negativos (FN) entre 170 y 188 casos. En cuanto a la precisión global sobre el total de la muestra de prueba, el modelo muestra entre 93,61% y 94,26% de aciertos. Por lo que, se concluye que la red neuronal presenta alta capacidad de generalización y, es capaz de predecir con precisión independientemente de la distribución utilizada.

		Predicción				Predicción				Predicción	
		No hay	Hay			No hay	Hay			No hay	Hay
R e a l i d a d	No hay	VN 3311	FP 226	No hay	VN 3329	FP 263	No hay	VN 3382	FP 270	Aciertos	94.26%
	Hay	FN 188	VP 3492	Hay	FN 182	VP 3443	Hay	FN 179	VP 3386		

	Predicción			Predicción			Predicción		
	No hay	Hay		No hay	Hay		No hay	Hay	
R e a l i d a d	No hay	VN 3348	FP 260	No hay	VN 3369	FP 279	No hay	VN 3380	FP 275
	Hay	FN 180	VP 3429	Hay	FN 182	VP 3387	Hay	FN 170	VP 3392
		Aciertos	93.90%		Aciertos	93.61%		Aciertos	93.83%

Figura 90: Matrices de confusión del modelo del conjunto de prueba en función de distintas distribuciones aleatorias de datos.

Fuente: Elaboración propia.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Resultados obtenidos de la propagación del oleaje

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la propagación del oleaje bajo distintas condiciones. A través de los mapas generados se visualiza la evolución espacial de los parámetros principales del oleaje, como la altura de ola, la dirección de propagación y la refracción inducida por la batimetría, además de la difracción y reflexión al incidir sobre las estructuras costeras.

La zona donde se pretende actuar y regenerar la playa es entre los puntos marcados como “A” y “B” en los mapas. El punto “A” corresponde al punto más al norte del tramo más erosionado, mientras que “B” es el final de este, que coincide con Blay Beach un bar restaurante conocido como punto de referencia de esta zona de la playa de Les Marines (Figura 91). En total este tramo tiene una longitud aproximada de 450 metros y actualmente no tiene playa seca.

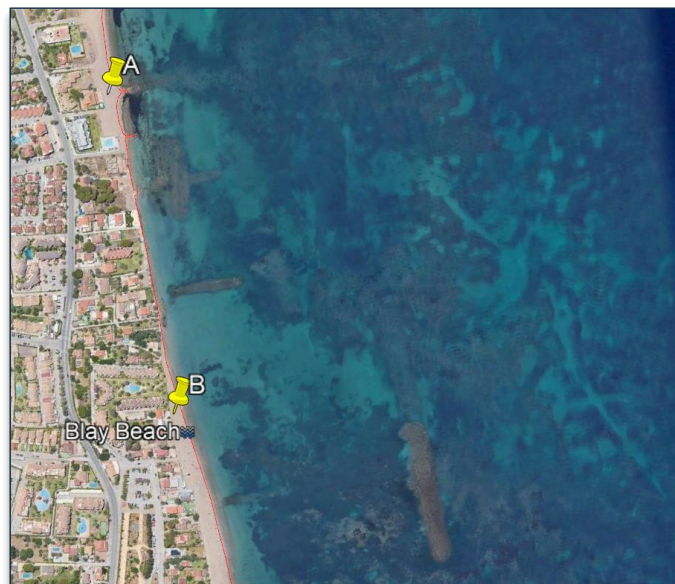


Figura 91: Inicio (A) y final (B) del tramo a regenerar.

Fuente: Google Earth.

5.1.1 Régimen medio de oleaje: condiciones normales

En primer lugar, se presentan los mapas correspondientes al régimen medio de oleaje. Cabe recordar que se estudian dos situaciones: una inicial con el dique exento que se encuentra a 2,5 metros de profundidad todavía presente a la altura de Les Marines (Situación I de 2025), y otra anterior a la inicial con el dique exento y además los espigones que se encontraban a la altura de Blay Beach, Les Marines en los años 70 (Situación II de 1979). Con esto se pretende estudiar la influencia en la disipación de la energía del oleaje tanto del dique como de los espigones desmantelados.

Figura 92 y Figura 93 a continuación son los resultados obtenidos de la **primera** simulación de la **situación I** realizada en este orden:

- $H = 1$ m, $T = 7$ s, Dirección NE
- $H = 1$ m, $T = 9$ s, Dirección NE

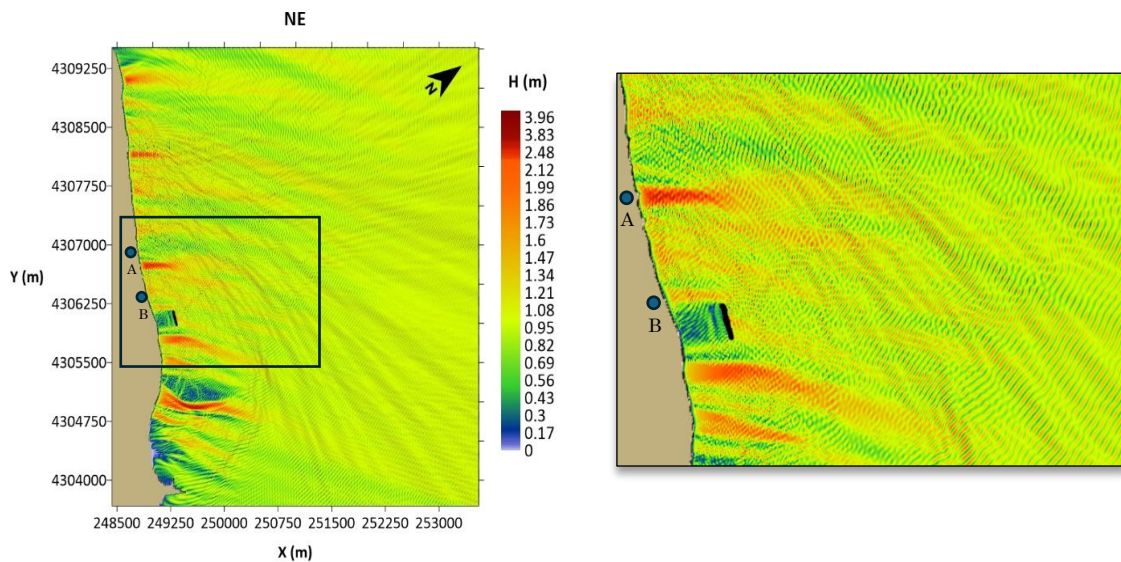


Figura 92: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 1$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s.

Fuente: Elaboración propia.

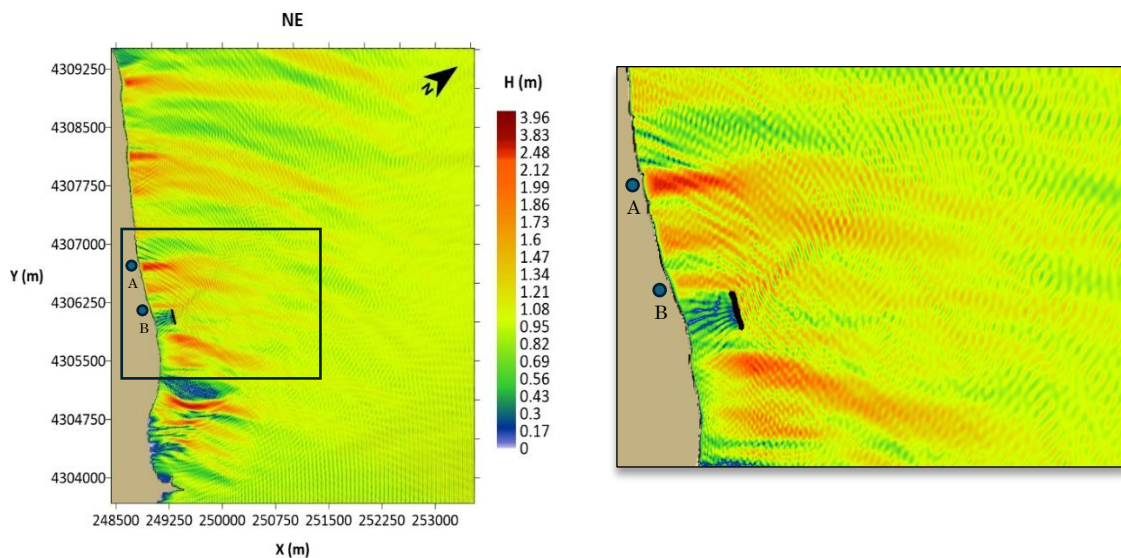


Figura 93: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 1$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 94 y Figura 95 a continuación son los resultados obtenidos de la **segunda** simulación de la **situación I** realizada en este orden:

- H = 1 m, T = 7 s, Dirección ENE
- H = 1 m, T = 7 s, Dirección E

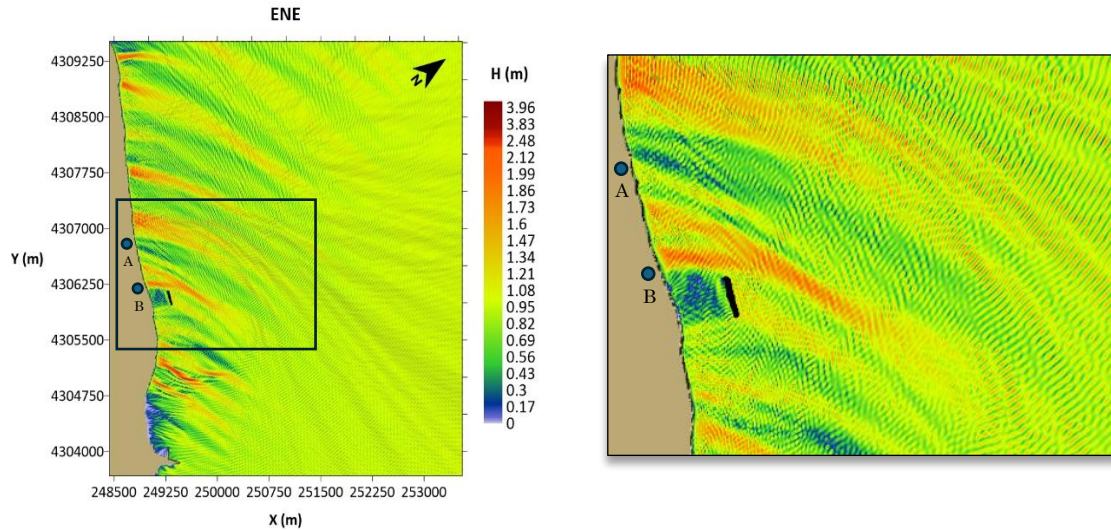


Figura 94: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 1$ m, dirección ENE y periodo (T).

Fuente: Elaboración propia.

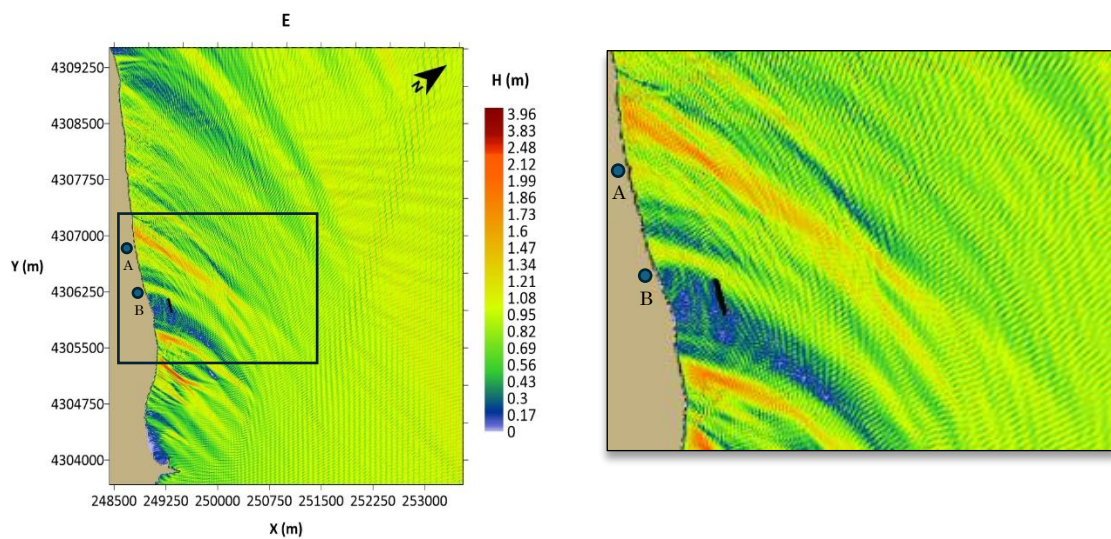


Figura 95: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 1$ m, dirección E y periodo (T) de 7 s.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 96 y Figura 97 a continuación son los resultados obtenidos de la **tercera** simulación de la **situación II** realizada en este orden:

- H = 1 m, T = 7 s, Dirección NE
- H = 1 m, T = 9 s, Dirección NE

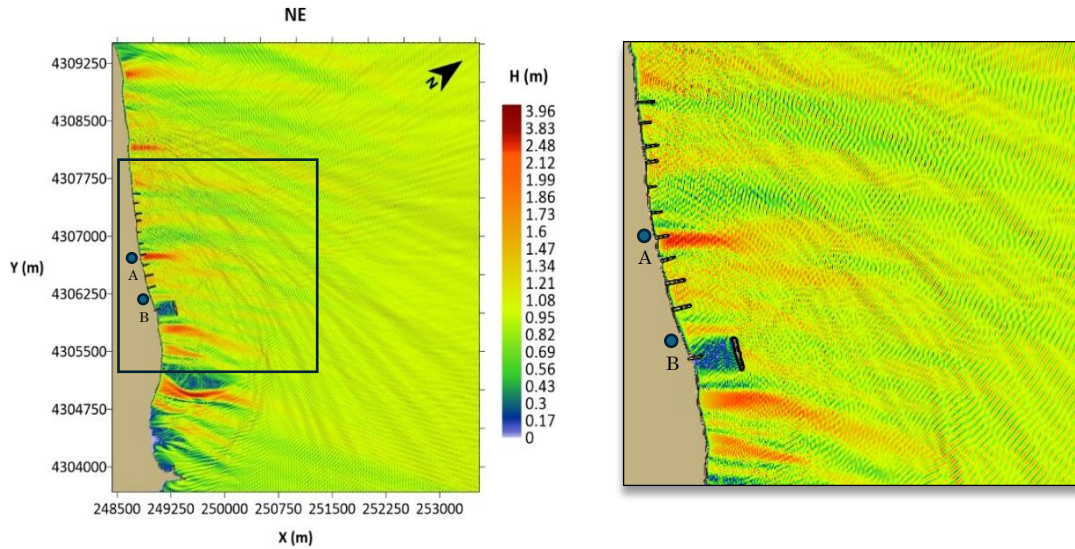


Figura 96: Resultados de situación II con altura de ola con $H = 1$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s.

Fuente: Elaboración propia.

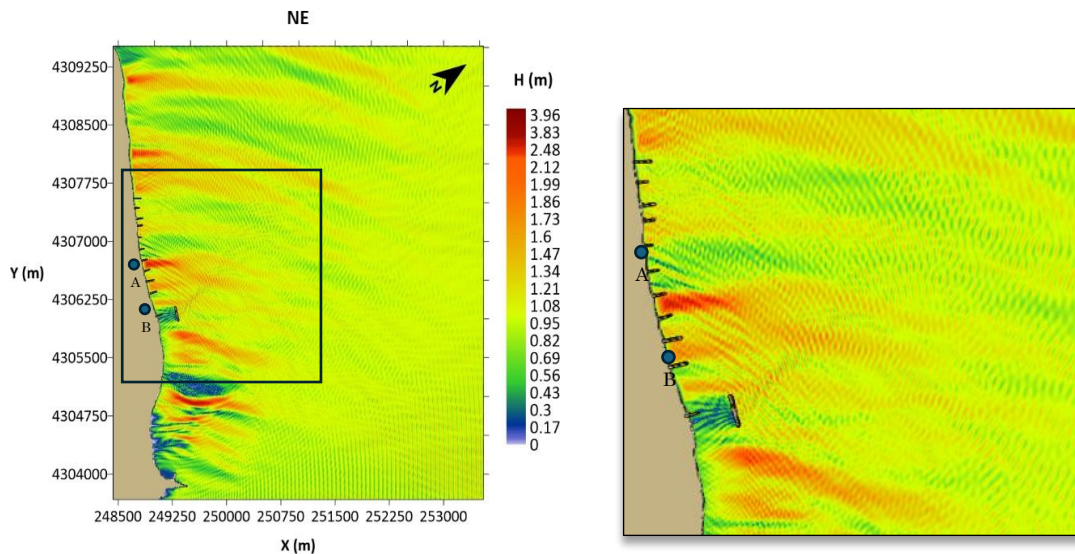


Figura 97: Resultados de situación II con altura de ola con $H = 1$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Régimen extremal de oleaje: condiciones de temporal

En este apartado, se presentan los mapas correspondientes al régimen extremal de oleaje. En este caso también se estudian para las dos situaciones: con el dique exento que se encuentra todavía presente a la altura de Les Marines (Situación I), y otra con el dique exento y además los espigones que se encontraban a la altura de Blay Beach, Les Marines en los años 70 (Situación II).

En la Figura 98 y Figura 99 a continuación son los resultados obtenidos de la simulación de la **situación I** realizada en este orden:

- H = 2 m, T = 7 s, Dirección NE
- H = 2 m, T = 9 s, Dirección NE

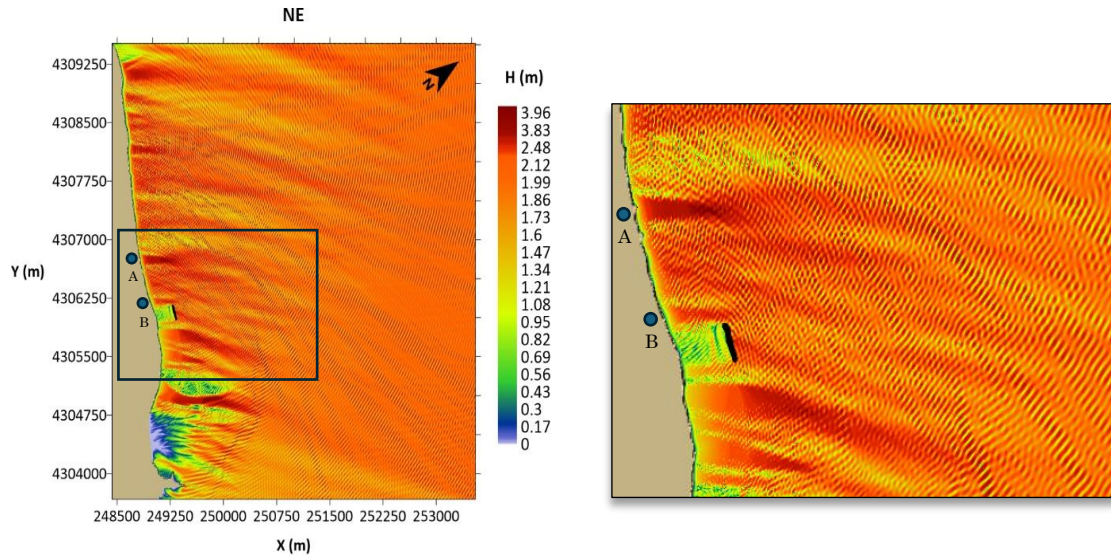


Figura 98: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 2$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s.

Fuente: Elaboración propia.

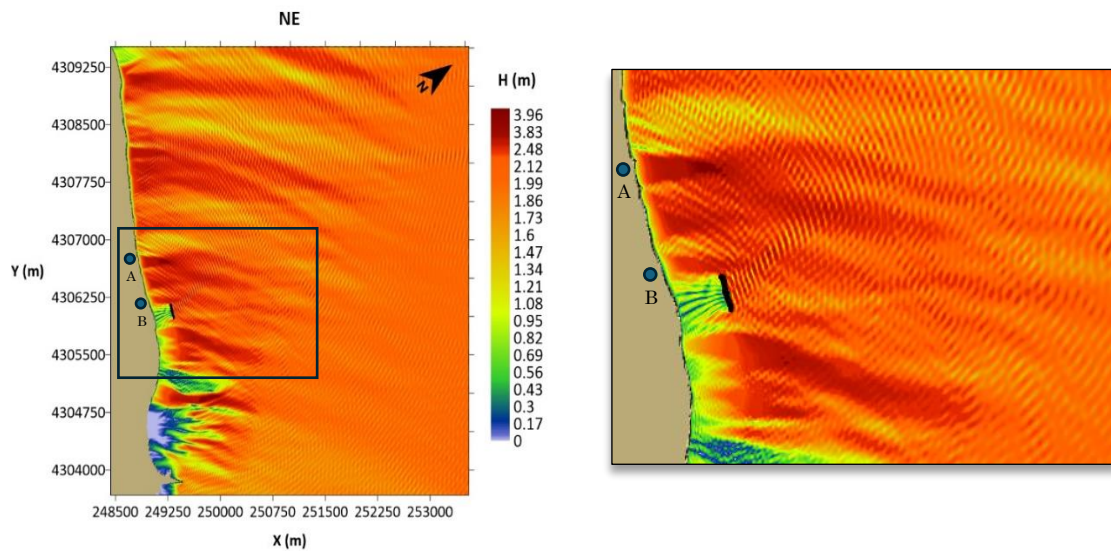


Figura 99: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 2$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 100 y Figura 101 a continuación son los resultados obtenidos de la **segunda** simulación de la **situación I** realizada en este orden:

- H = 2 m, T = 7 s, Dirección ENE
- H = 2 m, T = 7 s, Dirección NNE

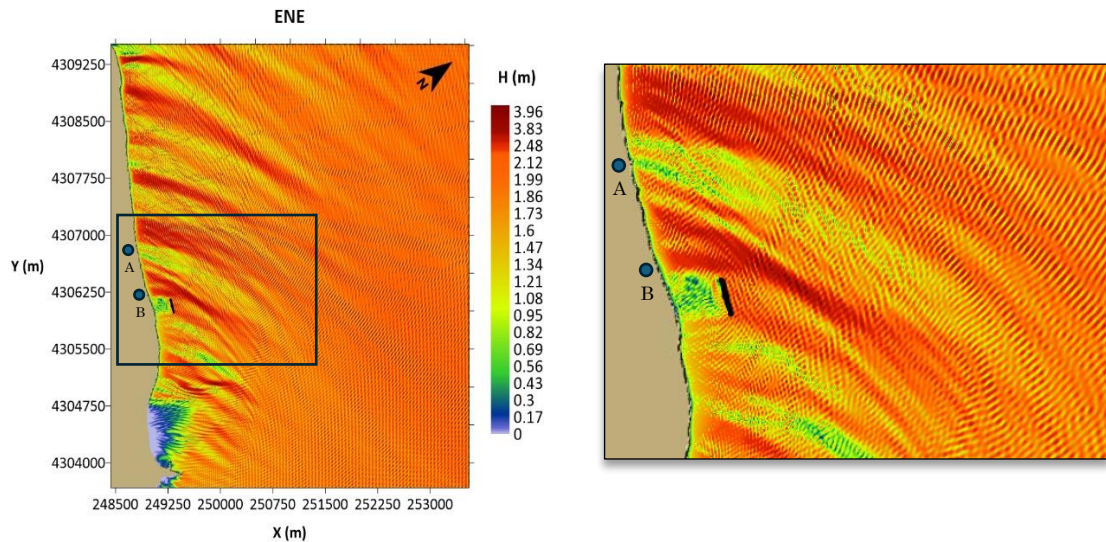


Figura 100: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 2$ m, dirección ENE y periodo (T) de 7 s.

Fuente: Elaboración propia.

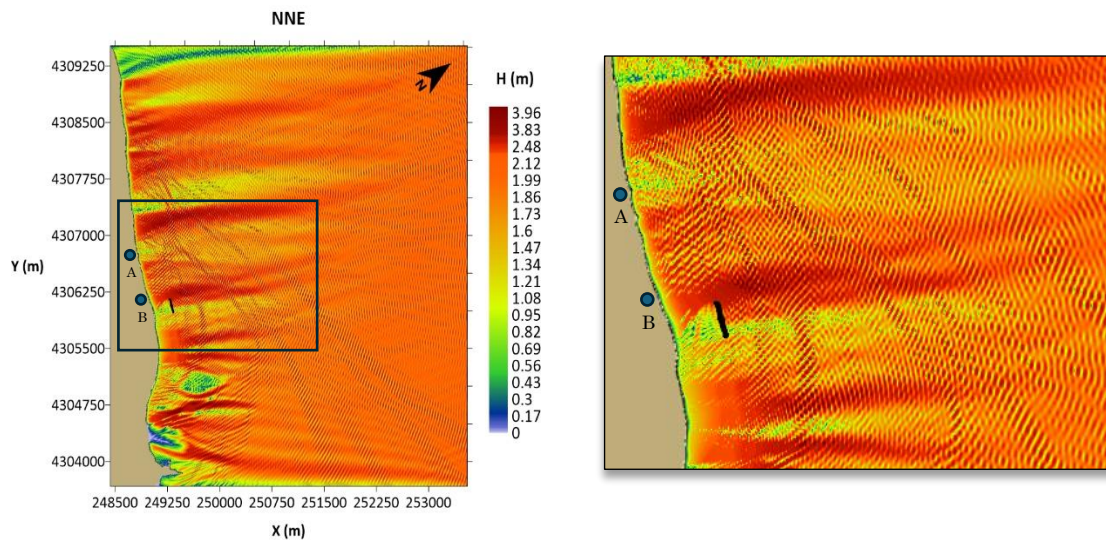


Figura 101: Resultados de situación I con altura de ola con $H = 2$ m, dirección NNE y periodo (T) de 7 s.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 102, Figura 103 y Figura 104 a continuación son los resultados obtenidos de la **tercera** simulación de la **situación I** realizada en este orden:

- $H = 3$ m, $T = 8$ s, Dirección NE
- $H = 4$ m, $T = 9$ s, Dirección NE
- $H = 5$ m, $T = 10$ s, Dirección NE

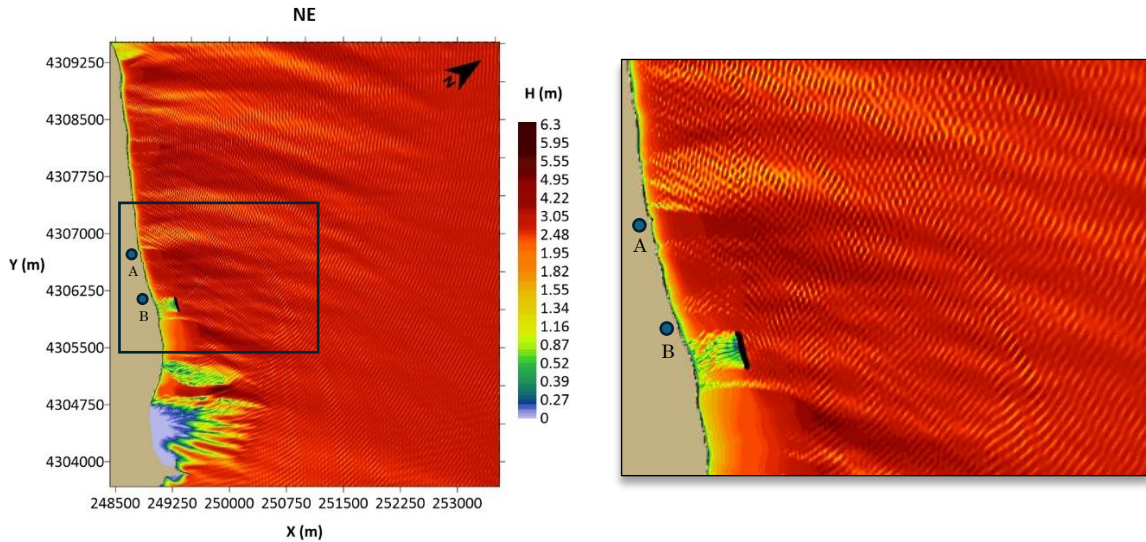


Figura 102: Resultados de situación I con alturas de ola con $H=3$ m, dirección NE y periodo (T) de 8 s.
Fuente: Elaboración propia

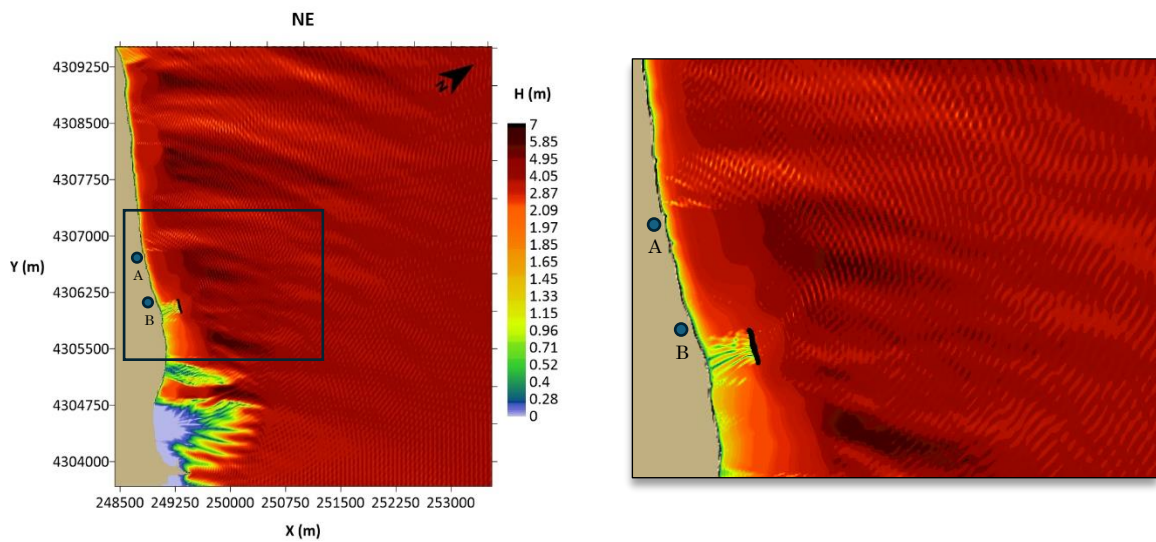


Figura 103: Resultados de situación I con alturas de ola con $H=4$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.
Fuente: Elaboración propia

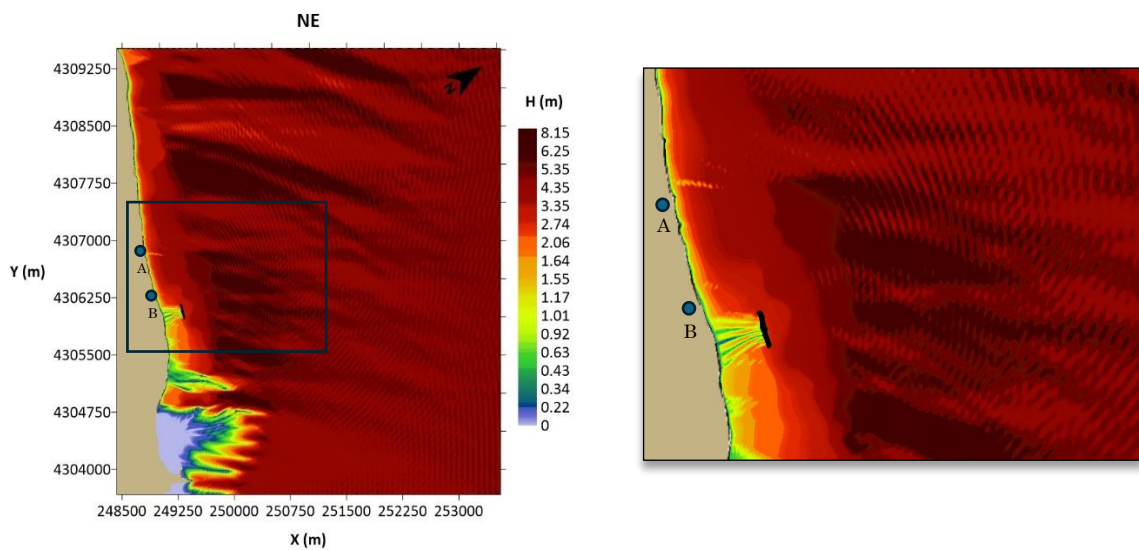


Figura 104: Resultados de situación I con alturas de ola con $H=5$ m, dirección NE y periodo (T) de 10s.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 105 y Figura 106 a continuación son los resultados obtenidos de la tercera simulación de la situación II realizada en este orden:

- H = 2 m, T = 7 s, Dirección NE
- H = 2 m, T = 9 s, Dirección NE

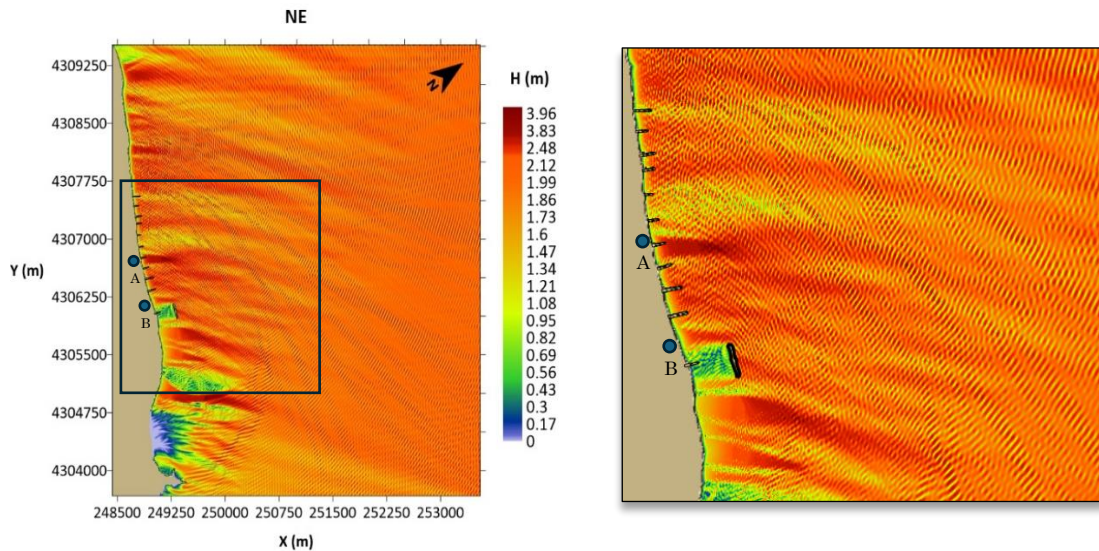


Figura 105: Resultados de situación II con altura de ola con $H=2$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s.
Fuente: Elaboración propia.

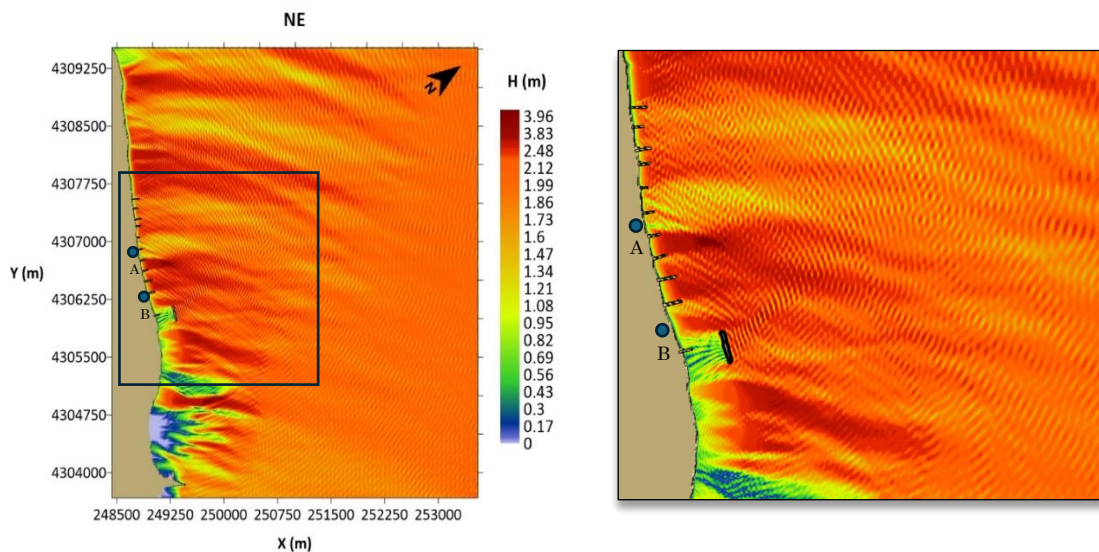


Figura 106: Resultados de situación II con altura de ola con $H=2$ m, dirección NE y periodo (T) de 9 s.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 Conclusiones parciales

Tras obtener los resultados del comportamiento del dique exento actualmente existente y la evaluación de los antiguos espigones construidos en los años 70 y posteriormente retirados, se concluye que estos últimos no ofrecían una protección costera eficaz. Su escasa longitud y orientación no permitían una interferencia efectiva con la propagación del oleaje, ni una capacidad real para retener sedimentos. En cambio, el dique exento sumergido actual cumple adecuadamente con su función de abrigo, proporcionando una barrera eficaz frente al oleaje y contribuyendo a la estabilización del tramo costero situado frente a él.

Estos resultados se tendrán en cuenta a la hora de diseñar y proponer nuevas soluciones para la zona más afectada, localizada al norte del dique, donde persisten los procesos erosivos.

5.2 Resultados de la Red Neuronal Artificial (ANN)

Tras estudiar la influencia de cada una de las variables Hrms, Ue, Tau, Urms y Ubrms, junto con el índice de rotura Hrms/h, el análisis demostró que las que mayor influencia tienen son la tensión tangencial por el fondo y la altura de ola representada por el índice de rotura. En el gráfico a continuación (Figura 107) se puede ver el resultado obtenido con el 15% de los datos designados para el test una vez entrenados 70% de los datos y validados con otros 15%.

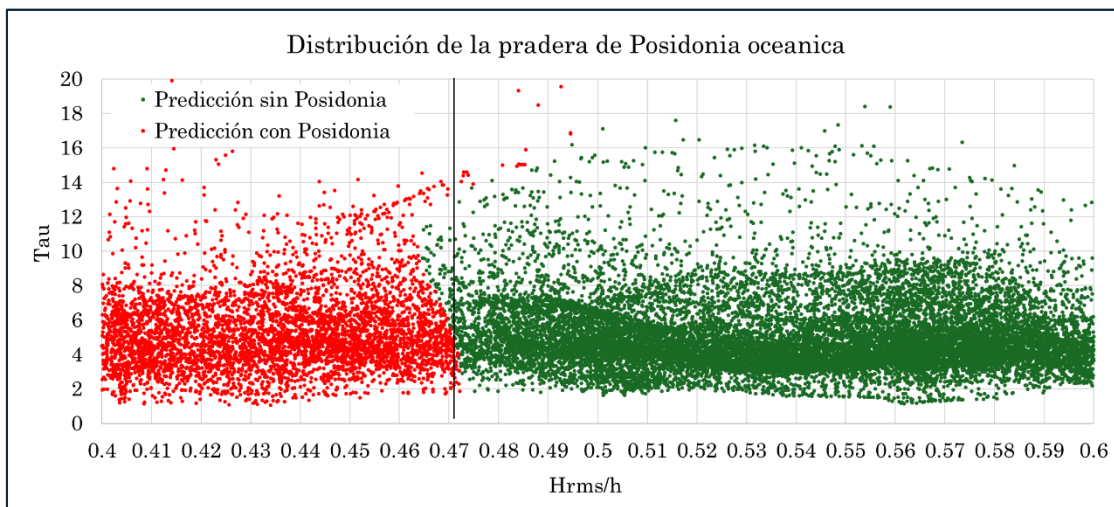


Figura 107: Condición límite para la Posidonia oceanica en el plano Tau–Hrms/h

Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico se puede deducir que la importancia e influencia que tiene la rotura por fondo resulta considerablemente más determinante que la ejercida por la tensión tangencial en el fondo. Es decir, aunque el esfuerzo cortante en el fondo tiene un efecto relevante sobre la pradera, es la condición de rotura del oleaje la que domina y define de manera más clara y precisa el límite superior de distribución de la pradera de *Posidonia oceanica*.

El índice de rotura (Hrms/h) resulta un parámetro clave al integrar simultáneamente la altura de ola y la profundidad local y permite establecer un criterio hidrodinámico objetivo. A partir de los resultados obtenidos se identifica un umbral crítico que se traduce en una condición límite hidrodinámica bien definida en la distribución de la pradera de *Posidonia oceanica*:

$$\frac{Hrms}{h} = 0,472$$

Donde:

- Hrms (m): altura de ola media cuadrática.
- h (m): profundidad; distancia vertical desde la superficie libre hasta el fondo marino.

Interpretación de la condición límite Hrms/h:

- Para valores superiores a 0,472, el oleaje alcanza la condición de rotura por fondo, generando un esfuerzo suficiente para provocar el arranque de haces y rizomas, lo que hace inviable la permanencia de la pradera en esta zona.
- Para valores inferiores a 0,472, el oleaje no llega a romper en el fondo y, en consecuencia, la pradera debería mantenerse estable, salvo en situaciones donde intervengan factores no hidrodinámicos (p. ej., déficit de transparencia del agua, dragados, vertidos o presiones antrópicas).

La condición límite obtenida permite, además, explicar de manera coherente los efectos observados durante grandes temporales, como el temporal Gloria de enero de 2020. Durante este tipo de eventos extremos, las alturas de ola superan los valores habituales, lo que provoca que el oleaje alcance la condición de rotura a profundidades superiores a las normales. Como consecuencia, la pradera de *Posidonia oceanica* experimenta procesos de arranque en cotas donde, bajo condiciones de clima marítimo medio, se mantiene estable. Este mecanismo justifica el retroceso del límite superior de la pradera tras episodios de alta energía, que posteriormente tiende a recuperarse de forma progresiva conforme se restablecen condiciones hidrodinámicas más moderadas, favoreciendo nuevamente su expansión hacia la zona costera.

Es importante señalar que el modelo de red neuronal desarrollado se ha construido a partir de datos de cartografía real de la zona de Denia, lo que garantiza la representatividad de los resultados. Asimismo, la condición límite para la *Posidonia oceanica* obtenida presenta un carácter transferible, ya que puede aplicarse en otras áreas con condiciones de transparencia del agua similares. Su utilización resulta especialmente práctica, dado que únicamente requiere disponer de la altura de ola (de los máximos temporales y direcciones más frecuentes) y propagarla desde aguas profundas hasta aguas someras, la cual puede obtenerse mediante fórmulas empíricas de propagación del oleaje o a través de modelos numéricos como XBeach. El segundo parámetro necesario es la profundidad local, fácilmente disponible en cartografía batimétrica.

De este modo, el valor crítico del índice Hrms/h obtenido a partir del modelo de la red neuronal artificial constituye un criterio cuantitativo de distribución, capaz de explicar con precisión la localización del límite superior de la pradera de *Posidonia oceanica*. Dicho criterio puede emplearse como herramienta práctica en actuaciones de construcción de obras marítimas como diques de baja cota (diques exentos o rompeolas sumergidos) y otras estructuras costeras, de manera que se minimice su impacto sobre los ecosistemas de fanerógamas marinas. Además, el umbral obtenido sirve para la toma de decisiones en proyectos de regeneración y protección de hábitats marinos frente a escenarios de cambio climático.

6 PROPUESTA DE SOLUCIONES

Como se ha evidenciado a lo largo del análisis realizado en el tramo de estudio, la playa de Les Marines, a la altura de Blay Beach, se encuentra en un estado avanzado de recesión, hasta el punto de que actualmente no existe un tramo funcional de playa arenosa y el paseo-conexión desde la Playa del Raset a la playa de les Marines resulta casi imposible por la orilla del mar (ver *ANEJO I: DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA*).

Ante esta situación, la solución que se plantea como más adecuada consiste en la regeneración de la playa mediante el vertido controlado de arena y la formación de un sistema dunar artificial, complementada con la construcción de un dique exento de baja cota que actúe como elemento de protección frente a la acción del oleaje y contribuya a la estabilidad de la nueva playa creada. Por lo tanto, este capítulo se divide en dos apartados principales:

- Diseño de estructura homogénea de baja cota (HLCS)
- Regeneración del sistema dunar

6.1 Diseño de estructura homogénea de baja cota (HLCS)

Los diques exentos son estructuras construidas en paralelo a la línea de costa, frente a la misma a bajas profundidades por encima del nivel medio del mar, o ligeramente sumergidas, generando un abrigo a la costa. Sus funciones principales son disminuir la energía del oleaje, generar un área abrigada y retener materiales sedimentarios. Al ser estructuras de baja cota son discretas y prácticamente invisibles desde la playa proporcionando la menor alteración al paisaje posible.

Los diques exentos pueden clasificarse según su composición en multicapa o homogéneos. Los diques multicapa combinan núcleo, filtro y manto y son impermeables, mientras que los homogéneos están hechos de un solo material (permeables), como escollera o piezas prefabricadas de hormigón. Entre estas piezas destacan los cubos, Cubípodos, Tetrapods, Dolos o Xbloc, diseñadas para mejorar la estabilidad y reducir el consumo de hormigón.

En este caso, se ha optado por el diseño de un dique de baja cota construido con cubípodos, de manera que actúe como un arrecife artificial. De este modo, la estructura cumple una doble función: proteger la costa mediante la disipación de la energía del oleaje y favorecer al mismo tiempo la colonización por organismos marinos.

6.1.1 El Cubípedo como elemento de protección costera

En este estudio se propone el uso del Cubípedo como elemento principal en el diseño de un dique homogéneo de baja cota (HLCS), debido a sus ventajas tanto hidráulicas como ambientales.

El Cubípedo (Figura 108) es un bloque de hormigón prefabricado utilizado en la protección de diques en talud, especialmente eficaz en zonas con fuerte oleaje y requerimientos ambientales sensibles. Fue inventado en 2005 en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València (UPV), por los profesores

Josep R. Medina y M.^a Esther Gómez-Martín. Su geometría cúbica modificada incorpora salientes que favorecen la trabazón entre piezas y aumentan la fricción interna del manto, mejorando su estabilidad hidráulica frente a las olas. Este tipo de estructuras se caracteriza por su alta porosidad, lo que permite reducir de forma eficaz la energía del oleaje y disminuir el coeficiente de transmisión, algo esencial para proteger tramos de playa frente a temporales (Medina et al., 2020). Al ser una pieza prefabricada de hormigón, el Cubípodo también ofrece importantes ventajas prácticas: se puede colocar de forma controlada, es reutilizable, y no depende de la disponibilidad de escollera natural (Molines et al., 2021).

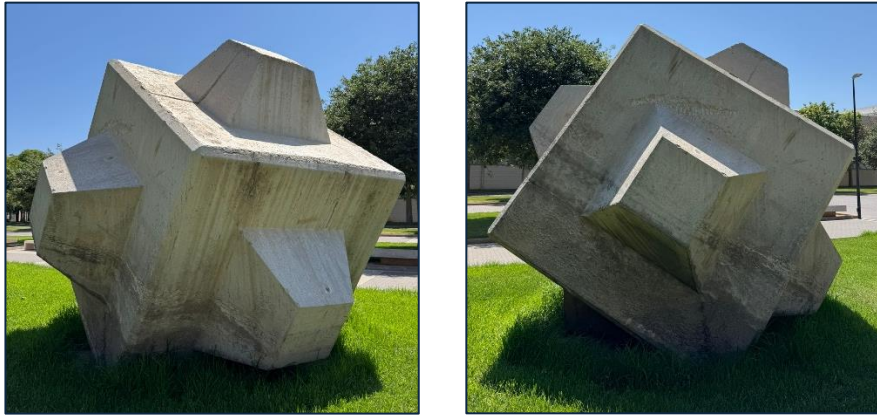


Figura 108: Cubípodo a escala real. Fotos tomadas en el campus de la UPV.
Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista ambiental, el Cubípodo favorece la colonización de especies marinas al ofrecer un hábitat con distintas exposiciones de luz y superficies rugosas, lo que contribuye a la recuperación ecológica del entorno, especialmente en zonas donde existen praderas de fanerógamas marinas (Silva et al., 2016).

Otra razón que justifica su uso en este caso concreto es la naturaleza del fondo marino, que está compuesto por una capa de arena sobre una base rocosa. Esta condición es favorable para la colocación de Cubípodos, ya que la roca proporciona un apoyo estable y reduce el riesgo de asentamientos o desplazamientos. Además, su forma tridimensional mejora el rozamiento con el terreno y permite un buen apoyo, incluso sin escollera de base, lo que garantiza estabilidad estructural ante oleaje intenso (Medina et al., 2020; Molines et al., 2021; Ripoll et al., 2023).

Por estas razones, se considera una alternativa eficaz y sostenible para estructuras sumergidas o rompeolas que buscan proteger la costa minimizando el impacto sobre ecosistemas como las praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*.

Cabe destacar que el diseño del dique que se propone en este trabajo se basa en ensayos físicos realizados previamente en el marco de los proyectos HOLOBREAK y HOLOBRACE, desarrollados en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València (LPC-UPV). Dichos estudios experimentales han permitido caracterizar el comportamiento hidráulico de diques homogéneos de baja cota (HLCS) contruidos con Cubípodos, evaluando su estabilidad y transmisión de oleaje bajo condiciones de rotura en aguas someras. En concreto, se han ensayado

distintas configuraciones de mallas de colocación (cuadrada y triangular) y número de capas (1, 3 y 5), concluyéndose qué disposiciones ofrecen un óptimo equilibrio entre estabilidad estructural y eficiencia constructiva (Ripoll, 2024).

6.1.2 Criterios de diseño y emplazamiento

En el diseño del dique de baja cota de cubípodos requiere considerar varios criterios técnicos que influyen en la alternativa a desarrollar finalmente como solución. Fundamentalmente, entre las principales decisiones a adoptar se encuentran los siguientes:

- El grado de inmersión de la estructura: optar por dique sumergido, emergido o parcialmente emergido.
- La longitud total del dique: colocar una estructura única más extensa o disponer de dos o más unidades de menor longitud.
- El ángulo de inclinación respecto a la línea de costa.

En la fase de diseño, es muy importante analizar factores como la batimetría, la altura de ola de cálculo, la pendiente media del fondo y la orientación de los frentes de ola, de modo que la geometría propuesta garantice una disipación de energía adecuada sin comprometer la estabilidad de la estructura ni la dinámica litoral existente.

Respecto al emplazamiento del dique se tienen que considerar tres factores claves que son:

- El límite superior (upper limit) de distribución de la pradera de *Posidonia oceanica*.
- La zona de mayor concentración de energía del oleaje.
- La formación o no de tómbolos/hemitómbolos.

6.1.3 Vida útil y altura de ola de cálculo

Según los criterios que establece la ROM 1.0-09 (Recomendaciones para Obras Marítimas) la vida útil y el periodo de retorno de diseño de una estructura marítima, como un dique exento de baja cota, deben determinarse en función de varios factores: la función de la estructura, su localización, el nivel de protección requerido y las consecuencias de un posible fallo. En las tablas a continuación se establece la vida útil mínima (V_m) de 15 años que se debe asegurar para una estructura de regeneración y defensa de playas. Por otro lado, la tabla a la derecha establece la probabilidad de fallo frente a los modos de fallo (P_f) a considerar, en este caso de 0,2 (Tabla 7).

Tabla 7: IRE y vida útil mínima en función del tipo de obra para áreas litorales (izq.) e ISA y probabilidad conjunta de fallo en función del tipo de obra para áreas litorales (der.).

Fuente: ROM 1.0-09

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA			ÍNDICE IRE ⁷		VIDA ÚTIL MÍNIMA (V _m) ⁷ (años)
ÁREAS PORTUARIAS	PUERTO COMERCIAL	Puertos abiertos a todo tipo de tráfico	r ₃	Alto	50
		Puertos para tráfico especializados	r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹
	PUERTO PESQUERO		r ₂	Medio	25
	PUERTO NAÚTICO-DEPORTIVO		r ₂	Medio	25
	INDUSTRIAL		r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹
	MILITAR		r ₂ (r ₃) ²	Medio (alto) ²	25 (50) ²
	PROTECCIÓN DE RELLENOS O DE MÁRGENES		r ₂ (r ₃) ³	Medio (alto) ³	25 (50) ³
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ⁴		r ₃	Alto	50
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		r ₂ (r ₃) ⁵	Medio (alto) ⁵	25 (50) ⁵
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		r ₁ (r ₃) ⁶	Bajo (alto) ⁵	15 (50) ⁷
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		r ₁	Bajo	15

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA			ÍNDICE ISA		P _{RELU}	P _{FALLA}
COMERCIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07
		Pasajeros y Mercancías no peligrosas ¹	s ₂	Bajo	0.10	0.10
	Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique	s ₁	No significativo	0.20	0.20	
PESQUERO	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s ₁	No signif.	0.20	0.20	
NAÚTICO-DEPORT.	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s ₁	No signif.	0.20	0.20	
INDUSTRIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07
		Mercancías no peligrosas	s ₂	Bajo	0.10	0.10
	Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique	s ₁	No significativo	0.20	0.20	
MILITAR	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique ¹	s ₃	Alto	0.01	0.07	
	Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique	s ₁	No signif.	0.20	0.20	
PROTECCIÓN ⁶	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₃	Alto	0.01	0.07
		Mercancías no peligrosas	s ₂	Bajo	0.10	0.10
DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ⁵		s ₄	Muy alto	0.0001	0.07	
PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		s ₂ (s ₃) ⁴	Bajo (alto) ⁴	0.10 (0.0001)	0.10 (0.07)	
PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		s ₂ (s ₃) ⁵	Bajo (muy alto) ⁵	0.10 (0.0001)	0.10 (0.07)	
REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		s ₁	No signif.	0.20	0.20	

¹ El índice IRE se elevará a r₃ cuando el tráfico esté asociado con el suministro energético o con materia prima mineral estratégica y no se disponga de instalaciones alternativas adecuadas para su manipulación y/o almacenamiento.
² El índice IRE se elevará a r₃ cuando la instalación militar se considere esencial para la defensa nacional.
³ En obras de protección de rellenos o de defensa de márgenes se tomará un índice IRE igual al señalado para el área portuaria en que se localiza.
⁴ Se entienden como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquellos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.
⁵ El índice IRE se elevará a r₃ cuando la toma de agua o el punto de vertido esté asociado con el abastecimiento de agua para uso urbano o con la producción energética.
⁶ El índice IRE se elevará a r₃ cuando en su zona de afección se localicen edificaciones o instalaciones industriales.
⁷ Los índices inferiores a r₃ de la tabla se elevarán un grado por cada 30 ME de coste de inversión inicial de la obra de abrigo.

¹ PROTECCIÓN DE RELLENOS O MÁRGENES.
² En el caso de que en la superficie adosada al dique esté previsto que se ubiquen edificaciones (p.e. estaciones marítimas, lonjas...), depósitos o silos que pudieran resultar afectados en el caso de fallo de la obra de abrigo, se considerará un índice ISA muy alto (s₄) (P_{RELU}=0.0001; P_{FALLA}= 0.0007).
³ Se consideran mercancías peligrosas los grupos de sustancias prioritarias incluidas en el anexo X de la Directiva Marco del Agua (Decisión 2455/2001/CE), en el inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER, Decisión 2004/479/CE), y en el Reglamento Nacional de Admisión, Manipulación y Almacenamiento de Mercancías Peligrosas (Real Decreto 1451/1989). (Ver RICM 5.1-05).
⁴ Se entiende como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquellos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.
⁵ El índice ISA se elevará a s₃ cuando la toma de agua o el punto de vertido estén asociados con el abastecimiento de agua para uso urbano o industrial o con la producción energética.
⁶ El índice ISA se elevará a s₄ cuando en caso de fallo pudieran resultar afectadas edificaciones u otras instalaciones industriales.

$$T_R = 1 / (1 - (1 - Pf)^{(1/Vm)})$$

Donde:

- Tr es el periodo de retorno (años) asociado al oleaje de proyecto.
- Vm es la vida útil (años), es decir, el periodo de tiempo durante el cual la obra debe cumplir su función con un nivel de servicio adecuado y sin requerir reparaciones mayores.
- Pf es la probabilidad de fallo frente a los modos de fallo.

Por lo tanto, una vez obtenidos los valores de las tablas anteriores para la vida útil mínima (Vm) y la probabilidad de fallo (Pf), se obtiene que el periodo de retorno (Tr) calculado es de 67,7 años, el cual se redondea a 70 años conforme a los criterios habituales de diseño y seguridad recogidos en la ROM.

En el gráfico de la Figura 109 se muestra el ajuste de la probabilidad mediante la distribución de Weibull, la altura anual de temporales y la probabilidad de excedencia. La relación entre la altura significativa de ola y el periodo de pico está descrita por la expresión:

$$T_p = 4,36H_s^{0,47}$$

Considerando un periodo de retorno (Tr) de 70 años, lo que corresponde a una probabilidad de excedencia anual del 0,014, se obtiene una altura significativa de ola en aguas profundas de aproximadamente 9,8 m. Por lo tanto, el periodo pico asociado a esta altura de ola es de 13 segundos.

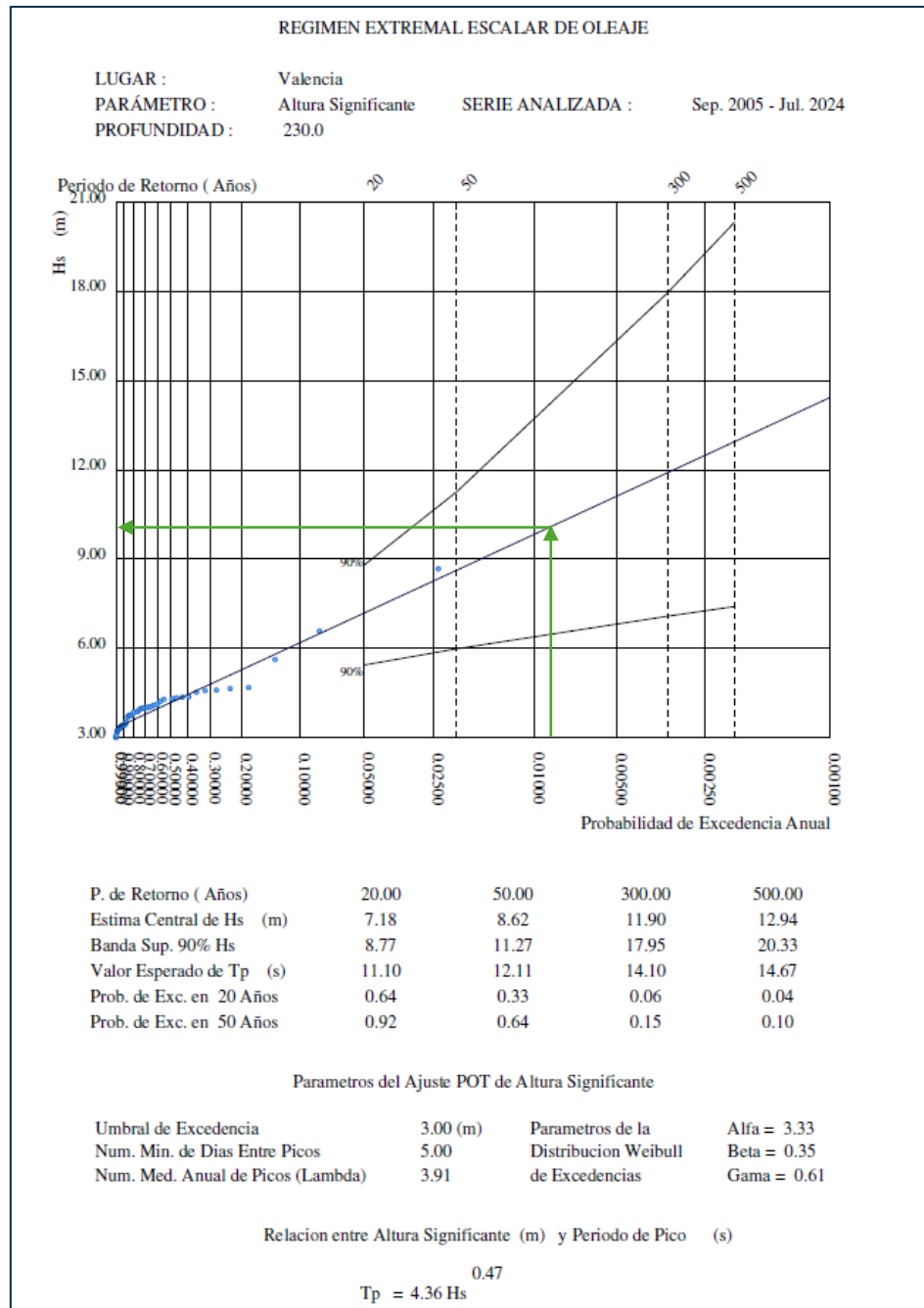


Figura 109: Régimen extremal direccional de oleaje. Boya de Valencia.

Fuente: Puertos del Estado.

Cabe destacar que los datos registrados por la boya de Valencia corresponden a condiciones en aguas profundas. No obstante, para disponer de las condiciones reales de oleaje en el entorno del dique, ubicado en aguas someras, es necesario realizar una transformación mediante propagación del oleaje hacia la costa. Para ello, se requiere conocer el coeficiente de asomeramiento (K_s) y el coeficiente de refracción (K_r). El ábaco de la Figura 110 es desarrollado por el cuerpo de ingenieros militares de los EEUU (U.S. Army Corps of Engineers) y permite la obtención de los coeficientes K_r y K_s si se conoce la dirección de incidencia del oleaje y su periodo.

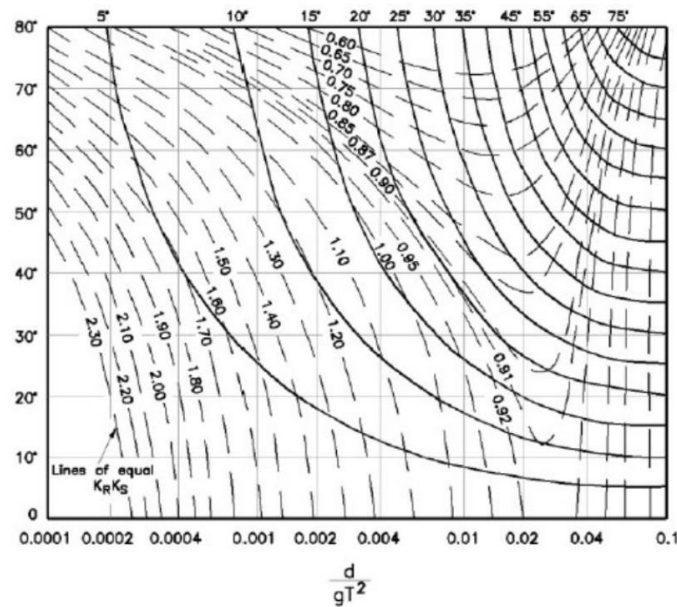


Figura 110: Ábaco para obtención de coeficientes de refracción y asomeramiento.

Fuente: Shore Protection Manual (1984).

Para la correcta utilización del ábaco de diseño, es necesario disponer de dos parámetros fundamentales. El primero es el monomio:

$$\frac{d}{g \cdot T^2}$$

Donde:

- d representa la profundidad en el pie del dique
- g es la aceleración de la gravedad
- T el periodo del oleaje incidente.

El segundo parámetro es el ángulo de incidencia del oleaje con respecto a la batimetría en aguas profundas, el cual se determina a partir de la dirección de procedencia del oleaje dominante.

Tal y como se ha establecido previamente, la altura significativa del oleaje en aguas profundas es de 9,8 m, con un periodo pico de 13 segundos.

La profundidad a pie de dique viene determinada por la batimetría en la zona de emplazamiento del dique.

En base a los resultados obtenidos tras propagar el oleaje en la zona de estudio, en la Figura 111 se puede ver que la zona donde se concentra la mayor energía de oleaje coincide con la zona en la que actualmente no existe playa.

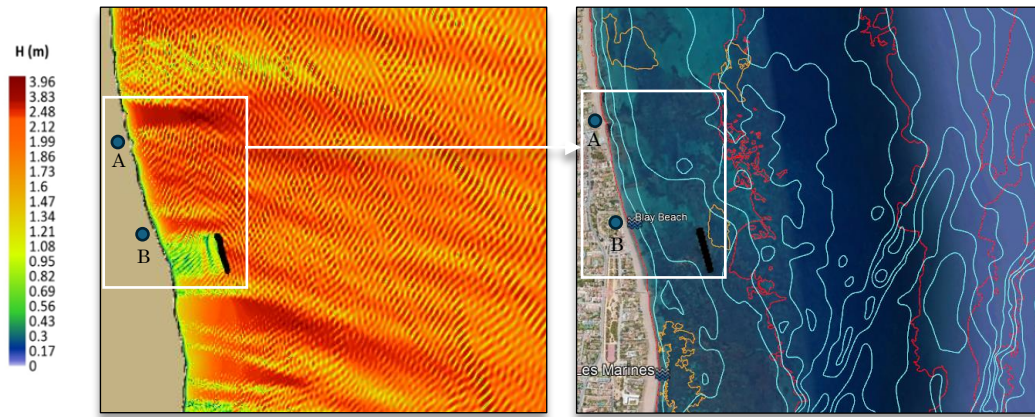


Figura 111: Resultados con altura de ola $H=2$ m, dirección NE y periodo (T) de 7 s, en comparación con vista aérea de Google Earth con la batimetría (azul claro) y las praderas de *Posidonia* (rojo) y *Cymodocea* (amarillo).

Fuente: Elaboración propia.

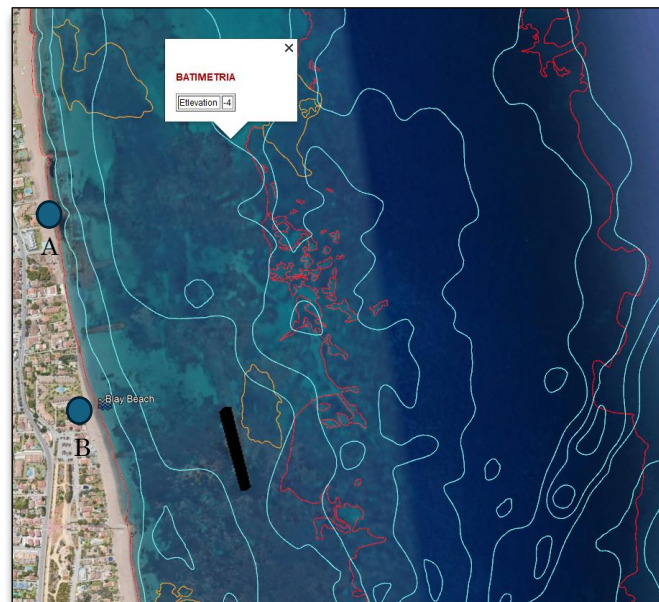


Figura 112: Detalle de la zona más afectada. Vista aérea de Google Earth con la batimetría (azul claro) y las praderas de *Posidonia* (rojo) y *Cymodocea* (amarillo).

Fuente: Google Earth.

Atendiendo a los dos criterios determinantes para la ubicación del dique, la profundidad óptima se sitúa entre las isóbatas de -3 m y -4 m, con la estructura dispuesta de forma paralela a la línea de costa y alineada con el dique exento existente. Esta disposición garantiza, por un lado, que las praderas de *Posidonia oceanica* queden fuera del área de afección directa, y por otro, que la zona de mayor concentración de energía del oleaje se vea interceptada por el dique, facilitando su disipación y contribuyendo a la protección de la línea de costa.

Para el cálculo del monomio, y en concordancia con un criterio conservador, se adopta la condición más desfavorable, correspondiente a una profundidad de cálculo de 4 metros en el pie del dique.

Por lo tanto, el monomio para una profundidad de 4 metros a pie de dique queda como sigue:

$$\frac{d}{g \cdot T^2} = \frac{4}{9,81 \cdot 11^2} = 0,0034$$

Dado que la dirección dominante del oleaje es del noreste (NE), y que las líneas batimétricas en la zona de estudio presentan una orientación casi paralela a la línea de costa, el ángulo de incidencia del oleaje respecto a las isóbatas en aguas profundas se considera bajo, en torno a 10°–15°. Esta condición implica una entrada prácticamente normal del oleaje hacia el frente del dique. Por lo tanto, el valor del coeficiente de $K_r \cdot K_s$ a pie de dique corresponde al valor de 0,87.

Una vez obtenido este valor, se calcula la altura de ola correspondiente a pie de dique ($H_{s,p}$) mediante la fórmula a continuación:

$$H_{s,p} = H_{s,o} \cdot K_r \cdot K_s$$

Donde:

- $H_{s,p}$ es la altura significativa del oleaje en el pie del dique
- $H_{s,o}$ es la altura significativa del oleaje en aguas profundas (offshore).
- K_r es el coeficiente de refracción
- K_s es el coeficiente de asomeramiento

Se obtiene una altura de ola a pie de dique de 8,53 metros.

Para limitar el crecimiento de la altura del oleaje debido al asomeramiento en zonas someras, es necesario considerar el fenómeno de rotura por fondo, que impone un valor máximo físico a la altura que puede alcanzar el oleaje antes de romper. Esta altura límite, denominada altura de rotura (H_b), se calcula mediante una relación esta fórmula:

$$H_b = \gamma \cdot h_b$$

Donde:

- h_b es la profundidad local en el punto de rotura
- γ es el coeficiente de rompimiento, cuyo valor típico para fondos con pendiente moderada oscila entre 0,6 y 0,8.

En este estudio se adopta el valor recomendado de $\gamma=0,78$, propuesto por McCowan, que ha demostrado ser una referencia fiable para entornos de playa abiertos. Esta estimación permite verificar si la altura del oleaje transformado en el pie del dique excede el valor de rotura, en cuyo caso se limita a H_b para garantizar un diseño realista y coherente con el comportamiento físico del oleaje en aguas someras.

Por lo tanto, se obtiene la altura de rotura para la profundidad estudiada:

$$H_b = 0,78 \cdot 4 = 3,12 \text{ m}$$

La altura de ola utilizada para el diseño de la estructura será la menor entre la altura de ola propagada hasta el pie del dique y la altura de rotura por fondo. Esto

se debe a que, si el proceso de transformación del oleaje (por asomeramiento y refracción) genera una altura superior a la que permite la rotura en la profundidad existente, la ola romperá antes de llegar al emplazamiento del dique. En consecuencia, solo se considera válida para el cálculo aquella altura que efectivamente puede alcanzar el pie del dique sin haber experimentado rotura. Aplicando este criterio, se adopta como altura de ola de diseño el valor de **3,12 m**.

6.1.4 Dimensiones de los Cubípodos y sección tipo

Como se ha indicado previamente, el diseño del dique se apoya en los ensayos físicos realizados en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València. Estos estudios analizaron la estabilidad hidráulica de diques de baja cota construidos con Cubípodos, variando tanto el tipo de malla de colocación (cuadrada y triangular) como la disposición del manto (número de capas y bloques por hilera).

El canal de oleaje (Figura 113) donde se realizaron los ensayos está diseñado para estudiar el comportamiento del oleaje y su interacción con modelos físicos de estructuras costeras; y tiene las siguientes características principales:

- Dimensiones: 30 metros de largo, 1,2 metros de ancho y 1,2 metros de alto.
- Fondo variable: incluye una rampa de 15,3 m con pendiente del 4%, simulando el fondo marino y permitiendo la rotura por fondo.
- Zonificación:
 - Los primeros 5,46 m son fondo plano.
 - Luego hay dos rampas consecutivas: una de 6,25 m con pendiente del 4% y otra de 7,49 m con pendiente del 2%, donde se ubica el modelo a ensayar.
- Generación de oleaje: una pala controlada por software genera oleaje irregular usando el espectro JONSWAP ($\gamma = 3,3$). La pala incorpora el sistema AWACS para evitar reflexiones no deseadas.
- Disipación de energía: al final del canal, un sistema de 13 paneles metálicos ranurados disipa la energía del oleaje transmitido, evitando interferencias en las mediciones.
- Instrumentación: se utilizan sensores capacitivos para medir el nivel del agua y distinguir entre oleaje incidente y reflejado. Hay un total de 9 sensores distribuidos antes, en y después del modelo.
- Material del modelo: los Cubípodos utilizados son de resina inyectada ($D_n = 4,36$ cm) y de distintos colores por capa, lo que permite observar y analizar desplazamientos y daños tras los ensayos.



Figura 113: Canal de oleaje, LPC-UPV.

Fuente: Elaboración propia.

Durante la fase experimental, se llevaron a cabo ensayos comparativos utilizando tanto malla triangular como malla cuadrada (Figura 114), con el objetivo de evaluar cuál de estas configuraciones ofrecía mayor estabilidad estructural, tanto en el tronco como en el morro del dique.

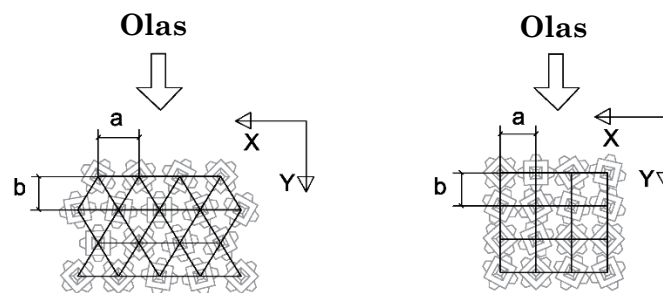
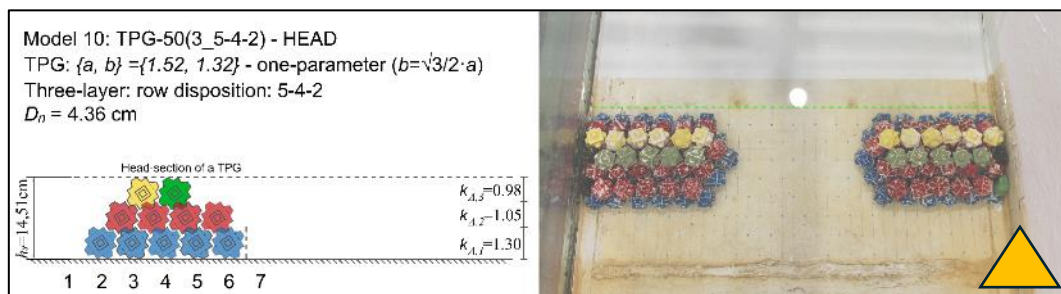


Figura 114: Malla triangular y malla cuadrada utilizadas en los ensayos.

Fuente: Molines et al., 2021.

Por otro lado, se llevaron a cabo ensayos sobre distintas configuraciones de sección, en los que se variaba tanto el número de hileras como la cantidad de bloques dispuestos en cada fila, con el fin de optimizar la disposición del manto de Cubípodos. En la Figura 115 se presenta a modo de ejemplo unos de los modelos que fueron ensayados.



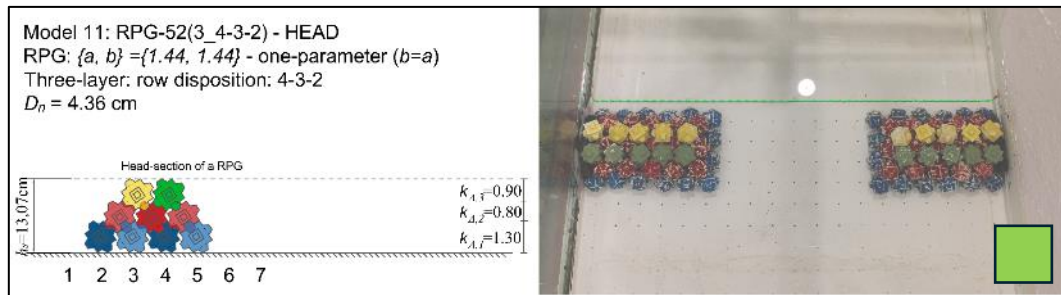


Figura 115: Ejemplo de modelos ensayados en el LPC, UPV. Proyectos HOLOBREAK y HOLOBRACE.

Fuente: Documentación técnica interna: ensayo de Cubípodos.

En general, fueron ensayados múltiples combinaciones de configuraciones frente a condiciones de oleaje variadas (altura de ola, periodo pico y profundidad).

La conclusión principal al comparar el comportamiento de las dos secciones con la malla triangular y cuadrada es que, en la zona de los morros, la malla cuadrada presenta una mayor estabilidad. A modo de ejemplo, en la Figura 116 se muestran resultados de dos ensayos con las mismas condiciones de oleaje propagado y el resultado de cómo han quedado las piezas con una y otra malla.

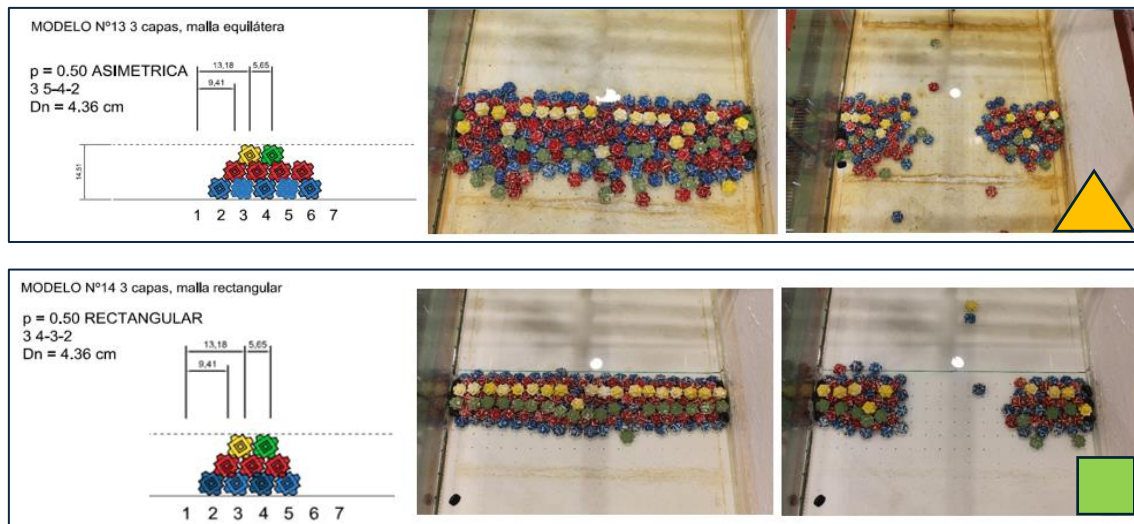


Figura 116: Resultados de modelos ensayados (LPC, UPV. Proyectos HOLOBREAK y HOLOBRACE).

Fuente: Documentación técnica interna: ensayo de Cubípodos.

Para resumir, las condiciones que se dan en el tramo de playa en Les Marines que se pretende regenerar son:

- Altura de cálculo (H_b) de 3,1 m.
- Periodo pico (T_p) de 13 segundos.
- Profundidad a pie de dique de 4 metros.

Cabe destacar que todos los ensayos se han realizado con una pendiente del fondo del 2% y los cubípodos son de diámetro nominal de 4,36 cm. Además, los ensayos que se han utilizado como referencia corresponden a un dique enrasado, dado que la solución final propuesta busca garantizar la mínima obstrucción visual posible.

A continuación, se muestra el ensayo realizado con condiciones muy similares a las del tramo de Les Marines que mejor protección a la costa ofrece. La configuración es de malla cuadrada y disposición en tres capas 4-3-2, sometida a oleaje extremo con una altura de ola de 1,9 m, periodo pico de 16,2 s y profundidad de 4,3 m a escala 1:30 (Figura 117).

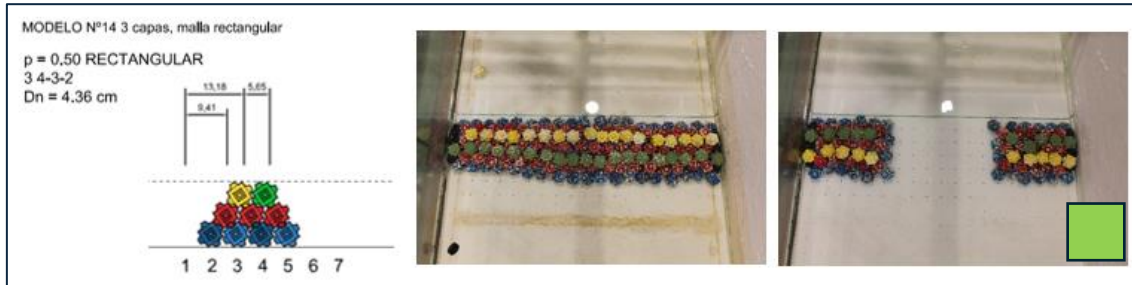


Figura 117: Resultados del ensayo sobre el modelo 14, tronco (izq.), morros (der.).

Fuente: Documentación técnica interna: ensayo de Cubípodos.

Como se puede ver en las imágenes, los resultados muestran que la malla cuadrada ofrece un comportamiento muy estable frente a la acción del oleaje, sobre todo en la zona del morro. Asimismo, se ha determinado que la configuración de tres hileras en disposición 4-3-2 proporciona la mayor estabilidad global, tanto en términos de trabazón entre piezas como en capacidad de disipación. Cabe resaltar que, aunque los ensayos se realizaron con periodos pico algo mayores a los característicos en la playa de Les Marines, esta condición sitúa el diseño del lado de la seguridad. Por lo tanto, en caso de que se den escenarios de oleaje con periodos mayores de los habituales, la estructura no colapsaría.

Por otro lado, la altura de ola del ensayo (1,9 m) es menor que la altura teórica de rotura por fondo, estimada en 3,1 m para esta zona. Esto se traduce en que, en diques permeables de baja cota, la rotura no siempre se produce al alcanzar la altura teórica, ya que parte de la energía del oleaje se disipa progresivamente antes de que la ola incida directamente sobre la estructura. Durante la campaña de ensayos se comprobó que el dique no sufrió roturas en ninguno de los casos, incluso al incrementarse progresivamente tanto la altura como el periodo de ola. La razón principal es que, al superar ciertos umbrales, las olas rompen en la zona de fondo antes de alcanzar el pie del dique, lo que reduce considerablemente la energía incidente.

Es importante mencionar que las condiciones del canal de ensayos presentan un fondo liso, a diferencia del entorno real en Les Marines, donde el fondo marino presenta irregularidades naturales, presencia de praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*, y rugosidad inducida por sedimentos y biota. Esta heterogeneidad implica que, in situ, la altura de ola que llegaría al pie del dique sería incluso menor que la registrada durante los ensayos, lo cual refuerza aún más la validez del diseño propuesto y sitúa la solución adoptada en el lado de la seguridad.

En resumen, el modelo que mejor se adapta a las condiciones presentes en el tramo de playa a regenerar en Les Marines, tiene altura de ola de 1,9 metros, periodo pico de 16,2 segundos y profundidad de 4,3 metros. Por lo tanto, el diámetro nominal mínimo a utilizar sería de:

$$Dn = \lambda * Dn_{modelo} = 30 * 4,36 * 0,01 = 1,31 \text{ m}$$

Donde:

- λ es la escala utilizada.
- Dn_{modelo} es el diámetro nominal de los cubípodos utilizados en los ensayos (en cm).
- Dn es el diámetro nominal real de las piezas de cubípodos (en m).

El peso de cada Cubípodo sería de:

$$W = Dn^3 * \gamma = 1,31^3 * 2,35 = 5,3 \text{ tn}$$

Donde:

- W es el peso de cada Cubípodo (en toneladas).
- Dn es el diámetro nominal real de las piezas de cubípodos (en m).
- γ es el peso específico del hormigón utilizado para la fabricación de cubípodos, en este caso de 2,35 t/m³.

Una vez fijado el diámetro nominal, se adopta un ancho de sección de 5,25 metros. A continuación, se presenta la sección óptima de dique que se va a utilizar en este estudio, siendo la que mejor resultado ha dado en función de los parámetros medidos en el laboratorio (Figura 118).

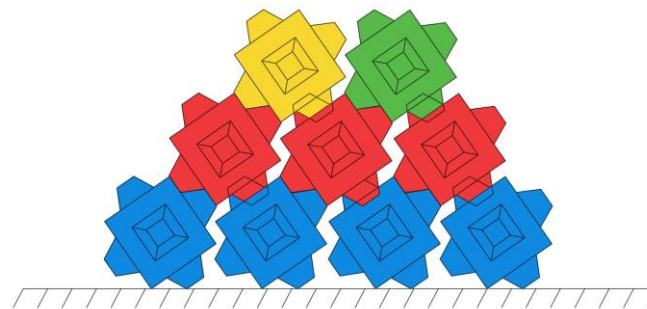


Figura 118: Sección tipo.

Fuente: Elaboración propia.

Para optimizar la operación de desencofrado y alcanzar rendimientos de fabricación similares a los obtenidos con bloques cúbicos convencionales, es fundamental que el diseño del encofrado permita una extracción vertical eficiente. Esta condición se consigue mediante la incorporación de una ligera inclinación, aproximadamente del 3,5 %, en las caras verticales del molde, lo cual facilita el desencofrado al permitir que las paredes del hormigón se separen simultáneamente al elevar el encofrado superior (Medina & Gómez-Martín, 2015).

Es importante destacar que la dimensión nominal (Dn) del Cubípodo no coincide con la medida real del lado de la pieza, ya que esta última se define por el

parámetro "L". En la Figura 119 a continuación se presentan las dimensiones del Cubípodo en función de dicho parámetro L.

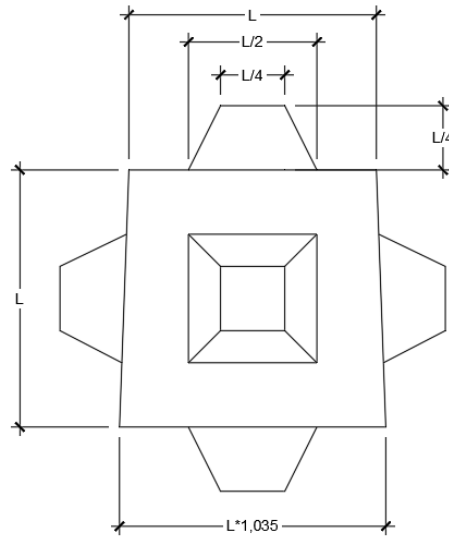


Figura 119: Relación entre las dimensiones características del Cubípodo en función del parámetro L.

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener las dimensiones de los lados, es necesario emplear la siguiente relación entre el lado (L) y el diámetro nominal (Dn) de las piezas:

$$L = \frac{D_n}{1,068} = \frac{1,31}{1,068} = 1,23 \text{ m}$$

Finalmente, las dimensiones de la pieza a utilizar quedarían de la siguiente manera:

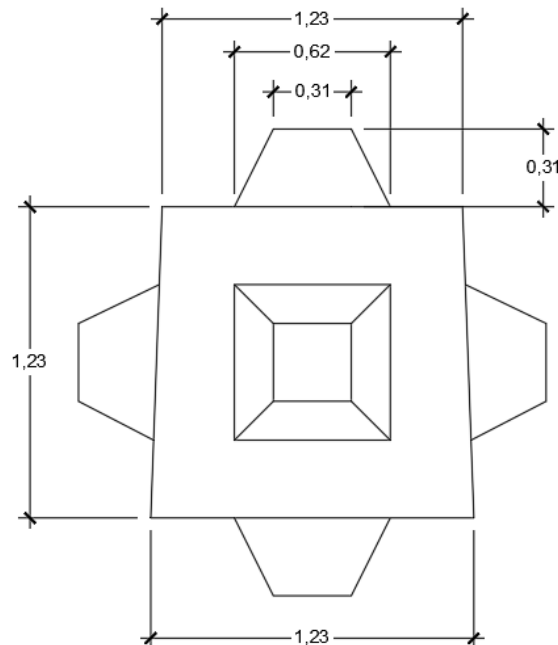


Figura 120: Dimensiones del Cubípodo a utilizar para el dique (en metros).

Fuente: Elaboración propia

6.1.5 Malla de colocación

En el diseño y ejecución de diques la malla de colocación tiene un papel fundamental para garantizar la estabilidad hidráulica, la eficiencia estructural y el comportamiento frente al oleaje. En caso de los diques portuarios de gran altura, donde el objetivo principal es la protección total contra el rebase, en los diques de baja cota se busca disipar parte de la energía del oleaje, permitiendo cierto grado de rebase sin comprometer la funcionalidad del sistema.

La malla de colocación define el patrón geométrico con el que se disponen los Cubípodos, determinando su posición relativa en planta y en altura. Esta organización es clave para obtener un manto uniforme, con una porosidad controlada y una capacidad de trabazón que permita resistir el impacto del oleaje sin comprometer la estabilidad del conjunto.

Como se ha comentado en el apartado anterior, en los ensayos realizados en el Laboratorio de Puertos y Costas se ha analizado el comportamiento hidrodinámico de dos tipos de mallas: triangular y rectangular. Aunque los ensayos con mallas triangulares han mostrado ciertas ventajas hidrodinámicas, como mejor adaptación al oleaje incidente, los ensayos recientes del proyecto HOLOBRACE (Ripoll, 2024) indican que la malla rectangular o cuadrada presenta ventajas significativas en entornos reales de obra como la sencillez de colocación, la reducción de errores durante la ejecución, menor daño estructural y mejor aprovechamiento del espacio en secciones de baja altura.

La malla cuadrada que se utiliza en este proyecto se caracteriza por estos dos parámetros:

- Separación horizontal entre piezas: $a/Dn = 1,44$
- Separación vertical entre piezas: $b/Dn = 1,44$

Esta configuración da lugar a una porosidad del 52% que es un valor que se considera óptimo para esta tipología de diques de baja cota donde se busca un equilibrio entre estabilidad, disipación y permeabilidad al flujo.

Dicha porosidad se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$p\% = \frac{1 - n \cdot Dn^2}{n_F \cdot \frac{a}{Dn} \cdot n_C \cdot \frac{b}{Dn} \cdot Dn^2}$$

Donde:

- Dn es el diámetro nominal del Cubípodo.
- n_F y n_C son factores dependientes de la disposición geométrica.
- a y b son las distancias entre centros de gravedad en cada dirección.

En la Figura 121 se muestra la malla cuadrada a utilizar para la disposición ordenada de los Cubípodos. Los puntos rojos marcan las ubicaciones precisas donde debe situarse el centro de gravedad de cada bloque. El proceso de colocación se lleva a cabo en varias capas: en primer lugar, se instala la capa inferior siguiendo el patrón

de malla establecido; posteriormente, la segunda capa se posiciona de manera que cada Cubípodo quede centrado en la intersección de cuatro unidades de la capa anterior. Esta secuencia se repite de forma progresiva hasta completar la totalidad del volumen proyectado.

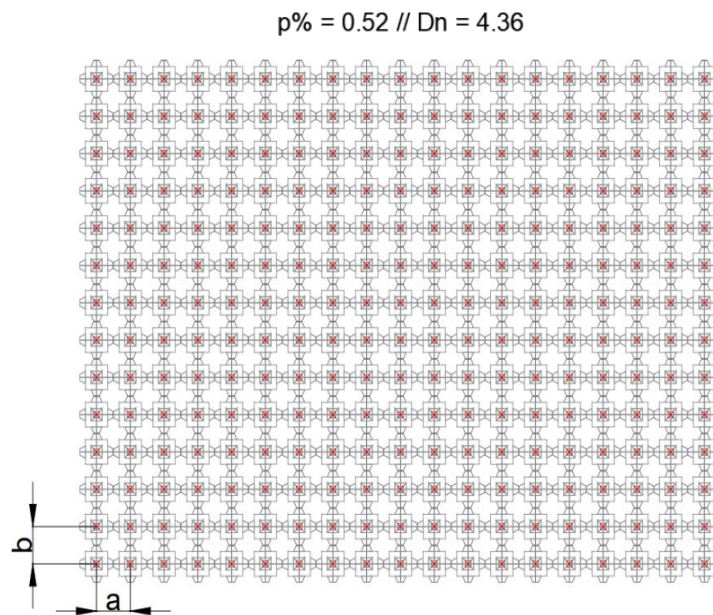


Figura 121: Malla cuadrada de colocación.

Fuente: LPC, UPV.

Una vez calculado del tamaño de Cubípodo a utilizar (6.1.4 Dimensiones de los Cubípodos), se pueden obtener las dimensiones que definen la malla:

- $\frac{a}{Dn} = 1,44 \rightarrow \frac{a}{1,31} = 1,44 \rightarrow a = 1,89 \text{ m}$
- $\frac{b}{Dn} = 1,44 \rightarrow \frac{b}{1,31} = 1,44 \rightarrow b = 1,89 \text{ m}$

Por lo tanto, la malla quedaría de la siguiente manera:

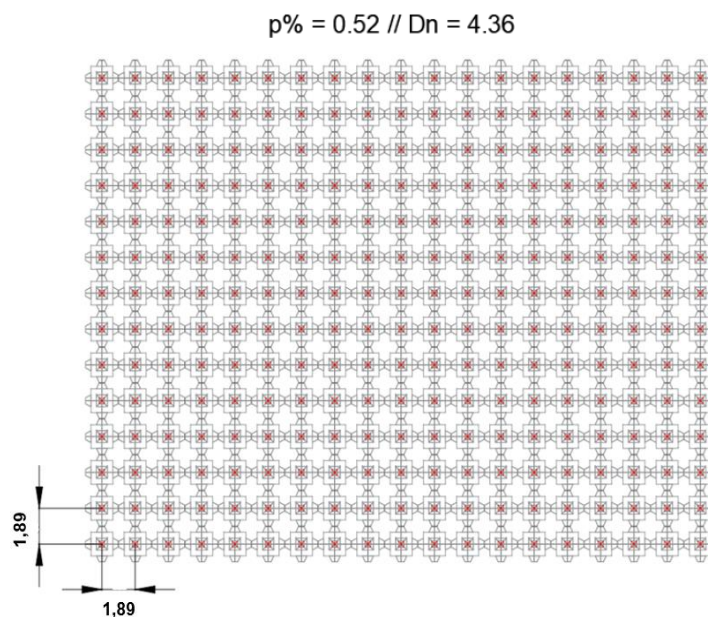


Figura 122: Malla cuadrada a utilizar.

Fuente: Elaboración propia.

La altura total de la estructura es de 4 metros y quedando alineada con el nivel medio del mar lo que permite una integración visual discreta en el paisaje y minimiza el impacto sobre el entorno. En la Figura 123 se puede ver la sección final a utilizar en el diseño del dique.

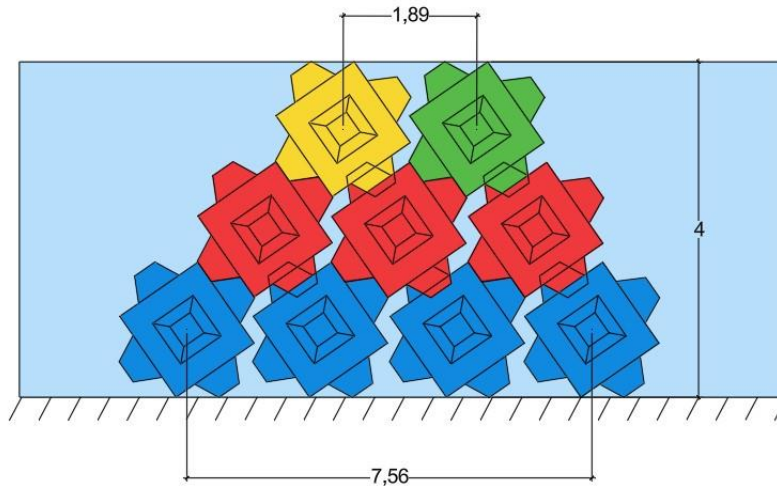


Figura 123: Sección transversal final (cotas en metros).

Fuente: Elaboración propia.

6.1.6 Ubicación del dique

La ubicación del dique respecto a la línea de costa constituye un factor determinante en la configuración morfodinámica que se pretende inducir en la playa. En función de la distancia a la que se coloca desde la playa y la altura que tiene, la respuesta costera puede variar significativamente. Cuando el dique se sitúa a una distancia corta de la orilla, se favorece la formación de tómbolos o hemitómbolos, debido a una mayor acumulación de sedimentos en la zona detrás del dique (Figura 125). Y, por lo contrario, si la distancia entre el dique y la costa es mayor, esto conlleva a que la acumulación sedimentaria disminuye notablemente, lo que impide el desarrollo de un tómbolo propiamente dicho. Los criterios que describen la respuesta de la costa se detallan en las figuras a continuación.

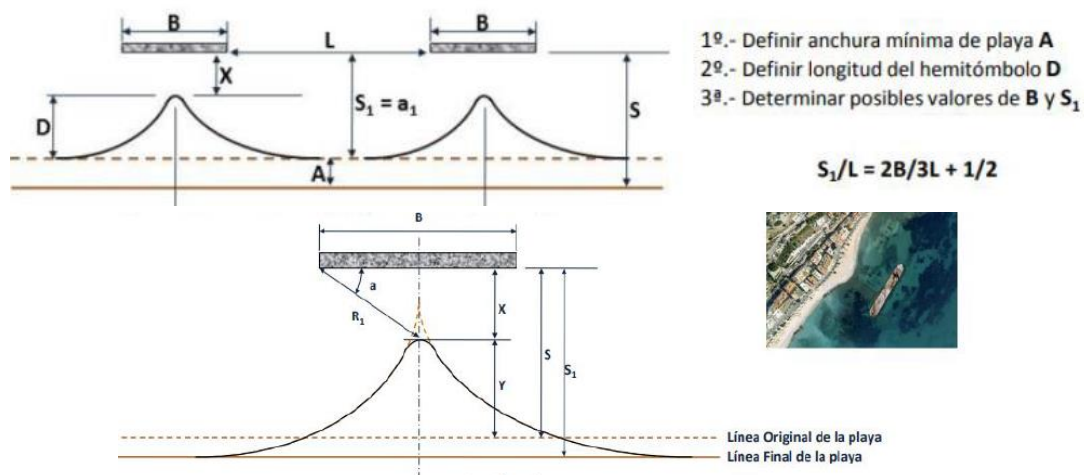


Figura 124: Esquema de la respuesta de la costa ante la construcción de dique exento.

Fuente: Apuntes de la asignatura Puertos y Costas.

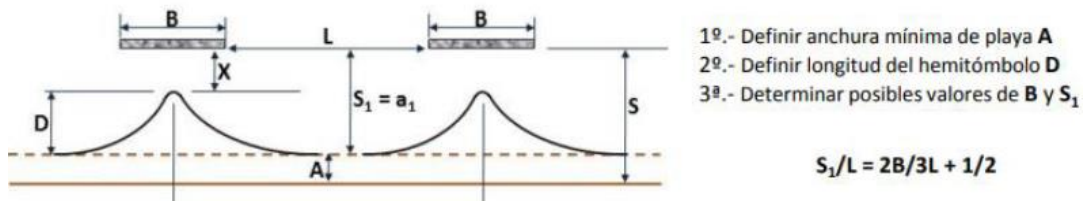


Figura 125: Esquema de la respuesta de la costa ante la construcción de un grupo de diques.

Fuente: Apuntes de la asignatura Puertos y Costas.

En la Tabla 8 se presentan distintas expresiones para cuantificar la respuesta de la costa.

Tabla 8: Condiciones geométricas para la formación de tómbolos en la costa.

Fuente: Elaboración propia.

Autor	Expresión	Respuesta de la costa
Gourlay (1981)	$B / S < 1$	No hay tómbolo
	$B / S > 2$	Doble tómbolo
	$B / S > 0,67 - 1$	Tómbolo (aguas someras)
S.P.M. (1984)	$B / S < 0,4 - 0,5$	Saliente
Dally y Pope (1987)	$B / S = 0,5 - 0,67$	Saliente
Suh y Dalrymple (1987)	$B / S < 1$	No hay tómbolo (dique aislado)
	$B / S < 2G / B$	No hay tómbolo (grupo de diques)
Ahrens y Cox (1990)	$B / S < 0,8 - 1,5$	Pequeño saliente
	$B / S < 1,5$	Saliente bien desarrollado
	$B / S > 2,5$	Tómbolo periódico
Ming y Chiew (2000)	$B / S > 1,25$	Tómbolo
	$B / S < 1,25$	Hemitómbolo

B: Longitud del dique exento
S: Distancia del dique a la posición inicial de la línea de costa
G: Separación entre diques exentos alineados

6.1.7 Evaluación comparativa de alternativas de actuación

Con el objetivo de identificar la configuración óptima de diques para mitigar la erosión en la playa de Les Marines sin comprometer las praderas marinas existentes, se ha llevado a cabo una serie de simulaciones con el modelo numérico WAPO. A lo largo del proceso se han ido probando y ajustando distintas alternativas, tomando decisiones sucesivas en función de los resultados obtenidos para las condiciones más frecuentes de oleaje en la zona.

Este análisis se ha centrado exclusivamente en la respuesta hidrodinámica de cada configuración, sin considerar en esta fase otros aspectos como la viabilidad económica o el proceso constructivo.

La sección utilizada en todas las propuestas es la misma y es la que se detalla en el apartado 6.1.4 *Dimensiones de los Cubípodos y sección tipo*. Los parámetros que varían entre una y otra propuesta es la longitud del dique y el número total de diques a construir a lo largo del tramo costero. En las diferentes configuraciones propuestas las estructuras siempre quedan ubicadas a una distancia segura del límite superior (upper limit) de la *Posidonia oceanica*, de forma que no interfieran con el desarrollo de la planta, atenúen el oleaje y contribuyan a una mejor redistribución del sedimento, favoreciendo así tanto la protección costera como la expansión natural de las fanerógamas marinas. Asimismo, en todos los casos se opta por disponer el dique al nivel medio del mar para minimizar la obstrucción del paisaje. No obstante, es importante tener en cuenta que, debido a la carrera de marea observada en la zona (de aprox. 1 metro), en ciertos momentos la estructura puede quedar parcialmente emergida, mientras que en otros momentos puede quedar completamente sumergida. La decisión de colocar la estructura al nivel medio del mar responde a una doble necesidad: por un lado, asegurar una cierta funcionalidad hidráulica frente a la energía del oleaje, y por otro, preservar el valor paisajístico y ambiental de la playa. Además, esta cota de implantación favorece la interacción controlada entre la estructura y los ecosistemas marinos, reduciendo el riesgo de sombreado excesivo sobre las praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*.

Seguidamente, se analizan las distintas configuraciones evaluadas mediante el modelo numérico WAPO. El criterio principal que guía el enfoque y la toma de decisiones es la capacidad de cada alternativa para atenuar la energía del oleaje y su eficacia en la mitigación de la erosión. Asimismo, se valora en qué medida cada solución evita generar impactos negativos o trasladar el problema hacia los tramos adyacentes al área de estudio.

Con el objetivo de comprender mejor el efecto de cada una de las estructuras propuestas, se presentan a continuación los resultados correspondientes a la situación actual, sin intervención, bajo dos configuraciones de oleaje:

- Altura significativa de ola (H_s) de 1 metro, periodo pico (T) de 7 segundos y dirección NE (Figura 126).

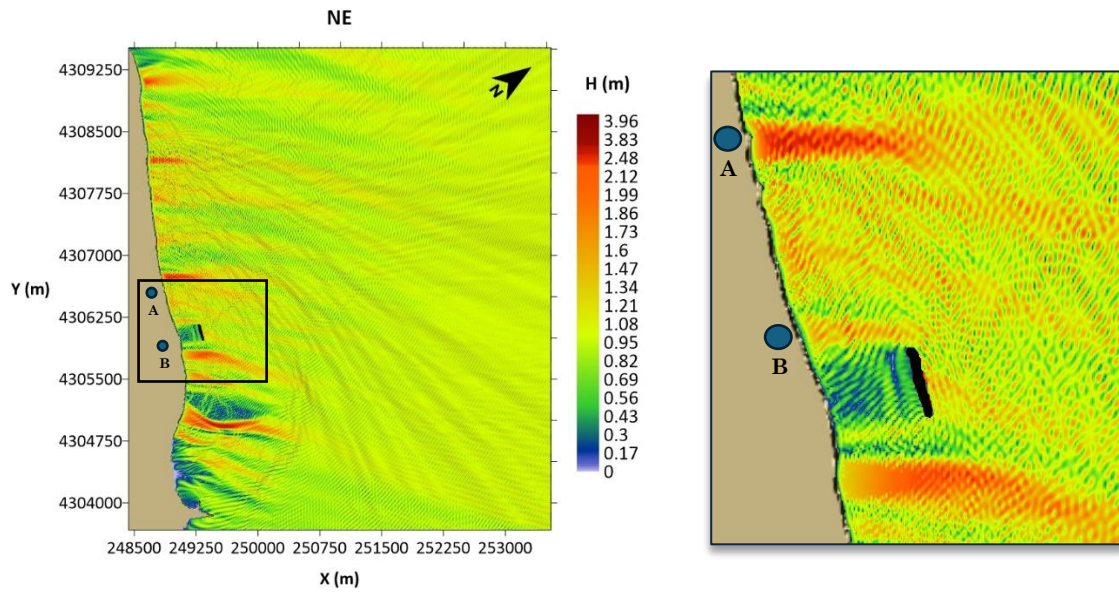


Figura 126: Energía de oleaje en situación actual, $H = 1$ m, $T = 7$ s, NE.

Fuente: Elaboración propia.

- Altura significativa de ola (H_s) de 2 metros, periodo pico (T) de 9 segundos y dirección NE (Figura 128).

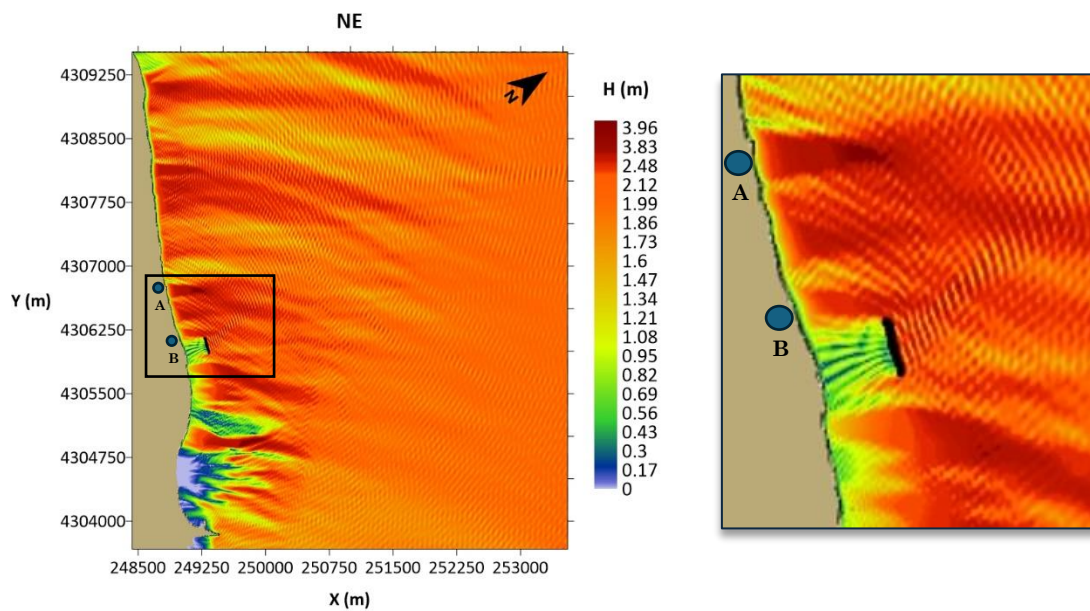


Figura 127: Energía de oleaje en situación actual, $H = 2$ m, $T = 9$ s, NE.

Fuente: Elaboración propia.

Estas condiciones han sido utilizadas como base para simular todas las alternativas planteadas.

En los apartados siguientes, para cada una de las soluciones analizadas, se incluyen los gráficos correspondientes a ambas configuraciones de oleaje, ya con la/s estructura(s) propuesta(s) incorporada(s), con el fin de evaluar su influencia en la dinámica costera.

Además, se señalan con “A” y “B” los puntos de inicio y fin respectivamente del tramo afectado a regenerar; con línea negra la *Posidonia* y línea verde la *Cymodocea*.

6.1.7.1 Opción 1: Dique largo continuo

Esta primera opción consiste en un único dique exento de 450 metros longitud, paralelo a la costa y situado a una distancia promedio de 320 metros de la línea de playa. Su longitud coincide con el tramo afectado por erosión, delimitado entre los puntos A y B indicados en los mapas.

- Dique largo continuo, $H = 1$ m, $T = 7$ s, Dirección NE.

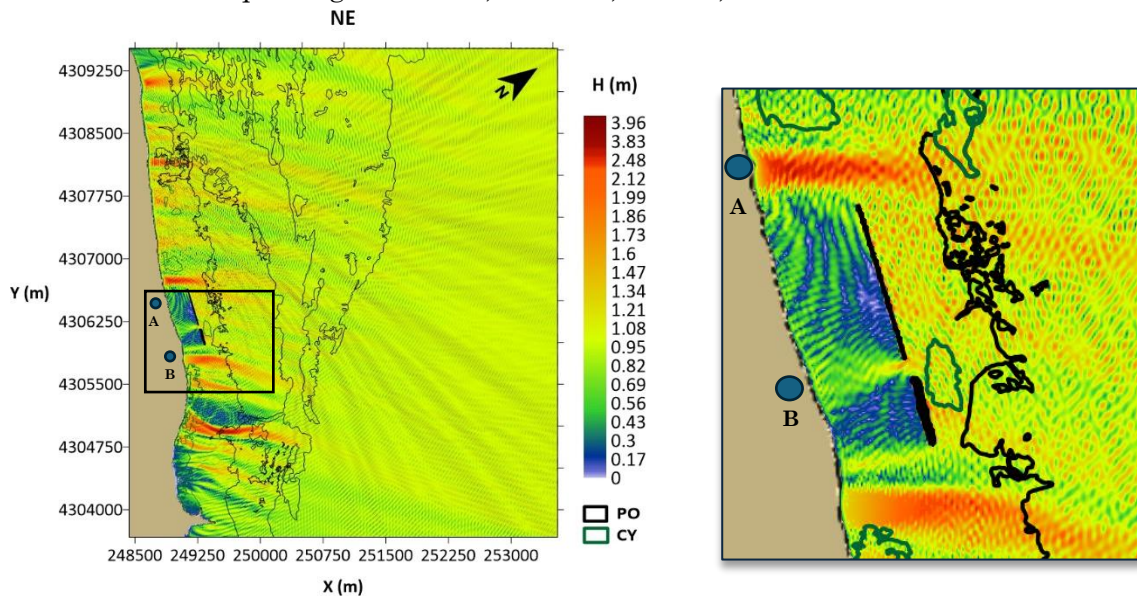


Figura 128: Energía de oleaje con dique largo continuo, $H = 1$ m, $T = 7$ s, NE.

Fuente: Elaboración propia.

- Dique largo continuo, $H = 2$ m, $T = 9$ s, Dirección NE.

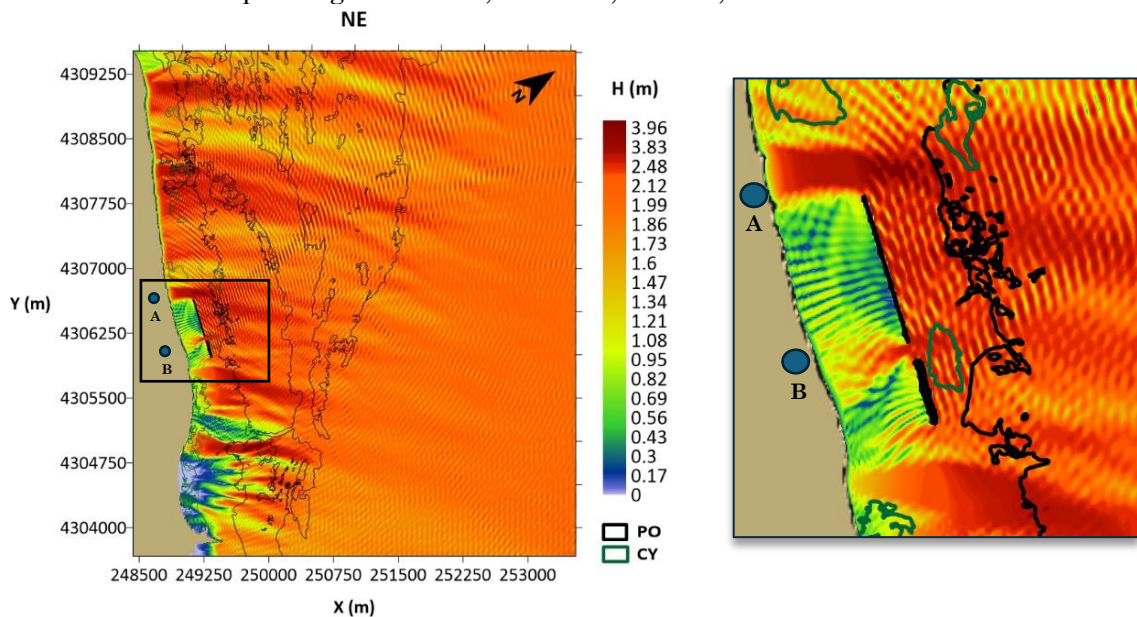


Figura 129: Energía de oleaje con dique largo continuo, $H = 2$ m, $T = 9$ s, NE.

Fuente: Elaboración propia.

Esta solución proporciona muy buena disipación del oleaje incidente y reduce significativamente la energía a pie de playa. No obstante, al tratarse de una estructura de considerable longitud, uno de los posibles inconvenientes es el elevado volumen de material necesario para su ejecución, lo que podría implicar un aumento en los costes de fabricación, transporte y colocación.

6.1.7.2 Opción 2: Dique corto

Esta solución contempla la construcción de un dique de menor longitud que el anterior con el objetivo de evaluar si es posible alcanzar una protección efectiva mediante una estructura más corta. De esta manera se pretende optimizar el diseño desde el punto de vista técnico y reducir el coste económico, así como el volumen de materiales y necesidades constructivas asociadas. La longitud de la estructura propuesta es de 260 metros y en las figuras se puede ver la respuesta hidrodinámica del entorno costero.

- Dique corto, $H = 1$ m, $T = 7$ s, Dirección NE.

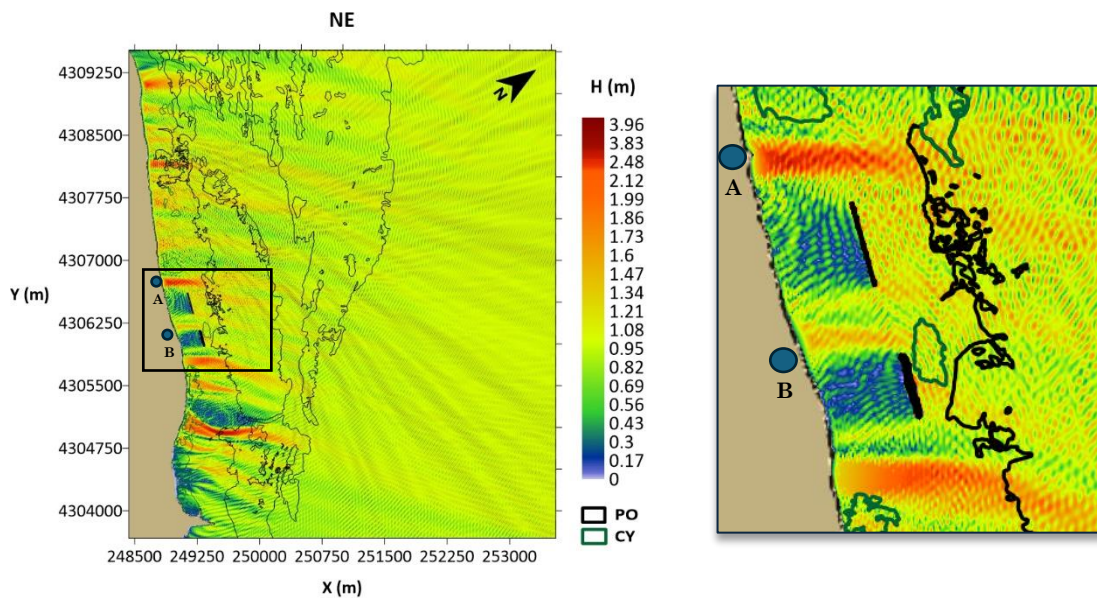


Figura 130: Energía de oleaje con dique corto, $H = 1$ m, $T = 7$ s, NE.

Fuente: Elaboración propia.

- Dique corto, $H = 2$ m, $T = 9$ s, Dirección NE.

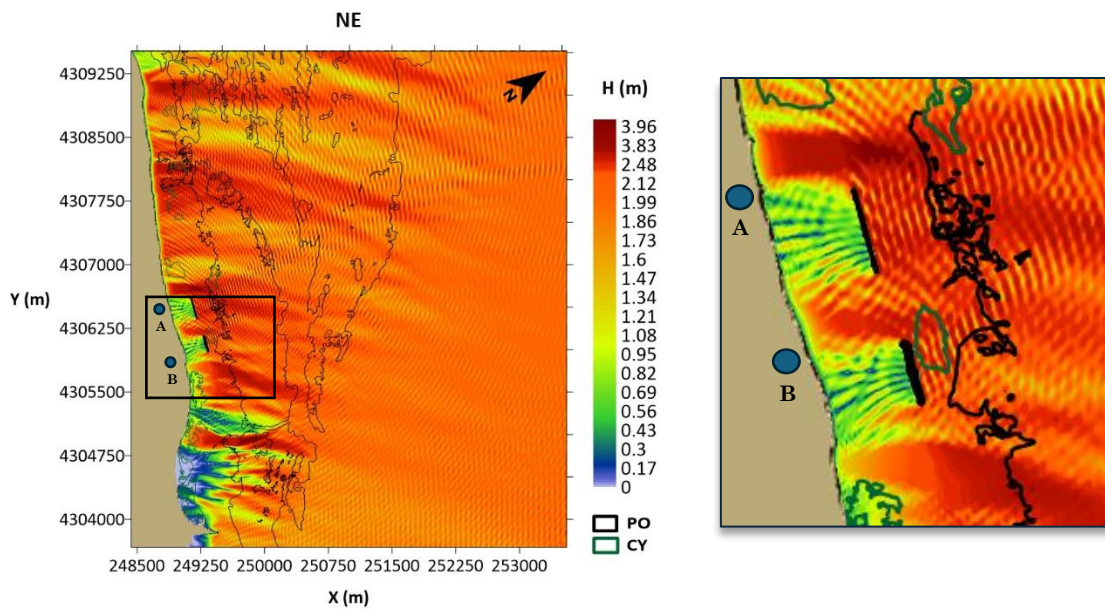


Figura 131: Energía de oleaje con dique corto, $H = 1$ m, $T = 7$ s, NE.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, en condiciones de oleaje moderado, el dique genera una zona de sombra bien definida que reduce de forma significativa la energía que alcanza la playa de Blay Beach. Esta disipación contribuye a mejorar la estabilidad del frente costero y puede favorecer la acumulación de sedimentos en la zona protegida. Cuando el oleaje es más intenso, aunque la atenuación es menor, la estructura sigue actuando como barrera parcial, desviando parte de la energía incidente.

Sin embargo, los resultados muestran también que el tramo comprendido entre este nuevo dique y el existente actualmente al sur puede seguir presentando problemas de erosión, ya que concentra parte de la energía que no es disipada.

Por tanto, aunque la solución resulta eficaz en el entorno inmediato del dique, es necesario considerar medidas complementarias que eviten agravar la situación en zonas adyacentes.

6.1.7.3 Opción 3: Dos diques cortos

Para este modelo se plantea dividir el dique largo de la opción 1 en dos estructuras separadas, cada una de 100 metros de longitud. Como se muestra en las figuras, esta configuración permite mantener un nivel aceptable de disipación de energía en las zonas directamente protegidas por los diques.

- Dos diques cortos, $H = 1\text{ m}$, $T = 7\text{ s}$, Dirección NE.

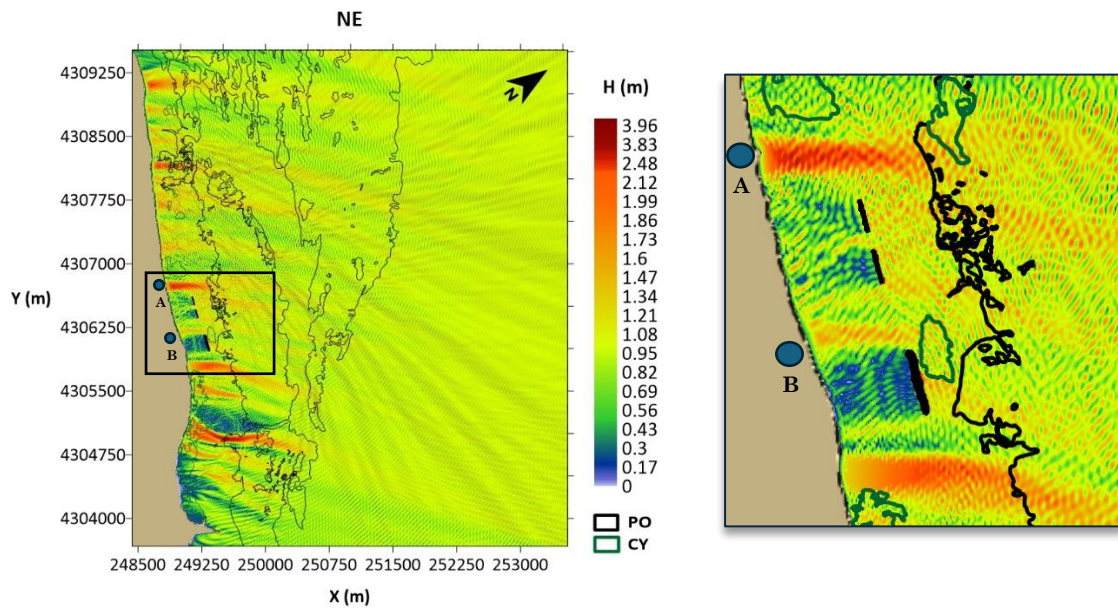


Figura 132: Energía de oleaje con dos diques cortos, $H = 1\text{ m}$, $T = 7\text{ s}$, NE.

Fuente: Elaboración propia.

- Dos diques cortos, $H = 2\text{ m}$, $T = 9\text{ s}$, Dirección NE.

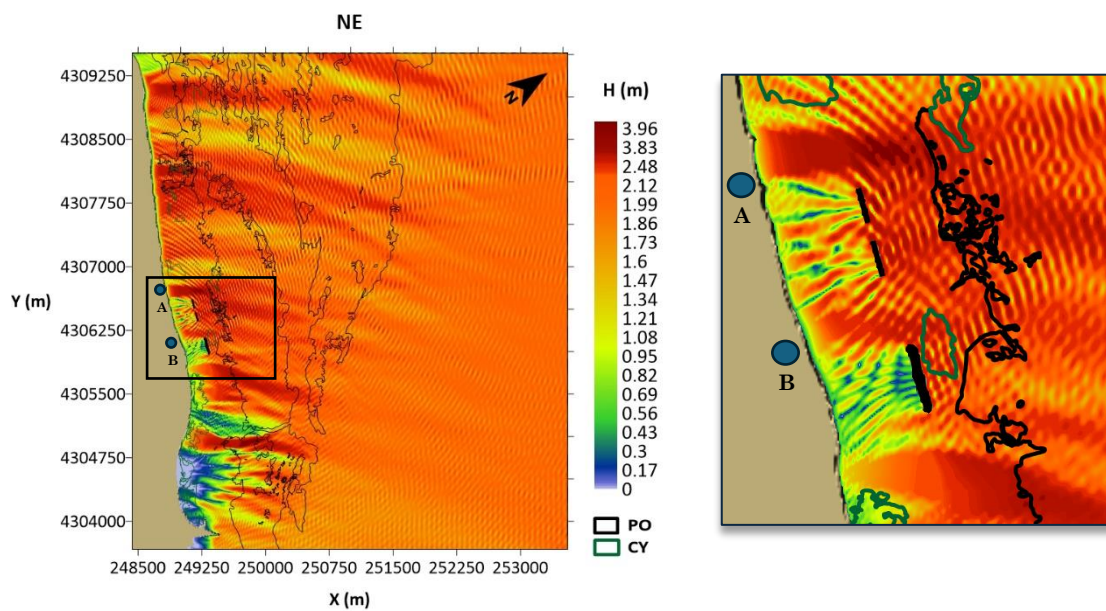


Figura 133: Energía de oleaje con dos diques cortos, $H = 2\text{ m}$, $T = 9\text{ s}$, NE.

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, la franja central situada entre ambos diques propuestos y el dique existente al sur queda más expuesta al oleaje, lo que podría favorecer procesos de erosión y retroceso en esa área concreta.

Por tanto, aunque esta alternativa supone una mejora puntual respecto al escenario sin intervención, no resulta completamente efectiva para proteger de forma continua el conjunto de la costa.

6.1.7.4 Opción 4: Tres diques cortos

La opción 4 consiste en una configuración con tres diques exentos: uno central de 200 metros y dos laterales de 100 metros cada uno. Esta opción surge a partir del buen comportamiento observado en la opción 1 del dique largo, pero buscando reducir la ocupación de lecho mediante una solución más fragmentada. La idea es replicar el efecto de una barrera continua utilizando varios diques de menor longitud.

El dique central tiene una longitud de 200 metros con el objetivo de asemejarse lo máximo posible al dique de escollera existente al sur del tramo, de modo que actúe como una continuación funcional de este. Los dos diques laterales tienen una longitud de 100 metros cada uno. Para garantizar la continuidad y un comportamiento hidrodinámico estable, entre el dique actual y el primero del grupo de tres diques se deja una separación de 50 metros, así como otros 50 metros entre los tres elementos propuestos.

En las figuras se encuentran los resultados obtenidos bajo condiciones de oleaje moderado.

- Tres diques cortos, $H = 1$ m, $T = 7$ s, Dirección NE.

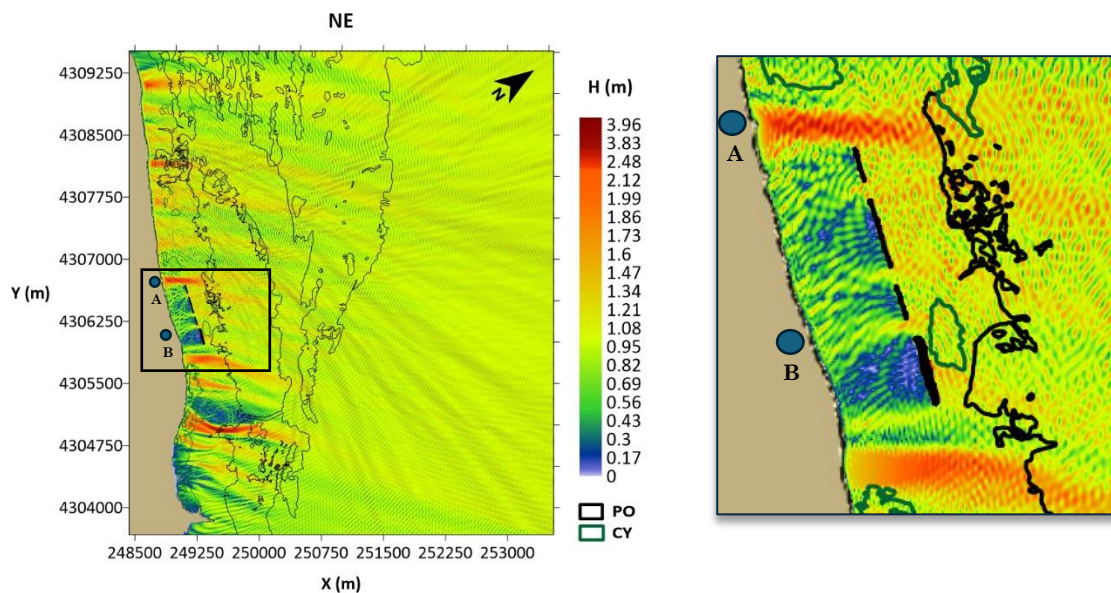


Figura 134: Energía de oleaje con tres diques cortos, $H = 1$ m, $T = 7$ s, NE.

Fuente: Elaboración propia.

- Tres diques cortos, $H = 2\text{ m}$, $T = 9\text{ s}$, Dirección NE.

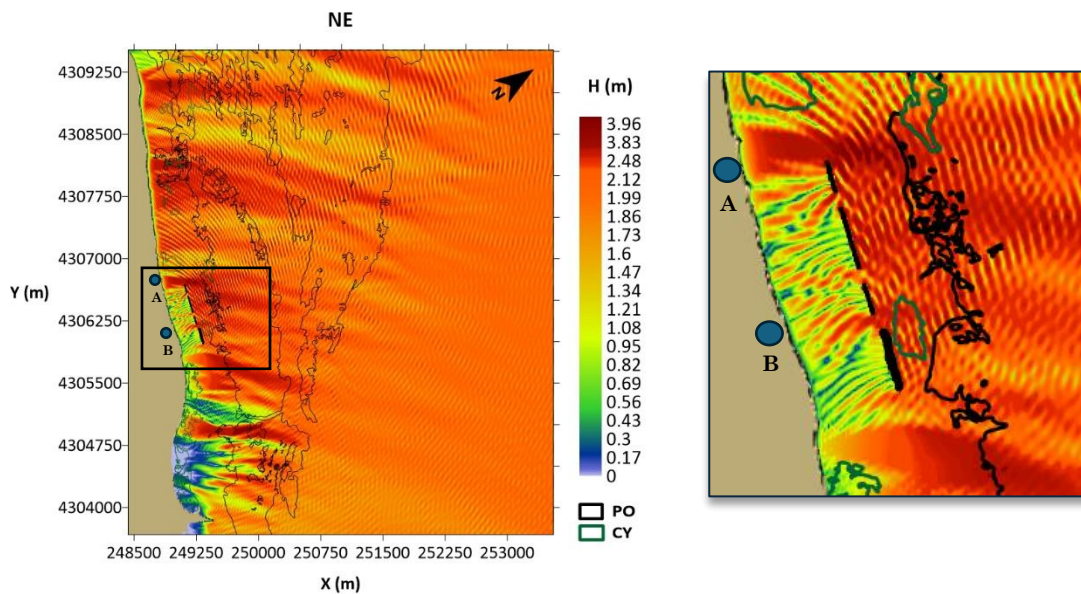


Figura 135: Energía de oleaje con tres diques cortos, $H = 2\text{ m}$, $T = 9\text{ s}$, NE.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la solución funciona muy bien ya que la energía incidente se disipa de forma eficaz, y la distribución del oleaje residual es bastante homogénea en todo el tramo entre los puntos A y B, donde se concentra el principal problema de erosión. Además, esta disposición ayuda a reducir el impacto sobre las praderas marinas, ya que se evitan acumulaciones puntuales de energía en zonas sensibles. Desde el punto de vista constructivo, esta alternativa permite reducir el volumen total de estructura respecto al dique largo, lo que puede suponer ventajas tanto económicas como ambientales. Se mantiene, además, la efectividad hidráulica, y al no interrumpir por completo la dinámica litoral, se favorece una mejor integración del sistema en el entorno.

Como punto débil, hay que tener en cuenta que, al dividir la solución en tres diques, se generan seis extremos, es decir, hay que ejecutar 6 moros. Estas zonas suelen requerir más precisión en la colocación, mayor control en obra y una ejecución más lenta, por lo que podrían suponer un reto adicional durante los trabajos de construcción.

6.1.7.5 Solución adoptada

Basado en los resultados obtenidos con el modelo numérico WAPO y tras una serie de mejoras sucesivas, las soluciones que mejor protección ofrecen son la opción 1 de dique largo continuo y la opción 4 de tres diques cortos. Ambas soluciones cumplen con el objetivo principal de proteger el tramo afectado en la zona de Les Marines, entre los puntos A y B, y aseguran una franja de playa seca que se pueda disfrutar. Además, las dos propuestas respetan la presencia de praderas marinas en la zona, evitando interferencias directas sobre ellas. De hecho, al reducir la energía del oleaje, estas soluciones favorecen la expansión de las praderas de *Posidonia*

oceanica y *Cymodocea nodosa* en áreas adyacentes, al generar condiciones más tranquilas y estables en el medio marino.

La principal diferencia entre ambas opciones consiste en su configuración estructural y en el proceso constructivo. La opción 1, con un único dique de 450 metros de longitud, permite una ejecución más sencilla y eficiente, ya que el proceso de colocación es continuo y lineal, lo que facilita la planificación y reduce los tiempos de obra. Sin embargo, requiere una mayor cantidad de material y presenta una ocupación mayor del entorno marino. Incluso, un dique continuo de estas dimensiones puede favorecer la aparición de corrientes tipo Iribarren en los extremos, lo que podría derivar en efectos indeseados sobre las playas adyacentes.

Por su parte, la opción 4, con tres diques que suman un total de 400 metros, por lo que presenta una ocupación ligeramente menor. Sin embargo, esta alternativa implica, una ejecución más compleja y prolongada, ya que el proceso constructivo deja de ser lineal y se vuelve más fragmentado, con más interrupciones y operaciones independientes. Además, se deben ejecutar seis morros, que son los puntos más delicados de cada dique y los que requieren mayor precisión técnica, control en obra y tiempo de ejecución. Esta característica es importante tenerla en cuenta para los plazos de construcción, la logística, y la organización del personal y maquinaria.

Desde el punto de vista paisajístico, la solución con tres diques también ofrece una ventaja, dado que las estructuras son más cortas y generan un menor impacto visual desde la costa, lo cual es especialmente relevante en zonas de uso turístico. Asimismo, al estar fragmentada, esta configuración permite una ejecución por fases o ajustes futuros, según la evolución del perfil costero y el comportamiento real de la playa tras la intervención.

Por último, en cuanto al mantenimiento a largo plazo, una estructura continua presenta menos puntos críticos de inspección, mientras que en la opción de tres diques será necesario un seguimiento más detallado de cada uno de los elementos y sus extremos, lo que podría implicar un mayor esfuerzo en términos de operación y conservación.

En resumen, la elección entre ambas alternativas depende del enfoque prioritario del promotor o administración responsable. Si se busca una solución rápida y constructivamente eficiente, la opción 1 es más favorable, en cambio, si se valora una intervención más integrada, ambientalmente respetuosa y adaptativa, la opción 4 ofrece una solución técnicamente robusta con mejor encaje en el entorno litoral.

Para este proyecto, se adopta como solución preferente la **opción 4**, de tres diques cortos, al considerarse prioritaria la integración paisajística, la compatibilidad con los ecosistemas marinos y la menor ocupación del medio. Aunque esta alternativa implica una mayor complejidad en su ejecución y, previsiblemente, un mayor coste económico y temporal, se valora positivamente su mejor adaptación al entorno y su menor impacto ambiental a largo plazo.

La longitud total de los tres diques es de 400 metros, por lo tanto, para la construcción de los diques en total serían necesarios 2338 cubípodos.

El Manual del Cubípodo presenta una metodología para estimar los costos de construcción de diques empleando unidades Cubípodo. Esta propuesta clasifica los gastos en seis categorías: suministro de hormigón, fabricación, manipulación, transporte y colocación, almacenamiento y encofrados. La proporción que representa cada una de estas partidas se muestra en una figura anexa.

Con el fin de determinar el coste que supone la construcción de los diques, se aplica la fórmula propuesta a partir del análisis de 153 casos realizado por Corredor et al. (2008), Medina et al. (2010):

$$c_c \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = (265 + HOR) + 1 \left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(V_c W_c)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(V_c W_c)} \right) \right]$$

Donde:

- HOR (€/m³) es el coste unitario del suministro de hormigón
- Wc (t) es el peso de cada unidad de Cubípodo
- Vc (m³) representa el volumen total de hormigón empleado en la fabricación de las piezas

Por lo tanto, el precio de suministro de hormigón en masa se considera de 75 €/m³, un peso unitario de Cubípodo de 5,3 t y un volumen total de hormigón de:

$$2338 \text{ Cubípodos} \times 1,31^3 \frac{\text{m}^3}{\text{Cub}} = 5256 \text{ m}^3$$

Y, el coste resulta en:

$$c_c \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = (265 + 75) + 1 \left[10^5 \left(\frac{1}{\ln(5256 * 5,3)} \right)^2 - 10^4 \left(\frac{1}{\ln(5256 * 5,3)} \right) \right] = 317,58 \text{ €/m}^3$$

6.1.8 Señalización y balizamiento

Para garantizar la seguridad de los usuarios de la playa, así como la de las embarcaciones, se considera necesarios señalar y disponer balizamiento adecuado en la zona de los diques. Aunque el conjunto de diques está diseñado para quedar al nivel del mar, en determinados momentos, debido a las variaciones del nivel del mar, estos pueden quedar total o parcialmente sumergidos o emergidos, lo que puede presentar un riesgo para la navegación recreativa, los bañistas y la fauna marina. Es por ello que, en este apartado se propone un sistema de señalización apropiado.

La implantación del balizamiento sigue las recomendaciones de la Asociación Internacional de Señalización Marítima (IALA, Región A), aplicables en el ámbito nacional.

6.1.8.1 Señalización provisional

En primer lugar, es necesario disponer de señalización durante el proceso de ejecución de las obras ya que estas pueden durar entre varias semanas y un par de meses según las condiciones marítimas. Durante el proceso de construcción, se colocan boyas especiales de color amarillo para delimitar la zona de obras. Esta

señalización debe ser según establece el sistema internacional de balizamiento IALA (Región A). Asimismo, según lo que establece la normativa española, incluyendo las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM 5.1-13), el Reglamento de Prevención de Riesgos Laborales (RD 1627/1997) y el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes en la Mar (RIPAM), debe de colocarse un perímetro de seguridad con boyas alrededor del área de obra, así como, carteles informativos en los accesos a la playa en español, valenciano e inglés.

6.1.8.2 Balizamiento fijo

Conforme a lo establecido en el Sistema de Balizamiento Marítimo IALA (MBS), R1001 Ed. 2.0 (Puertos del Estado, 2024), se propone que estas balizas adopten las características de marcas especiales, dado que su función principal es señalar estructuras artificiales. Las marcas especiales deben ser de color amarillo, e incluir, en caso necesario, una marca de tope en forma de aspa "X" amarilla, visible en todas direcciones. Si disponen de luz, esta debe ser amarilla, con un ritmo que no coincida con los asignados a marcas cardinales, de peligro aislado o aguas navegables.

Se recomienda que el balizamiento definitivo para la estructura sea de dos balizas fijas, colocadas en los morros de cada uno de los tres diques. De esta forma las embarcaciones que naveguen por la zona puedan identificar fácilmente la presencia del dique y mantener una ruta segura a una distancia adecuada. Se considera mejor instalar las balizas en una base de hormigón construida adyacente al morro del dique, sobre el fondo marino, en lugar de utilizar boyas flotantes, con el objetivo de evitar el deterioro y la pérdida de funcionalidad que puede generar la acción del oleaje. Esta solución proporciona una mayor estabilidad, visibilidad y durabilidad.

El dique sumergido actualmente existente está señalizado con una baliza blanca y con marca de tope en forma de aspa "X" como se puede ver en la Figura 136.



Figura 136: Baliza fija dique sumergido existente.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se recomienda instalar una baliza fija en el extremo de cada uno de los tres nuevos diques, con características similares a la del dique existente. No obstante, dado que su función corresponde a la de marcas especiales, las balizas

deberán ser de color amarillo en lugar de blanco, conforme a la codificación establecida para este tipo de señales (Figura 137).

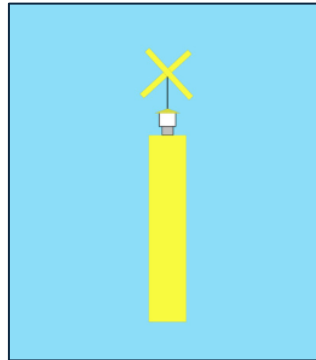


Figura 137: Marca especial a instalar.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.8.3 Balizamiento auxiliar estival

Durante la temporada de verano, cuando el uso recreativo de la playa aumenta notablemente, se considera conveniente complementar el balizamiento fijo con un sistema auxiliar compuesto por boyas flotantes. Esto consiste en la instalación lineal de boyas amarillas a lo largo de la alineación de los diques. El objetivo principal de este sistema es advertir visualmente a usuarios de motos acuáticas, embarcaciones ligeras o tablas de recreo, especialmente a aquellos sin conocimientos sobre el sistema internacional de señalización marítima. La instalación de este balizamiento auxiliar tendrá carácter temporal y estacional, quedando su implementación bajo la responsabilidad de la autoridad municipal o local competente.

Adicionalmente, se instalan paneles informativos permanentes en los accesos principales a la playa, con el fin de informar al público general sobre la existencia y ubicación de los diques; la importancia ecológica del entorno marino y de las praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*; información de contacto con los servicios de emergencia.

6.2 Regeneración del sistema dunar y alimentación artificial

El sistema dunar es un componente esencial de los entornos costeros, ya que actúa como una barrera natural frente a la acción del oleaje, las tormentas y la subida del nivel del mar. Además, cumple funciones importantes como la retención de sedimentos, la recarga de acuíferos y el mantenimiento de hábitats para especies vegetales y animales adaptadas a condiciones de alta salinidad y viento.

En el tramo litoral analizado, el cordón dunar presenta un estado muy degradado o incluso inexistente en algunos puntos, principalmente debido a los procesos erosivos, la presión turística y la falta de planificación en el uso del suelo. Esta pérdida del sistema dunar ha incrementado la vulnerabilidad de la costa frente a procesos erosivos, afectando tanto a la estabilidad de la playa como a los ecosistemas marinos cercanos.

Con el objetivo de recuperar la funcionalidad del sistema dunar y reforzar la protección natural del litoral, se propone una intervención basada en técnicas de restauración ambiental compatibles con el entorno. Entre las acciones previstas se incluyen:

Los sistemas dunares juegan un papel clave en la protección natural del litoral, ya que actúan como barreras físicas frente al oleaje, las tormentas y la subida del nivel del mar. Además, almacenan sedimentos que pueden ser liberados hacia la playa en situaciones de erosión, contribuyendo a su recuperación. También ofrecen un hábitat valioso para diversas especies adaptadas a condiciones extremas y participan en procesos de filtrado y recarga de acuíferos.

En el tramo costero comprendido entre la Punta dels Molins y el Puerto de Denia, se observa un deterioro generalizado del sistema dunar, debido principalmente a la ocupación urbanística, la falta de vegetación estabilizadora, la presión turística y los procesos erosivos. La pérdida de estas estructuras naturales ha contribuido a la regresión de la línea de costa y a una mayor exposición frente a temporales.

Con el objetivo de reforzar la protección del litoral y mejorar el estado ambiental de la zona, se plantea la necesidad de restaurar y regenerar el sistema dunar. Esta intervención debe realizarse de forma respetuosa con el entorno, utilizando soluciones blandas que favorezcan la dinámica natural. Las actuaciones recomendadas incluyen:

- **Creación y refuerzo de cordones dunares** mediante el aporte de arenas compatibles con las originales.
- **Instalación de estructuras captadoras de arena**, como palizadas de madera o barreras biodegradables, para favorecer la acumulación natural por efecto del viento.
- **Revegetación con especies autóctonas**, como *Ammophila arenaria*, que ayudan a fijar el sedimento y estabilizar la duna.
- **Eliminación o reubicación de infraestructuras artificiales innecesarias** que interrumpen la dinámica litoral, como accesos improvisados o canalizaciones.
- **Delimitación de zonas de protección** y señalización informativa para evitar el tránsito sobre las áreas en proceso de recuperación.

6.2.1 Extracción, transporte y acopio del material de alimentación superficial

Para llevar a cabo la alimentación superficial del tramo de playa objeto de estudio, se utilizará como fuente de sedimento un banco de arena localizado frente a la costa de Cullera, el cual ha sido autorizado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Este banco se encuentra a aproximadamente 3000 metros de la costa, en una zona de gran profundidad (70 a

90 metros) y sin presencia de praderas de *Posidonia oceanica*, lo que garantiza un impacto ambiental mínimo durante el proceso de extracción.

La arena necesaria para la alimentación superficial será depositada inicialmente en la Playa de la Punta del Raset, situada en el extremo norte del puerto de Denia. Esta localización ha sido seleccionada estratégicamente con el fin de minimizar el riesgo de afección sobre las praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* presentes a lo largo del frente litoral de Denia. La distancia entre el banco de arena frente a Cullera y el puerto de Denia es de aproximadamente 40 kilómetros por vía marítima, lo que permite realizar el transporte mediante dragas especializadas, garantizando así una operación eficiente desde el punto de vista técnico y ambiental.

Para el proceso de extracción del material se empleará una draga de succión y arrastre con tolva (Trailing Suction Hopper Dredger, TSHD), que permite la extracción directa del material del fondo marino y su transporte en el interior del propio buque.

Durante la fase de extracción, la draga aspira el sedimento mediante una tubería de succión equipada con una cabeza de dragado, que se desplaza a lo largo del fondo marino. La arena extraída se deposita en la tolva del buque, donde se elimina el exceso de agua y se compacta el material. Una vez completada la carga, el buque navega hasta el puerto de Denia siguiendo una ruta previamente definida con el objetivo de evitar las zonas con presencia de *Posidonia oceanica* o *Cymodocea nodosa*. La entrada (conducciones) en la zona portuaria se realizará a través del único canal de navegación libre de vegetación marina, garantizando así que no se produzca arrastre o alteración de los hábitats marinos protegidos. Una vez en la zona portuaria, la draga procederá a la descarga del material mediante impulsión por tubería hasta una zona habilitada de acopio provisional en la Playa de la Punta del Raset (Figura 138) sin afectar la *Posidonia oceanica*.



Figura 138: Localización del canal de entrada del buque draga y zona de acopio temporal de arena.

Fuente: Elaboración propia.

Este método evita realizar vertidos directos al mar y permite controlar el volumen de arena depositada, así como su distribución. Posteriormente, desde el punto de acopio, la arena será transportada mediante camiones hasta la zona de Blay Beach haciendo su recorrido por la playa. De esta forma se evita el tránsito de buques cerca del frente litoral de Les Marines, eliminando el riesgo de afección directa a las praderas marinas presentes en el entorno submarino.

Como medida complementaria a la alimentación superficial planteada, se propone la creación de un sistema de dunas artificiales en el tramo comprendido entre el puerto de Denia y más al norte de la playa de Blay Beach. Esta actuación permitiría reforzar la protección del litoral a medio y largo plazo, generando un almacenamiento natural de arena que ayude a reducir los efectos de la erosión costera y contribuya a la regeneración del sistema dunar original. Estas dunas funcionarían como reserva de sedimento y como barrera física frente al oleaje y los temporales, y su diseño se adaptaría al entorno para integrarse con el paisaje y favorecer el desarrollo de vegetación autóctona. La construcción de estas estructuras permitiría disponer de arena adicional que, en caso de pérdida, podría movilizarse de forma natural o hacia las zonas más erosionadas. Tal y como se ha comentado anteriormente, el transporte litoral de sedimentos en esta zona es de sur a norte, es decir, desde el puerto de Denia hacia la Punta dels Molins. Por este motivo, se considera adecuado que una parte del sedimento aportado quede acumulado en la Playa de la Punta del Raset, en la zona más próxima al puerto, permitiendo así que el oleaje y las corrientes lo redistribuyan de forma progresiva hacia el norte.

6.2.2 Estimación del volumen de arena necesario para la alimentación artificial

Según la Dirección General de Puertos y Costas (1985) la playa seca se subdivide en tres zonas: activa, de reposo y de espacios libres. Para la playa objeto de este trabajo, la Ecocartografía de Alicante elaborada por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (2007) en su ficha A005 (Figura 139) señala que el tamaño medio del sedimento (D50) es de 0,31 mm, con una anchura media de playa de 41,52 m y un mínimo de apenas 2,02 m en el tramo de Blay Beach, identificado como el sector más crítico de la playa de Les Marines.

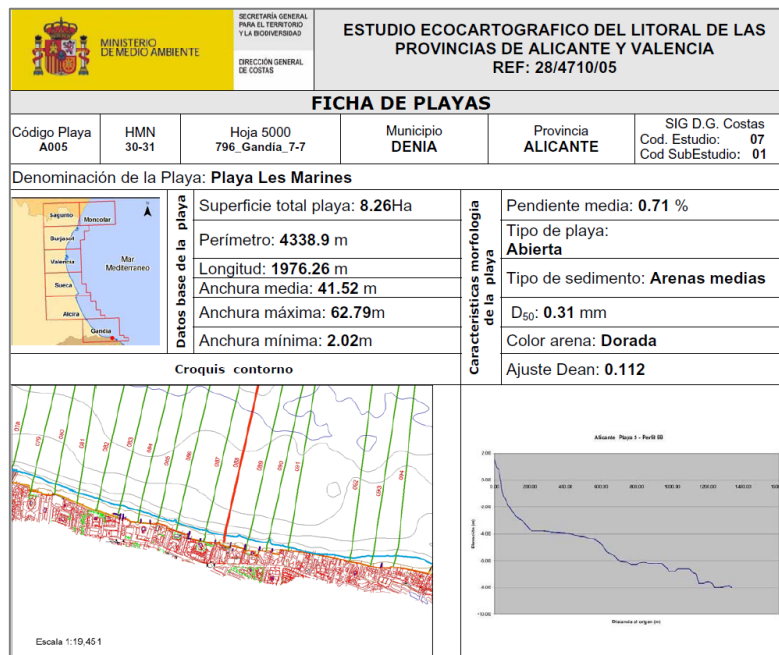


Figura 139: Ficha de Playa Les Marines.

Fuente: Estudio ecocartográfico del litoral de la provincia de Alicante (DGCM, 2007).

La comparación con la línea de costa de 1957 (ver 2.2 *Evolución línea de costa*) pone de manifiesto un retroceso significativo del litoral, evidenciando cómo la pérdida de anchura ha sido progresiva hasta desaparecer en la actualidad, donde los muros de las edificaciones se encuentran en contacto directo con el mar.

En base a la Ecocartografía consultada, para las actuaciones de regeneración artificial se va a aportar un sedimento de granulometría, fijándose el material de aporte en un D50 de 0,30 mm.

Un perfil de playa se estructura en distintas zonas con funciones específicas: la playa sumergida, que se extiende hasta la profundidad de cierre y es donde se produce la disipación del oleaje; el estrán que es una franja intermareal comprendida entre los niveles de bajamar y pleamar; la playa seca dividida en zona activa, directamente expuesta al oleaje y zona de reposo que es más estable y está destinada al uso público; y finalmente la duna o escarpe, que actúa como depósito sedimentario y barrera natural frente a temporales.

En base a las consideraciones anteriormente comentadas, para la regeneración se ha previsto un material de aporte con D50 = 0,30 mm y se han

definido unas anchuras de 20 m para la zona activa, 25 m para la de reposo y 15 m para el escarpe. Además, se dispondría de un resguardo de 10 m que sirva de protección a las edificaciones. Con ello, la playa alcanzaría una anchura total de 70 m, asegurando su estabilidad morfodinámica, la funcionalidad recreativa y la conservación ecológica del entorno. Con el ancho de playa proyectado y la distancia establecida respecto a los diques exentos, no se producirán formaciones de tómbolos ni hemitómbolos, lo que resulta favorable para mantener el transporte longitudinal de sedimentos, evitar erosiones en los tramos adyacentes y favorecer una redistribución homogénea de la arena. Esta condición contribuye también a reducir el riesgo de impactos sobre las praderas, ya que se impide la acumulación localizada de sedimentos que podría comprometer su desarrollo. Asimismo, este nuevo ancho supone incluso una mejora respecto a la línea de costa de 1957. Cabe destacar que, en algunos puntos de la playa, el ancho superará el establecido en el diseño, al existir ya sectores de playa seca. Por lo que, el excedente de arena se redistribuirá a lo largo del tramo de actuación o se destinará preferentemente a las zonas más críticas.

El perfil adoptado responde a las Recomendaciones de Obras Marítimas de la Dirección General de Costas, con pendientes de 8 % en la zona activa, 7 % en la zona de reposo y 1,5 % en el estrán (Figura 140).

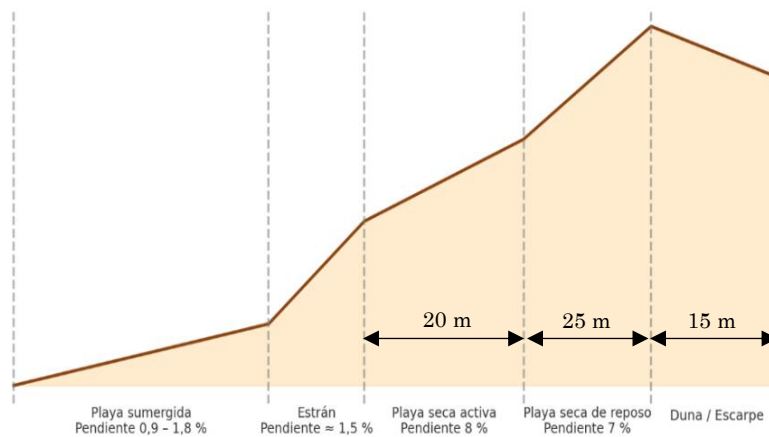


Figura 140: Diseño del perfil de la playa.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definido el perfil de equilibrio, se procede al cálculo del volumen de arena necesario para la alimentación. Para ello, el tramo de costa estudiado se ha representado mediante dos secciones tipo de playa consideradas como representativas del conjunto, en lugar de realizar un cálculo perfil a perfil mediante integración.

Antes de proceder a la definición de las secciones transversales de cálculo, resulta imprescindible introducir el concepto de profundidad de cierre y determinar su valor. La profundidad de cierre es un parámetro fundamental en la dinámica litoral. Concretamente, es la cota batimétrica a partir de la cual los sedimentos dejan de experimentar transporte transversal significativo bajo la acción del oleaje. Es decir que, por debajo de dicha profundidad el fondo permanece estable y el perfil de la playa no se ve modificado. Dicha profundidad determina el límite inferior del perfil

de equilibrio empleado en el diseño de la regeneración de la playa. Y, una vez calculado el volumen de arena de aporte, el perfil de diseño debe cerrarse en esta cota, ya que más allá de ella no existe intercambio neto de sedimentos con la playa. De este modo se evita sobrestimar el material necesario y se garantiza un dimensionamiento realista del relleno. Para la estimación de la profundidad de cierre en la playa de Les Marines se ha utilizado la serie de oleaje horario del punto SIMAR (1958–2025). El procedimiento aplicado corresponde al criterio de Hallermeier (1978) y su adaptación de Birkemeier (1985), que establecen que el estado de mar representativo para definir la profundidad de cierre es aquel que se excede únicamente 12 horas por año.

Tras ordenar los valores horarios de la altura de ola significativa (H_s) de mayor a menor, se ha tomado el valor en la posición 816, que es la correspondiente a 68 años de registro. Este umbral equivale a la altura de ola significativa (H_{12}) de 3,57 m. El periodo pico asociado (T_{12}) es de 8,44 s. Una vez obtenidos, se aplican las fórmulas empíricas.

- Hallermeier (1978):

$$h_c = 2,28H_{12h} - \frac{68,5H_{12h}^2}{gT_{12h}^2} = 6,9 \text{ m}$$

- Birkemeier (1985):

$$h_c = 1,75H_{12h} - \frac{57,9H_{12h}^2}{gT_{12h}^2} = 5,2 \text{ m}$$

Al ser resultados muy próximos, finalmente se adopta como profundidad de cierre un valor medio de 6 m.

Para la estimación del volumen de arena necesario se han definido dos secciones tipo de playa representativas del tramo a regenerar. La primera corresponde al sector más crítico, identificado en la zona de Blay Beach, con una longitud aproximada de 300 metros. En este punto actualmente no existe playa, de manera que el oleaje incide directamente sobre las cimentaciones de las edificaciones. La segunda sección se sitúa a ambos lados de este sector central e incluye un total de 300 metros lineales, en los cuales sí existe playa, aunque con un ancho medio reducido de aproximadamente 15 metros.

En el diseño de la regeneración se establece como objetivo alcanzar una cota de berma de +2,0 m respecto al NMM, garantizando así una playa seca funcional. Asimismo, se proyecta la construcción de un cordón dunar con una altura adicional de 4,0 m sobre la berma, con el fin de mejorar la protección del frente costero frente a temporales.

El cálculo del área de las secciones muestra que la primera sección tipo presenta una superficie de aproximadamente 551 m², al considerar tanto la playa seca y la duna como la zona sumergida hasta la profundidad de cierre. En el caso de la segunda sección, el área estimada es de 506 m². Finalmente, multiplicando estas áreas representativas por la longitud de cada tramo, se obtiene un volumen total de

relleno de 317100 m³ de arena, necesario para ejecutar la regeneración de los 600 metros de costa considerados.

Con el fin de tener en cuenta las posibles pérdidas de material durante las operaciones de vertido o por la acción del oleaje, se considera un coeficiente de seguridad sobre el volumen calculado con un valor de 1,3. Por lo tanto, el volumen final de aporte considerado para el tramo crítico resulta en 381030 m³.

Adicionalmente, se prevé montar cordones dunares artificiales como reserva de arena en todas las zonas que lo permiten desde la Punta del Raset hasta Blay Beach. La sección de los cordones tendrá dimensiones de 15 metros de ancho y 4 metros de altura al igual que en la zona crítica. Estos cordones abarcarán aproximadamente 2500 metros a lo largo de la playa. De esta forma se dispondrá de 150000 m³ de reserva de arena que teniendo en cuenta que el transporte de sedimentos es de 30000 m³ al año de promedio (*2.5 Dinámica litoral*), esto significa que habrá reserva de arena para al menos 5 años en adelante. De este modo, se habilita un volumen de reserva de 150000 m³ de arena que, considerando un transporte medio anual de sedimentos de 30000 m³, garantizaría el suministro de sedimento durante, al menos, un periodo de cinco años.

En conjunto, el volumen total de arena necesario se estima en 531030 m³.

7 VALORACIÓN ECONÓMICA

En este apartado se desarrolla una valoración económica estimada para la *Opción 4: Tres diques cortos* finalmente adoptada que consiste en la construcción de tres diques de cubípodos y la alimentación superficial de la playa, considerando las mediciones y precios unitarios de las principales actividades definidas.

7.1 Descripción de los capítulos

CAPÍTULO 01. TRABAJOS PREVIOS

Este primer capítulo corresponde a las actividades relativas a la preparación y acondicionamiento de la zona de fabricación y acopio de los Cubípodos, así como a la instalación de los servicios auxiliares requeridos (electricidad, agua, instalaciones sanitarias), señalización de seguridad y disposición de la maquinaria y equipos de obra.

CAPÍTULO 02. FABRICACIÓN Y ACOPIO DE CUBÍPODOS

En este capítulo se recogen los trabajos asociados al proceso constructivo de los Cubípodos. Esto comprende la preparación y montaje de los encofrados, el vertido del hormigón, las operaciones de vibrado y curado, el desencofrado una vez alcanzada la resistencia adecuada y el traslado de las unidades fabricadas al parque de acopio.

CAPÍTULO 03. TRANSPORTE Y CONSTRUCCIÓN DE LOS DIQUES

Este capítulo aborda el transporte e instalación de los Cubípodos en su emplazamiento definitivo en el mar. Las unidades se manipulan desde el parque de acopio hasta su carga en barcazas o pontonas, se transportan por vía marítima hasta el tramo costero de actuación y se colocan mediante grúas equipadas con sistemas

de posicionamiento GPS, siguiendo la malla definida en el diseño técnico para garantizar la estabilidad estructural y la integración con el medio marino.

CAPÍTULO 04. APORTES DE ARENA Y REGENERACIÓN DEL SISTEMA PLAYA-DUNA

Este capítulo incluye las actuaciones necesarias para el aporte de arena y la regeneración artificial del frente costero. Se contempla la extracción del material, su transporte hasta la playa, el extendido mediante medios mecánicos y el perfilado del nuevo talud. Todo ello se realiza con material compatible desde el punto de vista granulométrico y ambiental. En el precio del aporte de arena se incluyen las tuberías, fondeos y medios auxiliares necesarios para la descarga en playa.

Para el cálculo del aporte de arena necesario se ha tomado como referencia el tramo más afectado, correspondiente a la zona de Blay Beach (600 m), donde la regresión ha llegado a hacer desaparecer prácticamente la playa seca. Asimismo, la valoración económica contempla el vertido longitudinal de arena que se extiende a lo largo de todo el tramo comprendido entre el puerto de Denia y un sector ligeramente posterior a Blay Beach (en total aprox. 2500 m). Este depósito adicional supondría una reserva sedimentaria que proporcionaría una mayor estabilidad al sistema playa-duna a medio y largo plazo.

CAPÍTULO 05. SEÑALIZACIÓN Y BALIZAMIENTO FIJO

En este apartado se describen las actuaciones destinadas a la instalación de elementos de señalización y balizamiento marítimo fijos tras la finalización de la obra. Estos elementos garantizan la seguridad de la navegación, delimitan la zona de actuación y advierten de la presencia de los diques.

CAPÍTULO 06. GESTIÓN DE RESIDUOS

Este capítulo incluye las actuaciones relacionadas con la gestión de los residuos generados durante las fases de fabricación, manipulación y acopio de los Cubípodos, así como aquellos derivados de su transporte e instalación en el mar. Se contemplan medidas de clasificación, almacenamiento temporal, retirada y tratamiento de residuos, conforme a la normativa vigente y con especial atención al cumplimiento de los principios de economía circular y protección del entorno marino.

CAPÍTULO 07. SEGURIDAD Y SALUD

En este apartado se desarrollan las tareas dirigidas a garantizar la seguridad y salud de los trabajadores durante la ejecución de las distintas fases del proyecto. Incluye la planificación preventiva, señalización de zonas de riesgo, protocolos de actuación, formación específica y aplicación de medidas colectivas e individuales de protección. Todo ello en conformidad con la Ley de Prevención de Riesgos Laborales y demás disposiciones aplicables al entorno portuario y costero. Además, se realizarán auditorías regulares para garantizar el cumplimiento de todas las normativas y la protección del personal.

CAPÍTULO 08. CONTROL AMBIENTAL

Este capítulo corresponde al seguimiento y control ambiental del proyecto, asegurando que las actuaciones se desarrollen conforme a la normativa vigente en materia de medio ambiente. Se contemplan medidas de prevención, seguimiento y corrección para mitigar los impactos sobre los ecosistemas marinos, en especial las praderas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*, así como acciones específicas para evitar afecciones a la calidad del agua, el fondo marino y la biodiversidad del entorno litoral.

7.2 Valoración económica final

Código Ud.	Descripción	Medición	Precio (€)	Importe (€)
CAPÍTULO 01. TRABAJOS PREVIOS				
UO1	- Delimitación y acondicionamiento del parque de fabricación y las zonas de acopio de Cubípodos	1	10000.00	10000.00
UO2	- Casetas de obra e instalación de los servicios auxiliares requeridos	1	7000.00	7000.00
UO3	- Señalización de seguridad y disposición de la maquinaria	1	1000	1000.00
CAPÍTULO 02. FABRICACIÓN Y ACOPIO DE CUBÍPODOS				
UO4	m ³ Hormigón HA-30/B/20/Iia	5256	75	394200.00
UO5	m ³ Encofrado metálico reutilizable de acero estructural, diseñado para la forma del Cubípedo	5256	22	115632.00
UO6	m ³ Maquinaria y equipamiento para la fabricación, vibrado y curado	5256	22	115632.00
CAPÍTULO 03. TRANSPORTE Y CONSTRUCCIÓN DE LOS DIQUES				
UO7	m ³ Transporte de los Cubípodos por medios marítimos mediante barcazas	5256	23	120888.00
UO8	m ³ Colocación de las piezas mediante grúa	5256	21	110376.00
CAPÍTULO 04. APORTES DE ARENA Y REGENERACIÓN DEL SISTEMA PLAYA-DUNA				
UO9	m ³ Aporte de arena con draga + bombeo a playa	531030	23	12213690.00
UO10	m ² Perfilado y extendido de la arena en superficie de playa	937	1	937.00
UO11	m ² Modelado y conformación del sistema dunar mediante maquinaria ligera	60	2	120.00
CAPÍTULO 05. SEÑALIZACIÓN Y BALIZAMIENTO FIJO				
UO12	ud. Poste de baliza en Acero Inoxidable	6	2000	12000.00
UO13	ud. Colocación y fabricación de cimentación balizas con hormigón armado, con HA-30/P/20/Iia, y acero corrugado B500S	6	520	3120.00
UO14	ud. Anclajes para fondeo de balizamiento	6	125	750.00
UO15	ud. Cartelería informativa fija sobre presencia de diques y medidas de protección del ecosistema litoral	2	200	400.00
CAPÍTULO 06. GESTIÓN DE RESIDUOS				
UO16	- Transporte de residuos inertes, con contenedor de 7 m ³ a vertedero específico	10	99	990.00
CAPÍTULO 07. SEGURIDAD Y SALUD				
UO17	- Conjunto de sistemas de protección colectiva y equipos de protección	1	8000	8000.00
UO18	- Planificación y formación	1	1000	1000.00
UO19	- Señalización	1	300	300.00
UO20	- Auditorías	1	300	300.00
CAPÍTULO 08. CONTROL AMBIENTAL				
UO21	- Seguimiento de calidad del agua (muestreo, análisis físico-químico)	1	1400	1400.00
UO22	- Seguimiento de estado de praderas marinas	1	1200	1200.00
UO23	- Informes técnicos de seguimiento ambiental	1	500	500.00
			Total	13119435.00

7.3 Presupuesto base de licitación

Precio de Ejecución Material (PEM)	13119435.00 €
Beneficio industrial (BI)	13%
	1,705,526.55 €
Gastos generales (GG)	6%
	787,166.10 €
Impuesto sobre el Valor Agregado (IVA)	21%
	2,755,081.35 €
Presupuesto base de licitación	18,367,209.00 €

El presupuesto base de licitación final asciende a la cantidad de **DIECIOCHO MILLONES TRESCIENTOS SESENTA Y SIETE MIL DOSCIENTOS NUEVE EUROS**.

8 CONCLUSIONES

Este Trabajo Fin de Máster ha permitido entender mejor la relación que hay entre la distribución de las praderas de *Posidonia oceanica* en la costa de Denia y la hidrodinámica generada por la acción del oleaje.

La investigación permitió determinar un valor crítico del índice de rotura ($H_{rms}/h \approx 0,472$), que está directamente relacionado con el límite superior (upper limit) de la pradera de *Posidonia oceánica* en el sector costero examinado. Para valores superiores a dicho umbral, el oleaje alcanza la rotura por fondo y provoca el arranque de la pradera, mientras que para valores inferiores su presencia resulta estable, salvo en presencia de factores externos no hidrodinámicos como baja transparencia, dragados o vertidos.

Este resultado constituye un aporte importante, ya que ofrece un criterio cuantitativo que permite pronosticar y delimitar la distribución de la pradera en función de variables hidrodinámicas simples (altura de ola y profundidad). En particular en contextos de cambio climático, donde los temporales son más intensos y frecuentes, es una herramienta útil para emplearse en la gestión y planificación de intervenciones costeras.

Se ha comprobado que las redes neuronales artificiales (ANN) son efectivas en este caso particular para integrar distintas variables, trabajar con una amplia base de datos y corroborar la importancia del índice de rotura como parámetro clave. El modelo utilizado presentó niveles de precisión y capacidad predictiva que resultaron satisfactorios, validando así su utilidad para apoyar la gestión ambiental y la toma de decisiones en proyectos de ingeniería costera.

Por otra parte, los resultados están relacionados con las soluciones propuestas para regenerar la playa de Les Marines en el área de Blay Beach, que se basan en construir tres diques exentos de Cubípodos y alimentar la playa de forma artificial. Estas medidas buscan compatibilizar la estabilidad de la playa con la preservación de los ecosistemas marinos, creando un entorno de menor energía hidrodinámica que

favorezca la recuperación y protección de las praderas marinas de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*.

En cuanto a su alineación con la Agenda 2030, este trabajo mantiene una relación directa con los *ODS 13. Acción por el Clima*, *ODS 14. Vida Submarina* y *ODS 11. Ciudades y Comunidades Sostenibles*, al abordar la conservación de praderas marinas y la regeneración costera como medidas de adaptación frente al cambio climático y de resiliencia urbana. Asimismo, presenta vínculos complementarios con los *ODS 9. Industria, innovación e infraestructura*, *ODS 6. Agua limpia y saneamiento* y *ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres*, promoviendo la innovación en infraestructuras y la protección de la biodiversidad.

En resumen, este Trabajo de Fin de Máster ofrece un enfoque innovador y práctico para definir el límite superior (upper limit) de la pradera de *Posidonia oceanica*, lo cual representa un gran progreso en la gestión integrada del litoral y la protección de un ecosistema de alto valor ecológico.

Como futuras líneas de investigación se propone aplicar el método desarrollado a otros tramos litorales donde exista cartografía actualizada sobre la distribución de praderas marinas. Esto permitiría comprobar si el criterio definido se mantiene en distintos escenarios y así obtener un modelo predictivo con mayor alcance.

9 REFERENCIAS

- Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A., & Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*, 4(11), e00938. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>
- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2024). Resumen anual del clima en España 2024. AEMET. https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2024.pdf
- Ayuntamiento de Denia. (2022). Estudio de paisaje del Plan General Estructural de Dénia. <https://www.denia.es/docs/pge/ep%20pge%20denia/2022-11%20estudio%20paisaje%20pge%20denia.pdf>
- Bonamano, S., Piazzolla, D., Scanu, S., Mancini, E., Madonia, A., Piermattei, V., & Marcelli, M. (2021). Modelling approach for the evaluation of burial and erosion processes on *Posidonia oceanica* meadows. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 254, 107321. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107321>
- Centro Nacional de Información Geográfica. (2025). Centro de descargas del CNIG. Recuperado el 12 de febrero de 2025, de <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscarGeom>
- Coleman, F. C., & Williams, S. L. (2002). Overexploiting marine ecosystem engineers: potential consequences for biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(1), 40–44. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(01\)02330-8](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(01)02330-8)
- Consejo de la Unión Europea. (1992). Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 206, 7-50. <https://www.boe.es/doue/1992/206/L00007-00050.pdf>
- Consejo de las Comunidades Europeas. (1982). Decisión del Consejo, de 3 de diciembre de 1981, referente a la celebración del Convenio relativo a la conservación de la vida silvestre y del medio natural en Europa. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 38, 1-45. <https://www.boe.es/doue/1982/038/L00001-00045.pdf>
- De Boer, W. F. (2007). Seagrass–sediment interactions, positive feedback and critical thresholds for occurrence: a review. *Hydrobiologia*, 591(1), 5–24. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-0780-9>
- Descarga KMZ. (2025) Ministerio Para La Transición Ecológica Y El Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/procedimientos-gestion-dominio-publico-maritimo-terrestre/linea-deslinde/descargakmzdpmt-dld.html>
- Díaz-Almela, E., Marbà, N., & Duarte, C. M. (2007). Consequences of Mediterranean warming events in seagrass (*Posidonia oceanica*) flowering

- records. *Global Change Biology*, 13(1), 224–235. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01260.x>
- Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar. (2007). Estudio ecocartográfico del litoral de las provincias de Alicante y Valencia. Ficha A005 de Playa Les Marines, Dénia. Ministerio de Medio Ambiente.
 - Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 206, 22/07/1992, 7–50. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:31992L0043>
 - Duarte, C. M., Borum, J., Short, F. T., & Walker, D. I. (2008). Seagrass ecosystems: their global status and prospects. In Cambridge University Press eBooks (pp. 281–294). <https://doi.org/10.1017/cbo9780511751790.025>
 - Ecocartografía de Valencia. Ministerio Para La Transición Ecológica Y El Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/ecocartografias/ecocartografia-valencia.html>
 - Ecologistas en Acción. (2019). Alegaciones al Proyecto de Regeneración de Playas en Dénia. <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2019/08/Alegaciones-regeneraci%C3%B3n-playas-Denia.pdf>
 - El clima en Denia, el tiempo por mes, temperatura promedio (España) - Weather Spark. (2025). Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/42513/Clima-promedio-en-Denia-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o>
 - Escudero, M., Marbà, N., Garrido, J., Molines, J., Ripoll, E., & Medina, J. R. (2024). Predictive tool of seagrass health to optimize the design of low crested structures. *Coastal Engineering Proceedings*, (38), 50-50.
 - Espino, F., Tuya, F., Izquierdo-Gómez, D., Riera, R., Haroun, R., & González-Lorenzo, G. (2022). Fish assemblages associated with *Cymodocea nodosa* seagrass meadows in the Atlanto-Mediterranean province: A regional synthesis. *Diversity*, 14(10), 808. <https://doi.org/10.3390/d14100808>
 - Espino, F., et al. (2015). Macroecological analysis of the fish fauna inhabiting *Cymodocea nodosa* seagrass meadows. *Journal of Fish Biology*.
 - García Antón, M. D., & Pardo Pascual, J. E. (2004). Asentamientos portuarios históricos del litoral meridional valenciano: Influencia del medio físico en su emplazamiento y evolución. *Mediterrané*, (103), 33–42. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.2122>
 - García, R., Mateo, M. A., Duarte, C. M., & Terrados, J. (2012). Organic carbon burial and accumulation rates in *Posidonia oceanica* meadows along a depth gradient. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 96(1), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.10.008>



- Garmin. (2025) Navionics WebApp – Mapa marino interactivo. <https://maps.garmin.com/es-ES/marine?maps=another-brand&overlay=false&key=eyzvu9cxvvpf>
- Generalitat Valenciana. (2023). Orden 18/2023, de 30 de junio, de la Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica, por la que se aprueba la cartografía oficial de praderas de fanerógamas marinas en la Comunitat Valenciana. Diario Oficial de la Generalitat Valenciana, 9622, 33972–34048.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org>
- Guillén, J. E., Martínez-Crego, B., Otero, M., & Mateo, M. A. (2013). Decadal evolution of seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) in Spanish Mediterranean coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.05.003>
- Hendriks, I. E., Escolano-Moltó, A., Flecha, S., Vaquer-Sunyer, R., Wesselmann, M., & Marbà, N. (2022). Mediterranean seagrasses as carbon sinks: methodological and regional differences. *Biogeosciences*, 19(18), 4619–4637. <https://doi.org/10.5194/bg-19-4619-2022>
- Holzknecht, M., & Albano, P. G. (2022). The molluscan assemblage of a pristine *Posidonia oceanica* meadow in the eastern Mediterranean. *Marine Biodiversity*, 52(6), 59. <https://doi.org/10.1007/s12526-022-01292-2>
- IALA AISM. <https://www.iala.int/>
- INE - Instituto Nacional de Estadística. (2025). INE. Instituto Nacional de Estadística. INE. <https://www.ine.es/>
- Infantes, E. (2022). Seagrass roots reduce coastal erosion [Fotografía]. Eduardo Infantes. Disponible en <https://www.eduardoinfantes.com/pubs/seagrass-roots-reduce-coastal-erosion/>
- Infantes, E., Orfila, A., Bouma, T. J., Simarro, G., & Terrados, J. (2015). *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* seedling tolerance to wave exposure. *Marine Environmental Research*, 103, 55–62. Disponible en https://www.eduardoinfantes.com/pubs/seagrass_seedling_survival_wave_energy_flow_posidonia_cymodocea/
- Infantes, E., Orfila, A., Simarro, G., Terrados, J., & Alomar, C. (2009). Wave energy and the upper depth limit distribution of *Posidonia oceanica*. *Botanica Marina*, 52(5), 419-427. Disponible en <https://digital.csic.es/bitstream/10261/99337/1/Infantes-Botanica-Marina-2009-v52-n5-p419.pdf>
- Instituto Geográfico Nacional. (2025) Iberpix - Visor cartográfico. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. <https://www.ign.es/iberpix/>

- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1975). Mapa geológico de España 1:50.000. Hoja 796 (30-31): Gandía. Madrid: IGME. https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/pdfs/d7_G50/Magna50_796.pdf
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1975). Memoria explicativa de la hoja 796: Gandía. Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Madrid: IGME. <https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/memorias/MMagna0796.pdf>
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2004). Mapa geotécnico de España a escala 1:200.000. Hoja 64: Alcoy. Madrid: IGME. https://info.igme.es/cartografiadigital/datos/Geotecnico200/pdfs/Editado64_Geotecnico200.pdf
- Ivajnsič, D., Orlando-Bonaca, M., Donša, D., Grujić, V. J., Trkov, D., Mavrič, B., & Lipej, L. (2022). Evaluating seagrass meadow dynamics by integrating Field-Based and remote sensing techniques. *Plants*, 11(9), 1196. <https://doi.org/10.3390/plants11091196>
- Diputació de Valencia. Medi Ambient. La *posidonia* - Ecosistema litoral. (2021, June 2). Ecosistema Litoral. <https://ecosistemalitoral.dival.es/index.php/es/la-posidonia/>
- Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. Boletín Oficial del Estado, n.º 299, de 14 de diciembre de 2007, pp. 51275–51327. <https://www.boe.es/eli/es/l/2007/12/13/42>
- Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2016) - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España. Agencia Estatal De Meteorología - AEMET. Gobierno De España. https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/MapasclimaticosdeEspana19812010
- Ecologistas en Acción. (2021, 7 de junio). [Fotografía]. Fanerógamas marinas: no todo lo verde que habita bajo el mar son algas. Ecologistas en Acción. <https://www.ecologistasenaccion.org/172920/fanerogamas-marinas-no-todo-lo-verde-que-habita-bajo-el-mar-son-algas/>
- Marbà, N., & Duarte, C. M. (2010). Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. *Global Change Biology*, 16(8), 2366–2375. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x>
- Marín, C., & Marín, C. (2016, June 9). Nuevo aporte de arena para recuperar la playa de Blay Beach este verano. *Dénia.com*. <https://www.denia.com/nuevo-aporte-de-arena-para-recuperar-la-playa-de-blay-beach-este-verano/>
- Marín-Guirao, L., Ruiz, J. M., Dattolo, E., Garcia-Munoz, R., & Procaccini, G. (2016). Physiological and molecular evidence of differential short-term heat

tolerance in Mediterranean seagrasses. *Scientific Reports*.
<https://doi.org/10.1038/srep28615>

- Mashadyan, M. (2022). Estudio experimental de diques arrecife con Cubípodos en mallas abiertas y cerradas. Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de València.
- Mayot, N., Boudouresque, C. F., & Leriche, A. (2005). Unexpected response of the seagrass *Posidonia oceanica* to a warming sea. *Marine Ecology Progress Series*, 299, 51–60. <https://doi.org/10.3354/meps299051>
- Medina, J. R., Gómez-Martín, M. E., Mares-Nasarre, P., Escudero, M., Odériz, I., Mendoza, E., & Silva, R. (2020). Homogeneous Low-Crested Structures for Beach Protection in Coral Reef Areas. *Proc. 36th Int. Conf. on Coastal Engineering (ICCE)*, ASCE.
- Medina, J. R., Tintoré, J., & Duarte, C. M. (2001). Las praderas de *Posidonia oceanica* y la regeneración de playas. *Revista de Obras Públicas*, abril 2001.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). Directrices comunes para la gestión y conservación de las fanerógamas marinas. Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, 24 de julio de 2024. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/biodiversidad-marina/especies/Directrices_cons_fanerogamas_marinas.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2008). Ficha descriptiva del hábitat 1120: Praderas de *Cymodocea nodosa* (Macaronesia). Dirección General de Costas. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/030508_Cymodocea_macaronesia_tcm30-162357.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Proyecto constructivo para la recuperación del tramo de costa comprendido entre el Puerto de Denia y el río Girona (Alicante). Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/190520_pc_denia_girona_unificado_tcm30-498059.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2025). Resolución de 7 de marzo de 2025, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto «Extracción de arenas en aguas profundas de Valencia y transporte para alimentación de playas». *Boletín Oficial del Estado*, 67, 33081–33090. <https://www.boe.es/boe/dias/2025/03/19/pdfs/BOE-A-2025-5496.pdf>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2018). Proyecto de recuperación del tramo de costa comprendido entre el Puerto de Dénia y el río Girona (T.M. de Dénia, Alicante) - Les Deveses. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/180824_proyecto_denia_les_deveses_completo_tcm30-483497.pdf

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Estrategia de actuación para la protección y regeneración de la costa de la Comunidad Valenciana. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategiaactuacionvalenciafinalmemoriared1b_tcm30-163219.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). Directrices comunes para la gestión y conservación de las fanerógamas marinas. Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, 24 de julio de 2024. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/biodiversidad-marina/especies/Directrices_cons_fanerogamas_marinas.pdf
- Molines, J., Centi, L., Di Risio, M., & Medina, J. R. (2021). Estimation of layer coefficients of Cubipod homogeneous low-crested structures using physical and numerical model placement tests. *Coastal Engineering*, 168, 103901.
- Molines, J., Centi, R., Di Risio, M., & Medina, J. R. (2021). Estimation of layer coefficients of cubipod homogeneous low-crested structures using physical and numerical model placement tests. *Coastal Engineering*, 168, Article 103901. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103901>
- Montefalcone, M., Vacchi, M., Archetti, R., Ardizzone, G., Astruch, P., Bianchi, C. N., Calvo, S., Criscoli, A., Fernández-Torquemada, Y., Luzzu, F., Misson, G., Morri, C., Pergent, G., Tomasello, A., & Ferrari, M. (2018). Geospatial modelling and map analysis allowed measuring regression of the upper limit of *Posidonia oceanica* seagrass meadows under human pressure. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 217, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.11.006>
- Pergent, G., Bazairi, H., Bianchi, C. N., Boudouresque, C. F., Buia, M. C., Clabaut, P., ... & Verlaque, M. (2012). Mediterranean Seagrasses and Climate Change: A Review. *Mediterranean Marine Science*, 13(2), 194–212. <https://doi.org/10.12681/mms.297>
- Pergent, G., et al. (2014). Climate change and seagrass meadows: A Mediterranean perspective. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.10.013>
- Puertos del Estado. (2018). ROM 1.1-18: Oleaje. Clima marítimo. Características y acciones en obras marítimas. Puertos del Estado. <https://www.puertos.es>
- Puertos del Estado. (2025). Datos históricos del mareógrafo de Gandía, de la boya de Valencia y del punto SIMAR 2085107 (información solicitada). <https://portus.puertos.es/#/>
- Puertos del Estado. (junio, 2023). R1001 Ed2.0 Sistema de Balizamiento Marítimo IALA (SBM).
- Puertos del Estado. ROM 1.0 09: Recomendaciones para el diseño y ejecución de obras de abrigo (Breakwaters, Part 1) [PDF]. Puertos del Estado. <https://www.puertos.es/sites/default/files/2024-04/ROM%201.0-09.pdf>



- Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero, para el desarrollo del Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial y del Catálogo Español de Especies Amenazadas. Boletín Oficial del Estado, n.º 46, de 23 de febrero de 2011, pp. 20601–20614. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2011/02/04/139>
- Real Decreto 1997/1995, de 7 de diciembre, por el que se establecen medidas para contribuir a garantizar la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. Boletín Oficial del Estado, n.º 310, de 28 de diciembre de 1995, pp. 37310–37321. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1995/12/07/1997>
- Ripoll, E. (2024). Estudio hidráulico de diques exentos de baja cota con Cubípodos en secciones de tronco y morro (Proyecto HOLOBRACE). Universitat Politècnica de València.
- Ripoll, E., Díaz-Carrasco, P., Molines, J., Escudero, M., González-Escivá, J. A., & Medina, J. R. (2023). Hydraulic performance of homogeneous low-crested structures for beach protection in coral reef areas. Universitat Politècnica de València.
- Roelvink, D., Reniers, A. J. H. M., Van Dongeren, A. P., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). XBeach model description and manual. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology. Report June, 21(2010), 2.
- Ruiz, J. M., Guillén, J. E., Ramos Segura, A., & Otero, M. M. (2015). Atlas de las praderas marinas de España.
- Ruiz, J. M., Guillén, J. E., Ramos Segura, A., & Otero, M. M. (2024). Atlas de las praderas marinas de España.
- Ruiz, J. M., Guillén, J. E., Ramos Segura, A., & Otero, M. M. (2015). Atlas de las praderas marinas de España. Instituto Español de Oceanografía (IEO) / Instituto de Ecología Litoral (IEL) / Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).
- Schmidgall, S. (2024). Brain-inspired learning in artificial neural networks: A review. *APL Machine Learning*, 2(2), 021501. <https://doi.org/10.1063/5.0186054>
- Silva, R., Borthwick, A. G., & Taylor, R. E. (2005). Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. *Coastal engineering*, 52(5), 391-407.
- Silva, R., Mendoza, E., Mariño-Tapia, I., Martínez, M. L., & Escalante, E. (2016). An artificial reef improves coastal protection and provides a base for coral recovery. *Journal of Coastal Research*, 75, 467–471.
- Sokolova, M., & Lapalme, G. (2009). A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management*, 45(4), 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2009.03.002>



- Tourlioti, P. N., Portman, M. E., Tzoraki, O., & Pantelakis, I. (2021). Interacting with the coast: Residents' knowledge and perceptions about coastal erosion (Mytilene, Lesvos Island, Greece). *Ocean & Coastal Management*, 210, 105705. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105705>
- U.S. Army Corps of Engineers. (1984). *Shore Protection Manual (Vol. I)*. Coastal Engineering Research Center, U.S. Government Printing Office. <https://luk.staff.ugm.ac.id/USACE/USACE-ShoreProtectionManual1.pdf>
- Universitat Politècnica de València. MOOC UPV – Cubipod Manual. Cubipod.com. <https://www.cubipod.com/en/mooc-upv-cubipod-manual/>
- Visor de información geográfica GeoGIS. GEONET Territorial S.A. <https://visor.geonet.es/#>
- Zubak, I., Kruschel, C., & Schultz, S. T. (2017). Predators structure fish communities in *Posidonia oceanica* meadows: Meta-analysis of available data across the Mediterranean basin. *Marine Ecology Progress Series*, 566, 145-159.



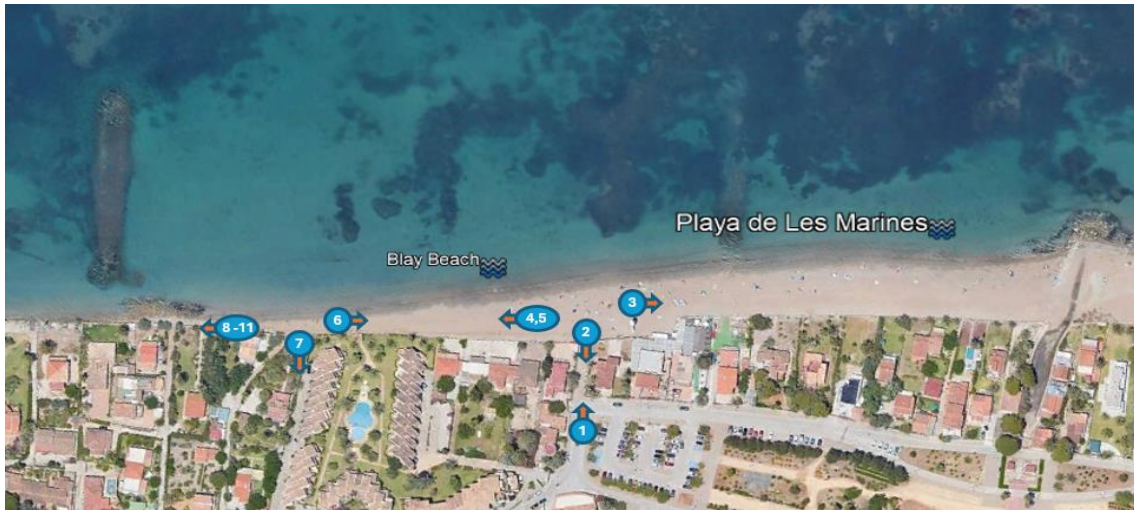
ANEJOS





ANEJO I: DOCUMENTACIÓN FOTOGRAFICA

Playa de Les Marines – Blay Beach

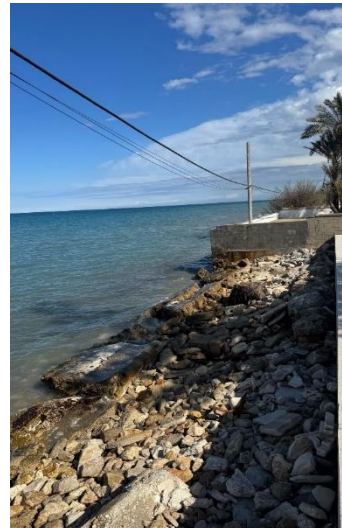




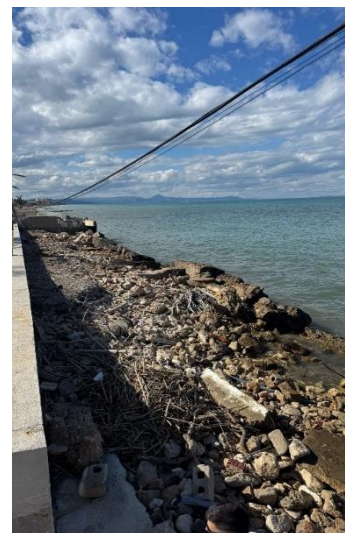
Salida desde calle Gamba:



A derechas:



A izquierdas:



Salida desde Carrer Bogavant

A derechas:

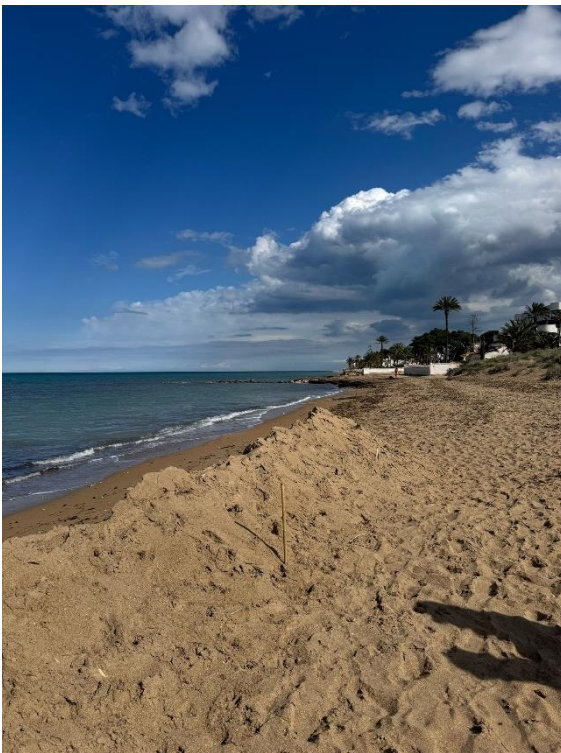


A izquierdas:



Playa de Les Marines













ANEJO 2: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENBIBLE

Relación del Trabajo de Fin de Máster “Estudio del efecto del clima marítimo sobre la extensión de las praderas de *Posidonia oceanica* usando técnicas de IA en la costa de Denia. Aplicación a la regeneración de un tramo de la playa de Les Marines (Alicante).” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

ODS	Relación	Justificación
1. Fin de la pobreza	No hay	No aborda pobreza ni desarrollo económico directo.
2. Hambre cero	Baja	Indirecto: conservación de ecosistemas marinos favorece pesca sostenible.
3. Salud y bienestar	Baja	Protección costera mejora calidad ambiental, efecto indirecto.
4. Educación de calidad	No hay	No vinculado con sistemas educativos.
5. Igualdad de género	No hay	No vinculado con género.
6. Agua limpia y saneamiento	Moderada	Posidonia mejora calidad del agua; protección indirecta.
7. Energía asequible y no contaminante	No hay	No vinculado con energía.
8. Trabajo decente y crecimiento económico	Elevada	Turismo costero sostenible se beneficia de playas regeneradas.
9. Industria, innovación e infraestructura	Moderada	Innovación en ingeniería costera mediante IA, HLCS y modelación numérica.
10. Reducción de las desigualdades	No hay	No impacta desigualdades sociales.
11. Ciudades y comunidades sostenibles	Elevada	Aporta resiliencia a comunidades costeras frente a erosión y temporales.
12. Producción y consumo responsables	Baja	Fomenta gestión sostenible, pero no producción/consumo directo.
13. Acción por el clima	Elevada	Trabaja con impactos climáticos y adaptación costera.
14. Vida submarina	Elevada	Núcleo TFM: conservación de <i>Posidonia oceanica</i> y <i>Cymodocea nodosa</i> .
15. Vida de ecosistemas terrestres	Baja	Relación indirecta, sobre todo ámbito marino no terrestre.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas	No hay	No aborda gobernanza ni instituciones.
17. Alianzas para lograr los objetivos	Baja	Posible contribución a proyectos colaborativos internacionales.





ANEJO 3: PLANOS



ÍNDICE PLANOS

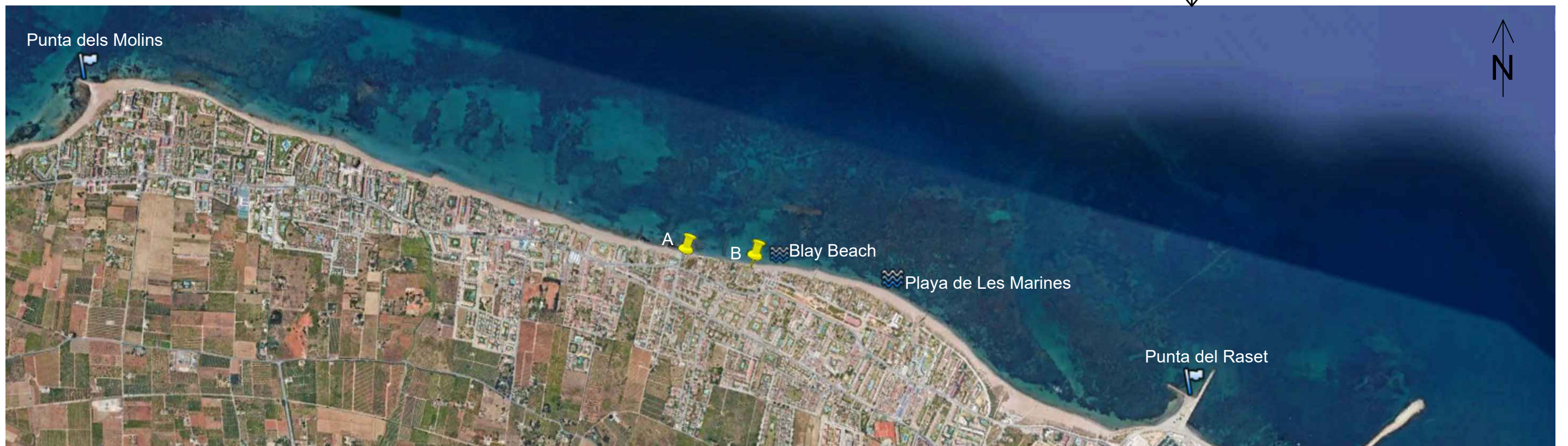
- 1 LOCALIZACIÓN Y EMPLAZAMIENTO
- 2 BATIMETRÍA
- 3 BATIMETRÍA ZONA A REGENERAR
- 4 EVOLUCIÓN LÍNEA DE COSTA
- 5 EVOLUCIÓN LÍNEA DE COSTA ZONA A REGENERAR
- 6 DISTRIBUCIÓN PRADERAS
- 7 BATIMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN PRADERAS ZONA A REGENERAR
- 8 PLANTA DIQUES
- 9 MALLA COLOCACIÓN Y DIMENSIONES CUBÍPODOS
- 10 SECCIÓN DIQUE
- 11 DISPOSICIÓN BALIZAMIENTO, DRAGA Y TUBERÍAS
- 12 ESTADO FINAL
- 13 ESTADO FINAL GENERAL

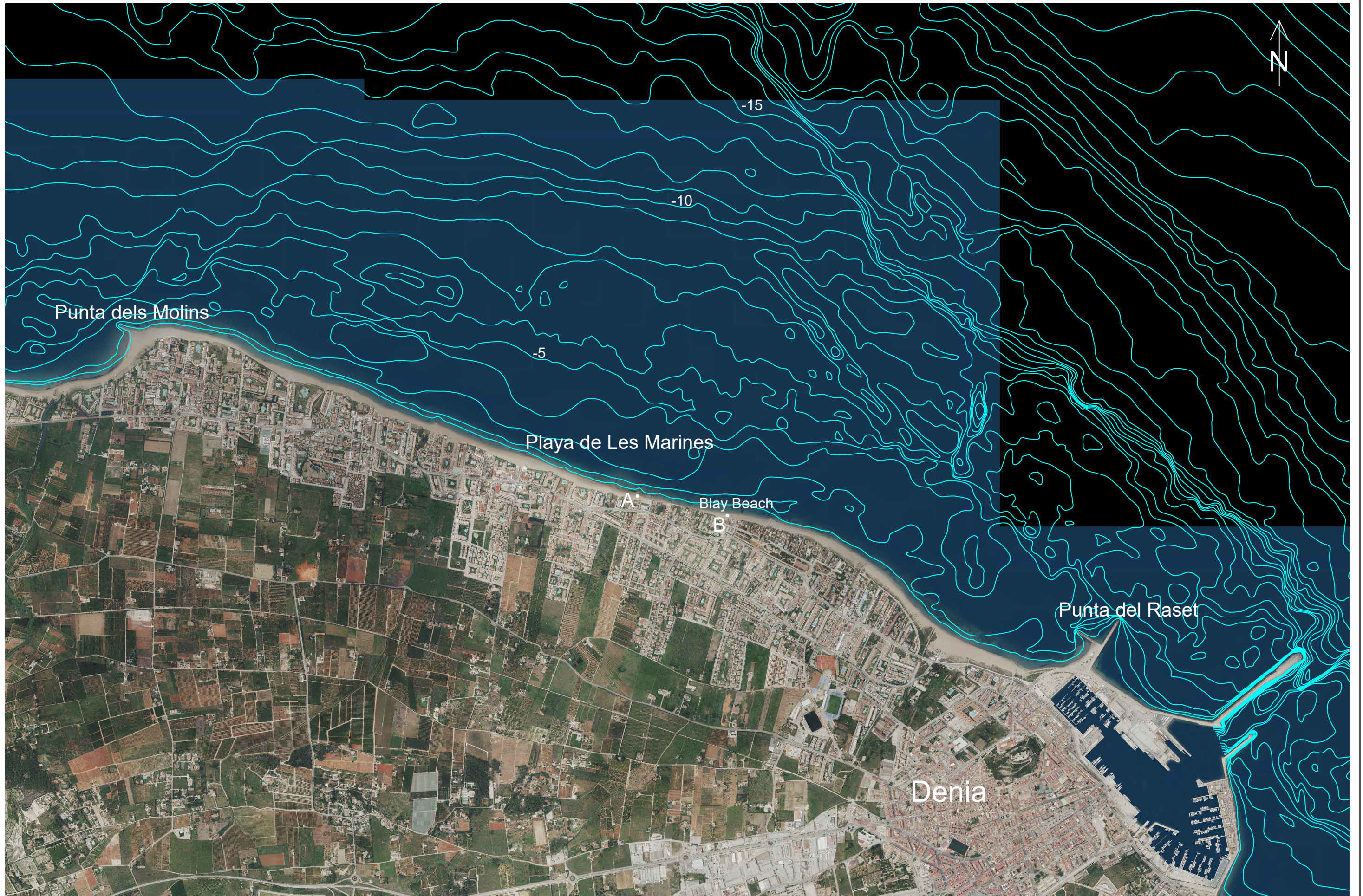
Valencia, septiembre de 2025

MISHEL
ASPARUHOVA|
DANOVA

Digitally signed by MISHEL
ASPARUHOVA|DANOVA
Date: 2025.09.06 18:23:05
+02'00'

Fdo. Mishel Asparuhova Danova









Punta dels Molins



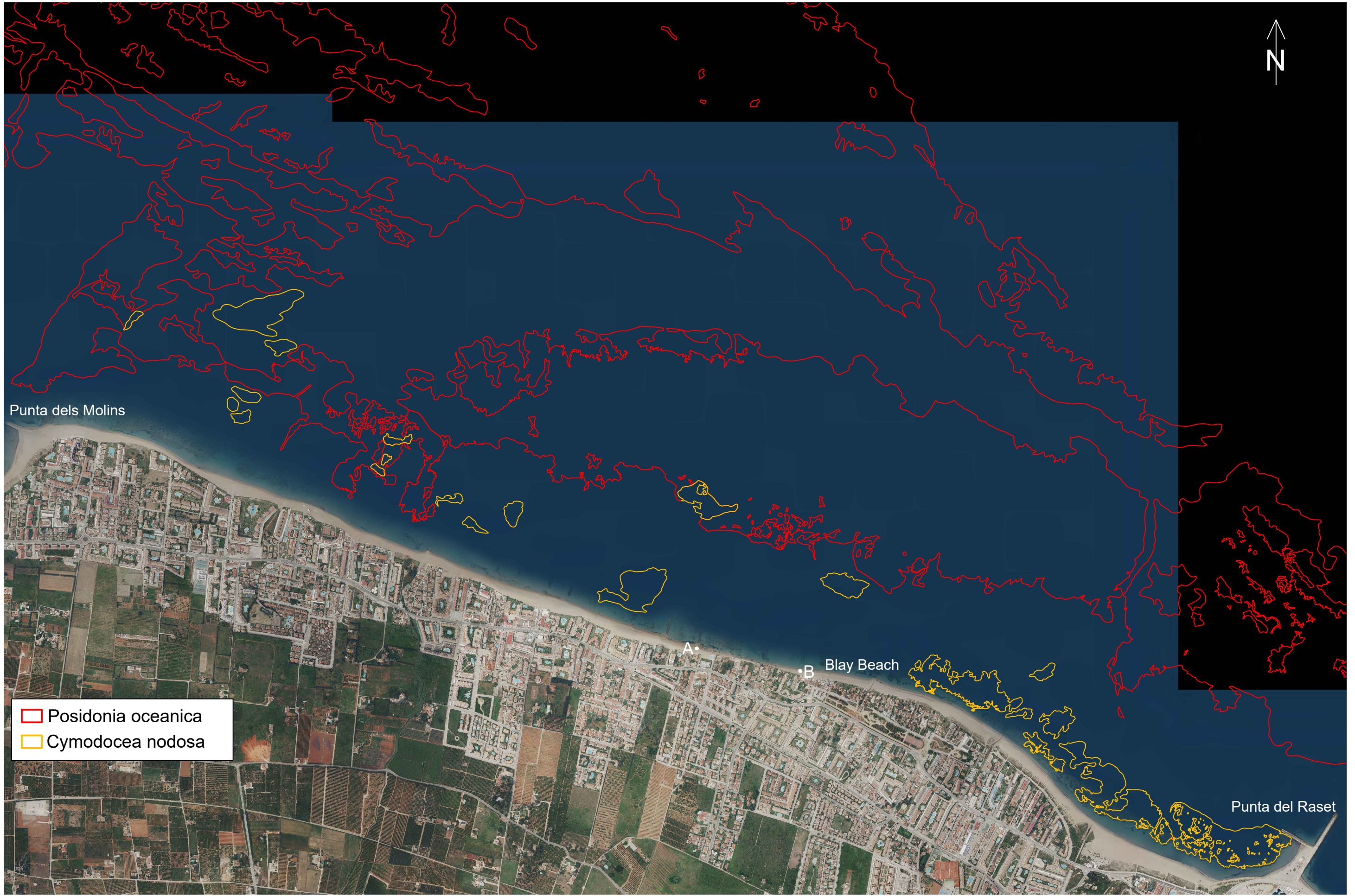
Punta del Raset



- 1957
- 2009
- 2013
- 2016
- 2018
- 2020
- 2024

A

B

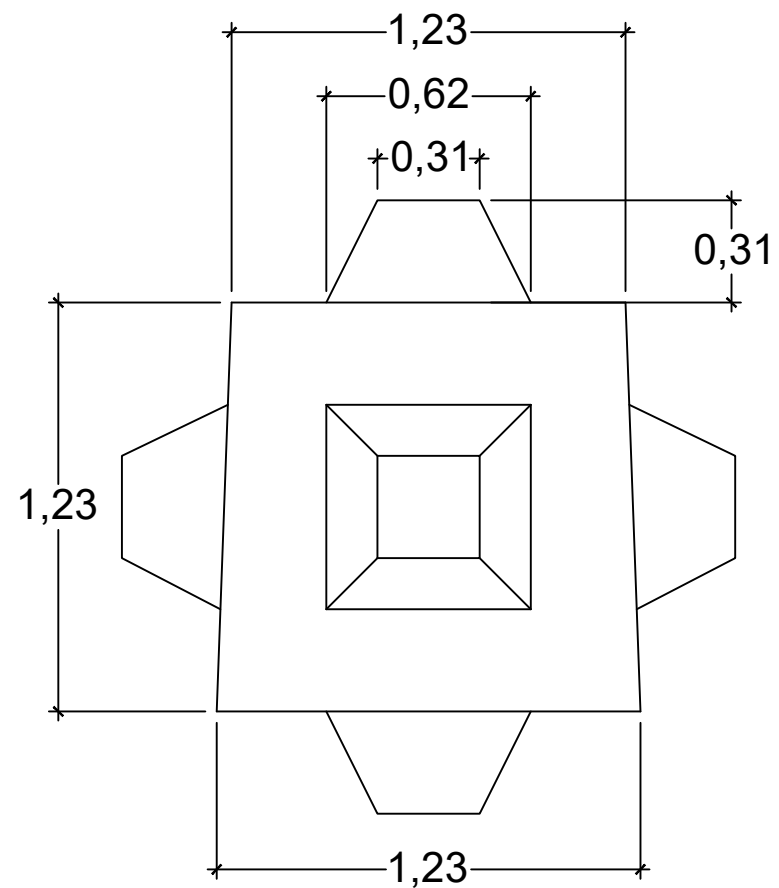






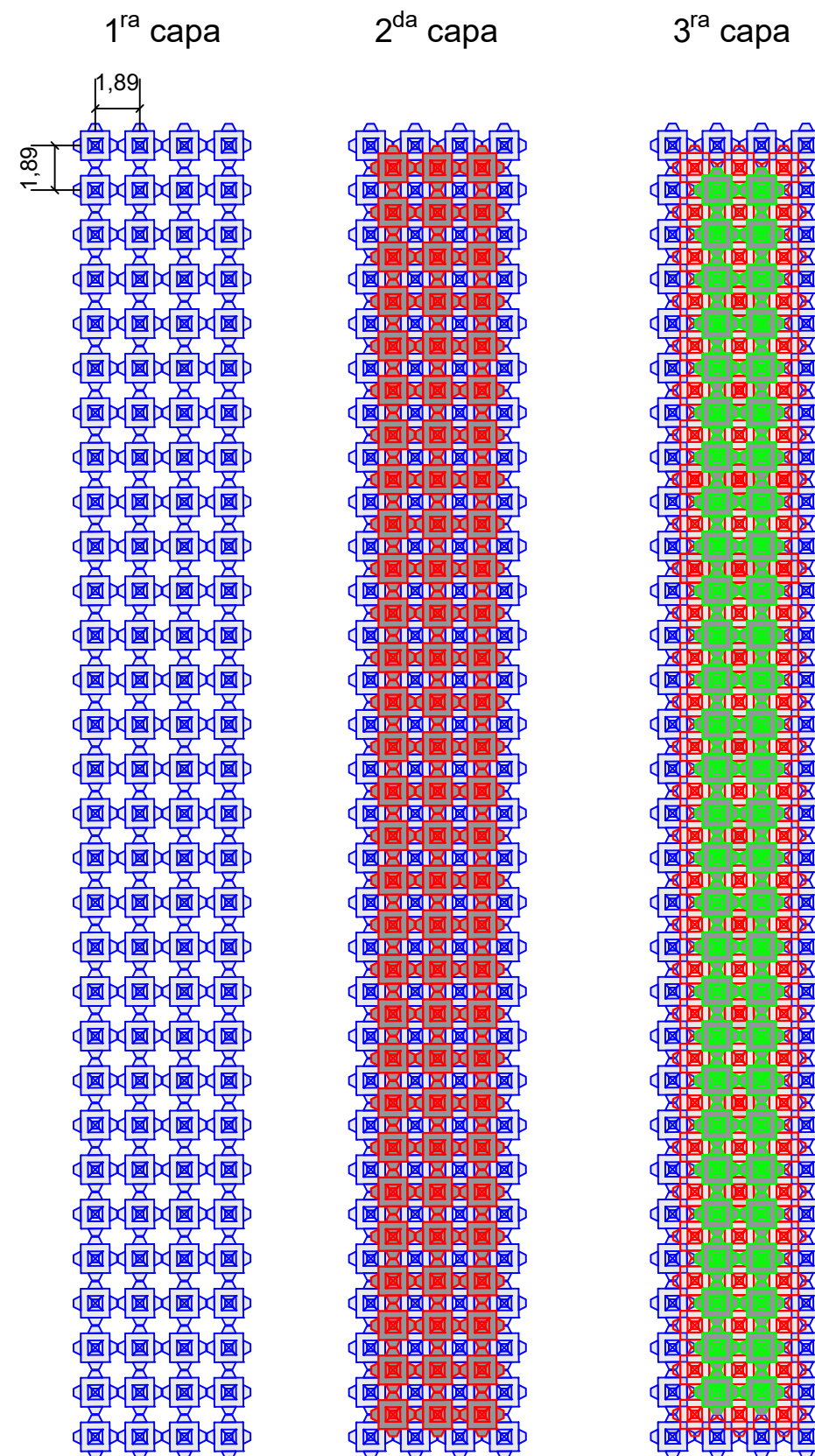
- Línea de costa 2024
- Cymodocea nodosa
- Isobatas

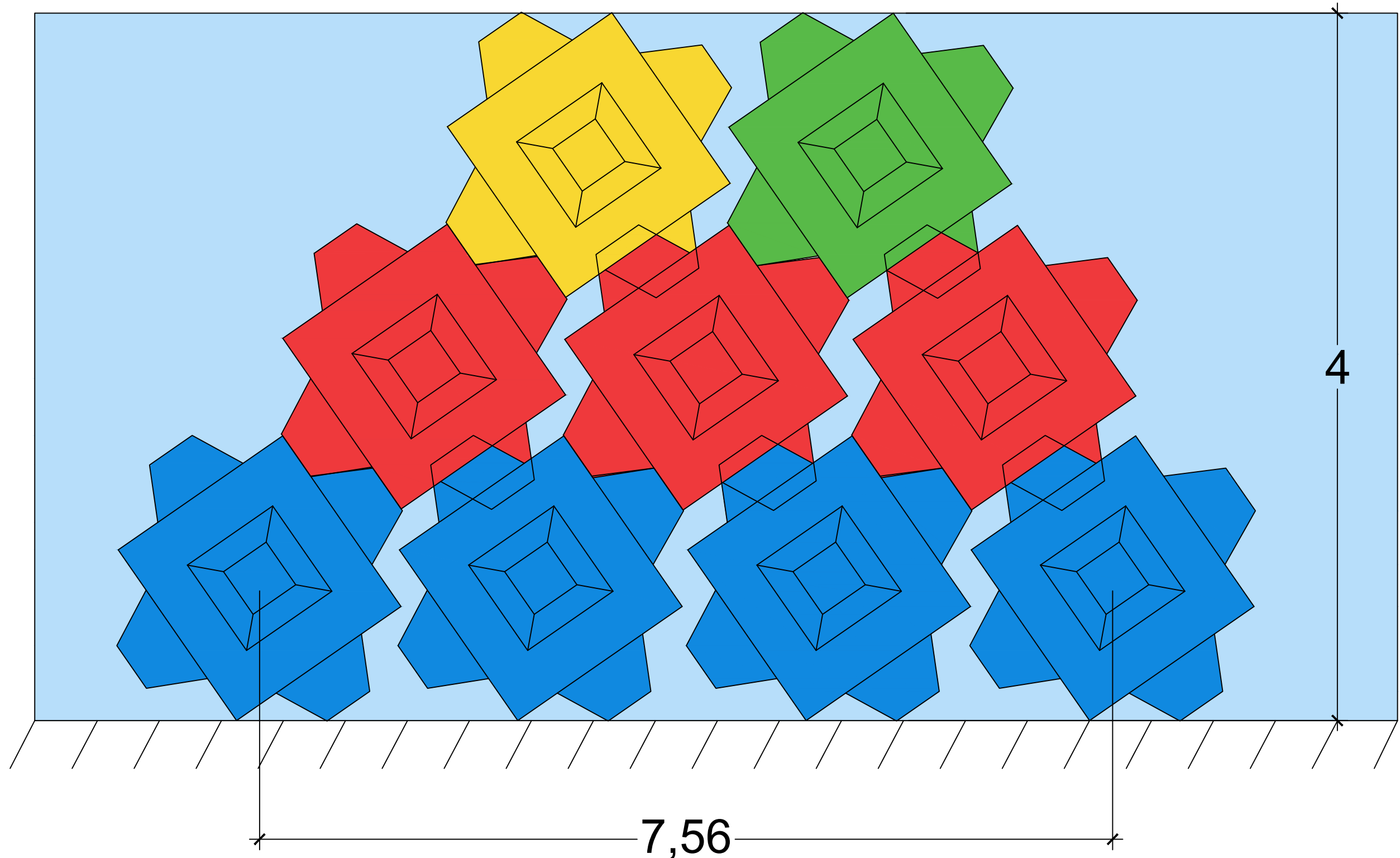
Dimensiones del cubípodo (en metros)

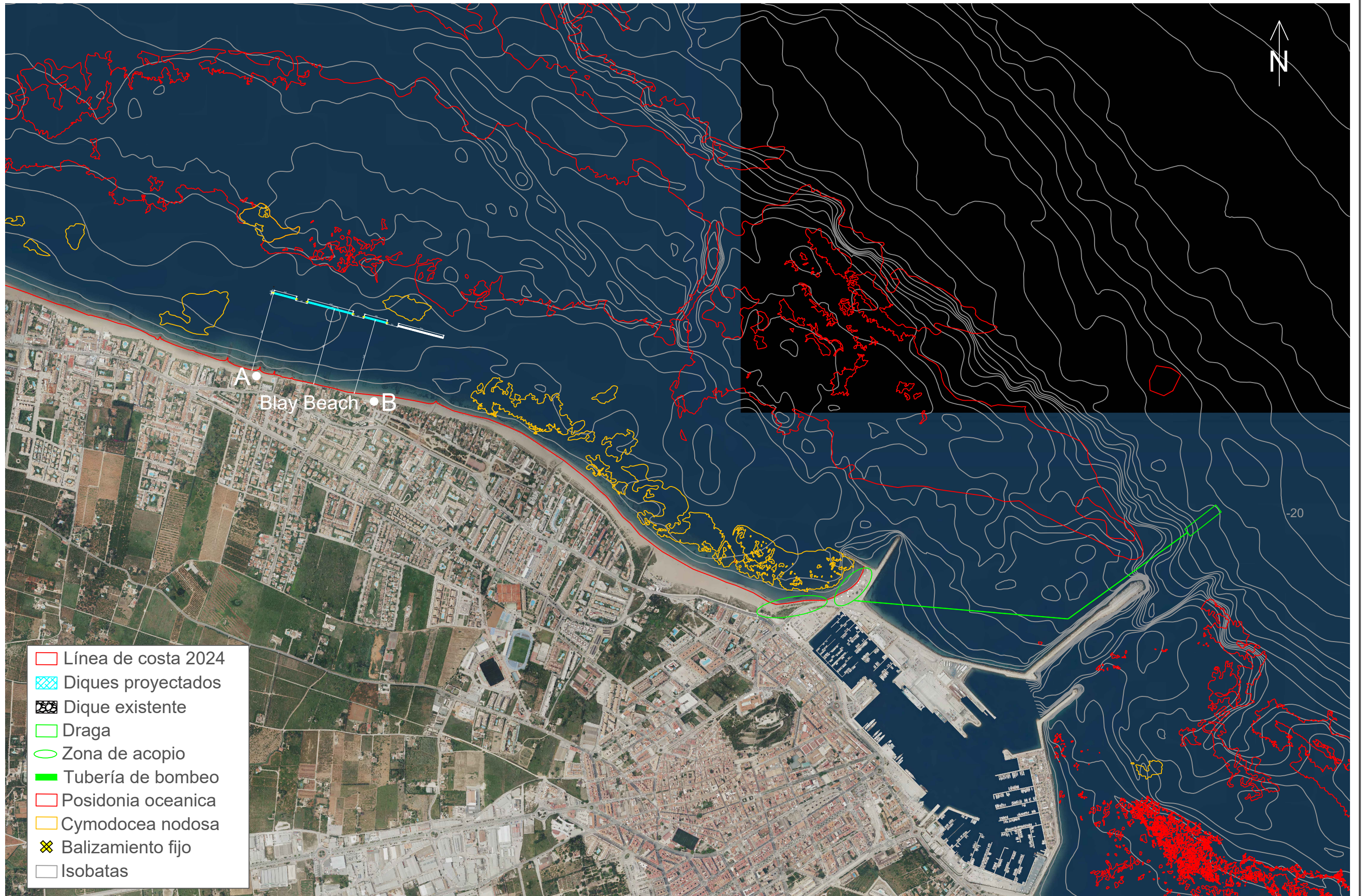


Malla de colocación (en metros)

$$p\% = 0.52 // Dn = 4.36$$



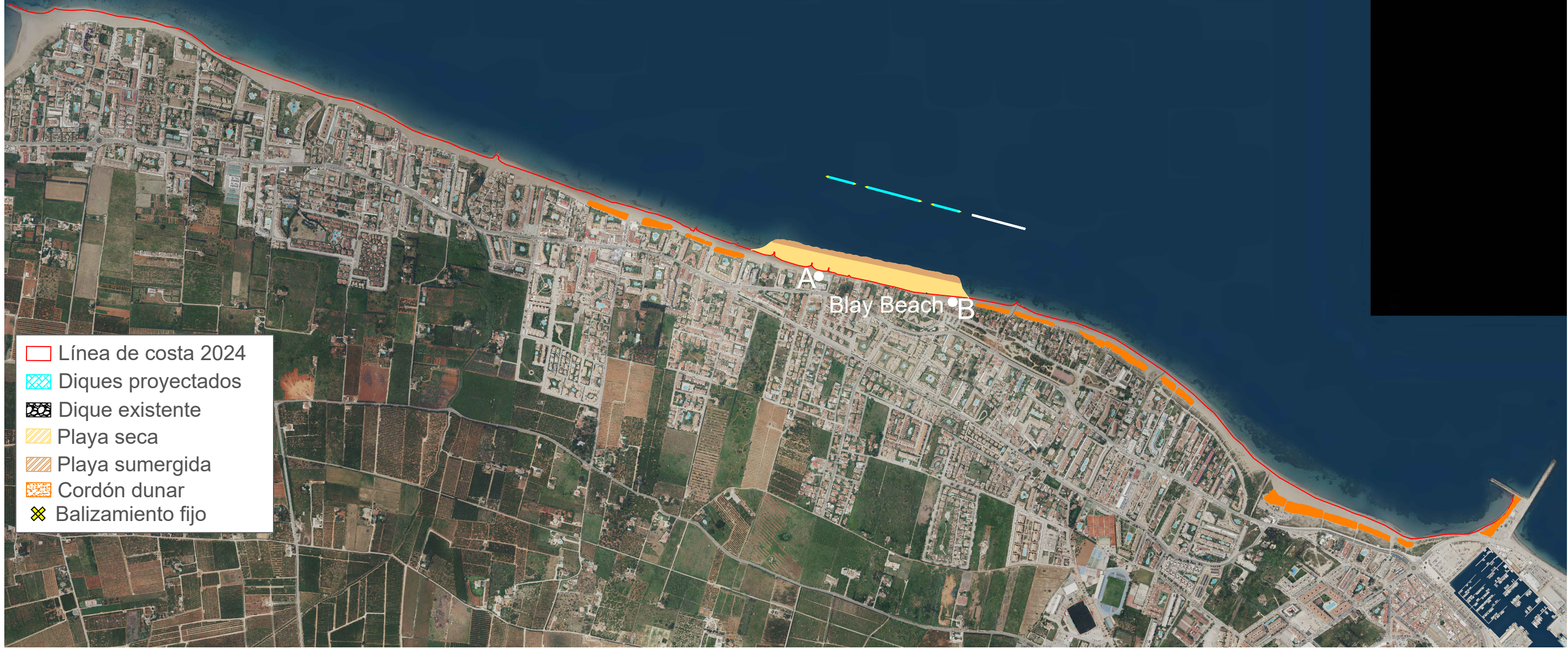











- Línea de costa 2024
- Diques proyectados
- Dique existente
- Draga
- Zona de acopio
- Tubería de bombeo
- Posidonia oceanica
- Cymodocea nodosa
- Balizamiento fijo
- Isobatas



- Línea de costa 2024
- ▨ Diques proyectados
- ▨ Dique existente
- ▨ Playa seca
- ▨ Playa sumergida
- ▨ Cordón dunar
- ✕ Balizamiento fijo



-  Línea de costa 2024
-  Diques proyectados
-  Dique existente
-  Playa seca
-  Playa sumergida
-  Cordón dunar
-  Balizamiento fijo