



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PROLONGACIÓN DEL DIQUE DE LA RÍA DE AVILÉS EN LA ESTABILIDAD DE LA PLAYA

Trabajo realizado por:
Gabriel Bellido Prieto

Dirigido:
Raúl Medina Santamaría
Ernesto Mauricio González Rodríguez

Titulación:
**Máster Universitario
en Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2023

TRABAJO FIN DE MASTER



ÍNDICE

RESUMEN.....	6
ABSTRACT	7
ANTECEDENTES	8
1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL DOCUMENTO.....	9
1.2 INFORMACIÓN UTILIZADA	10
1.3 ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO	10
2 REVISIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS.....	11
3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	12
3.1 MORFOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	12
3.1.1 SISTEMA PLAYA/DUNAS DE SALINAS-EL ESPARTAL.....	14
3.1.2 BATIMETRÍA Y GRANULOMETRÍA	15
3.1.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA	17
4 DINÁMICA MARINA	24
4.1 NIVEL DEL MAR.....	24
4.2 CLIMA MARÍTIMO EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS.....	25
4.2.1 DESCRIPCIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS DATOS.....	25
4.2.2 OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS	27
4.3 CLIMA MARÍTIMO EN PROFUNDIDADES REDUCIDAS	29
4.3.1 METODOLOGÍA DE PROPAGACIÓN DEL OLEAJE.....	29
4.3.2 OLEAJE EN LA PLAYA (DIAGNÓSTICO PRELIMINAR).....	33
4.3.3 RECONSTRUCCIÓN DEL OLEAJE EN LOS PUNTOS DE CONTROL	37
4.3.4 CONCLUSIONES RESPECTO AL OLEAJE EN LA PLAYA.....	41
4.4 SISTEMA CIRCULATORIO.....	42
4.4.1 CORRIENTES LONGITUDINALES.....	43
5 DINÁMICA LITORAL	48
5.1 ANÁLISIS EN LARGO PLAZO	49
5.1.1 FORMA EN PLANTA.....	49
5.1.2 PERFIL DE EQUILIBRIO	51
5.2 MODELO DE FUNCIONAMIENTO MORFODINÁMICO.....	54

6	ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....	55
6.1.1	ALTERNATIVA 1 – Prolongación de 200 metros.....	55
6.1.2	ALTERNATIVA 2 – Prolongación de 500 metros.....	58
6.1.3	ALTERNATIVA 3 – Prolongación de 800 metros.....	60
7	CONCLUSIONES.....	62
	BIBLIOGRAFÍA.....	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Localización del área de estudio. Fuente: Google Earth.....	12
Figura 2.	Figuras de protección en la zona de estudio.....	13
Figura 3.	Tramos en la zona de estudio “Sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal”. 14	
Figura 4.	Batimetría general de la zona de estudio.....	15
Figura 5.	Topobatimetría local de la zona de estudio. Fuente: CEDEX (sept. 2013).....	16
Figura 6.	Perfiles de control empleados en el estudio del CEDEX (2017).....	16
Figura 7.	Vista del paseo marítimo en la playa de Salinas (1990, izquierda – actualidad, derecha). Fuente: https://www.elcomercio.es/asturias/mas-concejos/201501/25/anos-derrumbe-paseo-salinas-20150125004209-v.html	17
Figura 8.	Perfiles transversales y frentes dunares en el periodo 1957-2016 sobre la ortofoto PNOA 2014. (INDUROT, 2017).....	18
Figura 9.	Zoom a los perfiles transversales y frentes dunares en el periodo 1957-2016 sobre la ortofoto PNOA 2014. (INDUROT, 2017).....	19
Figura 10.	Desplazamientos acumulados en el frente dunar con respecto a la posición del frente en el año 1957 y registro de eventos marinos identificados como más significativos. (INDUROT, 2017).....	19
Figura 11.	Comparación del volumen de arena dragado en San Esteban y Avilés y otras actuaciones, con la evolución del frente dunar de Salinas- El Espartal. Fuente: IHCantabria (2021).....	22
Figura 12.	Campañas topo-batimétricas completas realizadas por CEDEX y área de control seleccionada por CEDEX para la estimación del balance sedimentario en las zonas de interés (CEDEX, 2015).....	23
Figura 13.	Caracterización estadística del nivel del mar en la zona de estudio (referidas al NMM del puerto de Avilés).....	25
Figura 14.	Gráficos de dispersión para la comparación de los datos instrumentales de Hs de las boyas “Gijón II” (izquierda) y “Cabo de Peñas” (derecha), con los datos del hindcast en la malla G03. Fuente: IHCantabria.....	26
Figura 15.	Localización del punto ROW utilizado para el estudio. Fuente: IHCantabria.....	27
Figura 16.	Caracterización estadística del punto ROW-Asturias seleccionado.....	27

Figura 17. Rosa de oleaje de altura de ola significativa diferenciando entre los meses de invierno (diciembre-febrero), primavera (marzo-mayo), verano (junio-agosto) y otoño (septiembre-noviembre).....	28
Figura 18. Régimen extremal de altura de ola significativa.....	29
Figura 19. Mallas empleadas en la propagación del oleaje a la zona de estudio.....	31
Figura 20. Selección de casos (100) mediante la técnica MaxDiss (Camus et al., 2011).	32
Figura 21. Localización de los puntos de control para la reconstrucción del oleaje en aguas reducidas.....	33
Figura 22. Gráfico de magnitud (Hs) y vectores de oleajes medio y temporal, de componente NE (figuras superiores) y NNE (figuras inferiores).....	34
Figura 23. Gráfico de magnitud (Hs) y vectores de oleajes medios y temporal, de componente N.....	34
Figura 24. Gráfico de magnitud (Hs) y vectores de oleajes medios y temporal, de componente NNW.....	35
Figura 25. Gráfico de magnitud (Hs) y vectores de oleajes medios y temporal, de componente WNW.....	35
Figura 26. Gráfico de magnitud (Hs) y vectores de oleajes medios y temporal de componente NW en pleamar.....	36
Figura 27. Gráfico de magnitud (Hs) y vectores de oleajes medios y temporal de componente NW en bajamar.....	36
Figura 28. Localización de los puntos de control.....	37
Figura 29. Caracterización del clima marítimo en dos puntos de control de la zona de estudio. Punto P11 (izquierda) y punto P38 (derecha).....	38
Figura 30. Mapa de la dirección del Flujo Medio Anual de Energía (FME) en los puntos de control.....	39
Figura 31. Resultados de la dirección del Flujo Medio Anual de Energía (FME) en los puntos de control.....	40
Figura 32. Evolución histórica del flujo medio anual de energía (FME) en el punto P08.	41
Figura 33. Mecanismos de transporte según el informe del CEDEX (1994).....	42
Figura 34. Modelo de funcionamiento propuesto por IHCantabria, (1996b) bajo condiciones de temporal.....	43
Figura 35. Gráficos de corrientes asociadas a un temporal del NW en bajamar.....	44
Figura 36. Gráficos de corrientes asociadas a un temporal del NW en pleamar.....	45
Figura 37. Gráficos de corrientes asociadas a un temporal del WNW en bajamar.....	45
Figura 38. Gráficos de corrientes asociadas a un temporal del WNW en bajamar.....	46
Figura 39. Gráficos de corrientes de un oleaje medio del NW (bajamar y pleamar).	46
Figura 40. Variaciones del fondo (m) respecto a la batimetría inicial tras un temporal del NW en bajamar.....	47
Figura 41. Evolución de la playa según la escala espacial (izquierda) y temporal (derecha).	48
Figura 42. Cuadro resumen de la expresión parabólica de Hsu y Evans para playas encajadas.....	50
Figura 43. Forma en planta de equilibrio de playa de Salinas-El Espartal.....	51

Figura 44. Forma en planta de equilibrio de playa de Salinas-El Espartal.	51
Figura 45. Perfiles de playa extraídos de la batimetría de septiembre de 2013.	52
Figura 46. Ajuste de los perfiles extraídos de la batimetría disponible (sept. 2013).	53
Figura 47. Modelo de funcionamiento más probable en situación de bajamar.	54
Figura 48. Diseño de la nueva planta de equilibrio tras la prolongación de 200 metros.	56
Figura 49. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 200 metros (derecha), durante un temporal del WNW en bajamar. .	56
Figura 50. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 200 metros (derecha), durante un temporal del NW en bajamar.	57
Figura 51. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 200 metros (derecha), durante un temporal del NNW en bajamar. .	57
Figura 52. Diseño de la nueva planta de equilibrio tras la prolongación de 500 metros.	58
Figura 53. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 500 metros (derecha), durante un temporal del WNW en bajamar. .	58
Figura 54. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 500 metros (derecha), durante un temporal del NW en bajamar.	59
Figura 55. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 500 metros (derecha), durante un temporal del NNW en bajamar. .	59
Figura 56. Cambios en la dirección y energía del FME tras la ampliación de 800m.	60
Figura 57. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 800 metros (derecha), durante un temporal del WNW en bajamar. .	60
Figura 58. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 800 metros (derecha), durante un temporal del NW en bajamar.	61
Figura 59. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 800 metros (derecha), durante un temporal del NW en bajamar.	61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estimación del volumen de arena ganado/perdido respecto al año 1957. (INDUROT, 2017).	20
Tabla 2. Listado de eventos históricos. Fuente: IHCantabria, 2021.	21
Tabla 3. Balance sedimentario obtenido a partir de los datos históricos. CEDEX (2015)	23
Tabla 4. Balance sedimentario en playa y dunas obtenidos con base en los datos del CEDEX (2015) e INDUROT (2017), respectivamente.	24
Tabla 5. Tabla de probabilidad de ocurrencia de oleajes, según su dirección de incidencia. Columna “Hs50”: régimen medio de altura de ola significativa (prctil. 50%). Columna “Hs12”: régimen extremal de altura de ola significativa (prctil. 99.8%).	30
Tabla 6. Casos seleccionados para su propagación y el diagnóstico preliminar.	32
Tabla 7. Parámetros asociados al ajuste en dos tramos de los perfiles analizados.	53

RESUMEN

El presente Trabajo Final de Máster, desarrollado dentro del título Máster en Ingeniería de Costas y Puertos por la Universidad de Cantabria, ha sido elaborado por Gabriel Bellido Prieto bajo la dirección de Raúl Medina Santamaría y Ernesto Mauricio González Rodríguez.

Este estudio surge a raíz de la sugerencia de la Dirección General de Costas de prolongar el espigón como medida para reducir la entrada de sedimento y su acumulación en la barra de la canal de navegación de la Ría de Avilés. En este sentido, el presente trabajo se centra en la evaluación los efectos de prolongar el espigón de la Ría de Avilés en la estabilidad de la playa de Salinas-El Espartal. Para ello, se han considerado tres escenarios de prolongación del espigón, con longitudes de 200, 500 y 800 metros, este último llevado hasta la profundidad de cierre de la playa.

En la fase inicial del estudio, se lleva a cabo una revisión de los estudios previos relacionados con la problemática de la zona de estudio. El trabajo realizado ha permitido comprender el modelo de funcionamiento del sistema y constatar que nos encontramos ante una caja abierta, que experimenta recibe y pierde grandes cantidades de sedimento que entra por el extremo occidental (Punta de la Peñona) procedente de la deriva litoral que recorre la costa desde el cabo de Vidrias.

En el análisis del sistema de corrientes se constata que los temporales del WNW, NW y NNW en situación de bajamar son los responsables de mover este sedimento y llevarlo hasta a la barra de la canal. Los resultados revelan que cualquier extensión del espigón induce cambios significativos en el patrón de las corrientes, destacando el cambio en el sentido de giro del bucle generado en el extremo oriental.

También, se evidencia la eficacia de la prolongación del espigón en la reducción de la entrada de arena en la canal de navegación. Aunque, esta medida solo alcanzará su máximo potencial si se prolonga hasta la profundidad de cierre, ubicada a 800 metros de la posición actual del morro. Además, dado que el sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal es abierto, la efectividad de la prolongación del espigón se reducirá con el tiempo debido a la entrada continua de arena desde el exterior.

Por otro lado, se ha analizado los efectos de la prolongación del espigón sobre la playa, evidenciando que cada extensión conlleva un giro y avance de la playa en su extremo oriental. Esto implica la necesidad de incorporar grandes volúmenes de arena para llevar a la playa a un estado de equilibrio de la forma en planta de la playa.

Palabras clave: playa, espigón, estabilidad, corrientes de rotura, Avilés, SMC_e.

ABSTRACT

The following Master's Final Project, developed within the Master's Degree in Coastal and Port Engineering at the University of Cantabria, has been prepared by Gabriel Bellido Prieto under the supervision of Raúl Medina Santamaría and Ernesto Mauricio González Rodríguez.

This study emerged in response to a suggestion from the Dirección General de Costas to extend the groyne as a measure to reduce sediment inflow and accumulation in the navigation channel bar of the Avilés Estuary. Accordingly, this research focuses on evaluating the effects of extending the Avilés Estuary groyne on the stability of the Salinas-El Espartal beach. For this purpose, three scenarios have been considered, with lengths of 200, 500 and 800 meters, the latter extending to the to the beach closure depth.

A review of previous studies related to the problems of the study area was carried out. This work has allowed for an understanding the system's operational model, and the fact that it is an open system which experiences the intake and loss of substantial sediment entering from the western end (Punta de la Peñona) originating from the littoral drift along the coast from Cabo de Vidrias.

The current system analysis reveals that storms from WNW, NW, and NNW during low tide are responsible for moving this sediment and transporting it to the channel bar. The results show that any extension of the breakwater induces significant changes in the current patterns, with particular emphasis on the alteration of the rotation direction of the loop generated at the eastern end.

Furthermore, the effectiveness of the groyne extension in reducing sand inflow into the navigation channel is evidenced. However, its maximum potential will only be reached by extending the groyne to the closure depth, located 800 meters from the current position of the headland. In addition, considering the open system of the Salinas-El Espartal beach/dune, the effectiveness of the groyne extension will diminish over time due to the continuous sand inflow from the exterior.

Finally, the analysis of the impact on the beach caused by the groyne extension show that each extension results in a shoreline advance at its eastern edge. Therefore, large volumes of sand will be necessary to bring the beach into a stage of equilibrium.

Key words: beach, groyne, stability, wave-induced currents, Avilés, SMC.

ANTECEDENTES

La elaboración del presente estudio forma parte del Trabajo de Fin de Máster, requerido para finalizar el Máster Universitario en Costas y Puertos, de la Universidad de Cantabria. Este trabajo ha sido realizado por Gabriel Bellido Prieto bajo la supervisión de Raúl Medina Santamaría y Ernesto Mauricio González Rodríguez. Para la elaboración del estudio se ha contado con la información proporcionada por IHCantabria.

Este documento pasa a ser la presentación escrita del “ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PROLONGACIÓN DEL DIQUE DE LA RÍA DE AVILÉS EN LA ESTABILIDAD DE LA PLAYA”, en el que se exponen la problemática y objetivos a alcanzar, los estudios previos realizados, la metodología empleada para alcanzar los resultados y las conclusiones.

Fecha:

Firma:

1 INTRODUCCIÓN

En el año 2018, la Autoridad Portuaria de Avilés (APAv) solicita al actual Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto de Demográfico (MITECO) la autorización para la ejecución del proyecto “Dragado de Mantenimiento en el puerto de Avilés para cuatro años”, con el objetivo de mantener los niveles de seguridad y operatividad de los muelles del Puerto de Avilés.

Conforme se acordó en el citado proyecto, el puerto realizaría los trabajos de dragado en la zona de la barra y canal de entrada del Puerto (zona activa del Puerto de Avilés). La cantidad de actuaciones podría variar a lo largo del año, dependiendo de la ocurrencia de temporales y de los cambios en la geometría de la zona activa del puerto, durante el período previsto de cuatro años.

Tras el periodo de revisión e información pública y consultas, desde la Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental del MITECO se formuló declaración de impacto ambiental favorable del Proyecto (DIA, véase BOE-A-2018-9755). Sin embargo, la DIA establece una serie de requerimientos a cumplir, entre los que destaca:

- La necesidad de aplicar medidas para compensar anualmente las pérdidas netas de arena del sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal por el efecto sumidero asociado a cada dragado de mantenimiento (D 1.2 y D 4.1).
- Entre las medidas de compensación, destaca la necesidad de priorizar la arena procedente de los dragados de categoría A que cumpla los criterios químicos y microbiológicos de la Instrucción técnica para la gestión ambiental de las extracciones marinas para la obtención de arena (MARM, 2010), y en caso de no cumplir con dichos criterios, utilizar material externo de características apropiadas para la regeneración.

En posteriores reuniones entre la Autoridad Portuaria y la Dirección General de Costas, esta sugirió la posibilidad de prolongar el espigón para reducir la cantidad de arena que entra y se acumula en la barra de la canal de navegación.

1.1 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL DOCUMENTO

El objetivo general del presente estudio es analizar la eficacia de prolongar el dique en la ría de Avilés para reducir la erosión del sistema dunar de Salinas-El Espartal.

Para ello, se ha previsto la realización de las siguientes tareas:

- Recopilación de datos e información histórica y actual de la zona de estudio.
- Revisión de los estudios previos que faciliten la comprensión de la problemática.
- Estudio del funcionamiento de la dinámica litoral mediante el uso de herramientas de información geográfica y modelos numéricos de propagación del oleaje.
- Diagnóstico del modelo de funcionamiento de las corrientes en el sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal.
- Estudio de los efectos esperados en el sistema debidos a las diferentes prolongaciones del espigón.

Uno de los aspectos que tendrá que ser analizado para alcanzar los objetivos propuestos es determinar si el sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal es un sistema abierto o cerrado, pues este hecho tiene mucha relevancia en la eficacia del espigón que se pretende prolongar.

1.2 INFORMACIÓN UTILIZADA

Para la realización del presente trabajo se ha contado con la siguiente información:

- Batimetría general obtenida las cartas náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina y The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO).
- Batimetrías de detalle de la playa de Salinas – El Espartal de septiembre del año 2013 (CEDEX).
- Datos de clima marítimo de las bases de datos de reanálisis ROW – Asturias (Reanalysis Ocean Waves), GOS (Global Ocean Surges) y GOT (Global Ocean Tides) de IHCantabria.
- Fotografías aéreas históricas procedentes de Google Earth, Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Listado de informes y artículos científicos que analizan la zona de estudio (CEDEX, INDUROT, IHCantabria 1996a, Cabrera y Flor 1993, etc.).

1.3 ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO

El presente trabajo se organiza del siguiente modo:

Capítulo 1. Introducción: Presentación de la problemática y de los objetivos que llevan a realizar el presente trabajo, así como los datos utilizados y el contenido del mismo.

Capítulo 2. Revisión de estudios previos: Enumeración de los estudios realizados hasta la fecha y que se han analizado en el capítulo 3.

Capítulo 3. Descripción de la zona de estudio: Descripción de las principales características morfológicas de la zona de estudio, y análisis de los estudios previos y repaso histórico de las actuaciones realizadas en este tramo costero.

Capítulo 4. Dinámica marina: Caracterización del clima marítimo (oleaje y niveles) en profundidades indefinidas y en la zona de estudio, en condiciones medias y de temporal. Además, se analiza el sistema de corrientes en la playa inducidas por el oleaje.

Capítulo 5. Dinámica litoral: Análisis de la estabilidad de la playa en la zona de estudio, determinación del balance sedimentario, y el modelo de funcionamiento del sistema.

Capítulo 6. Estudio de alternativas: Evaluación de los efectos producidos en la estabilidad de la playa y el funcionamiento de las corrientes derivado de las prolongaciones del espigón.

Capítulo 7. Conclusiones: Exposición de las conclusiones obtenidas del trabajo.

2 REVISIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS

En la realización de este trabajo, se ha llevado a cabo una fase de revisión de estudios previos que proporcionan información crucial para comprender la problemática actual. La zona de estudio cuenta con una extensa bibliografía de investigaciones realizadas, a las cuales se ha tenido acceso y revisado en detalle. A continuación, se enumeran los documentos analizados:

- CEDEX (1994): Estudio del dique de contención de arenas en la margen izquierda de la Ría de Avilés (Asturias).
- IHCantabria (1996a, 1996b): “Estudio de la canal de navegación del Puerto de Avilés y su interacción con la playa del Espartal”. INFORME N°1 “Procesos litorales en la ensenada y ría de Avilés” (IHCantabria, 1996a) e INFORME N°2 “Propuesta de soluciones” (IHCantabria, 1996b)
- INDUROT (1999): “Aportaciones del INDUROT al proyecto de regeneración medioambiental de la playa de San Juan-Salinas y mejora de la entrada al puerto de Avilés” realizado por INDUROT y aportado por la APAV.
- CEDEX (2010): “Análisis de la playa de Salinas (Castrillón-Asturias) y posibles mejora de su comportamiento” del CEDEX aportado por la APAV.
- INDUROT, 2017: “Estudio Geomorfodinámico y de la cubierta vegetal de las dunas de El Espartal en el T.M. de Castrillón, Asturias”, aportado por la APAV.
- CEDEX (2017): Informes de seguimiento morfodinámico de la Playa de Salinas y bocana del Puerto de Avilés correspondiente a la Fase 2014-2016.
- Artículos científicos sobre la zona de estudio (Flor-Blanco et al., 2013; Flor-Blanco y Flor, 2011, López Peláez y Flor, 2008...) y los asociados al estuario del Nalón (Cabrera y Flor, 1993; Flor et al., 2018; Flor y Flor-Blanco, 2009...)
- IHCantabria (2020): “Análisis de las muestras de caracterización granulométrica y química de los sedimentos a dragar en el Puerto de Avilés”.
- DIA, BOE-A-2018-9755: Resolución de 26 de junio de 2018, de la Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto Dragado de mantenimiento en el puerto de Avilés para cuatro años.
- IHCantabria (2021): Estudio de evolución del sistema playa-dunas para dar respuesta al punto 4.4 de la DIA, dentro del “Contrato de investigación para el análisis de las muestras de caracterización granulométrica y química de los sedimentos a dragar en el puerto de avilés y trabajos para dar respuesta a la DIA del proyecto Dragado de mantenimiento en el puerto de Avilés”.

El análisis en detalle de estos estudios se realiza en el apartado 3.1.3.

3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En este apartado, se llevará a cabo una descripción de la zona de estudio, abordando las características geomorfológicas y ecosistémicas del sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal, y su relación con la evolución histórica de las construcciones y actuaciones humanas en dicha costa.

3.1 MORFOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en la ensenada de Avilés, en el municipio de Castrillón, en la costa cantábrica central del Principado de Asturias, España. Concretamente, en este estudio se analiza el sistema que comprende la playa de Salinas y la playa de San Juan de Nieva, que conjuntamente forman el sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal. Esta playa, posee una orientación noroeste (NW) y está delimitada por la Peñona al oeste y la Punta de la Forcada al este.



Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: Google Earth.

Es importante destacar que la zona de estudio no se limita exclusivamente a la playa y el sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal, sino que se encuentra estrechamente conectada con otras áreas cercanas. Hacia el oeste, está vinculada con la desembocadura del río Nalón y la playa de los Quebrantes, mientras que, hacia el este tiene una conexión directa con la ría de Avilés y la playa de Xagó.

Este ecosistema costero de Salinas-El Espartal posee una destacada riqueza natural y ha adquirido una gran importancia en términos de conservación, ya que se encuentra protegido por la Red Natura 2000. En particular, la zona de estudio está incluida en dos figuras de protección relevantes: una Zona de Especial Conservación (ZEC) y una Zona

de Especial Protección para las Aves (ZEPA), identificadas como "Cabo Busto-Luanco (Asturias)" con códigos ES1200055 y ES0000318, respectivamente.

Dentro de este espacio de protección, se localizan también otros tres lugares pertenecientes a la Red Regional de Espacios Naturales Protegidos: el Paisaje Protegido de "El Cabo Peñas", el Monumento Natural de la "Charca de Zeluán y Ensenada de Llodero" y el Monumento Natural de la "playa del Espartal".

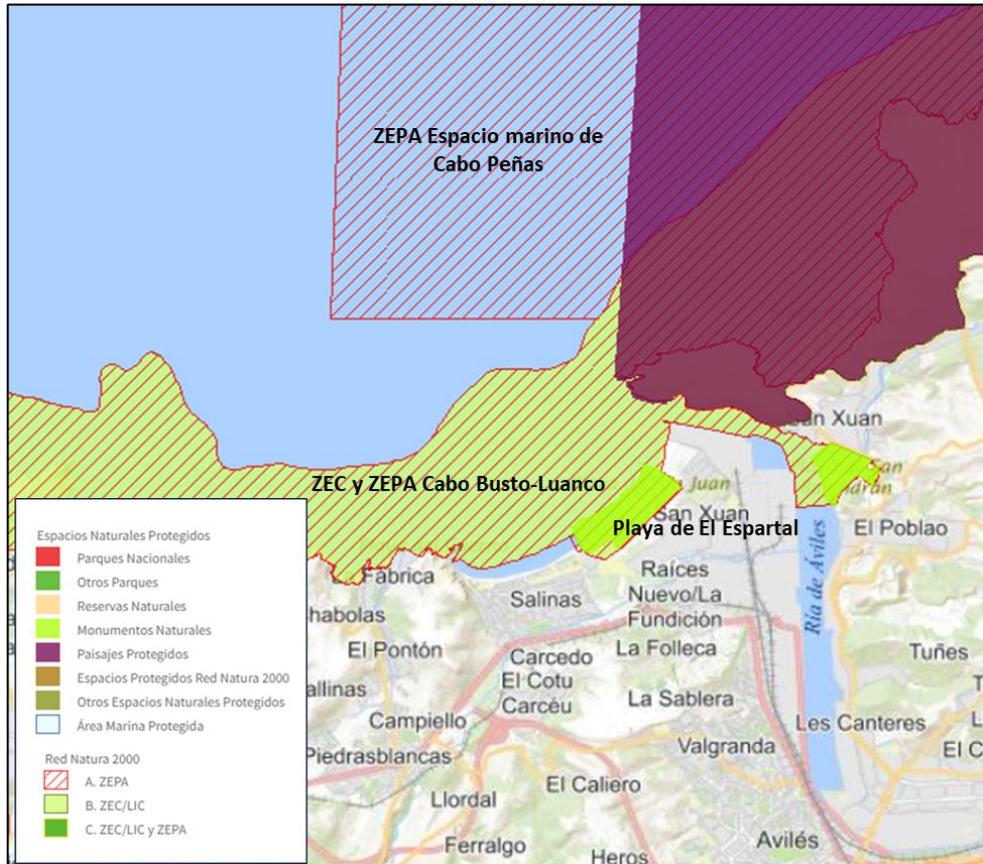


Figura 2. Figuras de protección en la zona de estudio.

3.1.1 SISTEMA PLAYA/DUNAS DE SALINAS-EL ESPARTAL

En este estudio, se ha considerado como un único elemento de estudio al tramo costero que abarca la playa de Salinas y la playa de San Juan de Nievas, pasando a ser llamado “Sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal”. Este territorio de estudio se configura con diversos componentes que merecen su atención.



Figura 3. Tramos en la zona de estudio “Sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal”.

El tramo occidental de la playa es denominado la playa de Salinas, un espacio que se encuentra sometido a una intensa influencia humana, debido a la presencia de la población de Salinas, con correspondiente tejido urbano. Esta playa se extiende a lo largo de 1200 metros de longitud, recorridos por un paseo marítimo que llega hasta la punta de la Peñona. Continuando hacia el este desde la playa de Salinas, comienza un tramo de más de 1400 metros de arenal y dunas de arena dorada. Este tramo también es llamado el arenal de El Espartal, y constituye una prolongación natural de la playa de Salinas, que se extiende hasta el área de servicio del Puerto de Avilés, situado sobre la margen izquierda de la Ría. En conjunto, el sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal describe un arco de unos tres kilómetros de longitud de orientación norte-noroeste, entre el cabo de La Peñona y la margen izquierda de la ría de Avilés.

La zona de estudio adquiere su importancia debido al sistema dunar, el cual históricamente ha sido catalogado como el más amplio de Asturias. A lo largo de este sistema se identifican dos hábitats de interés comunitario (HICs): 2110-Dunas embrionarias (dunas móviles primarias) y 4090-Brezales mediterráneos oromediterráneos primarios y secundarios con dominio de genistas. Además, esta zona cuenta con algunas especies singulares incluidas en el Catálogo Regional de Especies Amenazadas de la Flora Asturiana. En consecuencia, este sistema dunar fue declarado Monumento Natural mediante Decreto 81/2006, de 29 de junio, que reconoce su singularidad en el territorio asturiano y que pasa a ser gestionado con el objetivo de conservar y recuperar los ecosistemas y poblaciones amenazadas, dentro del marco normativo nacional y europeo (Red Natura 2000).

3.1.2 BATIMETRÍA Y GRANULOMETRÍA

En este apartado se analiza la configuración batimétrica de la zona de estudio, así como la información disponible de geometría y la composición granulométrica del sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal. Esta información ha permitido obtener una visión detallada del fondo marino en la costa frente a la zona de estudio.

Por un lado, se dispone de información batimétrica reciente y completa obtenida a partir de diferentes fuentes. La batimetría general de la zona se ha generado mediante la combinación de datos cartográficos del Instituto Hidrográfico de la Marina y GEBCO. Se observa una batimetría recta y paralela en la zona exterior, destacando el cañón de Avilés, que comienza a una profundidad en torno a los 200 metros.

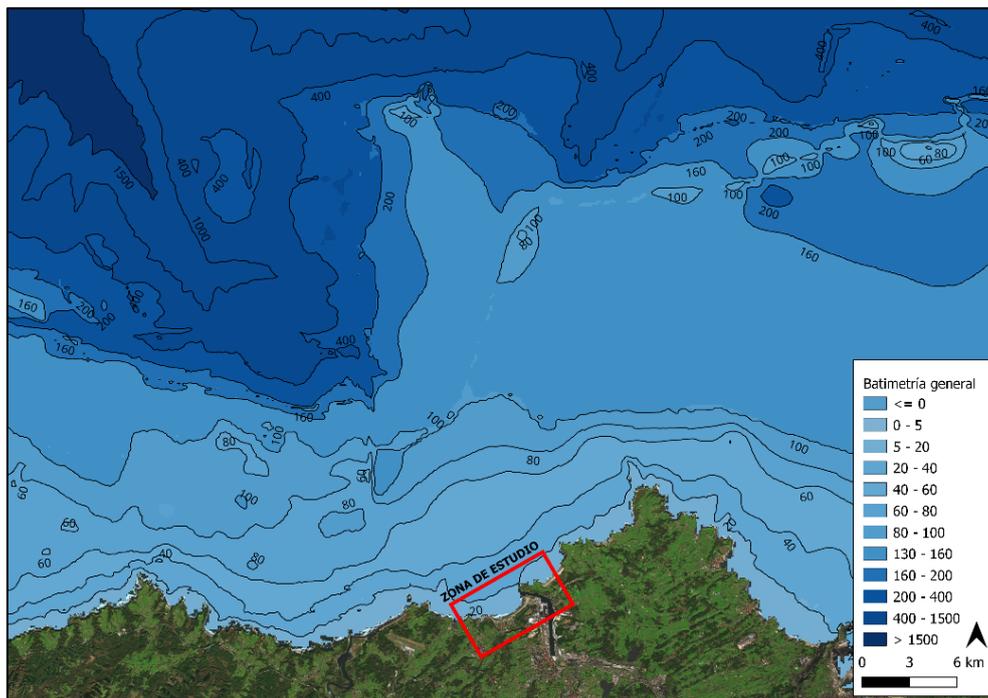


Figura 4. Batimetría general de la zona de estudio

Adicionalmente, se ha incorporado la batimetría de detalle aportada por el CEDEX (Batimetría de la playa de Salinas-El Espartal de septiembre de 2013). Haciendo zoom en la zona de estudio, en base a la información de septiembre de 2013, la playa es recta y paralela hasta la cota -6 m, con excepciones como los afloramientos rocosos de la ensenada de Avilés al Este entre las cotas -18 y -21 m y al Oeste entre -8 y -13 m, los cuales también se aprecian en la siguiente figura. A partir de la cota -3 m aparecen barras y canales compatibles con el sistema de corrientes observados, tal y como se comentará en el apartado 4.4.1 de este trabajo.

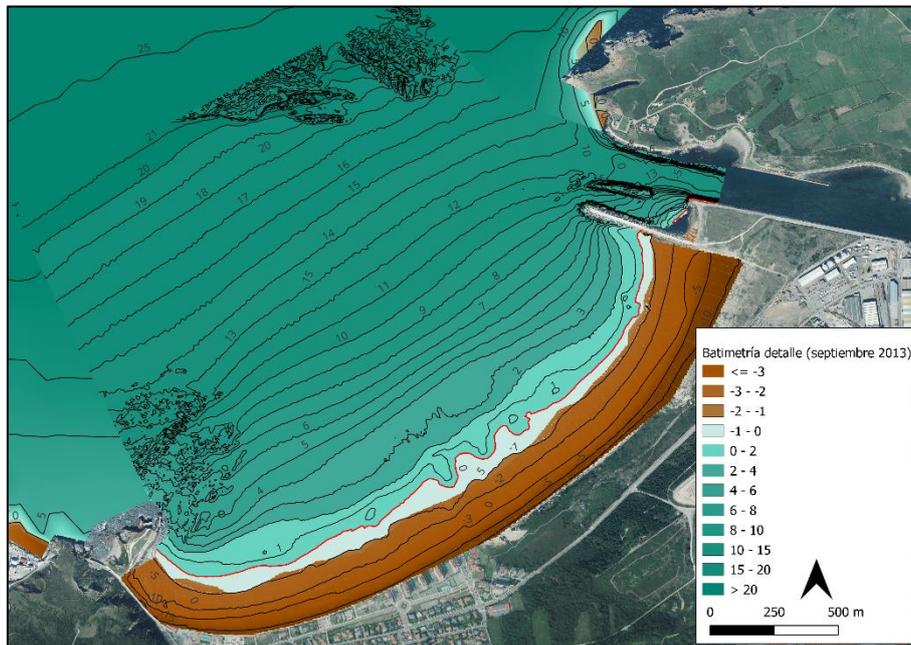


Figura 5. Topobatimetría local de la zona de estudio. Fuente: CEDEX (sept. 2013).

Por otro lado, se cuenta con información granulométrica que proviene de las campañas de campo realizadas en 2017 por el CEDEX (ver figura 6), en las que se han muestreado cinco perfiles a lo largo de la playa de Salinas-El Espartal. De este estudio se determina un tamaño de grano más grueso en el tramo occidental (P10), donde se estima un tamaño de 0.36 mm. En el tramo central y oriental (P30 y P52), el tamaño del sedimento disminuye hasta un promedio de 0.31 mm.

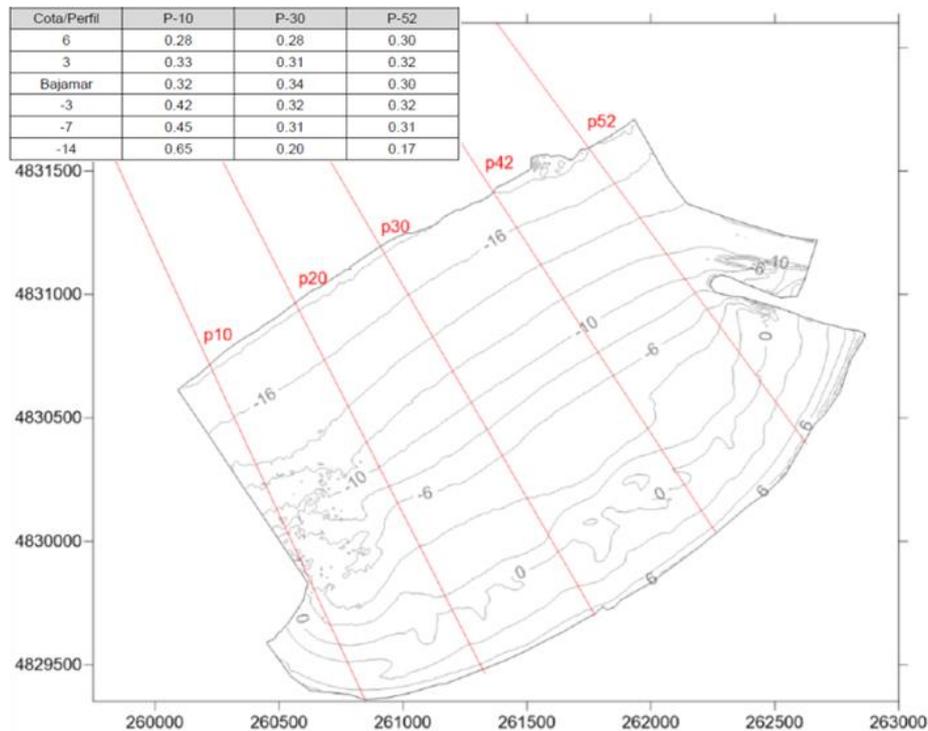


Figura 6. Perfiles de control empleados en el estudio del CEDEX (2017).

3.1.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA

A lo largo del último siglo, el sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal ha experimentado importantes cambios debido al desarrollo urbanístico y a diversas actuaciones realizadas en el entorno de la ría de Avilés y en la propia playa de Salinas.

Desde mediados del siglo XIX, se han llevado a cabo intervenciones significativas dentro de la Ría de Avilés, enfocadas principalmente en el desarrollo y expansión del puerto y de la industria asociada. Como consecuencia de la creciente demanda de puestos de trabajo, se generó un importante desarrollo urbanístico en la población de Avilés, que se expandió hacia la playa de Salinas y las dunas de El Espartal. Destacando importantes proyectos como la construcción de los edificios "Gauzones" en primera línea de costa, o la creación del paseo marítimo, el cual tuvo que ser retranqueado y reconstruido, después de un temporal en 1990.



Figura 7. Vista del paseo marítimo en la playa de Salinas (1990, izquierda – actualidad, derecha). Fuente: <https://www.elcomercio.es/asturias/mas-concejos/201501/25/anos-derrumbe-paseo-salinas-20150125004209-v.html>

Junto a las numerosas intervenciones realizadas en la playa de Salinas, también se llevaron a cabo acciones en el mar, incluyendo dragados tanto en el puerto de Avilés como en la desembocadura del río Nalón, en San Esteban de Pravia. Estos dragados implican la extracción de material sedimentario y su vertido fuera de las playas, por lo que han sido motivo de numerosos estudios para determinar su influencia en la evolución de la playa y el sistema dunar.

Los estudios revisados han permitido elaborar una comparación entre la evolución del sistema dunar y el volumen de arena extraído por la Autoridad Portuaria de Avilés para el periodo comprendido entre 1957 y 2016.

Por un lado, se cuenta con los análisis de la evolución de las dunas realizados por autores como INDUROT (2017). En este estudio se analiza la evolución de las dunas con base en fotografías aéreas, ortofotos históricas y vuelos de dron en 2016, que fueron debidamente georreferenciados para digitalizar el frente dunar en 13 fechas diferentes: 1957, 1963, 1969, 1984, 1989, 1994, 2001, 2003, 2006, 2009, 2011, 2014 y 2016 (ver figura 8).

Los cambios en las dunas fueron cuantificados en 6 perfiles transversales (del 3 al 8, de los 11 realizados), tomando como línea de referencia el frente dunar correspondiente a la ortofoto del año 1957 para determinar los cambios (ver figura 9).

En la figura 10, se muestra el desplazamiento acumulado del frente dunar respecto a la posición en el año 1957 (representado con barras rojas) junto con la fecha de temporales significativos registrados durante ese periodo (identificados con puntos azules). Los resultados muestran un crecimiento del sistema dunar que alcanza su máximo avance (13 m respecto a 1957) en el año 1984. Mientras que, a partir de ese año comienza un periodo de erosión y retroceso medio de 1.4 metros por año hasta el año 2016, resultando en un retroceso de 32.5 m respecto a la línea de 1957.



Figura 8. Perfiles transversales y frentes dunares en el periodo 1957-2016 sobre la ortofoto PNOA 2014. (INDUROT, 2017).

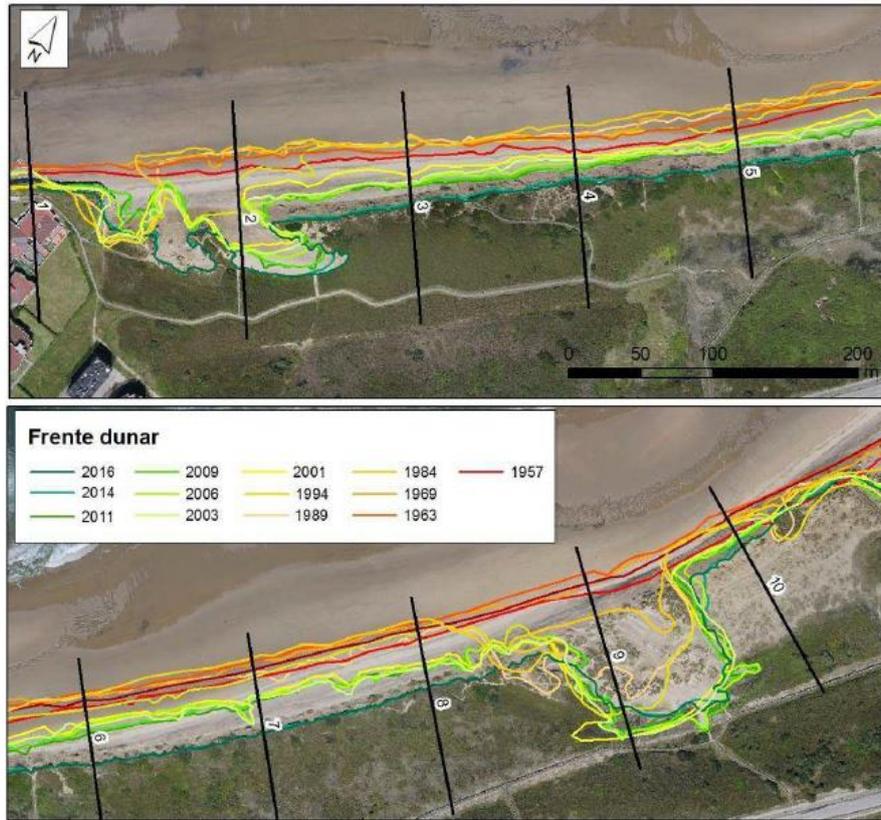


Figura 9. Zoom a los perfiles transversales y frentes dunares en el periodo 1957-2016 sobre la ortofoto PNOA 2014. (INDUROT, 2017).

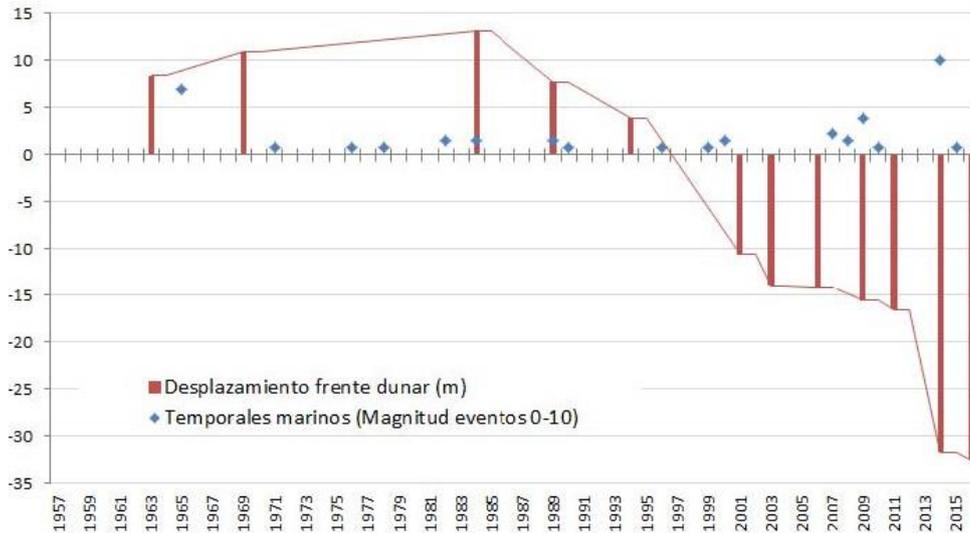


Figura 10. Desplazamientos acumulados en el frente dunar con respecto a la posición del frente en el año 1957 y registro de eventos marinos identificados como más significativos. (INDUROT, 2017).

En la siguiente tabla se muestra el volumen de arena ganado/perdido anualmente, considerando una altura promedio del sistema dunar de 12 metros y una longitud del cordón dunar de 1.560 metros:

Tabla 1. Estimación del volumen de arena ganado/perdido respecto al año 1957. (INDUROT, 2017).

Años	Avance promedio del frente dunar respecto a 1977 (m)	Incremento del volumen de arena respecto a 1957 (m³)
1963	8,40	157.242,14
1969	10,87	203.568,84
1984	13,07	244.688,30
1989	7,85	146.979,01
1994	3,87	72.378,03
2001	-10,58	-198.032,94
2003	-13,92	-260.503,03
2006	-14,10	-263.997,72
2009	-15,73	-294.526,68
2011	-16,52	-309.267,81
2014	-31,87	-596.673,57
2016	-32,61	-610.458,63

El estudio realizado por IHCantabria 2021 realiza un análisis comparativo entre la variación del frente dunar, realizada por INDUROT 2017, y las diversas intervenciones humanas realizadas desde 1930 hasta la actualidad (ver tabla 2), entre las que se incluyen los dragados de San Esteban de Pravia y de la Ría de Avilés.

El siguiente listado de eventos históricos recoge intervenciones que pudieron afectar directamente al sistema dunar, como pueden ser la ocupación de suelo dunar para la creación del polígono de Banesto o la recuperación ambiental de las dunas en 2002 (ID 5 y 14 de la tabla 2, respectivamente), así como otras actuaciones que pueden influir de manera indirecta, como pueden ser los dragados efectuados en la ría de Avilés y en San Esteban de Pravia.

Tabla 2. Listado de eventos históricos. Fuente: IHCantabria, 2021.

ID	Fecha inicio	Fecha fin	Actuación	Fuente
1	1960		Deseccación (relleno) de marismas: Marismas de Lloredo Marismas de las Aceñas	López Peláez y Flor (2008)
2	Principios años 60	1965	Comienza la construcción del paseo marítimo	Flor et al. (2013) INDUROT (2017)
3	1963		Adaptaciones del entorno para usos urbanos e industriales: urbanización de unas 5,6 ha en la zona occidental de El Espartal por el crecimiento del núcleo urbano de Salinas.	INDUROT (2017)
4	1970	1976	Ampliación del canal de entrada (construcción del dique) Dragados	López Peláez y Flor (2008)
5	1976		Canalización de la ría de Avilés: canalización y ampliación de la bocana, ocupando espacio a las dunas de El Espartal para la creación del polígono de Banesto	INDUROT (2017)
6	1980		Construcción del muelle pesquero y lonja y posterior ampliación (Avilés)	López Peláez y Flor (2008)
7	Década 80		Adaptaciones del entorno para usos urbanos e industriales: se destruyó el campo dunar externo para la creación de un polígono industrial.	INDUROT (2017)
8	Invierno 1990		Destrucción del paseo marítimo por temporal de oleaje no muy intenso	INDUROT (2017)
9	Década 90		Adaptaciones del entorno para usos urbanos e industriales: : nuevo aumento del área urbanizada en la zona occidental de El Espartal.	INDUROT (2017)
10	1994		Ampliación del muelle de Raíces	López Peláez y Flor (2008)
			Finalización de las obras de reconstrucción primer tramo de paseo marítimo (casi 1 km)	INDUROT (2017)
11	1995		Construcción de balsa de residuos (III). AZSA	López Peláez y Flor (2008)
12	1998	2006	Dragados: Área de Pachico-Rechalda	López Peláez y Flor (2008)
			Ampliación dársena S. Juan de Nieva Remodelación del dique de acceso al canal de entrada	
13	2000		Finalización de reconstrucción de segundo tramo de paseo marítimo	INDUROT (2017)
14	2002		Recuperación ambiental: Finalización de las obras de regeneración en 16 ha de zonas degradadas, mediante modelado de dunas, revegetaciones y construcción de pasarelas	INDUROT (2017)
			Desmantelamiento de la plataforma de bloques,	CEDEX (2010)
15	2002	2003	Canalización de la ría de Avilés: obras de restauración de la franja oriental que incluyeron la construcción de un dique de encauzamiento más largo al existente. para evitar pérdida de arenas	CEDEX (2010) INDUROT (2017)
16	2003	2006	Restauración: Campo dunar de San Juan de Nieva	López Peláez y Flor (2008)
			Regeneración: Playa de Salinas-El Espartal Retirada de fangos (industriales) Cola estuarina Canalización (escollera): Cala estuarina	
17	2005		Prolongación del paseo marítimo hasta La Peñona	INDUROT (2017)
	dic-04	ene-05	Regeneración playa se vertieron 438.477,98, en lugar de los 600.000 m3 previstos. Las previsiones de vertido correspondían a una alimentación artificial de 200 m3/m, realizándose 146,16 m3/m	CEDEX (2010)
18	2008		Comienzo de procesos de rotura y pérdida de estabilidad	INDUROT (2017)
19	2009		Actuaciones de refuerzo del paseo tras temporales	INDUROT (2017)
20	2014		Actuaciones de refuerzo del paseo tras temporales	INDUROT (2017)

El resultado del estudio se muestra en el siguiente gráfico comparativo entre la evolución del frente dunar respecto a 1957 (línea en verde) y las diversas actuaciones realizadas en la zona, entre las que se incluyen los dragados de San Esteban de Pravia (línea azul) y en la Ría de Avilés (línea roja).

Como se puede observar en la gráfica a simple vista, los dragados masivos realizados en San Esteban de Pravia, que fueron vertidos en un punto próximo al cabo de Vidrias, sirvieron de aporte al sistema dunar hasta el año 1985, donde se registra el máximo avance de la duna (13 metros, respecto al año 1957). Los datos también recogen la ejecución de dragados en la Ría de Avilés durante el mismo periodo de crecimiento de la duna. A partir del año 1985, se registran pérdidas del frente dunar que van variando en intensidad, hasta la actualidad en la que se estima un retroceso 33 metros respecto a la línea en 1957.

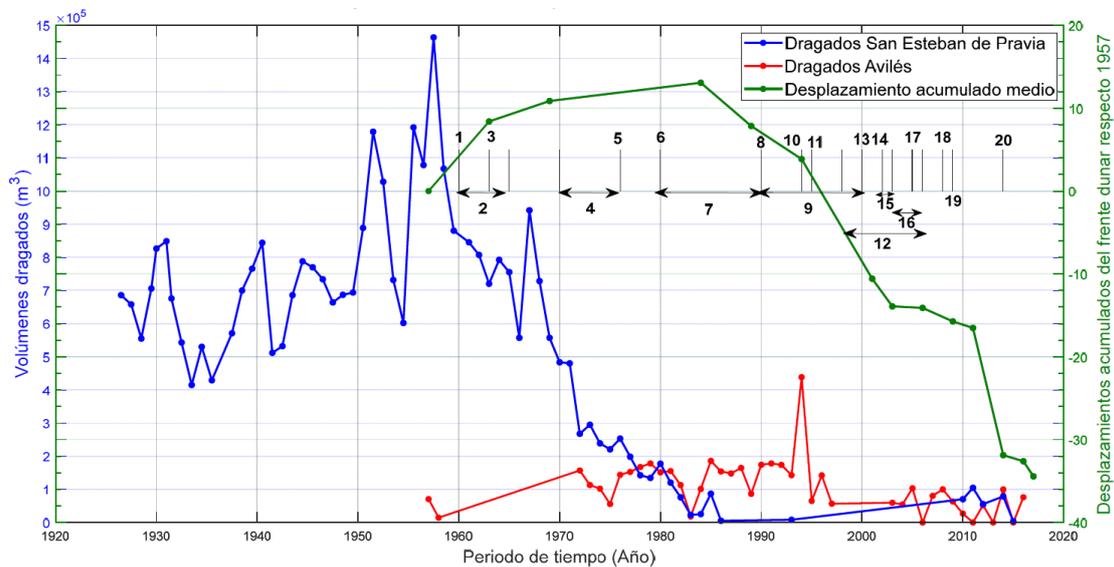


Figura 11. Comparación del volumen de arena dragado en San Esteban y Avilés y otras actuaciones, con la evolución del frente dunar de Salinas- El Espartal. Fuente: IHCantabria (2021).

Este registro histórico de la evolución del frente dunar desde el año 1957 se puede comparar con otros estudios disponibles que cuenten con información contrastada de la distribución de la arena y el balance sedimentario en la zona de estudio.

En este caso, los resultados de IHCantabria 2021 se comparan con los obtenidos por CEDEX 2015 en los informes de seguimiento de la playa Salinas-El Espartal. Estos informes forman parte de las campañas topo-batimétricas de control realizadas en determinadas zonas y a lo largo de toda la playa seca y hasta los -18 m de profundidad. El CEDEX determinó en su estudio el área de control (área en azul) para realizar la comparación de los resultados, así como el periodo del que se dispone de batimetrías completas de la zona.

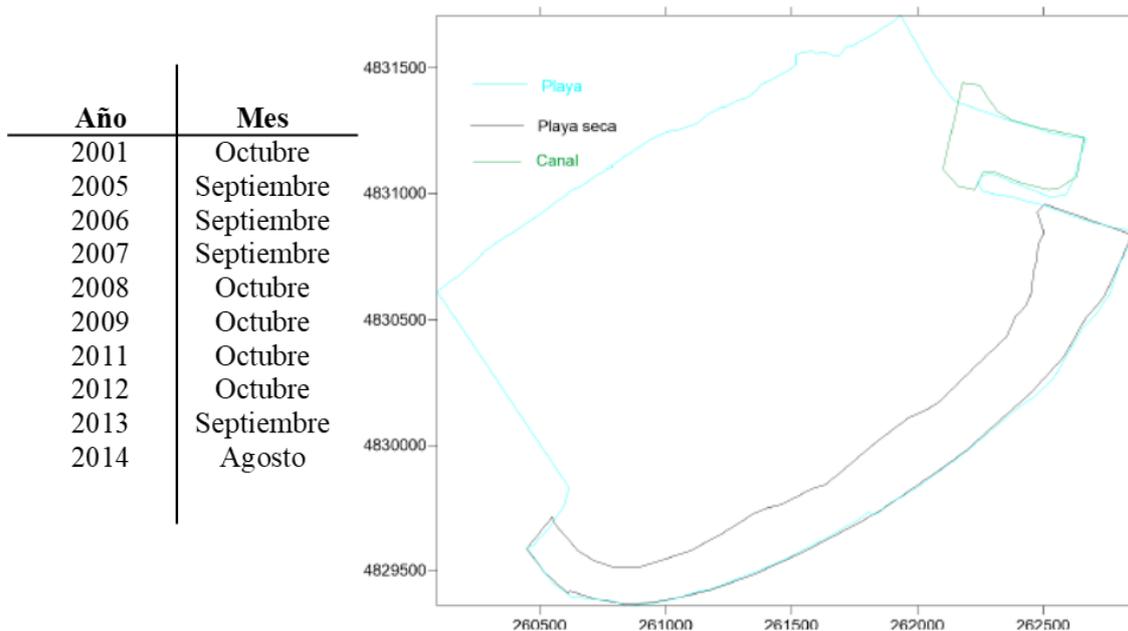


Figura 12. Campañas topo-batimétricas completas realizadas por CEDEX y área de control seleccionada por CEDEX para la estimación del balance sedimentario en las zonas de interés (CEDEX, 2015).

De las campañas realizadas se extraen los balances sedimentarios anuales netos en la playa desde 2005 hasta 2014, salvo 2009-2011 (tabla 3). Cabe destacar que todas las campañas se denominan octubre para simplificar, a pesar de que algunas fueran realizadas en septiembre o agosto.

La tabla muestra una gran variabilidad en el volumen de arena en la playa, que oscila entre $-4.000.000 \text{ m}^3$ (pérdidas) y aproximadamente $+270.000 \text{ m}^3$ (ganancias). Destacan los años en los que se registran las grandes pérdidas (2008-2009 y 2013-2014) debido a la alta frecuencia e intensidad de temporales en esos años: enero-marzo 2009 y febrero-marzo 2014, respectivamente. En la última fila se obtiene el balance total, resultado de la suma de volúmenes totales anuales en el periodo 2005-2014, dando como resultado una acreción positiva de 254.069 m^3 en el conjunto del sistema.

Tabla 3. Balance sedimentario obtenido a partir de los datos históricos. CEDEX (2015)

Batimetrías analizadas	Variación volumétrica de arena
Octubre 2005-2006	-57.557 m^3
Octubre 2006-2007	-91.899 m^3
Octubre 2007-2008	243.252 m^3
Octubre 2008-2009	-396.428 m^3
Octubre 2009-2011 ⁽¹⁾	266.400 m^3
Octubre 2011-2012	137.574 m^3
Octubre 2012-2013	251.947 m^3
Octubre 2013-2014	-99.220 m^3
Total Global 2005-2014	254.069 m^3

Por último, con el fin de comparar el balance sedimentario de la playa con la pérdida de arena de las dunas, en la siguiente tabla se muestra: en la columna de la izquierda el balance sedimentario de la playa con base en los datos del CEDEX (2015); mientras que en la derecha se recogen los balances correspondientes a las dunas (Tabla 1) obtenidos con base en los datos de INDUROT (2017).

Tabla 4. Balance sedimentario en playa y dunas obtenidos con base en los datos del CEDEX (2015) e INDUROT (2017), respectivamente.

Periodo de estudio	Balance playa (m³)	Balance dunas (m³)
2006-2009	-245.075	-30.528,96
2009-2011	266.400	-14.741,13
2011-2014	290.301	-287.405,76

A la vista de los resultados de esta comparación, se demuestra que:

- A pesar del continuo retroceso del frente dunar experimentado desde los años 80, el sistema completo presenta un balance neto positivo, lo que quiere decir que, una parte de la arena perdida de las dunas alimenta las cotas bajas del perfil de playa, pero hay un segundo aporte de gran volumen que entra en el sistema, confirmando la afirmación de que se trata de un sistema abierto.
- No se puede afirmar que existe una relación directa entre dragar y perder arena, ya que, se demuestra que hay años en que la APAV ha realizado dragados de gran volumen de arena y, sin embargo, el frente dunar se ha mantenido en el mismo nivel.

4 DINÁMICA MARINA

En el presente apartado se analizan las dinámicas marinas que en mayor medida gobiernan la costa frente a la playa de Salinas. En el ámbito de la dinámica costera se destacan dinámicas como el nivel del mar, el viento y el oleaje, entre otras. En este caso, se han considerado el nivel del mar y el oleaje (que incorpora viento) como las dinámicas gobernantes en el sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal.

4.1 NIVEL DEL MAR

El nivel del mar, definido como la posición media de la superficie libre del mar una vez filtradas las oscilaciones de onda corta y larga asociadas al oleaje, se puede descomponer en oscilaciones de onda larga asociadas al movimiento de los astros (Marea astronómica) y a los fenómenos atmosféricos (Marea meteorológica).

La serie de marea meteorológica disponible proporciona datos del nivel a escala horaria durante las últimas décadas. Los datos provienen de la base de datos GOS (Global Ocean Surges), realizada mediante el modelo ROMS (Regional Ocean Model System) desarrollado por Rutgers University (Shchepetkin and McWilliams, 2005), y calibrada

con los mareógrafos de la red REDMAR (Red de Mareógrafos de Puertos del Estado). La serie de marea astronómica proviene de la base de datos GOT (Global Ocean Tides), que utiliza el modelo global de mareas TPXO, desarrollado por la Universidad de Oregón (Egbert et al., 1994; Egbert y Erofeeva, 2002), y que asimila la información del nivel del mar derivada de las observaciones del sensor TOPEX/Poseidon. De esta información se extraen los resultados de la combinación de ambas oscilaciones, dando como resultado un único régimen de nivel del mar.

En la zona de estudio, se registra un nivel del mar en régimen macromareal, pues varía entre los -2.5 y 2.5 metros con respecto al nivel medio del mar, teniendo una carrera máxima de marea de 5 metros. El valor medio del nivel del mar es tiende a ser 0 metros, y el valor asociado a un periodo de retorno de 10 años es próximo a 2.45 metros.

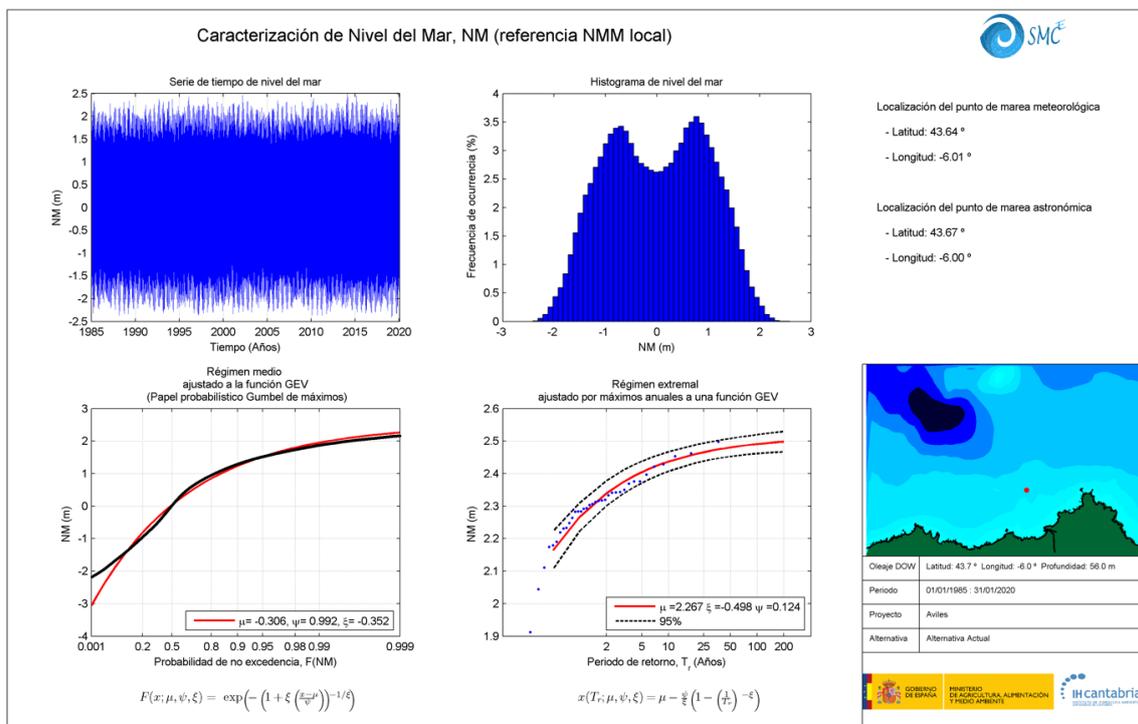


Figura 13. Caracterización estadística del nivel del mar en la zona de estudio (referidas al NMM del puerto de Avilés).

4.2 CLIMA MARÍTIMO EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

En este apartado, se describen las dinámicas del oleaje en profundidades indefinidas. De este análisis se extraen los patrones de oleaje y procesos de transformación que sufrirá en su aproximación a la costa.

4.2.1 DESCRIPCIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS DATOS

Para el análisis del clima marítimo en aguas profundas, se ha utilizado la base de datos de reanálisis ROW-Asturias (Reanalysis Ocean Waves), desarrollada por IHCantabria. Esta base de datos es un hindcast de oleaje que proporciona información histórica sobre

las condiciones del oleaje en la costa del Principado de Asturias desde 1985 hasta 2020, y se ha llevado a cabo mediante un proceso de downscaling dinámico a partir de un producto global GOW2 (Global Ocean Waves, Pérez et al., 2017) empleando el modelo numérico SWAN (Simulating WAVes Nearshore).

En particular, ROW- Asturias utiliza como datos de oleaje offshore en los contornos los espectros de frecuencias-direcciones de la citada base de datos GOW2. Estos espectros han sido validados y corregidos utilizando como referencia datos altimétricos multi-misión de satélite. Los forzamientos utilizados en el dominio son los campos de viento del hindcast atmosférico SeaWind-Cantábrico, que es un downscaling realizado con el modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting) alimentado con los datos de reanálisis global CFSR (Climate Forecast System Reanalysis). Además, para su generación se han tenido en cuenta las variaciones del nivel del mar debidas a la marea astronómica y a la marea meteorológica.

Como resultado, se cuenta con una base de datos de alta resolución, que proporciona información horaria a una resolución de 1 km a lo largo de toda la costa, entre 1985-2020, de altura de ola significativa, el periodo de pico, la dirección del oleaje, entre otros. Estos datos de la base de datos ROW-Asturias fueron calibrados y validados por medio de medidas instrumentales in-situ provenientes de las boyas Puertos del Estado (REDEXT y REDCOS). La validación fue realizada en diferentes ubicaciones, como la boya de Cabo de Peñas y Gijón II, mediante gráficos que representan los percentiles de las alturas de ola (H_s) en diversos rangos.

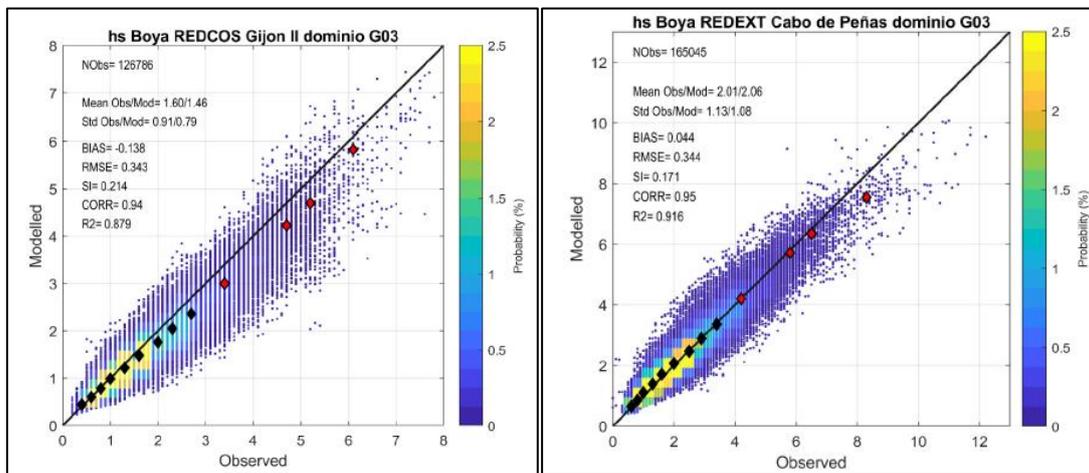


Figura 14. Gráficos de dispersión para la comparación de los datos instrumentales de H_s de las boyas “Gijón II” (izquierda) y “Cabo de Peñas” (derecha), con los datos del hindcast en la malla G03. Fuente: IHCantabria.

Para el análisis del clima marítimo en la zona de estudio, se ha seleccionado el punto específico ROW-Asturias ubicado en las coordenadas 43.66° de latitud Norte y 5.99° de longitud Oeste para llevar a cabo el estudio.

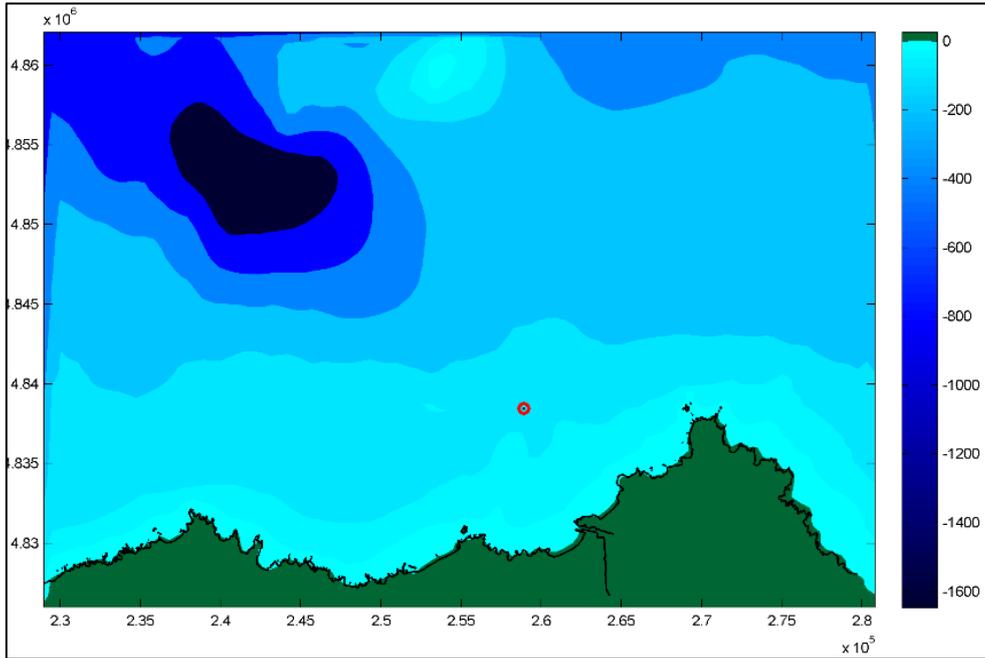


Figura 15. Localización del punto ROW utilizado para el estudio. Fuente: IHCantabria.

4.2.2 OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS

Los resultados de la caracterización del régimen medio del oleaje en el punto ROW revelan un oleaje energético, con una altura de ola promedio en torno a 1.66 m y alcanzan los 4 metros de altura solo el 5% de las ocasiones. El oleaje proviene principalmente de los cuadrantes NW-N y N-NE. Sin embargo, el oleaje de mayor probabilidad (82.18%) e intensidad, y a su vez de mayor interés para este trabajo, es el oleaje proveniente del último cuadrante (WNW-NW-NNW).

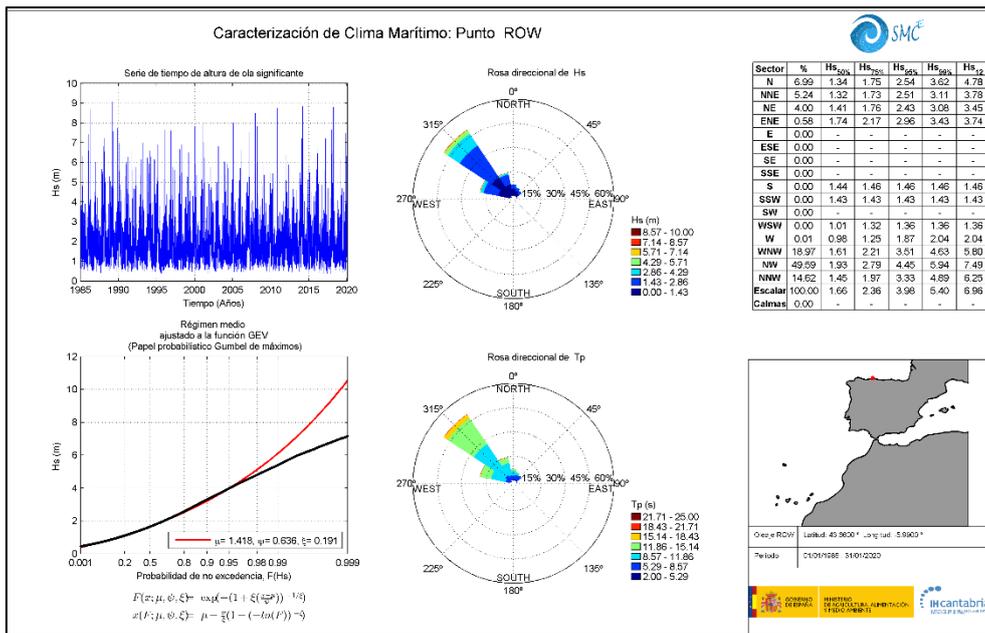


Figura 16. Caracterización estadística del punto ROW-Asturias seleccionado.

Se observan diferencias estacionales en el oleaje principalmente entre la época estival y el resto del año. Fuera de la época estival, es decir, entre los meses de septiembre y mayo, el oleaje es más intenso y se caracteriza por una mayor componente NW. Esta intensidad se ve reducida durante los meses de verano (junio-julio-agosto), llegando a registrar valores máximos de altura de ola por debajo de los 5 metros.

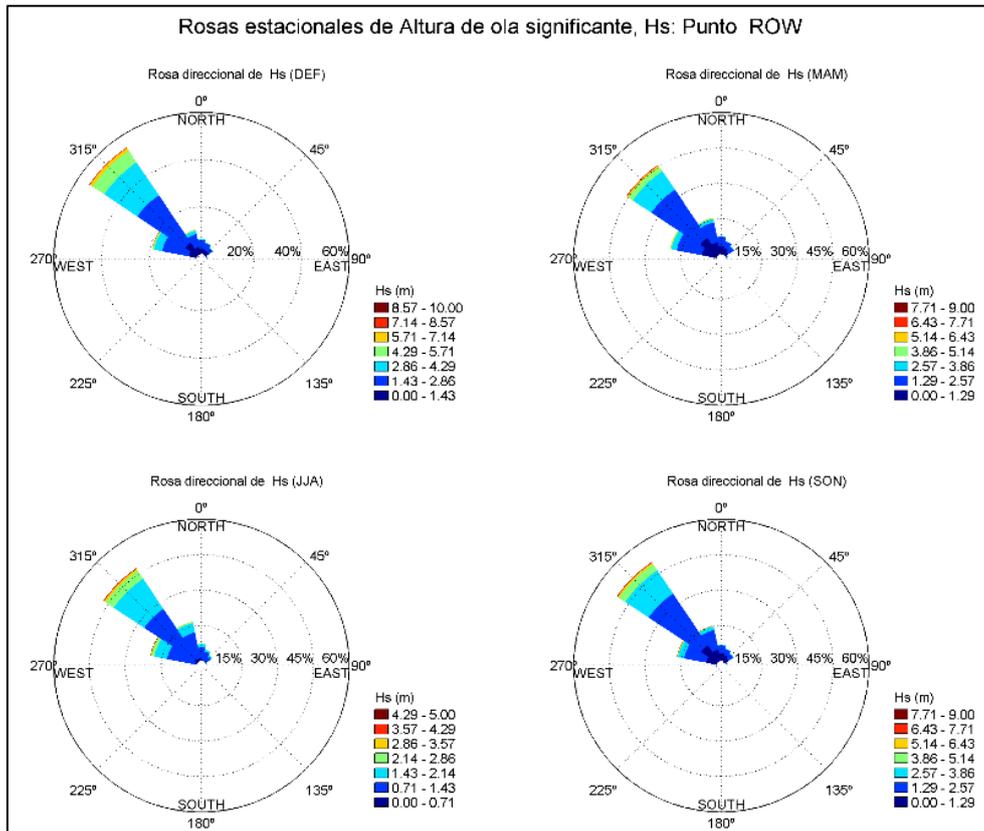


Figura 17. Rosa de oleaje de altura de ola significativa diferenciando entre los meses de invierno (diciembre-febrero), primavera (marzo-mayo), verano (junio-agosto) y otoño (septiembre-noviembre).

Para determinar el régimen extremal de la altura de ola significativa, se seleccionaron las alturas superiores a un umbral de 4 metros utilizando la técnica POT (Peak Over Threshold). Posteriormente, se ajustaron los datos a la función distribución Pareto-Poisson. Los resultados mostraron que una altura de ola de 8.83 metros, registrada durante los temporales que impactaron la costa en 2014, tiene un periodo de retorno superior a aproximadamente 15 años.

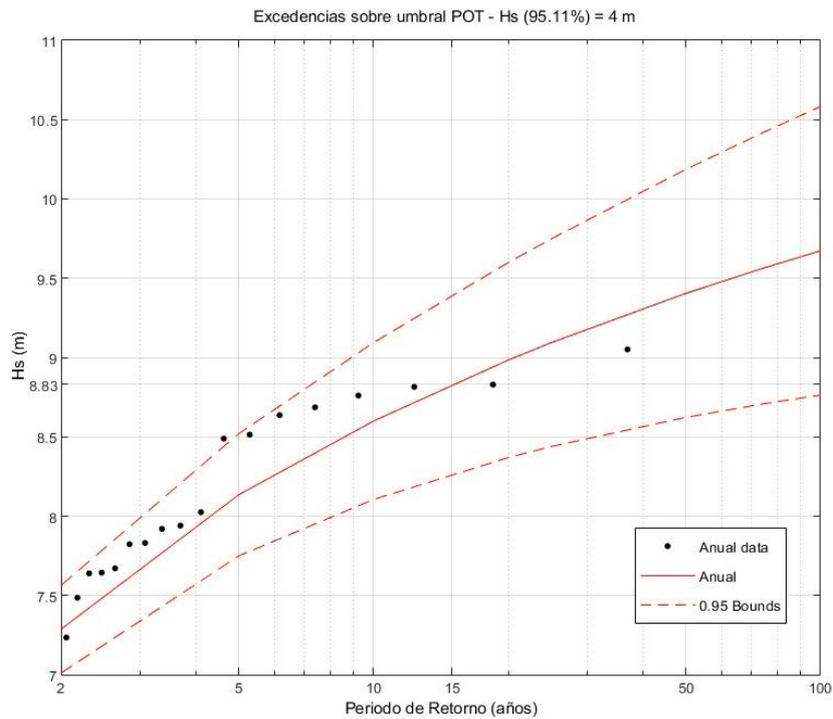


Figura 18. Régimen extremal de altura de ola significativa.

4.3 CLIMA MARÍTIMO EN PROFUNDIDADES REDUCIDAS

Una vez analizado el oleaje en aguas profundas se puede llevar a cabo la caracterización del oleaje cuando alcanza la zona de estudio. En el siguiente apartado se exponen las tareas realizadas para caracterizar el clima marítimo en la costa. El procedimiento ha consistido en propagar el oleaje desde aguas profundas hasta la zona de aguas reducidas donde se quieran conocer las condiciones del oleaje incidente, dando como resultado dos tipos de análisis:

- Un diagnóstico general que permite entender los patrones del oleaje tanto en condiciones medias como extremas.
- Un estudio en detalle que permite reconstruir la serie completa del oleaje en los puntos de control cercanos a la zona de estudio (playa) y poder caracterizar estadísticamente las dinámicas que actúan en dicha costa, así como su estado modal.

4.3.1 METODOLOGÍA DE PROPAGACIÓN DEL OLAJE

El procedimiento seguido comienza con la caracterización del oleaje en aguas profundas del que se extrae una lista de los oleajes más representativos bajo condiciones medias (Hs50) y extremas (Hs12). En este estudio, se utilizaron los resultados de la tabla de probabilidad de ocurrencia, obtenida en la figura 16, para identificar los oleajes más probables de todo el abanico de direcciones disponible. En la siguiente tabla se muestran los oleajes seleccionados para este estudio, que se resume en oleajes de componentes WNW-NNW y N-NE:

Tabla 5. Tabla de probabilidad de ocurrencia de oleajes, según su dirección de incidencia. Columna “Hs50”: régimen medio de altura de ola significativa (prtil. 50%). Columna “Hs12”: régimen extremal de altura de ola significativa (prtil. 99.8%).

Direcciones	Probabilidad	Hs50	Hs12
N (348.75° - 11.25°)	7%	1.34	4.79
NNE (11.25° - 33.75°)	5%	1.32	3.78
NE (33.75° - 56.25°)	4%	1.41	3.45
ENE (56.25° - 78.75°)	1%	1.74	3.74
W (258.75° - 281.25°)	0%	0.98	2.04
WNW (281.25° - 303.75°)	19%	1.61	5.80
NW (303.75° - 326.25°)	50%	1.93	7.49
NNW (326.25° - 348.75°)	15%	1.45	6.25

Para realizar las tareas de propagación del oleaje hasta la costa, se ha utilizado el Modelo de Propagación de Oleaje y Corrientes (OLUCA) incluido en el Sistema de Modelado Costero (SMC, Quetzalcóatl et al., 2019), el cual ha sido desarrollado inicialmente en la Universidad de Delaware, U.S.A. y mejorado posteriormente entre miembros de la citada Universidad y del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

Dicho modelo es capaz de simular procesos de transformación del oleaje como la refracción, asomeramiento, o la disipación de energía por fondo, para oleaje monocromático y espectral, resolviendo la forma parabólica de la ecuación de pendiente suave (Mild Slope). Además, incorpora modelos de propagación no lineales, simulación de capa límite turbulenta o laminar, la rugosidad del fondo, entre otros factores.

Con los datos y el modelo disponibles, se procede a describir los estudios realizados:

En primer lugar, se realiza el diagnóstico preliminar, descrito en el apartado 4.3.2, que permite verificar la eficacia del modelo, así como analizar los patrones generales del oleaje en su llegada a la zona de estudio:

1. Diseño de las mallas de propagación sobre la batimetría. Estas mallas deben colocarse con una orientación que mantenga la relación un ángulo no superior a $\pm 42^\circ$ respecto a la dirección de propagación del oleaje.

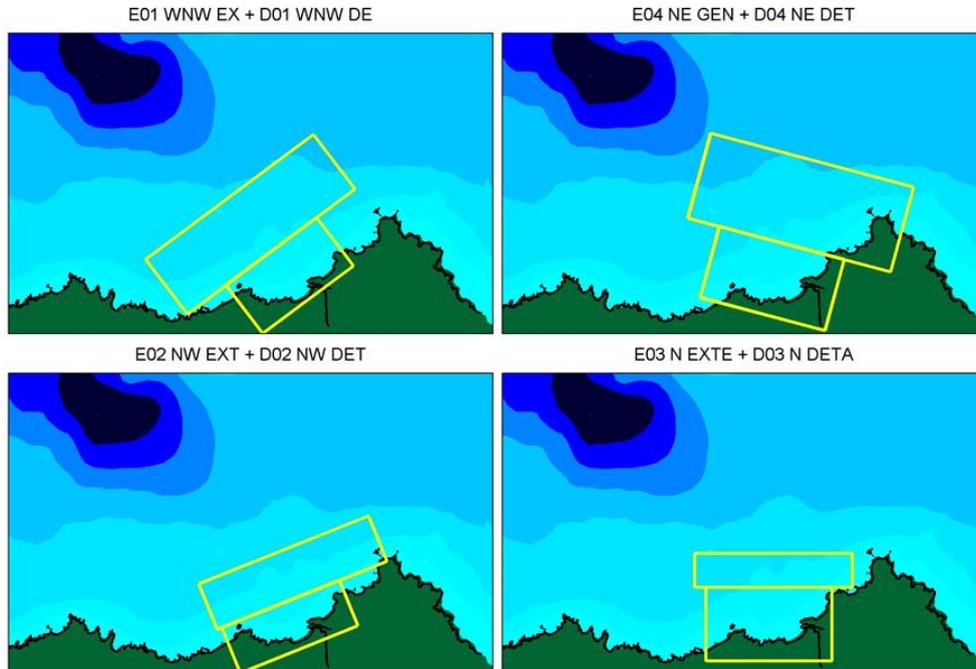


Figura 19. Mallas empleadas en la propagación del oleaje a la zona de estudio.

2. Propagación de los casos representativos (seleccionados de la tabla de probabilidad de ocurrencia del oleaje) y representación espacial y estadística del oleaje y las corrientes generadas en la zona de estudio, para analizar si tenían sentido los resultados.

Como se aprecia en la siguiente figura, la altura significativa de ola varía entre las condiciones medias, que no superan los 2 metros de ola en ninguno de los casos, y las condiciones de temporal que llegan a superar los 5 metros de altura de ola antes de llegar a la costa. Respecto al periodo de pico, se han obtenido los valores asociados a cada oleaje, en base a un ajuste exponencial (H_s-T_p).

Por último, los parámetros σ (espectro de direcciones) y Υ (espectro de frecuencias) de caracterización de la forma del espectro bidimensional se han definido en base las condiciones del oleaje, diferenciando entre un oleaje de tipo “SEA” con valores de dispersión de $\sigma = 15$ y $\Upsilon = 3.3$, y un oleaje de tipo “SWELL” con valores de dispersión de $\sigma = 10$ y $\Upsilon = 10$.

Tabla 6. Casos seleccionados para su propagación y el diagnóstico preliminar.

Dirección de incidencia	OLEAJE MEDIO (H_{s50})				OLEAJE DE TEMPORAL (H_{s12})			
	H_s (m)	T_p (s)	Υ	σ	H_s (m)	T_p (s)	Υ	σ
N	1.30	8	3.3	15	4.80	13	10	10
NNE	1.30	8	3.3	15	3.80	12	10	10
NE	1.40	8	3.3	15	3.50	12	10	10
WNW	1.60	9	3.3	15	5.80	14	10	10
NW	1.90	9	3.3	15	7.50	15	10	10
NNW	1.50	9	3.3	15	6.20	14	10	10

En segundo lugar, una vez verificada la viabilidad del modelo OLUCA para este caso de estudio, así como obtenida la visión general de los patrones de oleajes más probables, se procedió a realizar la propagación y reconstrucción del oleaje en los puntos de control en la costa. Los resultados se presentan en el apartado 4.3.3., y servirán posteriormente en el análisis de la estabilidad de la playa y su posible evolución bajo las diferentes alternativas propuestas. Este proceso ha consistido en los siguientes pasos:

1. Definición del número y orientación de las mallas que permitan simular todo el abanico de direcciones del oleaje en estudio. Finalmente se utilizaron las mallas mostradas anteriormente.
2. Selección de 100 casos de oleaje espectral para tres situaciones de marea: pleamar, media y bajamar, con el objetivo de propagar y reconstruir en la costa los cerca de 300.000 estados de mar disponibles en el punto ROW. Estos casos fueron seleccionados mediante la técnica de clasificación y selección MaxDiss (Camus et al., 2011), que permite elegir un conjunto representativo de estados de mar en aguas profundas y aplicarlos a la zona costera. Los casos seleccionados son simulados como oleajes espectrales tipo TMA (Bouws et al, 1985), al que se le aplica la función de dispersión angular propuesta por Borgman (1984).

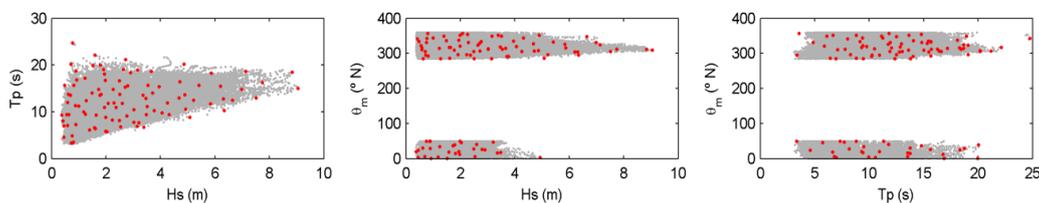


Figura 20. Selección de casos (100) mediante la técnica MaxDiss (Camus et al., 2011).

3. Reconstrucción de la serie temporal del oleaje propagado en los siguientes puntos de control dentro del sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal:

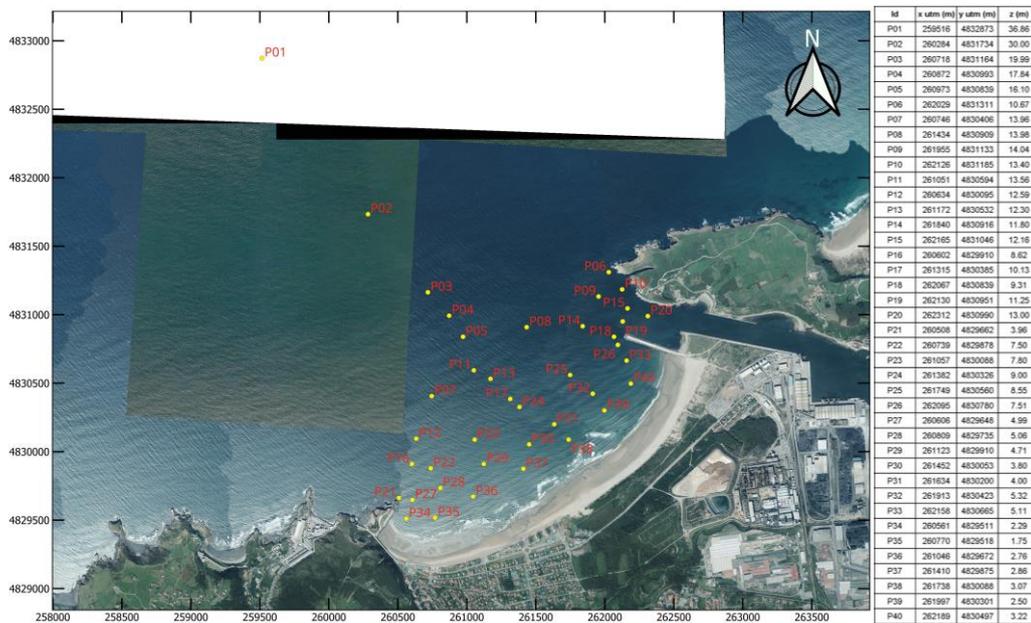


Figura 21. Localización de los puntos de control para la reconstrucción del oleaje en aguas reducidas.

4.3.2 OLEAJE EN LA PLAYA (DIAGNÓSTICO PRELIMINAR)

En primer lugar, se analizan los resultados de la propagación del oleaje más representativo en la zona (en condiciones medias y de temporal), dadas las condiciones batimétricas originales con fecha septiembre de 2013. Los gráficos cuentan con una escala de colores que indica la magnitud de la altura de ola significativa (H_s), y flechas que indican la dirección de procedencia y el tamaño (magnitud) del oleaje:

Oleaje de direcciones NE y NNE: debido a los efectos de la refracción y difracción en diferentes puntos de la costa oriental, el oleaje reduce su intensidad en su llegada a la playa hasta 1 metro de altura en condiciones medias, y hasta los 3 metros de altura máxima en la playa, en condiciones de temporal.

Estos efectos se aprecian se magnifican en el caso de un oleaje de componente NE, en el que se genera una zona de sombra que abarca toda la zona exterior de la playa de Salinas, y que se intensifica tras su paso por la Punta de la Forcada y el espigón. Ambos salientes actúan como punto de difracción y generan gradientes de altura de ola entre el tramo centro-occidental y el tramo oriental. En condiciones de temporal el efecto del fondo se nota a mayor profundidad, causando además zonas de gradientes de altura de ola en la playa debidas a la difracción de los bajos ubicados frente a la costa, las cuales serán motivo de generación de circuitos de corrientes a lo largo de la playa.

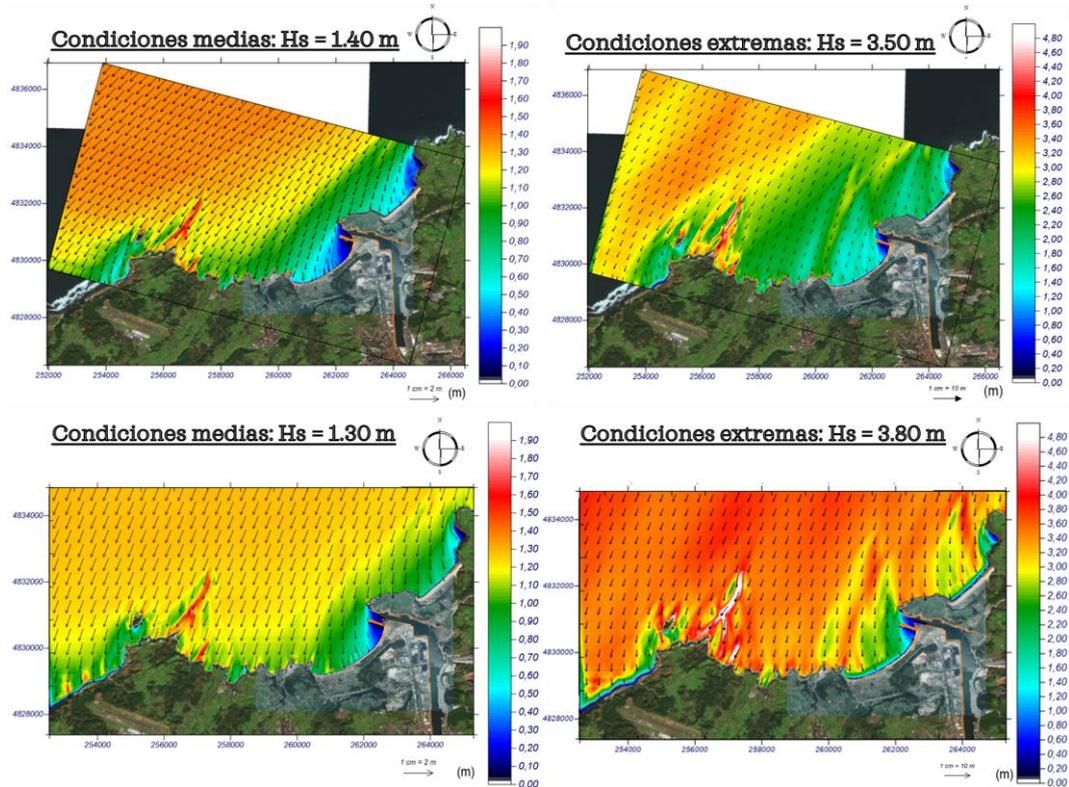


Figura 22. Gráfico de magnitud (H_s) y vectores de oleajes medio y temporal, de componente NE (figuras superiores) y NNE (figuras inferiores).

Oleaje de dirección N y NNW: A medida que se orienta hacia el cuarto cuadrante, el oleaje sufre en menor medida los efectos de la refracción en su llegada a la playa de Salinas. El oleaje de componente Norte, de menor intensidad que los del Oeste, supera los 5 metros de altura de ola en zonas de concentración del oleaje causadas por la difracción en los bajos frente a la playa. El oleaje NNW supera estas alturas de ola en las zonas de concentración del oleaje en el centro de la playa, superando los 6 metros. El efecto de difracción en Punta Forcada, amplificado en condiciones medias, se reduce al extremo oriental. El oleaje de temporal alcanza la costa con mayor intensidad, donde rompe (zona de rotura) en un punto cercano a los 10 metros de profundidad.

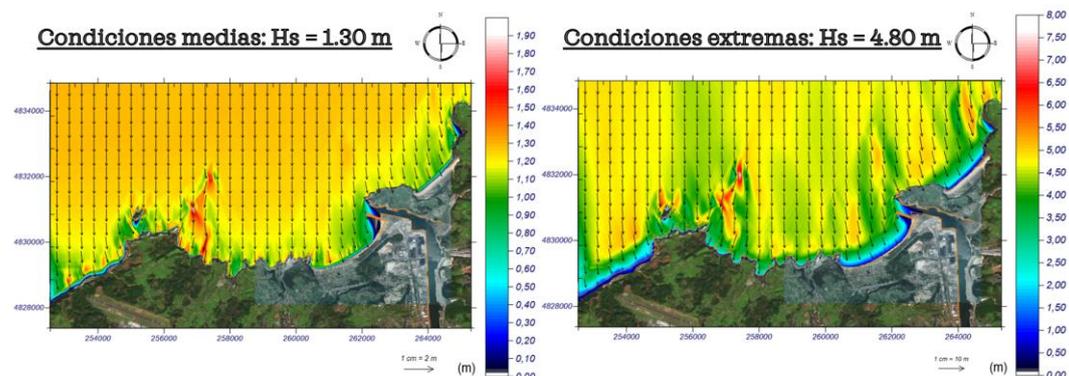


Figura 23. Gráfico de magnitud (H_s) y vectores de oleajes medios y temporal, de componente N.

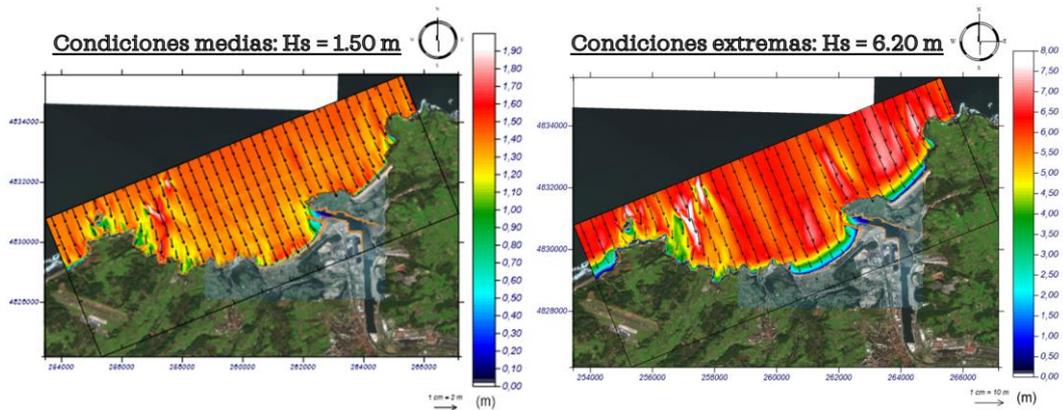


Figura 24. Gráfico de magnitud (H_s) y vectores de oleajes medios y temporal, de componente NNW.

Oleaje de dirección NW y WNW: El oleaje de dirección WNW incide prácticamente normal a la playa, llegando a la costa con magnitudes similares salvo el extremo occidental, que se ve influenciado la difracción en los bajos el Petón y Aguín. Esta condición hace que la altura de ola sea menor que en el resto de playa. El oleaje bajo condiciones extremas alcanza la costa con mayor intensidad, donde rompe (zona de rotura) en un punto entre los 10-15 metros de profundidad.

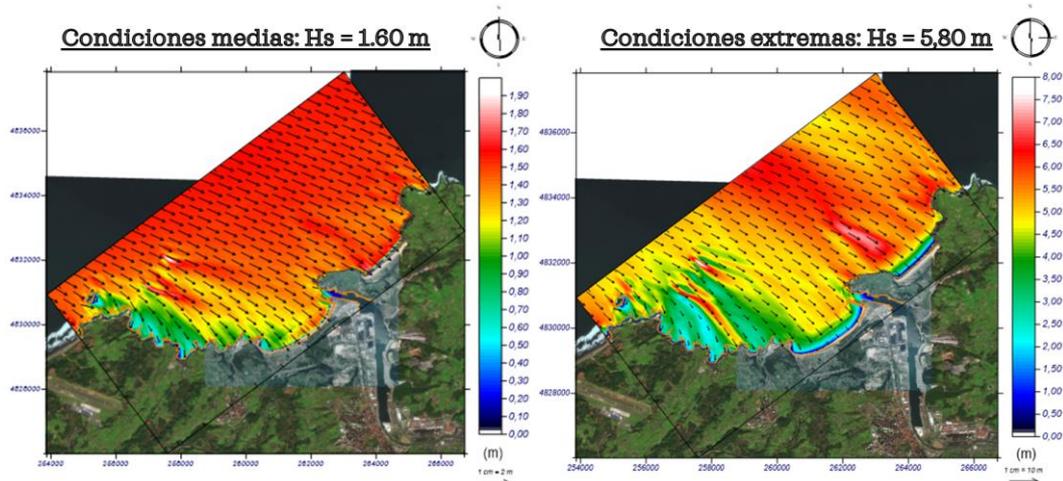


Figura 25. Gráfico de magnitud (H_s) y vectores de oleajes medios y temporal, de componente WNW.

El oleaje de dirección NW también incide perpendicular a la playa, y alcanza la zona exterior de la playa con alturas de ola similares a las generadas. En esta dirección los efectos de difracción generados por los bajos son menos visibles, aunque similares, pues causan concentraciones de altura de ola en la zona central y occidental de la playa.

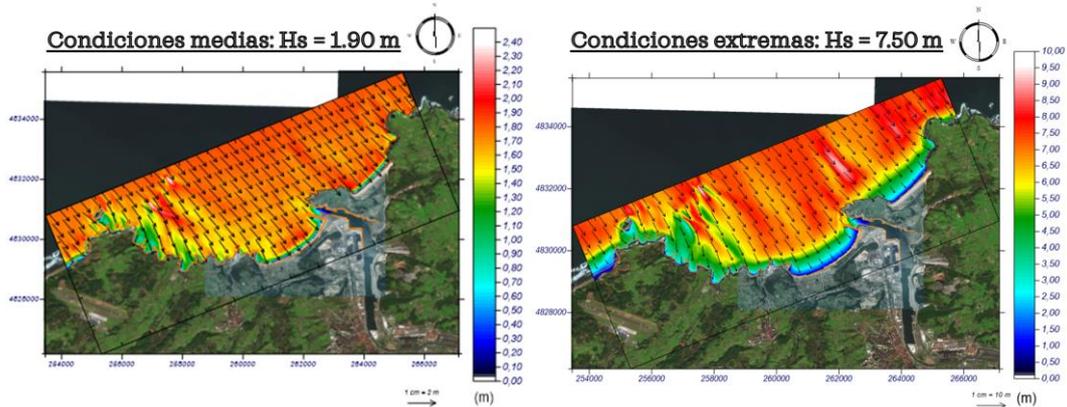


Figura 26. Gráfico de magnitud (H_s) y vectores de oleajes medios y temporal de componente NW en pleamar.

A modo de ejemplo, en las siguientes figuras se muestra la simulación del oleaje típico de componente NW en situación de bajamar. Las consecuencias de reducir hasta 5 metros el calado disponible (máxima bajamar) es una transformación del oleaje más acusada por el aumento del efecto de los bajos (difracción) y el desplazamiento hacia el exterior (más cerca de la punta del espigón) de la zona de rotura, tanto en condiciones medias como en condiciones de temporal.

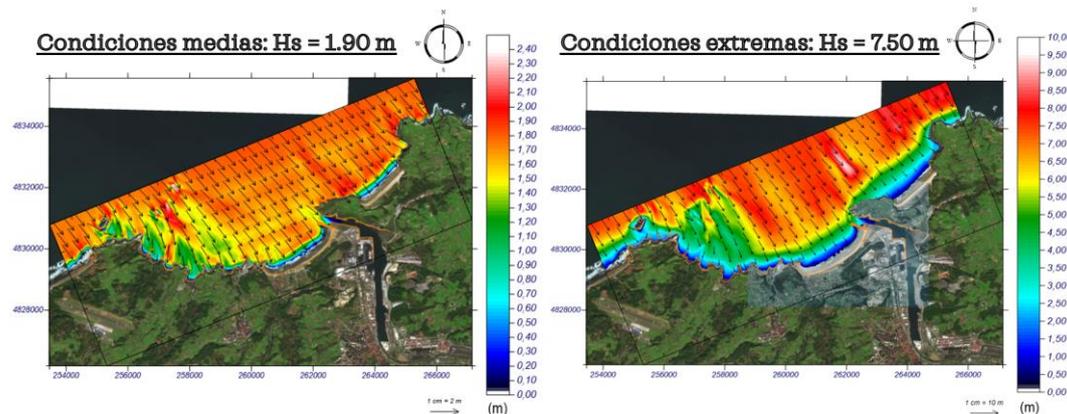


Figura 27. Gráfico de magnitud (H_s) y vectores de oleajes medios y temporal de componente NW en bajamar.

En resumen, las dinámicas que gobiernan la zona de estudio (marea y oleaje) están condicionadas, a su vez, por la morfología de la costa. Los oleajes de mayor intensidad, de componente NW, inciden perpendiculares a la playa y mantienen prácticamente las mismas condiciones que en aguas profundas, salvo en determinados puntos donde se concentra el oleaje y aumenta la altura de ola. Los oleajes de componente N y NE tienen un menor impacto en la playa tanto por su condición inicial, de menor magnitud, como por su orientación y la presencia de obstáculos (punta de la Forcada y espigón) que protegen parcial o totalmente a la playa, generando gradientes de altura de ola entre el extremo occidental, y el oriental.

4.3.3 RECONSTRUCCIÓN DEL OLEAJE EN LOS PUNTOS DE CONTROL

En segundo lugar, con objeto de caracterizar de forma detallada el clima marítimo en la zona de estudio, se ha reconstruido la serie temporal completa del oleaje en varios puntos de control cercanos a la playa, mediante la técnica propuesta en Camus et al. (2011).

De los 40 puntos de control (mostrados en la figura 21), se analiza en detalle los resultados en ciertas zonas de interés para este trabajo, pues van a servir para analizar los cambios en la estabilidad de la playa bajo las diferentes situaciones (prolongaciones) propuestas. Los puntos de interés se localizan a ambos extremos de la playa y la zona central.

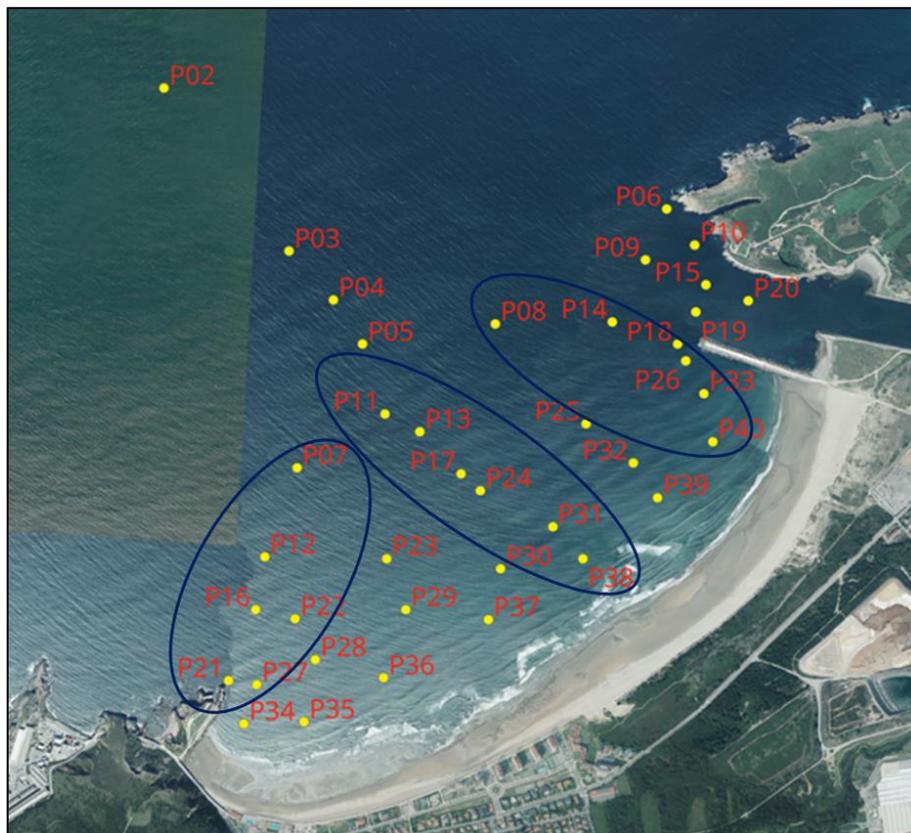


Figura 28. Localización de los puntos de control.

El clima marítimo en la costa de estudio se compone principalmente de un oleaje del cuarto cuadrante (WNW-N) y en mucha menor proporción del primer cuadrante (N-NE). En la siguiente figura se pueden comparar las condiciones del clima marítimo en la zona más alejada de la playa (a 13 metros de profundidad), frente a la zona más cercana a la orilla (a 3 metros de profundidad):

- En los puntos más alejados de la playa (p.ej. P07, P08 y P11) se aprecia una disminución del abanico de direcciones frente al oleaje en aguas profundas, y una mayor predominancia del oleaje de componente WNW-NW (85%). En esta zona, el régimen medio de altura de ola es cercano a los 1.2 m en condiciones medias y de 6.3 metros en condiciones de temporal.

- Sin embargo, a medida que nos acercamos a la playa (p.ej. P36, P38 y P40), el abanico de direcciones se va cerrando y limitando a oleajes del NW hasta el NNE. En estos puntos cercanos a la playa, disminuye la componente NE pues la playa queda protegida por la Punta de la Forcada y el espigón de la ría de Avilés, por lo que aumenta la probabilidad de ocurrencia de direcciones del cuatro cuadrante (>90%). En términos de régimen medio, como consecuencia del efecto del fondo, la altura de ola del oleaje medio aumenta levemente, hasta los 1.3 metros. Por el contrario, en condiciones de temporal, la altura de ola en esta zona disminuye drásticamente debido a los procesos de rotura y disipación del oleaje, reduciendo a alturas máximas de 3 metros.

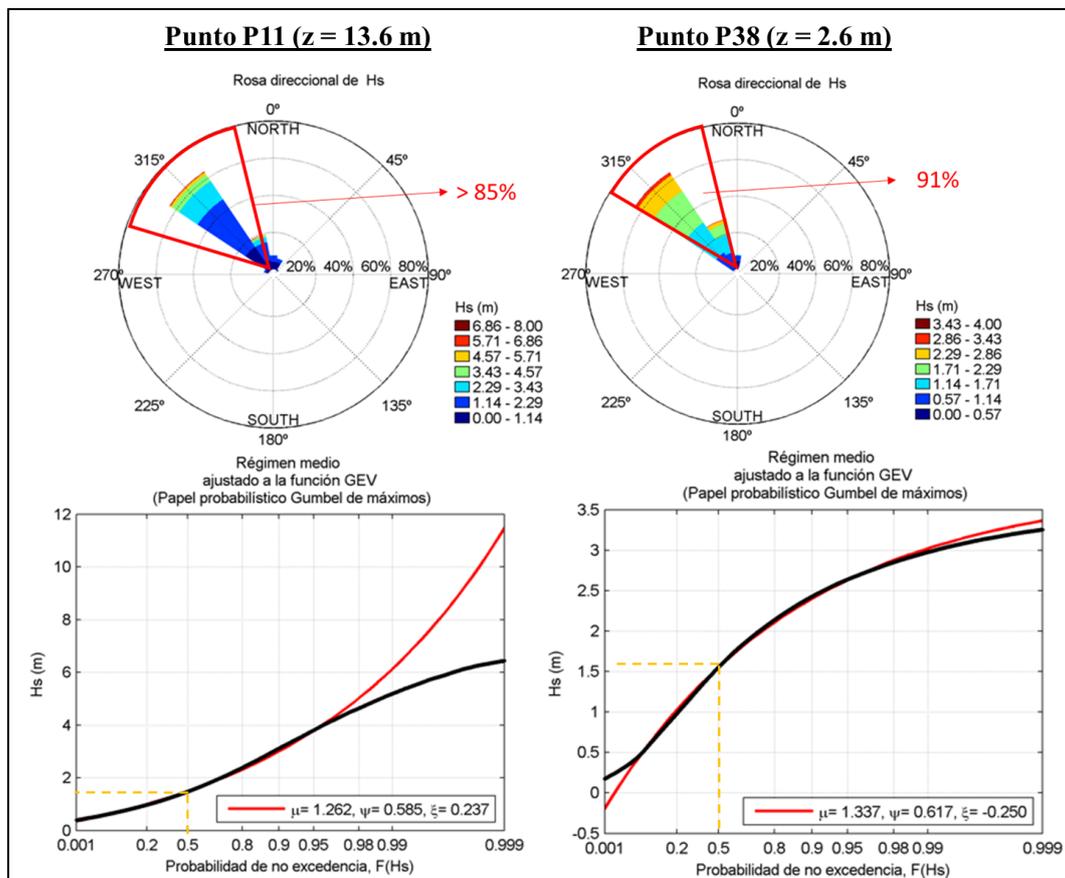


Figura 29. Caracterización del clima marítimo en dos puntos de control de la zona de estudio. Punto P11 (izquierda) y punto P38 (derecha).

La reconstrucción del oleaje en los puntos de control nos permite conocer las condiciones medias energéticas y direccionales del oleaje. Esta información servirá posteriormente para determinar la forma en planta de una playa, la cual tiende a ubicarse en una posición media o de equilibrio con las condiciones medias energéticas del oleaje.

Esta condición se define mediante el Flujo Medio Anual de Energía \vec{F}_m a lo largo de la playa. El vector flujo de energía en un punto $\vec{F}_m = F_x \vec{i} + F_y \vec{j}$ está asociado a un determinado oleaje, tiene como dirección la correspondiente al vector número de onda

(que coincide con la dirección del oleaje) y como magnitud $\frac{1}{8} \rho g H^2 C_g$. Donde C_g es la celeridad de grupo, H la altura de ola.

El vector Flujo Medio Anual de Energía es el vector suma de los flujos de energía de todos los oleajes en un año. Así, si en cada hora del año existe un flujo de energía $F_x \vec{i} + F_y \vec{j}$, el flujo medio de energía se define como:

$$\vec{F}_m = \frac{1}{8760} \left(\sum_{t=1h}^{8760} F_{x,t} \vec{i} + \sum_{t=1h}^{8760} F_{y,t} \vec{j} \right)$$

$$\vec{F}_m = \overline{F_x} \vec{i} + \overline{F_y} \vec{j}, \quad \text{donde la dirección del FME es: } \theta_m = \arctan \left(\frac{\overline{F_y}}{\overline{F_x}} \right)$$

El procedimiento que se ha seguido para obtener la dirección del Flujo Medio Anual de Energía ha sido el siguiente:

- Selección, propagación y reconstrucción del oleaje en los puntos de control.
- Obtención de los coeficientes de propagación y de los flujos de energía asociados a cada estado de mar de la muestra.
- Cálculo vectorial de la dirección del flujo medio de energía anual.

Los resultados de la dirección del flujo medio anual de energía (FME) calculado en cada punto de control (los 40 analizados) se pueden visualizar en la siguiente figura. Estos resultados corresponden con la configuración batimétrica de la playa actual (septiembre de 2013).

Se observa una clara exposición al oleaje del NW, abarcando un rango entre los 300° o N60W (p.ej. P10 y P20, protegidos por Punta de la Forcada) y los 350° o N10W (p. ej. P34, protegido por Punta la Peñona).

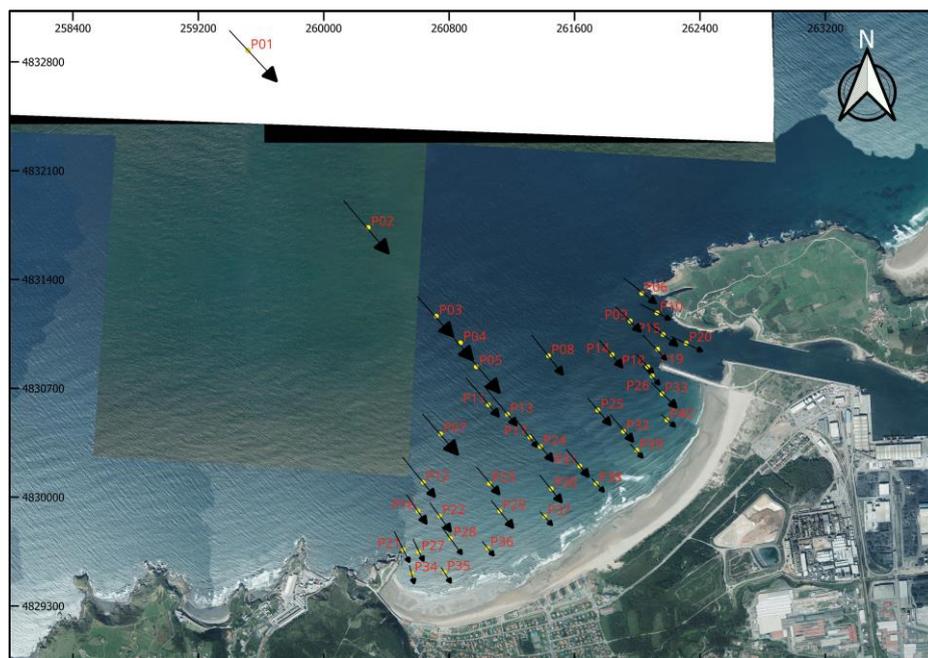


Figura 30. Mapa de la dirección del Flujo Medio Anual de Energía (FME) en los puntos de control

En la siguiente tabla se muestra el valor, en grados, de la dirección exacta del Flujo Medio Anual de Energía en cada punto. Esta información será utilizada en el diseño de playas para definir la línea de dirección media de energía del oleaje (orientación del frente) en el punto de difracción. Si analizamos las zonas de interés, se observan los siguientes comportamientos:

- En el extremo oriental de la playa junto al espigón de la ría de Avilés, se localizan los puntos de control marcados **en rojo**. En esta zona se estima un FME de 321.7° (N38W) para los puntos más próximos a la punta del espigón, P18 y P26. A medida que se aleja de la punta del espigón, el FME gira en sentido horario hasta alcanzar los 322.11 ° y 322.74° (N37W) en los puntos P14 y P8, respectivamente.
- En el extremo occidental de la playa junto a punta Peñona, el FME tiene una influencia mayor del primer cuadrante. Tal y como se observa en los puntos marcados **en verde**, el FME en esta zona va girando en sentido horario a medida que se aleja de la punta, siendo de 338° (N22W) en los puntos P21 y P27, y de 328° (N32W) en zonas más alejadas y por lo tanto menos afectadas por los bajos de la punta, concretamente los puntos P16 y P22.
- En la zona central de la playa, se mantiene un mismo FME promediado en 322°, es decir N38W.

Punto	Id	Lat (°)	Lon (°)	x utm (m)	y utm (m)	z (m)	θ _{FME} (°)
1	P01	43.6100	-5.9800	259516	4832873	36.86	318.00
2	P02	43.6000	-5.9700	260284	4831734	30.00	319.68
3	P03	43.5950	-5.9644	260718	4831164	19.99	318.96
4	P04	43.5935	-5.9624	260872	4830993	17.84	320.51
5	P05	43.5922	-5.9611	260973	4830839	16.10	321.10
6	P06	43.5968	-5.9482	262029	4831311	10.67	314.35
7	P07	43.5882	-5.9637	260746	4830406	13.96	321.21
8	P08	43.5930	-5.9554	261434	4830909	13.98	322.74
9	P09	43.5951	-5.9491	261955	4831133	14.04	317.81
10	P10	43.5957	-5.9470	262126	4831185	13.39	302.65
11	P11	43.5900	-5.9600	261051	4830594	13.56	321.31
12	P12	43.5854	-5.9649	260634	4830095	12.59	323.08
13	P13	43.5895	-5.9585	261172	4830532	12.30	321.85
14	P14	43.5931	-5.9504	261840	4830916	11.80	322.11
15	P15	43.5944	-5.9464	262165	4831046	12.16	312.56
16	P16	43.5837	-5.9652	260602	4829910	8.63	329.04
17	P17	43.5882	-5.9566	261315	4830385	10.13	322.70
18	P18	43.5925	-5.9475	262067	4830839	9.31	321.01
19	P19	43.5936	-5.9468	262130	4830951	11.39	318.64
20	P20	43.5940	-5.9446	262312	4830990	13.00	304.12

Punto	Id	Lat (°)	Lon (°)	x utm (m)	y utm (m)	z (m)	θ _{FME} (°)
21	P21	43.5814	-5.9663	260508	4829662	3.96	337.29
22	P22	43.5835	-5.9635	260739	4829878	7.50	327.29
23	P23	43.5854	-5.9597	261057	4830088	7.80	322.73
24	P24	43.5877	-5.9558	261382	4830326	9.00	322.79
25	P25	43.5899	-5.9514	261749	4830560	8.55	322.12
26	P26	43.5920	-5.9472	262095	4830780	7.51	322.44
27	P27	43.5813	-5.9651	260606	4829648	4.99	339.44
28	P28	43.5822	-5.9626	260809	4829735	5.06	327.96
29	P29	43.5839	-5.9588	261123	4829910	4.71	324.48
30	P30	43.5853	-5.9548	261452	4830053	3.80	323.72
31	P31	43.5866	-5.9526	261634	4830200	4.00	323.68
32	P32	43.5887	-5.9493	261913	4830423	5.32	322.50
33	P33	43.5910	-5.9463	262158	4830665	5.11	316.99
34	P34	43.5801	-5.9656	260561	4829511	2.29	351.17
35	P35	43.5802	-5.9630	260770	4829518	1.74	334.08
36	P36	43.5817	-5.9597	261046	4829672	2.76	327.20
37	P37	43.5836	-5.9552	261410	4829875	2.86	323.89
38	P38	43.5857	-5.9513	261738	4830088	3.07	323.36
39	P39	43.5877	-5.9482	261997	4830301	2.50	323.25
40	P40	43.5895	-5.9459	262189	4830497	3.22	317.87

Figura 31. Resultados de la dirección del Flujo Medio Anual de Energía (FME) en los puntos de control.

Cabe señalar que el flujo de energía varía de un año a otro, por lo tanto, es necesario analizar si existen variaciones tanto en magnitud como en dirección debidas a las dinámicas actuantes cada año.

A modo de ejemplo, se muestra la evolución el oleaje en el punto P08. Como se aprecia en la siguiente figura la magnitud del flujo de energía anual (panel superior) varía en torno al valor medio ($54.000 \text{ j s}^{-1}\text{m}^{-1}$), con una variación de aproximadamente $40.000 \text{ j s}^{-1}\text{m}^{-1}$ (variación entre $37.000 \text{ j s}^{-1}\text{m}^{-1}$ y $77.000 \text{ j s}^{-1}\text{m}^{-1}$). En cuanto a la dirección (panel inferior), se

observan variaciones en promedio de 2 grados en torno al valor medio N37.3W, a excepción del año 2005, donde se registra un año anormal de componente N34.3W.

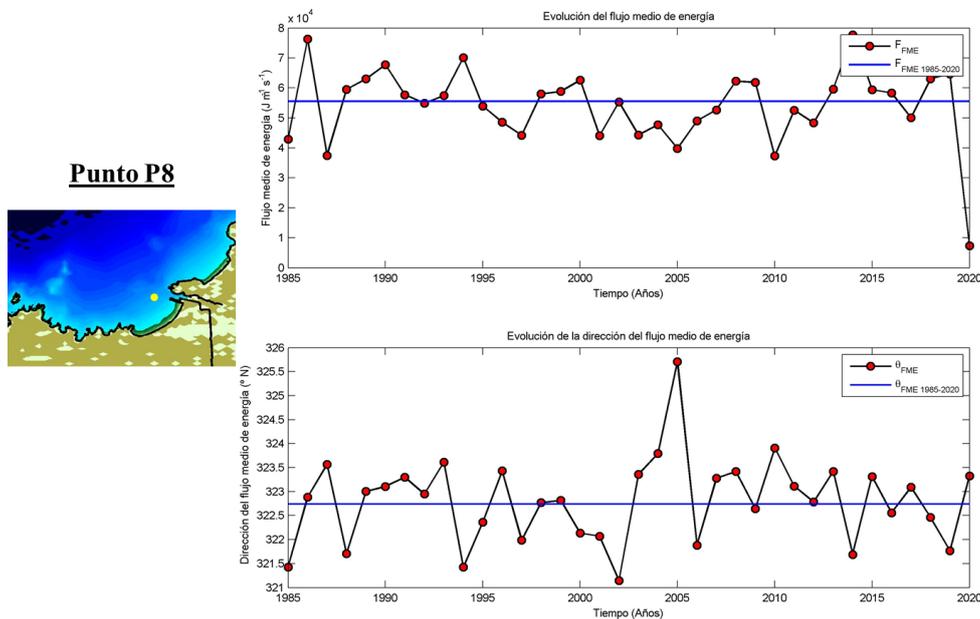


Figura 32. Evolución histórica del flujo medio anual de energía (FME) en el punto P08.

4.3.4 CONCLUSIONES RESPECTO AL OLEAJE EN LA PLAYA

Las conclusiones que se extraen del análisis de la propagación del oleaje, tanto condiciones medias como extremas, son las siguientes:

- El nivel del mar, con una carrera de casi 5 metros, juega un papel importante en el comportamiento del oleaje en su llegada a la playa. En condiciones bajamar, el oleaje más intenso rompe antes de su llegada a la punta del espigón, mientras que, el aumento del calado en condiciones de pleamar permite al oleaje alcanzar zonas protegidas por el espigón, más próximas a la orilla.
- El oleaje predominante y de mayor energía es de componente NW, y con menor relevancia los de WNW y NNW. Estos oleajes mantienen prácticamente su energía desde aguas profundas hasta la costa de estudio. Se observan concentraciones del oleaje en ciertas zonas del tramo central y oriental de la playa, causadas por la difracción en los bajos frente a la costa, dando como resultado un incremento de la altura de ola. Estas concentraciones de oleaje y variaciones en la altura de ola serán importantes en el sistema de corrientes de la playa y, por tanto, en el modelo de funcionamiento de la misma, tal y como se verá posteriormente.
- En ambos extremos de la playa (Punta la Peñona y Punta de la Forcada y el espigón) surgen puntos de difracción en marea alta, creando gradientes de altura de ola en los extremos de la playa. Este proceso se acentúa con oleajes de componente NE, frente a los de componente NW y WNW, y bajo condiciones medias frente a oleajes de tipo temporal.

Respecto a la caracterización del clima marítimo en los puntos de control de interés:

- La dirección del flujo medio anual de energía promedio en toda la playa se aproxima a los 322° o N38W. En el extremo oriental, zona que se analizará en la propuesta de alternativas, el FME es de 323° (N37W). El extremo occidental, zona más expuesta al oleaje del noroeste, presenta FME de 328° (N32W)
- Respecto a la evolución temporal del flujo medio de energía, se observa un constante cambio año tras año, aunque de muy poca magnitud.

4.4 SISTEMA CIRCULATORIO

Uno de los objetivos de este trabajo es analizar el funcionamiento de las corrientes dentro del sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal. Habiendo revisado estudios previos, se observa una diversidad de conclusiones al respecto, las cuales se resumen a continuación:

La primera de las hipótesis, apoyada por CEDEX y Costas, concluye que el modelo morfodinámico de funcionamiento del sistema es un sistema cerrado en el que el flujo sedimentario hacia la canal se produce por dos mecanismos:

- Corrientes de gradientes de sobreelevación, generadas por los temporales de componente Norte y Este, con capacidad de transporte de 80.000 m³/año.
- Transporte normal debido a los temporales dominantes, con capacidad de transporte de unos 30.000 m³/año.

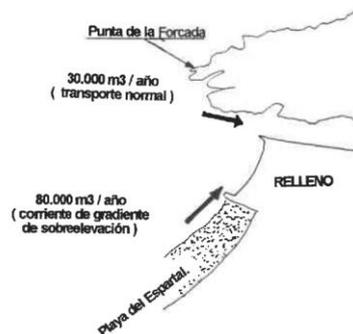


Figura 33. Mecanismos de transporte según el informe del CEDEX (1994).

La segunda de las hipótesis, respaldada por diversos autores (Flor y Flor-Blanco (2009) INDUROT (1999), IHCantabria (1996a), entre otros), concluye que:

- El sistema es una caja abierta que recibe arena del exterior a través de la corriente en sentido W-E que comunica las playas de toda la costa de estudio.
- El oleaje de componente NW, de mayor probabilidad e intensidad, alcanza la costa y rompe a una distancia de la playa suficiente para formar una zona de corriente superficial que transcurre a lo largo de toda la costa, adaptándose a las formas del terreno (cabos, bahías, islotes, etc.). En su entrada al sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal, parte de este flujo de agua se redirige por el interior de la playa, recogido entre los diferentes salientes, y otra parte (un segundo flujo

exterior) se une al flujo continuo que recorre la costa, tal y como puede verse en la siguiente imagen:

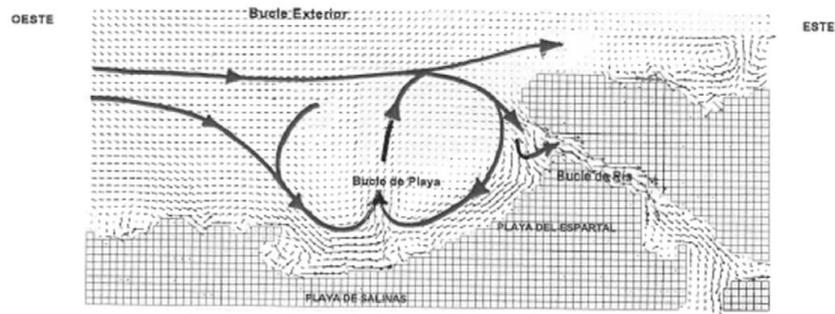


Figura 34. Modelo de funcionamiento propuesto por IHCantabria, (1996b) bajo condiciones de temporal.

En este contexto, se procede a analizar el funcionamiento de las corrientes, bajo las condiciones batimétricas disponibles (septiembre de 2013).

4.4.1 CORRIENTES LONGITUDINALES

En el análisis del sistema circulatorio de las corrientes en una playa se parte de la base que la principal fuente generadora de corrientes longitudinales es la rotura del oleaje. Es en este punto de rotura de la ola, generalmente a lo largo de una línea paralela a la playa, se produce un pico de velocidad longitudinal que depende directamente de la oblicuidad con la que incide el oleaje.

Estas corrientes longitudinales son determinantes en la configuración de equilibrio de la forma en planta de una playa, ya que transportan el sedimento puesto en suspensión de un punto a otro de la playa. La respuesta de la playa es la búsqueda de un equilibrio que logra cuando, aun existiendo corrientes longitudinales, el transporte neto es nulo ya que la arena erosionada de una zona es reemplazada por arena de otra zona.

Existen diversos métodos para conocer la magnitud de las corrientes longitudinales. En este estudio se aplica un modelo de cálculo de corrientes asociado a la rotura del oleaje, el modelo COPLA desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. El modelo determina el tensor de radiación del oleaje a partir de los resultados obtenidos de altura e incidencia del oleaje obtenidos en la propagación, calculando el campo de corrientes y niveles debido a dichos tensores de radiación por medio de un modelo no-lineal que resuelve las ecuaciones integradas de Navier-Stokes.

Para caracterizar adecuadamente el comportamiento de las corrientes en la zona de estudio, y dar por válida una de las dos hipótesis de modelo de funcionamiento planteadas en la introducción, se ha analizado en detalle todo el abanico de direcciones de oleajes que inciden en la costa de estudio, teniendo en cuenta tanto las condiciones medias, como las de temporal, así como los diferentes casos asociados a las mareas (pleamar y bajamar).

Del conjunto de casos analizados, se decide seleccionar los casos más probables y de mayor intensidad de la zona de estudio, y que permiten alcanzar una postura firme en la

determinación de la hipótesis más acertada para explicar el modelo morfodinámico de funcionamiento del sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal. Estos casos son los oleajes de componente NW, WNW y NNW, con una probabilidad conjunta de ocurrencia del 83%. Para cada dirección se muestran las condiciones más energéticas (Hs12) en situación de bajamar (0 metros) y de pleamar (5 metros), con el objetivo de representar el comportamiento típico de los temporales más comunes. Para facilitar la comprensión de los resultados, los gráficos incluyen una escala de colores de magnitud de corriente la cual ha sido modificada para mostrar la misma escala en m/s en todos los casos. El máximo de velocidad de corriente será siempre 0.7 m/s:

Temporal del NW: El oleaje de componente noroeste es considerado el más energético y probable (50% de ocurrencia). Este oleaje es responsable de la formación de varios circuitos de corrientes en la playa:

El circuito principal es exterior (flechas **rojas**) al sistema, ya que sigue la costa de oeste a este y entra en la playa desde el extremo oriental, creando fuertes corrientes frente a la Punta de la Peñona. Luego, se mueve paralelo a la playa de oeste a este, hasta alcanzar el morro del espigón y dirigirse a la canal de navegación. Del flujo principal divergen dos corrientes:

- Una corriente, de grandes magnitudes, va por el interior de la ensenada paralela a la playa y vuelve a unirse a la corriente principal en la zona central de la playa.
- Una corriente, de menor magnitud, que fluye en paralelo por el exterior junto a la corriente principal y escapa hacia el exterior también en el centro de la playa.

El circuito interior (flechas **negras**), o más próximo a la costa, no presenta un flujo continuo a lo largo de la playa y está claramente condicionado por el nivel del mar:

- En bajamar, el extremo occidental tiene una corriente longitudinal alimentada por el flujo principal, que converge en la zona central de la playa. El extremo oriental forma un bucle (en sentido horario) que va paralelo al espigón y gira hacia el centro de la playa hasta unirse al flujo principal, creando corrientes de retorno.

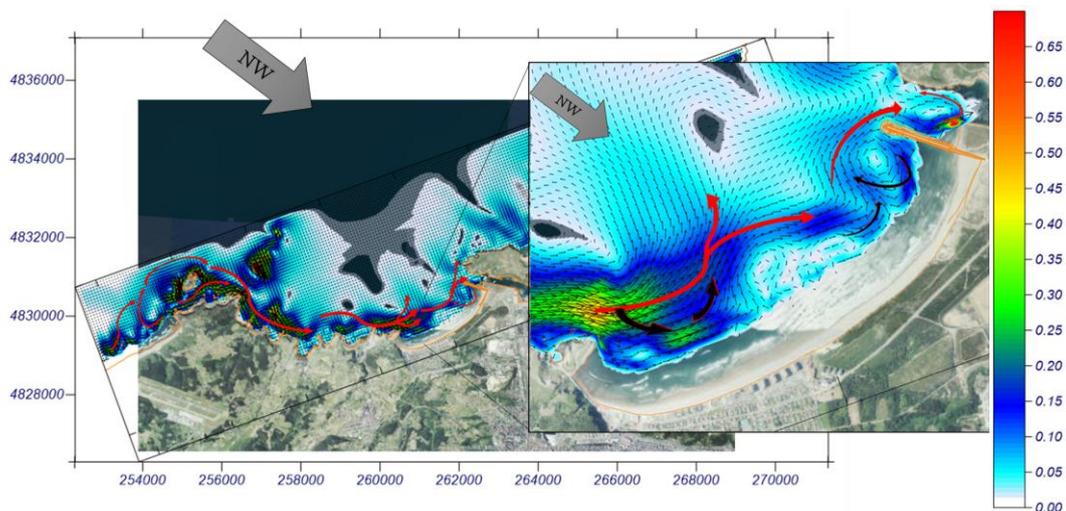


Figura 35. Gráficos de corrientes asociadas a un temporal del NW en bajamar

- En pleamar, las corrientes que se generan son de menor magnitud. Destaca el cambio de sentido del bucle generado en el extremo oriental, el cual lleva el flujo principal hasta el morro del espigón y posteriormente a la canal de navegación.

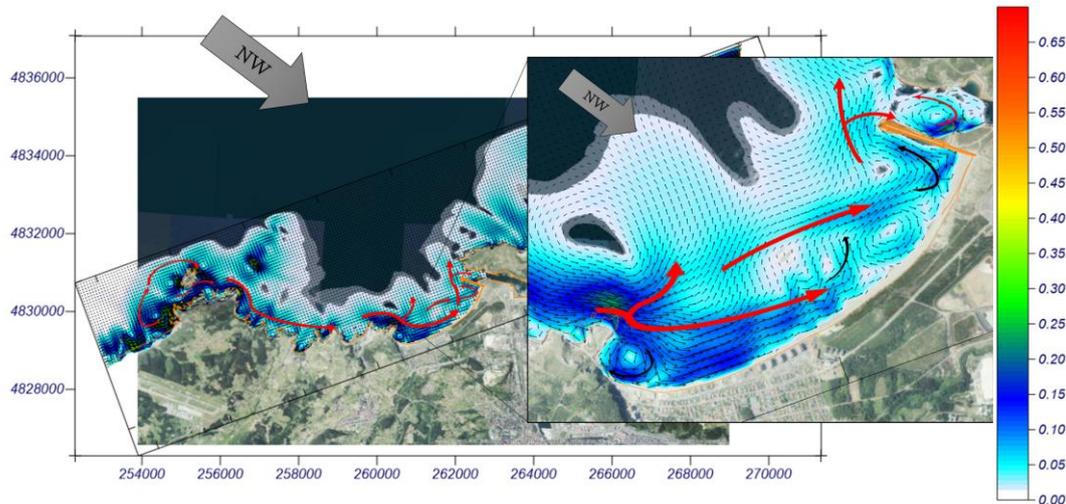


Figura 36. Gráficos de corrientes asociadas a un temporal del NW en pleamar.

Otros oleajes del noroeste generan corrientes similares, de gran magnitud y sentido W-E en la zona. Como ya se ha comprobado con el temporal del NW, el régimen de marea es importante en el comportamiento de las corrientes, siendo mucho más intensas en situación de bajamar.

Temporales del WNW: En un temporal del WNW se genera una corriente principal (flechas rojas) proveniente del exterior del sistema, esta vez de mayor magnitud. La corriente recorre la playa en sentido W-E hasta el morro del espigón y se divide creando una corriente hacia el interior de la canal de navegación. También, se forman corrientes en el interior (flechas negras) de la playa, destacando el bucle en sentido horario que recorre el espigón y lleva el agua hacia el centro de la playa, donde se une al flujo principal por la corriente de retorno.

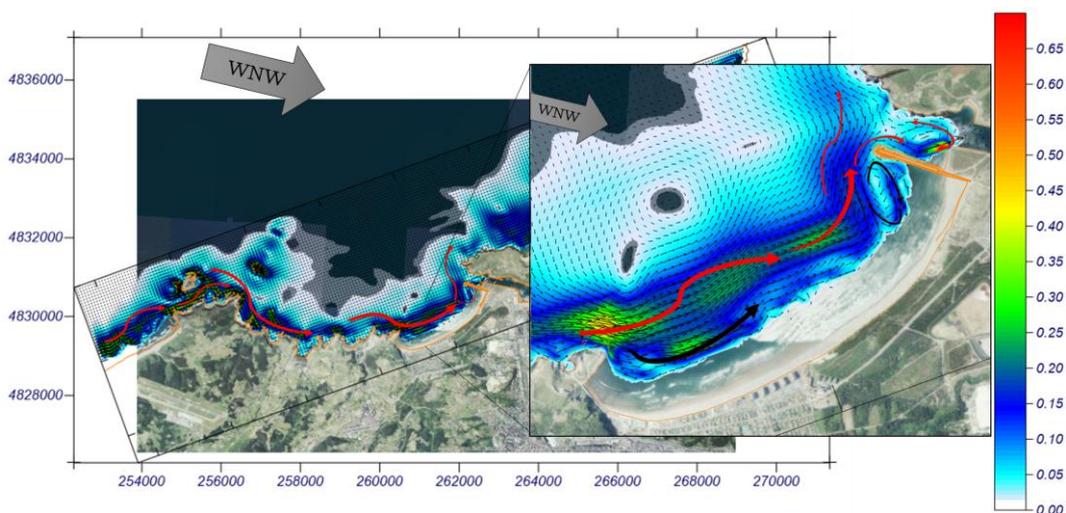


Figura 37. Gráficos de corrientes asociadas a un temporal del WNW en bajamar.

Temporales del NNW: En un temporal del NNW, se forma la corriente exterior (flechas rojas) que termina por alcanzar el morro del espigón y entrar en la canal de navegación, sin embargo, se observa un cambio de sentido en las corrientes internas, que también ocurre en otros oleajes del Norte y Noreste. Esta corriente interior (flechas negras) se crea en el espigón, junto con la formación de bucles y corrientes rítmicas, y recorre la playa en sentido E-W hasta unirse a la corriente exterior en el tercio occidental, formando una corriente de retorno oblicua.

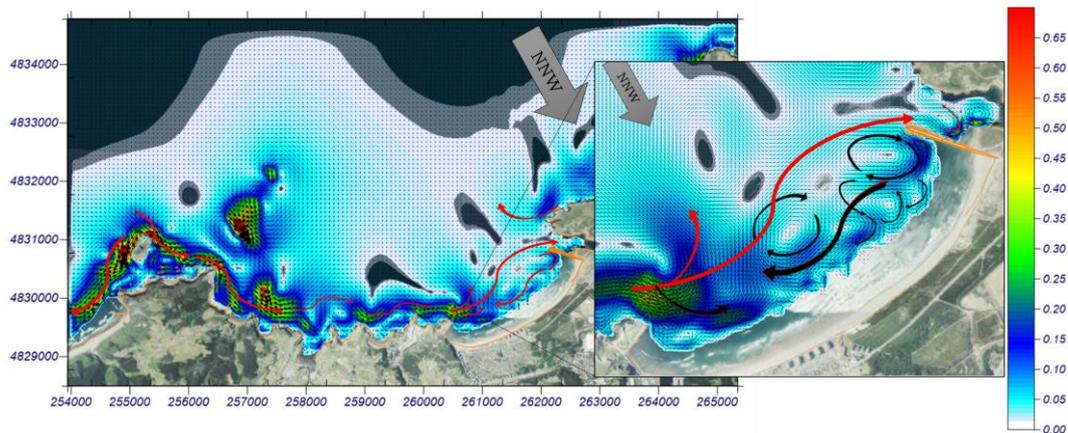


Figura 38. Gráficos de corrientes asociadas a un temporal del WNW en bajamar.

Oleajes medios del cuatro cuadrante (WNW, NW y NNW): Los oleajes medios presentan un patrón de corrientes similares a las generadas por los temporales, pero de menor magnitud. Sin embargo, las magnitudes del oleaje medio no son suficientes para que la corriente alcance el morro del espigón. Un ejemplo de esto ocurre con el oleaje medio de componente NW, bajo las dos situaciones de marea previstas.

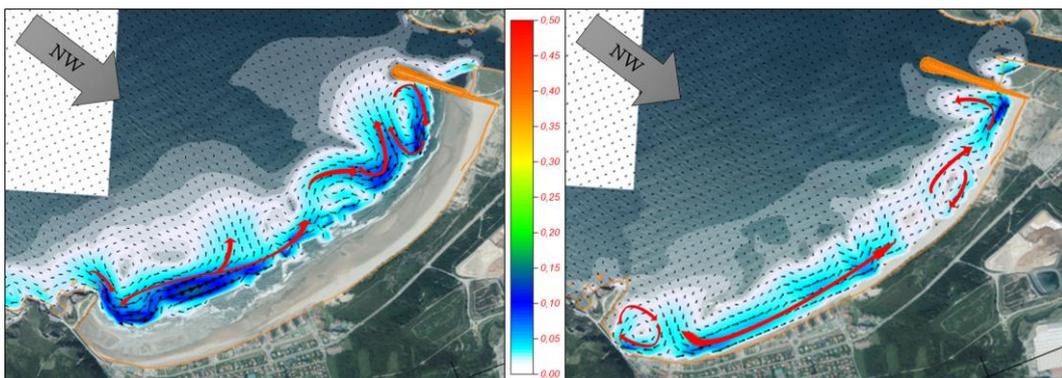


Figura 39. Gráficos de corrientes de un oleaje medio del NW (bajamar y pleamar).

Capacidad de transporte de las corrientes: Las corrientes que alcanzan el morro del espigón y continúan hacia la canal de navegación pierden intensidad y con ello su capacidad portante, dando como resultado zonas de acumulación de sedimento. Este efecto se aprecia muy bien en la siguiente figura, que representa los cambios en el fondo que ocurrirían sobre la batimetría inicial tras un temporal del NW en situación de bajamar.

La escala de colores mostrada representa variaciones del fondo en metros. Los valores en positivo corresponden con zonas de erosión, como la ocurrida en la punta de la Peñona (manchas de color marrón, rosa o azul). Por el contrario, los valores en negativo hacen referencia a zonas de acumulación, como la ocurrida en el morro del espigón y en la canal de navegación (manchas de color amarillo, lila o verde).

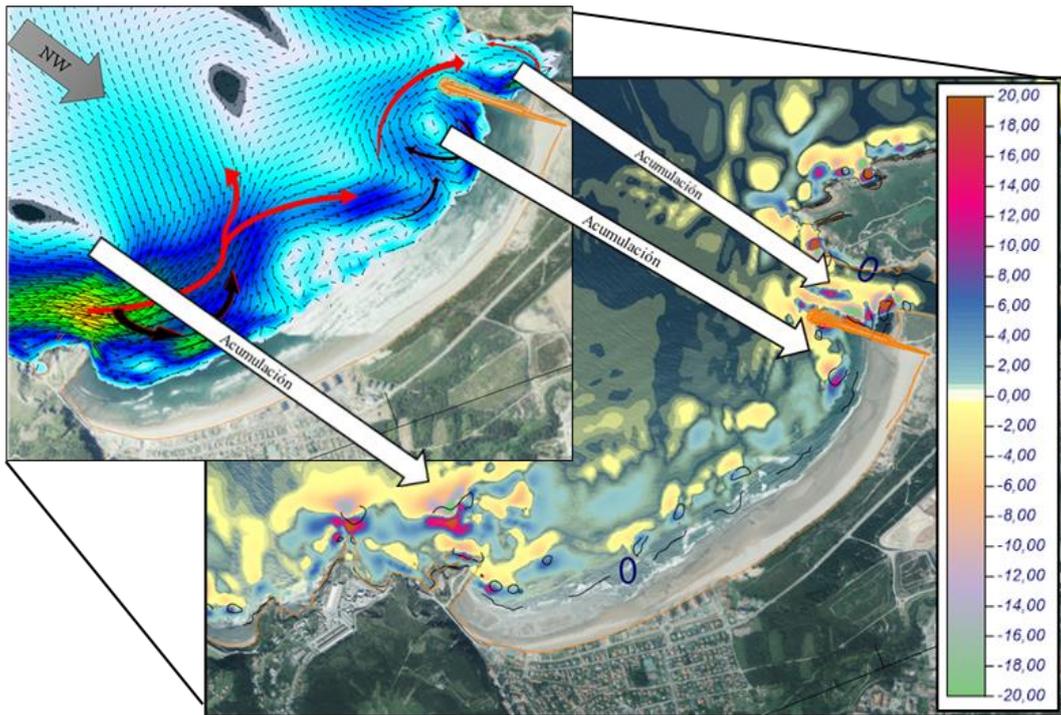


Figura 40. Variaciones del fondo (m) respecto a la batimetría inicial tras un temporal del NW en bajamar.

En resumen, el estudio de las corrientes ha confirmado la existencia de un patrón de transporte longitudinal a lo largo de la costa asturiana, desde el cabo Vidrias hasta Avilés, en línea con lo mencionado por varios autores (Flor-Blanco et al., 2013; IHCantabria, 1996b; INDUROT, 1999).

Este modelo confirma que los temporales del WNW, NW y NNW en situación de bajamar, a través de la corriente exterior, son los principales transportadores de sedimentos hacia la canal de navegación, complementados por aportes menores de corrientes interiores del sistema. También se ha identificado que en situaciones de pleamar durante temporales NW o WNW, puede ocurrir un aporte reducido desde el extremo oriental de la playa de San Juan de Nieva, aunque esto es poco común.

5 DINÁMICA LITORAL

En capítulos anteriores se ha analizado la zona de estudio, sus antecedentes históricos y el comportamiento del oleaje tanto en aguas profundas como en la costa. Esta información nos permite comprender el comportamiento de la playa, teniendo en cuenta su estado de equilibrio en el largo plazo.

En este capítulo nos centramos en la situación actual de la playa y su estado de equilibrio, considerando los análisis previos. Estudiar íntegramente los procesos tridimensionales y las escalas que ocurren en la playa conlleva un proceso complejo que no es objeto de este trabajo, por ello se asumen ciertas hipótesis:

- Se acepta, como hipótesis inicial, la ortogonalidad de los movimientos longitudinales y transversales de una playa. Consecuentemente, se admite que la estabilidad de la misma puede ser analizada estudiando la estabilidad de su forma en planta y su perfil.
- Se separa el análisis de la estabilidad y evolución de la playa de acuerdo con las diferentes escalas de los procesos. Las dinámicas que influyen en el comportamiento de una playa de estas características se presentan en escalas espaciales, que van desde los centímetros (turbulencia) hasta los kilómetros (mareas), y en escalas temporales que abarcan desde los segundos (oleaje) hasta las décadas (subida del nivel del mar). La respuesta de la playa ante estas dinámicas queda representada en la siguiente figura:

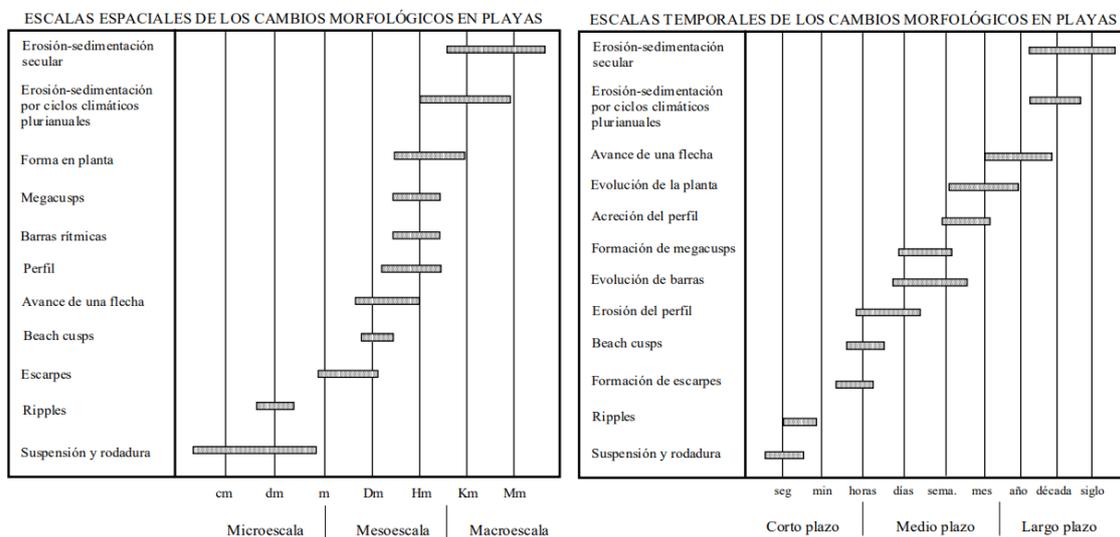


Figura 41. Evolución de la playa según la escala espacial (izquierda) y temporal (derecha).

En este trabajo se analiza la estabilidad y evolución de la playa en las condiciones batimétricas disponibles, de septiembre de 2013. Se acepta como hipótesis inicial, la ortogonalidad de los procesos de la playa, diferenciando entre perfil y planta de equilibrio en el largo plazo.

5.1 ANÁLISIS EN LARGO PLAZO

En primer lugar, se analiza la estabilidad de la playa en una escala de años/décadas. En estos términos, la playa alcanza su forma en planta y perfil de equilibrio en el tiempo.

5.1.1 FORMA EN PLANTA

El estudio de la forma en planta pasa por la determinación de formas teóricas que mejor se ajusten a la realidad, tales como la parábola de Hsu y Evans (1989), que busca representar la forma en planta mediante curvas apoyadas en el punto de difracción de la playa, que buscan el definir una playa de equilibrio en función de la dirección de incidencia media del oleaje, la distancia del punto de difracción a la costa, entre otros.

Hsu et al. (1989) propusieron para la forma en planta de una playa la expresión:

$$\left(\frac{R}{R_0}\right) = C_0 + C_1\left(\frac{\beta}{\theta}\right) + C_2\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2$$

, donde:

R = radio vector, tomado desde el punto de difracción, que define la forma de la playa.

R0 = radio vector, tomado desde el punto de difracción, correspondiente al extremo no abrigado de la playa.

C0, C1, C2 = coeficientes (función de β).

β = ángulo (fijo) formado entre el frente de oleaje y el radio vector R0.

θ = ángulo (variable) entre el frente de oleaje y el radio vector R.

González et al. (2000) plantearon una metodología para el diseño de playas encajadas a partir de la formulación de Hsu. En el método desarrollado β es función de:

- el número de longitudes de onda o distancia adimensional que exista hasta la línea de costa (Y/L), siendo Y la distancia a la línea de costa y L la longitud de onda.
- la dirección del frente del oleaje, que corresponde con la dirección del flujo medio de energía en la zona del polo de difracción (punto de control).

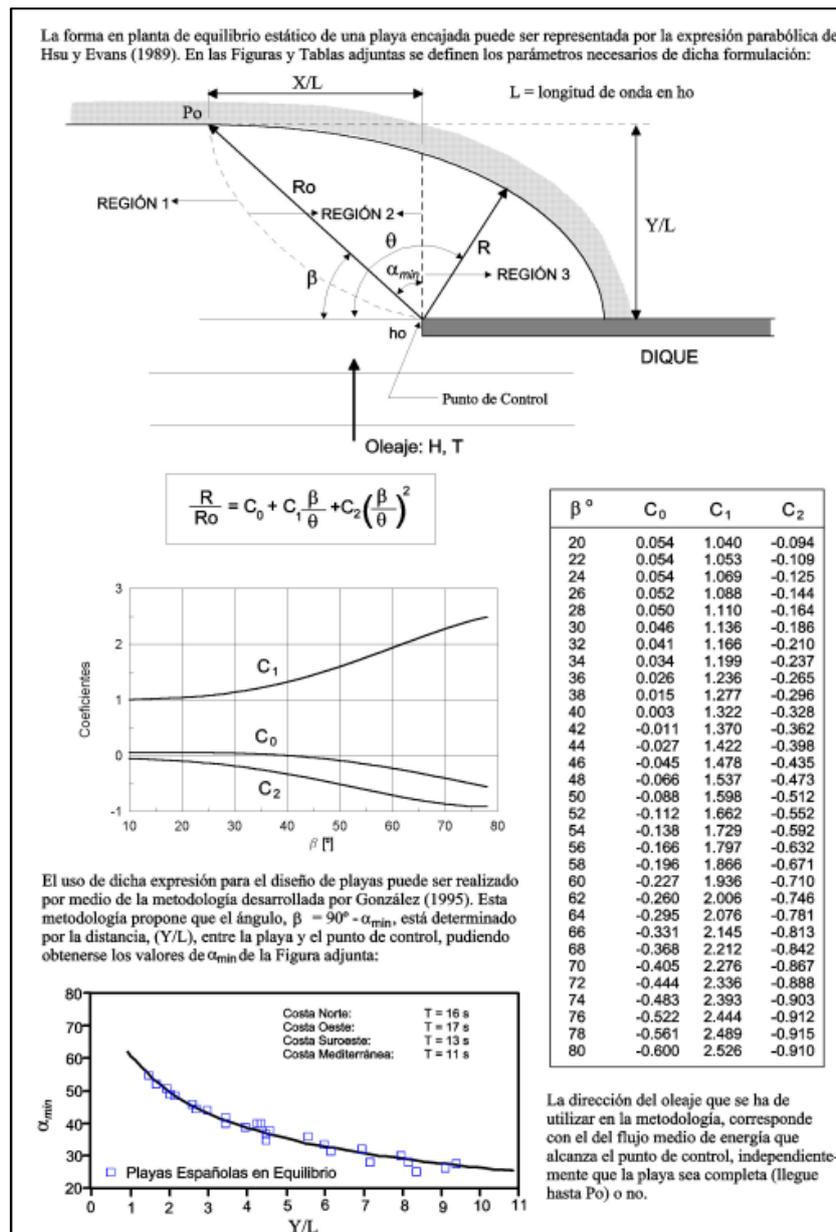


Figura 42. Cuadro resumen de la expresión parabólica de Hsu y Evans para playas encajadas.

En este contexto, para conocer la planta en equilibrio se ha seguido la metodología descrita en el apartado 4.3.1 para determinar el flujo medio anual de energía, y se hace el mejor ajuste de la playa en base a teoría González et al. (2000).

Como se puede observar en la siguiente figura, los puntos de difracción colocados a ambos extremos de la playa, a escasos metros de los acantilados y el morro del espigón, son determinante en la forma en planta de la playa. Se observa una planta de equilibrio bastante bien ajustada, principalmente en el extremo oriental a partir de la línea de alfamin (líneas rosas discontinuas). Sin embargo, se observa un peor ajuste en el tramo occidental donde se aprecia la formación de una corriente de retorno oblicua que modifica el fondo.

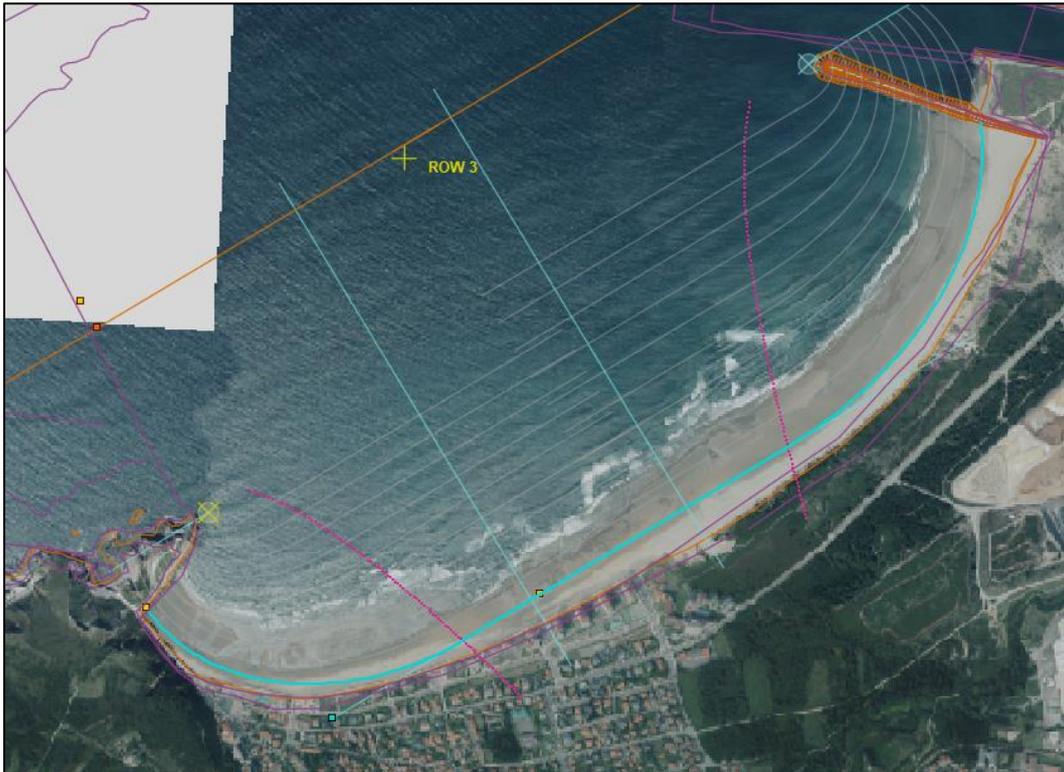


Figura 43. Forma en planta de equilibrio de playa de Salinas-El Espartal.

5.1.2 PERFIL DE EQUILIBRIO

En la determinación del perfil de equilibrio, se aplicó el ajuste propuesto por Bernabéu en 1999 que define un perfil de equilibrio compuesto por dos tramos, cuyas características vienen determinadas por un **perfil de rotura**, que va desde la línea de costa hasta el punto de rotura; y un **perfil de asomeramiento**, correspondiente al tramo desde el punto de rotura hacia aguas adentro (Bernabéu, 1999).

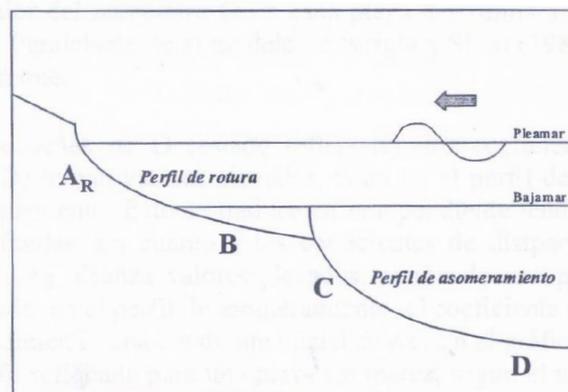


Figura 44. Forma en planta de equilibrio de playa de Salinas-El Espartal.

A continuación, se muestra una representación de los perfiles analizados:

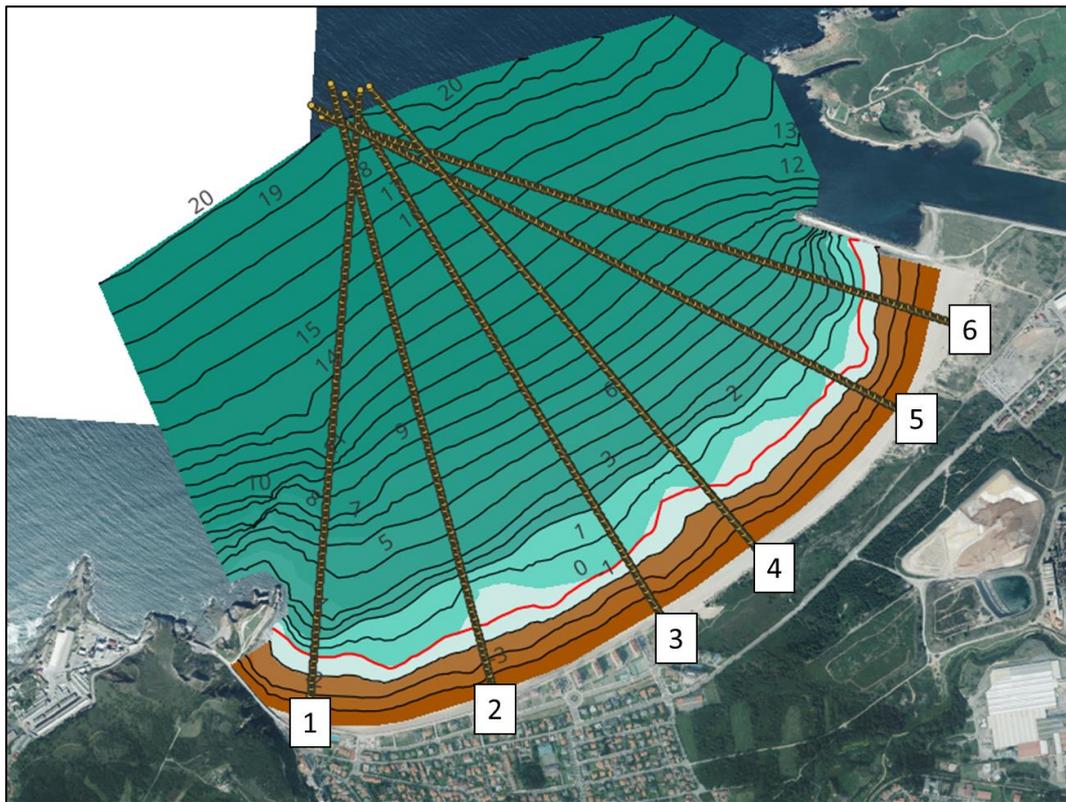
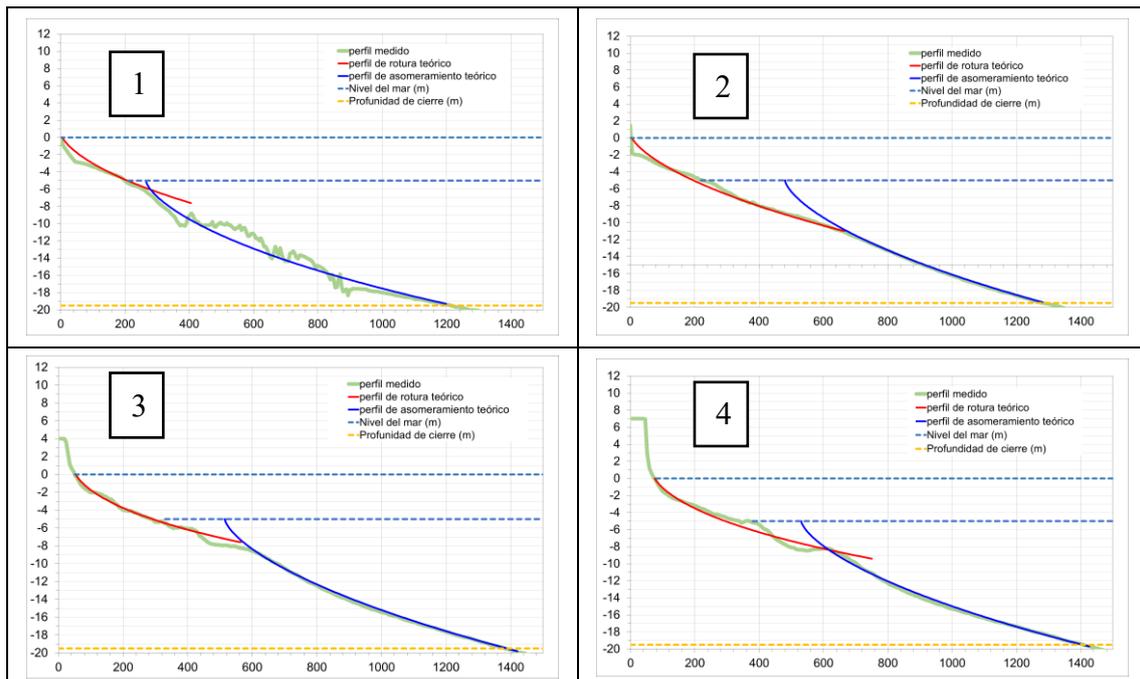


Figura 45. Perfiles de playa extraídos de la batimetría de septiembre de 2013.

De cada perfil se determina el mejor ajuste del perfil de equilibrio en dos tramos de Bernabéu, 1999, teniendo en cuenta la carrera máxima de marea. La línea discontinua azul superior es pleamar (+5 m) y la línea inferior corresponde con bajamar (0 m), respecto a la batimetría disponible.



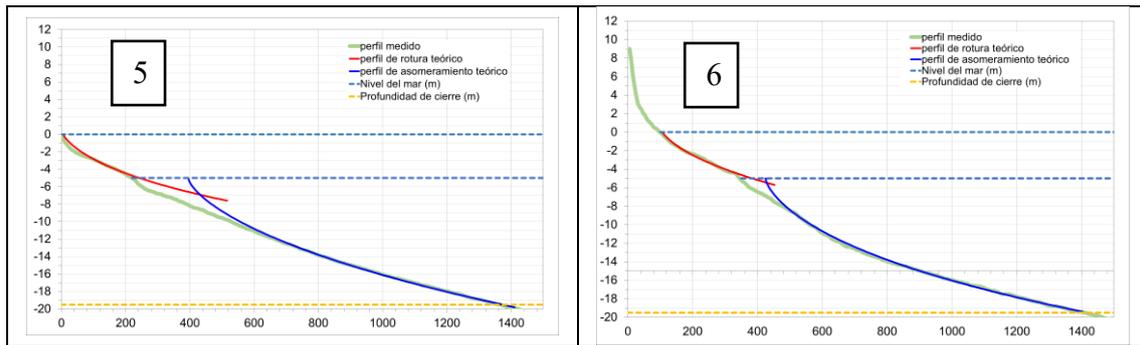


Figura 46. Ajuste de los perfiles extraídos de la batimetría disponible (sept. 2013).

En la siguiente figura se muestra un resumen de los perfiles medidos y del valor de los parámetros de ajuste teórico anteriormente mencionados. El ajuste de los perfiles de Bernabéu consigue representar bien los tramos asociados al perfil de rotura teórico y al asomeramiento teórico.

Tabla 7. Parámetros asociados al ajuste en dos tramos de los perfiles analizados.

Perfiles	Perfil de rotura		Perfil de asomeramiento	
	A	B	C	D
1	0.170	0.010	0.176	0.005
2	0.170	0.005	0.185	0.003
3	0.170	0.025	0.176	0.003
4	0.170	0.017	0.176	0.003
5	0.170	0.025	0.176	0.006
6	0.147	0.019	0.200	0.011
Promedio	0.166	0.017	0.181	0.005

La línea discontinua de color amarillo de los perfiles de la figura 46 indica la profundidad de cierre, tras la que no existen interacciones significativas entre el estado modal del oleaje y el fondo. Para el cálculo de la profundidad de cierre se ha elegido un punto próximo a Punta Forcada, dado que representa el punto de control de la playa más exterior. En particular, se ha seleccionado el punto P6 de los puntos seleccionados para la reconstrucción del oleaje, donde las características del oleaje que definen la profundidad de cierre son de 7 metros de altura de ola significativa superada solo 12 horas al año (H_{s12}) y un T_p asociado a dicha H_{s12} de 16 segundos.

La formulación aplicada estará del lado de la seguridad, pues es necesario sobreestimar el dato de la profundidad para asegurar el límite de acción de las corrientes. En consecuencia, mediante la formulación de Hallermeier (1981), se estima la siguiente profundidad de cierre (h_*):

$$h_* = 2.28H_{s12} - 68.5 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_p^2} \right) \approx 14.5 \text{ m}$$

5.2 MODELO DE FUNCIONAMIENTO MORFODINÁMICO

En este apartado se propone un modelo de funcionamiento del sistema playa-dunas de Salinas-El Espartal con base en los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

Las dinámicas que gobiernan el balance sedimentario de esta playa son las corrientes de rotura, principalmente de los temporales del cuatro cuadrante (WNW, NW y NNW) en situación de bajamar. En este sentido, se concluye lo siguiente:

- Los oleajes del NNW y hacia el Este (N, NNE y NE) generan principalmente corrientes en sentido Este - Oeste, mientras que los del NW y WNW crean corrientes en sentido Oeste-Este que llegan al morro del espigón y la canal de navegación.
- Los temporales del WNW y NW generan dos circuitos de corrientes, uno exterior de mayor magnitud, y otro interior que se conecta con el principal creando corrientes de retorno.
- Las corrientes más fuertes y capaces de transportar mayor cantidad de sedimentos son las que se forman en el circuito exterior debido a los temporales WNW y NW.
- La marea tiene un impacto significativo en el patrón y la magnitud de las corrientes, siendo más intensas durante la bajamar. En esta fase, los oleajes del NNW, NW y WNW crean un bucle en sentido horario cerca del espigón que transporta sedimentos de Este a Oeste y se conecta con la corriente principal. En pleamar, las corrientes en el extremo oriental se desplazan paralelas al espigón y se dirigen hacia el morro, conectando con la corriente principal que transporta sedimentos hacia la canal de navegación.

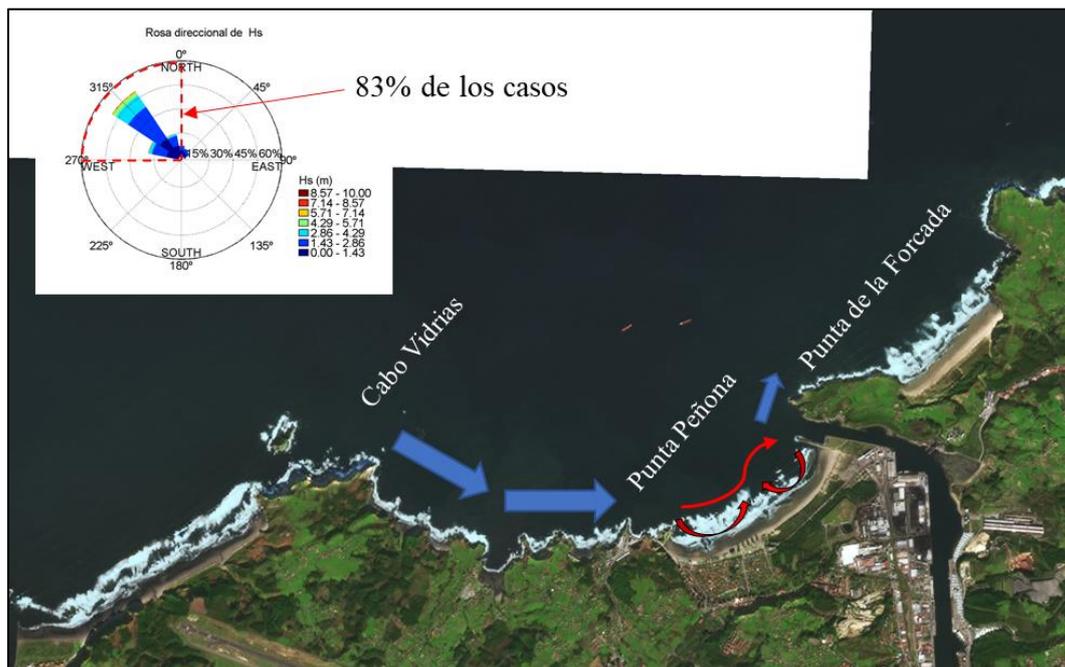


Figura 47. Modelo de funcionamiento más probable en situación de bajamar.

6 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Tal y como se ha planteado en apartados anteriores, uno de los objetivos del trabajo es el estudio de los efectos esperados en el sistema debidos a la prolongación del espigón. Al objeto de analizar el efecto de diferentes prolongaciones, en este trabajo se han considerado tres diferentes longitudes: 200, 500 y 800 metros.

Para llevar a cabo el estudio de cada prolongación, se han seguido una serie de pasos:

- **Determinación de la nueva playa de equilibrio y regeneración de las nuevas condiciones batimétricas:** Cada prolongación conlleva una alteración en las características del oleaje que llega a la costa, siendo esencial determinarlas. Este dato nos permite conocer la nueva orientación de la forma en planta que adquiere la playa en su búsqueda del equilibrio.
- **Propagación del temporal de diseño y estudio de las corrientes:** La nueva forma en planta regenerada se utiliza como base para propagar los temporales más representativos (WNW, NW y NNW) en situación de bajamar. A través de estos análisis, se evalúa si existen variaciones significativas en el flujo de las corrientes.

Para facilitar la comprensión de los resultados, los mapas de corrientes presentados en los siguientes apartados incluyen la misma escala de colores de magnitud de corriente en m/s en todos los casos. El máximo de velocidad de corriente será siempre 0.7 m/s.

El análisis de las corrientes se realizará mediante una comparación entre el funcionamiento de las corrientes en la situación actual (figura izquierda) y la nueva situación tras cada prolongación (figura derecha):

6.1.1 ALTERNATIVA 1 – Prolongación de 200 metros

La prolongación de 200 metros alcanza la profundidad -11 metros. Como se puede observar en la siguiente figura, modificar el espigón supone un cambio en la posición del punto de difracción.

Como consecuencia, la línea de alfamin se mueve 80 metros hacia el centro de la playa con respecto a su ubicación original, causando un giro anticipado de la línea de costa y un avance de hasta 120 metros en el tramo más cercano al espigón. Para lograr que la playa avance hasta alcanzar su nueva posición de equilibrio, se calcula que la playa requerirá un volumen de arena de 1.000.000 de m³.

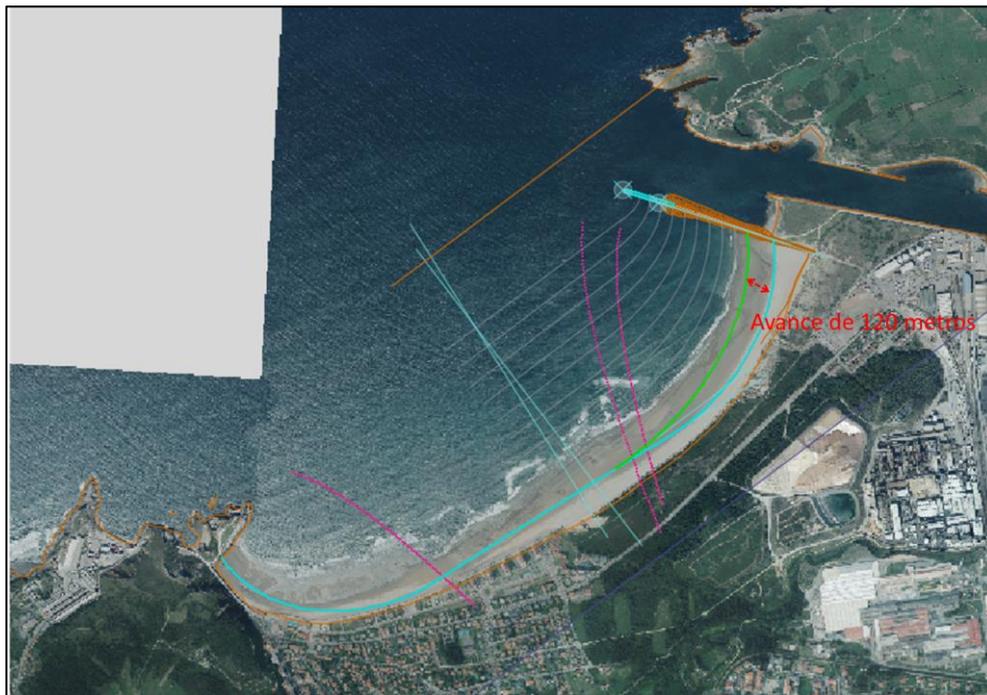


Figura 48. Diseño de la nueva planta de equilibrio tras la prolongación de 200 metros.

Temporal del WNW: La prolongación de 200 metros genera un cambio en el sentido de giro de la corriente que está pegada al espigón, que pasa a circular en paralelo y hacia el morro. Además, se aprecia una disminución en la magnitud de la corriente exterior a su paso por el centro de la playa, pues esta se encuentra con una corriente de retorno que desplazada hacia la izquierda para dejar paso a la corriente paralela al espigón. Se aprecia una disminución de las corrientes que llegan al morro, dando pie a la posible entrada y acumulación del sedimento en la canal de navegación.

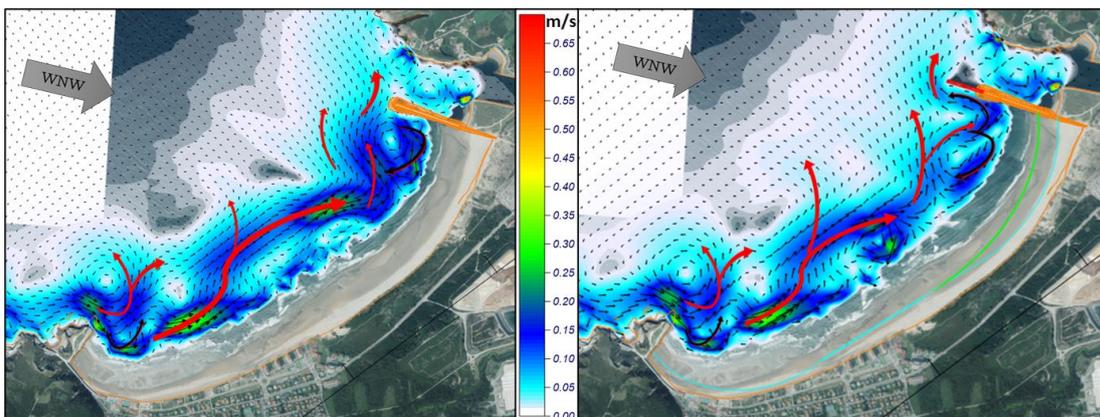


Figura 49. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 200 metros (derecha), durante un temporal del WNW en bajamar.

Temporal del NW: De nuevo, la prolongación de 200 metros genera un cambio en el sentido de giro de la corriente que está pegada al espigón, que pasa a circular en paralelo y hacia el morro. Este cambio de sentido se observa también en la corriente interior que recorre la playa longitudinalmente en sentido E-W, haciendo desaparecer la corriente de retorno que surgía en el extremo oriental. Como consecuencia, se aprecia una reducción en la magnitud de la corriente exterior en su llegada al morro del espigón, que tiende a continuar hacia la playa de Xagó.

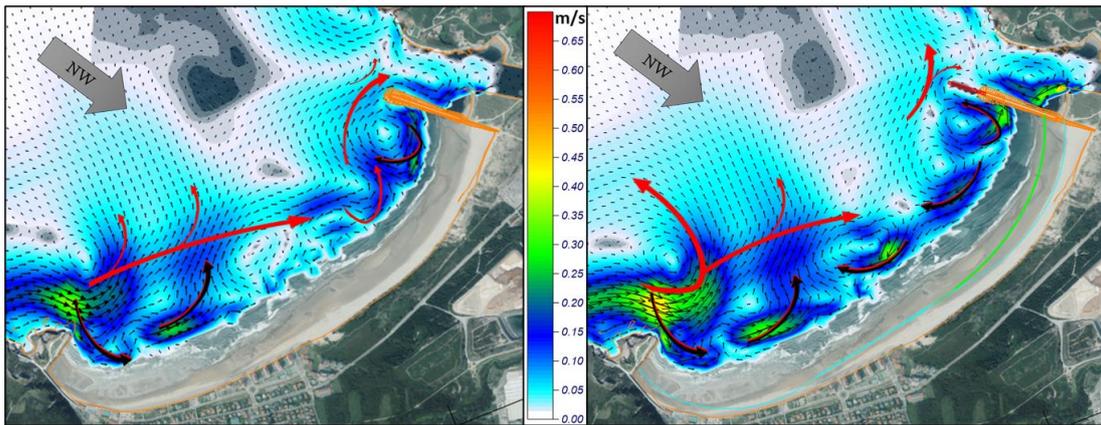


Figura 50. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 200 metros (derecha), durante un temporal del NW en bajamar.

Temporal del NNW: En este caso, se aprecian cambios significativos únicamente en el bucle circulatorio que está pegado al espigón. El cambio de sentido de esta corriente provoca la desaparición de la corriente de retorno localizada en el extremo oriental, que conducía el flujo directamente al morro del espigón. En este caso, sigue apareciendo una corriente de entrada en la zona de la canal, aunque de menor magnitud.

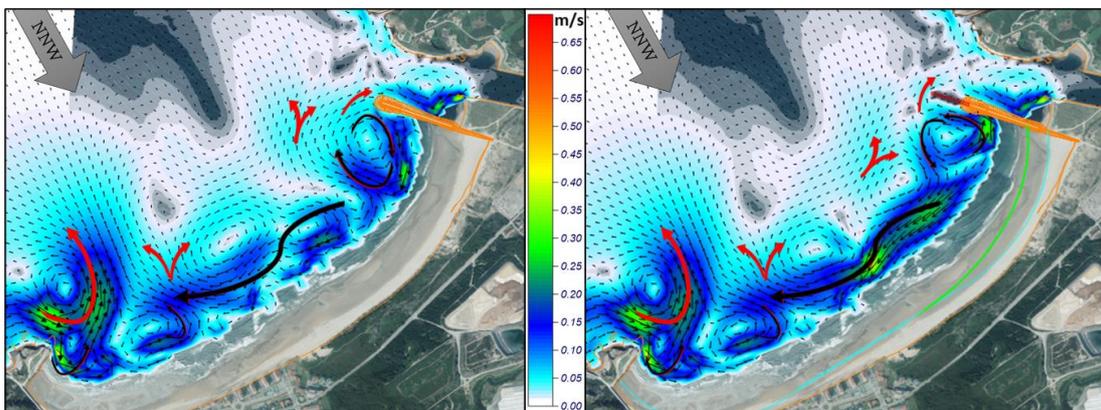


Figura 51. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 200 metros (derecha), durante un temporal del NNW en bajamar.

6.1.2 ALTERNATIVA 2 – Prolongación de 500 metros

La prolongación de 500 metros alcanza la profundidad -13 metros, casi duplicando la longitud del espigón actual. Como se puede observar en la siguiente figura, el cambio en la posición del punto de difracción produce que la línea de alfamin alcance el centro de la playa, provocando un avance de la línea de costa de hasta 270 metros en el extremo más oriental. En este caso, el volumen de arena necesaria para que la playa alcance su nueva posición de equilibrio, se estima en casi 2.000.000 de m³.

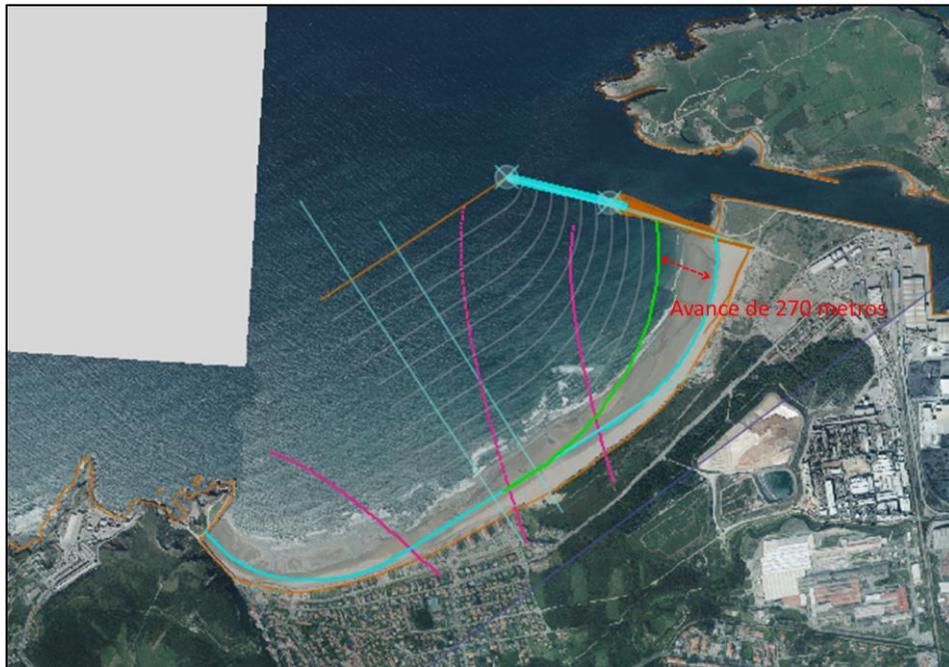


Figura 52. Diseño de la nueva planta de equilibrio tras la prolongación de 500 metros.

Temporal del WNW: La prolongación de 500 metros crea una corriente aún mayor a lo largo del espigón y modifica su dirección. Se produce una nueva corriente de retorno en el centro de la playa que permite la conexión del flujo principal (exterior) con la corriente del extremo oriental, la cual pierde su capacidad portante en el morro del espigón.

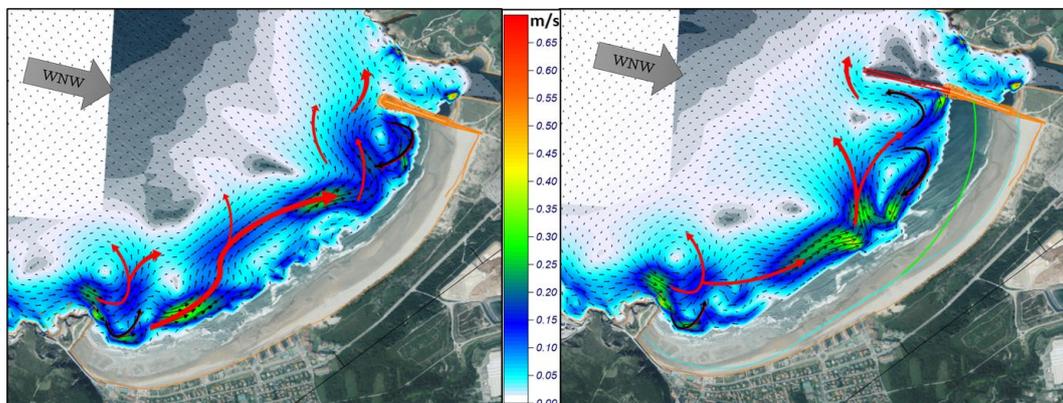


Figura 53. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 500 metros (derecha), durante un temporal del WNW en bajamar.

Temporal del NW: La prolongación de 500 metros aumenta considerablemente la magnitud e intensidad de la nueva corriente generada junto al espigón y que recorre el mismo hasta su morro, donde mantiene su tendencia a continuar hacia la playa de Xagó. La continuidad del flujo exterior se mantiene, aunque surge una fuerte corriente de retorno en el centro de la playa, que conecta nuevamente con la corriente del extremo oriental que recorre el espigón hasta su morro.

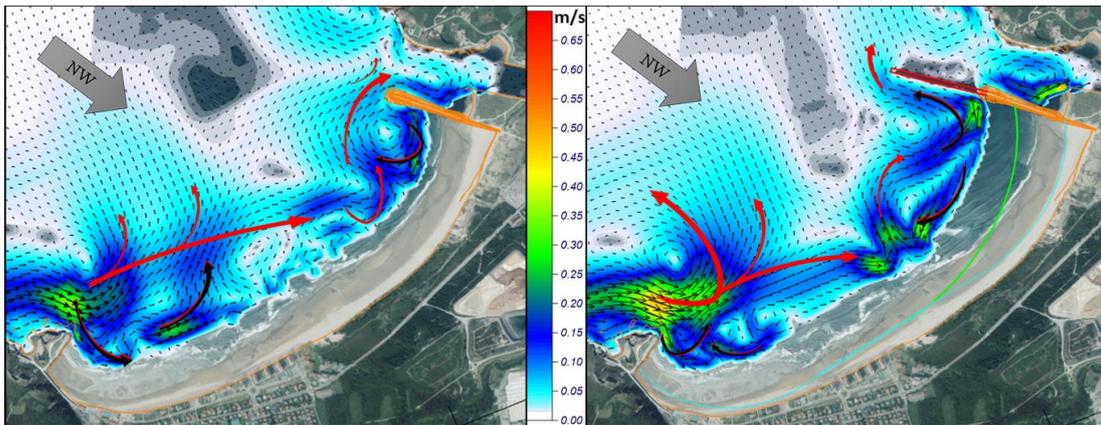


Figura 54. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 500 metros (derecha), durante un temporal del NW en bajamar.

Temporal del NNW: La prolongación de 500 metros suprime casi por completo la corriente de entrada en la canal de navegación. No obstante, el flujo que se genera a lo largo del espigón, y que tiene su origen en las cotas inferiores a la -10, son de gran magnitud e intensidad hasta su llegada al morro del espigón donde se dispersan. La continuidad del flujo exterior se mantiene, aunque surge una fuerte corriente de retorno en el centro de la playa, que conecta nuevamente con la corriente del extremo oriental que recorre el espigón hasta su morro. Cabe destacar la pérdida de continuidad longitudinal de la corriente exterior que surge en el centro de la playa y se divide en dos flujos en sentidos opuestos.

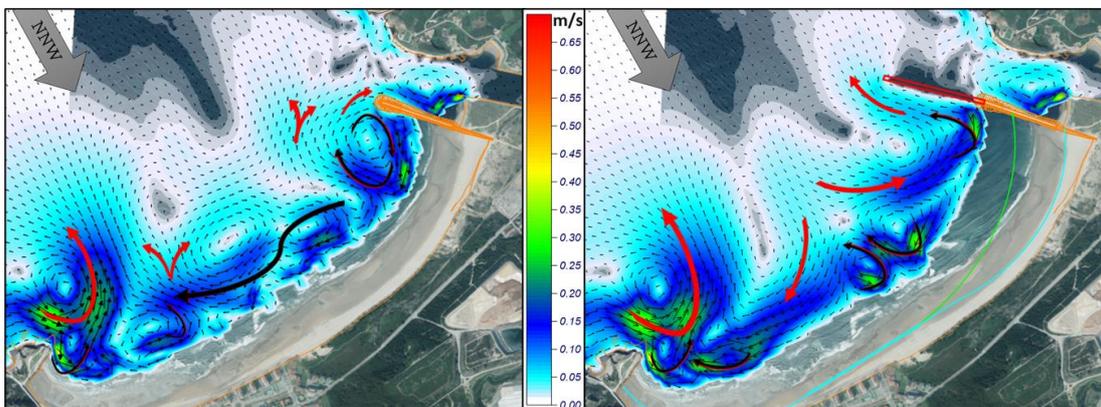


Figura 55. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 500 metros (derecha), durante un temporal del NNW en bajamar.

6.1.3 ALTERNATIVA 3 – Prolongación de 800 metros

La prolongación de 800 metros se diseña para que alcance la profundidad de cierre de la playa (-14.5 metros), calculada en el apartado 5.1.2. Esta prolongación representa un cambio significativo en la forma de la playa, la cual queda prácticamente protegida de los oleajes del N-E. Como se observa en la figura siguiente, el avance previsto de la línea de costa empieza a ser evidente en la zona central, incluyendo el inicio del paseo marítimo y alcanza los 420 metros en su extremo oriental, y un volumen de 3.800.000 m³.

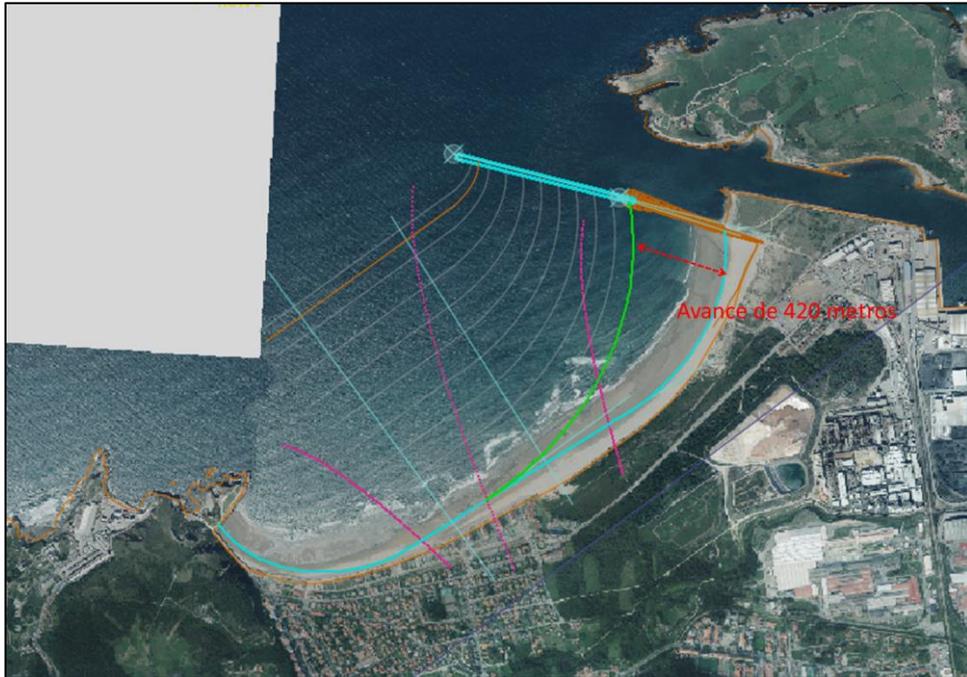


Figura 56. Cambios en la dirección y energía del FME tras la ampliación de 800m.

Temporal del WNW: La prolongación de 800 metros reduce la intensidad de la corriente exterior, aunque esta no pierde su continuidad. Se aprecia una disminución generalizada de la magnitud de las corrientes, incluyendo el flujo que circula en paralelo al espigón hasta el morro.

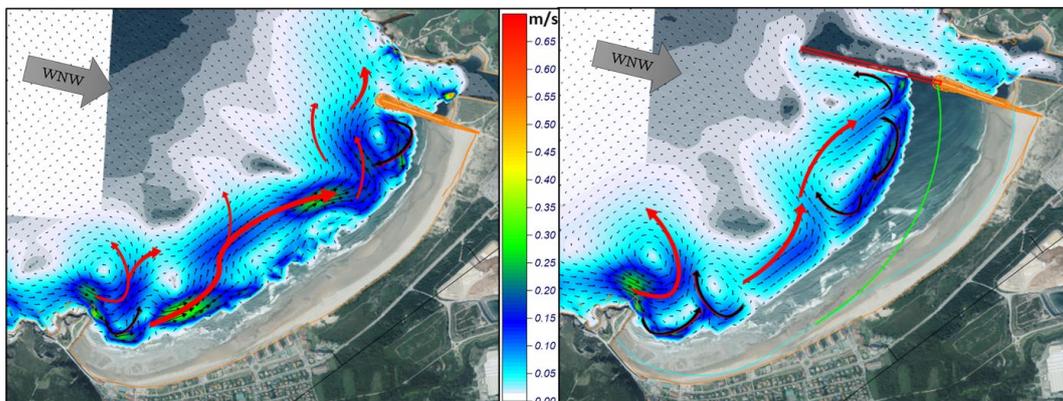


Figura 57. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 800 metros (derecha), durante un temporal del WNW en bajamar.

Temporal del NW: Se aprecian flujos de corrientes similares en magnitud e intensidad. Sin embargo, se aprecia una reducción prácticamente total del flujo que entraba directamente en la canal de navegación.

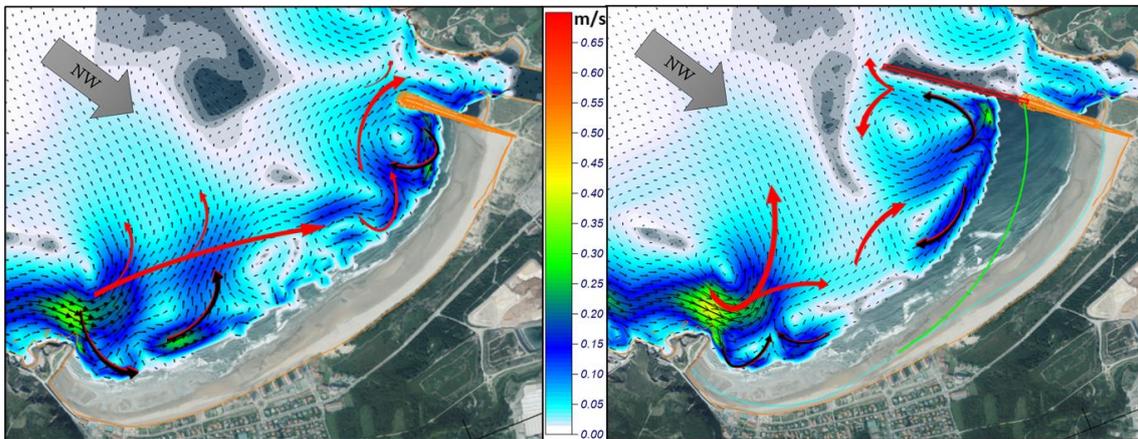


Figura 58. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 800 metros (derecha), durante un temporal del NW en bajamar.

Temporal del NNW: De nuevo, la prolongación de 800 metros supone un cambio sustancial en la configuración de las corrientes. El flujo que se genera a lo largo del espigón, forma parte de un bucle de gran magnitud que mueve el agua por todo el tramo oriental y que conecta con la corriente longitudinal interior.

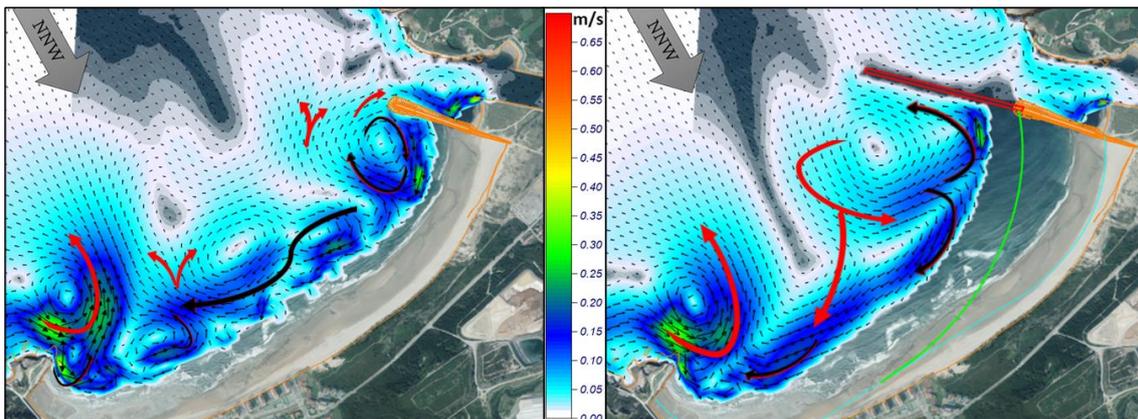


Figura 59. Comparación entre el funcionamiento actual de las corrientes (izquierda) y con la prolongación de 800 metros (derecha), durante un temporal del NNW en bajamar.

7 CONCLUSIONES

A partir del análisis realizado para determinar la eficacia de la prolongación del espigón y sus efectos sobre la playa, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La prolongación del espigón, siguiendo la sugerencia de la Dirección General de Costas, efectivamente disminuye la entrada de arena en la canal de navegación de la Ría de Avilés. Sin embargo, para que esta reducción sea completa, se requiere una prolongación mínima de 800 metros de longitud, hasta alcanzar la profundidad de cierre.

En general, cada prolongación modifica el patrón de corrientes de los temporales analizados (NNW, NW y WNW). Los principales cambios se manifiestan en el extremo oriental, donde se produce un cambio en el sentido de giro del bucle de corrientes, que discurre a lo largo del espigón hacia aguas profundas.

Cualquier extensión del dique conlleva un giro y un avance en el extremo oriental de la playa, lo que demanda una cantidad significativa de arena. En el escenario más pequeño, con una prolongación de 200 metros, se necesitaría aproximadamente 1.000.000 de m³ de arena. En el caso de prolongar hasta la profundidad de cierre, la demanda de arena se incrementa a 3.800.000 m³ para lograr un avance de 420 metros en el extremo oriental de la playa.

De acuerdo con estudios previos analizados (Flor-Blanco y Flor, 2011, Flor-Blanco et al., 2013; IHCantabria, 1996b y 2021; INDUROT, 1999), se confirma que el sistema playa/dunas de Salinas-El Espartal es un sistema abierto que recibe y pierde arena, originado por la deriva litoral que circula desde el cabo Vidrias y entra por el extremo occidental (Punta de la Peñona). Esto implica que la efectividad del espigón se verá reducida con el tiempo debido a la entrada de nueva arena en el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- De Pedraza Gilsanz, J., & González, R. M. C. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Rueda.
- Cabrera Ceñal, R., Flor, G., 1993. Evolución reciente del estuario del Nalón (Asturias). *Cuaternario y Geomorfol.* 7, 23–24.
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., 2011. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coast. Eng.* 58, 851–862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- CEDEX. Informes de seguimiento morfodinámico de la Playa de Salinas y bocana del Puerto de Avilés de distintas fases: Fase 2011 (CEDEX, 2012), Fase 2012 (CEDEX, 2013), Fase 2013 (CEDEX, 2014), Fase 2014 (CEDEX, 2015) y Fase 2014-2016 (CEDEX, 2017).
- Flor-Blanco, G., Flor, G., 2011. Alteraciones antrópicas por dragados en el estuario de Avilés y la playa/dunas de “Salinas-El Espartal” (Asturias), in: *Actas de Las VI Jornadas de Geomorfología Litoral*, Tarragona.
- Flor-Blanco, G., Flor, G., Pando, L., 2013. Evolution of the Salinas-El Espartal and Xagó beach/dune systems in north-western Spain over recent decades: Evidence for responses to natural processes and anthropogenic interventions. *Geo-Marine Lett.* 33, 143–157. <https://doi.org/10.1007/s00367-012-0301-3>
- Flor, G., Flor-Blanco, G., 2009. Aspectos morfológicos, dinámicos y sedimentarios del sector costero: desembocadura del Nalón-playa de Bañugues: problemática ambiental, 6º Simposio sobre el margen Ibérico Atlántico. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. España, Oviedo.
- GIOC, Universidad de Cantabria (2000). Documento de Referencia, Volumen 1. Dinámicas, Sección 4.
- Hallermeier, R.J., 1981. Critical wave conditions for sand motion initiation. *Coast. Eng. Res. Cent. FORT BELVOIR VA.* <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5962/bhl.title.47737>
- IHCantabria, 1996a. Procesos litorales en la ensenada y ría de Avilés, in: *Estudio de La Canal de Navegación Del Puerto de Avilés y Su Interacción Con La Playa Del Espartal*.
- IHCantabria, 1996b. Propuesta de soluciones, in: *Estudio de La Canal de Navegación Del Puerto de Avilés y Su Interacción Con La Playa Del Espartal*.
- INDUROT, 1999. Aportaciones del INDUROT al proyecto de regeneración medioambiental de la playa de San Juan-Salinas y mejora de la entrada al puerto de Avilés.
- INDUROT, 2017. Estudio Geomorfodinámico y de la cubierta vegetal de las dunas de El Espartal en el T.M. de Castrillón, Asturias.



Quetzalcóatl, O., González, M., Cánovas, V., Medina, R., Espejo, A., Klein, A., Tessler, M.G., Almeida, L.R., Jaramillo, C., Garnier, R., Kakeh, N., González-Ondina, J., 2019. SMCε, a coastal modeling system for assessing beach processes and coastal interventions: Application to the Brazilian coast. *Environ. Model. Softw.* 116, 131–152. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.03.001>