



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DPTO. DE CIENCIAS Y TÉCNICAS DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS PARA LA  
GESTIÓN DE LA COSTA

---

## **TESIS DOCTORAL**

**Análisis morfológico de las dunas primarias  
costeras y definición de los parámetros  
controladores de su forma de equilibrio**

---

*PhD THESIS*

*Morphological analysis of coastal foredunes and  
definition of parameters that drive their  
equilibrium shape*

---

Presentada por: **LAURA RIBAS DE ALMEIDA**

Dirigida por: **DR. ERNESTO MAURICIO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**  
**DR. RAÚL MEDINA SANTAMARÍA**

**Santander, 2017**



## Agradecimientos

A mis directores Mauricio González y Raúl Medina, por proporcionarme la oportunidad de desarrollar esta tesis. Por todo el tiempo que me han dedicado, por los conocimientos transmitidos y por las oportunidades ofrecidas, ¡muchas gracias!

Ao programa *Ciências sem Fronteira* do CNPq (*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil*) que apoiou esta tese a través da concessão de uma bolsa de doutorado pleno, sem a qual não seria possível a realização de este trabalho.

A todos los investigadores del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria que siempre están disponibles a ayudar y enseñar. Agradezco especialmente la ayuda de Antonio Tomás, Verónica Cánovas y Mar Cárdenas con los análisis de *k*-medias; de Melisa Menéndez con los análisis de régimen medio y extremal; de Sheila Abad con la obtención de los MDE y procesamiento de los mismos en ArcGis, y de June Gainza por la revisión del documento.

A todos los profesionales del grupo del IHCantabria de la cual hice parte (Ingeniería y Gestión de la Costa), en especial a Verónica Cánovas, Omar Quetzalcóatl, Erica Pellón, Camilo Jaramillo, Iñigo Aniel y Paula Gomes, por la ayuda que en algún momento me proporcionaron.

A todos los que trabajan en el IHCantabria y en la Universidad de Cantabria, que de una manera u otra facilitaron el desarrollo de este trabajo. Especial mención hago a los del equipo de administración, de la limpieza y de la seguridad del IHCantabria, que nos proporcionan las mejores condiciones para trabajar; a los de la biblioteca y administración de la Universidad de Cantabria por facilitar las gestiones necesarias.

Agradezco inmensamente a los amigos. Fueron mi familia en *terras de além-mar*, apoyándome, alegrándome, aguantando las protestas y los malos humores y animándome. Que nadie se sienta olvidado (son muchos para citar), pero a los que más agradezco son a Erika y Paula, por el compañerismo en todo y por los viajes; a Camilo, Paula, June, Camino, Felipe, Alfonso, Carlos Vinicius, Michele, Helius y Nacho por los cumpleaños, barbacoas, rutas, cenas, copas y todo lo demás; a Edurne, Alexia, Jose Manuel, Óscar, Mar, María, Iñigo, Elena, Jara, Olga (y otros menos frecuentes) por alimentar mi alma en las conversaciones a la hora de la comida y el espíritu a la hora de las cañas (viva Cañakí!).

A la familia española que me acogió y me enseñó esta cultura tan rica. Muchas gracias a todos los Velasco y los Ayensa, en especial a Iñigo, que además ayudó en las correcciones de la ortografía.

Um agradecimento especial a Ana Helena e Eduardo, meus queridos pais que, apesar da distância, jamais me deixaram sozinha e sempre estiveram apoiando e incentivando meu trabalho. Muito obrigada!



## **Resumen**

Las dunas primarias costeras son definidas como el primer cordón arenoso paralelo a la línea de costa, adyacente a la playa. Su desarrollo y morfodinámica está intrínsecamente conectado a la playa y a la dinámica costera. Justamente debido a esta fuerte interacción playa-duna primaria, estas últimas tienen la importante función de amortiguar impactos causados por eventos extremos, proporcionando sedimento a la playa cuando es necesario y volviendo a acumularlo en período de buen tiempo. Además, es una unidad morfológica de gran valor paisajístico y ecológico. Por estos motivos hay actualmente un gran afán en preservar y, si es necesario, reconstruirlas o crearlas.

Se reconoce que las dunas primarias, en una escala a largo plazo (décadas), pueden presentar una condición de equilibrio. La identificación de esta condición y los principales factores que determinan su morfología son de extremo interés a proyectos de recuperación y construcción de sistemas de dunas primarias/playa. Por lo tanto la presente tesis tiene como objetivo principal el de proponer un modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias, basado en la identificación de las características morfológicas y su relación con las dinámicas eólica y marina.

La evaluación de los parámetros morfométricos y de forma de 193 perfiles de playa seca/duna primaria del litoral norte de España, con características próximas a la condición de equilibrio, indicaron que el tamaño de las dunas primarias puede variar significativamente, sin embargo su forma, principalmente el tramo de mayor conexión con la playa (tramo cóncavo), es bastante constante. Se verificó que los parámetros morfométricos de las dunas primarias en equilibrio (volumen, altura, anchura y pendiente máxima) están muy correlacionados, permitiendo la proposición de ecuaciones de estas relaciones alométricas.

Se calculó parámetros indicadores del potencial de transporte eólico y de la dinámica marina, utilizando bases de datos de varios años y metodologías consolidadas, y se correlacionó estos con las características de tamaño y posicionamiento de las dunas primarias. Se identificó que el transporte eólico potencial medio anual, teniendo en cuenta la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP\alpha$ ), está muy correlacionado con el tamaño de las dunas primarias. La anchura de playa, tanto normal a la línea de costa como en la dirección media del viento, no está fuertemente relacionada al tamaño de las dunas primarias en equilibrio, lo que lleva a creer que el fetch disponible es mayor que el fetch crítico.

La dinámica marina parece ser la responsable de la localización de las dunas primarias evaluadas, siendo la cota del pie de la duna primaria equivalente a la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI<sub>10a</sub>). También se verificó que en cuanto más energético el clima marítimo, mayor es el tamaño de las dunas primarias.

Basado en estos resultados se propone un modelo de funcionamiento a largo plazo de las dunas primarias en equilibrio. En la situación en que la dinámica marina es despreciable, o sea, sin la presencia de oleaje y marea meteorológica, al desarrollarse las dunas primarias reciben sedimento de la playa, crecen y avanzan sobre las mismas. Debido a que la playa es su fuente de sedimento, ocurre una autorregulación, con la duna recibiendo cada vez menos sedimento a medida que avanza. Esta progresión de la duna ocurrirá hasta un punto en la playa donde ya no recibe suficiente sedimento debido a una limitación de fetch, llamado fetch de autorregulación. Por otro lado, en la condición en que la dinámica marina es importante la duna avanzará sobre la playa hasta un punto determinado por la cota de inundación de eventos extremos. Esto significa que, la dinámica marina definirá la anchura de playa seca desde la pleamar hasta el pie de la duna, y si esta es mayor que el fetch crítico, las dunas estarán totalmente desarrolladas y su tamaño será una función del  $DP\alpha$ . Si la anchura de playa seca es menor que el fetch crítico, el tamaño de las dunas primarias será una función del  $DP\alpha$  y de un coeficiente que tiene en cuenta la limitación del fetch.

Finalmente, se propone un modelo conceptual de perfil de equilibrio de dunas primarias, considerando que los perfiles estudiados se encuentran en la condición de dunas primarias totalmente desarrolladas y, por lo tanto, su tamaño será determinado a partir de  $DP\alpha$ . Este perfil de equilibrio de las dunas primarias tendrá como característica una cresta en forma de meseta, a diferencia de la forma convexa real. De la cresta hasta la intersección con la playa seca la duna primaria presentará una forma cóncava que puede ser reproducida por una ecuación exponencial. Tanto la anchura de la cresta de la duna como su altura serán una función de  $DP\alpha$ . Una propuesta para estimar la anchura de playa seca mínima fue presentada. La altura de la playa seca es la distancia vertical entre la pleamar media y la cota correspondiente a la  $CI_{10a}$ . Considerando que la anchura mínima de la playa seca ocurrirá en la condición del evento extremo equivalente al que genera la  $CI_{10a}$ , se puede estimarla a partir del cálculo de su pendiente utilizando la ecuación propuesta por Díez et al. (2017b).

Como conclusión final se puede afirmar que el modelo de funcionamiento a largo plazo presentado en esta tesis consigue explicar que la morfología de las dunas primarias en equilibrio es dependiente de la actuación conjunta de la dinámica marina y eólica. El modelo y metodología del perfil de equilibrio de las dunas primarias representa satisfactoriamente la realidad y, salvo algunas limitaciones, podrá ser aplicado en proyectos de ingeniería costera.

## Índice

Agradecimientos .....	i
Resumen .....	iii
Índice.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xvii
Lista de símbolos.....	xix
I. Introducción .....	3
1. Introducción y motivación .....	3
2. Resumen del estado del arte .....	6
2.1. El desarrollo de las dunas primarias.....	6
2.2. Forma de las dunas primarias.....	7
2.3. Parámetros que influyen en la morfología de las dunas primarias .....	7
2.4. Modelos de funcionamiento de las dunas primarias.....	9
2.5. Conclusiones del estado del arte .....	11
3. Objetivos .....	11
3.1. Objetivo principal.....	11
3.2. Objetivos específicos.....	11
4. Organización de la tesis.....	11
II. Caracterización morfométrica y de la forma del perfil .....	15
1. Introducción .....	15
2. Metodología .....	16
2.1. Datos utilizados .....	16
2.2. Definición de parámetros morfométricos.....	21
2.3. Método de clasificación .....	24
3. Descripción de las características morfométricas de las áreas de estudio.....	26
3.1. Puntal de Somo.....	27
3.2. Evaluación de todas las áreas de estudio.....	31
4. Evaluación de los parámetros morfométricos .....	32
4.1. Resultados y discusión .....	33
4.2. Conclusiones acerca de la evaluación de los parámetros morfométricos.....	49
5. Clasificación de la forma del perfil .....	51
5.1. Resultados y discusión .....	51
5.2. Conclusiones acerca de la evaluación de la forma del perfil.....	61

III.	Influencia de las dinámicas marinas y eólicas en la morfología del perfil de las dunas primarias.....	65
1.	Introducción.....	65
2.	Metodología.....	66
2.1.	Datos utilizados .....	66
2.2.	Caracterización de la dinámica eólica .....	67
2.3.	Propagación y caracterización de la dinámica marina costera .....	71
3.	Descripción de las características dinámicas de las áreas de estudio .....	74
3.1.	Puntal de Somo.....	75
3.2.	Las otras áreas de estudio .....	78
4.	Resultados y discusión .....	80
4.1.	Consideraciones sobre la metodología de cálculo de la dinámica eólica .....	80
4.2.	Correlaciones entre los parámetros morfométricos y de la dinámica eólica .....	82
4.3.	Correlaciones entre los parámetros morfométricos y de la dinámica marina.....	90
4.4.	Propuesta de definición de la anchura de playa para una duna en equilibrio .....	102
5.	Conclusiones .....	104
IV.	Modelo de funcionamiento teórico.....	109
1.	Introducción.....	109
2.	Funcionamiento de la oscilación acumulación/erosión de la duna a corto y medio plazo .	110
2.1.	Período de acumulación: .....	110
2.2.	Período de erosión:.....	112
2.3.	Equilibrio entre las dos situaciones: .....	114
3.	Modelo de equilibrio a largo plazo.....	114
3.1.	Sistemas playa/duna dominados por la dinámica eólica: considerando solamente la autorregulación en función del transporte eólico .....	115
3.2.	Sistemas playa/duna dominados por la dinámica marina: considerando el transporte eólico y la dinámica marina.....	116
3.3.	Situaciones teóricas .....	117
3.4.	Comparación entre áreas de estudio .....	119
4.	Conclusiones .....	120
V.	Modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias y su aplicación para la regeneración de sistemas playa/dunas .....	123
1.	Introducción.....	123
2.	Propuesta de un modelo conceptual .....	124
2.1.	Bases teóricas .....	124
2.2.	Modelo conceptual .....	126
2.3.	Definición de la ecuación del perfil de equilibrio de las dunas primarias.....	127
2.4.	Parámetros de la ecuación de perfil de equilibrio de las dunas primarias .....	131

3.	Metodología para aplicar el modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias .....	136
4.	Comparación del modelo con datos reales .....	138
5.	Conclusiones .....	143
VI.	Consideraciones finales y futuras líneas de investigación. ....	147
1.	Conclusiones finales y aportaciones de esta tesis .....	147
2.	Consideraciones para las futuras líneas de investigación.....	149
3.	Futuras líneas de investigación .....	151
Anexos		
A.I.	Estado del arte .....	157
1.	Definiciones .....	157
2.	Desarrollo de las dunas primarias .....	158
3.	Morfología de las dunas primarias .....	160
4.	Clasificación de la morfología de las dunas primarias.....	161
5.	Parámetros ambientales que influyen en la morfología de las dunas primarias.....	172
5.1.	Viento y potencial de transporte eólico.....	172
5.2.	Sedimento.....	176
5.3.	Características de la playa.....	176
5.4.	Características de la dinámica costera.....	179
5.5.	Vegetación.....	181
6.	Influencia humana sobre las dunas primarias.....	182
7.	Modelos de funcionamiento de las dunas primarias .....	184
7.1.	Modelos a corto plazo .....	184
7.2.	Modelos a medio plazo .....	186
7.3.	Modelos a largo plazo .....	187
AII.	Caracterización de las áreas de estudio y sus dunas primarias.....	197
1.	Caracterización morfométrica y morfológica.....	197
1.1.	Puntal de Somo.....	197
1.2.	Valdearenas .....	197
1.3.	Bayas .....	201
1.4.	Doniños .....	205
1.5.	Baldaio .....	208
1.6.	Traba .....	212
2.	Caracterización de la dinámica.....	216
2.1.	Caracterización de la dinámica regional.....	216
2.1.	Caracterización de la dinámica de cada playa.....	223
Referencias bibliográficas .....		247



## Lista de figuras

Figura I.1 – Resumen de los principales factores que influyen en la morfología de las dunas primarias y la interconexión entre los mismos.....	8
Figura II.1 - Ejemplo de obtención de los perfiles transversales, utilizando el MDT05 y la ortofoto, para la playa de Valdearenas/Liencre (Cantabria).....	17
Figura II.2 – Ejemplo de los perfiles obtenidos para la playa de Valdearenas/Liencre (Cantabria). ....	17
Figura II.3 – Niveles de referencia utilizados para la playa de Liencre ..... 19	19
Figura II.4 – Perfil obtenido con la definición de los puntos pertenecientes al sistema playa seca/ duna primaria (desde pleamar viva media observada (PVMO) hasta cresta de la duna primaria) y cambio de referencia de los ejes X (Abscisa) e Y (Ordenada). ....	22
Figura II.5 – Definición de los parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria.....	24
Figura II.6 – Separación del perfil.....	26
Figura II.7 – Localización de las playas seleccionadas en la costa atlántica española, para la evaluación de sus dunas primarias. ....	27
Figura II.8 –Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) de la playa del Puntal de Somo y perfiles evaluados en este estudio. ....	28
Figura II.9 – Perfiles de la playa/duna primaria del Puntal de Somo (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar). ....	29
Figura II.10 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa del Puntal de Somo. ....	30
Figura II.11 – Variación espacial de las cotas del pie y cresta de las dunas de todos los perfiles evaluados en el litoral norte de España. ....	32
Figura II.12 – Variación espacial del volumen de todo el <i>backshore</i> y de las dunas primarias de todos los perfiles evaluados en el litoral norte de España. ....	32
Figura II.13 – Relación entre pendiente de la playa y de la duna con la pendiente del pie de la duna primaria (PendPie).....	34
Figura II.14 – Relación entre los valores de pendiente media calculada a través del mejor ajuste lineal y calculada por la relación entre altura y longitud del perfil (tangente). ....	35
Figura II.15 – Histograma de clases de pendiente media y máxima (en grados) de las dunas seleccionadas en la costa norte de España ..... 36	36
Figura II.16 – Ejemplo de cálculo de la pendiente media para las dunas primarias ..... 36	36
Figura II.17 – Relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos cota de coronación de la duna y altura, para todos los perfiles evaluados (izquierda) y con valores medios de cada playa (derecha). ..	37
Figura II.18 – Relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos volumen de la duna primaria y volumen del <i>backshore</i> , para todos los perfiles evaluados (izquierda) y para los valores medios de cada playa (derecha).....	38
Figura II.19 – Relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos anchura de la duna primaria y anchura del <i>backshore</i> , para todos los perfiles evaluados (izquierda) y para valores medios de cada playa (derecha). ....	39

Figura II.20 – Relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos de las dunas primarias: volúmenes, alturas, anchuras y pendientes máximas; para todos los perfiles evaluados (izquierda) y para valores medios de cada playa (derecha).....	40
Figura II.21 – Relaciones entre tamaño medio del sedimento y los parámetros morfométricos medios de las dunas primarias para cada playa estudiada. ....	41
Figura II.22 – Relación entre la pendiente característica del pie de la duna primaria (PendPie) y la pendiente media de la playa con el tamaño medio del sedimento. ....	42
Figura II.23 – Correlaciones entre anchura de la playa y volumen de la duna: (a) para todos los perfiles evaluados; (b) para los valores medios de cada playa; (c) para los perfiles de cada playa. ....	43
Figura II.24 - Correlaciones entre pendiente de la playa y volumen de la duna: (a) para todos los perfiles evaluados; (b) para los valores medios de cada playa; (c) para los perfiles de cada playa. ....	45
Figura II.25 - Relación entre la pendiente de la duna primaria y la anchura de la playa.....	46
Figura II.26 – Formas “tipo” (centroides, adimensionales) de la duna tramo convexo y porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides, siendo el tipo 0 aquellos perfiles que presentan el tramo convexo de la duna como no identificado/detectado. ....	52
Figura II.27 – Centroides tipo del tramo “duna tramo convexo” (línea roja) con banda de confianza del 95% (líneas negras finas). En cada gráfica está presentado el porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides y la variación máxima en el eje Y, dentro de cada tipo ( $\Delta_{max}$ ). ....	52
Figura II.28 – Formas “tipo” (centroides) de la duna tramo cóncavo y porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides. ....	53
Figura II.29 – Centroides tipo del tramo “duna tramo cóncavo” (línea roja) con banda de confianza del 95% (líneas negras finas). En cada gráfica está presentado el porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides y la variación máxima en el eje Y, dentro de cada tipo ( $\Delta_{max}$ ). ....	53
Figura II.30 – Formas “tipo” (centroides) de la playa seca y porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides.....	54
Figura II.31 – Centroides tipo del tramo “playa seca” (línea roja) con banda de confianza del 95% (líneas negras finas). En cada gráfica está presentado el porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides y la variación máxima en el eje Y, dentro de cada tipo ( $\Delta_{max}$ ). ....	55
Figura II.32 – Proporción de centroides tipo encontrados en cada una de las playas, para cada tramo del perfil (Duna tramo convexo, Duna tramo cóncavo y Playa seca).....	56
Figura II.33 – Combinación entre tipos de las partes de la duna en función de los tipos de playa seca. ....	57
Figura II.34 – Clasificación de la forma de los perfiles de los 3 tramos conjuntos (duna tramo convexo, duna tramo cóncavo y playa seca), adimensionalizados independientemente. La parte recta en la duna tramo convexo indica que esta parte no fue posible de ser detectada. ....	58
Figura II.35 – (Izquierda) Centroides obtenidos de la evaluación <i>k</i> -medias con todo el perfil del sistema playa/duna primaria, adimensionalizados por tramos “duna tramo convexo”, “duna tramo cóncavo” y “playa seca” separadamente (línea roja) con banda de confianza del 95% (líneas negras finas) y (Derecha) Perfiles originales (no adimensionalizados) agrupados por los centroides tipo. ....	61
Figura III.1 – Número de horas de datos de viento registrados, cada año, por las boyas localizadas delante de Cantabria, Asturias y Galicia (la línea roja marca el umbral de 5600hs).....	68
Figura III.2 – Definición de los parámetros para calcular el transporte potencial considerando la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP_{\alpha}$ ) y el fetch efectivo ( $fetch_e$ ). ....	71

Figura III.3 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas del Puntal de Somo, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea, $U_{3m} > U_{L,3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en $m^3/m/año$ ).....	75
Figura III.4 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa del Puntal de Somo: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad $H_s - T_p$ .....	76
Figura III.5 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/ intermedias hasta la playa del Puntal de Somo. ....	77
Figura III.6 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en la playa del Puntal de Somo. ....	78
Figura III.7 – Relaciones entre la velocidad media del viento y los parámetros morfométricos medios indicadores del tamaño de las dunas primarias y la pendiente máxima. ....	83
Figura III.8 – Relaciones entre el transporte eólico potencial (DP) y los parámetros morfométricos medios indicadores del tamaño de las dunas primarias .....	84
Figura III.9 – Relaciones entre el transporte eólico potencial* $\cos\alpha$ ( $DP\alpha$ ) y los parámetros medios de tamaño de la duna primaria.....	86
Figura III.10 – Relación entre el fetch efectivo y el volumen de la duna (VolDuna): (a) para todos los perfiles evaluados; (b) para los valores medios de cada playa; (c) para los perfiles de cada playa.....	89
Figura III.11 – Relaciones entre los valores de altura de ola significativa media ( $H_s50\%$ ) de los puntos POI y los parámetros medios indicadores del tamaño de las dunas primarias de los perfiles asociados. ....	92
Figura III.12 – Relaciones entre los valores de altura de ola significativa asociada a eventos extremos ( $H_s12$ ) de los puntos POI y los parámetros medios indicadores del tamaño de las dunas primarias de los perfiles asociados. ....	92
Figura III.13 – Relaciones entre $\Omega$ de los puntos POI y los parámetros indicadores del tamaño de las dunas primarias de los perfiles asociados.....	94
Figura III.14 – Relaciones entre $\Omega$ y los parámetros indicadores del tamaño de la duna, con ajuste a una función Gaussiana para los valores de volumen medio de los perfiles asociados a cada punto POI y su respectivo $\Omega$ (izquierda) y para los valores medios por playa (derecha).....	95
Figura III.15 – Relación entre el Flujo Medio de Energía (FME) de los puntos POI y los parámetros indicadores del tamaño de las dunas primarias de los perfiles asociados.....	97
Figura III.16 – Datos de cotas del pie de la duna comparados con datos de cota de inundación, evaluados con régimen medio (percentil 99% (CI_99%) y valor de CI superado solamente 12 horas al año (CI_12h)) y distribución de extremos (cota de inundación con período de retorno de 2 (CI_2a) y de 10 años (CI_10a)).....	99
Figura III.17 – Correlación entre los valores medios de cota del pie de las dunas primarias de los perfiles asociados a cada punto POI (izquierda) y por playa (derecha) y la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI_10a).....	99
Figura III.18 - Correlación entre los parámetros indicadores del tamaño de la duna primaria y la cota de inundación con período de retorno de 10años (CI_10a), valores medios asociados a cada punto POI (izquierda) y valores medios por playa (derecha). ....	100

Figura III.19 - Comparación entre los valores de anchura de playa seca medida y la anchura de playa estimada. ....	104
Figura IV.1 – Etapas del período de acumulación de las dunas primarias. ....	111
Figura IV.2 – Causas del período de erosión de la duna primaria. ....	113
Figura IV.3 – Desarrollo de las dunas primarias en condición con transporte eólico potencial y sin influencia importante de la dinámica marina. Las dunas crecen y avanzan sobre la playa hasta un punto en que ocurre una autorregulación: avanzan sobre el fetch disponible, lo que genera una disminución en el aporte sedimentario, frenando el avance y crecimiento. Como consecuencia el tamaño final de las dunas primarias (en el tiempo $t_{i+n}$ ) será menor que el potencial debido a limitación en el fetch disponible (anchura de playa). ....	116
Figura IV.4 - Desarrollo de las dunas primarias en condición de transporte eólico potencial y con influencia importante de la dinámica marina. Las dunas primarias crecen y avanzan sobre la playa hasta el límite permitido por la dinámica marina. Debido a que el fetch disponible (anchura de playa) es mayor que el fetch crítico, las dunas estarán totalmente desarrolladas y su tamaño será proporcional al transporte eólico potencial. ....	117
Figura IV.5 – Comparación de condiciones de equilibrio ( $t_{i+\infty}$ ) en función del transporte eólico potencial diferenciado, para una misma condición de dinámica marina (a la izquierda) y en función de diferentes dinámicas marinas, para una misma condición de transporte eólico potencial (a la derecha). ....	118
Figura IV.6 – Variación longitudinal, en la playa de Puntal de Somo, de la altura de playa equivalente a la cota de inundación con período de retorno (para cada punto POI), media de anchura de playa y volumen de la duna (para los perfiles más próximos a cada punto POI). ....	120
Figura V.1 – Propuesta de un modelo conceptual que describe la forma del perfil de equilibrio de dunas primarias. ....	127
Figura V.2 – Parámetros de la ecuación obtenidos con el ajuste exponencial ....	128
Figura V.3 – Parámetros de la ecuación obtenidos con el ajuste potencial ....	129
Figura V.4 – Variación espacial de la calidad de los ajustes (por $R^2$ en la gráfica superior y RMSE en la gráfica inferior) para todos los 193 perfiles evaluados. ....	129
Figura V.5 –Presentación visual de los parámetros de la ecuación exponencial para las dunas primarias ....	130
Figura V.6 – Variación por perfil/ playa de los valores de $b$ e histograma de frecuencia de cada clase de $b$ .131	
Figura V.7 - Comparación de la bondad de los ajustes con el parámetro $b$ libre o fijo al valor de 0.07. ....	133
Figura V.8 – Bondad de los ajustes considerando $b$ fijo (0.07).....	133
Figura V.9 - Variación de valores de $c$ y altura de la duna ( $H_{duna}$ , desde cota de inicio=CI_10a hasta la cresta de la duna) para cada uno de los 193 perfiles. ....	134
Figura V.10 – Correlación entre el parámetro $c$ y la altura de la duna (desde cota de inicio=CI_10a hasta la cresta de la duna) ....	134
Figura V.11 – Correlaciones entre el parámetro $c$ y el parámetro del transporte eólico potencial considerando la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP\alpha$ ). ....	135
Figura V.12 - Relación entre $x_0$ y la anchura de la duna solamente del tramo convexo (arriba) y de toda la duna (abajo) ....	135
Figura V.13 – Correlación entre el parámetro $x_0$ y el transporte eólico potencial considerando la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP\alpha$ ).....	136

Figura V.14 – Perfiles de equilibrio de la duna primaria y playa seca mínima, de las áreas de estudio de esta tesis, obtenidos a partir de la metodología propuesta.....	137
Figura V.15 - Ejemplos de aplicación del modelo de perfil de equilibrio con la ecuación exponencial y $b=0.07$ (ecuación V.8).....	139
Figura V.16 – Comparación entre los parámetros de tamaño de la duna primaria medidos y obtenidos a partir de la aplicación del modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias. ....	141
Figura AI.1 – Perfil del sistema playa-duna y sus principales referencias .....	158
Figura AI.2 – Relaciones entre la dinámica de la línea de costa, el manejo, la actividad eólica y la forma de las dunas. (Figura obtenida de Arens & Wiersma 1994).....	160
Figura AI.3 – Clasificación propuesta por Hesp (2002), que varía del estadio 1 (más estable) hasta el estadio 5 (más erosionado). Las dunas estables pueden aumentar de altura en costas estables o avanzar sobre la playa en costas progradantes (cuadro A); las dunas que sufren erosión pueden retroceder, perder altura o crear casquetes erosivos ( <i>blowout</i> ), dependiendo del grado de retroceso de la línea de costa (cuadro B y C). A cualquiera de los estadios un evento de temporal puede causar la formación de un escarpe (cuadro D) (Figura obtenida de Hesp 2002).....	162
Figura AI.4 – Características de la forma del perfil y su comportamiento de transporte y deposición de sedimento (Figura obtenida de Ollerhead et al. 2013).....	164
Figura AI.5 – Clasificación de los tipos de perfil de dunas primarias en función del desarrollo a largo plazo. (Figura obtenida de Arens & Wiersma, 1994) .....	165
Figura AI.6 – Representación esquemática de la zona de variación del perfil de playa subacuática y su forma de equilibrio (figura obtenida de Davidson-Arnott 2010) .....	166
Figura AI.7 – Esquema del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos propuesto por Bernabeu et al. (2001) .....	167
Figura AI.8 – Esquema del perfil de equilibrio en dos tramos con la influencia de la morfodinámica de la playa y marea, propuesto por Bernabeu et al. (2002).....	167
Figura AI.9 – Tipos de perfil de equilibrio propuestas por Dai et al. (2007): cóncavo en la parte superior con bermas altas reflejantes, pendiente inclinada del frente de playa (U-EBP); Cóncavo en la parte inferior del perfil, sin berma reflejante, pendiente suave del frente de playa (D-EBP); Características medias con bermas reflejantes; los sectores por encima del agua presentan perfil cóncavo en la parte superior y en los sectores abajo del nivel del mar presentan perfil cóncavo en la parte inferior (M-EBP).....	168
Figura AI.10 – Clasificación de la forma de playas, dependiendo del estado morfodinámico, propuesta por Wright & Short (1984) (figuras obtenidas de GIOC 2003).....	169
Figura AI.11 - Clasificación de la forma de perfil de playas, dependiendo del estado morfodinámico y de la marea, propuesta por Masselink & Short (1993) (figuras obtenidas de GIOC 2003). ....	170
Figura AI.12 – Clasificación de formas de perfil de playa seca (izquierda de la figura), dependientes del estado morfodinámico de la playa, y perfiles “tipo” ( <i>clusters</i> ) obtenidos con la aplicación del $k$ -medias a perfiles reales adimensionalizados (derecha de la figura. No presentado para el Tipo 4): Tipo 1 = playas disipativas; Tipo 2 = playas intermedias; Tipo 3 = playas reflejantes; Tipo 4 = playas ultradisipativas (figura adaptada de Díez et al. 2017a). ....	171
Figura AI.13 – Cambios en el flujo de sedimento con la distancia de fetch para tres diferentes velocidades de viento, medidos por Davidson-Arnott & Law (1990). Gráfica obtenida de Bauer & Davidson-Arnott (2002).....	175

Figura AI.14 – Iso-líneas de velocidad media del viento medidas en playas disipativas, intermedias y reflejantes (Figura obtenida de Hesp 2012) .....	177
Figura AI.15 - Modelo conceptual de la relación de balance de sedimento de la playa y el balance de sedimento de las dunas primarias, transferencia de arena hacia interior, y topografías resultantes en el sistema de reparto de arena propuesto por Psuty (Figura obtenida de Psuty, 2004). .....	189
Figura AII.1 – Localización de las playas seleccionadas en la costa atlántica española, para la evaluación de sus dunas primarias. ....	197
Figura AII.2 – Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) de la playa de Valdearenas y perfiles evaluados en este estudio.....	198
Figura AII.3 – Perfiles de la playa/duna primaria de Valdearenas (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar). ....	199
Figura AII.4 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa de Valdearenas. ....	200
Figura AII.5 – Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) de la playa de Bayas y perfiles evaluados en este estudio.....	202
Figura AII.6 – Perfiles de la playa/duna primaria de Bayas (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar). ....	203
Figura AII.7 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa de Bayas. ....	204
Figura AII.8 – Imágenes (fuente: Galicia (2011)) de la playa de Doniños y perfiles evaluados en este estudio. ....	205
Figura AII.9 – Perfiles de la playa/duna primaria de Doniños (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar). ....	206
Figura AII.10 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa de Doniños. ....	207
Figura AII.11 – Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) de la playa de Baldaio y perfiles evaluados en este estudio.....	209
Figura AII.12 – Perfiles de la playa/duna primaria de Baldaio (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar). ....	210
Figura AII.13 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Baldaio. ....	211
Figura AII.14 – Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) y perfiles evaluados en este estudio de la playa de Traba.....	212
Figura AII.15 – Perfiles de la playa/duna primaria de Traba (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar). ....	213
Figura AII.16 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa de Traba.....	214
Figura AII.17 – Localización de las playas estudiadas, las boyas <i>offshore</i> de donde se obtuvieron datos de viento y de oleaje a nivel regional (puntos azules) y los puntos de datos de oleaje obtenidos por reanálisis (DOW) utilizados en cada playa (puntos rojos). ....	216
Figura AII.18 – Evaluación de los datos de viento de cada una de las boyas, con presentación del número de horas registradas y seleccionadas (>5.5m/s) en cada año evaluado. ....	217

Figura AII.19 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Valdearenas, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea, $U_{3m} > U_{L3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en $m^3/m/año$ ).....	224
Figura AII.20 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Valdearenas: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp. ....	225
Figura AII.21 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/ intermedias hasta la playa de Valdearenas. ....	226
Figura AII.22 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Valdearenas. ....	227
Figura AII.23 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Bayas, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea, $U_{3m} > U_{L3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en $m^3/m/año$ ).....	228
Figura AII.24 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Bayas: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp. ....	229
Figura AII.25 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/ intermedias hasta la playa de Bayas. ....	230
Figura AII.26 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Bayas.....	231
Figura AII.27 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Doniños, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea, $U_{3m} > U_{L3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en $m^3/m/año$ ).....	232
Figura AII.28 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Doniños: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp.....	233
Figura AII.29 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/ intermedias hasta la playa de Doniños. ....	234
Figura AII.30 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Doniños. ....	235
Figura AII.31 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Baldaio, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea, $U_{3m} > U_{L3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en $m^3/m/año$ ).....	236
Figura AII.32 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Baldaio: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp.....	237
Figura AII.33 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/ intermedias hasta la playa de Baldaio. ....	238

Figura AII.34 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Baldaio.....	239
Figura AII.35 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Traba, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea, $U_{3m} > U_{t,3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en $m^3/m/año$ ). .....	240
Figura AII.36 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Traba: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp. ....	241
Figura AII.37 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/ intermedias hasta la playa de Traba. ....	242
Figura AII.38 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Traba. ....	243

## Lista de tablas

Tabla II.1 - Playas seleccionadas para la evaluación de la forma del perfil de equilibrio de las dunas primarias .....	18
Tabla II.2 – Tamaño del grano medio (D50, mm) de la zona intermareal, playa seca y duna primaria de playas de Cantabria (fuente: Triax, 2015) y la relación entre los mismos.....	20
Tabla II.3 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria del Puntal de Somo (Número de perfiles evaluados=55). .....	29
Tabla II.4 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de áreas de estudio localizadas en el litoral norte de España (Número de perfiles evaluados=193). .....	31
Tabla II.5 – Relaciones alométricas encontradas para las dunas primarias estables de la costa atlántica de España.....	46
Tabla II.6 – Comparación entre las relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos de las playas/dunas de la costa atlántica de España, evaluados en esta investigación, y relaciones encontradas en otras investigaciones.....	47
Tabla III.1 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa del Puntal de Somo.....	78
Tabla III.2 – Parámetros medios de la morfología y dinámica eólica y marina de las playas estudiadas.....	79
Tabla III.3 – Estimación de la anchura de playa seca mínima para la localización de las dunas primarias, considerando la situación de evento extremo con período de retorno de 10 años. ....	103
Tabla V.1 – Porcentaje de perfiles que mejor ajustan a cada una de las ecuaciones propuestas, basado en los valores de RMSE.....	130
Tabla V.2 – Resultado de los valores del parámetro <i>b</i> de la ecuación exponencial, para cada playa y general (todos los datos) .....	132
Tabla V.3 – Porcentaje medio (considerando los 193 perfiles evaluados) de diferencia entre el volumen obtenido por el modelo exponencial y los valores de volumen real (desde el inicio de las dunas =CI_10a hasta la cresta) .....	138
Tabla V.4 –Parámetros de tamaño de la duna primaria medidos y obtenidos a partir de la aplicación del modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias y comparación a través del porcentaje de diferencia (Lconvex= anchura del tramo duna convexa (m); Hduna=altura de la duna (m); VolDuna= volumen de la duna primaria (m <sup>3</sup> /m).....	141
Tabla AII.1 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Valdearenas (Número de perfiles evaluados=18). .....	201
Tabla AII.2 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Bayas (Número de perfiles evaluados=20). .....	203
Tabla AII.3 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Doniños (Número de perfiles evaluados=27). .....	208
Tabla AII.4 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Baldaio (Número de perfiles evaluados=39). .....	210
Tabla AII.5 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Traba (Número de perfiles evaluados=34). .....	215
Tabla AII.6 – Caracterización de viento para cada región de España estudiada, considerando todos los datos de viento para los años con registro de más de 5600h/año. ....	219

Tabla AII.7 – Caracterización de viento para cada región de España estudiada, corregidos para tierra, considerando solamente las velocidades superiores a la velocidad de inicio de movimiento de los granos ( $U_{t,3m}= 5.5m/s$ ).....	220
Tabla AII.8 – Niveles de marea registrados en puertos del norte de España (Fuente: Puertos del Estado) ...	221
Tabla AII.9 – Caracterización del oleaje para cada región de España estudiada, con datos provenientes de las boyas <i>offshore</i> (todos los datos registrados en la boya) .....	222
Tabla AII.10 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Valdearenas .....	227
Tabla AII.11 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Bayas .....	231
Tabla AII.12 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Doniños .....	235
Tabla AII.13 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Baldaio.....	239
Tabla AII.14 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Traba.....	243

## Lista de símbolos

$a$  - parámetro de la curva de perfil de equilibrio de dunas primarias que indica la distancia en el eje Y desde la asíntota de la curva hasta cuando la curva cruza el eje Y

$A_t$  - constante adimensional en el cálculo de  $u_{*t0}$

$b$  - parámetro de la curva de perfil de equilibrio de dunas primarias que representa la concavidad o el cuán rápido la curva llega a su asíntota

$c$  - parámetro de la curva de perfil de equilibrio de dunas primarias que corresponde a la distancia vertical entre  $Y=0$  y la asíntota de la curva, o sea, la llamada  $H_{\max}$  del modelo conceptual

$C_g$  - celeridad de grupo del oleaje

CI - Cota de inundación

CI\_10a - Cota de inundación con período de retorno de 10 años

CI\_2a - Cota de inundación con período de retorno de 2 años

CI\_12h - Cota de inundación superada solamente 12 horas al año

CI\_99% - Cota de inundación con probabilidad de no excedencia de 99%

D - Tamaño de grano del sedimento

D50 - Tamaño de grano medio del sedimento

Dir - Dirección del oleaje

dLC - dirección de la línea de costa

DOW (*downscaled ocean waves*) - puntos de datos de oleaje generados a partir de reanálisis)

DP (*potential drift*) - transporte eólico potencial

DP $\alpha$  - transporte potencial considerando el ángulo del viento con relación a la línea de costa

Fc - fetch crítico

$fetch_e$  - fetch efectivo

FE - flujo de energía

FME - Flujo Medio de Energía

$g$  - aceleración de la gravedad

GEV (*generalized extreme value*) - análisis estadística de extremos

$h$  - profundidad de un punto

$H_0$  - altura de ola significativa a 80m, en la ecuación de  $R_{2\%}$  de Stockdon et al. (2006)

Hs - altura de ola significativa

Hs12 - altura de ola significativa superada solamente 12 horas al año

Hs50% - altura de ola significativa mediana

Hs<sub>C110años</sub> - altura de ola significativa asociada a eventos que generan cota de inundación semejante a la de período de retorno de 10 años

IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental

$k$  – constante de von Karman (se ha asumido valor de 0.4)

$K$  - coeficiente empírico en el cálculo de DP, dependiente del D.

$L$  - longitud de onda

$L_0$  - longitud de onda en profundidades de 80m, en la ecuación de  $R_{2\%}$  de Stockdon et al. (2006)

$m$  - pendiente del tramo recto de la playa seca en la ecuación de Díez et al. (2017b)

$m_{C110años}$  - pendiente del tramo recto de la playa seca asociado a  $\Omega_{C110años}$

$ma$  - marea astronómica

$mm$  - marea meteorológica

$n$  - número de onda

NMM - Nivel medio del mar

NMMA - Nivel Medio del Mar de Alicante

$p$  - porosidad del sedimento

PMax - Pleamar Máxima Astronómica

POI (*points of interest*) - Puntos de la base de datos de ondas, cerca de la playa (a 10m de profundidad)

PVMO - Pleamar Viva Media Observada

$R^2$  - Coeficiente de determinación

$R_{2\%}$  - elevación del nivel de excedencia del 2% del *runup*

RDD (*resultant drift direction*) - dirección media del transporte eólico potencial

RMSE (*root mean squared error*) - raíz cuadrada del error cuadrático medio

SSE (*sum of squares due to error*) - suma cuadrática debido al error

$T$  - período de onda

$T_{C110años}$  - período de ola asociado a  $Hs_{C110años}$

$T_p$  - periodo de pico del oleaje

$T_{p12}$  - periodo de pico del oleaje asociado a  $H_{s12}$

$T_{p50\%}$  - periodo de pico del oleaje asociado a  $H_{s50\%}$

$u^*$  - velocidad de corte del viento

$u_{*t0}$  - la velocidad de corte de inicio de movimiento

$U_{2m}$  - velocidad del viento medido a 2m del suelo

$U_{3m}$  - velocidad del viento medido a 3m del suelo

$U_{land}$  - velocidad del viento sobre tierra

$U_{sea}$  - velocidad del viento sobre el mar

$U_{t,3m}$  - velocidad medida, a 3m que es considerada la mínima necesaria para el inicio del movimiento del grano

$x_0$ - es la distancia entre  $X=0$  y donde la curva cruza el eje  $X$  en la curva de perfil de equilibrio de dunas primarias

$\alpha$  - ángulo medio de aproximación del viento a una perpendicular a la costa.

$\beta$  - pendiente de la playa, en la ecuación de  $R_{2\%}$  de Stockdon et al. (2006)

$\Delta\alpha_V$  - rango de direcciones de viento que actúan en una playa

$\rho$  - densidad del agua del mar

$\rho_a$  - densidad del aire

$\rho_s$  - densidad del sedimento

$\Omega$  - parámetro adimensional de caída de grano (indicador del estado morfodinámico de la playa)

$\Omega_{C110años}$  – parámetro adimensional de caída de grano (estado morfodinámico) asociado a eventos que generan cota de inundación semejante a la de período de retorno de 10 años

$\omega$  - velocidad de caída del grano



# CAPÍTULO I

## Introducción



# **I. Introducción**

## **1. Introducción y motivación**

La zona costera es una frontera altamente dinámica, donde océano, tierra y atmósfera interactúan. En esta zona ocurren importantes procesos de disipación de energía marina y modificaciones de los flujos atmosféricos. Su capacidad de respuesta frente a estos procesos depende de la naturaleza y nivel de energía que entra en el sistema y de las características morfológicas (Short & Hesp 1982). Psuty (2004) explica que el concepto fundamental en geomorfología costera es que estos procesos de viento, olas y corrientes actúan sobre los sedimentos para producir una variedad de formas sedimentarias que están causalmente relacionados.

Entre las diversas unidades morfológicas costeras las playas y sus zonas adyacentes son, actualmente, las que sufren la mayor demanda de uso, con consecuente valoración económica del espacio cerca del mar. Eso ocurre debido a una alta densidad poblacional, aproximadamente 3 veces mayor para las zonas a menos de 100km de la costa y a menos de 100m de elevación que la densidad media global (Small & Nicholls 2003), con una tendencia de aumento de esta concentración, según los escenarios socioeconómicos propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Además, las playas son altamente valoradas económicamente en función de su atractivo turístico. Para muchos países el éxito de la industria del turismo depende de la vitalidad de las playas (FitzGerald et al. 2008). Como consecuencia, hay un gran interés en proteger la estructura urbana adyacente a estas que, a menudo, fue construida de manera equivocada por la falta de conocimiento o para proveer necesidades que van en desacuerdo con la dinámica local, y que frecuentemente se ven atacadas por ondas y mareas. En España el gran desarrollo urbano debido al turismo en los sesenta y setenta causó la destrucción de muchos sistemas de dunas costeras, sin tener en cuenta su importancia para la estabilidad de las playas (Gómez-Pina et al. 2002).

Los sistemas playa, dominadas por ola-corriente, y sistema dunas, dominada por vientos, fueron por muchos años examinados como sistemas distintos y separados, pero a partir de los años 80 diversos trabajos reconocieron que estos sistemas están fuertemente acoplados y mutuamente ajustados (Sherman & Bauer 1993). A partir de las definiciones propuestas por Livingstone & Warren (1996), Hesp (2002) y Psuty (2004), en la presente tesis se considera que la duna primaria es el primer cordón arenoso, paralelo a la línea de costa, localizado en la porción superior del perfil de playa (final de la playa seca); es un resultado directo de los procesos costeros/litorales y su morfología es dependiente de la dinámica conjunta playa-duna; es la única forma de dunas totalmente dependiente de una localización costera.

Se reconoce que una importante función de las dunas primarias es la protección contra inundaciones causadas por olas y niveles altos de agua durante condiciones extremas de tormentas, así como protección de zonas litorales contra erosión (Carter 1991;

Larson et al. 2004; Bochev-van de Burgh et al. 2009; Pye & Blott 2008; Houser 2013). Un ejemplo de la utilización de las dunas como protección es el manejo costero realizado en Holanda en el último siglo (Kljin 1990; Ruessink & Jeuken 2002; Bochev-van der Burgh et al. 2011). Además de su función en la estabilidad de la costa, García de Lomas et al. (2011) afirman que las dunas costeras constituyen un recurso natural de enorme importancia. Su papel como acuíferos costeros, su interés biológico y ecológico, su relevancia en la edafogénesis de áreas costeras, así como sus valores paisajísticos, turístico-recreativos y educacionales, hacen que la gestión y conservación de estos sistemas naturales sea, en la actualidad, una de las prioridades ambientales a nivel nacional e internacional.

La alteración ecológica y morfológica de las dunas primarias conduce no sólo a la pérdida de su condición como hábitat y soporte vital de organismos, sino a la pérdida de procesos naturales de los que se beneficia el ser humano directa o indirectamente. La destrucción de las dunas altera la dinámica y el equilibrio sedimentario de las playas, ocasionando la desaparición de superficie natural y un consecuente incremento de los gastos debido a la necesidad de una regeneración artificial de estos ambientes o reconstrucción de las estructuras urbanas localizadas en la línea de costa (Ley Vega et al. 2007; Martínez & Psuty 2007; García de Lomas et al. 2011).

Gómez-Pina et al. (2002) y Sanjaume et al. (2011) explican el proceso por el cual las dunas primarias actúan como una barrera resiliente a fuerzas destructiva de eventos extremos: durante tormentas de alta energía, las ondas aplanan la playa y erosionan arena, socavando y colapsando las dunas en su cara hacia mar. Las ondas transportan la arena erosionada hacia la playa sumergida y la deposita en la zona de rompientes en grandes barras. Estas barras de arena disipan la energía de las olas de tormenta debido a la rotura en aguas más profundas. En períodos de calma las olas vuelven a movilizar la arena de las barras en dirección a tierra, causando una graduada acreción a la playa. A partir del momento en que la arena vuelve a estar disponible en la zona intermareal y playa seca, el transporte eólico actuará en la recuperación de las dunas primarias, cerrando el ciclo que caracteriza el equilibrio sedimentario del sistema playa/duna primaria.

De esta manera podemos considerar que las dunas primarias forman parte de un sistema global, en que los factores de tiempo y espacio influyen en las características de la playa y son acompañadas de la forma de las dunas, y viceversa, evolucionando mutuamente y ajustándose mediante el intercambio de sedimento (Psuty 1988; Sherman & Bauer 1993; Hesp 2012). Está claro que las dunas conforman un importante elemento en el balance sedimentario litoral y, por lo tanto, necesitan ser consideradas en el ámbito de la gestión costera y prácticas de ingeniería, si se pretende que sean sostenibles y estables (Arens & Wiersma 1994; Saye et al. 2005).

A pesar del reconocimiento de que la morfología de las dunas primarias está afectada por eventos particulares como tormentas, o sea, escala de procesos (corto plazo) (por ejemplo en Carter & Stone 1989; Sallenger 2000; Larson et al. 2004; Houser 2013),

algunos estudios confirmaron que las dunas primarias presentan una estabilidad a largo plazo (décadas), donde se puede considerar que hay un equilibrio, con fluctuación de su forma y posición alrededor de un perfil promediado en el tiempo (Guillén et al. 1999; Houser 2009; Bochev-van der Burgh et al. 2011).

El concepto *forma de equilibrio* es ampliamente usado en estudios de playas, como por ejemplo el perfil de equilibrio de playas propuesto inicialmente por Bruun (1954) y ampliamente evaluado y divulgado por Dean (1977). Dean (1991) afirma que, en grandes escalas de tiempo, la parte “activa del perfil” de la playa es altamente dinámica, pero su forma media en el largo plazo tiende a ser relativamente invariable. Este modelo está basado en el principio de la disipación uniforme de energía por unidad de volumen y asume que el transporte transversal ocurre a través de la difusión, considerando que la agitación de sedimento depende de la velocidad orbital de la ola próxima al fondo. Es decir, un perfil de equilibrio será la tendencia final de desarrollo en respuesta a la interacción entre erosión y acreción a largo plazo (Dai et al. 2007).

Siguiendo esta línea de pensamiento, en la presente tesis se asume como hipótesis que la parte activa de las dunas primarias, es decir, la parte que está dinámicamente conectada a la playa y a los efectos del mar y del viento, tenderá a ajustarse a su forma de equilibrio en función de las fuerzas constructivas y destructivas. Houser (2009) desarrolla esta idea, en la cual propone que un sistema de playa-duna presenta un intercambio de sedimento entre la parte subacuática y subaérea, y describe que playas y dunas son sistemas activos que oscilan (erosionan y acumulan alrededor de una morfología de equilibrio). Cuanto más cerca del equilibrio, menor la oscilación. El modelo de evolución del perfil de playa/duna frente a una subida del nivel del mar, desarrollado por Davidson-Arnott (2005), considera que la playa/duna buscará un perfil de equilibrio, con retroceso de la línea de costa y migración de las dunas primarias hacia tierra, con mantenimiento de su forma. Los modelos teórico/matemáticos de desarrollo y evolución de dunas primarias también consideran la existencia de este estado de equilibrio (van Dijk et al. 1999; van Boxel et al. 1999; Hanson et al. 2010; Duran & Moore 2013; Goldstein & Moore 2016; Larson et al. 2016).

Debido a la importancia de las dunas primarias y el creciente interés en preservarlas, recuperarlas y, si es el caso, crearlas, se vislumbra que la determinación y definición de su forma de equilibrio sería de gran importancia en proyectos de recuperación del sistema playa-dunas, de la misma manera que el perfil de equilibrio de Dean es ampliamente utilizado en la ingeniería costera para la construcción de playas en equilibrio. A pesar del reconocimiento de un posible estado de equilibrio de las dunas primarias, y de los importantes avances obtenidos en los últimos años en el conocimiento de su funcionamiento, todavía no está claro cómo generar dunas primarias estables a largo plazo. El gran problema de la reconstrucción de las dunas a través de la movilización del sedimento artificialmente es que, actualmente, no hay ecuaciones o parámetros conocidos que permitan diseñar una duna en equilibrio, que presentará menor coste de mantenimiento. Normalmente se crea la duna lo más próximo posible de la situación previa

o semejante a las dunas de áreas adyacentes. Pero, tal como resumido por Nordstrom (1994), normalmente se reconstruyen las dunas en dimensiones menores, en localización más cerca del mar que su localización de equilibrio (normalmente ocupadas por casas) y son mantenidas en su nueva localización a través del uso de técnicas de estabilización, resultando en un incremento de esfuerzo humano y coste.

Por lo tanto, en la presente tesis se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- *¿Hay un tamaño, posición y forma de equilibrio de las dunas primarias?*
- *¿Se puede obtener una ecuación que describa su forma?*
- *¿Es posible identificar de qué depende cada uno de los parámetros que definen la morfología las dunas primarias en equilibrio?*

## **2. Resumen del estado del arte**

A partir de la motivación presentada anteriormente, se hizo una amplia revisión bibliográfica para comprobar los antecedentes del conocimiento obtenido sobre las dunas primarias y verificar si las preguntas formuladas por la presente tesis ya habían sido contestadas. Debido a la extensión de esta recopilación, en este apartado se presenta un resumen del estado del arte de los conocimientos existentes sobre este tema. La descripción detallada de la revisión bibliográfica se recoge en el Anexo I.

### **2.1. El desarrollo de las dunas primarias**

Las dunas costeras aparecen en todo el mundo distribuidas en una amplia variedad de regímenes climáticos. Se forman en aquellos lugares de la costa donde hay dos requerimientos básicos: 1) disponibilidad de aportes de arenas de tamaño adecuado, y 2) vientos procedentes del mar capaces de transportar las arenas hacia el interior, al menos en parte del año (Ley Vega et al. 2007). De manera general, la presencia de dunas en la parte superior de la playa indica que hubo transporte eólico en algún momento (de Vries et al. 2015).

Para que una duna primaria empiece a ser formada, el flujo de arena transportada eólicamente debe encontrarse con un elemento a su paso, en la mayoría de los casos la vegetación, pero puede ser también detritos y obstáculos topográficos (cambios de pendiente, formas de lecho relictas, etc.) (Hesp 1989; Hesp et al. 2005; Mathew et al. 2010). Este elemento causa una reducción local del caudal de transporte, con deposición del sedimento. Con el crecimiento de la duna ocurre una retroalimentación en este proceso. Si hay gran aporte de sedimento, con una costa progradante, una nueva duna primaria empezará a formarse, lo que resulta a largo plazo en la creación de una sucesión de cordones dunares (Ley Vega et al. 2007). Si la costa es estable, las dunas se desarrollaran y avanzaran sobre la playa hasta que la dinámica litoral lo permita.

## **2.2. Forma de las dunas primarias**

Diversos factores influyen en las posibles formas de las dunas primarias, tal como resumieron Arens & Wiersma (1994). Entre estos factores cabe mencionar las condiciones energéticas constructivas y destructivas del medio (eólicas y marinas), el origen del sedimento y gestiones antrópicas. Algunas clasificaciones en cuanto a la forma y estado de desarrollo/recuperación de las dunas primarias fueron propuestas (Arens & Wiersma 1994; Hesp 2002; Ollerhead et al. 2013; Brodie & Spore 2015; véase detalles en el Anexo I), en su mayoría de manera cualitativa y descriptiva, con separación de condiciones y características de dunas en desarrollo o establecidas; erosionadas/regresivas, progresivas o estables; naturales o gestionadas.

No se han encontrado artículos publicados que propongan una expresión matemática (ecuaciones de perfil de equilibrio) de la forma de los perfiles de dunas primarias, en función de las condiciones ambientales, tal como la que existe para playas (Bruun 1954; Dean 1977; Dean 1991; Bernabeu et al. 2001; Bernabeu et al. 2002; Dai et al. 2007; Wright & Short 1984; Masselink & Short 1993; Díez et al. 2017a y b).

## **2.3. Parámetros que influyen en la morfología de las dunas primarias**

Una vez que las dunas primarias se generan, la morfodinámica, evolución y características naturales de las mismas son afectadas por diferentes condicionantes que están interconectados entre sí. Diversas investigaciones han sido desarrolladas para identificar los factores ambientales y su influencia (p. ej. Psuty 1993; Sherman & Bauer 1993; Arens 1996a; Davidson-Arnott & Law 1996; Guillén et al. 1999; Bauer & Davidson-Arnott 2002; Ruessink & Jeuken 2002; Aagaard et al. 2004; Larson et al. 2004; Saye et al. 2005; Davidson-Arnott et al. 2008; Bauer et al. 2009; Sabatier et al. 2009; Miot da Silva & Hesp 2010; Houser & Mathew 2011; Miot da Silva 2011; de Vries et al. 2012; Miot da Silva et al. 2012; Ollerhead et al. 2013; de Vries et al. 2015; Zarnetske et al. 2015; Darke et al. 2016). Véase detalles de la descripción de estos parámetros en el Anexo I.

La Figura I.1 resume estos factores ambientales. Se puede observar que la duna tendrá sus características morfológicas influenciadas por básicamente dos procesos (en verde): (i) capacidad de transporte de sedimento hacia las dunas y (ii) capacidad de erosión de este sedimento. Por otro lado, la propia duna puede influir en estos procesos, por ejemplo, a través de la resistencia a la erosión en función de su gran volumen o reduciendo la capacidad de transporte eólico sobre las mismas debido a una mayor altura y pendiente. El aporte y la erosión del sedimento son influenciados por los factores ambientales: el sedimento, el viento, las ondas y mareas, la playa adyacente y la vegetación (en azul).

La capacidad de transporte del sedimento dependerá de muchos factores. Obviamente la característica y suministro del propio sedimento es el principal de ellos y será dependiente de la geología local, del suministro causado por la dinámica litoral, de la selección causada por el viento, etc... Este transporte de sedimento es primordialmente realizado por el viento. Factores como la morfología de la playa, la acción del oleaje y

mareas en el fetch de actuación del viento, la presencia de vegetación e inclusive las características climáticas de lluvia influirán en el transporte del sedimento hasta las dunas primarias.

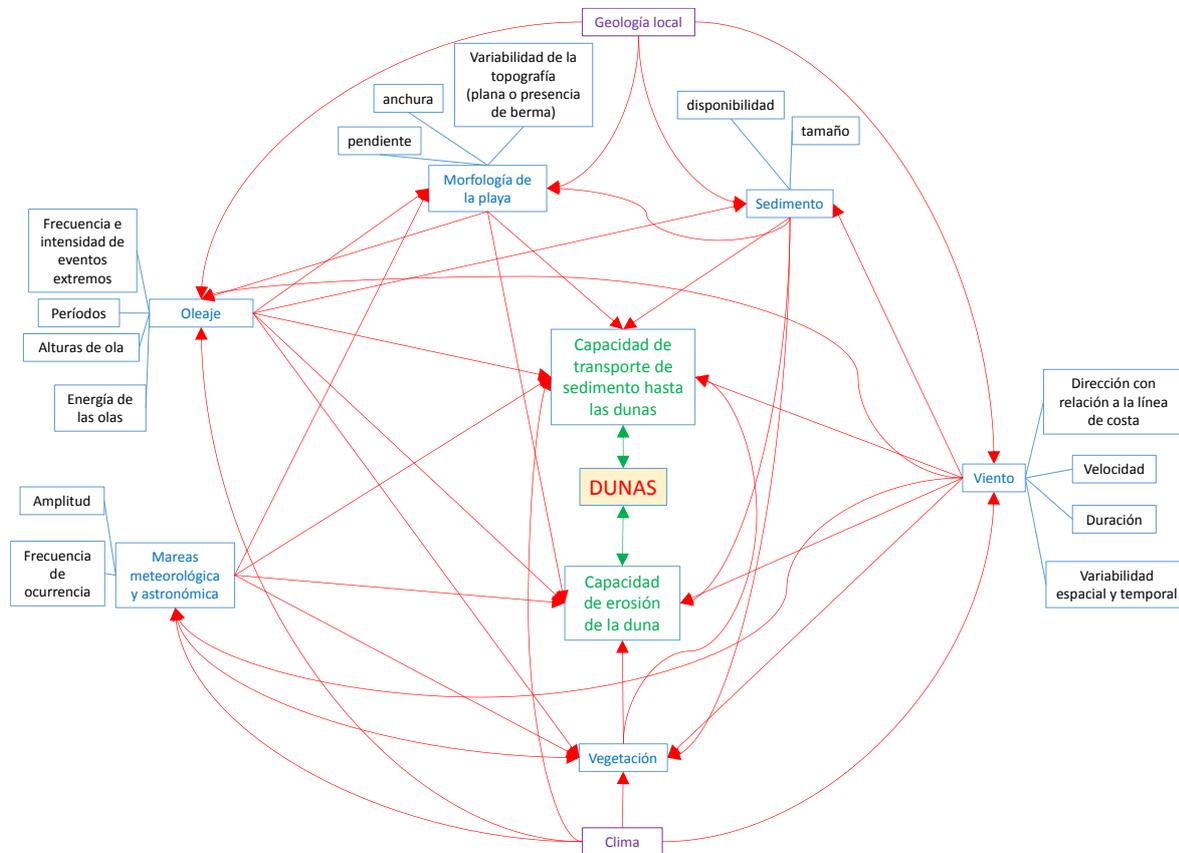


Figura I.1 – Resumen de los principales factores que influyen en la morfología de las dunas primarias y la interconexión entre los mismos

La capacidad de erosión dependerá principalmente del potencial que la dinámica marina tiene al actuar sobre esta duna, o sea, directamente del clima de oleaje y mareas, además de las características del sedimento. También dependerá de las características morfológicas de la playa y/o la presencia de vegetación, sea por protección y/o disipación de la energía marina. El viento también puede ser un factor erosivo.

Como se puede observar, la morfología de la playa influirá tanto en la capacidad de transporte del sedimento como en la erosión de las dunas. Esta variará en función del sedimento que la compone, del clima de oleaje y mareas y de la geología local. Los vientos y oleaje actuantes en la playa, principales fuentes de energía tanto constructora como destructora de las dunas primarias, son determinados por el clima (en la generación) y por la geología local (en las propagaciones y transformaciones). El clima de oleaje a nivel local también será influenciado por la propia morfología de la playa, debido a las transformaciones que las olas sufren al aproximarse de la línea de costa.

La vegetación está indicada por diversos estudios como un importante factor en la dinámica de las dunas. Sus características (diversidad, abundancia, desarrollo) dependerán de las condiciones ambientales y de su capacidad de adaptarse a ellas. El sedimento

(características y suministro), la dinámica de vientos, mareas y el oleaje determinarán las características ambientales que pueden dificultar o estimular el desarrollo de la vegetación. A pesar de que algunos trabajos consideran que la vegetación influye en la morfología de las dunas primarias (Hesp 1989; Miot da Silva et al. 2008; Duran & Moore 2013; Zarnetske et al. 2012), en esta tesis se parte de la premisa de que los factores físicos y dinámicos son los que definen la localización y el desarrollo de la vegetación, y solo habrá vegetación si la duna presenta una posición y forma estable a largo plazo. Por lo tanto, se simplificará la evaluación morfológica de las dunas primarias y no se considerará la influencia de la vegetación en su morfología.

Como se puede observar, la morfología de las dunas primarias dependerá directa e indirectamente de diversos factores que interactúan entre sí, formando un sistema extremadamente complejo. La influencia de los parámetros ambientales presentada anteriormente indica su importancia en la condición de estabilidad de la duna. Sin embargo, no se puede menospreciar la actuación humana en los cambios de los procesos, tanto de manera destructiva como constructiva.

Las causas antrópicas de la degradación de las dunas en España van desde la destrucción directa (p. ej. construcciones, retirada de arena, presión recreacional) (Gómez-Pina et al. 2002) hasta efectos indirectos (p. ej. cambios en el balance sedimentario) (Sanjaume & Pardo-Pascual 2005).

Por otro lado, diversas intervenciones humanas pueden ser realizadas sobre las dunas buscando su regeneración. Algunas investigaciones han sido desarrolladas para entender los efectos de estas medidas de recuperación de dunas, como la siembra (Carter & Stone 1989; Hanley et al. 2014; Sigren et al. 2014), aportes de sedimento (van der Wal 1998) y colocación de captadores (llamados cercas, *fences*) para acumular la arena (Hanley et al. 2014). Algunas concluyeron que, a pesar de las medidas para mejorar la estabilización de las dunas primarias, las mismas siguen presentando una dinámica de acuerdo con las condiciones ambientales (Bochev-van der Burgh et al. 2011); y que la utilización de procesos naturales y el entendimiento de su dinámica son estrategias más sostenibles a la hora de recuperarlas (Aarninkhof et al. 2010).

#### **2.4. Modelos de funcionamiento de las dunas primarias**

Los modelos que explican el funcionamiento de las dunas primarias a corto plazo (días) se basan en prever el impacto de eventos extremos en la erosión de las mismas. Algunos ejemplos son las publicaciones de Hallermeier & Rhodes (1988), Kriebel & Dean (1993), Komar et al. (1999), Sallenger (2000) y Larson et al. (2004).

Los modelos de medio plazo (de meses a años) explican las variaciones de las dunas primarias estacionalmente: normalmente las dunas se erosionan en invierno, cuando hay mayor frecuencia de tormentas, mayores mareas meteorológicas y menor suministro de sedimento debido a que la arena está húmeda y no disponible para el transporte eólico. En el verano ocurre su recuperación, con mayor disponibilidad de arena seca para el transporte

eólico y menor retirada debido a la erosión causada por los procesos costeros (Komar 1976; Christiansen & Davidson-Arnott 2004; Houser 2009). Algunos autores han verificado una oscilación con escala de tiempo de años en el avance o retroceso de las dunas, y han propuesto un modelo de evolución dependiente de la migración de ondas de arena (Stewart & Davidson-Arnott 1988; Ruessink & Jeuken 2002) o del acoplamiento de barras arenosas que migran hacia tierra (Aagaard et al. 2004).

Los modelos a largo plazo (de años a décadas) coinciden con la motivación de esta tesis: definir de qué dependen las características morfológicas de las dunas primarias. Entre los más importantes podemos citar:

- El modelo conceptual de Short & Hesp (1982), que conecta el estado morfodinámico modal de la playa y la morfología de las dunas. Este modelo afirma que playas disipativas, característicamente planas, extensas y compuestas por sedimento fino, presentan mayor potencial de transporte de sedimento hacia las dunas y, por lo tanto, estas presentarían mayor volumen. Por otro lado las playas reflejantes, compuestas por arena más gruesa, con alta pendiente y presencia de berma, además de estrechas, se caracterizan por un bajo potencial de creación de dunas primarias. Las playas intermedias presentarían dunas primarias mayores o menores dependiendo del acercamiento a una condición, respectivamente, disipativa o reflejante.

- El modelo de Psuty (Psuty 1988; Psuty 1992; Psuty 2004), que relaciona el balance sedimentario con las características de las dunas primarias. Propone que si la playa recibe mucho aporte de sedimento, con transferencia de este hacia las dunas, se crearán dunas primarias sucesivas, con generación de un campo de cordones dunares paralelos, aunque de pequeño tamaño debido al poco tiempo de desarrollo de cada uno. Por otro lado, si la playa es débilmente erosiva y el balance sedimentario de las dunas es positivo, ocurrirá la posibilidad de un máximo desarrollo de las dunas primarias, debido a que habrá más tiempo de aporte sedimentario hacia un único cordón arenoso. Cuando el balance sedimentario es negativo, tanto en la playa como en la duna, ocurrirá la degradación de la duna primaria.

- El modelo propuesto por Sherman & Bauer (1993) complementa el de Psuty al considerar los estados de balance sedimentario estable, con definición de 9 escenarios (véase detalles en el Anexo I).

- Los últimos trabajos desarrollados intentan prever el comportamiento de las dunas primarias a largo plazo a partir de modelos matemáticos. Se basan en ecuaciones de transporte eólico, que alimenta las dunas primarias, y de erosión debido al impacto de las olas sobre las playas y dunas: i) Hanson et al. (2010) proponen un modelo que estima los cambios sedimentarios transversales del perfil playa/duna primaria y, consecuentemente, la posición de la duna; ii) Larson et al. (2016) complementan este modelo incluyendo los procesos de rebase de la duna y la formación de la barra; iii) Duran & Moore (2013) proponen un modelo de desarrollo de las dunas en función de diferentes localizaciones de la vegetación pionera; iv) Goldstein & Moore (2016) desarrollaron un modelo no lineal de una dimensión para simular la estabilidad de la altura de las dunas primarias.

## **2.5. Conclusiones del estado del arte**

Al hacer la revisión de las investigaciones publicadas, que evalúan las características, morfología y morfodinámica de las dunas primarias, se observó que muchos estudios evalúan los efectos a corto plazo del transporte eólico y erosión costera sobre las dunas primarias. Algunos evalúan el comportamiento a largo plazo o, cualitativamente, la forma de las dunas primarias. Sin embargo, no se ha encontrado modelos que propongan cuales son las características morfológicas de equilibrio de las dunas primarias, tal como su forma de equilibrio y tamaño, y la influencia de los factores ambientales a largo plazo en cada uno de los parámetros que la caracterizan. En vista de esto se propone una serie de objetivos a ser desarrollados por la presente tesis.

## **3. Objetivos**

Basado en lo expuesto anteriormente, donde se presentó la importancia de las dunas primarias y la motivación de la presente tesis, y en vista de que las preguntas de investigación planteadas no están del todo resueltas en el estado del arte, se establecen los siguientes objetivos de este trabajo:

### **3.1. Objetivo principal**

Proponer un modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias costeras.

### **3.2. Objetivos específicos**

Para alcanzar este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

i) Analizar la morfometría y la forma de los perfiles de dunas primarias en equilibrio de playas del norte de España, identificando correlaciones entre los parámetros morfológicos y evaluando la variación de su forma.

ii) Evaluar las dinámicas actuantes sobre el sistema playa/duna primaria y correlacionarlas con los parámetros morfométricos de la duna primaria.

iii) Proponer un modelo de funcionamiento teórico, de largo plazo, que explique la condición de equilibrio de las dunas primarias.

iv) Proponer un modelo que represente la forma del perfil de equilibrio de la duna primaria, teniendo en cuenta las características dinámicas locales.

## **4. Organización de la tesis**

Para cumplir con los objetivos propuestos en esta tesis este documento fue organizado en capítulos:

**Capítulo I – Introducción**, donde se describe la motivación de la investigación, un resumen del estado del arte del conocimiento acerca de las dunas primarias y los objetivos planteados.

**Capítulo II – Caracterización morfométrica y de la forma del perfil** en el que se hace la descripción morfológica de los perfiles del sistema playa/duna estudiados y se evalúan las relaciones entre los parámetros morfométricos y la forma de los diferentes tramos del sistema (objetivo específico (i)).

**Capítulo III – Influencia de las dinámicas marinas y eólicas en la morfología del perfil de las dunas primarias** en el que se obtienen parámetros indicadores de las dinámicas eólica y marina y se relacionan los mismos con los parámetros morfométricos (objetivo específico (ii))

**Capítulo IV – Modelo de funcionamiento** donde se propone un modelo de funcionamiento a largo plazo de las dunas primarias (objetivo específico (iii)).

**Capítulo V – Modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias y su aplicación para la regeneración de sistemas de playa/duna**, donde se presenta el modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias, los ajustes matemáticos aplicados para definir la ecuación que mejor describe su morfología y los parámetros de que depende (objetivo específico (iv)). Al final se propone una metodología de aplicación del modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias.

**Capítulo VI – Consideraciones finales y futuras líneas de investigación**, en el que se presenta un resumen de las principales conclusiones y contribuciones de esta tesis. Finalmente, se sugieren algunas futuras líneas de investigación a desarrollar con el objetivo de validar, calibrar, mejorar y/o complementar el modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias.

Excepto el Capítulo I y Capítulo VI, cada capítulo presenta una pequeña introducción para recordar el objetivo a que se propone, los datos y metodología aplicada para las evaluaciones pertinentes, los resultados encontrados con discusión basada en trabajos previos y conclusiones.

De manera complementaria se presenta:

**Anexo I – Estado del arte**, en el que se expone, de manera expandida, la descripción de las principales investigaciones realizadas sobre las dunas primarias.

**Anexo II – Caracterización de las áreas de estudio y sus dunas primarias**, en el que se describe detalladamente las playas evaluadas y los resultados de la caracterización de la dinámica.

**Referencias bibliográficas** de la literatura citada durante el desarrollo de esta tesis.

# CAPÍTULO II

## Caracterización morfométrica y de la forma del perfil



## **II. Caracterización morfométrica y de la forma del perfil**

### **1. Introducción**

La duna primaria es el primer cordón arenoso, paralelo a la línea de costa, localizado en la porción superior del perfil de playa (final de la playa seca). Su tipología varía desde dunas bajas y dispersas con menos de 1m (en islas barreras con rebase y limitado suministro de arena) hasta dunas muy altas y complejas, alcanzando 30-35m de altura. Estas últimas son raras y pueden presentarse en costas erosivas donde hay interferencias humanas y gestiones que inducen al desarrollo de grandes dunas primarias (Hesp 2002). Diversos autores indican que las dunas primarias no son uniformes y pueden exhibir una considerable variabilidad en altura, volumen y extensión a lo largo de la costa (p.ej. Thieler & Young 1991; Houser et al. 2008; Houser & Mathew 2011). Su variación espacial refleja, además del historial de impactos de eventos de temporal, las variaciones a lo largo de la costa en el transporte potencial y suministro de sedimento para su crecimiento (White 1987; Hesp 2002; Houser et al. 2008).

A pesar de la variación espacial y temporal de la morfología de las dunas primarias, la forma de su perfil en condición de estabilidad es comúnmente descrita de la misma manera: su frente hacia el mar tiene como característica una curvatura cóncava en el tramo inferior, es decir, en la conexión con la playa seca, y curvatura convexa en la cresta, pudiendo ser simétricas o asimétricas, con mayor acumulación de arena en la cara hacia tierra (p. ej. Hesp 1999; Van Boxel et al. 1999; Bochev-van der Burgh et al. 2011; Pérez Alberti & Vázquez Paz 2011).

Diversos artículos científicos describen y clasifican morfológicamente las dunas primarias, sea en función de los diferentes tamaños, estados de desarrollo o recuperación tras eventos extremos (p.ej. Arens & Wiersma 1994; Hesp 2002; Ollerhead et al. 2013; Brodie & Spore 2015; para mayores detalles ver Anexo I). A pesar de la gran contribución de estos autores, no se identificaron trabajos que evalúen específicamente la forma del perfil de la duna primaria en equilibrio, tal como se ha hecho para el perfil de playa (Dean 1977; Wright & Short 1984; Dean 1991; Masselink & Short 1993; Bernabeu et al. 2001; Bernabeu et al. 2002; Dai et al. 2007; Díez et al. 2017a), o sus relaciones morfométricas, tal como se ha hecho para dunas desérticas (Lancaster 1988; Hesp & Hastings 1998; Momiji & Bishop 2002).

Con vista a contribuir al conocimiento de las dunas primarias, este capítulo tiene como objetivos: (i) evaluar las características morfométricas de los perfiles de las dunas primarias consideradas estables en la costa norte de España y sus inter-relaciones; (ii) evaluar la variabilidad de formas, a través de la aplicación de una técnica de clasificación automática (*k*-medias).

## 2. Metodología

En el presente apartado se presentan los datos utilizados y las metodologías empleadas para evaluar la morfología del sistema playa/ dunas primarias, sus parámetros morfométricos y la forma de cada parte del sistema.

### 2.1. Datos utilizados

#### Topografía y perfiles del sistema playa/duna primaria

En primero lugar se hizo una búsqueda con el objetivo de identificar las playas de la costa española que presentan dunas primarias bien preservadas y con características de estabilidad a medio y largo plazo. La referencia principal para identificación de estas playas fue el libro “Las Dunas de España” (Sanjaume & Gracia 2011), junto con la “Guía de playas”, que aporta información general de todas las playas de España, elaborado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (<http://www.magrama.gob.es/es/costas/servicios/guia-playas/>), imágenes de Google Earth y ortofotos del proyecto PNOA<sup>®</sup> (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea), del ©Instituto Geográfico Nacional (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>). En total se identificaron 20 playas con características que teóricamente posibilitarían la identificación de perfiles de dunas primarias en equilibrio.

Los datos utilizados para la obtención de los perfiles fueron los de topografía suministrados por el ©Instituto Geográfico Nacional, proyecto PNOA<sup>®</sup>, obtenidos a partir de vuelos con un sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*) realizados entre 2011 y 2012, con densidad de 0.5 puntos/m<sup>2</sup>, interpolados por convolución cúbica, teniendo como resultado final al usuario un Modelo Digital de Terreno con paso de malla de 5m (MDT05). Todos los MDT05 y las ortofotos están georreferenciadas al Sistema de Coordenadas Proyectadas UTM, Europe: ETRS\_1989\_UTM, zona 30N, con la referencia vertical de la cota cero relativa al Nivel Medio del Mar de Alicante (NMMA).

Sobre el MDT05, utilizando el software *ArcMap* y su herramienta *3D Profile Graph*, se trazaron los perfiles perpendiculares a la dirección de la línea de costa, que a su vez fue definida a partir de las cotas batimétricas más bajas de la playa seca. Con la ayuda de las ortofotos fueron obtenidos perfiles, con una distancia entre ellos de aproximadamente 25m, en el área de la playa donde las dunas son más preservadas, evitando las irregularidades, zonas de erosión, caminos peatonales y edificaciones. Un total de 1085 perfiles fueron adquiridos en las 20 playas inicialmente seleccionadas (Tabla II.1). Un ejemplo de la obtención de los perfiles se puede apreciar en Figura II.1 y Figura II.2, para la playa de Valdearenas/Liencren (Cantabria). Los perfiles fueron enumerados de izquierda a derecha, considerando la vista de tierra hacia el mar.

Estos perfiles fueron exportados en formato “.txt”.

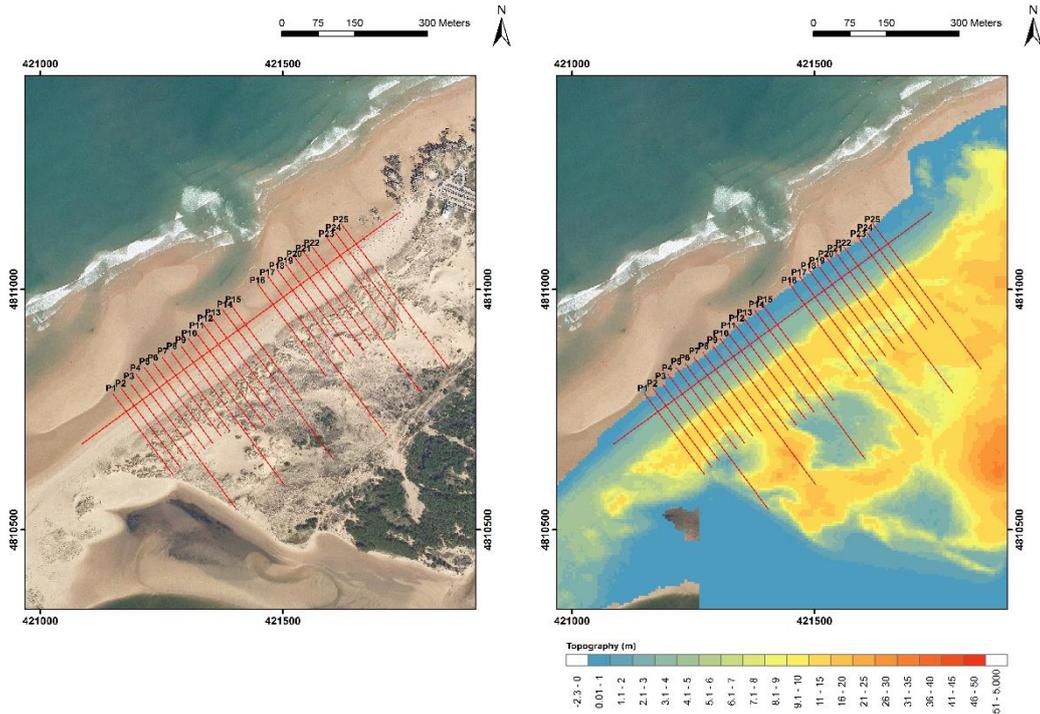


Figura II.1 - Ejemplo de obtención de los perfiles transversales, utilizando el MDT05 y la ortofoto, para la playa de Valdearenas/Lienres (Cantabria).

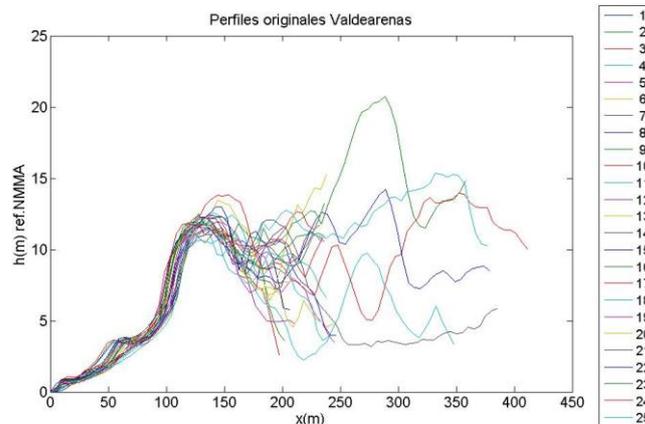


Figura II.2 – Ejemplo de los perfiles obtenidos para la playa de Valdearenas/Lienres (Cantabria).

Tras la obtención de los perfiles de estas playas, los mismos fueron examinados exhaustivamente, a través del análisis visual de cada uno, identificación de antecedentes y caracterización de cada playa mediante amplia revisión bibliográfica. Esta segunda evaluación de las playas y sus perfiles permitió la selección final de los perfiles a ser utilizados. Fueron eliminadas aquellas playas con antecedentes de alteraciones humanas en los últimos 10 años y ocurrencia de eventos erosivos constantes en la última década. No se consideraron tampoco aquellos perfiles con pocos puntos topográficos, por considerarse que no representan bien la forma del perfil. Debido a que el objetivo de la presente tesis es el de identificar un perfil de equilibrio de las dunas primarias, las clasificaciones propuestas por otros autores fueron utilizadas como apoyo para la selección de perfiles de

dunas con características de estabilidad y condición de equilibrio. Por lo tanto, las dunas de este estudio teóricamente se clasifican como: (i) dunas primarias establecidas, según descripción de Hesp (2002); (ii) de los estadios 1, 2 o 3 de la clasificación de Hesp (2002); (iii) del tipo “Pendiente a barlovento menos escarpada (*Cliffed lower stoss slope - CLS*)” con la rampa ya establecida o del tipo “Pendiente a barlovento (*Stoss slope - S*)”, propuestos por Ollerhead et al. (2013); (iv) estables (S) según Arens & Wiersma (1994); y (v) sanas según características morfológicas presentadas por Brodie & Spore (2015). El lector interesado en más información con relación a estas clasificaciones puede consultar el apartado 4 del Anexo I.

En total fueron seleccionadas 6 playas y 193 perfiles en condiciones ideales para el tipo de análisis planteado (Tabla II.1). Es importante destacar que todas las playas localizadas en el mar Mediterráneo fueron inicialmente descalificadas debido a sus recientes intervenciones y a la alta frecuencia de eventos erosivos.

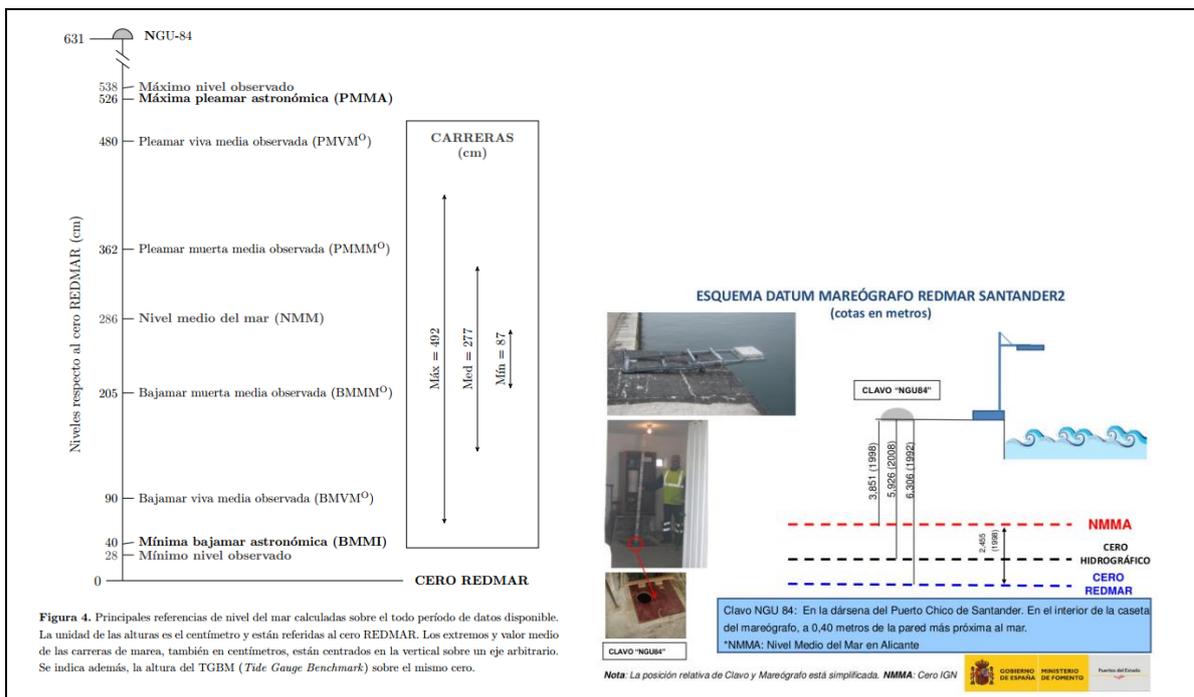
Tabla II.1 - Playas seleccionadas para la evaluación de la forma del perfil de equilibrio de las dunas primarias

Provincia	Municipio	Playa	Nº total de perfiles obtenidos	Nº total de perfiles seleccionados
<b>Costa Atlántica</b>				
<b>Cantabria</b>	Santoña	Berria	31	-
	Ribamontón del Mar	Somo-Puntal	80	55
	Piélagos	Valdearenas/Liencren	25	18
<b>Asturias</b>	Gozón	Xagó	40	-
	Castrillón	Salinas	28	-
	Castrillón	Bayas	47	20
<b>Galicia</b>	Ferrol	San Xurxo	65	-
	Ferrol	Doniños	46	27
	Carballo	Baldaio	99	39
	Laxe	Traba	54	34
	Carnota	Carnota	80	-
<b>Costa Mediterránea</b>				
<b>Cataluña</b>	Torroella de Montgrí	Mas Pinel	45	-
	Pals	Pals	42	-
<b>Comunidad Valenciana</b>	Segunto	Corint	50	-
	Segunto	L'Almardà	20	-
	Valencia	la Garrofera	44	-
	Valencia	la Devesa	138	-
	Elche	el Altet	29	-
	Elche	Guardamar	40	-
<b>Murcia</b>	San Pedro del Pinatar	Torre Derribada	82	-
<b>TOTAL</b>			<b>1085</b>	<b>193</b>

### Niveles y referencia vertical

Los datos medios de marea y sus relaciones con las referencias verticales fueron obtenidos de los informes de Puertos del Estado para el puerto más próximo a la playa (<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>). Estos datos fueron utilizados para referenciar los perfiles a un datum vertical de NMMA hacia nivel medio del mar (NMM), además de disponer de una relación entre las diferentes cotas de nivel de marea.

Un ejemplo de obtención del nivel de marea utilizado y su transformación a NMM se presenta en la Figura II.3 para el caso de la playa de Valdearenas/Liencrez (datos obtenidos de [http://calipso.puertos.es/BD/informes/globales/GLOB\\_2\\_3\\_3109.pdf](http://calipso.puertos.es/BD/informes/globales/GLOB_2_3_3109.pdf)).



Diferencia entre Cero RedMar y NMMA = 2.455m  
 Diferencia entre Cero RedMar y NMM = 2.86m  
 Corrección aplicada a las cotas de los perfiles (de NMMA hacia NMM)= -0.405m  
 Pleamar Viva Media Observada (con referencia al NMM)=1.94m  
 Máxima Pleamar Astronómica (con referencia al NMM)=2.4m

Figura II.3 – Niveles de referencia utilizados para la playa de Liencrez

### Información sedimentológica

Diversas fuentes de datos fueron utilizadas para obtener información referente al tamaño medio del sedimento de las playas y dunas primarias:

- Para Cantabria: (Losada et al. 1991; Martínez Cedrun et al. 2014; Triax 2015)
- Para Asturias: (Flor 1978; Diego Cavada 2014)
- Para Galicia: (Junoy et al. 2005)

Es importante señalar que para las playas de Cantabria y Asturias hay datos de granulometrías del sedimento de la playa (intermareal y seca) y de la duna primaria. Desafortunadamente, para Galicia los datos disponibles son referentes solamente a la zona intermareal de la playa. Para estimar el tamaño del sedimento de las dunas y playa seca de las playas gallegas, se definió la relación entre los tamaños de sedimento encontrados en las 3 partes (zona intermareal, playa seca y duna primaria), para las playas de Cantabria, medidos por el estudio realizado por Triax (2015). Los resultados se recogen en la Tabla II.2.

Tabla II.2 – Tamaño del grano medio (D50, mm) de la zona intermareal, playa seca y duna primaria de playas de Cantabria (fuente: Triax, 2015) y la relación entre los mismos.

Playas	D50 Duna primaria	D50 Playa seca	D50 Intermareal	Relación D50 playa seca/ intermareal	Relación D50 duna/ playa seca	Relación D50 duna/ intermareal
Oriñon (1)	0.18	0.19	0.2	0.95	0.95	0.90
Oriñon (2)	0.19	0.18	0.2	0.90	1.06	0.95
Sonabia	0.21	0.23	0.22	1.05	0.91	0.95
Salve (1)	0.19	0.2	0.2	1.00	0.95	0.95
Salve (2)	0.19	0.2	0.22	0.91	0.95	0.86
Salve (3)	0.2	0.21	0.23	0.91	0.95	0.87
Berria (1)	0.2	0.2	0.2	1.00	1.00	1.00
Berria (2)	0.2	0.2	0.21	0.95	1.00	0.95
Berria (3)	0.19	0.22	0.23	0.96	0.86	0.83
Berria (4)	0.19	0.2	0.24	0.83	0.95	0.79
Berria (5)	0.19	0.2	0.22	0.91	0.95	0.86
Ris (1)	0.24	0.27	0.3	0.83	0.96	0.80
Ris (2)	0.23	0.29	0.27	1.07	0.79	0.85
Somo (1)	0.26	0.28	0.3	0.93	0.93	0.87
Somo (2)	0.24	0.28	0.35	0.80	0.86	0.69
Puntal (1)	0.26	0.28	0.3	0.93	0.93	0.87
Puntal (2)	0.28	0.31	0.3	1.03	0.90	0.93
Valdearenas (1)	0.31	0.33	0.36	0.92	0.94	0.86
Valdearenas (2)	0.33	0.38	0.36	1.06	0.87	0.92
<b>Mediana</b>				<b>0.93</b>	<b>0.93</b>	<b>0.88</b>
<b>Media</b>				<b>0.95</b>	<b>0.95</b>	<b>0.87</b>

Asumiendo que las playas de Galicia presentan el mismo comportamiento de proporción de tamaños que las playas de Cantabria, se estimó que en Galicia las dunas primarias y playa seca, con respecto a la zona intermareal, presentan una relación de tamaño de sedimento 0.87 y 0.95 veces, respectivamente. Sabatier et al. (2009) presentaron la variación de tamaño de sedimento en playas de la costa francesa y, a partir de estos datos

se verificó una proporción máxima entre tamaño del sedimento de la duna de 0.8 con relación al tamaño del sedimento de la playa intermareal (duna=0.2mm; playa intermareal=0.25 a 0.31). A pesar de particularidades locales, se considera que la relación utilizada para estimar la granulometría de las playas de Galicia es bastante conservadora y se aproxima a la realidad.

## **2.2. Definición de parámetros morfométricos**

Se definió que el perfil del sistema playa/duna primaria comprende la línea entre la cresta del primer cordón dunar, definido en su máxima elevación, y la cota de la Pleamar Viva Media Observada (PVMO) indicada por Puertos del Estado.

Algunas premisas fueron definidas buscando una mejor descripción del perfil de este sistema:

- La playa seca y la duna primaria, a pesar de estar íntimamente relacionadas, presentan procesos dinámicos diferentes y deben ser evaluados separadamente con relación a sus características morfológicas. Un problema a veces encontrado al estudiar las características de la duna y correlacionarla con las características de la playa es justamente que muchas veces la separación de estas dos unidades fisiográficas no está muy clara.
- Las dunas primarias están caracterizadas por presentar una parte cóncava en la sección inferior y una parte convexa en la sección superior. Estas partes también pueden ser evaluadas separadamente, partiendo de la hipótesis de que los factores ambientales y dinámicos que determinan sus características morfológicas son distintos.

Basado en estas premisas, se llevó a cabo el procesamiento de los perfiles, modificando el sistema de coordenadas y definiendo los parámetros morfométricos, los cuales se presentan a continuación.

### *Modificación del sistema de abscisa y ordenada*

Una vez definido el perfil solamente del tramo playa/dunas primarias, se modificó el sistema de referencia de los ejes X (abscisa) e Y (ordenada). Por lo tanto, se consideró el inicio del perfil en la cresta de la duna primaria, es decir, el punto máximo de la topografía del primer cordón arenoso. De esta manera, el eje de las X crecerá en dirección hacia el mar, y el de las Y crecerá negativamente a medida que la elevación de la duna decrece, tal y como se muestra en la Figura II.4.

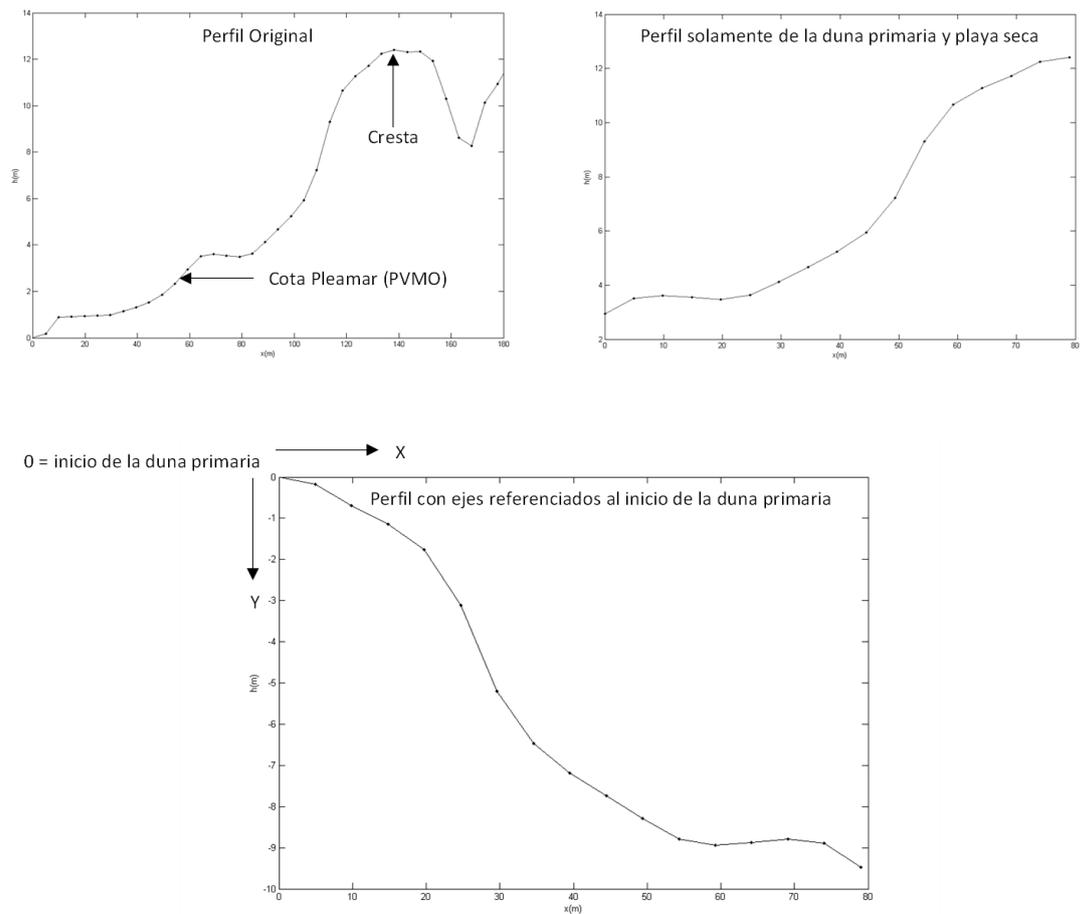


Figura II.4 – Perfil obtenido con la definición de los puntos pertenecientes al sistema playa seca/ duna primaria (desde pleamar viva media observada (PVMO) hasta cresta de la duna primaria) y cambio de referencia de los ejes X (Abscisa) e Y (Ordenada).

Definición de las partes del perfil y parámetros morfométricos

Para la definición del pie de la duna (en inglés comúnmente llamado *dune toe*), que es la transición entre la playa y la duna, van de Graaff (1990) cita que, en la práctica, sería la posición de línea de agua o la posición del nivel máximo causado por las tormentas. Más objetivamente, el pie de la duna primaria también puede ser definido con un criterio morfológico, y suele ser identificado por un cambio marcado en la pendiente del perfil (Ruessink & Jeuken 2002; van der Wal 2004; Bochev-van der Burgh et al. 2011; Houser 2013; Brodie & Spore 2015). En este trabajo se evaluó cada uno de los perfiles seleccionados y se definió el valor de la pendiente que caracteriza este cambio, para cada playa. Es decir, este valor (denominado  $PendPie$ =pendiente característica del pie) indica que pendiente menores o iguales se refieren al tramo que comprende la playa seca y valores superiores se refieren al tramo que comprende la duna. La cota del pie definida a través de la utilización de esta técnica fue confirmada con la ayuda de imágenes de satélite y de la topografía, donde se ha verificado si los valores definidos por el cambio de pendiente están en la cota y límites donde aparentemente empiezan las dunas primarias. A partir de esta separación entre perfil de la playa seca y perfil de la duna primaria los

parámetros morfométricos del perfil fueron definidos (Figura II.5) tal como se describen a continuación:

**Lduna** = anchura de la duna (m), calculada como la longitud horizontal entre la cresta de la duna y el pie de la duna.

**Lplaya** = representa la anchura de la playa seca (m), calculado como la longitud horizontal entre el nivel de Pleamar Viva Media Observada (PVMO) y el pie de la duna.

**Lbackshore** = es la anchura del backshore ( $L_{playa} + L_{duna}$ ), calculada como la longitud horizontal entre el nivel de PVMO y la cresta de la duna.

**Hduna** = altura de la duna (m), calculada como la distancia vertical entre la cresta de la duna y el pie de la duna.

**Hplaya** = altura de la playa seca (m), calculada como la distancia vertical entre la PVMO y el pie de la duna.

**Hbackshore** = es la altura del backshore ( $H_{playa} + H_{duna}$ ), calculada como la distancia vertical entre el nivel de PVMO y la cresta de la duna.

**VolDuna** = volumen de la duna ( $m^3/m$ ), calculada como la integración del área abajo de los puntos del perfil, desde la cresta hasta el pie de la duna.

**VolPlaya** = volumen de la playa seca ( $m^3/m$ ), calculada como la integración del área abajo de los puntos del perfil, desde la PVMO hasta el pie de la duna.

**VolReserva** = es el área que comprende, horizontalmente, la anchura de la duna y, verticalmente, la altura de la playa, no perteneciente ni a la duna primaria ni a la playa seca ( $m^3/m$ ).

**VolBackshore** = el volumen total del backshore, que será la suma de los volúmenes  $VolDuna + VolPlaya + VolReserva$  ( $m^3/m$ ).

**PendPie** = valor característico del cambio de pendiente que indica la intersección entre playa seca y duna primaria ( $^{\circ}$ ). Se definió un valor medio por playa a través de un análisis visual.

**Cota de inicio de la duna** = la cota, con relación al nivel medio del mar (NMM), donde se encuentra el pie de la duna primaria.

**Cota de coronación de la duna** = la cota, con relación al NMM, donde se encuentra la cresta de la duna primaria.

**PendMedDuna** = la pendiente media de la duna ( $^{\circ}$ ) (mejor ajuste lineal desde la cresta hasta el pie de la duna o tangente  $H_{duna}/L_{duna}$ ).

**PendMax** = la pendiente máxima de la duna, entre dos puntos topográficos ( $^{\circ}$ ).

**PendPlaya** = la pendiente media de la playa seca ( $^{\circ}$ ) (mejor ajuste lineal desde la PVMO hasta el pie de la duna o tangente  $H_{playa}/L_{playa}$ ).

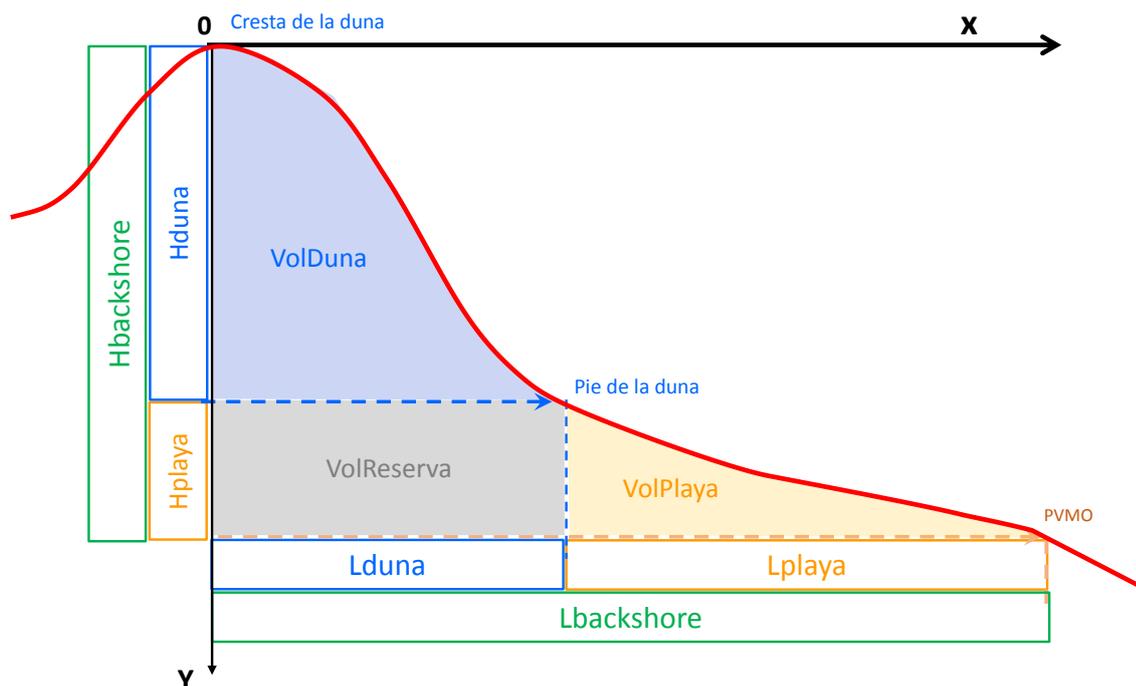


Figura II.5 – Definición de los parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria

### 2.3. Método de clasificación

De la revisión del estado del arte se ha verificado que hay diferentes aplicaciones a los métodos de clasificación de datos de perfiles de playa y/o dunas primarias. Algunos trabajos utilizan los valores de parámetros morfométricos conjuntamente con los parámetros ambientales para determinar patrones morfodinámicos entre las playas evaluadas (Pereira et al. 2010; Scott et al. 2011). Otros determinan perfiles “tipo”, o centrales, que representen perfiles reales, con el objetivo de disminuir la cantidad de datos cuando se quiere ejecutar modelos, tal como aplicado en el cálculo del riesgo de inundación costera para toda España (Tomás et al. 2015) o en la aplicación de un modelo que evalúa el impacto de temporales sobre dunas primarias (Taylor et al. 2015). Hay también los que realizan una clasificación de los perfiles con relación a su forma, tal como utilizado por Díez et al. (2017a) en la definición de formas típicas de perfiles de playa seca y su relación con el estado morfodinámico.

En la presente tesis se utilizó el algoritmo  $k$ -medias como un método de clasificación y agrupamiento para identificar las diversas formas del perfil del sistema playa/duna primaria. Este algoritmo divide los datos en un número de grupos (*clusters*), cada uno definido por un centroide o perfil tipo, donde todos los datos de entrada son clasificados de acuerdo con el centroide más cercano.

Dado un grupo de vectores reales  $d$ -dimensionales  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ , donde  $n$  es el total de datos, en este estudio específicamente el número de perfiles, y  $d$  es la dimensión de

los perfiles, que debe ser igual para todos los perfiles;  $k$ -medias es aplicado para obtener un conjunto de prototipos o centroides  $d$ -dimensionales,  $\{v_1, \dots, v_m\}$ . Esta tarea es realizada siguiendo un procedimiento iterativo, el cual comienza con un conjunto inicial de centroides elegidos aleatoriamente  $\{v_1^0, \dots, v_m^0\}$ . En cada iteración los datos más próximos de cada centroide son identificados (agrupamiento, por distancia Euclidiana) y el centroide es redefinido como una media de los datos correspondientes. El  $k$ -media iterativo mueve los centroides minimizando la distancia total dentro de cada agrupamiento, hasta que convergen y los datos pertenecientes a cada grupo se estabilicen (más información en Hastie et al. 2009).

La herramienta utilizada para aplicar  $k$ -medias fue el *software* MATLAB. Debido a que el conjunto inicial es aleatorio, los centroides definidos a cada aplicación de  $k$ -media pueden ser ligeramente distintos. Para eliminar esta variación el MATLAB presenta la opción de aplicar  $k$ -medias repetidamente, hasta que retorna la solución con el menor valor de la suma de las distancias totales dentro de cada grupo. En el caso de este estudio se aplicaron 250 repeticiones, valor suficientemente alto para que todas las pruebas presentasen los mismos centroides y no ocurriera diferencia en la suma de las distancias dentro de cada grupo.

El número de centroides a definir llevó en consideración la variabilidad de los datos y su interpretación, siendo determinado el número mínimo, tras diversas pruebas, donde se pudo identificar que todas las formas principales estaban contempladas. Se calculó el porcentaje de variación en el eje Y, para cada punto del eje X, y se admitió una variación máxima de un 30%.

#### Separación y adimensionalización de los perfiles

Para aplicar  $k$ -medias es necesario que los datos de entrada, en el caso de este estudio los perfiles del sistema playa/duna primaria, tengan las mismas dimensiones. Debido a la gran variabilidad de formas y tamaños existentes, y después de realizar varias pruebas (datos no presentados), se ha definido que:

i) Es necesario evaluar separadamente los diferentes tramos del perfil, considerando que cada parte presenta comportamientos y factores distintos que influyen en su forma, y así poder comparar mismas unidades morfológicas. Por lo tanto, para facilitar la evaluación morfológica del perfil playa/dunas primarias, los mismos fueron separado en 3 partes, tal como se muestra en la Figura II.6:

- Playa seca: comprende la parte del perfil desde la Pleamar Viva Media Observada (PVMO) hasta el pie de la duna.
- Duna tramo cóncavo: es la parte inferior de la duna primaria, que presenta una curvatura cóncava y comprende la parte del perfil desde el pie de la duna hasta la máxima pendiente;
- Duna tramo convexo: comprende la parte superior de la duna primaria, desde la máxima pendiente hasta la cresta de la duna.

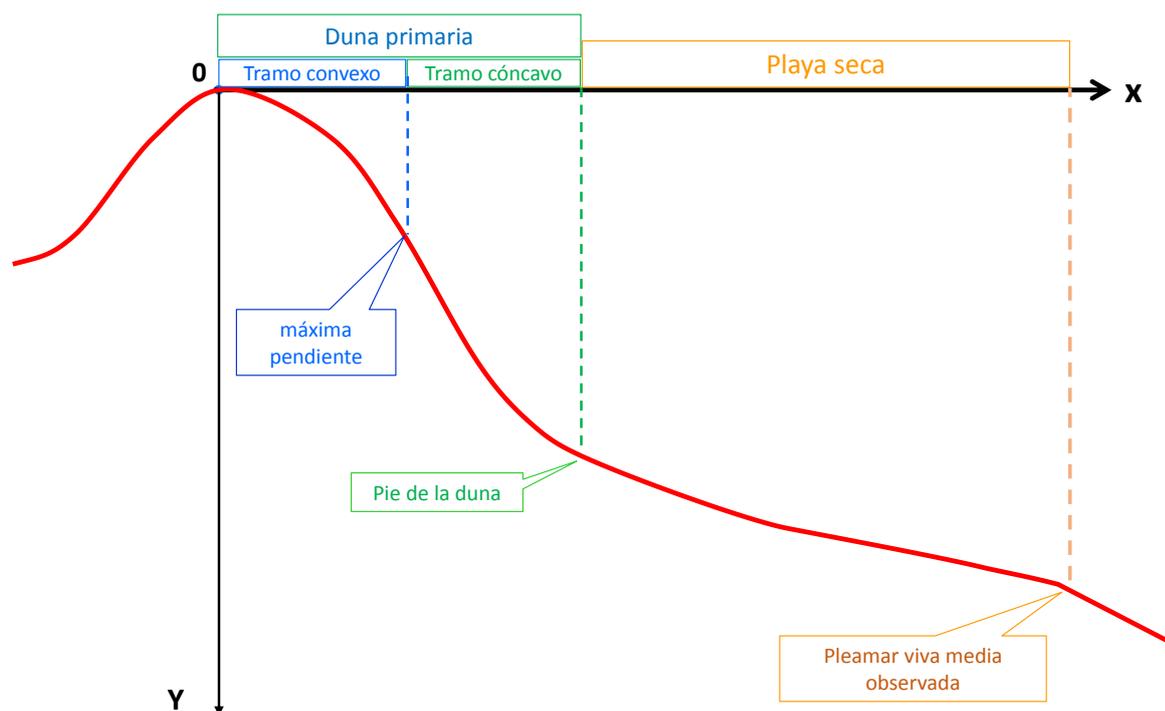


Figura II.6 – Separación del perfil

(ii) La metodología del  $k$ -media exige que los perfiles evaluados presenten la misma altura y misma longitud. Debido a que los perfiles estudiados en esta tesis presentan diferentes tamaños, fue necesario hacer su adimensionalización. Para esto se aplicó, para cada parte del perfil:  $X_{adim} = X/X_{max}$  e  $Y_{adim} = Y/Y_{max}$ ; donde  $X_{max}$  e  $Y_{max}$  son los valores máximos de cada parte en cada perfil, representando la longitud y altura, respectivamente. Con la adimensionalización es posible comparar formas, pero se pierden datos de alturas y anchuras

(iii) Para que sea posible la evaluación de la forma de cada parte es necesario un mínimo de 3 puntos en los datos originales de los perfiles, que tiene resolución de 5m en el eje X. Tras la separación de las partes del perfil se verificó que algunos presentaron la parte convexa con menos de 3 puntos. Para estos casos se definió que la parte “Duna Tramo Convexo” era no identificada/detectada y clasificados de tipo “0”.

### 3. Descripción de las características morfométricas de las áreas de estudio

Las playas seleccionadas (áreas de estudio), localizadas en la costa norte/Atlántica de España, son pertenecientes a tres comunidades autónomas: Cantabria, Asturias y Galicia (Figura II.7). Se hizo un estudio bibliográfico sobre cada playa. Sus perfiles fueron evaluados en cuanto a las características morfológicas y parámetros morfométricos. Debido a la extensión de la descripción detallada de cada una de las playas y sus perfiles,

esta información se presenta en el Anexo II. A modo de ejemplo, para que el lector sepa la información que encontrará en el Anexo II, a continuación se presenta la información referente a la playa del Puntal de Somo, es decir, los conocimientos previos publicados acerca de la playa, los perfiles seleccionados, la descripción morfológica y los parámetros morfométricos.

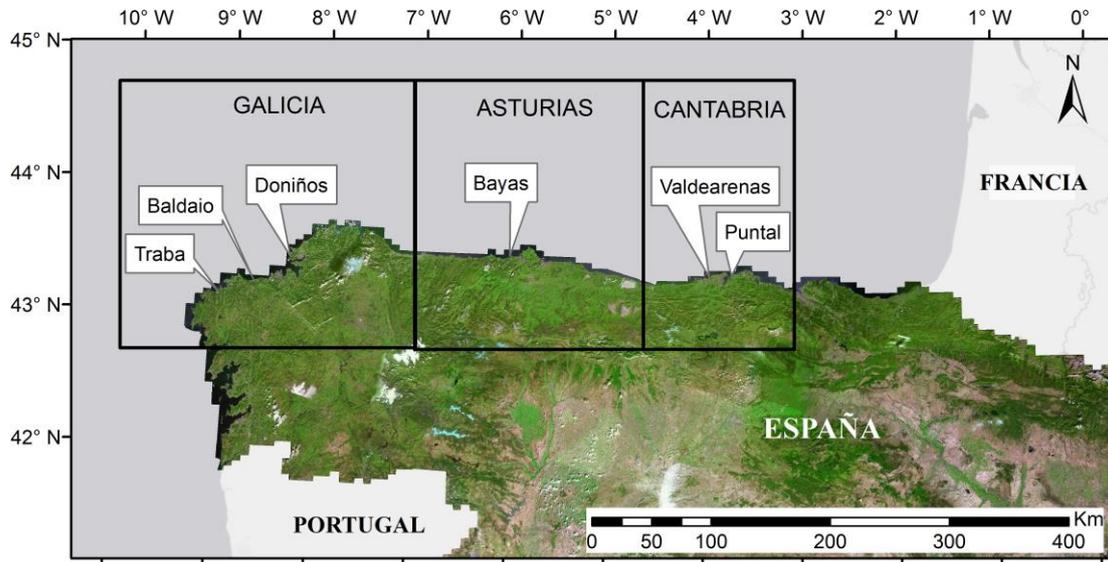


Figura II.7 – Localización de las playas seleccionadas en la costa atlántica española, para la evaluación de sus dunas primarias.

### 3.1. Puntal de Somo

Localizada en el municipio de Ribamontón al Mar (lat. 43° 27' 27" N; long. 03° 45' 59" W), Cantabria (Figura II.8), esta playa se ubica en la región externa de la barrera arenosa localizada en la salida de la Bahía de Santander, con contribuciones de sedimento proveniente de los ríos Pas y Miera (Flor et al. 2011). Presenta orientación hacia el norte (dirección entre 14 y 356°, dependiendo del tramo de la playa), con una longitud de la playa de aproximadamente 2500m. A pesar de la fuerte influencia de las corrientes de marea, la región de la playa/duna estudiada en esta tesis está dominada por la dinámica de las olas (Losada et al. 1991).

La barrera arenosa del Puntal de Somo presenta, en la sección central, un sistema de dunas que actúa como protección contra olas de alta energía provenientes de temporales, previniendo o retrasando la intrusión de agua y sedimento para las áreas de tierra. Esta formación natural de puntal ha sido objeto de importantes transformaciones debido tanto a procesos naturales como por influencias antrópicas. Detalles de la evolución morfodinámica pueden ser apreciados en el trabajo desarrollado por Losada et al. (1991).

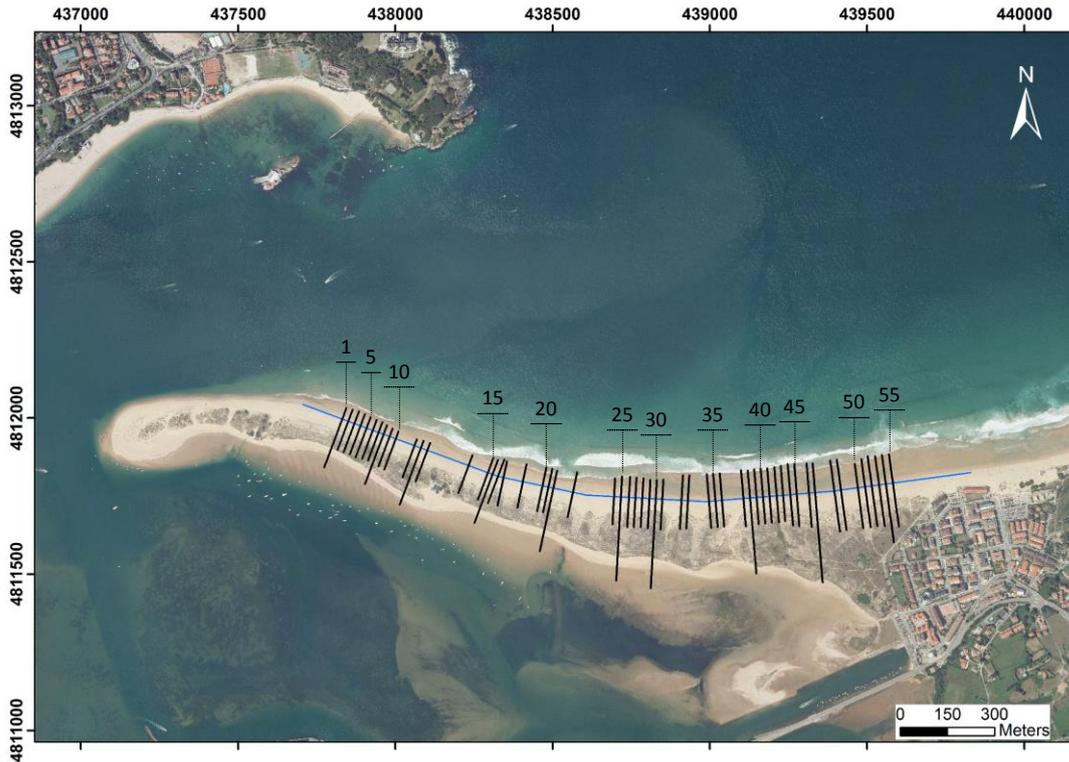


Figura II.8 –Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) de la playa del Punta de Somo y perfiles evaluados en este estudio.

En 1992 trabajos de restauración de las dunas han sido ejecutados en diversas fases, consistiendo del refuerzo del sistema dunar deteriorado, a través del uso de trampas de sedimento en combinado con trasplante de vegetación. En áreas sensibles se han construido cercas para reducir el efecto de pisoteo humano. Se han construido pasarelas elevadas para dar acceso a la playa, y estas fueron dispuestas estratégicamente cerca de los aparcamientos, incluyendo carteles informativos (Gómez-Pina et al. 2002). Pasados 20 años desde las intervenciones hasta la obtención de los datos de topografía utilizados en esta tesis, se consideró que la forma de las dunas primarias presenta las características naturales de equilibrio.

En lo que se refiere al sedimento, en el estudio de Martínez Cedrun et al. (2014) se midieron valores medios de tamaño de grano de 0.28mm para la playa y de 0.26mm para el

sistema de dunas, que coinciden con los obtenidos en evaluaciones más recientes a lo largo de la playa, entre 0.28-31mm para la playa y 0.26-29mm para las dunas primarias (Triax 2015), valores utilizados en la presente tesis.

La evaluación de los perfiles obtenidos del sistema playa/duna (Figura II.9) y sus datos morfométricos (Tabla II.3; Figura II.10) demuestra que estos presentan una variabilidad, con un marcado patrón espacial.

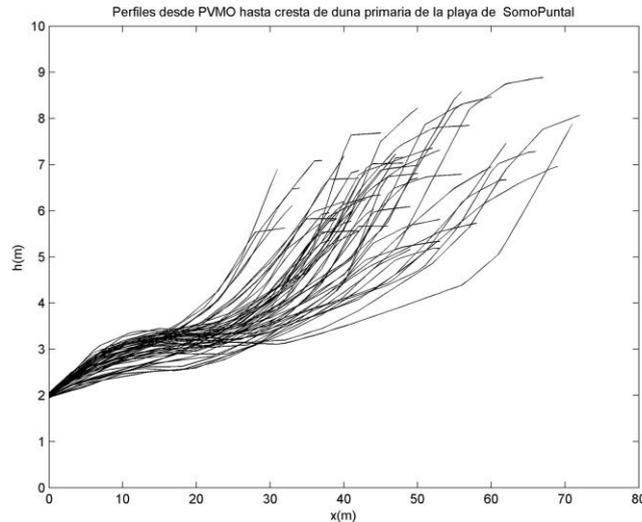


Figura II.9 – Perfiles de la playa/duna primaria del Puntal de Somo (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar).

Tabla II.3 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria del Puntal de Somo (Número de perfiles evaluados=55).

<b>Parámetro</b>	<b>Mín</b>	<b>Max</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación típica</b>
<i>Lbackshore (m)</i>	31.00	72.00	48.11	47.00	10.32
<i>VolBackshore (m<sup>3</sup>/m)</i>	50.13	179.84	90.92	80.67	33.80
<i>Cota de coronación dunas (ref.NMM)</i>	5.15	8.77	6.59	6.65	0.93
<i>Cota de inicio de las dunas (ref. NMM)</i>	3.06	4.69	3.67	3.60	0.39
<i>Hduna (m)</i>	1.44	4.97	2.97	2.81	0.80
<i>Lduna (m)</i>	14.00	30.00	19.24	19.00	4.71
<i>VolDuna (m<sup>3</sup>/m)</i>	11.00	80.66	29.80	25.97	14.75
<i>PendMedDuna(°)</i>	5.03	14.85	9.85	9.63	2.13
<i>PendMax Duna (°)</i>	6.56	26.36	14.31	14.21	3.82
<i>Hplaya (m)</i>	1.11	2.74	1.68	1.61	0.39
<i>Lplaya (m)</i>	16.00	56.00	28.87	28.00	8.48
<i>PendPlaya (°)</i>	1.60	4.80	2.91	2.75	0.83

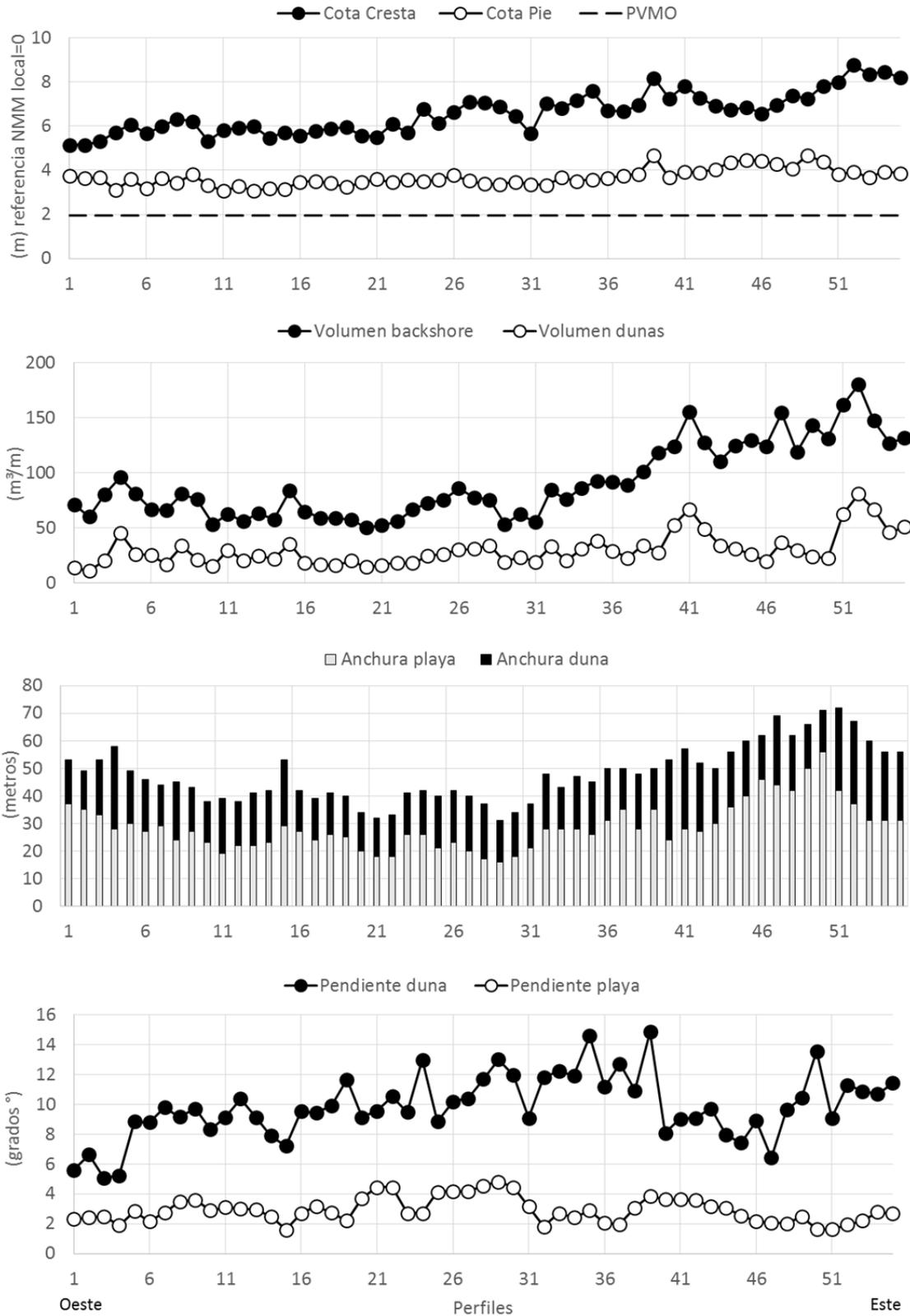


Figura II.10 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa del Puntal de Somo.

Se puede observar que del oeste hacia el este hay un aumento de la cota donde se localiza la cresta de la duna (de 5.2 hasta 8.8m por encima del NMM), así como del volumen del backshore (la numeración de los perfiles se representa en la Figura II.8). La pendiente que define el pie de la duna es de  $5.1^\circ$ , que se localiza a una cota de aproximadamente 3.7m por encima del nivel medio del mar. La anchura de la playa varía considerablemente (entre 16 y 56m) con mayores valores concentrados en los perfiles más al este. La pendiente de la playa presenta un valor medio de  $2.9 \pm 0.8^\circ$ , mientras que las dunas presentan valores de pendiente media variando entre  $5$  y  $14^\circ$ , con pendiente máxima absoluta registrada de  $26^\circ$ .

### 3.2. Evaluación de todas las áreas de estudio

La descripción de cada una de las playas, de la misma manera que se presentó para la playa de Puntal de Somo, está en el Anexo II. En este apartado se presenta una visión general de todos los perfiles evaluados y los valores medios encontrados para cada área de estudio.

Tal como se puede observar en la Tabla II.4, Figura II.11 y Figura II.12, y en el Anexo II, los parámetros morfométricos de los perfiles de las dunas primarias y playas adyacentes investigadas presentan amplia variación.

Tabla II.4 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de áreas de estudio localizadas en el litoral norte de España (Número de perfiles evaluados=193).

<i>Parámetro</i>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación típica</b>
<i>Lbackshore (m)</i>	31.0	114.0	57.3	54.0	14.7
<i>VolBackshore (m<sup>3</sup>/m)</i>	50.1	551.8	164.5	143.9	89.3
<i>Cota de coronación dunas (ref.NMM)</i>	5.2	13.0	8.4	8.1	1.9
<i>Cota de inicio de las dunas (ref. NMM)</i>	2.9	5.4	3.9	3.8	0.5
<i>Hduna (m)</i>	1.4	9.1	4.5	4.1	1.8
<i>Lduna (m)</i>	11.0	59.00	27.30	25.0	10.03
<i>VolDuna (m<sup>3</sup>/m)</i>	11.0	269.9	79.5	56.8	60.6
<i>PendMedDuna(°)</i>	5.0	20.3	10.7	10.3	2.7
<i>PendMax Duna (°)</i>	6.6	34.5	16.7	15.6	5.3
<i>Hplaya (m)</i>	1.0	3.5	2.0	1.9	0.5
<i>Lplaya (m)</i>	11.0	58.0	30.0	29.0	9.3
<i>PendPlaya (°)</i>	1.6	7.0	3.4	3.5	1.0

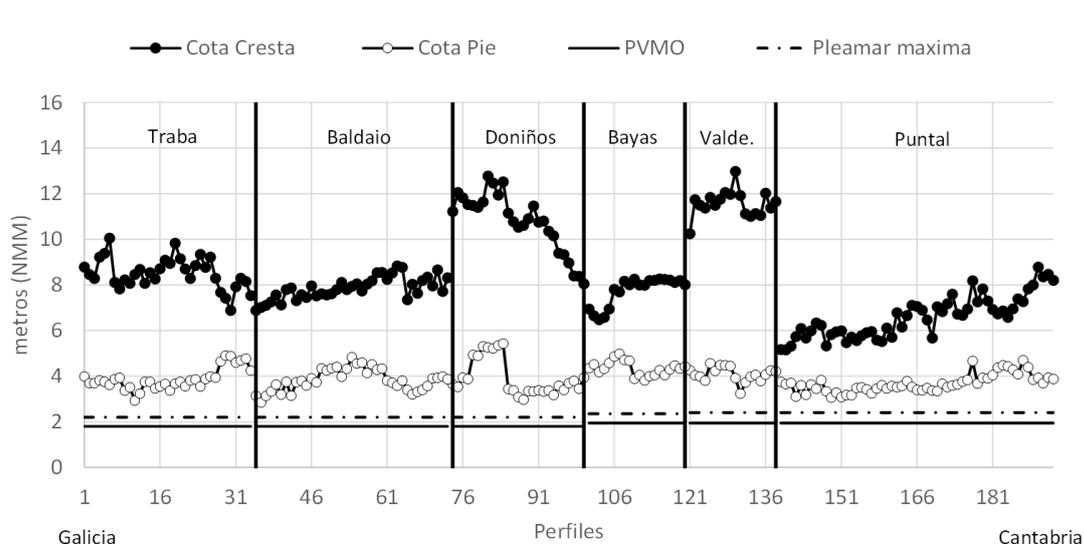


Figura II.11 – Variación espacial de las cotas del pie y cresta de las dunas de todos los perfiles evaluados en el litoral norte de España.

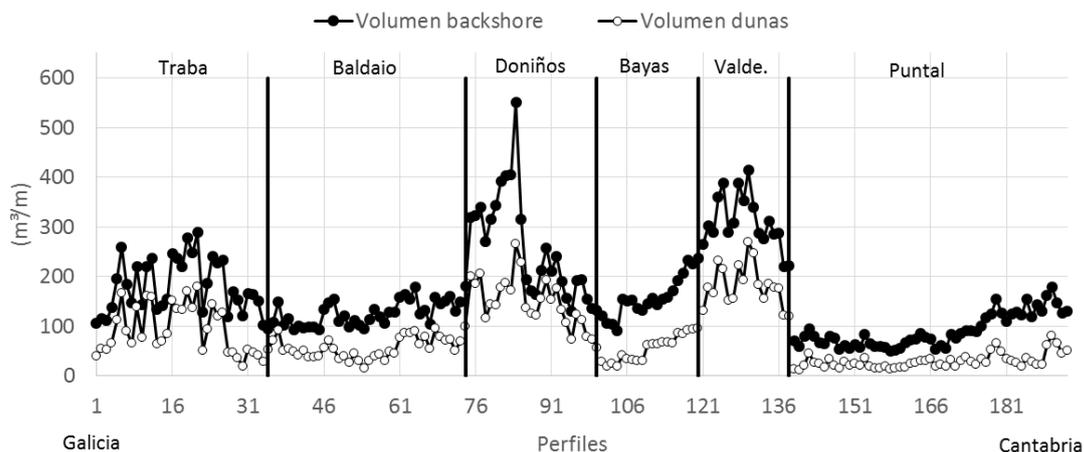


Figura II.12 – Variación espacial del volumen de todo el *backshore* y de las dunas primarias de todos los perfiles evaluados en el litoral norte de España.

En el siguiente apartado se presenta la evaluación de los parámetros morfométricos. Primeramente, se presenta una evaluación de las diferencias que pueden ocurrir en los parámetros morfométricos, definidos a partir de diferentes metodologías y referencias de inicio y final de cada tramo evaluado. Tras la presentación de estos resultados se evalúa la relación entre los parámetros morfométricos. Al final de este capítulo se aplica una metodología de clasificación automática para evaluar la variación de forma de cada uno de los tramos del perfil del sistema playa/ dunas primarias. Estos resultados se presentan a continuación.

#### 4. Evaluación de los parámetros morfométricos

Tras la definición de los parámetros morfométricos, presentados anteriormente y en el Anexo II, se hace una evaluación y comparación de los resultados de cada parámetro

según diferentes metodologías, y posibles relaciones existentes entre estas y con el tamaño del sedimento. A continuación, se presentan los resultados de:

- la localización del pie de las dunas primarias;
- las pendientes evaluadas;
- la altura, volumen y anchura de las dunas primarias;
- la correlación existente entre los parámetros morfométricos de la duna primaria (relaciones alométricas);
- la correlación entre los parámetros morfométricos con el tamaño del sedimento;
- la correlación de los parámetros morfométricos de la duna primaria con los de la playa seca.

#### 4.1. Resultados y discusión

##### Localización del pie de la duna

Uno de los parámetros más cruciales y difíciles de determinar es la localización del pie de la duna, es decir, donde termina la playa seca y donde empieza la duna primaria. Al evaluar los estudios publicados que se enfrentan con este problema se ha verificado que diversas metodologías y parámetros han sido aplicados.

Para determinar el pie de la duna algunos autores lo definieron como la posición de la línea de agua, la posición del nivel máximo causado por tormentas y/o de máxima acción de procesos de olas y corrientes; por encima de esta cota del perfil ya se consideran las dunas, donde los procesos eólicos son predominantes (van de Graaff 1990; Psuty 1993). Hesp (2011) afirma que el punto en la playa seca donde empieza las dunas primarias está fuertemente relacionado con la altura del lavado de la marea de sicigia, debido a que el lavado y la inundación causada por el mar limitará el crecimiento de las plantas pioneras.

Otra metodología para la definición del inicio de la duna primaria considera el pie como el borde donde empieza la vegetación (Miot da Silva & Hesp 2010), pero la mayoría de los autores prefieren utilizar un criterio morfológico, normalmente relacionado con el cambio en el perfil. Tal criterio puede ser por el cambio de pendiente entre la playa (pendiente suave) y la duna primaria (frente más inclinado), definido perfil a perfil (p. ej. Houser 2013; Houser & Mathew 2011). En los estudios de las dunas primarias en la costa de Holanda, hasta 1965 se definía el pie de la duna a través del cambio de pendiente, luego se estandarizó la cota del pie de la duna a un nivel fijo que coincide con este cambio (+3m, con relación al *Netherlands Vertical Datum*) (Ruessink & Jeuken 2002; van der Wal 2004; Bochev-van de Burgh et al. 2009; Bochev-van der Burgh et al. 2011; de Vries et al. 2011; de Vries et al. 2012).

Un grupo de investigadores que estudia las dunas primarias en la costa oeste del EE.UU. (Ruggiero et al. 2011; Mull & Ruggiero 2014; Zarnetske et al. 2015) prefirieron utilizar una selección automática para la identificación de este cambio en el perfil, a través de un algoritmo que define localmente el pie de la duna como la máxima diferencia entre el

perfil medido y un perfil ajustado a una función polinomial cúbica. Sin embargo, este tipo de selección automática puede presentar errores importantes en perfiles medidos cuando la actividad eólica es intensa y el cambio entre playa y duna no está muy claro (Ruggiero et al. 2011). Otra metodología aplicada para identificación automática fue utilizada por Brodie & Spore (2015), donde identifican el punto más distante entre el perfil medido y el ajuste lineal entre la cresta de la duna y la pleamar máxima media. La localización exacta del pie de la duna será la curvatura positiva (cóncava) máxima en el tramo del perfil de  $\pm 10\text{m}$  del punto previamente identificado. Debido a que estas metodologías de identificación automática fueron desarrolladas particularmente para las playas estudiadas, se observó que su aplicación no es totalmente fiable para los perfiles utilizados en la presente tesis (datos no presentados), principalmente por las variaciones en la parte de playa seca.

Con el objetivo de verificar de qué depende la localización del pie de la duna, en este estudio no se determinó una cota fija. Así como estudios anteriores, en la presente tesis se decidió utilizar el cambio de pendiente entre la playa seca y la duna primaria para la definición del pie de las dunas primarias. Como se ha explicado en el apartado 2.2 (Metodología) se definió un valor por playa de la pendiente que caracteriza el cambio entre la playa y la duna primaria, denominado Pendiente del Pie (PendPie).

Los resultados encontrados muestran que el pie de la duna se localiza siempre a una cota superior a la Pleamar Máxima Astronómica (PMax). Hay gran variación de valores de cota del pie con referencia al nivel medio del mar, a pesar de que los niveles de marea, tanto la pleamar viva media observada (PVMO) cuanto la PMax de las playas estudiadas son semejantes (Figura II.11). Dicha variación nos indica que otros factores y/o la sinergia entre ellos es lo que define la posición y cota del pie de las dunas, no solamente la cota de pleamar. La influencia de cuales factores ambientales definen esta cota será verificada en el próximo capítulo.

Al relacionar la pendiente media de la playa y de las dunas con la PendPie, es posible observar que los valores definidos para PendPie están mejor relacionados con la pendiente de la playa. Eso ocurre probablemente porque es el cambio de la pendiente de la playa que influye el investigador en la definición del valor de PendPie (Figura II.13).

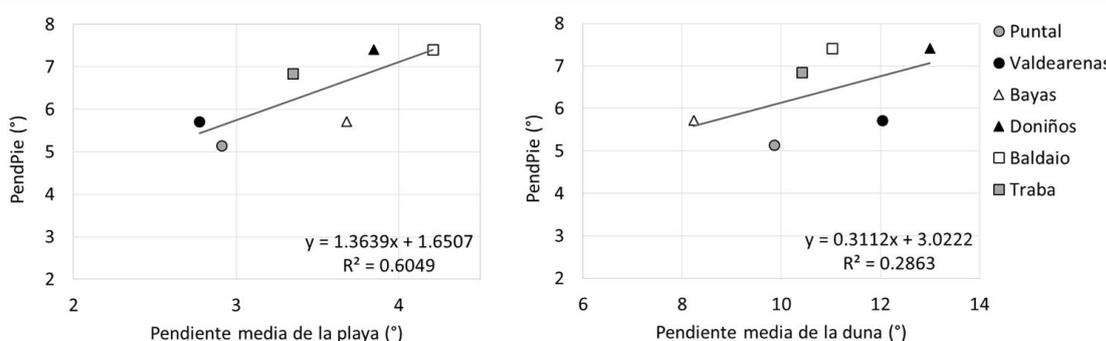


Figura II.13 – Relación entre pendiente de la playa y de la duna con la pendiente del pie de la duna primaria (PendPie).

### Pendientes

En cuanto al cálculo de la pendiente media, este puede ser realizado a través de encontrar la línea de mejor ajuste al tramo de playa (p. ej. en trabajo de Vries et al. 2012) y al tramo de dunas (p.ej. en trabajo Brodie & Spore 2015); o simplemente calculando la tangente entre el punto inicial y final de cada tramo (p.ej. en trabajo de Mull & Ruggiero 2014). Ambas maneras de calcular fueron aplicadas en este estudio y la diferencia entre las mismas es muy pequeña, como se puede comprobar en la Figura II.14. Por lo tanto, se decidió utilizar los valores del ajuste lineal para cálculo de las pendientes, por considerar la pendiente de la mayoría de los puntos y no solamente la tangente entre altura y longitud.

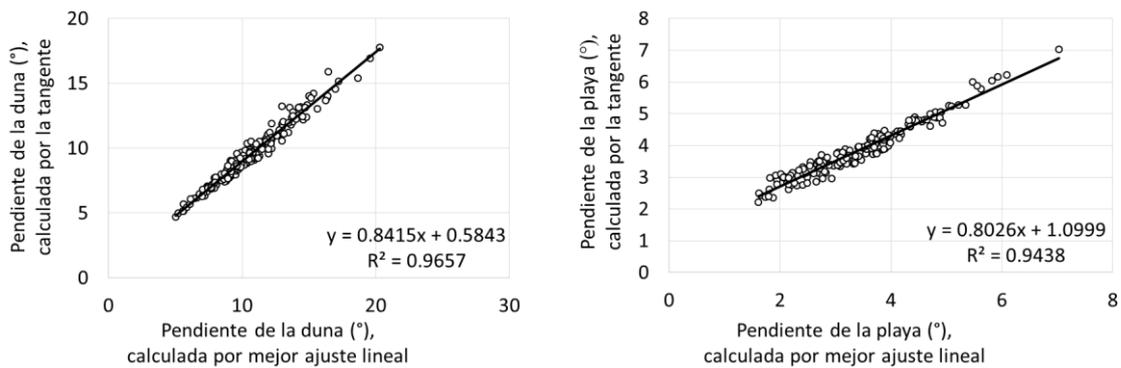


Figura II.14 – Relación entre los valores de pendiente media calculada a través del mejor ajuste lineal y calculada por la relación entre altura y longitud del perfil (tangente).

La literatura científica presenta una gran variación de valores de pendiente de duna considerada en equilibrio. Duran & Moore (2013) verificaron, a través de la aplicación de un modelo de desarrollo de dunas primarias, que las dunas primarias simuladas llegan a su estado estable con pendiente de la cara de barlovento variando entre 18-25°, valor coincidente con registros reales de dunas estables. Arens et al. (1995) y Bauer et al. (2012) registraron que no hay actividad de transporte durante condiciones favorables de viento, para dunas con pendiente a barlovento empinadas (ángulos de 27° y 22°, respectivamente). El modelo de transporte de sedimento en dunas transversales desarrollado por Van Dijk et al. (1999) predice un estado estable en dunas con ángulos de 7-8° en la cara de barlovento. De acuerdo con Livingstone & Warren (1996), la mayoría de las dunas transversales tienen una pendiente de barlovento de 5-10°. Brodie & Spore (2015) realizaron una clasificación morfológica de las dunas primarias de la costa norte del estado de Carolina del Norte (EE.UU.) y consideraron que las dunas sanas (aquellas que no están erosionadas o no sufrieron procesos de recuperación y reconstrucción) presentan pendientes de no más de 31° (0.6), aproximadamente el ángulo de reposo de sedimento, indicando una continua deposición y actividad debido a procesos eólicos. En la Figura II.15 se puede ver el histograma de las pendientes medias y máximas registradas en las dunas primarias estudiadas.

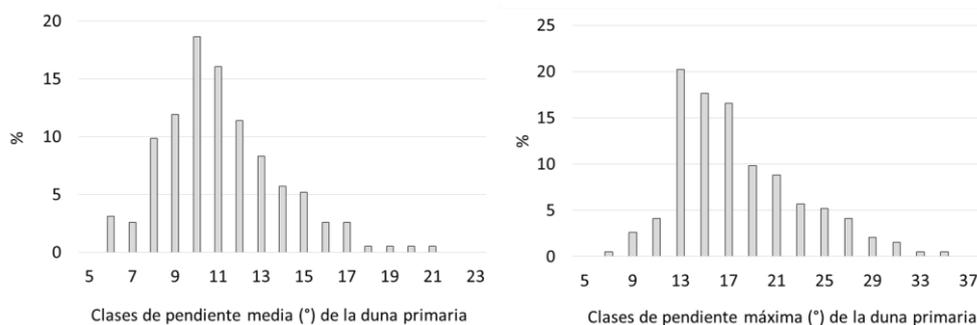


Figura II.15 – Histograma de clases de pendiente media y máxima (en grados) de las dunas seleccionadas en la costa norte de España

La gran mayoría de las dunas evaluadas en este estudio presentaron pendientes máximas entre 12 y 18°, y pendientes medias (mejor ajuste lineal para todo el perfil de dunas) de 10°. A pesar de funcionar como indicativo de la morfología general de la duna primaria, la medida de pendiente media debe ser utilizada con cautela, pues es calculada como el mejor ajuste (o la tangente) de un perfil cóncavo/convexo, lo que puede resultar en valores no representativos de su morfología (ver Figura II.16). Por lo tanto, se considera que la pendiente máxima, es decir, la máxima pendiente encontrada entre dos puntos topográficos del perfil de duna, es una mejor indicación de la característica morfológica, sea en relación con su estado de erosión o deposición.

Los valores de pendiente máxima encontrados en las dunas estudiadas en esta tesis están entre lo indicado en el modelo teórico de Duran & Moore (2013) y el modelo de Van Dijk et al. (1999). Además, estos ángulos indican dunas sanas, según la clasificación de Brodie & Spore (2015). De la base de datos inicial se verificó que algunas playas del norte de España (p. ej. Salinas, en Asturias, datos no enseñados) presentaron valores de pendiente más altos, de hasta 40°, coincidente con características muy claras de una condición erosiva, como presencia de escarpes.

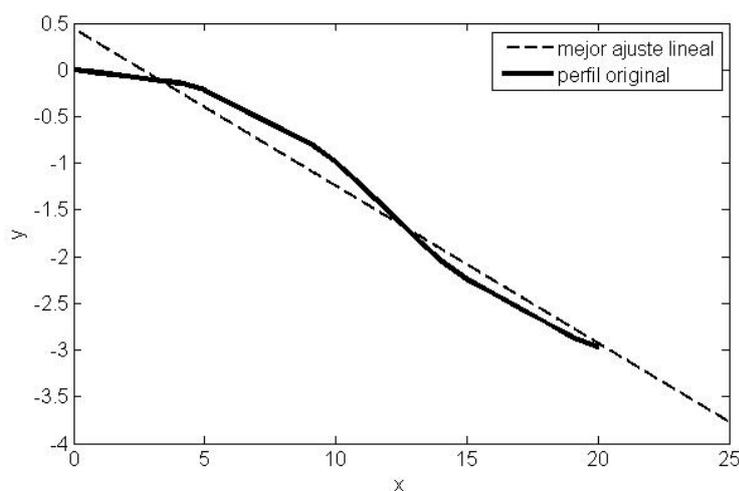


Figura II.16 – Ejemplo de cálculo de la pendiente media para las dunas primarias

### Altura de la duna primaria

En cuanto a la definición de la altura de la duna primaria, esta puede ser tanto del punto de vista de la cota de coronación con relación al nivel del mar (p. ej en la investigación de Saye et al. 2005 y Zarnetske et al. 2015) como la distancia vertical entre el pie de la duna y la cresta (Houser 2013). En esta tesis se definió las dos medidas y la relación entre ellas es muy fuerte, principalmente si utilizamos los valores medios de cada playa (Figura II.17), debido a que la altura de la duna comprende gran parte de la altura de la cota de coronación.

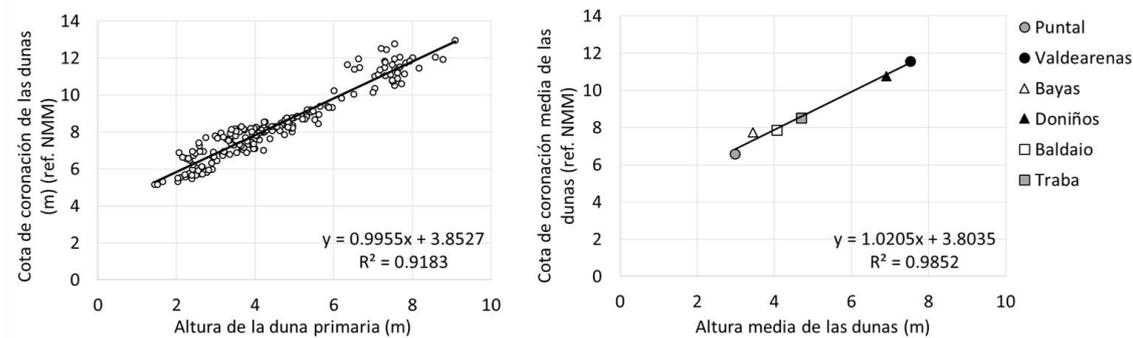


Figura II.17 – Relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos cota de coronación de la duna y altura, para todos los perfiles evaluados (izquierda) y con valores medios de cada playa (derecha).

En esta tesis se considera que las dos referencias de altura de la duna son válidas y ambas serán presentadas en las próximas evaluaciones.

A pesar de que la altura de la duna es importante para su diseño, según Hesp (2012) es un parámetro menos aplicable a ser utilizado para estimar la relación entre el estado de la playa, el transporte eólico de sedimento y el desarrollo de las dunas. Este autor indica que estimaciones de volumen permiten una medida más precisa para determinar tal relación. Este parámetro será analizado a continuación.

### Volumen de la duna primaria

La definición del volumen de las dunas primarias puede variar en función de los puntos de inicio y final de su perfil. En la mayoría de los estudios, el punto inicial se refiere al pie de la duna, discutido anteriormente. Sin embargo, hay autores, como Zarnetske et al. (2015), que para evaluar la variación del volumen de las dunas de la costa noroeste de Estados Unidos, prefirieron utilizar una cota fija de inicio, debido a la incertidumbre de obtener la posición del pie de las dunas primarias. Para la definición del punto final, los estudios que evalúan la variación de volumen a lo largo del tiempo, su progresión y retroceso con relación a la línea de costa, definen un punto fijo, normalmente a sotavento de las dunas, que no presente variación significativa en el tiempo, tal como hicieron de Vries et al. (2012). Los autores de estudios que evalúan las relaciones entre la duna primaria y los procesos que ocurren en la playa prefieren utilizar la cresta de la duna como punto final para la definición del volumen (Miot da Silva & Hesp 2010; Miot da

Silva et al. 2012; Brodie & Spore 2015), siendo esta última referencia la utilizada en la presente tesis.

Se ha incluido, además de la evaluación del volumen de la duna, la evaluación del volumen del backshore (de todo el sistema playa-duna primaria), debido principalmente a la incertidumbre de la definición del pie de la duna, tal y como se ha discutido anteriormente. Este tipo de medida también fue aplicado en el estudio desarrollado por Saye et al. (2005) que evaluó las relaciones morfométricas de las playas y dunas de la costa de Inglaterra y País de Gales.

De lo observado en la Figura II.12 se concluye que el comportamiento espacial del volumen de la duna y del backshore es el mismo, presentando una relación estrecha entre las dos medidas de volumen, como se puede ver en la Figura II.18. Esta fuerte relación indica la importancia de las dunas primarias en el volumen total del sistema subaéreo y su función de almacenamiento de sedimento que podrá ser utilizado en períodos erosivos para la recuperación de la playa. La media del volumen de la duna correspondió a un 45% del volumen total de la zona subaérea (backshore), mientras que la playa colabora con un 21% y el volumen de reserva un 34% (ver definiciones en la Figura II.5).

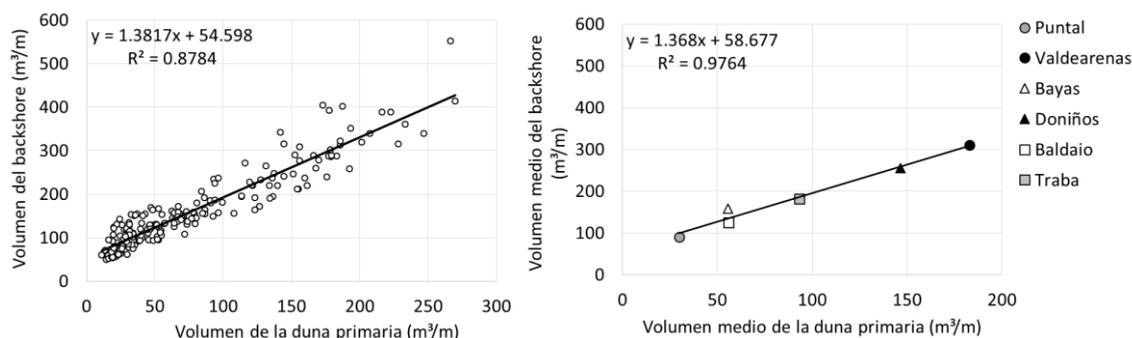


Figura II.18 – Relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos volumen de la duna primaria y volumen del backshore, para todos los perfiles evaluados (izquierda) y para los valores medios de cada playa (derecha).

### Anchura de la duna primaria

La anchura de la duna se refiere a la distancia horizontal entre el pie y la cresta de la duna, algunas veces denominada de “media anchura” (Zarnetske et al. 2015). La anchura de la duna es un parámetro menos utilizado en la evaluación de la morfodinámica, dado que las investigaciones publicadas normalmente evalúan su altura, volumen y/o pendiente, o la relación de la anchura con estos parámetros. De la misma manera que ocurre con las medidas de altura y volumen, la definición del pie de la duna afectará la definición de la anchura.

Se hizo la correlación entre la medida de anchura de la duna y la anchura de todo el backshore (Figura II.19). Lo que se puede observar es que la anchura de la duna, para las playas españolas evaluadas, contribuye con aproximadamente un 50% de la anchura total del backshore, una vez más indicando la importancia de las dunas en el sistema subaéreo de playa seca/duna primaria.

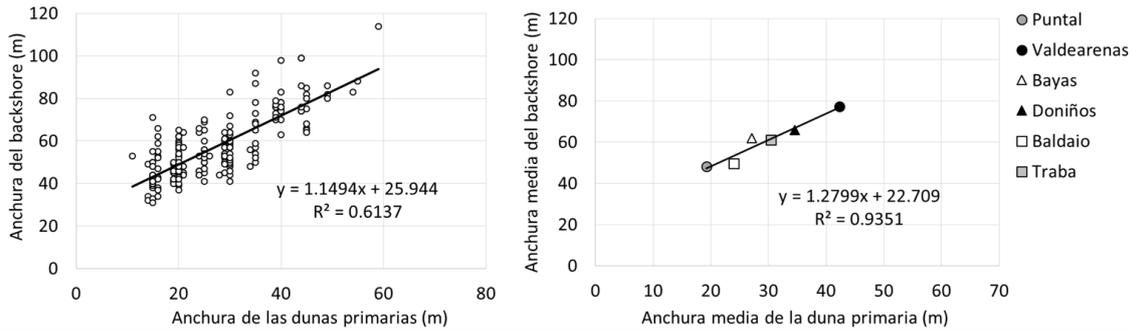


Figura II.19 – Relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos anchura de la duna primaria y anchura del backshore, para todos los perfiles evaluados (izquierda) y para valores medios de cada playa (derecha).

### Correlaciones entre los parámetros morfométricos (relaciones alométricas)

Uno de los objetivos de esta tesis es definir cuáles son los parámetros morfológicos de una duna primaria en equilibrio y de qué dependen. En el próximo capítulo se evaluará la influencia de los parámetros de la dinámica de oleaje y viento en la morfología de las dunas primarias. No obstante, y de acuerdo con Whalley (1990), se considera de extrema importancia la evaluación de sus parámetros morfométricos y la inter-relación entre los mismos (relaciones alométricas), dado que es una herramienta importante para el entendimiento de la evolución de las formas de los accidentes geográficos; es el punto inicial para explicar los procesos geomorfológicos que permiten predecir, empíricamente, un intervalo de procesos y dinámicas (Whalley 1990).

Partiendo del principio de que la forma de la duna y sus relaciones permanecen constantes cuando esta llega al estado de equilibrio, a partir de la definición de uno de los parámetros morfométricos de una duna primaria será posible la determinación de los demás si se definen relaciones entre ellos, llamada relaciones alométricas. Este tipo de relación es interesante cuando se desea definir “parámetros de diseño” al proyectar la recuperación o construcción de una duna.

La utilización de este tipo de relacione es común en estudios de dunas desérticas, tal como lo han descrito Hesp & Hastings (1998), que evaluaron las relaciones alométricas de dunas desérticas del tipo barjanes, con especial énfasis en la altura y la longitud entre los “cuernos” de la duna, y compararon sus resultados con los de otros estudios; o la relación entre la altura y el espaciamiento entre dunas desérticas, evaluada por Lancaster (1988).

Para las dunas primarias no se encontraron artículos que presenten este tipo de relación entre los parámetros morfométricos. Las relaciones encontradas entre los parámetros volumen, altura y anchura de la duna, obtenidos con los datos de esta tesis, pueden ser observadas en la Figura II.20, además de la relación entre la pendiente máxima de la duna y su altura.

Se puede observar que el mejor ajuste de la ecuación que relaciona altura y anchura es lineal, mientras que entre altura y anchura con volumen la ecuación que mejor describe

esta relación es la potencial. Todas presentaron un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) que indica buena correlación, con valores de más de 0.9.

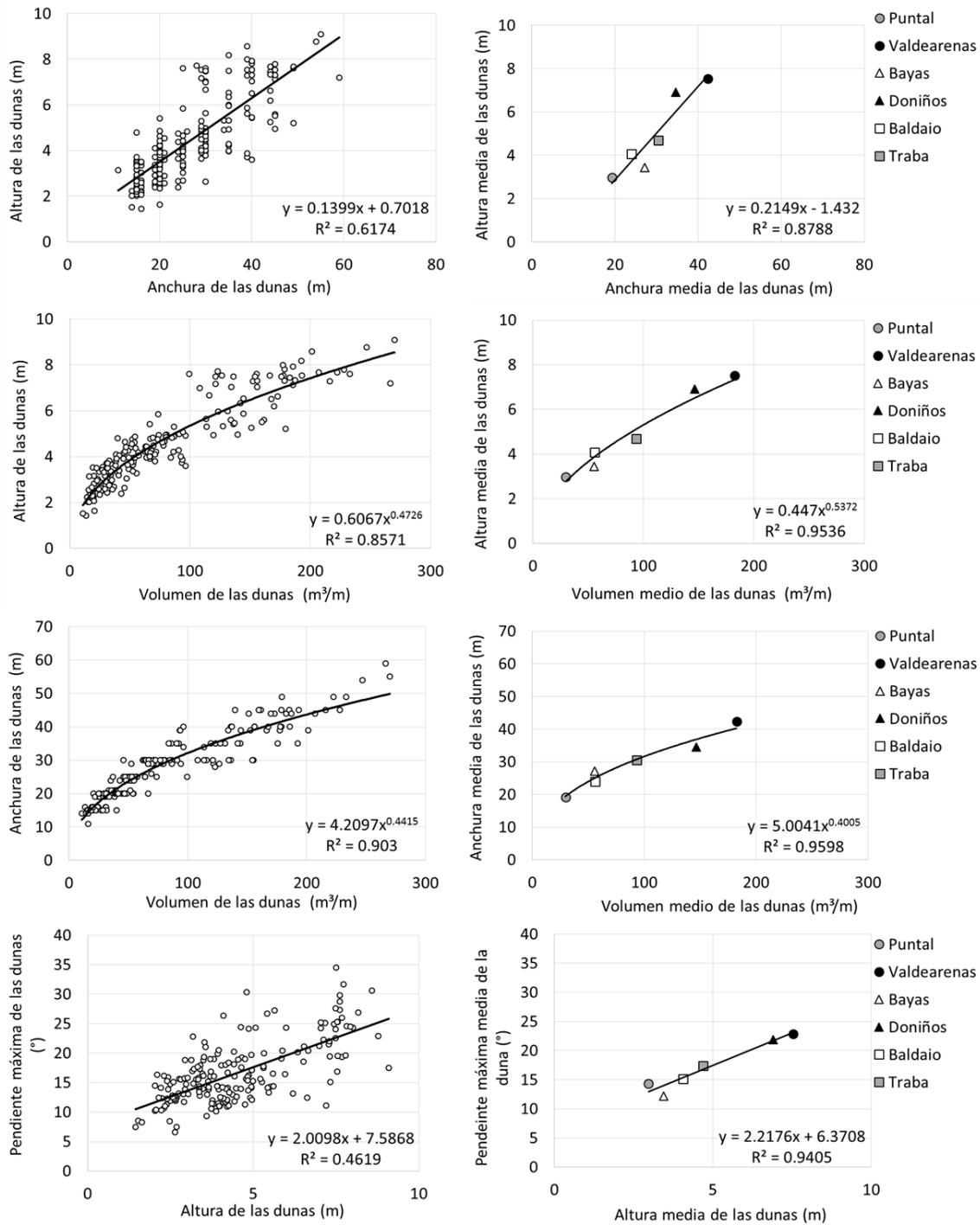


Figura II.20 – Relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos de las dunas primarias: volúmenes, alturas, anchuras y pendientes máximas; para todos los perfiles evaluados (izquierda) y para valores medios de cada playa (derecha).

Hay una relación lineal positiva entre la pendiente máxima de la duna y su altura, débil si consideramos todos los datos ( $R^2=0.46$ ) pero fuerte si consideramos los valores medios encontrados en cada playa ( $R^2=0.94$ ), donde cuanto más alta sea la duna, mayor su pendiente. Eso se explica en el modelo propuesto por Momiji & Bishop (2002), donde el

flujo y capacidad de transporte es influenciado por la pendiente de la duna. Afirman que cuanto mayor es la altura de la duna, mayor la probabilidad de que los granos de arena que sobrepasan su cresta sean capturados por la cara de deslizamiento a sotavento, es decir, hay un aumento en la eficacia de captura de arena, que puede disminuir la salida del flujo de sedimento. Sin embargo, este factor es compensado por el aumento del ángulo en la pendiente de barlovento. Está también relacionado con la velocidad de corte del viento, con la teoría de que cuanto mayor la velocidad del viento, más alta y empinada será la duna en equilibrio. La influencia de la velocidad del viento será analizada en el próximo capítulo.

Correlación entre tamaño del grano y parámetros morfométricos

Se evaluó la relación entre el tamaño del sedimento encontrado en cada playa y los principales parámetros morfométricos (Figura II.21) y lo que se observa es una relación positiva, con dunas más grandes y con mayor pendiente cuanto mayor es el tamaño del sedimento, pero esta relación es débil. Seguramente el tamaño de sedimento influye en la capacidad de transporte eólico de sedimento, con mayores tasas de transporte cuanto menor es el tamaño del sedimento, si se considera la misma velocidad de corte. Se plantea como hipótesis que este sedimento más fino, con alto potencial de transporte, puede ser trasladado más allá de las dunas primarias, generando campos de dunas costeras, pero con dunas primarias más pequeñas. La influencia del transporte potencial de sedimento será evaluada en el próximo capítulo.

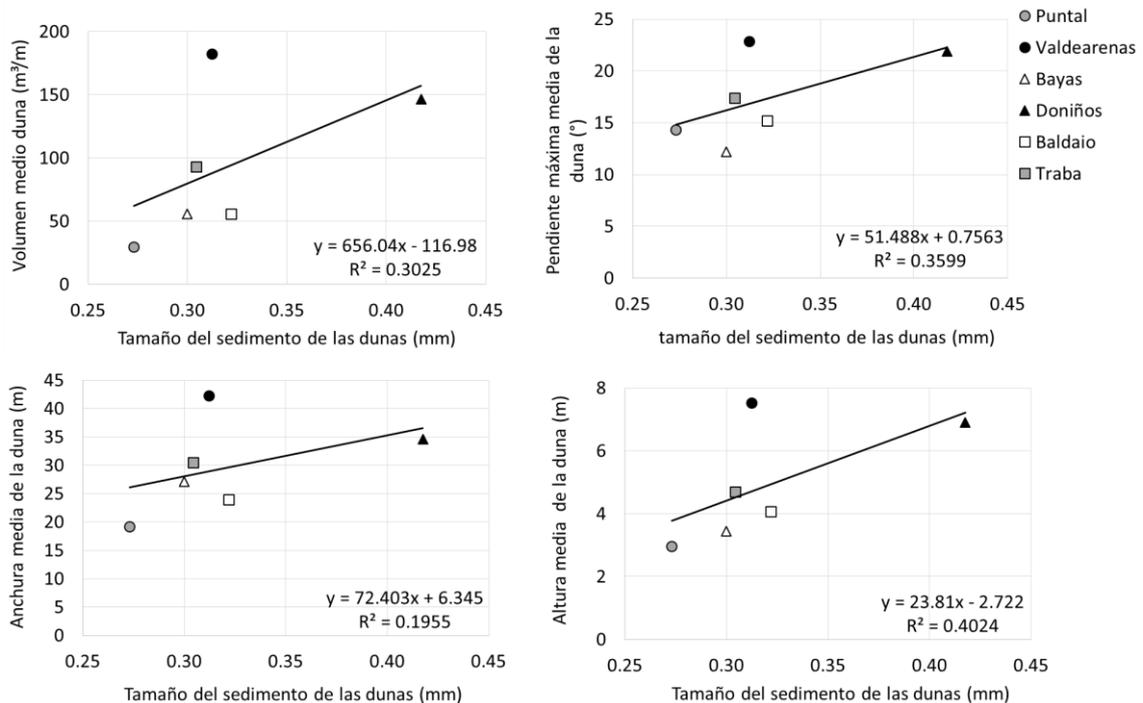


Figura II.21 – Relaciones entre tamaño medio del sedimento y los parámetros morfométricos medios de las dunas primarias para cada playa estudiada.

Se probó también la correlación entre el valor definido para cada playa de la pendiente característica del pie (PendPie) y el tamaño del sedimento (Figura II.22). Aparentemente están positivamente correlacionadas (con un coeficiente  $R^2=0.5$ ), con valores más grandes cuanto más grueso es el sedimento.

Uno de los factores reconocido como relevante en la definición de la pendiente de la playa sumergida es el tamaño de grano del sedimento (p. ej. para el frente de la playa como propuesto por Sunamura 1984). Considerando la evaluación anterior, donde se verificó que el valor de PendPie está mejor correlacionada con la pendiente de la playa (Figura II.13), se parte de la hipótesis de que el tamaño del sedimento influye en la pendiente de la playa seca, que a su vez contribuirá para la definición del valor de PendPie. En la Figura II.22 (derecha) se puede observar que esta hipótesis no se ha confirmado, visto que no hay una relación importante entre el tamaño del sedimento y la pendiente de la playa seca, siendo algo mejor en la duna (Figura II.21). Hay una tendencia de que cuanto mayor el tamaño del sedimento mayor es la pendiente de la playa seca, sin embargo otros factores serán más importantes, como por ejemplo la altura de ola y el estado morfodinámico, como verificado por Díez et al. (2017b).

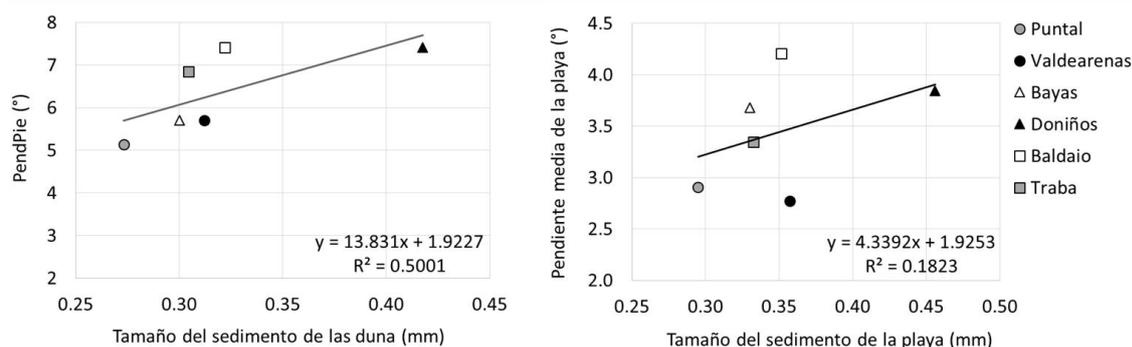


Figura II.22 – Relación entre la pendiente característica del pie de la duna primaria (PendPie) y la pendiente media de la playa con el tamaño medio del sedimento.

### Correlación entre los parámetros de la playa y de la duna primaria

Se puede observar que el volumen y altura de las dunas varía considerablemente en las playas evaluadas. Uno de los factores considerado por muchos autores como esencial en la definición del tamaño de la duna primaria es la anchura de la playa adyacente, sea por ser la fuente de sedimento transportado eólicamente (Davidson-Arnott & Law 1990; Davidson-Arnott & Law 1996; Bauer & Davidson-Arnott 2002; Houser 2009; Houser & Mathew 2011; de Vries et al. 2011) o por servir como amortiguador de los efectos erosivos de los eventos extremos (Hallermeier & Rhodes 1988; Saunders & Davidson-Arnott 1990). Houser & Mathew (2011) encontraron que un aumento en el fetch disponible, dependiente de la anchura de la playa, fue correlacionado con un aumento en la altura de la duna.

Dependiendo de lo que se quiere investigar y de los datos disponibles, se utilizan diferentes niveles de marea para definir el inicio de la playa subaérea: Saye et al. (2005) utilizó diferentes anchuras de playa dependiendo si se considera el nivel medio, la bajamar

media o la pleamar media; de Vries et al. (2012) utilizaron el nivel medio entre pleamar y bajamar media; Mull & Ruggiero (2014) utilizaron el nivel de pleamar. En esta tesis se utilizó el nivel de Pleamar Viva Media Observada (PVMO) por considerar que la parte de playa por encima de este nivel es la que más puede contribuir y definir las características de la duna. Además, se verificó que la base de datos de topografía utilizada en este estudio, medida a través de vuelos con un sensor LiDAR, presentó datos poco realistas en la zona de variación de marea y por lo tanto se consideró que los datos localizados por encima del nivel de PVMO eran más fiables.

En este estudio, al relacionar la anchura de la playa con el volumen de la duna (Figura II.23) se verificó que, tanto de manera general como evaluando cada playa separadamente, no existe una fuerte relación como se esperaba, con algunas playas presentando correlación lineal negativa. Si se hace la correlación entre los valores medio calculados para cada playa, la correlación es positiva, pero débil ( $R^2=0.27$ ). Las correlaciones de la anchura de la playa con la altura y anchura de las dunas también fueron estudiadas y presentaron comportamiento semejante al del volumen (datos no enseñados).

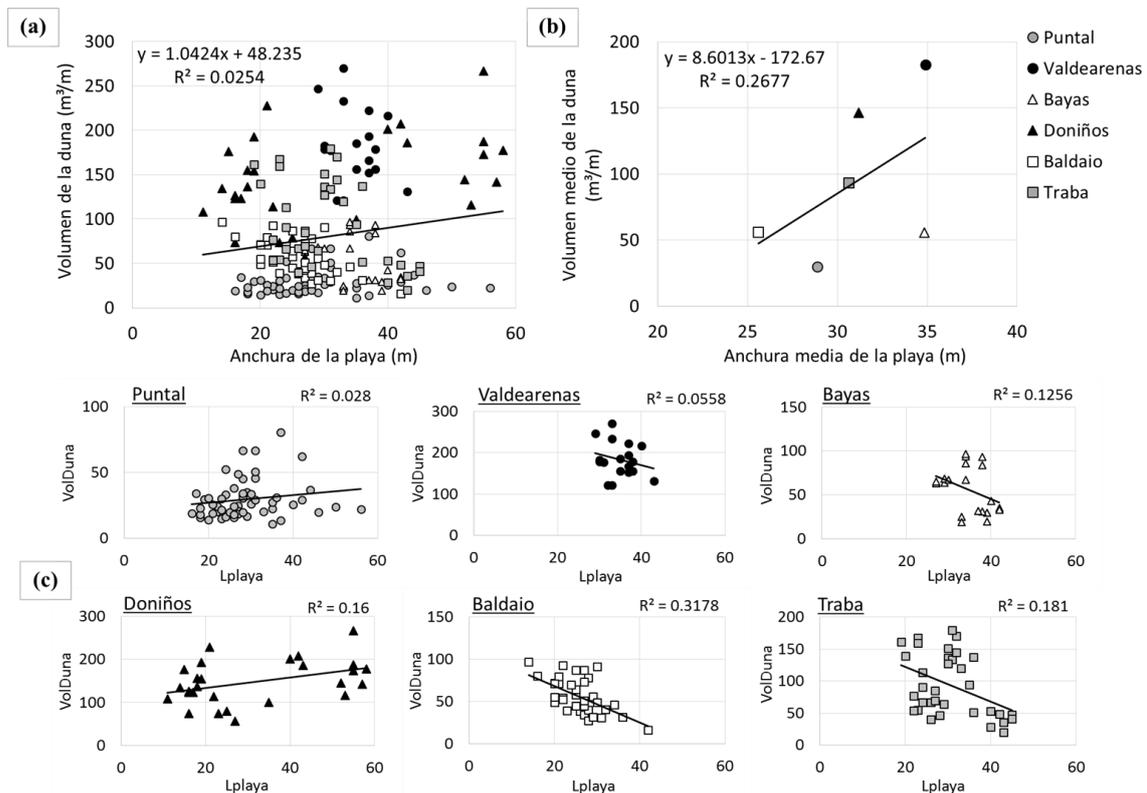


Figura II.23 – Correlaciones entre anchura de la playa y volumen de la duna: (a) para todos los perfiles evaluados; (b) para los valores medios de cada playa; (c) para los perfiles de cada playa.

de Vries et al. (2011) hizo la relación entre la variación temporal de la anchura de la playa con el volumen de la duna, seleccionando solamente dunas que presentaron crecimiento lineal, es decir, progradantes. Lo que estos autores verificaron es que no todas las zonas presentaron relación directa entre la variación de la anchura de la playa y el volumen de la duna. Estos autores explican que eso ocurre porque cuando la anchura de la

playa es menor que la anchura necesaria para que el transporte de sedimento llegue a la saturación (llamada fetch crítico), la variación de anchura de la playa causa una variación en el transporte eólico de sedimento y, consecuentemente, relación con el volumen de la duna primaria. Sin embargo, si la anchura de la playa es mayor que el fetch crítico, la duna recibirá siempre la tasa máxima de transporte eólico y la variación de anchura de la playa no afectará el volumen de la duna. Partiendo de esta hipótesis se puede considerar que, en general, la anchura de las playas secas evaluadas es suficientemente extensa como para que el transporte de sedimento sea totalmente desarrollado, parámetro este evaluado en el próximo capítulo.

Otro parámetro de la playa seca que puede influir en el tamaño de las dunas es su pendiente, tal y como ha sido sugerido por de Vries et al. (2012), que identificó una correlación negativa entre la variación media del volumen de las dunas y la pendiente media de la playa, para cada uno de los perfiles evaluados a lo largo de 20 años. Estos autores verificaron que cuando la pendiente de la playa era mayor el volumen de la duna disminuía. Explican que esto ocurrió probablemente debido a una limitación en el transporte de sedimento impuesta por la pendiente de la playa, lo que supone un aumento en la energía necesaria para mover el sedimento.

En esta tesis se ha analizado la influencia de la pendiente de la playa en el volumen de la duna, a través de la correlación entre estos parámetros morfométricos. Los resultados muestran que en general (todos los datos y valores medios) no hay una relación clara entre los mismos (Figura II.24). Sin embargo, para algunas playas en particular una tendencia puede ser observada, con menores volúmenes de dunas primarias adyacentes a playas de mayor pendiente, sin embargo, los valores del coeficiente de correlación  $R^2$  son muy bajos (p. ej. Valdearenas, Doniños y Traba). Las relaciones entre pendiente de la playa y altura o anchura de la duna también fueron estudiadas y presentaron el mismo comportamiento (sin relación, datos no presentados).

Como se puede observar, aparentemente la anchura y la pendiente de las playas evaluadas, características tradicionalmente utilizadas junto con el tamaño del grano y velocidad del viento como parámetros relevantes en el transporte potencial de arena, no influyen de manera importante en el tamaño de la duna primaria en condiciones de estabilidad. Otros estudios tampoco han encontrado una relación empírica clara entre el tamaño de las dunas primarias con la anchura de playa y/o su pendiente (Miot da Silva & Hesp 2010; Houser & Mathew 2011; de Vries et al. 2015).

Por otro lado, la erosión de las dunas primarias durante tormentas y la posibilidad de rebase también está controlada por las variaciones, a lo largo de la costa, de la anchura de la playa, que a su vez está asociada a células de corriente de retorno y mega cúspides (Komar 1971; Thornton et al. 2007), migración de barras intermareales (Aagaard et al. 2004; Anthony et al. 2006) y ondas de arena a lo largo de la costa (Davidson-Arnott & Law 1990; Ruessink & Jeuken 2002; Davidson-Arnott & Van Heyningen 2003).

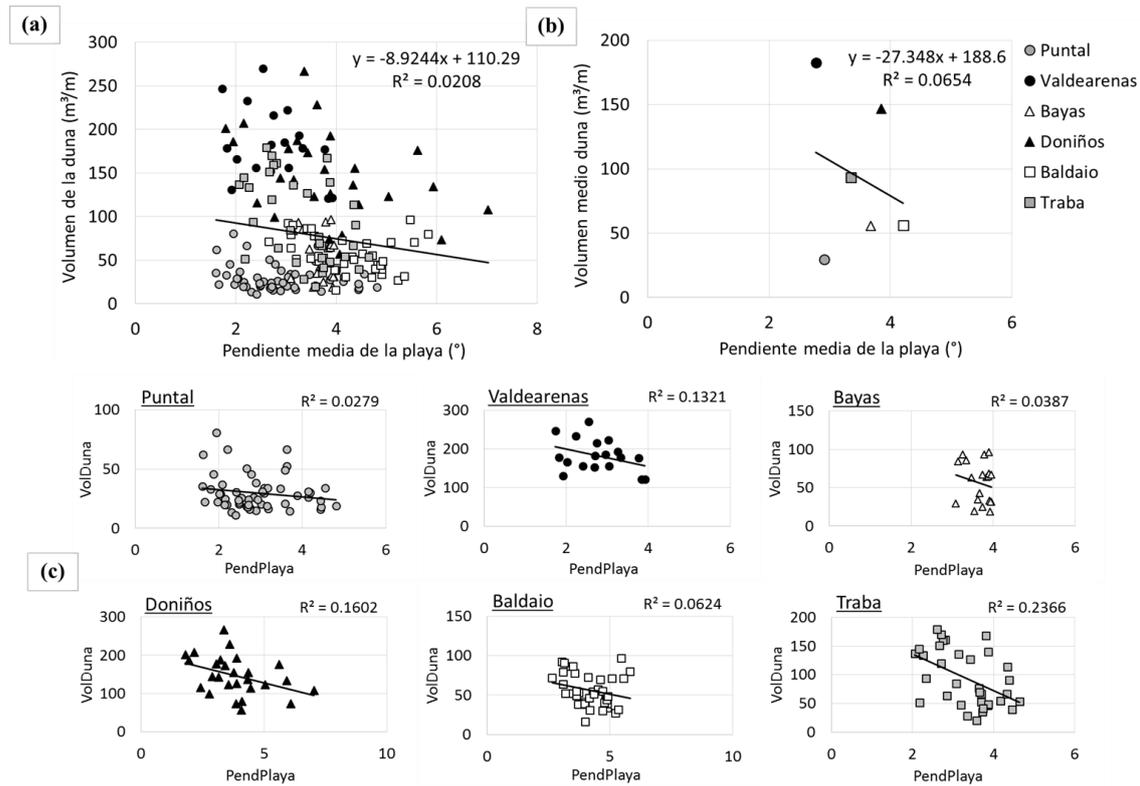


Figura II.24 - Correlaciones entre pendiente de la playa y volumen de la duna: (a) para todos los perfiles evaluados; (b) para los valores medios de cada playa; (c) para los perfiles de cada playa.

Saye et al. (2005) verificaron que la morfología de la playa es crítica para definir la condición de erosión/acreción de las dunas primarias. Sus resultados sugieren que, en general, las dunas primarias erosionadas se encuentran en playas más estrechas y empinadas, y que las dunas progradantes están asociadas a playas más anchas y con menor pendiente, principalmente si se considera la parte de playa seca (por encima de la pleamar media). Sin embargo, estos autores afirman que no se encontró una relación general entre la anchura de la playa y la recesión de las dunas, es decir, una anchura mínima de playa donde se puede considerar la duna “no erosionada”. Larson & Kraus (1991) examinaron los cambios de la playa durante tormentas con el modelo SBEACH y encontraron que la erosión de la duna inducida por el ataque del oleaje depende de la anchura de playa seca, entre mayor sea el ancho de la playa seca, mayor será la protección de las dunas.

Considerando que dunas escarpadas presentan pendiente máxima mayor, en esta tesis se analizó la relación entre la anchura de playa y la pendiente máxima de las dunas y no se encontró la relación inversa esperada (Figura II.25). Eso puede demostrar que los perfiles evaluados no están erosionados. Brodie & Spore (2015), al clasificar las dunas de la costa norte del estado de Carolina del Norte (EE.UU.), tampoco encontraron relación entre la anchura de playa seca y la erosión de las dunas primarias. Estos autores verificaron que, tanto las áreas donde las dunas fueron clasificadas como sanas como las clasificadas en erosión, presentaron playas adyacentes anchas y planas. Estos autores no hicieron análisis que puedan explicar la diferencia, pero suponen que las técnicas de gestión y/o la

variación de la batimetría de la zona marina pueden ser las posibles causas de esta diferencia.

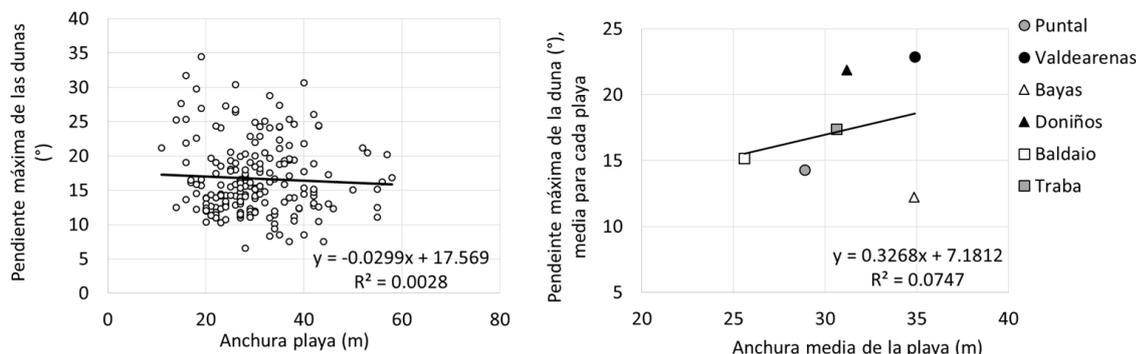


Figura II.25 - Relación entre la pendiente de la duna primaria y la anchura de la playa.

Resumen de las relaciones encontradas y comparación con las relaciones existentes en la bibliografía

Un resumen de las relaciones alométricas, obtenidas en este capítulo, se presenta en la Tabla II.5.

Tabla II.5 – Relaciones alométricas encontradas para las dunas primarias estables de la costa atlántica de España

Relaciones	Con todos los datos		Con valores medios	
	Relación	R <sup>2</sup>	Relación	R <sup>2</sup>
<b>Anchura de la duna (x) con Altura de la duna (y)</b>	$y = 0.1399x + 0.7018$	0.62	$y = 0.2149x - 1.432$	0.88
<b>Volumen de la duna (x) con Altura de la duna (y)</b>	$y = 0.6067x^{0.4726}$	0.86	$y = 0.447x^{0.5372}$	0.95
<b>Volumen de la duna (x) con Anchura de la duna (y)</b>	$y = 4.2097x^{0.4415}$	0.90	$y = 5.0041x^{0.4005}$	0.96
<b>Altura de la duna (x) con Pendiente máxima de la duna (y)</b>	$y = 2.0098x + 7.5868$	0.46	$y = 2.2176x + 6.3708$	0.94

En cuanto a los resultados de las relaciones entre los diferentes parámetros morfométricos, estos están resumidos en la Tabla II.6, con comparación de los resultados encontrados en otras investigaciones.

Se puede observar que son pocos los estudios que abarcan la relación entre las características morfométricas del perfil playa seca/duna primaria. Una contribución de la presente tesis es la propuesta de algunas relaciones de este tipo, principalmente con las relaciones alométricas que permiten, a partir de la definición de uno de los parámetros, encontrar los demás.

Tabla II.6 – Comparación entre las relaciones encontradas entre los parámetros morfométricos de las playas/dunas de la costa atlántica de España, evaluados en esta investigación, y relaciones encontradas en otras investigaciones

		Resultados obtenidos en otras investigaciones:									
	Resultados obtenidos en esta tesis	(Sunamura 1984)	(Davidson-Arnott & Law 1996)	(Hellemaa 1999)	(Momiji & Bishop 2002)	(Saye et al. 2005)	(Miot da Silva & Hesp 2010)	(de Vries et al. 2011) *	(Houser & Mathew 2011)	(de Vries et al. 2012) *	(de Vries et al. 2015)
Relaciones **	Para las playas del litoral atlántico español										
Pendiente media playa X Pendiente del Pie	Relación buena, positiva (R <sup>2</sup> =0.60)										
Pendiente media duna X Pendiente del Pie	Relación débil, positiva (R <sup>2</sup> =0.28)										
Altura de la duna X Pendiente máxima duna	Relación débil, positiva si utilizados todos los datos (R <sup>2</sup> =0.46) Relación buena si utilizados los valores medios (R <sup>2</sup> =0.94)				Proponen un modelo donde hay relación, positiva, que dependerá de la velocidad de corte del viento (no presenta R <sup>2</sup> )						
Tamaño del sedimento X tamaño de las dunas (Volumen, altura y anchura)	Relación inexistente para anchura (R <sup>2</sup> =0.20) y relación débil, positiva para volumen y altura (R <sup>2</sup> =0.30 y 0.40, respectivamente)										
Tamaño del sedimento X Pendiente máxima de la duna	Relación buena, positiva (R <sup>2</sup> =0.36)										
Tamaño del sedimento X Pendiente del Pie	Relación buena, positiva (R <sup>2</sup> =0.50)										

\* de Vries y colaboradores evaluaron las dunas que presentaron aumento del volumen de manera lineal (es decir, dunas prográdantes) y su relación a lo largo del tiempo con los parámetros morfométricos de la playa  
 \*\*\* Basado en el valor del R<sup>2</sup>, se definió que la relación es buena por encima de 0.5; débil abajo de 0.5, e inexistente abajo de 0.25.

(continuación...)

Resultados obtenidos en otras investigaciones:											
Relaciones **	Resultados obtenidos en esta tesis	(Sunamura 1984)	(Davidson-Arnott & Law 1996)	(Hellemaa 1999)	(Momiiji & Bishop 2002)	(Saye et al. 2005)	(Miot da Silva & Hesp 2010)	(de Vries et al. 2011) *	(Houser & Mathew 2011)	(de Vries et al. 2012) *	(de Vries et al. 2015)
Tamaño del sedimento X Pendiente X media de la playa seca	No hay relación (R <sup>2</sup> =0.18)	Propone una relación para pendiente del frente de la playa que depende de la altura y período de onda en rotura y tamaño del sedimento	Hay relación positiva. No hicieron análisis de regresión, pero verificaron que el acúmulo mayor o menor de sedimento en las dunas a lo largo del tiempo está mejor relacionado con la anchura de la playa que con la velocidad del viento			No hay relación universal, cada playa/región presenta su relación.	No hay relación, donde en una playa larga, zonas con mayor anchura presentaron dunas más pequeñas debido a poca incidencia del viento en esta zona.	Relación temporal buena, positiva (para dunas progresivas) (R <sup>2</sup> =0.56)	No hay relación. No hicieron análisis de regresión, pero verificaron, evaluando las dunas primarias de una amplia playa intermedia/ mayores dunas se localizan en las áreas con playas más estrechas y con más pendiente.	Relación temporal buena, positiva (para dunas progresivas) (R <sup>2</sup> =0.52)	No hay relación. Verificó que las dunas aumentaron de tamaño a pesar de evidencias de retirada de sedimento de la playa seca
Anchura de la playa seca X Volumen de las dunas	No hay relación si son utilizados todos los datos (R <sup>2</sup> =0.03) Relación débil, positiva si son utilizados los valores medios de cada playa (R <sup>2</sup> =0.27)										
Pendiente de la playa seca X volumen de las dunas	No hay relación (R <sup>2</sup> =0.07)										
Anchura de playa X pendiente máxima de la duna	No hay relación (R <sup>2</sup> =0.07)					Las dunas erosionadas/escarpadas (mayor pendiente) fueron encontradas en playas más estrechas, aunque no se encontró un valor único de anchura de playa que defina la condición de erosión					

La influencia de la anchura de la playa en el tamaño de la duna fue estudiada por diversos autores (Davidson-Arnott & Law 1996; Saye et al. 2005; Miot da Silva & Hesp 2010; de Vries et al. 2011; Houser & Mathew 2011; de Vries et al. 2012; de Vries et al. 2015), pero con diferentes resultados de correlación. Eso indica que la anchura de la playa, por sí solo, no puede ser utilizada como el factor que define las características de la duna, a pesar de estar intrínsecamente conectados.

Probablemente las características de la playa seca serán importantes en el desarrollo de las dunas primarias. McLean & Shen (2006) identificaron cuales las características que la playa de Moruya (Australia) presentó, en determinados períodos de tiempo, que permitieron el desarrollo de las dunas primarias. Verificaron que estas condiciones fueron encontradas en muy pocas ocasiones a lo largo del tiempo estudiado (12 años) y que la generación de una nueva duna primaria en Moruya es improbable en vistas a la condición de la playa. Se puede suponer que las características de la playa necesarias para el desarrollo y crecimiento de las dunas primarias son distintas de las que ocurren cuando la condición de equilibrio es alcanzada. Es decir, la falta de relación entre los parámetros de la playa seca y de la duna primaria puede indicar que, una vez que la duna primaria alcance el tamaño y posición de equilibrio, sus características morfológicas serán independientes de las características de la playa seca.

Considerando que la condición de equilibrio es obtenida por el balance entre fuerzas constructivas y erosivas, es de esperar que las características dinámicas del ambiente, tal como capacidad eólica y marina de transporte y su respuesta frente a las características de la playa, definan este estado. Probablemente la relación entre características del sistema playa/ duna primaria y las condiciones de dinámica definirán la anchura de playa necesaria, la localización del pie de la duna y el tamaño de la duna primaria estable. Por lo tanto, la evaluación de la dinámica particular de cada playa es esencial para la definición de los parámetros morfométricos de una condición de equilibrio. Estos análisis serán realizados en el próximo capítulo.

Para verificar la variación de la forma de la duna primaria y su relación con la forma de la playa seca, un análisis de clasificación automática fue realizado, con los resultados presentados en el apartado 5.

#### **4.2. Conclusiones acerca de la evaluación de los parámetros morfométricos**

La evaluación de los perfiles del sistema playa/duna de las playas seleccionadas en el litoral norte de España, considerando que presentan una condición próxima al estado de equilibrio, permitió la definición de parámetros morfométricos de las dunas del área de estudio.

Este análisis permitió verificar que las playas evaluadas presentan un amplio rango de valores que caracterizan el tamaño de las dunas primarias, como altura, anchura y volumen. Relaciones alométricas fueron definidas para estos parámetros (Tabla II.5).

Partiendo de resultados e indicaciones presentadas en la bibliografía especializada fueron obtenidas las correlaciones existentes entre estos parámetros. Los resultados encontrados en esta tesis indican que:

- La definición del pie de la duna (intersección entre playa seca y duna primaria) puede ser realizada a partir de un análisis de cambio en la pendiente entre estos dos tramos del sistema, aunque algunas veces este cambio no está claro. En esta tesis, evaluando los perfiles de cada playa separadamente, se definió un valor de pendiente máxima que caracteriza el fin de la playa e inicio de las dunas primarias (PendPie). Este valor está relacionado con el valor de la pendiente media de la playa.

- La comparación entre las diferentes metodologías utilizadas para calcular la pendiente media de los tramos de playa seca y duna primaria (mejor ajuste lineal o tangente) muestran que la diferencia entre los dos métodos es muy pequeña, confirmando que son equivalentes. Sin embargo, se concluyó que la utilización de la pendiente máxima es un parámetro más interesante a la hora de evaluar el estado morfológico de las dunas que la pendiente media, debido a la característica cóncava/convexa de su perfil.

- Las dunas primarias comprenden una gran proporción (aproximadamente 50%) del volumen y anchura de todo el backshore (playa seca + duna primaria), lo que indica su importancia en el almacenamiento de sedimento en el sistema playa/duna primaria.

- La pendiente de la duna está directamente correlacionada con su altura y, según Momiji & Bishop (2002), esta relación está asociada con la capacidad de transporte eólico.

- A pesar de una correlación débil, las dunas más grandes fueron encontradas en las playas con sedimento más grueso, para las áreas de estudio evaluadas.

- La pendiente del pie de la duna (PendPie) parece estar relacionada con el tamaño del sedimento, sin embargo, la playa seca no presentó esta correlación como era esperado. Se puede observar que hay una tendencia de que playas con sedimento más fino presenten menor pendiente de playa y PendPie. No obstante, parámetros de la dinámica ambiental, como el estado morfodinámico y cota de inundación, probablemente son más importantes en la definición de estos parámetros. Estas relaciones serán analizadas en el Capítulo III.

- A pesar de que algunos autores citan que el tamaño de la duna está directamente relacionado con la anchura y/o inversamente relacionado con la pendiente de la playa seca, esta relación no es evidente en las playas del norte de España con dunas en estado de equilibrio.

- La hipótesis de que dunas adyacentes a playas estrechas presentan mayor probabilidad de ataque de olas, con consecuente generación de un escarpe, lo que resulta en dunas con valores elevados de pendientes máximas, fue evaluada a través de la relación entre pendiente máxima de la duna y anchura de playa. Lo que se verificó es que esta relación es inexistente para las playas evaluadas, lo que puede indicar que las mismas, o no presentan la condición de erosión o la anchura de la playa no influye en la pendiente máxima de la duna primaria, a pesar de la mayor probabilidad de ataque del oleaje.

La comparación entre las relaciones morfométricas encontradas en esta tesis y la de otros autores se recoge en la Tabla II.6, donde se puede verificar que pocos estudios hacen este tipo de evaluación y que esta tesis viene a contribuir al mejor entendimiento del sistema playa/ duna primaria.

Se concluyó que la falta de correlación entre los parámetros morfométricos de la playa seca y de la duna primaria puede indicar que no hay valores y relaciones universales de la anchura y pendiente de la playa con las características morfológicas de las dunas primarias, y que los aspectos de la dinámica marina y eólica local son esenciales para la definición de los parámetros de una duna en equilibrio. Por lo tanto, estos aspectos serán evaluados en el próximo capítulo.

## **5. Clasificación de la forma del perfil**

Como se pudo comprobar en el apartado anterior, las dunas primarias evaluadas presentan una gran gama de características morfológicas, con diferentes tamaños, pendientes y distancias de la línea de pleamar. A pesar de estas diferencias, esta tesis partió de la hipótesis inicial de que las dunas primarias pueden alcanzar una forma de equilibrio.

Para probar esta hipótesis y verificar las diferentes formas que las dunas primarias y playa seca adyacente pueden presentar, se aplicó una técnica de clasificación por agrupamiento (*k*-medias). El análisis *k*-medias permite encontrar formas “centroides” o “tipos” a partir de un conjunto de perfiles. Con vista a evaluar las mismas unidades morfológicas, se separó el perfil playa-dunas primaria en 3 tramos: playa-seca, duna tramo cóncavo y duna tramo convexo (Figura II.6 en el apartado 2. Metodología). Debido a los diferentes tamaños de los perfiles y considerando que el objetivo es el de evaluar la forma y no los parámetros morfométricos (evaluados anteriormente) se adimensionalizó cada tramo del perfil.

A continuación, se presentan los resultados de la clasificación de cada uno de los tramos, la frecuencia de cada perfil “tipo” y posibles combinaciones o relaciones entre los diferentes tipos de los tramos.

### **5.1. Resultados y discusión**

#### *Tipos de duna tramo convexo*

En la Figura II.26 están presentadas las formas “tipo” o centroides obtenidos para la parte de la duna que comprende su configuración convexa, así como la frecuencia de ocurrencia. Se verificó que un 35% de los perfiles evaluados presentan el tramo convexo de la duna como no identificado/detectado, siendo clasificados de “tipo 0”. Eso ocurre probablemente debido a la resolución de los datos iniciales utilizados (resolución en el eje X de 5m) que impide “ver” el tramo convexo de dunas pequeñas. Para que la variación en el eje Y entre los perfiles clasificados como pertenecientes a cada tipo no supere el

estipulado, de 30%, fueron necesarios determinar 7 tipos distintos de centroides. En la Figura II.27, para una mejor visualización, se presenta estos centroides tipo separadamente y la desviación típica de los perfiles que fueron agrupados como pertenecientes a cada tipo, representados por la banda del 95% de confianza.

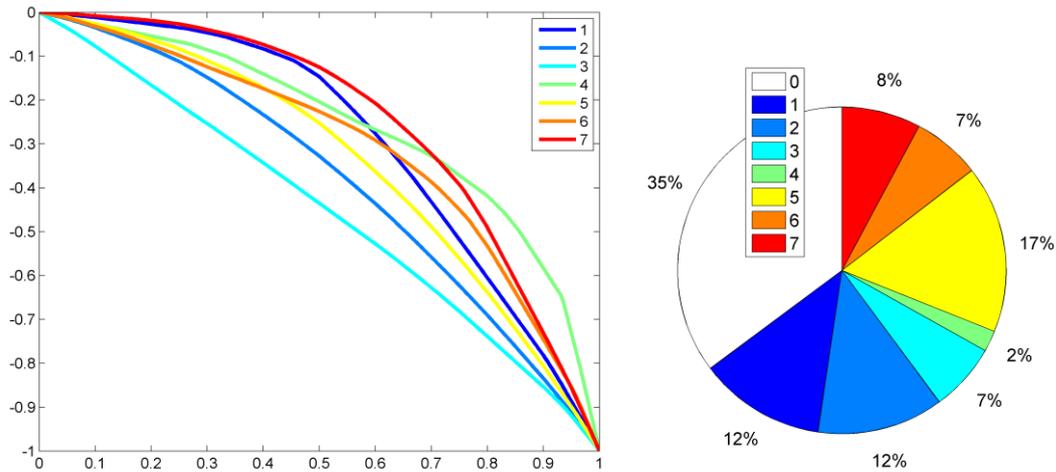


Figura II.26 – Formas “tipo” (centroides, adimensionales) de la duna tramo convexo y porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides, siendo el tipo 0 aquellos perfiles que presentan el tramo convexo de la duna como no identificado/detectado.

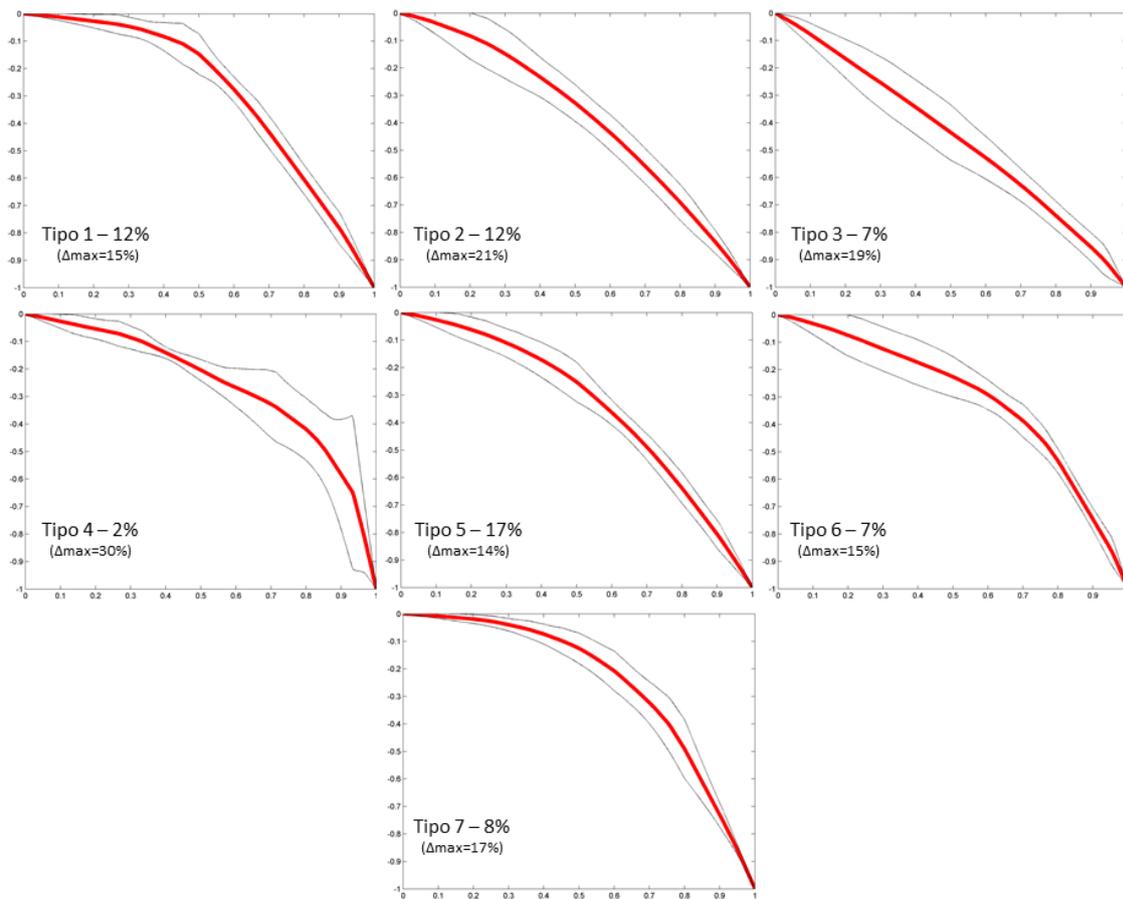


Figura II.27 – Centroides tipo del tramo “duna tramo convexo” (línea roja) con banda de confianza del 95% (líneas negras finas). En cada gráfica está presentado el porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides y la variación máxima en el eje Y, dentro de cada tipo ( $\Delta_{max}$ ).

En estas dos figuras lo que se puede observar es que la forma de las dunas tramo convexo no cambia significativamente, variando en curvaturas más o menos pronunciadas entre la cresta y la máxima pendiente de la duna. Los centroides más frecuentes fueron los de los tipos: 5, 1 y 2, representando 17%, 12% y 12% de los perfiles evaluados, respectivamente. El tipo con mayor variación en el eje Y (30.2%; tipo 4) presentó frecuencia de ocurrencia muy baja (2%). Los demás tipos presentaron variación máxima en el eje Y de menos de 21%.

Tipos de duna tramo cóncavo

Los centroides y el porcentaje de ocurrencia de cada tipo de la parte cóncava de la duna están presentados en la Figura II.28. Se muestran también cada centroide separadamente, con la variación tras el agrupamiento de los perfiles en cada uno de los tipos (Figura II.29). Esta parte de la duna es bastante homogénea, en su forma adimensional. El límite de variación en el eje Y, definido para los otros tramos como máximo de un 30%, se cumpliría con la definición de solamente 1 centroide, pero se definieron 3 centroides como número mínimo donde se puede ver todas las formas, con variación máxima de un 16% en el centroide 3.

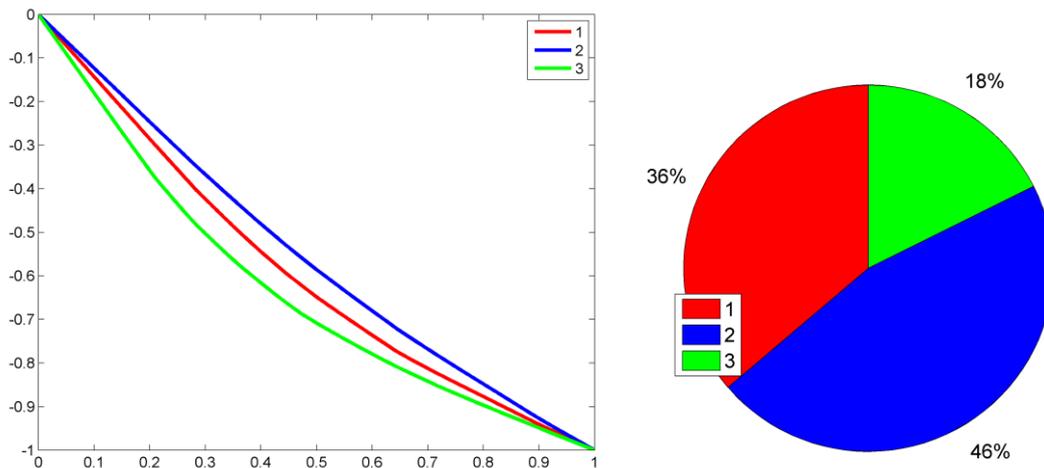


Figura II.28 – Formas “tipo” (centroides) de la duna tramo cóncavo y porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides.

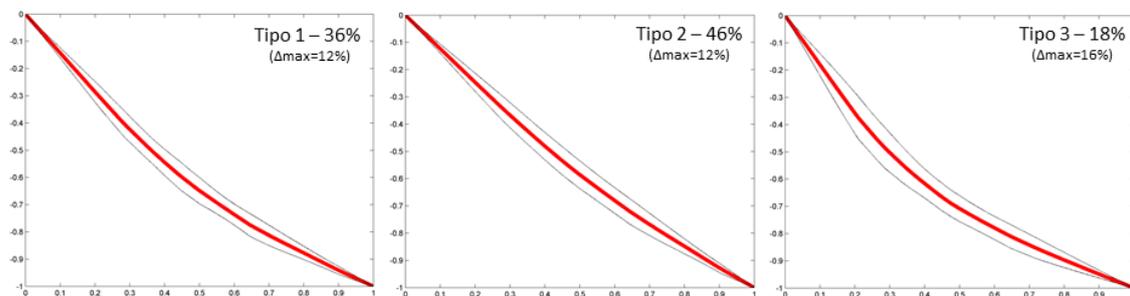


Figura II.29 – Centroides tipo del tramo “duna tramo cóncavo” (línea roja) con banda de confianza del 95% (líneas negras finas). En cada gráfica está presentado el porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides y la variación máxima en el eje Y, dentro de cada tipo (Δmax).

### Tipos de tramo playa seca

De las partes evaluadas de los perfiles, se puede observar que la playa seca fue la que presentó mayor variabilidad de formas, desde perfiles rectos hasta los que presentan crestas de bermas. Fue necesario definir 6 centroides para que la variación máxima en el eje Y, entre los perfiles de cada tipo, fuera el máximo estipulado de 30%. Los centroides y el porcentaje de ocurrencia de cada tipo del tramo “playa seca” se presentan en la Figura II.30. La representación de cada centroide tipo y su variación con relación al agrupamiento de los perfiles se muestra en la Figura II.31.

Los tipos de playa seca más frecuentes (>15%) son los centroides: 1, 4 y 5 con forma de la playa característicamente más recta. Los tipos 2 y 6 aparentemente presentan la cresta de la berma más desarrollada. El tipo 3 presenta frecuencia de ocurrencia muy baja (2%) y está caracterizado por la forma más excéntrica. El agrupamiento de los perfiles pertenecientes al centroide tipo 2 fue el que presentó mayor variabilidad en el eje Y, en la parte superior de la playa.

En el trabajo de Díez et al. (2017a) los tipos de playa seca más rectos fueron relacionados con playas de característica disipativa, mientras que playas intermedias presentaron formas con la presencia de berma. Estos autores citan que playas reflejantes son las que presentan una berma muy marcada seguida de una playa seca recta y horizontal, pero que característicamente este tipo de playa no presenta dunas primarias. Por lo tanto, las playas evaluadas en esta tesis son probablemente con características de disipativa a intermedia. Las relaciones entre la condición morfodinámica de la playa y las características de la duna primaria en la costa atlántica de España serán evaluadas en el próximo capítulo.

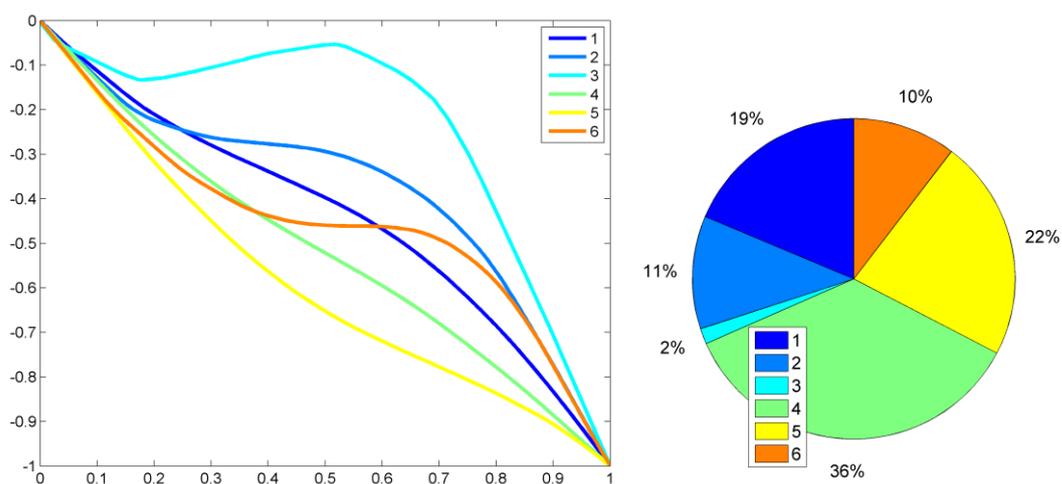


Figura II.30 – Formas “tipo” (centroides) de la playa seca y porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides.

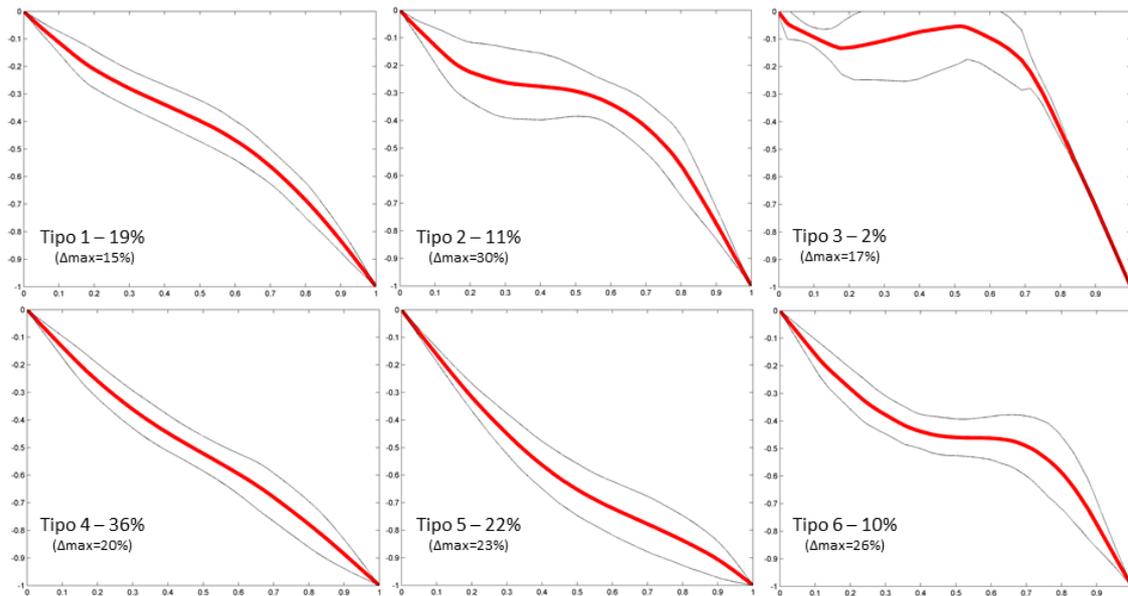


Figura II.31 – Centroides tipo del tramo “playa seca” (línea roja) con banda de confianza del 95% (líneas negras finas). En cada gráfica está presentado el porcentaje de perfiles que se aproximan a estos centroides y la variación máxima en el eje Y, dentro de cada tipo ( $\Delta_{max}$ ).

#### Evaluación espacial y combinación entre los tipos de cada tramo

Se evaluó la proporción de los centroides “tipos” encontrados en cada uno de los tramos del perfil, separadamente por playa. Los resultados se muestran en la Figura II.32.

De manera general lo que se observó es que las playas que presentan las dunas más pequeñas, con poca anchura (Puntal de Somo, Bayas y Baldaio) presentan un importante porcentaje de los perfiles donde no es posible identificar la parte “duna tramo convexo”. Tal como se ha explicado anteriormente, hay una limitación de la base de datos que se utiliza en este estudio, sin resolución suficiente (5m en horizontal) para identificar la curvatura convexa de la cresta, cuando esta es poco ancha.

En esta evaluación por playa se puede observar que no es posible la definición de un patrón o dominio claro de un centroide “tipo” de dunas primarias, principalmente en cuanto al tramo convexo identificado y clasificado, siendo registrado en una misma playa muchos centroides tipo de formas de dunas, como por ejemplo en la playa de Traba donde están presentes todos los tipos. Respecto al tramo cóncavo, se pudo verificar que la única playa en que domina el tipo 3 (mayor curvatura) es Valdearenas; mientras que en el Puntal de Somo domina el tipo 1 y las playas Bayas, Baldaio y Traba domina el tipo 2; Doniños presentó un equilibrio entre los tipos 1 y 2. Sin embargo, este dominio de un tipo u otro parece poco relevante considerando que los centroides tipo de la duna tramo cóncavo son muy semejantes y hay la presencia de más de un centroide en todas las playas. Esta falta de patrón ocurre debido a que, a pesar de la variación de los parámetros morfométricos, las formas son muy parecidas, y que los centroides tipo encontrados ocurren en función de la curvatura, pero no varían considerablemente en su configuración.

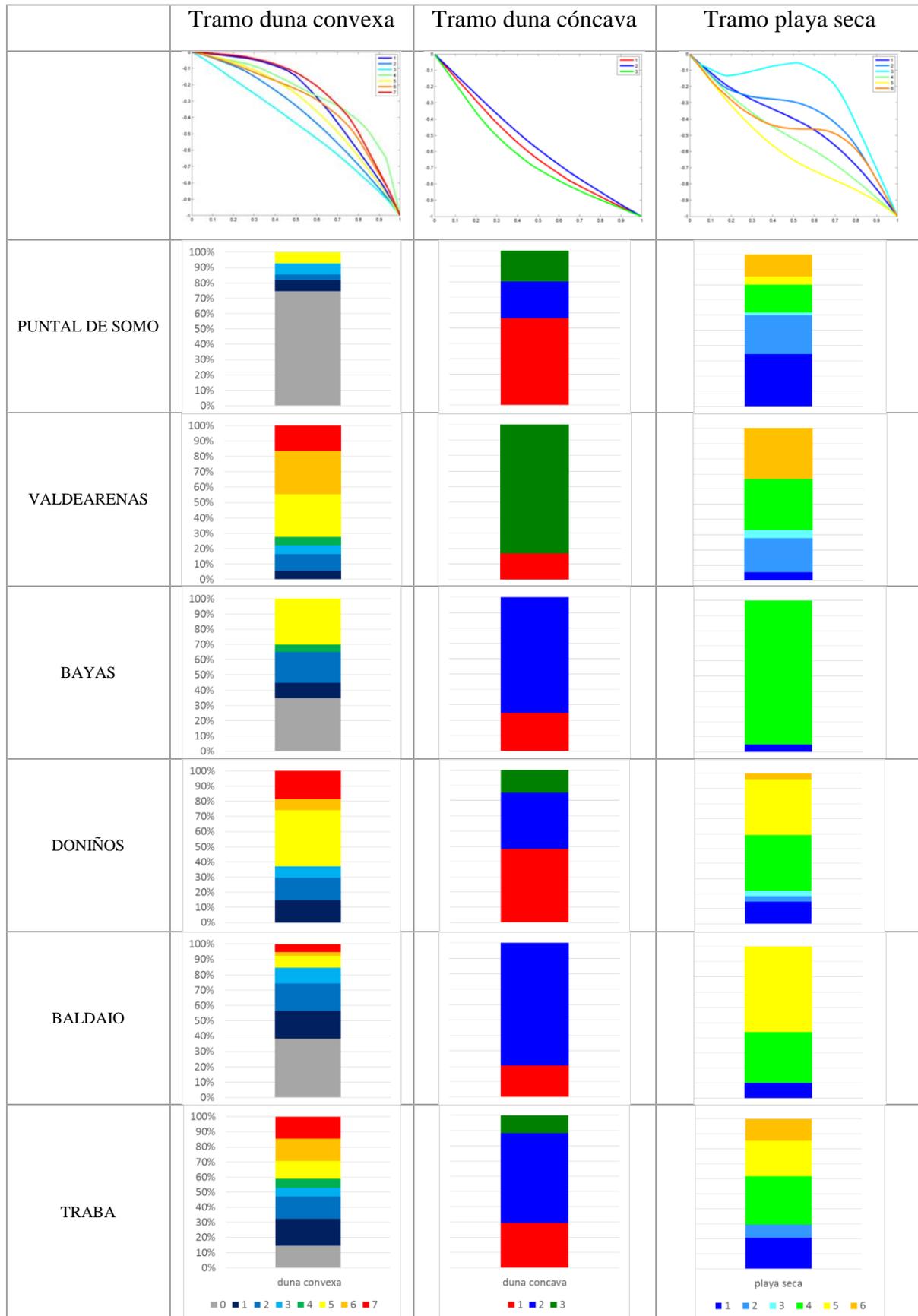


Figura II.32 – Proporción de centroides tipo encontrados en cada una de las playas, para cada tramo del perfil (Duna tramo convexo, Duna tramo cóncavo y Playa seca).

En cuanto a la forma de la playa, Bayas presentó dominancia muy clara de perfiles de playa seca característicamente rectos (Tipos 4); mientras que las otras playas presentaron una combinación de varios tipos.

Una cuestión analizada es si existe una relación entre los tipos encontrados en la duna con el tipo de playa seca, es decir, si un tipo de forma de playa lleva al desarrollo de un tipo específico de forma de duna. Para esto se probaron las combinaciones de tipos de playa existentes con los tipos de duna, tanto del tramo cóncavo como del tramo convexo, verificando la proporción de cada combinación. Los resultados se muestran en la Figura II.33.

Sin considerar el tipo 3 de playa seca, con poca representatividad (1.6%) y por lo tanto con pocas combinaciones posibles, lo que se comprobó es que las formas de playa pueden presentar prácticamente todas las combinaciones de forma de dunas primarias obtenidos, lo que puede indicar que la forma de la duna es independiente de la forma de la playa.

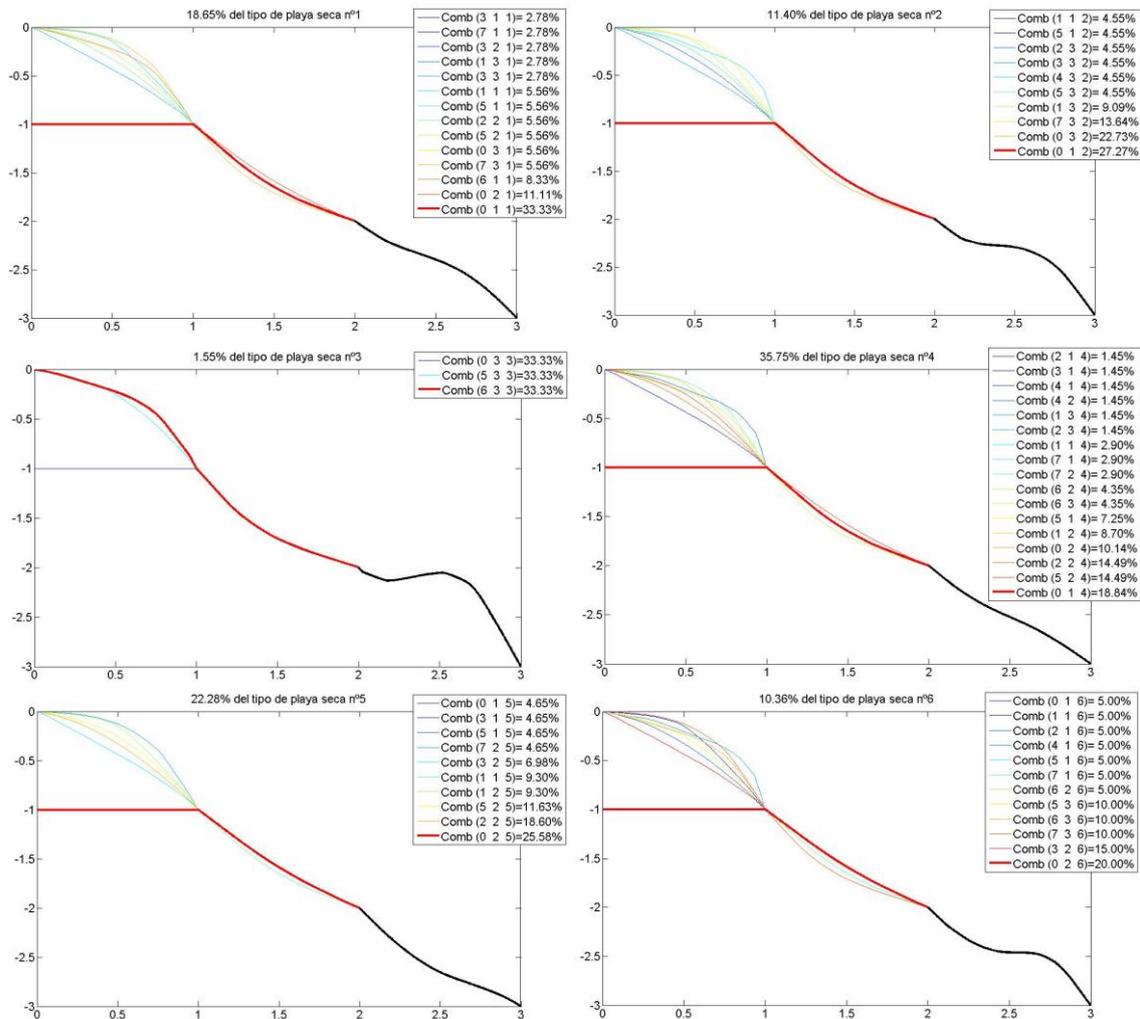


Figura II.33 – Combinación entre tipos de las partes de la duna en función de los tipos de playa seca. En la leyenda: la combinación del tipo (“Duna tramo convexo”, “Duna tramo cóncavo”, “Playa Seca”) y porcentaje encontrada de cada combinación, con la combinación más frecuente marcada en rojo.

Evaluación general de los tipos de cada tramo

Al evaluar los resultados de forma de los diferentes tramos del sistema playa/ dunas primarias, encontrados en este trabajo, es posible concluir que la playa seca presenta mucha más variedad de formas que la duna primaria. Esto puede indicar que las dunas primarias presentan unas formas bastante constantes y comunes, comparadas con la forma de la playa seca.

En este apartado se ha llevado a cabo una nueva clasificación para ilustrar esta estabilidad de la forma de las dunas primarias, con relación a la playa seca. Se aplicó el análisis de *k*-medias de los 3 tramo adimensionalizados separadamente, pero agrupadas como un solo perfil. El número de centroides fue seleccionado empíricamente para que representara toda la variación, principalmente de la playa seca. Los perfiles que no presentaban la parte “duna tramo convexo” fueron representados por una recta, sin variación en el eje Y.

El resultado nos indica que los centroides obtenidos son definidos prácticamente por el hecho de que la Duna Tramo Convexo exista o no y por la forma de la playa, ya que esta es la parte del perfil que presenta gran variabilidad. El tramo cóncavo de las dunas presenta forma muy constante (Figura II.34).

Al agrupar los perfiles originales, que fueron clasificados como pertenecientes a cada uno de los centroides, se puede verificar que esta evaluación consigue agrupar perfiles muy semejantes en forma, a pesar de la adimensionalización de los tramos separadamente (Figura II.35).

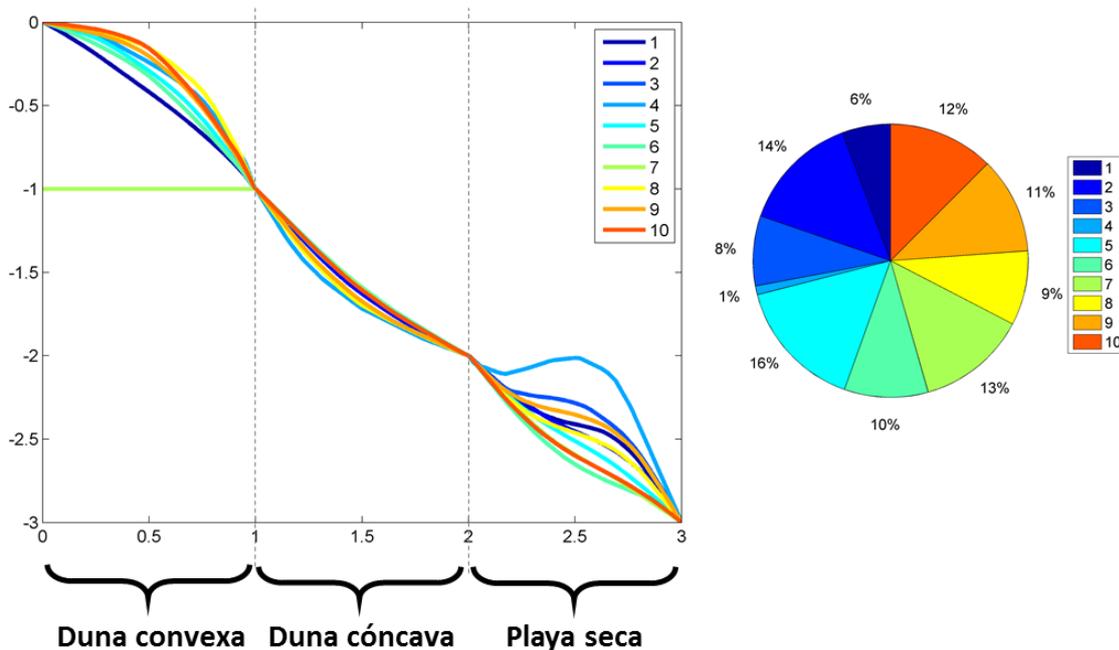
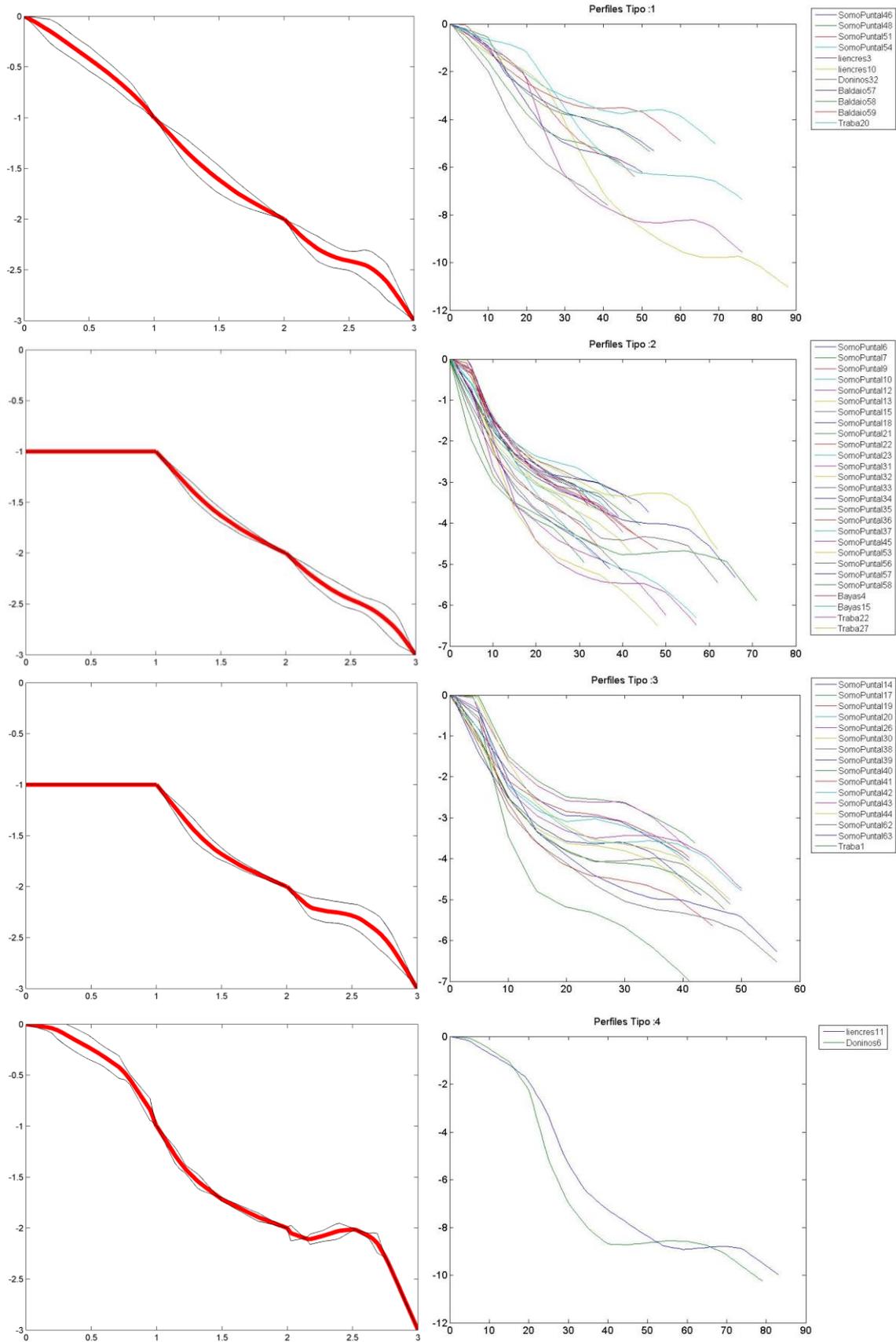
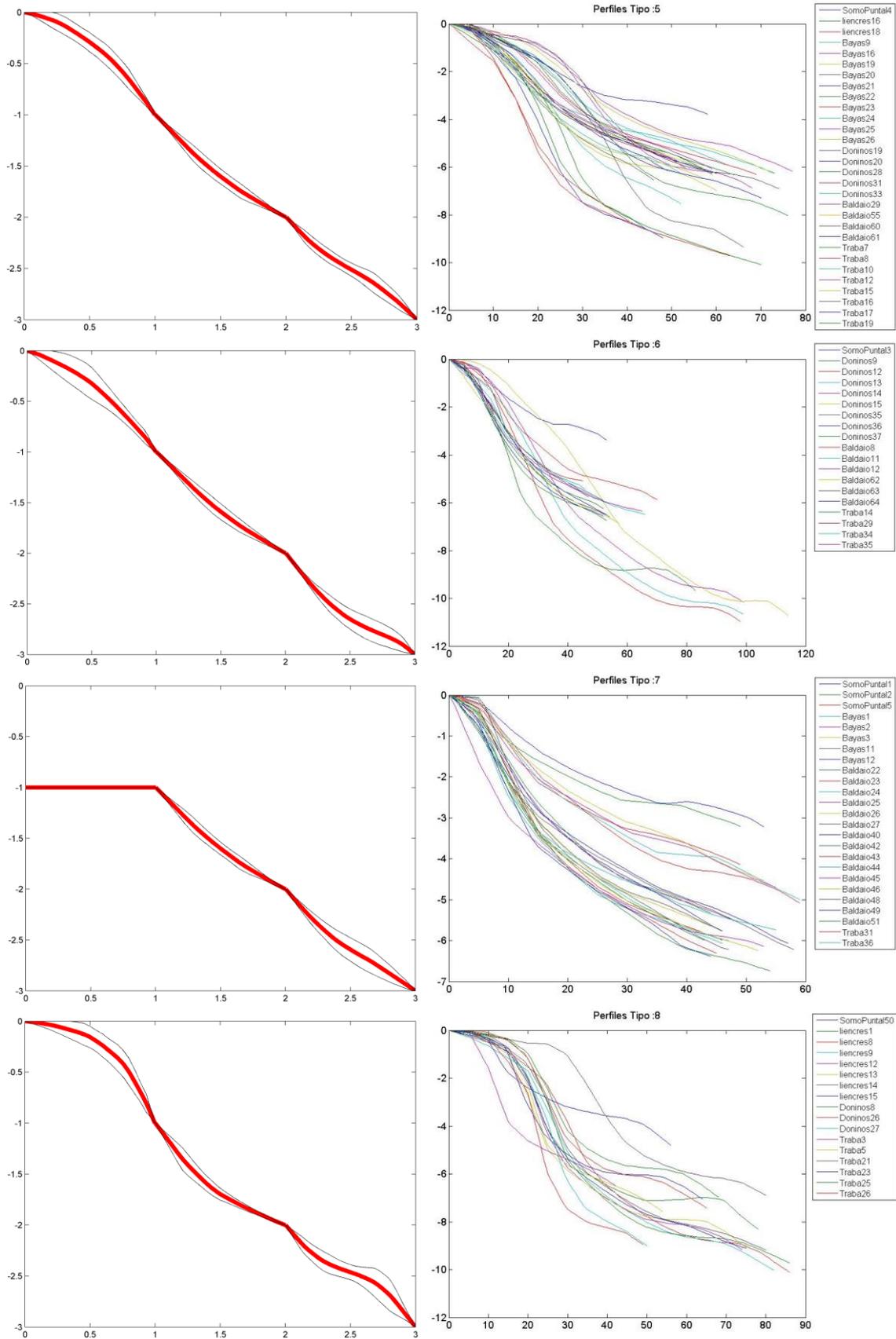


Figura II.34 – Clasificación de la forma de los perfiles de los 3 tramos conjuntos (duna tramo convexo, duna tramo cóncavo y playa seca), adimensionalizados independientemente. La parte recta en la duna tramo convexo indica que esta parte no fue posible de ser detectada.



(Figura II.35, continua...)



(Figura II.35, continua...)

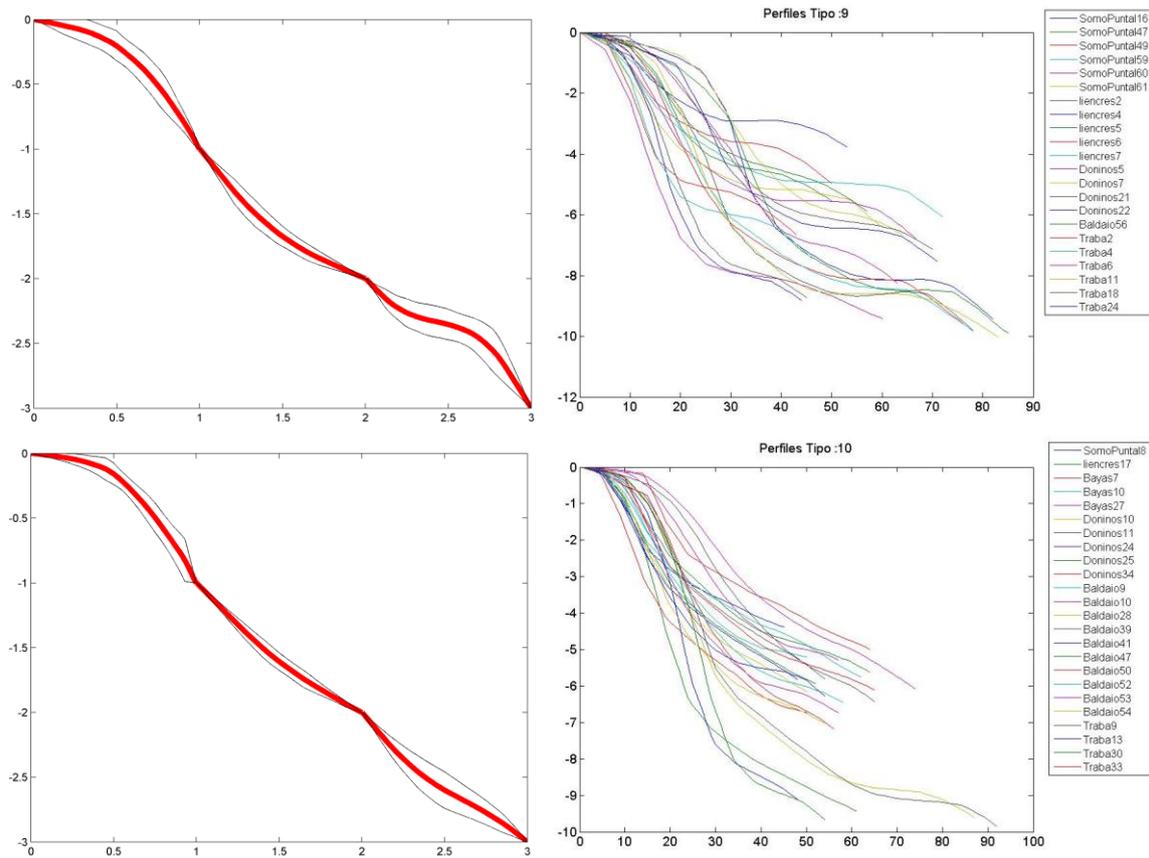


Figura II.35 – (Izquierda) Centroides obtenidos de la evaluación *k*-medias con todo el perfil del sistema playa/duna primaria, adimensionalizados por tramos “duna tramo convexo”, “duna tramo cóncavo” y “playa seca” separadamente (línea roja) con banda de confianza del 95% (líneas negras finas) y (Derecha) Perfiles originales (no adimensionalizados) agrupados por los centroides tipo.

## 5.2. Conclusiones acerca de la evaluación de la forma del perfil

En un 38% de los perfiles evaluados no fue posible identificar/detectar la parte convexa de las dunas primarias, principalmente en los perfiles de dunas de menor tamaño, como de Puntal del Somo, Bayas y Baldaio.

Fueron necesarios definir 7 centroides “tipo”, en el análisis *k*-medias, de la parte convexa para que el porcentual máximo de variación de 30% fuera cumplido. A pesar de un número relativamente alto de tipos, se pudo observar que la forma de los mismos es muy semejante y que los pocos tipos que dominaron (tipo 1; 2 y 5), se sumados con los del tipo 0, abarcan aproximadamente un 80% de los perfiles evaluados.

La clasificación de los perfiles “tipo” del tramo cóncavo de las dunas primarias muestra que este sector de la duna presenta gran homogeneidad, pudiendo ser agrupados en un mismo centroide si se considera la variación máxima del 30% definida para los otros tramos del perfil. Se han definido tres centroides y se observó que sus formas prácticamente no varían, presentando una desviación típica muy pequeña tras el agrupamiento de los perfiles originales.

En cuanto a la clasificación de la forma de la playa seca, el análisis *k*-medias indicó la necesidad de generar 6 centroides para obtener la variación máxima del 30% en el eje Y. Se pudo observar una mayor variedad de formas en este tramo del perfil, con tipos característicamente más rectos (tipos 1, 4 y 5) dominantes y tipos con la presencia de una cresta de berma, menos frecuentes. Los resultados corroboran los resultados obtenidos en el trabajo de Díez et al. (2017a) e indican que las playas estudiadas son del tipo entre disipativas e intermedias.

La evaluación de la forma de los tramos de la duna primaria y de la playa seca, a través de la definición de formas tipo por la aplicación del algoritmo *k*-medias, indica que las dunas primarias presentan una forma poco variable, principalmente en su tramo cóncavo, a pesar de los diferentes tamaños, pendientes y tipos de playa seca.

Las combinaciones existentes entre los perfiles clasificados dentro de cada tipo de playa seca y los de la duna indicaron que, a pesar de las diferentes formas de playa seca, la forma de la duna adimensional es independiente.

# CAPÍTULO III

## Influencia de las dinámicas marinas y eólicas en la morfología del perfil de las dunas primarias



### **III. Influencia de las dinámicas marinas y eólicas en la morfología del perfil de las dunas primarias**

#### **1. Introducción**

Estudios previos indican que la generación y morfología de las dunas primarias están influenciadas por diversos factores, pero principalmente por las características de la playa adyacente y por la dinámica ambiental (Short & Hesp 1982; Sherman & Bauer 1993; Davidson-Arnott & Law 1996; Guillén et al. 1999; Bauer & Davidson-Arnott 2002; Ruessink & Jeuken 2002; Saye et al. 2005; Houser & Hamilton 2009; Sabatier et al. 2009; Miot da Silva 2011; Houser & Mathew 2011; de Vries et al. 2012; Ollerhead et al. 2013) (véase detalles del estado del arte en el Anexo I de esta tesis).

La dinámica eólica y marina son las principales fuentes de energía en un sistema playa/duna primaria e influyen directamente en las condiciones de acumulación y erosión (Hanson et al. 2010; Larson et al. 2016; Palalane et al. 2016; Goldstein & Moore 2016). En el largo plazo se puede suponer que la morfología del sistema, dependiendo de las condiciones energéticas, llegará a una condición estable y una consecuente forma de equilibrio característica. No obstante, la importancia relativa y cuantificación de la influencia de estas dos fuentes de energía, en la definición de la morfología de las dunas primarias, todavía no está clara. Se sabe que el potencial del viento en transportar el sedimento es esencial para la formación y recuperación de las dunas primarias y, por lo tanto, tiene gran importancia en su condición de equilibrio (Miot da Silva & Hesp 2010; Delgado-Fernandez & Davidson-Arnott 2011). En contraste a la importancia de la función de crecimiento/recuperación de las dunas causado por el viento, algunos investigadores sugieren que, en el plazo, la erosión causada por oleaje es lo que definirá la morfología de equilibrio de las dunas primarias (Stallins & Parker 2003; Christiansen & Davidson-Arnott 2004; Houser 2009; Damsma 2009; de Vries et al. 2015).

Considerando como hipótesis de partida de esta tesis la de que, a largo plazo, las dunas primarias presentan una morfología de equilibrio, uno de los objetivos principales es el de identificar de que depende su tamaño, posición y forma. Dando seguimiento a las evaluaciones de los parámetros morfométricos de las dunas primarias en equilibrio, y partiendo de las evidencias presentadas en el Capítulo II de que estas características no pueden ser definidas solamente a partir de las características de la playa seca y granulometría, se probó la influencia de la dinámica ambiental. En este capítulo se evalúa la correlación entre diversos parámetros indicadores de la dinámica local, tanto de vientos como de oleaje/niveles del mar, y los parámetros morfométricos de los sistemas playas/dunas primarias evaluados.

## 2. Metodología

A continuación, se presentan los datos utilizados y las metodologías empleadas para cuantificar las dinámicas eólica y marina de las áreas de estudio. La metodología de la obtención de los parámetros morfométricos fue presentada en el Capítulo II.

### 2.1. Datos utilizados

#### Datos meteorológicos y oceanográficos provenientes de medidas directas

Los datos de vientos y clima marítimo fueron obtenidos a partir de las siguientes fuentes:

- Para la caracterización histórica de los vientos, los datos fueron obtenidos de las redes de boyas de Puertos del estado: REDEXT (Red de Boyas de Aguas Profundas) ([http://calipso.puertos.es//BD/informes/INT\\_2.pdf](http://calipso.puertos.es//BD/informes/INT_2.pdf)). Las boyas fueron seleccionadas por región y los datos obtenidos fueron velocidad y dirección del viento (a 3m de la superficie). Los datos son valores medios de medidas continuas de 10 minutos, cada hora.
- Para la caracterización regional del clima de oleaje los datos de altura de ola significativa (Hs), periodo de pico (Tp) y dirección (Dir) también fueron obtenidos a partir de las boyas REDEXT. Los datos son valores medios de medidas continuas de 30 minutos, cada hora.

#### Datos oceanográficos provenientes de reanálisis

Para la caracterización local a largo plazo del clima de oleaje se utilizó una base de datos generada a partir de reanálisis de parámetros atmosféricos, denominada *Downscaled Ocean Waves* (DOW), desarrollada por el IHCantabria (Camus et al. 2013), de 60 años de duración (1948-2008), con una resolución temporal horaria y espacial de entre 50 y 200 m. Para la construcción de dicha base de datos se desarrolló una metodología híbrida (Camus, et al 2011a) que combina la generación y propagación numérica del oleaje, con técnicas estadísticas avanzadas de selección (MaxDiss, Kennard & Stone 1969) e interpolación (RBF, Franke 1982) de variables de alta dimensionalidad. La propagación se realiza mediante la ejecución del modelo numérico SWAN (Booij et al. 1999) forzado con los vientos del reanálisis SeaWind-NCEP (Fita et al. 2009) y con los espectros de oleaje del reanálisis en aguas abiertas GOW 1.1 (*Global Ocean Waves*, Reguero et al., 2012) calibrados con datos de satélite (Mínguez et al. 2011; Mínguez et al. 2012).

Para la caracterización local a largo plazo (60 años con resolución temporal horaria) de la marea meteorológica se utilizó una base de datos generada a partir de reanálisis de parámetros atmosféricos, denominada *Global Ocean Surges* (GOS), desarrollada por el IHCantabria (Cid et al. 2014). Proporciona datos de marea meteorológica calculados con una resolución espacial de 1/8° y una resolución temporal horaria. Dicho reanálisis ha sido realizado con el modelo tridimensional de circulación ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) desarrollado por el *Ocean Modeling Group* de Rutgers (Shchepetkin &

McWilliams 2003). Debido a que el modelo incluye algoritmos físicos y numéricos altamente eficientes y precisos, en la actualidad está siendo ampliamente utilizado por la comunidad científica. Este modelo también fue forzado con datos de viento y presión atmosférica del reanálisis SeaWind-NCEP. Esta base de datos fue validada con datos de mareógrafos.

Los datos de marea astronómica, de 60 años de duración y resolución horaria, fueron obtenidos de la bases de datos del IHCantabria. Estos fueron calculados utilizando las ocho constantes armónicas primarias (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, y Q1), dos de largos periodos constituyentes (Mf y Mm) y 3 constituyentes armónicas no lineales ((M4, MS4 y MN4) del modelo global TPXO desarrollado por la Universidad de Oregón (Egbert et al. 1994; Egbert & Erofeeva 2002). Esta información se utilizó para reconstruir series temporales horarias utilizando la herramienta de  $t\_tide$  (Pawlowicz et al. 2002).

## 2.2. Caracterización de la dinámica eólica

En cada playa se caracterizó el viento considerando las siguientes premisas:

- Los vientos más importantes en el proceso de equilibrio de las dunas primarias son los vientos *onshore* (desde el mar hacia tierra), o sea, aquellos que interactúan con la playa y dunas primarias. Por lo tanto, se han descartado los vientos provenientes desde tierra.
- Los vientos registrados por la boya localizada en aguas profundas son equivalentes a los vientos que llegan a la costa, por no estar sujetos a grandes cambios antes de encontrar la orografía costera, salvo alguna corrección de velocidad. Por lo tanto, pueden ser utilizados para la definición del clima de viento en las regiones y playas.
- Los datos de vientos más relevantes en los procesos que gobiernan la estabilidad del sistema playas/dunas son los que presentan velocidades más altas que la velocidad de inicio de movimiento del sedimento.
- A pesar de que algunos autores destacan la importancia de otros factores que limitan el transporte de sedimento, como la humedad de sedimento o el efecto de los depósitos residuales (*lag deposits*), tal como se ha presentado en el Estado del Arte (Anexo D), estos factores no fueron tenidos en cuenta por considerarse que no cambiaran significativamente entre playas, en un ámbito de análisis en el largo plazo. Por lo tanto, se consideró que la velocidad del viento está directamente relacionada a su capacidad para transportar sedimento.
- Se observó que hay fallos en los registros de las boyas, que resultan en lapsos en las bases de datos. Al evaluar los datos de las boyas (Figura III.1) se determinó, empíricamente, que solamente los años con registro de más de 5600hs (más de 60% del total del año) serían considerados en la evaluación.

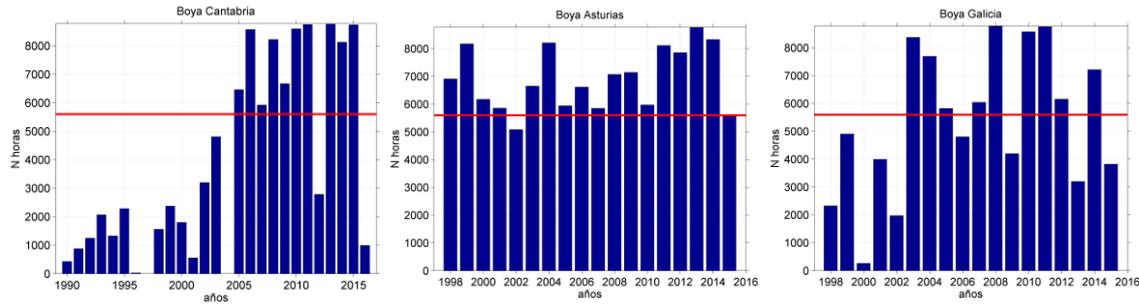


Figura III.1 – Número de horas de datos de viento registrados, cada año, por las boyas localizadas delante de Cantabria, Asturias y Galicia (la línea roja marca el umbral de 5600hs).

Las formulaciones utilizadas para los cálculos de transporte eólico fueron las indicadas por el *Coastal Engineering Manual* de *US Army Corps of Engineers* (Hsu & Weggel 2002).

Para el cálculo de la velocidad de corte del viento necesaria para el **inicio del movimiento** ( $u_{*t}$ ) a 0m de altitud se aplicó la ecuación de Bagnold (1941):

$$u_{*t0} = A_t \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)gD}{\rho_a}} \quad (III.1)$$

Donde:  $u_{*t0}$  = velocidad de corte de inicio de movimiento a 0m de altura;  $\rho_s$  = densidad del sedimento ( $2.65\text{g/cm}^3$ );  $\rho_a$  = densidad del aire ( $0.00122\text{g/cm}^3$ );  $A_t$  = constante adimensional (0.118);  $g$  = aceleración de la gravedad ( $980\text{cm/s}^2$ );  $D$  = tamaño del grano del sedimento (en cm). El tamaño del sedimento utilizado fue el obtenido de la bibliografía o estimado para las dunas primarias (datos presentados en la metodología del Capítulo II).

La relación para calcular la velocidad de corte ( $u_*$ ) a partir de la **velocidad del viento medida a una cierta altura**, y vice versa, fue determinada a través de la utilización de dos formulaciones:

i) la relación, para playas, propuesta por Hsu (1977) entre la velocidad de corte y la velocidad del viento medido a 2m del suelo ( $U_{2m}$  en cm/s):

$$u_* = U_{2m} * 0.044 \quad (III.2)$$

ii) la transformación de la velocidad del viento desde 2m hacia mayores alturas, como es el caso de esta investigación, donde se tienen datos medidos a 3m:

$$u_* = \frac{k(U_{z2} - U_{z1})}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)} \quad (III.3)$$

Donde:  $k = 0.4$  (constante de von Karman);  $U_{z1}$  = velocidad del viento (cm/s) en la altura 1, o sea, a 2m ( $U_{2m}$ );  $U_{z2}$  = velocidad del viento (cm/s) en la altura 2, o sea, 3m ( $U_{3m}$ );  $Z_1$  = altura 1 (2m);  $Z_2$  = altura 2 (3m).

Combinando las ecuaciones (III.2) y (III.3) y sustituyendo los valores tenemos que:

$$u_* = U_{3m} * 0.0421 \quad (III.4)$$

Incluyendo la ecuación (III.1) en la relación (III.4) se calculó la velocidad medida a 3m que es considerada la mínima necesaria para el inicio del movimiento del grano ( $U_{t,3m}$ ), y aplicando (III.4) se estimó de la velocidad de corte media encontrada en cada una de las playas, a partir de la velocidad media registrada a 3m.

Para estudios de transporte de sedimento en playas/dunas, Hsu & Weggel (2002) proponen la utilización de los datos de viento obtenidos de boyas *offshore* en vez de medidas de aeropuertos, pero se hace necesario una corrección:

$$U_{sea} = 1.62 (m/s) + 1.17 U_{land} \quad (III.5)$$

Donde:  $U_{sea}$  = velocidad del viento sobre el mar;  $U_{land}$  = velocidad del viento sobre tierra.

Las ecuaciones anteriores fueron aplicadas para saber cuál es el valor de la velocidad mínima del viento necesario para iniciar el movimiento de los granos, a partir del tamaño del grano de la duna de cada área de estudio, transformada a la velocidad medida a 3m ( $U_{t,3m}$ ) y corregida para tierra. De esta manera, para la evaluación de los datos de viento fueron seleccionados solamente los registros con valor superior a la  $U_{t,3m}$ , considerando que vientos con valores menores que  $U_{t,3m}$  no pueden colaborar en la morfodinámica entre playa y duna primaria, tal como se indica en la metodología del *Coastal Engineering Manual*.

Además de este umbral mínimo, se definió el rango de direcciones de viento ( $\Delta\alpha V$ ) que pueden actuar de la playa hacia las dunas primarias y, por lo tanto, influir en su equilibrio. En los casos de playas encajadas entre acantilados, estos fueron utilizados como referencia para determinar la dirección del viento que actúa sobre las dunas. Cuando no hay acantilado, o este se localiza paralelo a la línea de costa, se consideró un ángulo mínimo de  $15^\circ$  entre el viento y la línea de costa, siguiendo las indicaciones de Arens (1996b), que define que vientos paralelos (de  $0$  a  $15^\circ$  entre el viento y la línea de costa) no tienen capacidad de transporte de la playa hacia las dunas.

Con estos datos se realizó la caracterización estadística de los vientos (p. ej. rosa de dirección, histogramas de frecuencia de velocidad, media y variación mensual en la velocidad) a través del paquete estadístico AMEVA (IHCantabria 2016). Para la caracterización regional fueron utilizadas todas las direcciones de viento registradas; para la caracterización de las playas fueron seleccionados los datos que estaban dentro del rango de direcciones de mar hacia tierra, específicos de cada playa.

Para estimar el transporte potencial ( $DP$  – *potential drift*) en cada playa, se utilizaron los registros horarios seleccionados ( $U_{3m} > U_{t,3m}$ ; y dirección *onshore* dentro del rango  $\Delta\alpha V$ ), aplicando la ecuación de Hsu (1986):

$$DP_m = K \left( \frac{u_*}{\sqrt{gD}} \right)^3 \quad (\text{en g/m/hora}) \quad \text{y} \quad DP = \frac{DP_m}{\rho_s (1-p)} \quad (\text{en m}^3/\text{m/hora}) \quad (III.6)$$

Donde:  $u_*$  = velocidad de corte (solamente de los registros que superan el valor de inicio del movimiento);  $D$  = tamaño medio del sedimento;  $\rho_s$  = densidad del sedimento;  $p$  =

porosidad del sedimento (asumiendo porosidad típica de arenas de 0.4);  $g$  = aceleración de la gravedad; y  $K$  es un coeficiente empírico en función de  $D$  (en mm) dado por:

$$K = e^{-9.63+4.91D}$$

Se estimó la dirección media de transporte potencial (RDD - *resultant drift direction*) como una suma vectorial (ecuación III.7):

$$RDD = atan \left( \frac{\sum_{i=1}^{i=N} DP_i * \sin(dir_i)}{N} / \frac{\sum_{i=1}^{i=N} DP_i * \cos(dir_i)}{N} \right) \quad (III.7)$$

Donde:  $i$  = cada medida de viento;  $N$  = número total de registros de viento;  $DP_i$  = volumen transportado por el viento en  $i$ ;  $dir_i$  = dirección del viento en  $i$ .

Se estimó el transporte anual (DP en m<sup>3</sup>/m/año) a través de la suma de los transportes potenciales horarios, con extrapolación del total anual considerando la proporción del número de horas registrada con relación al número de horas del año. Al final se calculó el valor medio anual de todos los años evaluados. Es importante mencionar que los resultados obtenidos deben ser interpretados de modo orientativo, pues no se dispone de datos medidos del transporte para calibrar dichos resultados. Sin embargo se considera que en el largo plazo nos dice el orden de magnitud del transporte potencial eólico de sedimentos en las playas.

Según lo propuesto por Nickling & Davidson-Arnott (1990), el ángulo de incidencia del viento afectará la deposición real por metro de longitud en la duna primaria, que disminuye cuanto mayor es el ángulo relativo entre el viento y la orientación de la línea de las dunas primarias. Este transporte puede ser calculado como:

$$DP\alpha = DP * \cos \alpha \quad (III.8)$$

Donde:  $DP\alpha$  = transporte potencial considerando el ángulo del viento con relación a la línea de costa (volumen transportado por metro de duna primaria, m<sup>3</sup>/m/año);  $DP$  = transporte potencial;  $\alpha$  = ángulo de aproximación del viento a una perpendicular a la costa (Figura III.2). Este cálculo fue aplicado para cada registro de viento (horario) con posterior cuantificación del valor medio anual.

Según Bauer et al. (2009), la dirección del viento también influirá en la longitud del fetch de actuación del viento, llamado fetch efectivo (Figura III.2), que puede ser calculado como:

$$fetch_e = \frac{Lplaya}{\cos \alpha} \quad (III.9)$$

Donde:  $fetch_e$  = fetch efectivo;  $Lplaya$  = anchura de la playa;  $\alpha$  = ángulo medio de aproximación del viento a una perpendicular a la costa.

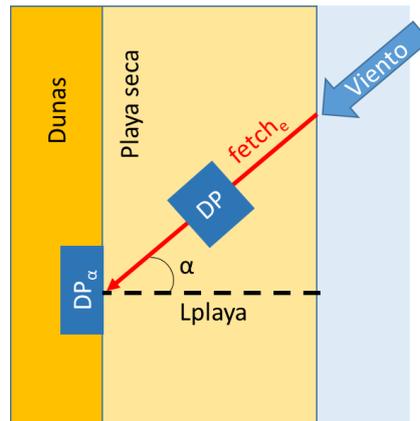


Figura III.2 – Definición de los parámetros para calcular el transporte potencial considerando la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP_\alpha$ ) y el fetch efectivo ( $fetch_e$ ).

### 2.3. Propagación y caracterización de la dinámica marina costera

Para estimar el clima del oleaje en profundidades reducidas se propagó la base de datos de 60 años de los puntos DOW (datos de oleaje generados por reanálisis) desde *offshore* (entre 60 y 200m de profundidad) hasta la línea de costa. Para esto se utilizó la siguiente metodología:

- Evaluación de las características del oleaje en profundidades indefinidas/intermedias, con selección del punto DOW representativo (sin diferencia significativamente con los puntos DOW adyacentes).
- Evaluación estadística de las características del clima del oleaje, principalmente las direcciones incidentes, para definir las mallas de propagación.
- Generación de un proyecto en el software Sistema de Modelado Costero - SMC (González et al. 2007) con batimetría general obtenida de las cartas náuticas y su mejora mediante inserción de batimetrías de detalle disponible en la base de datos del IHCantabria (para las playas del Puntal de Somo, Valdearenas y parte de Bayas), líneas batimétricas de poca profundidad basadas en imágenes de satélite y líneas batimétricas y topográficas adyacentes, necesarias para reconstrucción del modelo digital del terreno.
- Generación de las mallas, respetando un direccionamiento máximo de  $\pm 55^\circ$  entre la dirección de los espectros incidentes y la línea de entrada de la malla. La resolución de las mallas utilizadas fue de  $\Delta x$  y  $\Delta y$  igual a 50m.
- A partir de los 60 años de datos de oleaje, generadas por reanálisis, se hizo la selección de los espectros a propagar, aplicando la técnica de clasificación de Máxima Disimilitud - MaxDis (Camus et al. 2011b), con selección de los 150 casos espectrales más representativos de toda la serie de datos.
- Se realizó la propagación de los 150 casos, en tres niveles de marea (propagación total de 450 casos) utilizando el modelo tipo *ref-dif* OLUCA-SP del software Sistema de Modelado Costero (SMC, mayores detalles del modelo en González et al., 2007).

- Fueron definidos puntos delante de cada playa (puntos POI - *points of interest*), a una profundidad de 10m en bajamar, donde se reconstruyó la serie de datos de oleaje de 60 años, a través de la metodología de interpolación basada en funciones de base radial (RBF, Franke 1982) utilizando los 450 casos propagados. Dentro de cada playa, los perfiles de playa/duna primaria asociados a un punto POI fueron evaluados conjuntamente a través de la media de sus valores morfométricos, para las evaluaciones de correlación.

- El resultado final de esta metodología es la generación de datos de clima de oleaje de reanálisis de 60 años (desde 1948 hasta 2008) al pie de playa. Estos datos consisten en datos de altura de ola significativa, período de pico y dirección.

A través de estos datos es posible estimar el flujo medio de energía de las olas, la cota de inundación y el estado morfodinámico de la playa, con la metodología que se presenta a continuación.

#### Calculo del flujo medio de energía de las olas

El vector del flujo de energía en un punto, asociado a un determinado oleaje, tiene como magnitud:

$$FE = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad C_g = \frac{L}{T} n \quad n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad (\text{III.10})$$

Donde  $\rho$  = densidad del agua del mar;  $g$  = gravedad;  $H$  = altura de ola significativa;  $C_g$  = celeridad de grupo;  $L$  = longitud de onda;  $T$  = período de onda;  $n$  = número de onda;  $h$  = profundidad donde se está calculando.

Este vector  $FE$  (con magnitud y dirección) fue obtenido para cada registro horario de los 60 años de datos, a partir de los cuales se obtuvo el valor medio (Flujo Medio de Energía – FME) y su dirección media resultante, como una sumatoria de todos estos vectores mediante aplicación del teorema de Pitágoras.

#### Cálculo de cota de inundación de las playas

La cota de inundación (CI) de una playa consiste en la suma del nivel de la marea astronómica, la marea meteorológica y el *runup* de las olas. Esta cota, hasta donde llega el mar en cada instante de tiempo, incluye eventos extremales de oleaje y niveles, que alcanzan con cierta frecuencia la cota donde se encuentra la base de la duna primaria. Es uno de los factores, identificados por estudios previos, que influyen de forma importante los parámetros morfométricos de la duna primaria.

El cálculo de CI fue realizado para cada dato horario de las olas de reanálisis, marea meteorológica y marea astronómica (60 años), utilizando la siguiente ecuación:

$$CI = mm + ma + R_{2\%} \quad (\text{III.11})$$

Donde:  $mm$  = marea meteorológica;  $ma$  = marea astronómica y  $R_{2\%}$  = elevación del nivel de excedencia del 2% del *runup* de las olas, que a su vez fue calculada a través de la ecuación propuesta por Stockdon et al. (2006):

$$R_{2\%} = 1.1 \left( 0.35\beta(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta^2+0.004)]^{1/2}}{2} \right) \quad (\text{III.12})$$

Donde  $\beta$  = pendiente del frente de la playa (considerada 0.03);  $H_0$  = altura de ola significativa en 80m de profundidad;  $L_0$  = longitud de onda en profundidades de 80m (calculada por la ecuación de la dispersión). Para obtener  $H_0$  a partir de los datos a 10m de profundidad, se utilizó la teoría lineal de ondas para hacer el asomeramiento hacia atrás (*reverse shoaling*).

La evaluación estadística de los datos de CI fue realizada para el análisis de régimen medio, con todos los datos obtenidos, y el régimen extremal, con los valores máximos anuales, aplicando una función de distribución GEV (*Generalized Extreme Value*):

$$F(x; \mu; \psi; \xi) = \exp \left( - \left( 1 + \xi \left( \frac{x-\mu}{\psi} \right) \right)^{\frac{-1}{\xi}} \right) \quad (\text{III.13})$$

Donde:  $\mu$  = parámetro de localización;  $\psi$  = parámetro de escala;  $\xi$  = parámetro de forma.

Esta función de distribución combina las tres distribuciones en función del parámetro de forma: Gumbel si  $\xi=0$ ; Fréchet si  $\xi>0$ ; Weibull si  $\xi<0$ .

A partir del régimen medio es posible evaluar la probabilidad de no excedencia de una cota determinada o verificar la cota alcanzada solamente durante cierto tiempo en un año. En esta tesis se decidió calcular la cota de inundación superada solamente 12 horas al año y el percentil 99%. Con el régimen extremal de máximos anuales es posible estimar la cota de inundación para un período de retorno determinado, por ejemplo, cual la cota de inundación más probable asociada a un período de retorno de 2 años y 10 años.

#### Clasificación morfodinámica de las playas

Con el objetivo de evaluar la importancia del estado morfodinámico de la playa en las características de las dunas primarias, tal como definido en el modelo de Short & Hesp (1982), se calculó el parámetro adimensional de caída de grano ( $\Omega$ ), propuesta por Wright & Short (1984):

$$\Omega = \frac{H}{\omega T} \quad (\text{III.14})$$

Donde:  $H$  = es la altura de ola significativa;  $T$  = periodo de pico del oleaje;  $\omega$  = es la velocidad de caída del grano, la cual depende del tamaño del grano de la playa ( $D$ ) y es calculada, para tamaños de granos entre 0.1 y 1.0mm como:

$$\omega = 273D^{1.1}$$

Los cálculos fueron realizados para cada uno de los registros horarios de los 60 años de datos de reanálisis propagados hasta la playa, con evaluación de su estado medio.

La clasificación considera que valores de  $\Omega$  próximos o superiores a 5.5 se refieren a playas disipativas; valores próximos o inferiores a 1.5 se refieren a playas reflejantes. Para las playas que presentaron valores de  $\Omega$  entre estos rangos se considera que son intermedias.

### 3. Descripción de las características dinámicas de las áreas de estudio

Las dinámicas eólica y marina de cada una de las 3 regiones (Cantabria, Asturias y Galicia), y específicamente de cada playa, fueron evaluadas. Debido a la extensión de la descripción de las dinámicas y a que las correlaciones fueron realizadas a partir de datos medios o únicos para cada playa, la dinámica regional y local está recogida en el apartado 2 del Anexo II.

En la descripción regional del Anexo II el lector encontrará:

- La localización de las fuentes de datos de oleaje y viento (puntos DOW y boyas);
- La caracterización de los vientos (con todas las direcciones registradas, con y sin la selección de los registros de velocidad de viento con capacidad de transporte), a través de la presentación de las rosas de vientos, histogramas de velocidad y variación mensual;
- La caracterización del clima de oleaje, a través de la presentación de las rosas de oleaje, histogramas de altura y período de oleaje y su variación mensual;
- La presentación de los niveles de referencia del nivel del mar y mareas, en forma de tabla.

Se puede observar que las tres regiones se encuentran expuestas a intensas dinámicas de oleaje y de vientos. Fueron registrados vientos medios horarios de hasta 24m/s en la zona exterior (boyas *offshore*). Estos vientos presentan una estacionalidad, con mayores velocidades en invierno y velocidades más bajas en verano. Si se considera solamente los vientos con potencial para el transporte de sedimento (para una evaluación general  $u_{*t0} > 0.23\text{m/s}$ ), la principal dirección es de oeste-noroeste para Cantabria; oeste-sudoeste para Asturias; nordeste y sudoeste para Galicia (Figura AII.7 del Anexo II); con velocidades medias de aproximadamente 7.5m/s (en tierra, a 3m de altura).

El oleaje sigue este patrón de alta energía, con valores medios de altura de ola significativa de cerca de 2m y de alturas de ola significativa de temporal de más de 10m, en aguas profundas. También se observa variabilidad estacional, con olas más energéticas en invierno que en verano.

En cuanto a la caracterización de cada playa, se presenta a continuación la descripción de la dinámica de la playa del Puntal de Somo a modo de ejemplo, para que quede claro al lector lo que encontrará en el Anexo II.

### 3.1. Puntal de Somo

La dirección de los vientos hacia tierra, con influencia directa sobre el área de estudio de playa/duna de Puntal de Somo, es de entre  $314^\circ$  y  $67^\circ$  (Figura III.3). Los vientos dentro de este rango y con velocidades superiores a la de inicio de movimiento de los granos ( $U_{L3m}=6.71\text{m/s}$ ) ocurren en 1.3% de los registros, con una velocidad media de  $8.14\text{m/s}$  (medidos a 3m de altura). La dirección predominante es de noroeste a nortenoeste. El cálculo del transporte potencial (DP) indica un valor medio anual de  $1.95\text{m}^3/\text{m}/\text{año}$ , con dirección resultante proveniente de  $341^\circ$ . El cálculo del transporte anual considerando el ángulo del viento con relación a la dirección de línea de costa (DP $\alpha$ ) resulta en un valor medio de  $1.49\text{m}^3/\text{m}/\text{año}$ .

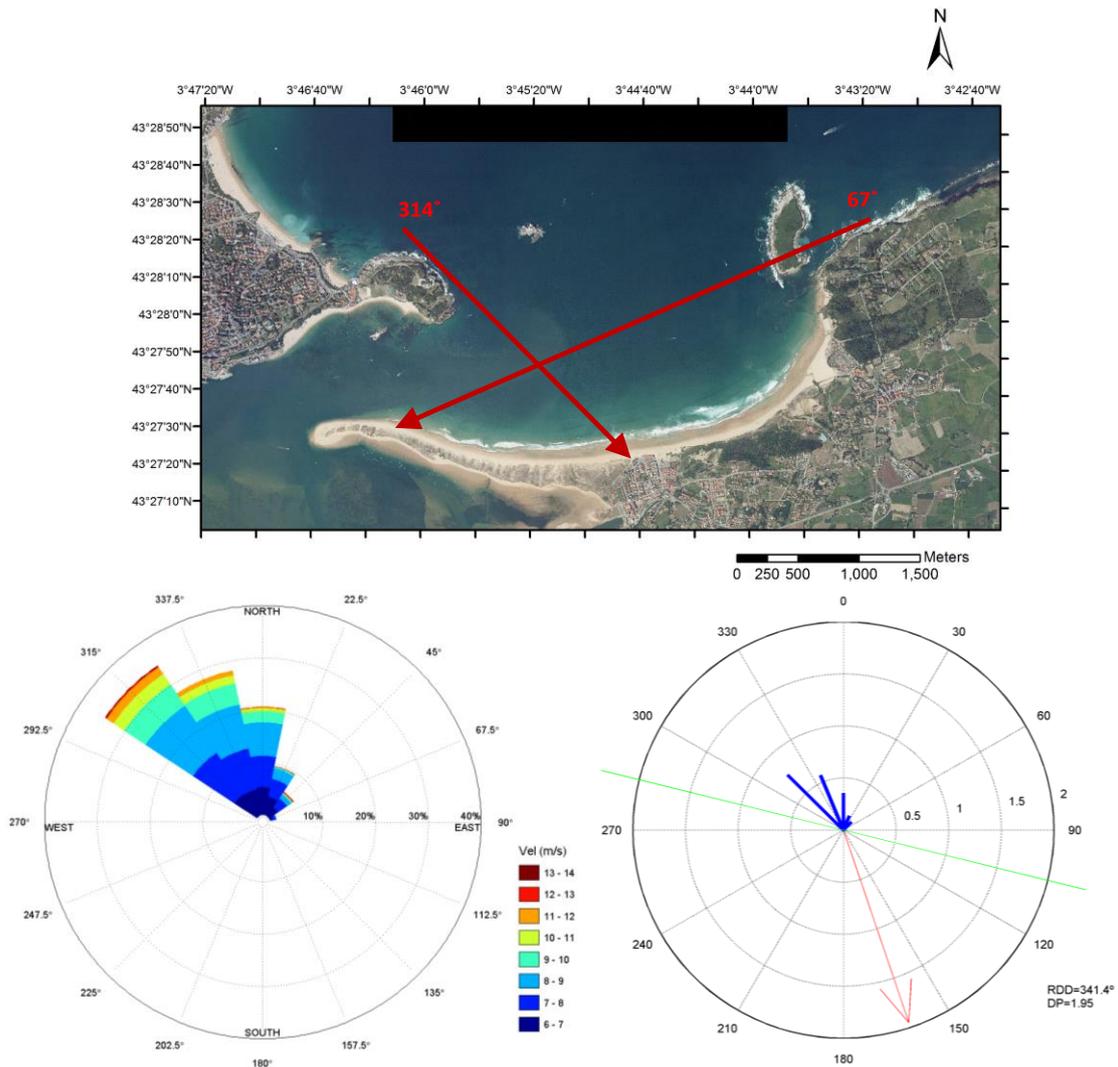


Figura III.3 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas del Puntal de Somo, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea,  $U_{3m} > U_{L3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en  $\text{m}^3/\text{m}/\text{año}$ ).

Para la caracterización del clima de oleaje en profundidades indefinidas/intermedias, el punto DOW utilizado se localiza en: long.= -3.780°; lat.= 43.532°; profundidad= 60m. Los resultados (Figura III.4) indican que el oleaje en profundidades indefinidas/intermedias son provenientes principalmente de NW (51%) y WNW (21%), en condiciones medias con  $Hs_{50\%}=1.6m$  y  $Tp_{50\%}=10s$  y en condiciones extremales (mayores temporales anuales) con  $Hs_{12}=7.6m$  y  $Tp_{12}=14.5s$ . Los resultados de la base de datos de oleaje generado por reanálisis DOW están de acuerdo a lo registrado en las boyas offshore (Tabla 9 del Anexo II).

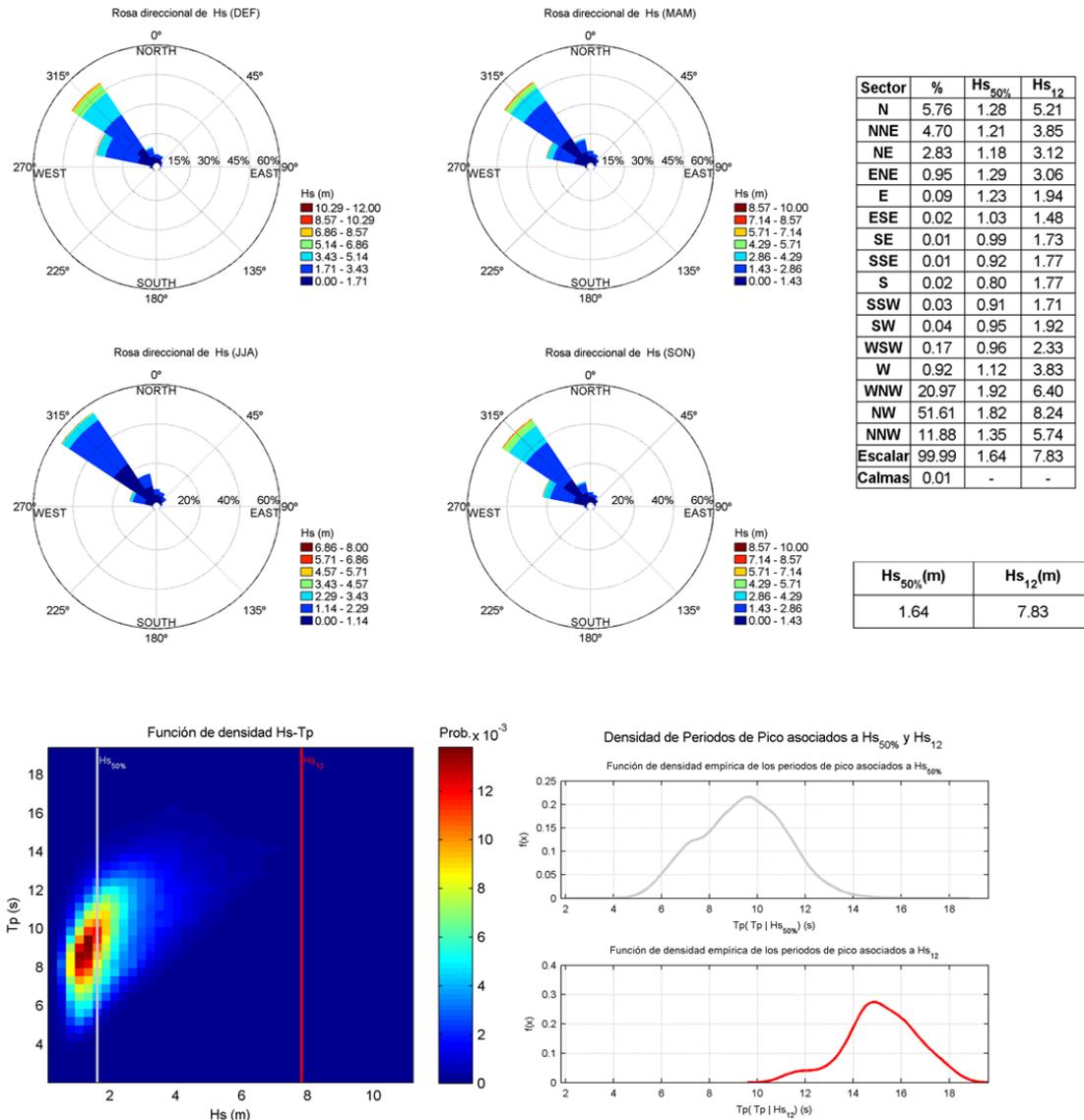


Figura III.4 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa del Puntal de Somo: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp.

Un ejemplo de propagación desde profundidades indefinidas/intermedias hasta la línea de costa puede ser observada en la Figura III.5, en un caso de evento extremal, con dirección más frecuente, en pleamar. La caracterización del oleaje en profundidades reducidas en los puntos/perfiles evaluados (Figura III.6) se recoge en la Tabla III.1.

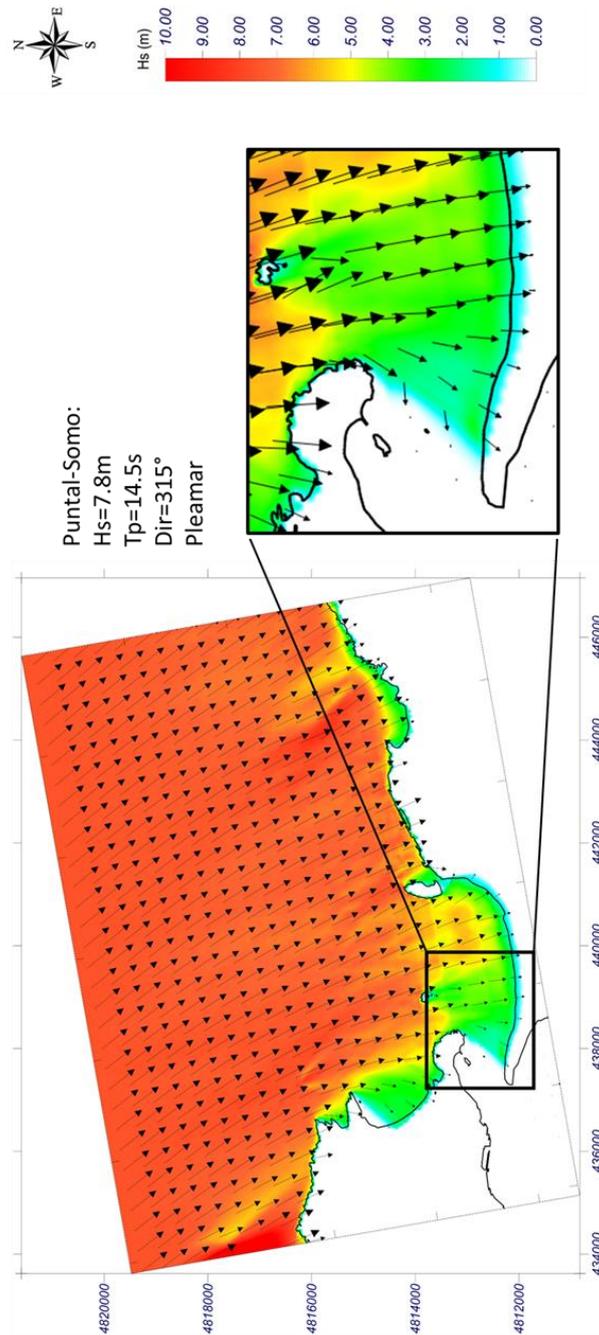


Figura III.5 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/intermedias hasta la playa del Punta de Somo.

Al propagar los oleajes hasta la línea de costa se puede observar que el acantilado y la isla, localizados delante de la playa (península de la Magdalena e isla de Mouro), causan difracción que, conjuntamente con procesos de refracción, resultan en una variación de la altura de ola a lo largo de la playa del Punta de Somo, con mayores alturas y más energía al este de la playa ( $H_{s50\%} \approx 1\text{m}$ ;  $H_{s12} \approx 4\text{m}$ ;  $FME \approx 10000\text{J/m/s}$ ), disminuyendo gradualmente hacia oeste ( $H_{s50\%} \approx 0.4\text{m}$ ;  $H_{s12} \approx 2\text{m}$ ;  $FME \approx 2000\text{J/m/s}$ ). Los puntos más al oeste (POI 1 y 2) presentaron un estado morfodinámico reflejante, pero la mayoría de la playa puede ser considerada morfodinámicamente intermedia. Los valores de cota de inundación calculada indican la importancia del *runup* generado por las olas, pues hay una

coincidencia de que los puntos con una menor exposición al oeste presentan menores cotas de inundación, aumentando en el oeste a medida que aumenta la exposición de la playa al oleaje. El régimen medio de la cota de inundación, con respecto al nivel medio del mar, indica que el valor de 99% (CI\_99%) de no excedencia está entre 2.75 y 3.10m; y el valor superado solamente 12 horas (CI\_12h) al año varía entre 3.0 y 3.4m. El régimen extremal de máximos anuales indica una cota de inundación variando entre 3.1 y 3.5m, para un período de retorno de 2 años (CI\_2a), y entre 3.3 y 3.7m, para un período de retorno de 10 años (CI\_10a).

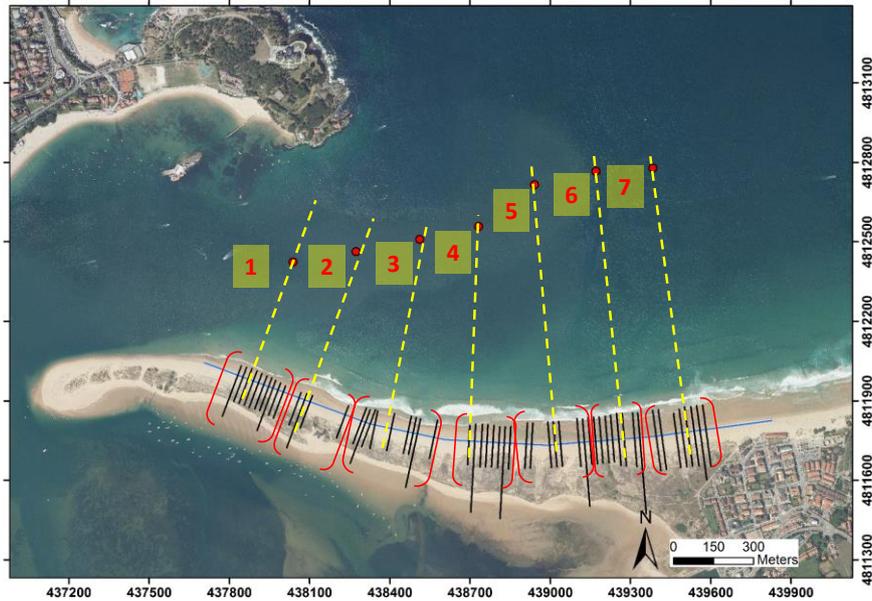


Figura III.6 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en la playa del Puntal de Somo.

Tabla III.1 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa del Puntal de Somo

POI	Hs <sub>50%</sub>	Tp <sub>50%</sub>	Hs <sub>12</sub>	Tp <sub>12</sub>	dFME (°)	FME (J/m/s)	CI <sub>99%</sub>	CI <sub>12h</sub>	CI <sub>2a</sub>	CI <sub>10a</sub>	Ω medio
1	0.40	9	1.81	13.92	47.75	1862.90	2.75	3.00	3.08	3.27	1.5
2	0.41	9	1.75	14.15	23.64	1716.28	2.74	2.99	3.08	3.27	1.4
3	0.65	9	2.63	14.05	6.55	4273.02	2.90	3.16	3.27	3.49	2.3
4	0.74	9	2.93	14.09	354.19	5363.56	2.96	3.23	3.34	3.57	2.6
5	0.82	9	3.66	14.06	350.23	7528.18	3.07	3.35	3.49	3.74	3.0
6	0.83	9	3.87	15.08	349.26	7737.82	3.10	3.40	3.52	3.79	3.1
7	0.95	11	4.01	14.13	352.22	9650.59	3.10	3.39	3.52	3.79	3.5

### 3.2. Las otras áreas de estudio

La descripción de la dinámica de cada una de las playas, de la misma manera que se ha hecho para la playa de Puntal de Somo, está en el Anexo II.

El resumen de los principales resultados de las dinámicas, y recordatorio de los parámetros morfométricos de los perfiles de playa seca/ duna primaria, se presenta en la Tabla III.2.

Tabla III.2 – Parámetros medios de la morfología y dinámica eólica y marina de las playas estudiadas

		Cantabria		Asturias	Galicia		
Playa		Puntal	Valdearenas	Bayas	Doniños	Baldaio	Traba
Parámetros Playa <sup>(i)</sup>	D50duna (mm)	0.27	0.31	0.3	0.42*	0.32*	0.30*
	D50playa (mm)	0.29	0.36	0.33	0.46**	0.35**	0.33**
	dLC (°)	14	321	327	284	335	323
	$\Delta\alpha V$ (°)	314-67	268-36	275-42	209-343	290-50	270-35
Parámetros perfil playa/duna <sup>(ii)</sup>	CotaPie (NMM)	3.67	4.08	4.33	3.92	3.82	3.87
	CotaCresta (NMM)	6.59	11.57	7.74	10.77	7.86	8.51
	Lplaya (m)	28.9	34.9	34.9	31.2	25.6	30.6
	Lduna (m)	19.2	42.3	27.2	34.6	24	30.5
	Hduna (m)	2.97	7.53	3.44	6.9	4.07	4.7
	Vduna (m <sup>3</sup> /m)	29.8	182.7	55.6	146.4	55.9	93.3
	PendMaxDuna (°)	14.31	22.89	12.23	21.88	15.18	17.4
	PendMedPlaya (°)	2.91	2.77	3.68	3.84	4.21	3.35
Parámetros Dinámica eólica <sup>(iii)</sup>	$u^*_{to}$ (m/s)	28.3	30.3	29.8	35.3	30.8	29.8
	$U_{t,3m}$ (m/s)	6.71	7.19	7.08	8.37	7.31	7.08
	VelM (m/s)	8.14	8.93	8.59	9.84	8.42	8.36
	Prop	1.3	3.9	2.2	2.2	4.5	2.8
	DP (m <sup>3</sup> /m/año)	1.95	8	3.93	5.78	7.32	4.37
	RDD (°)	341	295	301	244	24	341
	$\alpha$ (°)	35	31	36	46	55	42
	DP $\alpha$ (m <sup>3</sup> /m/año)	1.49	6.56	3.06	3.66	3.97	3.08
Parámetros Dinámica Costera <sup>(iv)</sup>	Hs50% (m)	0.7	1.4	1.7	1.8	1.4	1.8
	Tp50% (s)	9.3	11	10.3	11.2	10.4	11
	Hs12 (m)	2.9	5.7	5.8	7	5.2	6.2
	Tp12 (s)	14.2	14.8	14.3	15.4	15.1	15.9
	FME(J/m/s)	5447	34247	46877	57813	27024	47411
	CI_99% (NMM)	2.9	3.4	3.3	3.4	3.1	3.3
	CI_12h (NMM)	3.2	3.7	3.6	3.7	3.3	3.6
	CI_2a (NMM)	3.3	3.9	3.8	3.9	3.5	3.7
	CI_10a (NMM)	3.6	4.2	4	4.2	3.7	4
	$\Omega$ medio	2.5	3.7	4.7	3.2	3.3	4.6

(i) Parámetros de la playa: D50 = tamaño del sedimento; dLC = dirección media de la línea de costa (observador mirando hacia mar);  $\Delta\alpha V$  = rango de direcciones de viento provenientes del mar que actúan sobre las dunas primarias.

(Continúa en la próxima página)

(ii) Parámetros del perfil de la playa/duna: CotaPie = Cota de la intersección playa/duna (ref NNM); CotaCresta. (ref NMM) = cota donde se encuentra la coronación de la duna; Lplaya = anchura de la playa seca (desde pleamar viva media observada hasta el pie de la duna; Lduna = anchura de la duna primaria (distancia horizontal desde pie de la duna hasta su cresta); Hduna = altura de la duna (distancia vertical desde pie de la duna hasta su cresta); Vduna = volumen de la duna (área integrada abajo del perfil, desde el pie hasta la cresta de la duna); PendMaxDuna = pendiente máxima media de las dunas de cada playa (media entre los mayores valores de pendiente de cada perfil entre la cresta y el pie de la duna); PendMedPlaya = pendiente media de la playa (mejor ajuste lineal entre la cresta y el pie de la duna).

(iii) Parámetros del viento (obtenidos a partir de datos medidos en boyas *offshore*, con valores seleccionados y corregidos hacia tierra, considerando la dirección de línea de costa y tamaño del sedimento, particular para cada playa):  $u_{*10}$  = velocidad de corte para inicio del movimiento de los granos, considerando el D50 de las dunas (real o estimado);  $U_{t,3m}$  = velocidad de inicio de movimiento del sedimento, (valor extrapolado a vientos a altitud de 3m); Prop = Proporción de registro de vientos, con relación al total medido, que presenta velocidad superior a  $U_{t,3m}$  y está dentro del rango de viento que actúa sobre la playa ( $\Delta\alpha V$ ); VelM = velocidad media del viento capaz de transportar sedimento ( $>U_{t,3m}$ ) corregidos a tierra y en una altura de 3m; DP (*Drift Potential*) = volumen de transporte eólico potencial de sedimento al año; RDD (*Resultant Drift Direction*) = dirección resultante del transporte de sedimento;  $\alpha$  = ángulo medio (considerando todos los registros) de llegada del viento con relación a la normal a la línea de costa;  $DP\alpha$  = volumen de transporte eólico potencial por metro lineal de duna primaria (considera el ángulo de llegada del viento  $\alpha$  con relación a la línea de costa).

(iv) Parámetros de la dinámica marina costera (a 10m de profundidad, obtenido a partir de la propagación del oleaje): Hs50% = altura de ola significativa media; Tp50% = período de pico asociado a la Hs50%; Hs12 = altura de ola significativa superada solamente 12 horas al año; Tp12 = período de pico asociado a la Hs12; FME = flujo medio de energía del oleaje; CI\_99% = cota de inundación de no superación del 99% obtenida con el régimen medio; CI\_12h = cota de inundación superada solamente 12 horas al año calculada a partir del régimen medio; CI\_2a (ref NMM) = cota de inundación con período de retorno de 2 años, calculada con el régimen de máximos anuales; CI\_10a (ref NMM) = cota de inundación con período de retorno de 10 años, calculada con el régimen de máximo anuales;  $\Omega$  = parámetro adimensional de caída del grano medio (indicador del estado morfodinámico de la playa).

\* D50 de la duna estimada a partir de la granulometría de la zona intermareal, considerando, a través de la proporción de tamaño de otras playas, que  $D50_{duna} = 0.87 * D50_{playaInterm}$ .

\*\* D50 de la playa seca estimada a partir de la granulometría de la zona intermareal, considerando, a través de la proporción de tamaño de otras playas, que  $D50_{playa} = 0.95 * D50_{playaInterm}$ .

## 4. Resultados y discusión

Tras la caracterización de la dinámica eólica y marina de cada una de las playas estudiadas, a partir de los valores medios, se estudió la correlación de estos parámetros con las características morfométricas medias por playa de los 193 perfiles playa/duna primaria, con el objetivo de identificar la influencia de cada uno en la definición de características importantes de las dunas primarias, como tamaño y localización. Los resultados y la discusión, basada en conocimientos adquiridos en estudios previos, se muestran a continuación.

### 4.1. Consideraciones sobre la metodología de cálculo de la dinámica eólica

Partiendo del principio de que las dunas primarias son formaciones generadas primordialmente por el viento, la evaluación de la dinámica eólica es esencial, y esta deberá estar correlacionada con la morfología de las dunas.

Algunas premisas han sido consideradas al definir la selección de los datos utilizados en la evaluación de la dinámica eólica. La primera de ellas es que los datos considerados en los análisis son solamente los datos de viento soplando desde el mar hacia tierra (vientos *onshore*). A pesar de que algunos autores indican que los vientos provenientes de tierra hacia mar (vientos *offshore*) pueden influir en el transporte de sedimento sobre las dunas primarias (Sabatier et al. 2009; Bauer et al. 2012; Lynch et al. 2013), aparentemente los vientos *onshore* son los principales responsables de la formación y recuperación de las dunas primarias, su interacción con la playa y definición de una situación de equilibrio, tal como observado en diversos estudios (Arens et al. 1995; Arens 1996a; Tsoar 2001; Walker et al. 2006; Delgado-Fernandez & Davidson-Arnott 2011; de Vries et al. 2012). Esta misma consideración, con respecto a la selección solamente de los vientos *onshore* en la evaluación de la influencia de la dinámica eólica sobre las dunas primarias, fue realizada en otras investigaciones, por ejemplo las de Miot da Silva & Hesp (2010) y de Delgado-Fernandez (2011).

Una segunda premisa considera que los datos de viento medidos en boyas en mar abierto son equivalentes a los datos de vientos en las playas. Según el *Coastal Engineering Manual* (Hsu & Weggel 2002) lo ideal son medidas de viento directamente en la playa de estudio. Sin embargo, si estas medidas no están disponibles, recomienda que los datos de viento provenientes de boyas localizadas en mar abierto son más indicados para la evaluación del transporte eólico en playas que datos medidos en aeropuertos, estos últimos los más comúnmente disponibles. Ante la imposibilidad de medidas directas en las playas estudiadas se siguió esta recomendación por entender que los vientos registrados en los aeropuertos, principalmente los provenientes del mar, están fuertemente modificados por la orografía local y no representan la condición en la playa.

Por lo expuesto anteriormente se considera que la utilización de datos de viento medidos en las boyas, con dirección hacia tierra, seleccionados específicamente de acuerdo con la orografía circundante de cada playa, son representativos de la dinámica eólica que influye en la condición de equilibrio de las dunas primarias. Por lo tanto, estos datos fueron los utilizados en las correlaciones con los parámetros morfométricos del sistema playa/duna primaria.

Una limitación del uso de estos datos es que se obtiene un único valor de parámetro de viento por área de estudio. Posiblemente hay una variación en la capacidad eólica de transporte de sedimento a lo largo de la línea de costa en cada playa, ya sea por el efecto del fetch en función de cambios en la dirección y protección de los acantilados o por los efectos locales que el viento sufre (aceleración o disminución de su velocidad). Lo ideal sería tener medidas en la playa o un modelo de propagación del viento, pero en este estudio no fue posible un análisis tan detallado. En la práctica pocas, son las playas que tienen este tipo de dato y como el objetivo de esta tesis es presentar un modelo a largo plazo que pueda ser aplicado fácilmente, se consideró que la definición de un valor medio de velocidad de viento y de transporte de sedimento, obtenidos a partir de varios años de datos

(en este estudio de 9 a 16 años de datos, Figura III.1), es una buena aproximación si se evalúan los valores medios de los parámetros morfométricos de los perfiles de cada playa.

Una metodología ampliamente aplicada para evaluar el transporte potencial del viento es la de Fryberger & Dean (1979), que calcula el transporte eólico potencial (DP *drift potencial*) por sectores de dirección, con resultados en unidad de vector, y la dirección del transporte (RDD *resultant drift direction*) es calculada a partir de las DP de cada sector, con unidad de vector resultante de esta suma vectorial (RDP *resultant drift potential*). Esta metodología utiliza tablas de datos que contemplan el porcentaje de viento por sector y por clases de velocidad, normalmente la forma de datos disponibles en su momento por la *U.S. Air Force*. Cabe recordar que es una metodología desarrollada para ambientes desérticos, donde todas las direcciones de viento son importantes. En esta tesis se consideró más preciso utilizar los datos horarios para estimar el transporte eólico potencial anual de sedimento, con determinación de DP en  $m^3/m/año$  a través de las ecuaciones presentadas anteriormente, y RDD resultante de todos los datos horarios evaluados. Estas estimaciones son más interesantes cuando se pretende evaluar el potencial eólico en una playa y correlacionarlo con el tamaño de las dunas primarias, siempre y cuando existan datos horarios de varios años.

#### **4.2. Correlaciones entre los parámetros morfométricos y de la dinámica eólica**

A continuación, se presentan las relaciones entre los parámetros morfométricos de las dunas primarias y los indicadores de la dinámica eólica, en concreto, la velocidad media del viento, el transporte eólico potencial anual (DP en  $m^3/m/año$ ), el transporte potencial considerando el ángulo de llegada del viento ( $DP\alpha$  en  $m^3/m/año$ ) y el fetch efectivo.

##### Velocidad media del viento

Teniendo en cuenta que el transporte del sedimento depende directamente de la velocidad del viento a la 3ª potencia, según Bagnold (1941), se probó la relación entre los parámetros morfométricos medios indicadores del tamaño de la duna primaria y la velocidad media del viento (Figura III.7). La velocidad media del viento fue calculada con los registros capaces de transportar sedimento ( $U_{3m} > U_{t,3m}$ ), con valores a una altitud de 3m y corregidos de mar a tierra. Tal como se esperaba la relación es positiva, con coeficiente de correlación de  $R^2=0.52$  para el volumen de la duna primaria. La anchura de la duna parece menos influenciada por la velocidad de viento, pero la buena correlación con la altura (tanto absoluta como la cota de coronación) y con la pendiente máxima reafirma el modelo de Momiji & Bishop (2002) que prevé que cuanto mayores las velocidades del viento más altas y empinadas son las dunas.

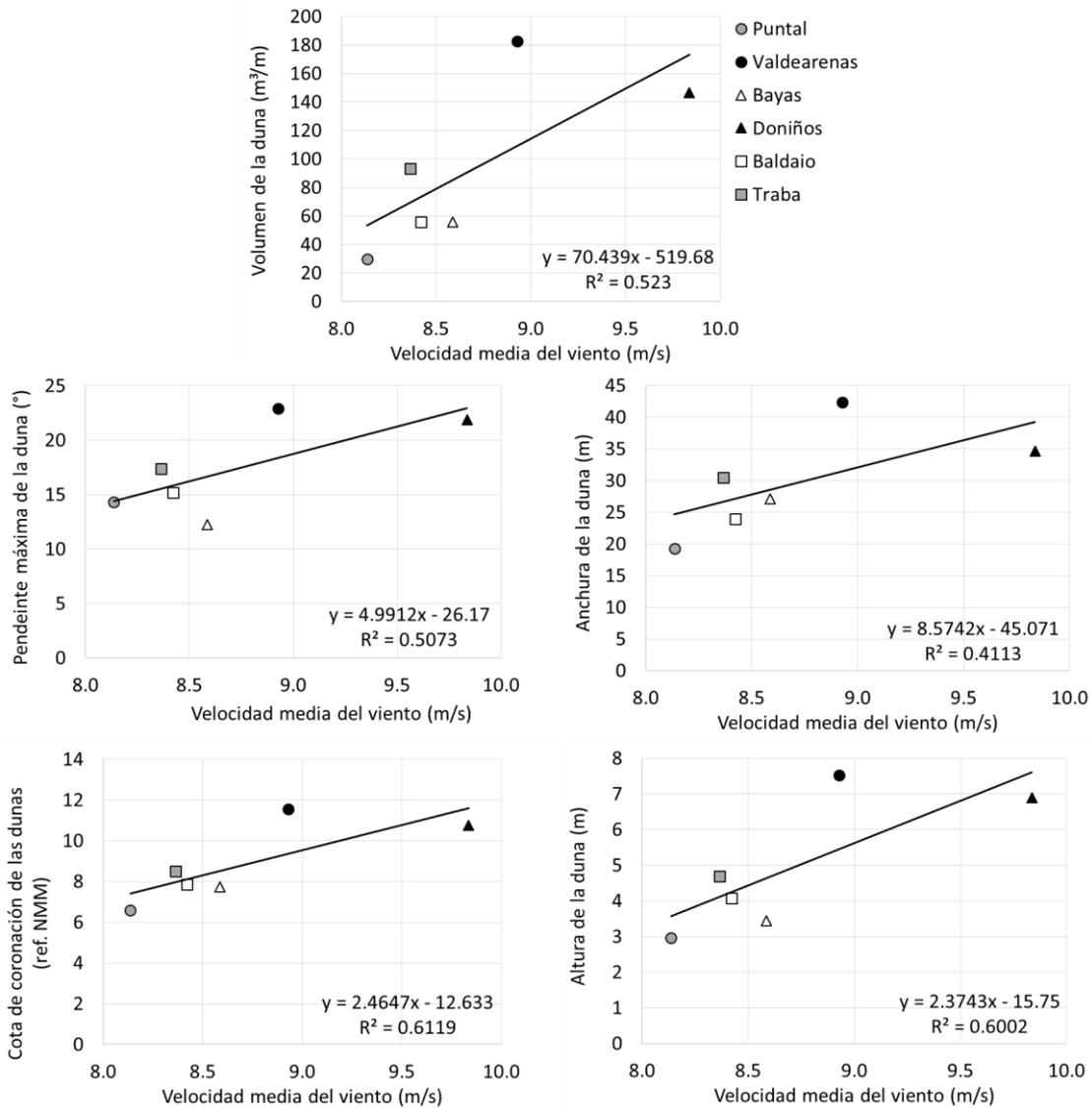


Figura III.7 – Relaciones entre la velocidad media del viento y los parámetros morfométricos medios indicadores del tamaño de las dunas primarias y la pendiente máxima.

Se puede concluir que la velocidad media del viento, capaz de transportar sedimento desde la playa hacia las dunas, está bien relacionado con el tamaño de las dunas primarias, sin embargo, no parece ser el mejor parámetro. Como será presentado a continuación, el transporte eólico potencial medio anual es un parámetro más indicado para correlacionar el tamaño de las dunas primarias con la dinámica eólica.

### Transporte eólico potencial (DP)

Existen varias ecuaciones propuestas que intentan estimar el transporte eólico, la gran mayoría de ellas desarrolladas para ambientes desérticos. La más conocida es la de Bagnold (1941). La ecuación utilizada en esta tesis (Hsu 1986) es una variación de la ecuación de Bagnold, que estima el transporte potencial de sedimento considerando solamente la velocidad del viento por encima de la de inicio del movimiento y las características del sedimento. Se aplicó la relación de DP anual con los parámetros

indicadores del tamaño de las dunas primarias (Figura III.8). Los resultados demuestran una buena correlación, sin embargo, el coeficiente de bondad del ajuste ( $R^2$  entre 0.46 y 0.51) no es muy distinto de lo encontrado para la velocidad media del viento.

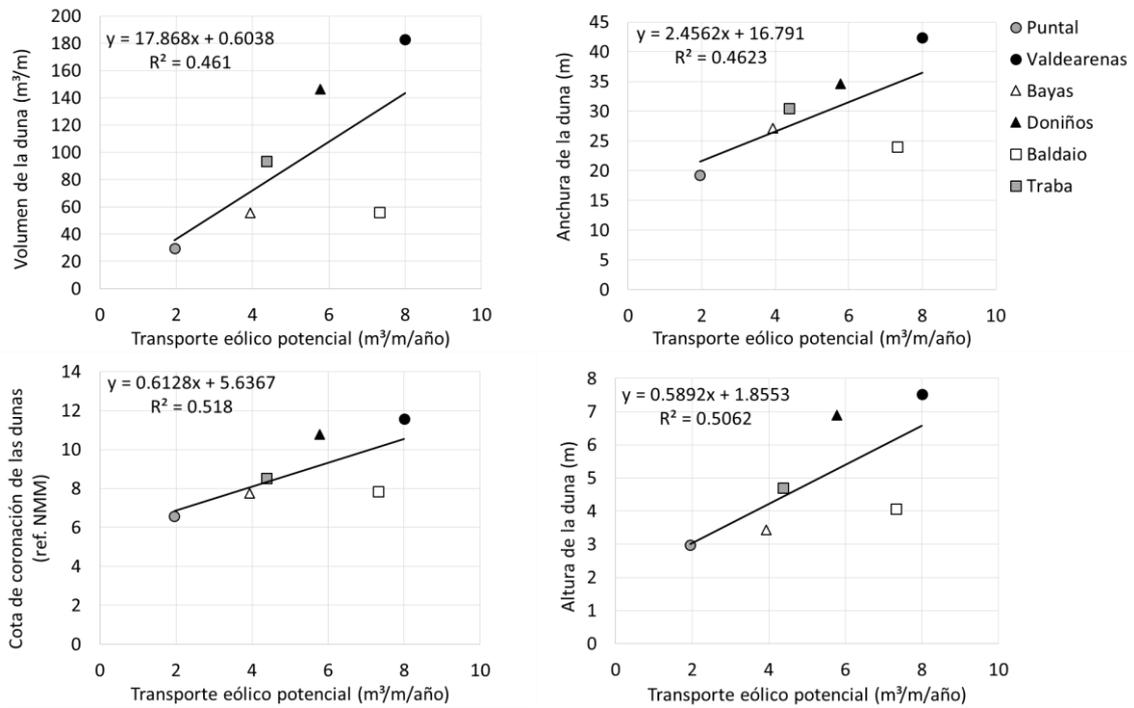


Figura III.8 – Relaciones entre el transporte eólico potencial (DP) y los parámetros morfométricos medios indicadores del tamaño de las dunas primarias

Miot da Silva & Hesp (2010) también encontraron una buena correlación ( $R^2=0.7$ ) entre el transporte eólico potencial medio, a partir de los valores por sector de viento (RDP), y el volumen de la duna. Estos autores calcularon el RDP aplicando la metodología de Fryberger & Dean (1979) solamente para vientos *onshore* con ángulo de  $\pm 75^\circ$  a la normal de la línea de costa, utilizando una base de datos de largo plazo (34 años). Evaluaron también la variación mensual por 1 año, aunque para los datos a corto/medio plazo hubo solamente concordancias de moderadas a pobres entre RDP y acumulación/erosión de las dunas. Los autores discuten que esto ocurre debido a que el cálculo de RDP no tiene en cuenta otros factores como el tipo de playa y su movilidad, niveles de humedad y lluvia, suministro y erosión de sedimento debido a la dinámica marina. Concluyeron que a pesar de la falta de una correlación fuerte entre el suministro potencial de sedimento, el suministro real de sedimento y la variación mensual del tamaño de dunas primarias, la formación y acreción neta de las dunas primarias a largo plazo y el registro de vientos de 34 años están muy relacionados: cuanto más fuerte es el viento *onshore* y mayor el RDP, mayor será la acumulación neta y/o el volumen de las dunas primarias.

Diversos estudios indican que, debido a la complejidad y variabilidad del transporte eólico en las playas, es difícil predecir su magnitud con ecuaciones que no contemplen otros factores como contenido de humedad, variación del tamaño del grano, detalles de la

topografía y cobertura vegetal (Davidson-Arnott & Law 1990; Bauer & Davidson-Arnott 2002; Davidson-Arnott et al. 2008; Muller et al. 2012; de Vries et al. 2012). De manera, general las tasas reales de transporte, medidas en campo, son mucho más bajas que las tasas predichas por las ecuaciones de transporte (Arens 1996b; Davidson-Arnott & Law 1996). En el estudio de Vries y colaboradores (de Vries et al. 2012), la variación anual del volumen de las dunas primarias progradantes no presentó correlación, en el tiempo y en el espacio, con el transporte potencial anual generado por el viento. Esta falta de correlación subraya la importancia de procesos de transporte limitantes. Concluyen que los modelos tradicionales de transporte eólico, desarrollados para dunas desérticas sobreestiman la importancia de las condiciones del viento a través de la playa hacia las dunas primarias. En el estudio realizado por Hall (2015) en la isla barrera de Masonboro (Carolina del Norte, EE.UU.), se midió la variación, a corto y largo plazo, de la morfología de las dunas primarias y el transporte de sedimento, a través de muestreo por trampas de sedimento por 1 año. Ninguna relación fue encontrada entre el transporte eólico de sedimento (medidas de relativamente corta duración) y la elevación de la duna, tanto a corto como a largo plazo. Davidson-Arnott & Law (1996), al evaluar el acúmulo de sedimento en las dunas de un lago de Canadá, tampoco encontraron relación con el transporte potencial, concluyendo que la anchura de la playa es más importante en este caso.

A pesar de las limitaciones citadas anteriormente, la mayoría de los estudios que indican que el transporte potencial no está relacionado con la acumulación y tamaño de las dunas consideran medidas de corto/medio plazo (de horas a meses). Sin embargo, los resultados de esta tesis indican que el transporte eólico potencial anual medio, calculado con una base en datos de varios años, muestra una correlación con el tamaño de las dunas primarias. Eso tiene sentido si se considera que los sistemas playa/dunas primarias evaluadas están en equilibrio y, por ser formaciones acumulativas, reflejan las condiciones medias de transporte eólico potencial a largo plazo (años), tanto debido a su contribución en el crecimiento de la duna como en la recuperación de estas tras eventos erosivos. Los resultados de Miot da Silva & Hesp (2010) reafirman esta cuestión, indicando que cuando se utiliza valores medios de varios años de vientos *onshore* existe una correlación positiva entre el potencial del viento y el volumen de la duna.

Otro factor a tener en cuenta en el cálculo del DP es la dirección relativa del viento. La influencia de la dirección del transporte con relación a la línea de costa es reconocida en diversos estudios. Se sabe que, sobre las dunas primarias y otros cordones arenosos, tal como dunas transversales, los vientos oblicuos tienden a sufrir deflación hacia la dirección normal de la cresta a medida que el flujo se aproxima y cruza la pendiente a barlovento, con importantes efectos sobre el transporte de sedimento de la playa hacia las dunas primarias (Svasek & Terwindt 1974; Arens et al. 1995; Walker et al. 2006; Lynch et al. 2008; Walker et al. 2009; Bauer et al. 2012; Hesp et al. 2015).

Hay una controversia en cuanto a la importancia de la dirección del viento, pues Nickling & Davidson-Arnott (1990) proponen que la cantidad de sedimento aportado por metro de línea de dunas primaria ( $DP\alpha$ ) será menor cuanto mayor el ángulo entre la

dirección del viento y la normal a la línea de costa ( $\alpha$ ). Sin embargo, Bauer et al. (2009) afirman que cuanto mayor el ángulo  $\alpha$  mayor será el fetch disponible para el transporte eólico (fetch efectivo) y, por lo tanto, las dunas recibirán más sedimento. Este efecto de fetch ocurre siempre y cuando la anchura de la playa sea menor que la anchura necesaria para que el transporte por saltación llegue a la saturación, conocido como fetch crítico (Fc) (Delgado-Fernandez 2010).

Para probar la importancia de la dirección del viento en el transporte eólico y su relación con las dunas primarias se hizo dos cálculos: transporte potencial considerando el ángulo  $DP\alpha$  y el fetch efectivo; y se correlacionó sus resultados con los parámetros morfométricos, presentado a continuación.

Transporte eólico potencial considerando la dirección del viento ( $DP\alpha$ )

Los resultados de la correlación entre  $DP\alpha$  y los parámetros morfométricos de las dunas primarias se muestran en la Figura III.9. Es interesante resaltar que la correlación entre el transporte potencial medio anual y el tamaño de las dunas primarias mejora significativamente si se considera la dirección del viento, indicado por la bondad de los ajustes ( $R^2$  entre 0.64 y 0.74), destacando la importancia en considerarla en la definición del tamaño de las dunas primarias en equilibrio.

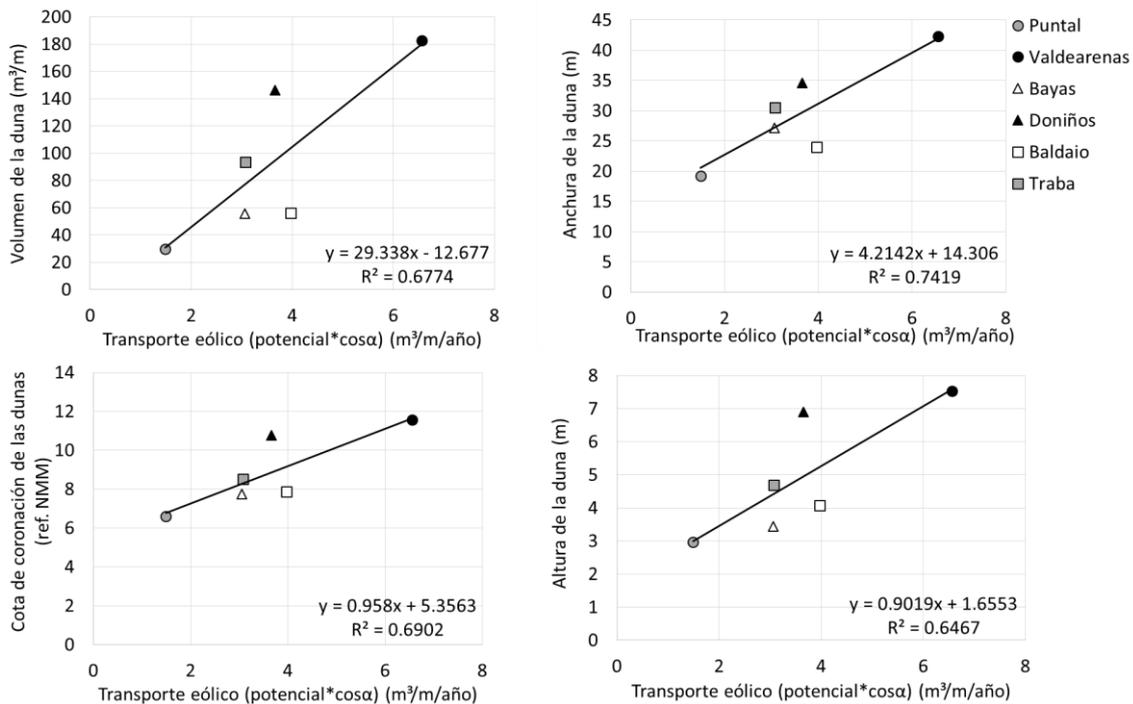


Figura III.9 – Relaciones entre el transporte eólico potencial\*cos $\alpha$  ( $DP\alpha$ ) y los parámetros medios de tamaño de la duna primaria

En esta tesis, siguiendo la sugerencia de Arens (1996b), fueron descartados los vientos paralelos a las dunas en la contabilización del transporte eólico potencial (DP) y  $DP\alpha$ , que comprenden aquellos que llegan con un ángulo entre 0 y 15° con relación a la línea de costa (equivalente a entre  $\pm 75$  y 90° con relación a la normal a la línea de costa). A

pesar de esta selección, hay indicios de que vientos oblicuos, con ángulo entre 15 y 30° con relación a la orientación de la línea de costa, pueden ser desviados a una dirección paralela a la duna, resultando en una menor acumulación a barlovento (Hesp 2002). Por lo tanto, se probó el cálculo de DP utilizando solamente los datos de vientos provenientes entre -60 y +60 grados con relación a la normal a la línea de costa. Los resultados fueron muy semejantes a los del cálculo de  $DP\alpha$  (datos no enseñados). Eso quiere decir que los vientos más importantes en la definición del tamaño de equilibrio de las dunas primarias son los aproximadamente perpendiculares a la línea de costa. La metodología de cálculo de  $DP\alpha$  incluye esta importancia relativa dependiente de la dirección del viento, sin necesidad de eliminación de estos datos.

Miot da Silva et al. (2012) apuntala que la variación de la orientación de la línea de costa, en una misma playa al sur de Brasil (Moçambique), es uno de los principales factores que definen el potencial del transporte eólico. Haciendo un paralelo con la presente tesis, la variación de la cantidad de energía eólica recibida y el  $DP\alpha$  (y probablemente el aporte sedimentario real) varían entre las playas de cada región estudiada debido a su orientación y a la protección de los acantilados, pues las características de vientos y olas son muy semejantes en la zona exterior (considerando cada región). Como consecuencia las áreas de estudio presentan una variación en el tamaño medio de las dunas primarias.

A partir de los resultados obtenidos en esta tesis, se puede concluir que el cálculo del transporte eólico potencial tiene su estimación mejorada si se considera la dirección del viento con relación a la línea de costa y, por lo tanto, el  $DP\alpha$  es el mejor parámetro a ser positivamente correlacionado con el tamaño de las dunas primarias.

#### Fetch efectivo

Los cálculos de transporte eólico potencial, presentados anteriormente, asumen que este está totalmente desarrollado en la playa evaluada, o sea, que la anchura de la playa es mayor que la anchura del fetch crítico ( $F_c$ ).

La magnitud del  $F_c$  en el corto plazo (escala de procesos) ha demostrado ser muy variable y dependiente de: la velocidad del viento (Davidson-Arnott & Law 1990), el contenido de humedad superficial (Davidson-Arnott et al. 2005) y la presencia de *lag deposits* (depósitos residuales) (van der Wal 1998). Lynch et al. (2008) señala que, bajo ciertas condiciones, cualquiera de las variables que controlan el transporte de sedimento pueden afectar el fetch crítico, influyendo en la distancia requerida para que la tasa de transporte alcance un valor máximo. En medidas realizadas en playas, los valores de  $F_c$  variaron entre 10 y 40m (Davidson-Arnott & Law 1990), pero hay evidencias de  $F_c$  más largos, específicamente debido al contenido de humedad u otros factores limitantes, con valores de  $F_c$  de 80-200m (Davidson-Arnott et al. 2008) o de 50-150m (Bauer et al. 2009).

Sabatier et al. (2009) proponen un modelo conceptual del fetch para playas con barras, integrando los efectos de mareas vivas y variabilidad de la morfología de barra-

canal en el tiempo. Estos autores hablan de la compartimentación del fetch debido a la diferencia transversal de la cantidad de humedad en el perfil. Realzan la dificultad de evaluar de manera global el efecto de fetch y la capacidad real de estimar el transporte a corto plazo. Bauer et al. (2009) también resaltan esta complejidad, basado en los resultados encontrados en su investigación: a través de medidas de campo de transporte eólico de sedimento, y de posibles parámetros que influyan en este (temperatura, humedad, velocidad), verificaron que las mayores tasas de transporte ocurrieron en la mitad de la anchura de la playa y luego disminuyeron, sin influencia aparente de los parámetros que promueven esta disminución. Eso contradice la expectativa de que la tasa de transporte aumenta a lo largo del fetch hasta que alcanza un máximo.

Debido a que los experimentos de campo sobre fetch de viento en playas son escasos, actualmente no hay suficiente evidencia de su potencial importancia en el transporte eólico de sedimento hacia las dunas costeras como para garantizar su incorporación en modelos de largo plazo (Delgado-Fernandez 2010). Algunos modelos proponen su uso, como el de Bauer & Davidson-Arnott (2002), que consideraron la geometría de la playa y los efectos del fetch, proporcionando una base para el modelado del suministro de sedimento para las dunas costeras. Otro ejemplo es el modelo matemático de Hanson et al. (2010), que propone una estima de la anchura de playa seca en equilibrio basado en la acumulación causada por el transporte eólico, con relación al  $F_c$ , y erosión causado por el impacto de las olas. Sin embargo, la aplicación de estos modelos es difícil por dos factores críticos hasta ahora no resueltos: (1) un método para determinar el  $F_c$  y (2) la determinación de una relación funcional que describa un aumento en el transporte del sedimento con la distancia, cuando el  $fetch < F_c$  (Davidson-Arnott et al. 2008; Delgado-Fernandez 2010).

A partir del hecho de que no hay medidas de fetch crítico en las playas estudiadas, ni tampoco modelos que propongan una solución para su estimación, no se sabe a ciencia cierta hasta qué punto las playas presentan anchura limitante o no para el aporte eólico potencial de sedimento hacia las dunas primarias. En el Capítulo II se comprobó que no existe una fuerte correlación entre la anchura de la playa y el tamaño de la duna primaria. Debido a que la anchura de una playa es finita, la dirección del viento es un factor importante a la hora de definir el fetch para el transporte eólico. Con vientos paralelos a la longitud de la playa el fetch y la fuente son virtualmente infinitos (pero el sedimento no se aporta a la duna primaria), mientras que vientos perpendiculares *onshore* presentan el menor fetch y fuente de sedimento (Arens 1996b). Cuando la anchura de la playa es menor que la del fetch crítico, los vientos oblicuos actúan sobre un fetch mayor que los vientos perpendiculares y, teóricamente, la longitud de este fetch estará relacionada al tamaño de la duna primaria (Bauer et al. 2009).

Por lo tanto, en esta tesis se calculó el fetch efectivo (definido en la Figura III.2), para probar si la incorporación de la dirección del viento es importante en la definición del fetch para el transporte eólico, y su relación con las dunas primarias. La relación del fetch efectivo con los parámetros indicadores del tamaño de la duna se muestra en la Figura

III.10, donde se puede observar que no hay una relación clara. La evaluación de cada playa separadamente también fue realizada y tampoco se verifica una relación directa, con algunas playas presentando relación inversa. Estos resultados fueron muy semejantes a los obtenidos con la anchura de playa (ver Figura II.23 del Capítulo II).

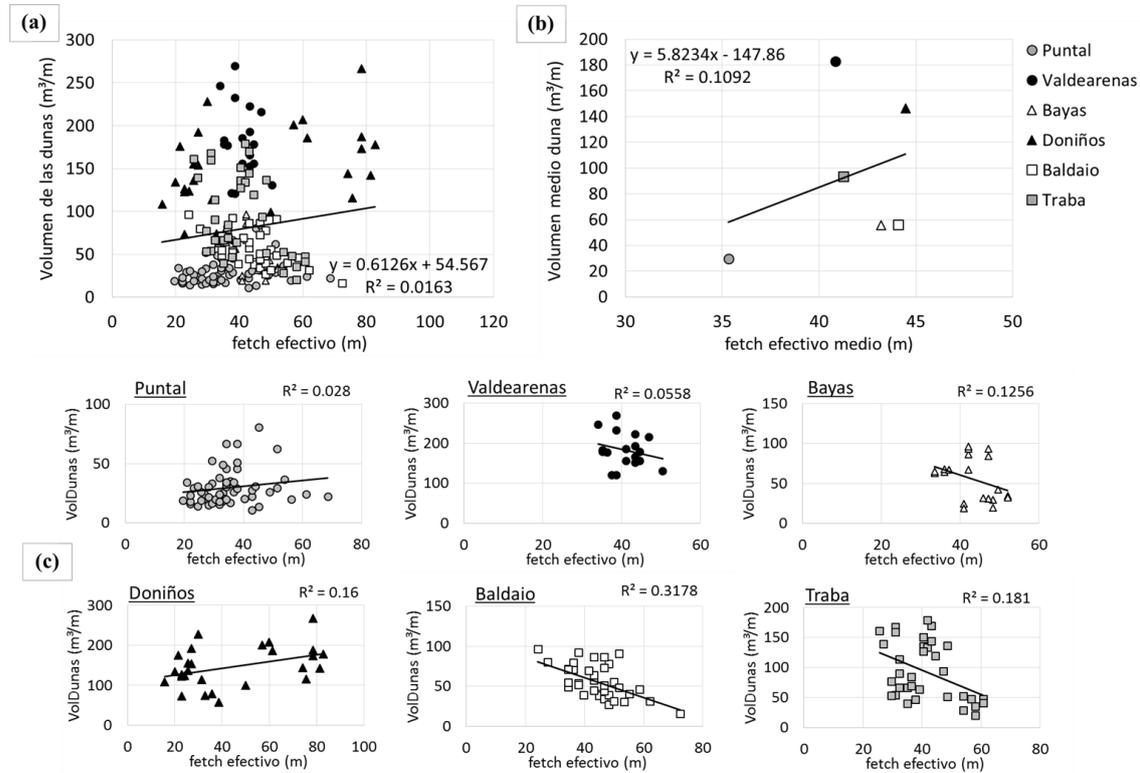


Figura III.10 – Relación entre el fetch efectivo y el volumen de la duna (VolDuna): (a) para todos los perfiles evaluados; (b) para los valores medios de cada playa; (c) para los perfiles de cada playa.

Otros trabajos tampoco encontraron relación entre el fetch y el tamaño de las dunas primarias, además de enseñar la complejidad de su influencia sobre el transporte de sedimento. Jackson & Cooper (1999) evaluaron, a través de un experimento en una amplia playa de Irlanda, el papel del fetch en el transporte de sedimento y verificaron que la distancia del fetch no es importante para la cuantificación del transporte eólico en playas con adecuado suministro de sedimento seco. Resultado similar fue encontrado por Lynch et al. (2008).

Merece la pena recordar que la morfología del tramo de playa seca presenta gran variabilidad, mucho mayor que lo de las dunas primarias. En el trabajo de Díez et al. (2017a) se propone un modelo con variación estacional e interanual en la forma de la playa seca. Estos autores afirman que la playa seca puede cambiar muy rápidamente tras un evento extremo, pero el retorno a la forma característica de buen tiempo es bastante más lenta. Hay que tener en cuenta que los datos utilizados en esta tesis fueron obtenidos en solamente 1 día de vuelo LiDAR, siendo una instantánea de la condición de los perfiles. Para las dunas primarias esto no parece ser un problema, debido a su carácter estable. No obstante, la anchura de playa seca puede no representar su condición media, más frecuente o relacionada a la condición de equilibrio de la duna. Díez et al. (2017b) proponen una

ecuación de perfil de equilibrio de la playa seca, lo que podría ser útil para estimar la anchura mínima necesaria para obtener una duna en equilibrio. Sin embargo esta ecuación no tiene un criterio definido que elija hasta qué cota se puede considerar que llega la playa seca, para definir así la cota del pie de la duna y calcular la anchura activa de la playa seca. Una vez definida de qué depende la cota de inicio de las dunas y bajo qué condiciones se encuentra esta situación, se podría aplicar la ecuación propuesta por Díez et al. (2017b) para verificar la anchura de playa seca mínima que está relacionada a la morfología de la duna primaria en equilibrio. Este análisis se lleva a cabo más adelante, en el apartado 4.4.

Algunos autores sugieren que la zona intermareal debe ser considerada en el fetch, como fuente de sedimento para el transporte eólico (p.ej. Houser 2009). Desafortunadamente, en esta tesis, no fue posible este análisis debido a una limitación de la base de datos utilizada, más fiable para cotas por encima de la pleamar. Además, debido a la constante humedad de la zona intermareal, se supone que, a largo plazo, no contribuirá substancialmente en el tamaño de equilibrio de las dunas primarias.

A pesar de la complejidad en estimar y evaluar la influencia del fetch en el transporte eólico, la falta de correlación entre el fetch efectivo y el tamaño de las dunas primarias muestra que, probablemente, las playas evaluadas presenten fetch disponible mayor que el fetch crítico, o que, en una escala de trabajo a largo plazo, la anchura de la playa tiene poca importancia en la configuración de equilibrio de las dunas primarias.

Se puede concluir que el transporte eólico potencial y su dirección son más importantes en la definición del tamaño de las dunas primarias, una vez que estas encuentren su posición de equilibrio a lo largo del *backshore*, siempre y cuando sean utilizadas estimaciones medias hechas a partir de medidas de viento de varios años.

En esta tesis se consideró que el sistema playa/dunas primarias está en equilibrio, o sea, no habrá pérdida de sedimento. La idea es que el transporte eólico causará un crecimiento de la duna, tanto en altura como en volumen hacia el mar, hasta un punto donde la dinámica marina impedirá este avance a través de erosiones puntuales causadas por eventos extremos. La recuperación de la duna tras estos eventos también dependerá de la actuación del transporte eólico, además de la recuperación de la propia playa. En los apartados siguientes se evaluará la influencia de la dinámica marina en las características de las dunas primarias.

#### **4.3. Correlaciones entre los parámetros morfométricos y de la dinámica marina**

Las dunas primarias, objeto de estudio de la presente tesis, son conceptualmente influenciadas por la dinámica de la playa. Diversos trabajos comprobaron esta interrelación entre la dinámica costera, la dinámica de playa y la dinámica de las dunas primarias. Normalmente las investigaciones que evalúan la influencia de la dinámica marina se centran en determinar su potencial erosivo en condiciones de eventos extremos y/o subida del nivel del mar y la vulnerabilidad de las dunas frente a este proceso destructivo (p. ej.

Sallenger 2000; Davidson-Arnott 2005; Stockdon et al. 2007; Ruz et al. 2009; Houser 2013; Long et al. 2014). Sin embargo, algunos estudios relacionan la dinámica modal de la playa con la condición de equilibrio de las dunas primarias (Short & Hesp 1982; Sherman & Bauer 1993). Considerando que el transporte eólico es la principal fuerza constructiva de las dunas primarias, evaluada en el apartado anterior, y que la dinámica marina determinará las características de la playa, además de ser la principal fuerza erosiva o limitante de su avance, a continuación se verificará su influencia sobre la morfometría de las dunas primarias.

Por lo tanto, se hizo la correlación de los parámetros indicadores de la dinámica marina (altura de ola, estado morfodinámico, flujo medio de energía y cota de inundación), calculados en los puntos cerca de la línea de costa (puntos POI a 10m de profundidad), con los parámetros medios de los perfiles, asociados a cada punto POI, indicadores del tamaño de la duna primaria (p. ej. volumen y altura) y de la localización de la duna (cota del pie).

#### *Altura de ola*

Duran & Moore (2013) sugieren una correlación lineal entre la altura de las olas y la altura de las dunas costeras (ver Figura 5 del artículo de Duran & Moore 2013), apoyada cuantitativamente por los datos de campo (Hesp 1988; Ruggiero et al. 2005; Miot da Silva et al. 2008). Duran & Moore (2013) proponen un modelo matemático de desarrollo de las dunas primarias que considera que cuanto mayor es la distancia entre la línea de costa y el límite de la vegetación (Lveg, o sea, la anchura de playa) mayor será el tamaño de la duna primaria, y que este Lveg está directamente relacionado con la altura media de las olas.

Siguiendo la observación de Duran & Moore (2013), en esta tesis se probó la relación entre la altura de ola en la playa (estimada a 10m de profundidad; Hs50% = condición media y Hs12 = condición extremal) y los parámetros indicadores del tamaño de la duna primaria (Figura III.11 y Figura III.12, respectivamente). Se puede observar una correlación directa, mejor con Hs12 ( $R^2$  entre 0.43 y 0.56).

Se puede concluir con este análisis que la altura de ola puede ser un buen indicador de la influencia de la dinámica marina sobre las playas y dunas primarias, sin embargo, otros parámetros que incluyan importantes aspectos de la playa, como tamaño del sedimento, pendiente de la playa y/o período del oleaje, pueden presentar correlaciones mejores y con mayor base teórica. Basado en resultados de estudios previos se evaluaron también los parámetros: parámetro adimensional de caída de grano, flujo medio de energía y cota de inundación; los cuales se presentan a continuación.

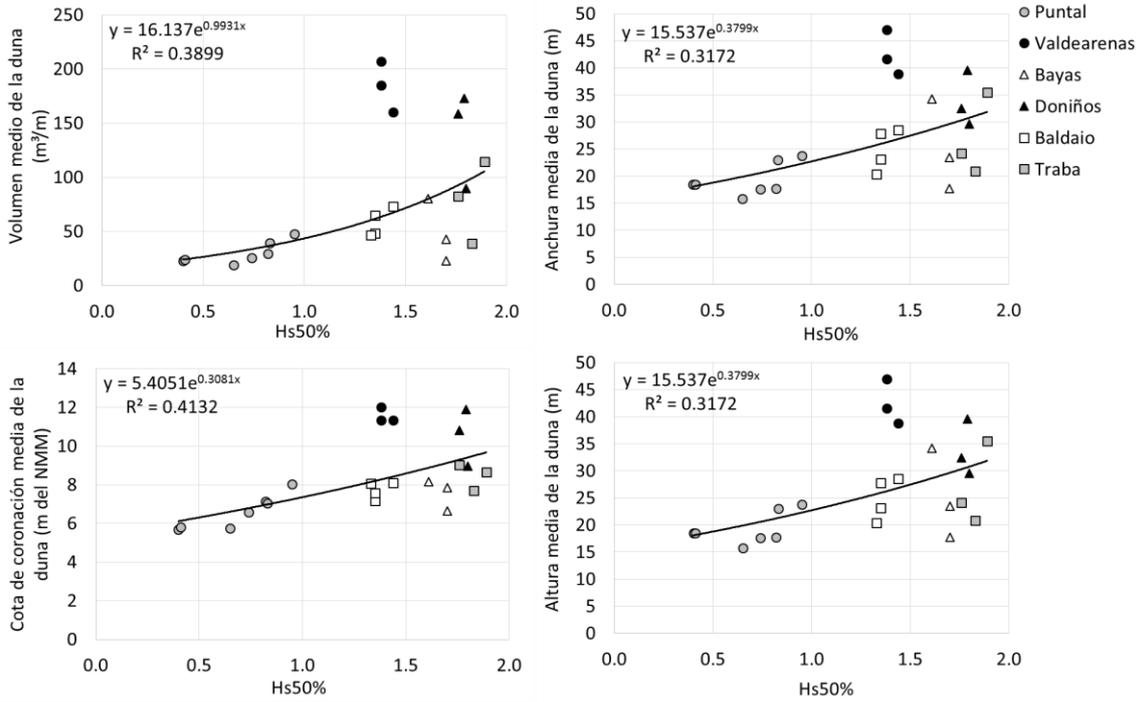


Figura III.11 – Relaciones entre los valores de altura de ola significativa media (Hs50%) de los puntos POI y los parámetros medios indicadores del tamaño de las dunas primarias de los perfiles asociados.

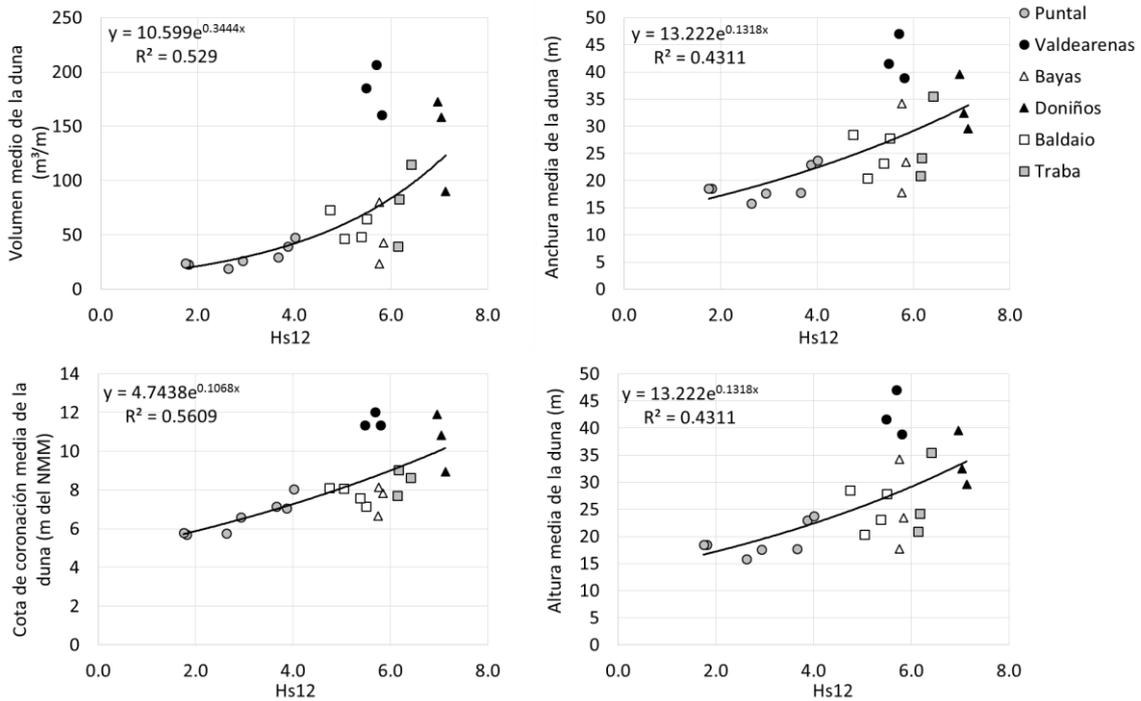


Figura III.12 – Relaciones entre los valores de altura de ola significativa asociada a eventos extremos (Hs12) de los puntos POI y los parámetros medios indicadores del tamaño de las dunas primarias de los perfiles asociados.

### Estado morfodinámico de la playa

Tal como fue señalado por Sherman & Bauer (1993), el estado morfodinámico de la playa tendrá implicaciones en el intercambio de sedimento entre playa-duna debido a su influencia en los procesos eólicos a través de 3 controles primarios: pendiente de la playa, distribución de tamaño de grano y anchura de la playa. Uno de los modelos más conocidos que relacionan las características morfológicas de las dunas primarias con la dinámica de la playa es el de Short & Hesp (1982). Este modelo predice que playas disipativas, más amplias, con sedimento más fino, menor pendiente y menor variabilidad topográfica (sin presencia de cresta de berma), tienen el potencial de desarrollar dunas mayores, debido a una mayor eficacia en el transporte de sedimento. Las playas más reflejantes, menos anchas, de sedimento más grueso, con mayor pendiente y que característicamente presentan una berma que causa división en el flujo de viento, tendrán dunas más pequeñas debido al menor potencial de transporte del viento.

Para probar este modelo se calculó el parámetro adimensional de caída del grano ( $\Omega$ ), indicador del estado morfodinámico, según metodología de Wright & Short (1984). Se utilizó los 60 años de datos, con resolución horaria, de alturas de ola significativa y período de pico en la playa, además de datos del tamaño del sedimento obtenidos de la bibliografía o estimados (datos presentados en la Tabla III.2) para la obtención de los valores medios de  $\Omega$  para cada punto POI. Considerando que las playas estudiadas presentan valores de marea importantes, se calculó la variación relativa de marea (*relative tide range*- RTR, Masselink & Short 1993). Los valores encontrados se localizan dentro de la clase entre  $3 < RTR < 7$ . Debido a que las playas pertenecen a una misma clase de RTR, a efectos de clasificación y correlaciones fue utilizado solamente los valores de  $\Omega$ .

Se puede observar (Figura III.13) que casi todos los perfiles son clasificados morfodinámicamente como intermedios, excepto el conjunto de perfiles localizados más al oeste de la playa del Puntal de Somo, que se aproximan a la condición reflejante. Aunque hay una relación creciente del valor del  $\Omega$  con los parámetros indicadores de tamaño de la duna, no se nota una correlación lineal clara, lo cual no confirma la teoría de Short & Hesp (1982).

Otros trabajos también verificaron que el modelo de Short & Hesp (1982) no se ajusta bien en todas las playas. En el trabajo de Davidson-Arnott & Law (1996) se comparó el transporte de sedimento en dos playas localizadas en un lago en Canadá, una con características más reflejantes (presencia de berma y mayor pendiente) y otra más disipativa (rectilínea y menos pendiente). Era esperado que, por el modelo de Short & Hesp (1982), la playa disipativa presentaría un mayor transporte, pero lo que observaron fue lo contrario. Concluyeron que la anchura de la playa pesa más que la forma del perfil en el transporte de sedimento. Miot da Silva (2011) verificó, en una extensa playa del sur de Brasil con variaciones de estados morfodinámicos, que en el tramo disipativo, con sedimento fino y relativamente ancho, las dunas primarias eran menores que las encontradas en los tramos morfodinámicamente intermedios. Esta autora explicó que en el

tramo de playa disipativo hay poca energía de oleaje y de viento para el transporte de sedimento hacia las dunas, además del hecho de que la parte intermareal está comúnmente mojada, limitando el transporte de arena, lo que justificaría el tamaño pequeño de las dunas primarias.

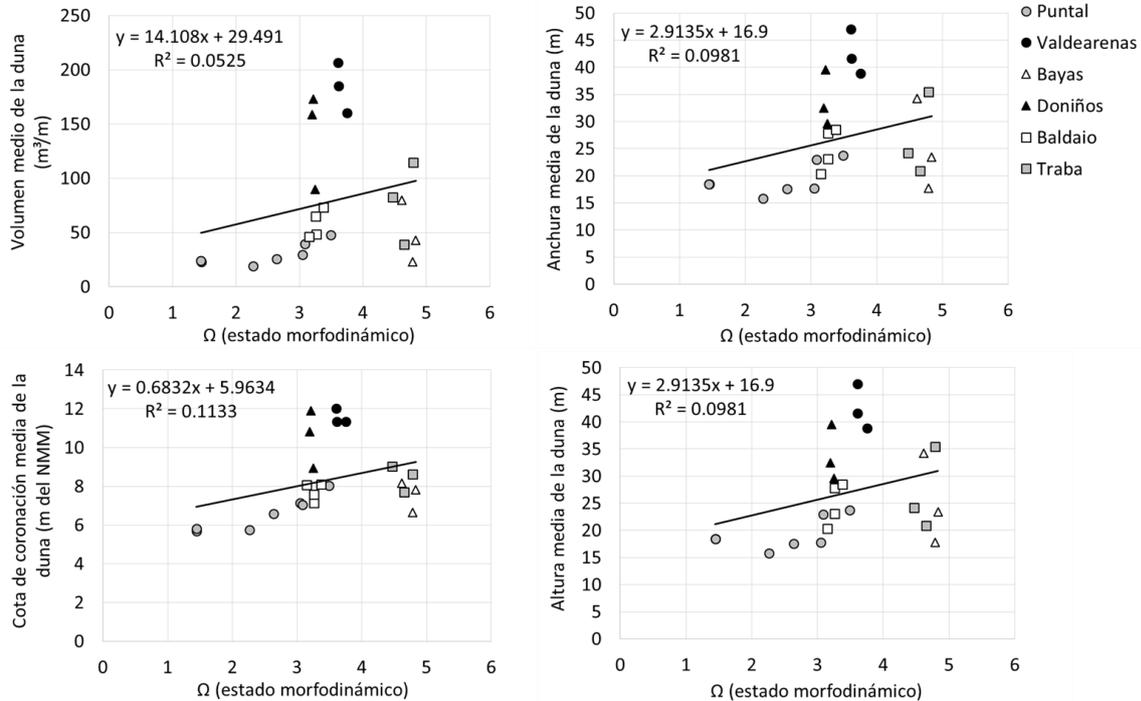


Figura III.13 – Relaciones entre  $\Omega$  de los puntos POI y los parámetros indicadores del tamaño de las dunas primarias de los perfiles asociados.

El modelo de Short & Hesp (1982), que se basa en la correlación entre el transporte potencial, el suministro de sedimento y el tamaño de las dunas primarias, dependiendo del estado morfofodinámico, está respaldado por el trabajo de Houser & Hamilton (2009) que examinaron playas entre reflejantes e intermedias. Sin embargo, Houser & Mathew (2011), quienes evaluaron playas de intermedias a disipativas, están en desacuerdo con dicho modelo, los cuales se explica a continuación.

Houser & Hamilton (2009) estudiaron las playas a lo largo de la Isla Santa Rosa (Florida, EE.UU.), con estados morfofodinámicos de intermedias a reflejantes, y verificaron que el cambio de sedimento entre la playa y la duna está limitado en áreas erosivas y relativamente reflejantes debido a la mayor pendiente y menor anchura de la berma (playa seca). Las playas más anchas y sin berma, intermedias, fueron más favorables al transporte de sedimento desde la playa hacia las dunas. Este estudio sugiere que en playas intermedias y reflejantes el desarrollo de las dunas es controlado por una variación a lo largo de la costa de la anchura y pendiente del litoral (*foreshore*).

Sin embargo, en estudio de Houser & Mathew (2011), con playas de intermedias a disipativas de South Padre Island (Texas, EE.UU.), se encontró que los perfiles de playa con pendiente más suave, o sea, más disipativos, sufrieron mayor inundación, con disminución del fetch con arena seca para el transporte eólico. Además, estas sufrieron

mayor ocurrencia de ataque de olas a las dunas en eventos extremos, con la consecuente disminución de su tamaño. Verificaron que las dunas más grandes estaban localizadas detrás de los perfiles de playa más inclinados y cortos, con estatus morfodinámico entre intermedios y disipativos. Los autores explican que esto ocurre debido a la presencia de barras intermareales en playas intermedias, que pueden generar mayor fetch cada cierto período de tiempo, y debido a una mayor elevación del pie de la duna, que hace que la playa seca superior presente menor humedad causada por la inundación marina.

Houser & Mathew (2011) sugieren que la disponibilidad de sedimento transportable, desde la zona de surf y playa seca, parece ser el principal factor que restringe el suministro de sedimento a las dunas, en playas de intermedias a disipativas. Esto contrasta con lo que ocurre con las dunas en playas de intermedias a reflejantes, como en el norte de Florida (Houser & Hamilton 2009), que están limitadas por el transporte potencial y no por la disponibilidad de sedimento. En cuanto a las playas intermedias, estas tienen tanto el transporte como el suministro de sedimento relativamente satisfactorios.

Según lo expuesto anteriormente, y a partir de las observaciones obtenidas en esta tesis, se puede suponer que, muchas veces, las playas intermedias son las que presentan las dunas primarias más grandes y estables. Si se evalúa nuevamente la relación entre el volumen medio de las dunas y el  $\Omega$  de cada punto POI, presentada anteriormente en la Figura III.13, además de esta misma relación para los valores medios por playa (Figura III.14), se puede observar que hay fuertes evidencias de que las dunas evaluadas parecen estar positivamente relacionadas al  $\Omega$  hasta un máximo ( $\Omega \approx 4$ ). Tras este valor, empiezan a estar inversamente correlacionados. Se hizo un ajuste de esta correlación a una función Gaussiana, con buen valor de bondad ( $R^2$  entre 0.51 y 0.65). Haría falta más datos para confirmar esta suposición, principalmente la utilización de una cantidad mayor de playas con dunas en equilibrio y con amplia variación de estados morfodinámicos. Sin embargo, este análisis corrobora los resultados de Houser & Hamilton (2009) y de Houser & Mathew (2011).

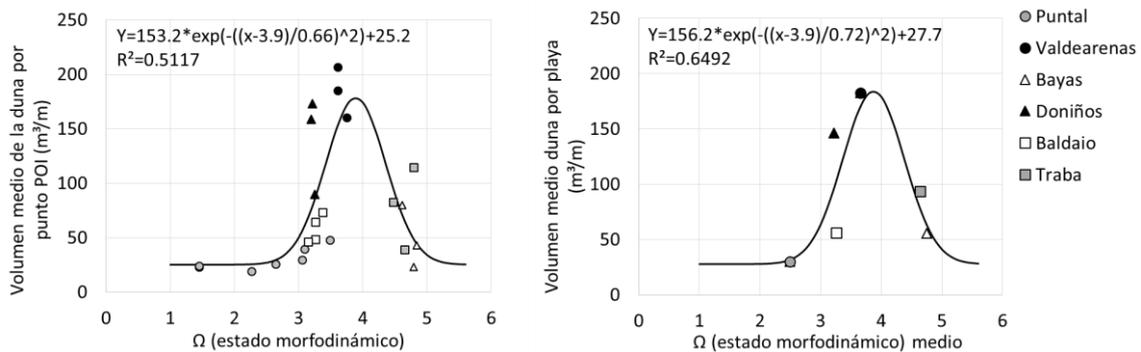


Figura III.14 – Relaciones entre  $\Omega$  y los parámetros indicadores del tamaño de la duna, con ajuste a una función Gaussiana para los valores de volumen medio de los perfiles asociados a cada punto POI y su respectivo  $\Omega$  (izquierda) y para los valores medios por playa (derecha).

Scott et al. (2011) verificaron que el parámetro  $\Omega$  aparentemente no tiene mucho éxito en la separación de las diferentes morfologías de barras presentes en los estados

morfodinámicos intermedios. Los resultados encontrados en esta tesis pueden presentar el mismo problema para las playas intermedias que característicamente presentan barras. Los autores compararon sus resultados con el flujo de energía del oleaje y verificaron que este parámetro fue un buen indicador de la separación de las playas intermedias de alta energía (con barras) y baja energía (sin barras).

Por lo tanto, partiendo del principio de que las playas estudiadas en esta tesis son intermedias y siguiendo la orientación de Scott et al. (2011), se probó la correlación entre los valores del Flujo Medio de Energía y las características morfométricas de las dunas primarias.

#### *Flujo medio de energía de las olas (FME)*

Partiendo del principio de que la clasificación del estado morfodinámico considera que playas con más energía tienen características más disipativas y playas con menos energía tienen características más reflejantes (Wright et al. 1979; Wright & Short 1984; Masselink & Short 1993), y que la diferenciación de las playas intermedias a través del parámetro  $\Omega$  no siempre presenta buenos resultados, como fue verificado por Scott et al. (2011), se considera como hipótesis que los valores del flujo medio de energía de las olas (FME) son buenos indicadores del estado morfodinámico de la playa y/o de su comportamiento.

La relación entre los valores encontrados del FME en puntos POI en la playa (10m de profundidad) y los parámetros indicadores del tamaño de la duna (Figura III.15) sugiere una relación positiva, con mejor ajuste exponencial y  $R^2$  entre 0.33 y 0.41. Por lo tanto, hay una tendencia de que playas con más energía, y teóricamente con presencia de barras, presenten mayor volumen de dunas que playas con menos energía, o sea, intermedias sin la presencia de barras. Scott et al. (2011) sugiere el umbral de 3000J/m.s en esta separación. Son necesarios más datos para evaluar la presencia de barras y su influencia en el tamaño de las dunas primarias, pero este análisis da indicios de que, para playas morfodinámicamente intermedias, el FME es un buen indicador de la influencia de la morfodinámica de la playa y su relación con el tamaño de las dunas primarias.

Short & Hesp (1982) argumentan que zonas de surf disipativas, es decir, de alta energía, tienen el mayor potencial de transporte hacia tierra, conducido por olas, mientras que playas reflejantes tiene el más bajo. El desplazamiento de las barras debido a un aumento en la condición energética del ambiente todavía es controvertido: Aagaard et al. (2004) verificó un avance de las barras hacia tierra con el aumento de la energía de las olas, al evaluar la migración de las barras en un puntal (Skallingen) con pendiente suave en la costa danesa del Mar del Norte. Contrariamente, los resultados encontrados en otros sitios indican que la migración de las barras ocurre en dirección hacia mar adentro cuando hay aumento de la condición energética (Wijnberg & Terwindt 1995; Shand & Bailey 1999).

de Vries et al. (2012), tras no encontrar relación entre el aumento del volumen de las dunas primarias y el transporte de viento, propone la hipótesis de que la cantidad de sedimento transportado eólicamente será influenciado directamente por el suministro marino. Este, si existente, causa una extensión de la anchura de la playa y suavización de su pendiente, pudiendo funcionar como una fuente directa para el transporte eólico, reduciendo los efectos de suministros limitados. Concluye que, a pesar de que hay conceptos que describen el comportamiento de las dunas como una función del estado de la playa (Short & Hesp, 1982), la actual falta de conocimiento sobre los procesos de cambio de sedimento entre zonas marinas y aéreas imposibilita responder a la cuestión de hasta qué extensión el suministro de sedimento de la zona marina puede influir en los cambios de volumen de las dunas.

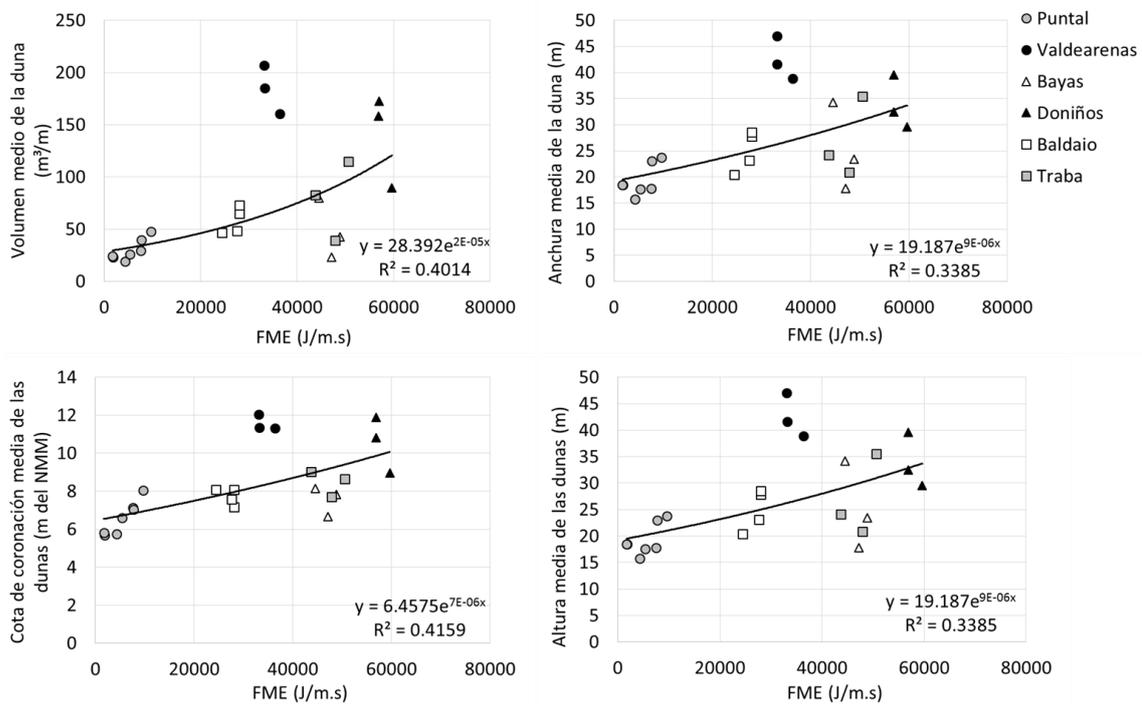


Figura III.15 – Relación entre el Flujo Medio de Energía (FME) de los puntos POI y los parámetros indicadores del tamaño de las dunas primarias de los perfiles asociados.

Si se evalúa conjuntamente los análisis de  $\Omega$  y de FME, se puede observar que las playas de Valdearenas y Doniños presentan un estado morfodinámico claramente intermedio y un FME alto que indicaría la presencia de barras importantes. Esto facilitaría el desarrollo de dunas más grandes, posiblemente debido al acoplamiento de las barras cada cierto tiempo, como lo observado por Aagaard et al. (2004) y Anthony et al. (2006), que generaría una anchura de playa razonable, con un aporte óptimo de sedimento a las dunas. Las playas de Baldaio y Puntal de Somo se clasifican como intermedias de baja energía, que presentarían limitaciones en el transporte de sedimento, tal como ha sido verificado por Houser & Hamilton (2009), debido a una menor anchura de playa seca y presencia de una cresta de berma. Finalmente, las playas de Bayas y Traba se acercan a una condición más disipativa y tendrían dunas más pequeñas debido a limitaciones en la disponibilidad de arena, pues la playa característicamente plana presenta mayor facilidad

de ser inundada, con arena constantemente húmeda y ataque de olas más frecuente, como ha sido observado por Houser & Mathew (2011).

En esta tesis se ha observado que una evaluación conjunta del estado morfodinámico y del flujo medio de energía aporta indicios de que las playas intermedias de alta energía pueden presentar dunas primarias en equilibrio más grandes. Como se ha dicho anteriormente, esta hipótesis debe ser mejor evaluada, con datos de playas de amplio rango de estados morfodinámicos y aportes energéticos.

#### Cota de inundación (CI)

Un importante efecto de la dinámica marina sobre las dunas es su efecto erosivo, por un lado limitando el crecimiento de la vegetación, lo cual podría contribuir a una estabilización de la duna y su avance sobre la playa (Hesp & Martínez 2007) y, por otro lado, debido a la retirada de sedimento de las dunas y deposición de este en la zona de surf durante eventos extremos (Gómez-Pina et al. 2002). La posición de las dunas es a menudo relacionada a la cota de máximo lavado o de máxima actuación de la dinámica marina (van de Graaff 1990; Psuty 1993; Pye & Blott 2008; Hesp 2011). Según Hesp (2002), es el lavado de la ola ocasional, o la ola que erosiona el pie de la duna primaria en la parte superior de la playa seca que: (i) restringe el crecimiento de las plantas hacia mar; (ii) forma un borde de vegetación paralelo a la línea de costa debido a la eliminación de las plantas que crecen sobre el tramo afectado por la marea de sicigia o de temporal; y/o (iii) genera escarpe en las dunas primarias y alinea esta con la forma en planta de la playa.

A pesar de que muchos autores coinciden con que el factor determinante de la localización del pie de las dunas es la cota de inundación (CI), hasta ahora no está claro como calcular esta relación y cuál periodo de retorno utilizar para definir la localización de la duna primaria en equilibrio.

En este trabajo, se partió de la hipótesis de que la CI, que consiste de la suma de los niveles de marea astronómica, marea meteorológica y el *runup* causado por las olas, tendrá gran importancia en la definición de la localización del pie de la duna. Para las playas del norte de España evaluadas se verifica que la cota del pie de la duna, definida a través del criterio de cambio en la pendiente, en todos los casos se localiza por encima de la cota de la pleamar máxima registrada en los mareógrafos de los puertos cerca de las playas (Figura II.11 del Capítulo II). Por lo tanto, se entiende que el *runup* tendrá gran importancia en esta definición de la cota de inundación que define el pie de la duna primaria.

Con el objetivo de verificar la influencia de la cota de inundación, se calculó su régimen medio y extremal, estimado para los 60 años de datos con resolución horaria, obteniendo diferentes probabilidades. Una comparación general entre la cota del pie de la duna y los resultados obtenidos con el régimen medio de CI (percentil 99% = CI\_99%; cota superada solamente 12 horas al año = CI\_12h) y con el régimen extremal (cota de inundación con período de retorno de 2 = CI\_2a y 10 años = CI10\_a) se presentan en la Figura III.16.

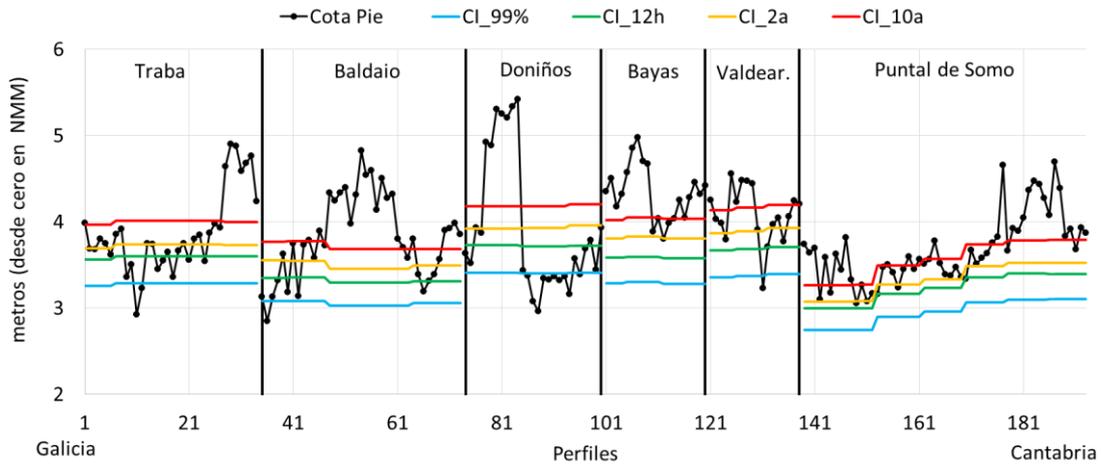


Figura III.16 – Datos de cotas del pie de la duna comparados con datos de cota de inundación, evaluados con régimen medio (percentil 99% (CI\_99%) y valor de CI superado solamente 12 horas al año (CI\_12h)) y distribución de extremos (cota de inundación con período de retorno de 2 (CI\_2a) y de 10 años (CI\_10a)).

De manera general, los resultados indican que la cota del pie de la duna es equivalente a la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI\_10a) y esta relación está presentada en la Figura III.17.

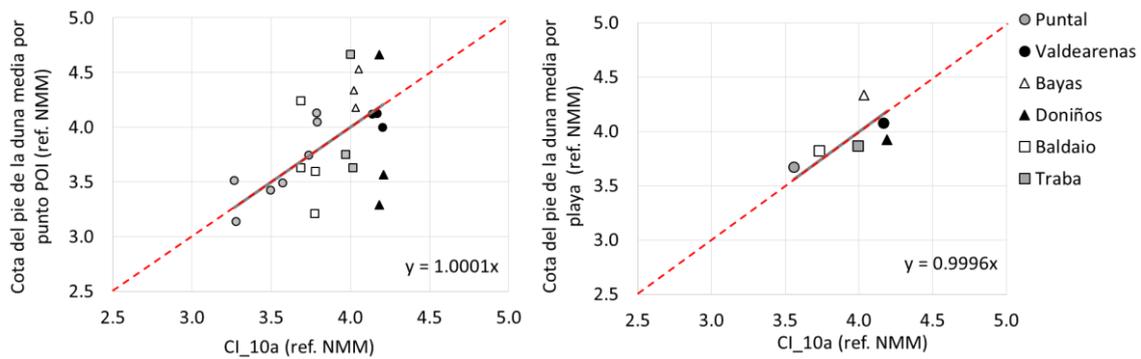


Figura III.17 – Correlación entre los valores medios de cota del pie de las dunas primarias de los perfiles asociados a cada punto POI (izquierda) y por playa (derecha) y la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI\_10a).

Trabajos previos, que evaluaron la influencia de la cota de inundación en las dunas primarias, presentaron resultados bastante variables. Algunos autores asocian la localización del pie de la duna a eventos extremos que ocurren todos los años (Ruggiero et al. 1997; Ruessink & Jeuken 2002; Heathfield et al. 2013). Otros trabajos indican que las dunas primarias solamente son impactadas por cotas de inundación asociadas a eventos muy extremos, que ocurren a cada década o más (Ruz et al. 2009; Hanley et al. 2014; Castelle et al. 2017).

Merece la pena recordar que las estimaciones de *runup*, que es un importante componente de la CI, dependen de varios parámetros que pueden afectar su precisión, como: (i) la batimetría de la zona de surf utilizada, que afectará la propagación del oleaje. Se sabe que esta cambia constantemente, sin embargo, es considerada la misma para toda la evaluación de los 60 años de datos; (ii) la pendiente de la playa, considerada uniforme

para todas las estimaciones, pero que también cambia interactivamente con la propia dinámica marina. Si la pendiente utilizada en los cálculos es más suave que la real, los valores serán subestimados, y vice versa. La importancia de la definición de la pendiente en los cálculos de *runup* fue verificado por Cariolet & Suanez (2013); (iii) errores al estimar el *runup* ( $R_{2\%}$ ) por la aplicación de una ecuación simplificadora de un proceso tan complejo que incluye *setup+runup+swash*. El  $R_{2\%}$  fue calculado por la ecuación de Stockdon et al. (2006) y estos valores no fueron calibrados para las áreas de estudio. Algunos artículos sugieren que esta ecuación subestima el  $R_{2\%}$ , cuando es comparado con valores observados en campo, a pesar de ser considerada la ecuación para estimar el *runup* más completa y que presenta las mejores correlaciones con los valores reales (Polidoro et al. 2013; Vousedoukas et al. 2012).

Para confirmar la correlación entre la cota del pie de la duna primaria y la CI\_10a sería necesario llevar a cabo validaciones con datos de campo de varios años de medidas de cota de inundación y cota del pie de la duna. Desafortunadamente, esta validación no es posible de ser hecha debido a la falta de datos de largo plazo en la monitorización de perfiles de playa/duna y eventos de inundación en las áreas de estudio. A pesar de eso, se puede concluir que la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI\_10a), de acuerdo con los resultados de la Figura III.16 y Figura III.17, es un buen indicador de la localización de la cota del pie de la duna primaria en condición de equilibrio a largo plazo. Tiene sentido si se conceptualiza que una duna que es fuertemente atacada por el oleaje todos los años presentaría una condición erosiva, sin embargo, si este ataque ocurre con período de retorno de 10 años habrá las dunas tendrán tiempo para recuperarse y volver a su morfología de equilibrio. Además, corrobora con la escala de tiempo utilizada en este estudio.

Partiendo de las evidencias de las evaluaciones anteriores, de que cuanto mayor la altura de ola y el flujo medio de energía que llega a una playa, mayores son las dunas primarias, se espera que cuanto mayores sean los valores de CI, mayores sean las dunas primarias, siempre y cuando un importante componente de la CI sea el *runup* causado por las olas. Esto se comprobó, como se puede ver en la Figura III.18, con la relación entre volumen de la duna y la CI\_10a.

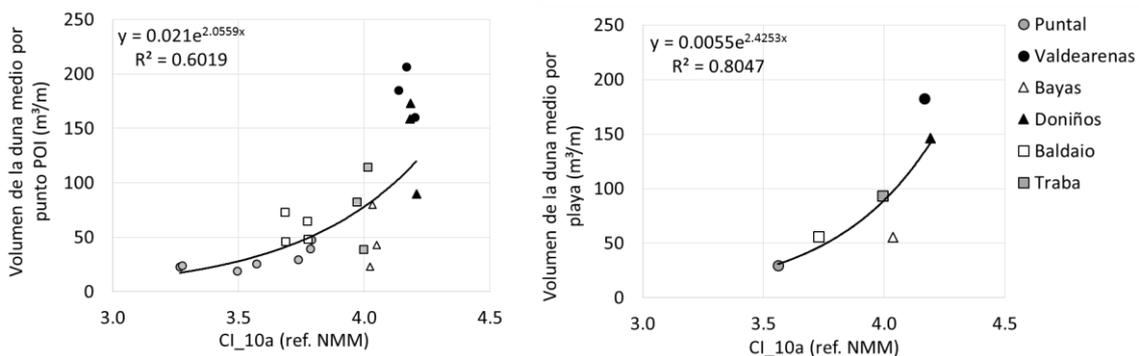


Figura III.18 - Correlación entre los parámetros indicadores del tamaño de la duna primaria y la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI\_10a), valores medios asociados a cada punto POI (izquierda) y valores medios por playa (derecha).

La explicación de esta relación podría darse por la interpretación de que cuanto más energía marina recibe una playa, y consecuentemente mayor su CI, más anchura de playa habrá entre la pleamar media y las dunas primarias. Una explicación similar fue sugerida por Duran & Moore (2013), que utilizaron en su modelo de desarrollo de dunas primarias la altura de ola para definir la anchura entre la pleamar y la línea de vegetación, donde se localiza la duna primaria. Cuanto mayor esta anchura, más fetch disponible para el transporte eólico potencial en período de buen tiempo. Además, Houser & Mathew (2011) afirman que no solamente un mayor fetch significa que el transporte potencial es máximo, una mayor elevación del pie de la duna (o altura de la playa seca) contendrá un gran volumen de sedimento que no está limitado por la presencia de humedad.

Nickling & Davidson-Arnott (1990) afirman que la complejidad de la interacción entre playa/duna y los procesos de transporte de sedimento sobre la playa hace que sea difícil aislar los efectos de restricción del fetch con los volúmenes disponibles, o aislar los efectos de la anchura de playa de otros factores como humedad y forma. Dicen que, de manera general, la anchura de la playa aumenta con un aumento de la energía de las olas y *runup*, y hay pocas dudas de que el desarrollo de dunas es limitado en playas de baja energía (asociadas a bahías y otras áreas de generación restringida del oleaje), que son estrechas y con sedimento pobremente seleccionado. Recuerdan que la anchura de la playa también aumenta con el aumento de la marea astronómica, pero en este caso la anchura real que puede suministrar sedimento para las dunas es mucho más pequeña, debido al tiempo relativamente corto entre bajamares, muchas veces insuficiente para secar el sedimento.

Los resultados de las correlaciones entre los parámetros de las dunas primarias y la cota de inundación nos llevan a concluir que la cota del pie de la duna es equivalente a la CI\_10a y que cuanto mayor sea esta cota mayor será el tamaño de la duna primaria.

A pesar de la indicación de que las dunas primarias en equilibrio deben empezar en la cota correspondiente a la CI\_10a, una determinación de la anchura de playa seca adyacente a esta duna sería bastante más interesante y útil a la hora de definir donde construir o recuperar una duna primaria en equilibrio. El problema principal en definir la anchura de playa, a partir de la CI, es que la línea de costa y la pendiente de la playa son parámetros que cambian constantemente, sea estacionalmente o debido a eventos extremos. Basado en lo expuesto, se ve necesaria la proposición de una manera de calcular la anchura de playa teórica, o mínima, donde se debe localizar la duna primaria, basado en una situación donde se pueda definir cuál es la morfología de la playa. Una propuesta se presenta en el próximo apartado.

#### 4.4. Propuesta de definición de la anchura de playa para una duna en equilibrio

Como se ha discutido en el apartado 4.2 (sub apartado *fetch efectivo*), la anchura de playa seca obtenida con base en los datos utilizados en esta tesis puede ser no representativo de la anchura de playa que define el tamaño de la duna primaria. El establecimiento de la distancia de la línea de costa donde es seguro construir estructuras urbanas, considerando la existencia de las dunas primarias, debe tener en cuenta episodios naturales de erosión (Komar et al. 1999).

Si se considera que la altura de la playa donde debe localizarse la duna primaria es la correspondiente a la cota de inundación con período de retorno de 10 años, de acuerdo con los datos y análisis realizados en esta tesis, la anchura de playa seca mínima será la que ocurre en la situación de temporal con período de retorno de 10 años. A partir de esto se propone el siguiente cálculo de anchura de playa mínima:

- Se verifica cual es la altura ( $H_s$ ) y período del oleaje ( $T$ ) medios, en la playa, que ocurren en eventos con cota de inundación semejante a la CI con período de retorno de 10 años ( $H_{SCI10años}$ ;  $T_{CI10años}$ ).
- Con estos parámetros y el tamaño del sedimento se calcula el parámetro adimensional de caída del grano asociado a esta condición ( $\Omega_{CI10años}$ ), con la ecuación de Wright & Short (1984);
- Partiendo del principio de que, en la situación del temporal con período de retorno de 10 años la condición de la playa será disipativa ( $\Omega > 6$ ), la pendiente de la playa seca se resumen, según Díez et al. (2017b) al parámetro  $m$ :

$$m = 0.003 * \exp(0.39 * \Omega) \quad (III.15)$$

- El modelo propuesto por Díez et al. (2017b) fue desarrollado para playas con  $\Omega$  máximo de 6.2. En esta propuesta se asume que la pendiente máxima de la playa seca será de  $m=0.06$ , que equivale a un  $\Omega=7.6$ .
- Se calcula la pendiente de la playa seca ( $m_{CI10años}$ ) aplicando la ecuación de Díez et al. (2017b) o la condición:

$$\begin{aligned} m_{CI10años} &= 0.003 * \exp(0.39 * \Omega_{CI10años}) && \text{si } 6 < \Omega_{CI10años} < 7.6 && (III.16) \\ m_{CI10años} &= 0.06 && \text{si } \Omega_{CI10años} > 7.6 && \end{aligned}$$

- Se calcula la anchura de la playa a partir de la pendiente estimada ( $m_{CI10años}$ ) y de su altura, desde pleamar viva media hasta la cota de inundación con período de retorno de 10 años ( $H_{playa_{CI10años}}$ ):

$$L_{teórica} = \frac{H_{playaCI10años}}{m_{CI10años}} \quad (III.17)$$

Se aplicó esta metodología a los puntos de análisis de la dinámica marina cerca de la línea de costa (puntos POI) y los resultados se presentan en la Tabla III.3. Se puede observar que es correcta la suposición de que, en esta situación de cota de inundación con período de retorno de 10 años, la playa presentará una condición morfodinámica disipativa ( $\Omega > 6$ ). La excepción son los cuatro primeros puntos POI de la playa del Puntal de Somo, característicamente protegidos del oleaje y que, en esta condición extrema, presentaran estado morfodinámico intermedio.

Se calculó la anchura de playa seca utilizando las ecuaciones III.16 (Tabla III.3). Los resultados se muestran en la Figura III.19, donde se puede observar que son bastante razonables.

Tabla III.3 – Estimación de la anchura de playa seca mínima para la localización de las dunas primarias, considerando la situación de evento extremo con período de retorno de 10 años.

Puntos POI en cada playa	$H_{SCI10años}$	$T_{CI10años}$	$\Omega_{CI10años}$	$m_{CI10años}$	Altura de la CI_10a	Anchura de playa estimada
<b>Puntal</b>	1.76	13.73	<b>3.65</b>	<b>0.01</b>	1.33	-
	1.78	13.82	<b>3.67</b>	<b>0.01</b>	1.33	-
	2.61	14.10	<b>5.28</b>	<b>0.02</b>	1.55	-
	2.97	14.24	<b>5.94</b>	<b>0.03</b>	1.63	-
	3.73	14.16	7.51	0.06	1.80	32
	3.94	14.76	7.62	0.06	1.85	32
	4.05	14.35	8.04	0.06	1.85	31
<b>Valdearenas</b>	5.62	15.30	8.26	0.06	2.19	37
	5.89	15.37	8.61	0.06	2.23	37
	6.02	15.38	8.81	0.06	2.26	38
<b>Bayas</b>	5.77	15.06	9.48	0.06	2.08	35
	5.97	15.16	9.75	0.06	2.11	35
	5.87	15.40	9.43	0.06	2.09	35
<b>Doniños</b>	7.32	16.20	7.76	0.06	2.38	40
	7.31	16.22	7.74	0.06	2.38	40
	7.39	16.16	7.86	0.06	2.41	40
<b>Baldaio</b>	5.38	15.97	7.82	0.06	1.97	33
	5.37	15.94	7.81	0.06	1.98	33
	4.95	15.95	7.20	0.05	1.89	38
	4.70	15.93	6.84	0.04	1.88	44
<b>Traba</b>	6.56	16.35	9.92	0.06	2.17	36
	6.68	16.27	10.17	0.06	2.21	37
	6.53	16.37	9.87	0.06	2.20	37

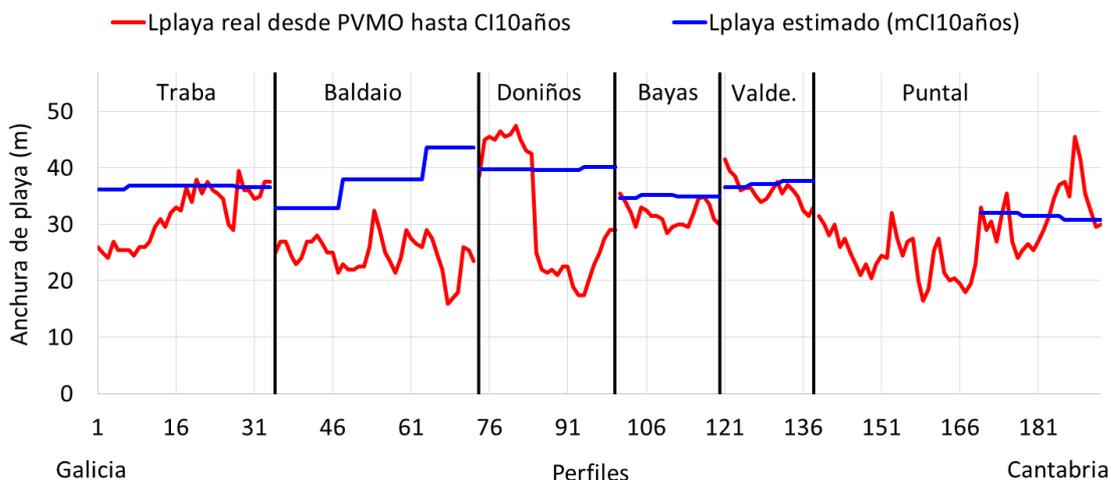


Figura III.19 - Comparación entre los valores de anchura de playa seca medida y la anchura de playa estimada.

## 5. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los resultados que relacionan las dinámicas eólicas y marinas con los parámetros morfométricos de los 193 perfiles de dunas primarias.

Al relacionar los parámetros de la dinámica del viento con las características morfológicas de las dunas primarias, se verificó que el transporte eólico potencial considerando la dirección relativa del viento ( $DP\alpha$ ), evaluado como valor medio de varios años, está razonablemente correlacionado con el tamaño de las dunas primarias. Por lo tanto, se concluye que este es el parámetro que mejor indica la dimensión de equilibrio de las dunas primarias. El hecho de que esta relación está evidenciada en el presente trabajo, al igual que en otros (como el de Miot da Silva & Hesp 2010), demuestra la importancia del potencial eólico en el largo plazo, pues este parámetro define el crecimiento de la duna hasta su tamaño de equilibrio y su recuperación a un estado estable tras eventos erosivos.

Con respecto al fetch efectivo (equivalente a la anchura de playa seca considerando la dirección media del viento), así como la anchura de la playa seca, se verificó que están pobremente correlacionados con el tamaño de las dunas primarias, indicando que el fetch disponible en las playas es mayor que el fetch crítico. Sin embargo, debido a la naturaleza variable de la playa seca, presentado en el modelo de Díez et al. (2017a), un valor puntual de su anchura puede no representar la característica que conlleva a la morfología de equilibrio de la duna primaria. Se puede concluir que el potencial de viento y la dirección del transporte eólico son más importantes en la definición del tamaño de equilibrio de las dunas primarias que la anchura del fetch, una vez que estas dunas encuentren su posición de equilibrio a lo largo del *backshore*.

En cuanto a la influencia de la dinámica marina sobre las dunas primarias, se demostró en este trabajo que la altura de ola está directamente correlacionada con el tamaño de las dunas primarias, resultado similar al obtenido por Duran & Moore (2013).

Sin embargo, se considera que parámetros más completos, como los que indican el estado morfodinámico de la playa, el flujo medio de energía de las olas o las alturas y probabilidades de cota de inundación, presentan mayor significado físico y mejor correlación con la morfología de las dunas.

Uno de los modelos más conocidos de morfología del sistema dunas/playas, de Short & Hesp (1982), indica una relación simple entre el parámetro adimensional de caída del grano ( $\Omega$ ), indicador del estado morfodinámico de la playa, y el tamaño de las dunas primarias. Sin embargo, en esta tesis no se encontró tal correlación. Siguiendo la idea propuesta en los artículos de Houser & Hamilton (2009) y Houser & Mathew (2011), se plantea una relación semejante a la encontrada por estos autores: el modelo de Short & Hesp funciona bien para playas de reflejantes a intermedias, pero no de intermedias a disipativas. Si se ajusta una función Gaussiana entre los valores de  $\Omega$  y los volúmenes medios de las dunas primarias, en las playas de esta tesis, los resultados son aceptables. Esto quiere decir que el volumen de las dunas aumenta con el aumento de  $\Omega$  hasta un máximo ( $\Omega \approx 4$ ), a partir del cual comienza a decrecer, estando inversamente correlacionado. Se asume que la causa de esto se debe al hecho de que cuando una playa se aproxima a la condición disipativa (valores altos de  $\Omega$ ), la playa seca, característicamente plana y de poca pendiente, sufrirá más fácilmente inundaciones, lo que puede minimizar el transporte eólico debido a la humedad del sedimento o aumentar la probabilidad de ataque de olas en las dunas, generando dunas primarias más pequeñas (Houser & Mathew 2011). Estos resultados deben ser valorados con más información de playas, principalmente por el hecho de que las playas estudiadas en esta tesis tienen estados morfodinámicos intermedios. Investigaciones futuras deben ser hechas para comprobar esta hipótesis.

Siguiendo la propuesta de Scott et al. (2011) de que el flujo medio de energía (FME) es un mejor parámetro para evaluar morfodinámicamente playas intermedias con o sin barras, se evaluó su influencia en la morfología de las dunas. Los resultados sugieren que hay una tendencia de que las playas que reciben más energía, con presencia de barras, presenten mayor volumen de dunas que las playas con menos energía, o sea, intermedias sin la presencia de barras.

La evaluación morfodinámica de cada playa y su relación con el tamaño de las dunas primarias, utilizando tanto el parámetro  $\Omega$  como el FME, explica satisfactoriamente el tamaño de las dunas primarias: las playas intermedias de alta energía ( $\Omega$  entre 1.5 y 4.5 y  $FME > 3000 J/m.s$ ) presentaron las mayores dunas primarias, mientras que las intermedias de baja energía ( $\Omega$  entre 1.5 y 4.5 y  $FME < 3000 J/m.s$ ) y las que se aproximan de la condición disipativa ( $\Omega$  entre 4.5 y 5) presentaron las dunas primarias de menor tamaño, a pesar de que estas últimas presentaron altos valores de FME (mayores que  $3000 J/m.s$ ).

La localización de la duna, con respecto al nivel medio del mar, suele estar relacionada con el alcance máximo de la dinámica marina, en eventos extremos (van de Graaff 1990; Psuty 1993; Pye & Blott 2008; Hesp 2011). Los resultados encontrados en

esta tesis corroboran estas afirmaciones, comprobando que la cota de inicio de las dunas primarias corresponde a la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI\_10a).

Una relación interesante encontrada es la de que cuanto mayor la cota de inundación de la playa, mayores son los volúmenes de las dunas primarias, ajustándose bastante bien a una ecuación exponencial, con indicador de bondad del ajuste de  $R^2=0.8$  (para valores medios en cada playa). Esta relación se explica partiendo del principio de que la cota de inundación con un período de retorno es la que define la localización del pie de la duna. Cuanto mayor sea la cota de inundación, más lejos estará la duna del nivel medio del mar. Como consecuencia esta duna tendrá, en condiciones de buen tiempo, una mayor disponibilidad de sedimento que una duna más cerca de la línea de agua. Una duna con inicio en cotas más altas presentará más fetch de actuación del viento y mayor volumen de sedimento que no está limitado por la presencia de humedad.

A pesar de indicar una cota de inicio de las dunas primarias (CI\_10a), la correspondiente anchura de playa seca variará en función de la morfología cambiante de la playa seca. Se propone una metodología para estimar la anchura mínima: (i) la situación de la CI\_10a que define la cota de inicio de las dunas primarias ocurre durante un evento extremo que hará que la playa se encuentre en una condición disipativa; (ii) utilizando las olas asociadas a la CI\_10a (altura  $H_{sCI10años}$  y período  $T_{CI10años}$ ) se puede calcular el estado morfodinámico de la playa en dicho momento ( $\Omega_{CI10años}$ ); (iii) a partir de  $\Omega_{CI10años}$  se calcula la pendiente de la playa  $m_{CI10años}$  utilizando el modelo de Díez et al. (2017b) si  $\Omega < 7.6$  o  $m_{CI10años} = 0.06$  si  $\Omega > 7.6$ ; (iv) a partir de la cota de la playa seca correspondiente a la CI\_10a ( $H_{playaCI10años}$ ) y de la pendiente  $m_{CI10años}$  es posible obtener una anchura de playa teórica en condición disipativa. La aplicación de esta metodología resultó en valores razonables. Debido a las limitaciones de la aplicación del modelo de Díez et al. (2017b) (válido solamente para  $6 < \Omega < 7.6$ ) son necesarios estudios que permitan confirmar la aplicación de esta metodología propuesta.

# CAPÍTULO IV

## Modelo de funcionamiento teórico



## IV. Modelo de funcionamiento teórico

### 1. Introducción

Diversos modelos teóricos y matemáticos reconocen la condición de equilibrio de las dunas primarias, donde las mismas alcanzarán un tamaño y posición característicos en función de las condiciones ambientales (Short & Hesp 1982; Psuty 1988; Sherman & Bauer 1993; Hanson et al. 2010; Duran & Moore 2013; Goldstein & Moore 2016; Larson et al. 2016).

El estado de equilibrio en morfodinámica se refiere a una condición más frecuente, o media, donde la unidad fisiográfica (duna, playa, delta,...) llegará a una estabilidad en función del equilibrio, en el largo plazo, de los procesos de erosión y sedimentación. El sistema cambia en respuesta a modificaciones en estos procesos. Este cambio puede ser alrededor de la condición de equilibrio, si las modificaciones en el sistema son de corto/medio plazo (días a años), o para encontrar una nueva condición de equilibrio, si hay modificaciones ambientales permanentes en el largo plazo (décadas a siglos).

Houser (2009) desarrolla esta idea y afirma que las playas y dunas son sistemas activos que oscilan (erosionan y acumulan alrededor de una morfología de equilibrio) en respuesta a una retroalimentación (*feedback*) entre algunas fuerzas (viento y olas) y su respectiva morfología antes del evento. Algunos trabajos registraron este tipo de oscilación alrededor de una condición más frecuente, o de equilibrio: Thom & Hall (1991) y McLean & Shen (2006), a través del análisis de 33 años de datos de perfil de la playa de Moruya, Australia (medidos cada 6 meses, de 1972 hasta 1986 y extendido el estudio hasta 2004), describieron una oscilación entre períodos de erosión y de acumulación, con duración entre 2 y 7 años. Ambos trabajos verificaron que el volumen de la playa subaérea y la localización de las dunas primarias acompañan esta oscilación, con una tendencia a la condición media o de equilibrio. En la playa de Wickaninnish (Vancouver, Canadá) se registró una variabilidad estacional, con un régimen de oleajes energéticos, y consecuente erosión de playa y la generación de un escarpe en la duna, ocurriendo con una frecuencia de aproximadamente 2.8 eventos al año (Heathfield et al. 2013). A pesar de la actividad erosiva, la recuperación de las dunas por el desarrollo de la rampa y crecimiento de las dunas incipientes ocurre rápidamente, a menudo por la presencia de grandes restos de madera (Heathfield & Walker 2011; Heathfield et al. 2013), manteniendo así el tamaño y localización de las dunas primarias. La estacionalidad en la erosión de las dunas durante el invierno y recuperación en el verano (Komar 1976) es un modelo general común en muchas playas. Guillén et al. (1999) identificaron comportamientos oscilatorios con periodicidad de 4-15 años en la localización del pie de las dunas primarias del litoral de Holanda, debido al comportamiento de migración de barras y cambios en la intensidad acumulada de tormentas.

Arens & Wiersma (1994) separaron las dunas primarias de Holanda en cuanto a los tipos de desarrollo a largo plazo: regresiva (R), estable (S) y progresiva (P). Si aplicamos las características de cada tipo a situaciones de corto y medio plazo (días a años), esta clasificación puede ser utilizada en un modelo a largo plazo, considerando una oscilación a lo largo de tiempo, pero con una tendencia final de estabilidad en una escala de décadas, si el balance sedimentario se mantiene. Hesp (2002) también propone una clasificación de las características morfológicas dependiendo de su condición de erosión, avance sobre la playa o estabilidad, y el propio autor reconoce que las dunas pueden saltar de una fase a otra dependiendo de la condición del ambiente, siempre y cuando no ocurra un evento catastrófico que desestabilice el sistema por completo. Ollerhead et al. (2013) hace este tipo de clasificación basado en la oscilación entre el estado de erosión o acumulación, para una escala estacional. La descripción de cada una de estas clasificaciones se presenta en el Anexo I.

Con el objetivo de entender el funcionamiento general de los procesos actuantes en las dunas primarias, a continuación se presenta su modelo de funcionamiento a corto y medio plazo, considerando los conocimientos previos presentados por la bibliografía especializada. Posteriormente, con el objetivo de explicar las condiciones existentes en un estado estable y las características morfológicas resultantes, se propone un modelo de funcionamiento teórico a largo plazo para la condición de equilibrio de las dunas primarias, fundamentado en los resultados de las correlaciones entre las dinámicas eólica y marina y los parámetros morfométricos de las dunas primarias.

## **2. Funcionamiento de la oscilación acumulación/erosión de la duna a corto y medio plazo**

### **2.1. Período de acumulación:**

#### ¿Porque ocurre?

- Estacionalmente, en períodos de baja frecuencia de ataque de olas. La acumulación generada por el transporte eólico supera la erosión causada por las olas (como se ha registrado en el estudio de Ollerhead et al. 2013).
- En escala de años, por la entrada de sedimento en el sistema por ondas de arena (como fue sugerido por Ruessink & Jeuken 2002 y Guillén et al. 1999) o acoplamiento de barras de la zona de surf (como fue verificado por Aagaard et al. 2004 y por Short & Jackson 2013).

#### ¿Qué pasa?

- En el caso de un suministro neto de arena, la influencia marina sobre el desarrollo de las dunas primarias es indirecta, puesto que la arena suministrada a la playa

solamente llegará a las dunas primarias si hay transporte por el viento (Arens & Wiersma 1994).

- Si hay aporte neto de sedimento para la playa y, posteriormente, para la duna primaria esta recibirá sedimento, aumentando de tamaño y avanzando sobre la playa (véase Figura IV.1A y B).

- Al recibir el sedimento, la duna aumenta de tamaño y/o de pendiente y empieza a ocurrir deposición de sedimento en su base, pues el flujo de viento ya no consigue transferir esta arena hasta la cresta (van Boxel et al. 1999). Por lo tanto, si la duna recibe más sedimento después de llegar a su forma de equilibrio empezará a avanzar sobre la playa, como ha sido verificado por Wijnberg et al. (2011) y por de Vries et al. (2012).

- Mientras la anchura de la playa sea mayor que la anchura del fetch crítico, la variación de la anchura de la playa no influirá en la tasa de transporte de sedimento, pues este está totalmente desarrollado (Bauer & Davidson-Arnott 2002; de Vries et al. 2011). Con el avance de la duna sobre la playa el fetch disminuye, y si la anchura de la playa llega a ser menor que el fetch crítico, las dunas recibirán cada vez menos aporte de sedimento (Figura IV.1B).

- Además, con el avance de la duna sobre la playa hay mayor probabilidad de que esta sufra un escarpe generado por la erosión de las olas. de Vries et al. (2012) verificaron que la variación del volumen de una duna primaria con característica progradante, en la costa de Holanda, no estaba relacionado con el transporte potencial del viento, pero sí con la erosión causada por los procesos litorales. A partir del momento que la erosión causada por las olas es superior a la deposición, empieza el período de erosión de la duna.

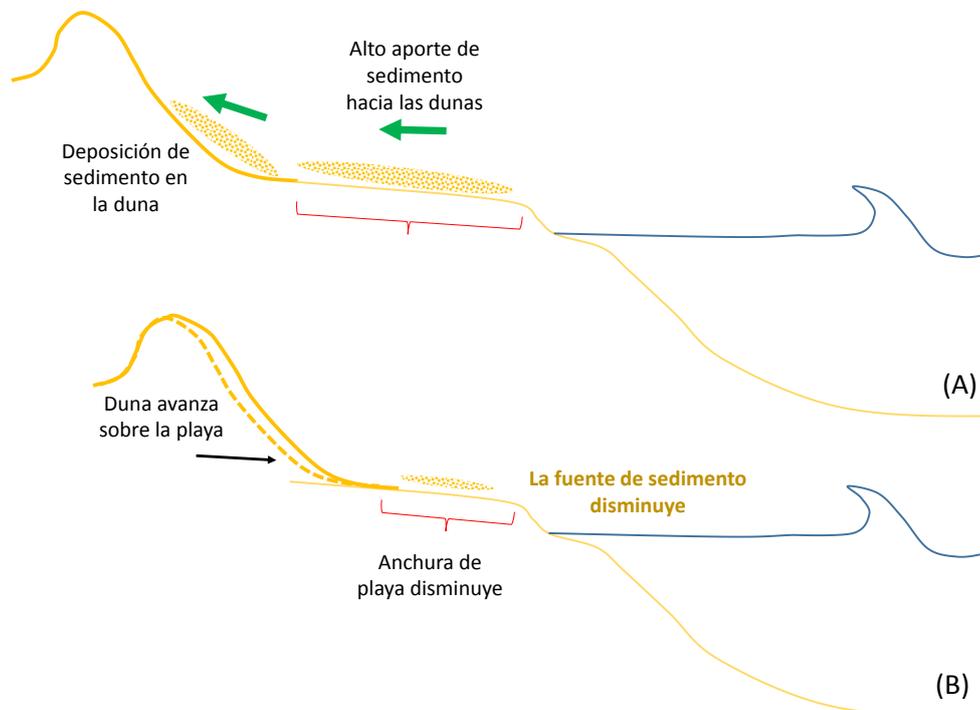


Figura IV.1 – Etapas del período de acumulación de las dunas primarias.

Una situación parecida de acreción de las dunas y migración de estas sobre la playa ocurrirá en el largo plazo (escala de décadas) si hay aportes de sedimento permanentes, como la construcción de diques que acumulen arena, regeneración de playa con aporte de arena, etc... En este caso la duna avanzará sobre la playa hasta que encuentre nuevamente su posición de equilibrio.

## **2.2. Período de erosión:**

### ¿Porque ocurre?

- Estacionalmente, debido a la mayor frecuencia y magnitud de olas y mareas meteorológicas (como fue registrado en estudios como los de Ollerhead et al. 2013 y de Ruessink & Jeuken 2002).
- En escala de años, por la salida cíclica de arena, por ejemplo, debido a migración de las ondas de arena (años) (como ha sido sugerido por Ruessink & Jeuken 2002 y Guillén et al. 1999).

### ¿Qué pasa?

- Si el nivel del mar llega a la duna, ocurrirá su erosión, con formación de un escarpe y, si hay rebase, puede ocurrir el retroceso o la destrucción de la duna (Figura IV.2A, B y C1) como ha sido confirmado por Stockdon et al. (2007) y Long et al. (2014).
- La erosión de las dunas es causada por la colisión de los bores de oscilación (*swash bores*) de las olas con el frente de la duna (Carter & Stone 1989). Esta erosión puede ocurrir debido a que la anchura de playa disminuyó por el avance de la duna sobre la playa (Figura IV.1B y Figura IV.2A); o a corto plazo, debido al ataque de olas en el período más energético (Figura IV.2B).
- No siempre el escarpe disminuye la altura de la duna, pero si las dunas son pequeñas con respecto al impacto del oleaje y hay rebase, estas pueden disminuir de altura y sufrir retroceso (Houser 2013) (Figura IV.2C1).
- Algunos autores (Bauer & Sherman 1999; Davidson-Arnott 2005) afirman que si la vegetación es retirada de la cara a barlovento de la duna, debido a la erosión causada por el oleaje, el sedimento será transportado por el viento hasta la cresta y a sotavento, pudiendo causar su retroceso (Figura IV.2C2).

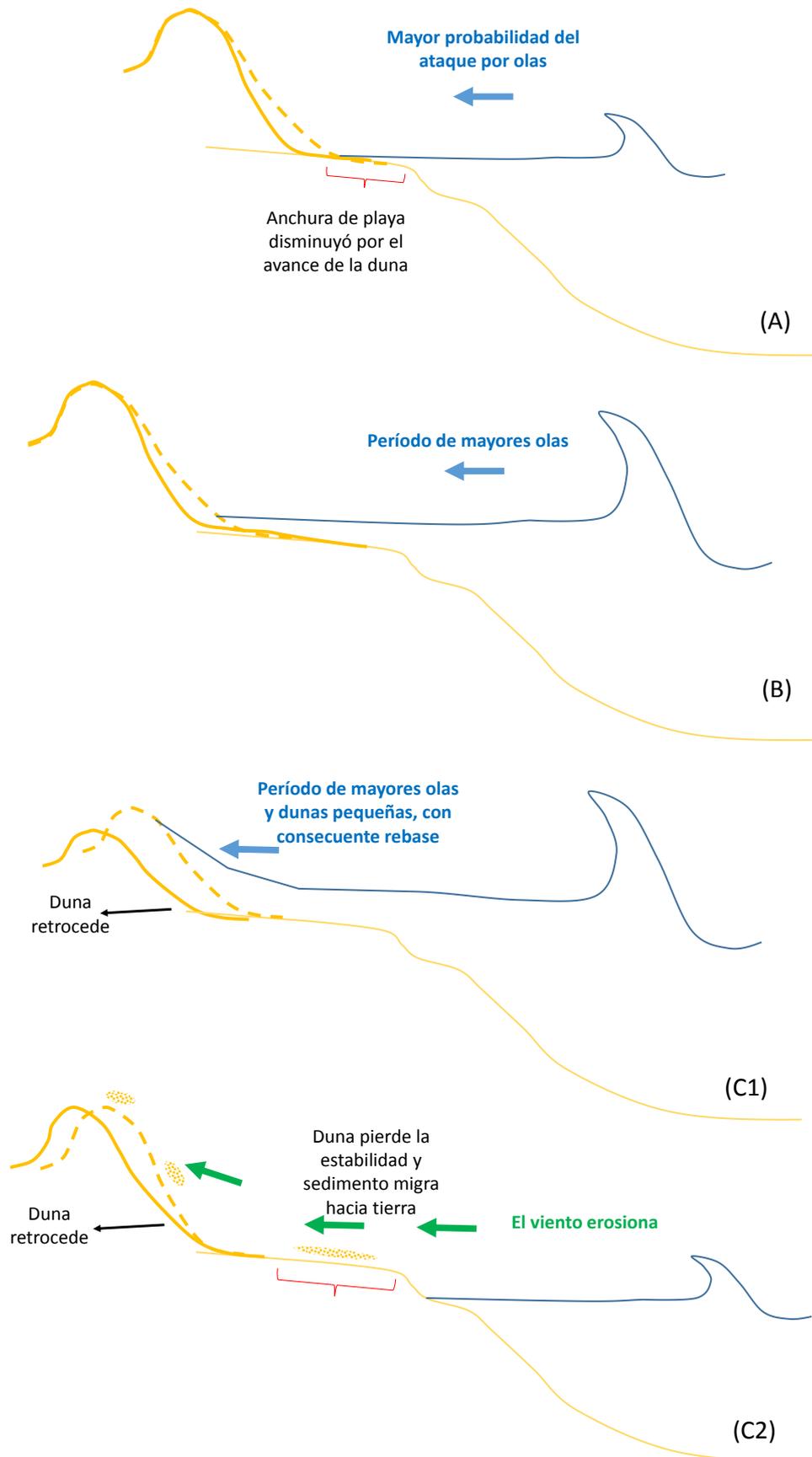


Figura IV.2 – Causas del período de erosión de la duna primaria.

Vale recordar que si ocurre una pérdida sedimentaria permanente del sistema, como en los casos de las Figura IV.2 C1 y C2 (pérdida del sedimento hacia la zona a sotavento), la duna será constantemente erosionada y la tendencia es que esta migre hacia tierra (Guillén et al. 1999) hasta que encuentra su nueva posición de equilibrio (si hay sedimento y área disponible para eso). Esto también puede ocurrir a largo plazo si hay una disminución permanente del aporte sedimentario, p. ej. por el bloqueo del transporte litoral longitudinal de sedimento que cause un déficit sedimentario en el sistema, o reducción de la anchura de la playa por la retirada de diques que lleven a que la línea de costa retroceda, como ha sido probado por Hanson et al. (2010). A muy largo plazo, un aumento lento del nivel del mar también llevaría a una migración hacia tierra del perfil del sistema playa/duna primaria, manteniendo su forma, como ha sido propuesto por el modelo conceptual de Davidson-Arnott (2005) y como han sugerido Ollerhead et al. (2013).

### **2.3. Equilibrio entre las dos situaciones:**

Un sistema playa/duna primaria en equilibrio presenta una oscilación entre erosión y acumulación, con el sedimento cambiando entre la playa sumergida, playa seca y duna primaria, pero sin pérdidas de sedimento hacia fuera de estos sistemas. Si la erosión por las olas es puntual o estacional la duna será escarpada y el sedimento distribuido a lo largo del perfil de la playa seca y/o playa sumergida, con formación de una barra. Tras la erosión por la tormenta, la recuperación de las dunas requiere inicialmente que la playa se recupere a través de la migración de las barras, con generación de una playa seca amplia y plana que servirá de fuente de sedimento para el transporte eólico hacia las dunas (Aagaard et al. 2004). El viento se encargará de recuperar la duna primaria, principalmente por la deposición de sedimento en su pendiente a barlovento (Sabatier et al. 2009; Ollerhead et al. 2013) volviendo al inicio del ciclo, entrando en el período de acumulación. En este caso, la duna primaria presentará un estado de equilibrio en el largo plazo, que tendrá una posición y tamaño de equilibrio, según lo propuesto a continuación.

## **3. Modelo de equilibrio a largo plazo**

A partir de los resultados encontrados en esta tesis se verificó que hay dos parámetros principales que determinan la posición y tamaño de las dunas primarias:

- (i) el transporte eólico potencial del sedimento, considerando su dirección con relación a la línea de costa ( $DP\alpha$ );
- (ii) la cota de inundación generada por las olas de temporales.

Basado en estos resultados y en el funcionamiento presentado anteriormente, se propone el siguiente modelo teórico de perfil de equilibrio de las dunas primarias en el largo plazo:

### 3.1. Sistemas playa/duna dominados por la dinámica eólica: considerando solamente la autorregulación en función del transporte eólico

- A medida que las dunas primarias se desarrollan en una playa con anchura mayor que la anchura del fetch crítico (Figura IV.3 del tiempo  $t_i$  hasta  $t_{i+1}$ ), estas van aumentando de tamaño y migrando en dirección al mar. Debido a que la anchura de la playa es mayor que la anchura del fetch crítico, la duna recibe el aporte máximo de sedimento proveniente del transporte eólico potencial. El tamaño y velocidad de avance de la duna será proporcional al transporte eólico potencial.

- A partir del momento en que la duna llega a la localización de la playa equivalente a la anchura del fetch crítico (tiempo  $t_{i+1}$ ; Figura IV.3) y sigue avanzando, la anchura del fetch disponible va gradualmente disminuyendo. Como la anchura de playa será menor que el fetch crítico, el aporte de sedimento ya no será el máximo potencial y la duna avanzará y crecerá a menor tasa. En otras palabras, ocurre una autorregulación, pues la duna avanza sobre su propia fuente de sedimento.

- Este avance ocurrirá hasta un punto de la playa donde ya no habrá fetch suficiente para que las dunas reciban sedimento para seguir avanzando, a pesar de la existencia del transporte eólico potencial.

- Como consecuencia, las dunas primarias en equilibrio ( $t_{i+n}$ ; Figura IV.3) presentaran un tamaño menor que el potencial eólico, debido a una limitación por fetch disponible.

- Se propone el término “fetch de autorregulación” para la anchura de playa mínima en la cual se localiza la duna primaria en esta situación, o sea, donde ya no hay avance. Se propone la hipótesis de que este fetch de autorregulación se generará por dos posibles procesos: (i) debido al establecimiento de una condición de equilibrio dinámico en el suministro de sedimento transportado eólicamente, es decir, el volumen de sedimento aportado por la playa hacia las dunas es el mismo volumen de sedimento retirado de las dunas hacia sotavento; (ii) debido a la forma de la duna primaria que, por su pendiente o concavidad, hace con que la tensión del viento no sea capaz de transportar el sedimento o genere una estagnación del flujo de viento.

- Es necesario desarrollar una metodología que permita la estimación de este fetch de autorregulación, pero se supone que será una función del propio transporte eólico potencial.

- Es importante señalar que la vegetación ejercerá un papel importante en este proceso de avance, puesto que estabiliza la duna a medida que esta recibe el sedimento. Si no hay la estabilización de la vegetación, el sedimento sería perdido para la región a sotavento, saliendo del sistema playa/duna, lo que no permitiría el avance de la duna sobre la playa.

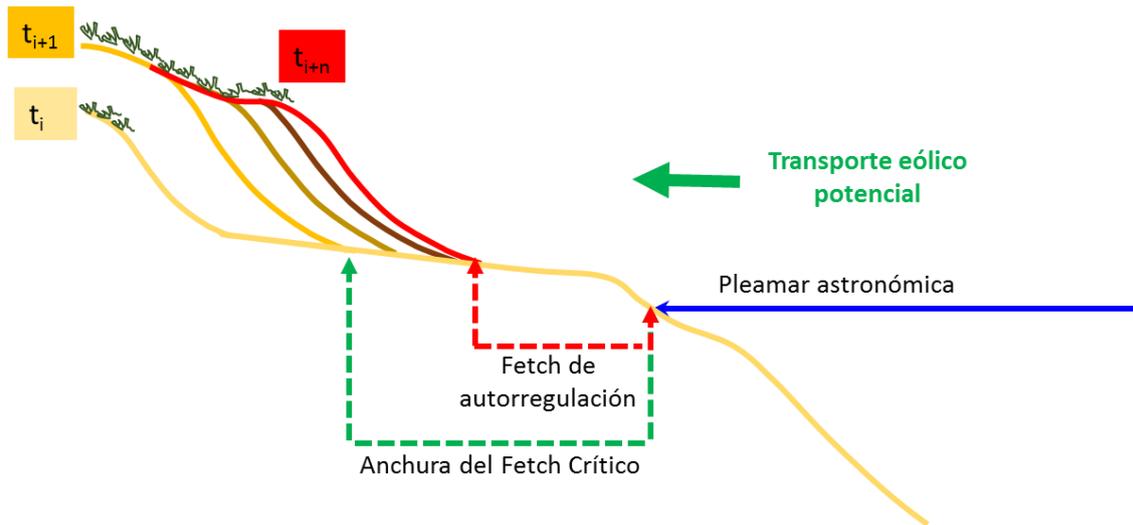


Figura IV.3 – Desarrollo de las dunas primarias en condición con transporte eólico potencial y sin influencia importante de la dinámica marina. Las dunas crecen y avanzan sobre la playa hasta un punto en que ocurre una autorregulación: avanzan sobre el fetch disponible, lo que genera una disminución en el aporte sedimentario, frenando el avance y crecimiento. Como consecuencia el tamaño final de las dunas primarias (en el tiempo  $t_{i+n}$ ) será menor que el potencial debido a limitación en el fetch disponible (anchura de playa).

### 3.2. Sistemas playa/duna dominados por la dinámica marina: considerando el transporte eólico y la dinámica marina

- Cuando se considera que la dinámica marina es importante en la morfodinámica del sistema playa/duna primaria, se agrega al modelo el hecho de que las olas erosionan las dunas cada cierto tiempo.
- En este caso, la localización de la duna con relación a la línea de costa dependerá de la cota de inundación (marea astronómica + marea meteorológica + *runup* de las olas). Los valores estimados en este estudio indican que la posición de equilibrio de las dunas primarias puede ser estimada por la cota de inundación con período de retorno de 10 años.
- Esto ocurre debido a que la actuación de las olas y marea meteorológica (cota de inundación), cada cierto periodo de tiempo, impide que la duna avance hasta el punto en que el fetch es lo suficientemente reducido para no causar el avance de la duna primaria (como la situación de la Figura IV.3), lo que se llamó “fetch de autorregulación”.
- Si la anchura de la playa, equivalente a la anchura desde pleamar hasta la posición definida por la dinámica marina, es mayor que la anchura del fetch crítico las dunas primarias estarán totalmente desarrolladas, o sea, presentarán el tamaño de equilibrio proporcional al transporte eólico potencial.
- En la Figura IV.4 se esquematiza esta condición, donde en el tiempo  $t_{i+2}$  la duna alcanza la posición en que la dinámica marina impide su avance.
- Debido a que el fetch es suficientemente ancho en períodos de buen tiempo, la duna seguirá creciendo hasta que llegue a su tamaño de equilibrio (tiempo  $t_{i+n}$ ) en proporción al transporte eólico potencial.

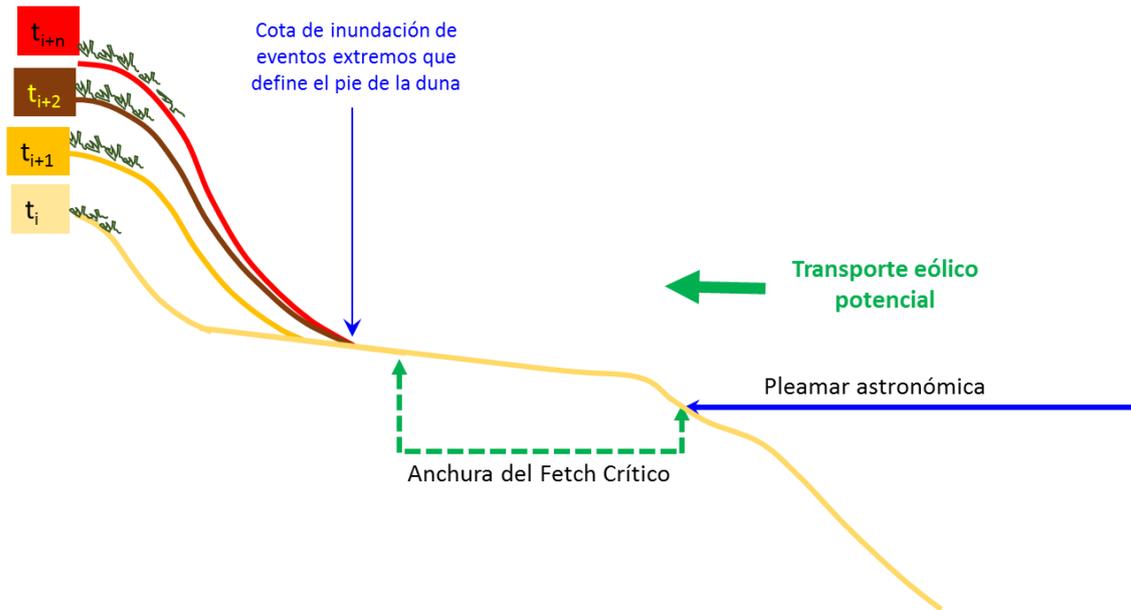


Figura IV.4 - Desarrollo de las dunas primarias en condición de transporte eólico potencial y con influencia importante de la dinámica marina. Las dunas primarias crecen y avanzan sobre la playa hasta el límite permitido por la dinámica marina. Debido a que el fetch disponible (anchura de playa) es mayor que el fetch crítico, las dunas estarán totalmente desarrolladas y su tamaño será proporcional al transporte eólico potencial.

### 3.3. Situaciones teóricas

Se puede proponer algunas situaciones teóricas y sus características según el modelo:

a) Playa con transporte eólico potencial alto y cota de inundación baja: la duna primaria se desarrollará y migrará sobre la playa hasta que encuentre su posición de equilibrio por limitación de fetch, o el llamado “fetch de autorregulación”. Eso resultará en una playa seca de poca anchura precedente a la duna primaria. El viento tiene potencial de crear dunas grandes pero el fetch disponible es muy pequeño y la duna ya no recibe sedimento. Las dunas primarias tendrán tamaño pequeño. A pesar de que para este trabajo no fue posible la obtención de datos de dunas primarias en equilibrio en situaciones como esta, empíricamente se puede afirmar que dunas localizadas en las playas inseridas en bahías o en el interior de estuarios se acercaran a esta situación.

b) Playas con transporte eólico potencial alto y cota de inundación alta: la duna primaria se desarrollará y migrará sobre la playa seca hasta un punto donde ocurre ataque de las olas cada cierto período de tiempo (los resultados indican cotas con período de retorno de 10 años). Si la anchura de playa resultante es mayor que la anchura del fetch crítico, la duna estará totalmente desarrollada y su tamaño será proporcional al transporte eólico potencial. Si la anchura de la playa resultante es menor que la anchura del fetch crítico el tamaño de las dunas será una función del transporte eólico potencial y un coeficiente que refleje la limitación del fetch.

c) Playas con transporte eólico potencial bajo y cota de inundación alta: el tamaño potencial de las dunas no estará limitado por el fetch, sin embargo, no habrá mucho

sedimento transferido hasta las dunas, teniendo como consecuencia dunas pequeñas, a pesar de mucha anchura de playa.

d) Playas con transporte eólico potencial bajo y cota de inundación baja: probablemente no habrá formación de dunas o, si hay, será de tamaño muy pequeño, pues existe la posibilidad de que el fetch esté limitado y que el viento no tenga competencia de llevar el poco sedimento disponible hasta las dunas.

Para el mejor entendimiento, se proponen dos posibles situaciones de equilibrio, simplificando el modelo y sin tener en cuenta el efecto del fetch, donde fijamos uno de los parámetros:

(i) Para una misma dinámica marina, las playas con mayor transporte eólico potencial generarán dunas más grandes (Figura IV.5 izquierda).

(ii) Para un mismo transporte eólico potencial, las playas que tienen una mayor dinámica marina tendrán como consecuencia más fetch disponible en período de buen tiempo. Eso generará dunas más grandes en playas con más dinámica marina (Figura IV.5 derecha).

Esto quiere decir que la dinámica marina y el potencial eólico actúan conjuntamente en el desarrollo de las dunas primarias y en la definición de su tamaño y posición de equilibrio.

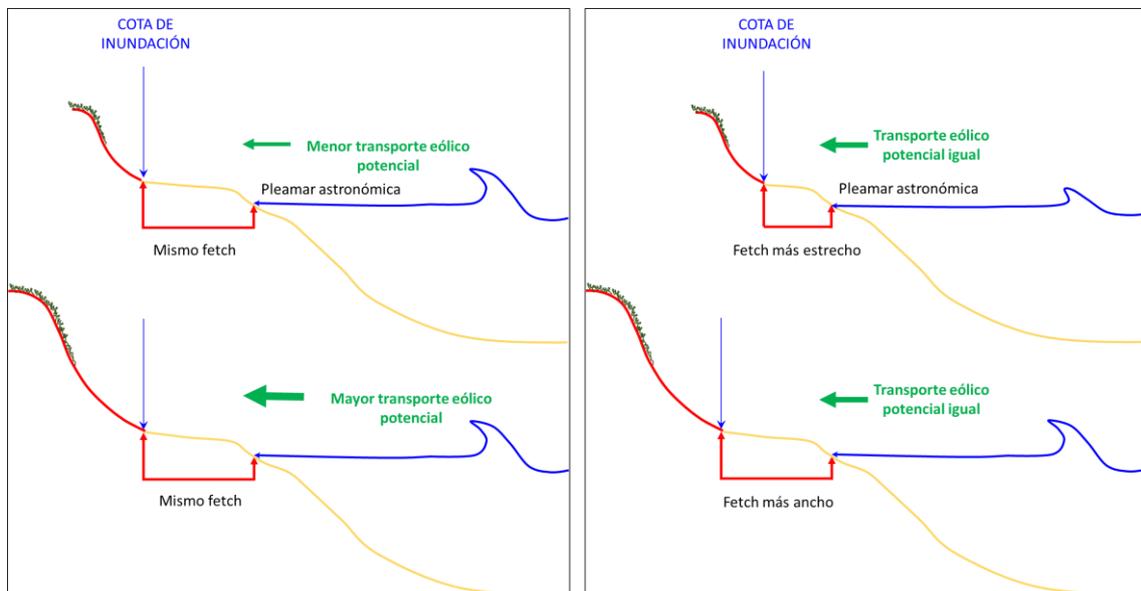


Figura IV.5 – Comparación de condiciones de equilibrio ( $t_{i+\infty}$ ) en función del transporte eólico potencial diferenciado, para una misma condición de dinámica marina (a la izquierda) y en función de diferentes dinámicas marinas, para una misma condición de transporte eólico potencial (a la derecha).

### **3.4. Comparación entre áreas de estudio**

Para contrastar la situación teórica (b) presentada anteriormente, que es la encontrada en los 193 perfiles estudiados en esta tesis, se puede comparar playas con las mismas condiciones energéticas marinas o de transporte eólico potencial:

- Liencres y Doniños presentan CI<sub>10a</sub> iguales (4.2m por encima del NMM). Sin embargo, Liencres presenta dunas más grandes que Doniños ( $VolDuna = 182$  y  $146m^3/m$ ; respectivamente) debido a que presenta un transporte eólico potencial mayor ( $DP\alpha = 6.6$  y  $3.7m^3/m/año$ , respectivamente para Liencres y Doniños).

- Las dunas primarias de Bayas y Baldaio presentan volumen semejante ( $56m^3/m$ ). Interesante notar que Baldaio presenta transporte potencial eólico mayor que Bayas ( $DP\alpha = 4.0$  y  $3.1m^3/m/año$ , respectivamente), pero Bayas está expuesta a una dinámica marina más intensa que Baldaio (CI<sub>10 años</sub> = 4.0 y 3.7m; FME = 46878 y 27025J/m.s, respectivamente).

- Bayas y Traba presentan el mismo transporte eólico potencial considerando la dirección del viento ( $DP\alpha=3.1 m^3/m/año$ ) y misma cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI<sub>10años</sub>=4m por encima del nivel medio del mar). Sin embargo, Traba tiene dunas primarias más grandes que Bayas ( $VolDuna = 93$  y  $56 m^3/m$ , respectivamente). Para explicar esta diferencia serían necesarios más estudios, donde se pueda identificar cuales los factores que generan mayor o menor duna primaria en estos casos. Algunas conjeturas sería el grado de humedad del sedimento, la variación de direcciones del viento, el estado morfodinámico de la playa, la composición del sedimento y/o la vegetación presente. Estas y muchas otras pueden ser la causa de estas diferencias, pero ninguna puede ser comprobada en este momento.

- La playa de Puntal de Somo presenta una variación longitudinal en la dinámica marina interesante a la hora de comprobar esta teoría. Asumiendo que toda la playa presenta el mismo transporte eólico potencial, pero con variación en la dinámica marina, es de suponer que cuantas más olas, más cota de inundación, más anchura de playa y consecuentemente mayores dunas primarias. Esto se confirma, como se puede observar en la Figura IV.6. Se podría proponer la hipótesis de que los puntos de 1 a 5 estarían limitados por fetch, mientras que los puntos 6 y 7 tendrían las dunas totalmente desarrolladas.

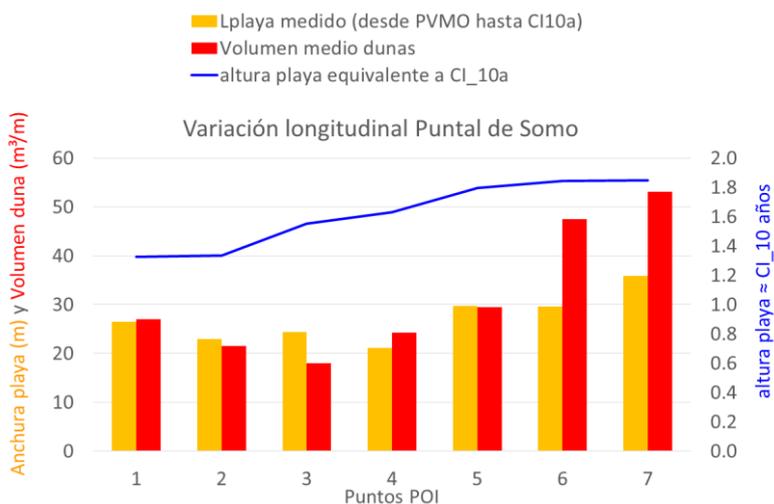


Figura IV.6 – Variación longitudinal, en la playa de Puntal de Somo, de la altura de playa equivalente a la cota de inundación con período de retorno (para cada punto POI), media de anchura de playa y volumen de la duna (para los perfiles más próximos a cada punto POI).

#### 4. Conclusiones

Se ha propuesto un modelo teórico del funcionamiento de las dunas primarias en equilibrio, considerando dos situaciones teóricas:

- *Dominadas por la dinámica eólica:* al desarrollarse, las dunas primarias van creciendo y avanzando sobre la playa seca. Considerando que la playa seca es la fuente de sedimento para las dunas, y que la anchura del fetch crítico es lo que define el aporte potencial máximo, al avanzar sobre la misma la duna recibirá cada vez menos sedimento, disminuyendo su crecimiento y avance, hasta que, debido a una autorregulación entre anchura de playa y aporte de sedimento, la duna encuentra su posición de equilibrio, llamada en esta tesis de “fetch de autorregulación”.

- *Dominadas por la dinámica marina:* cuando hay importante influencia de la dinámica marina, al desarrollarse las dunas solamente podrán avanzar hasta el punto de la playa permitida por la dinámica marina. El impacto del oleaje de eventos extremos impide este avance y generan una anchura de playa mayor que la anchura del fetch crítico. Eso proporciona condiciones para que la duna se desarrolle hasta el tamaño proporcional al transporte eólico potencial, o sea, estarán totalmente desarrolladas.

Si la dinámica marina genera una playa menos ancha que el fetch crítico, el tamaño de las dunas primarias será proporcional al transporte eólico potencial y a un coeficiente que refleje la limitación del fetch.

# CAPÍTULO V

Modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias y su aplicación para la regeneración de sistemas playa/duna



## **V. Modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias y su aplicación para la regeneración de sistemas playa/dunas**

### **1. Introducción**

Las dunas primarias son parte de uno de los sistemas más dinámicos de la zona costera, junto con la playa sumergida y playa seca. Funcionan como una zona de amortiguamiento, protegiendo la región litoral adyacente contra eventos extremos debido a su almacenamiento de sedimento que será transferido hacia la playa cuando sea requerido. Su presencia aumenta la estabilidad de la playa a largo plazo, con consecuente disminución de pérdidas del patrimonio localizado en la zona más próxima al mar, región muy valorada económicamente. Por este motivo, hay un creciente interés en recuperar o crear dunas primarias en playas que hayan perdido su función de protección o uso lúdico, ya sea debido a procesos de erosión u otra desestabilización. La definición de su localización, tamaño y forma es esencial a la hora de determinar un diseño que se acerque a su estado de equilibrio, minimizando pérdidas y costes de mantenimiento.

Con el propósito de cumplir con el objetivo principal de la tesis, que es la propuesta de un modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias, se formularon diversas preguntas de investigación que cuestionaban qué características morfológicas deberán tener las dunas primarias en equilibrio y cuáles serían los principales factores que las definen.

Con este fin se evaluaron 193 perfiles, que se consideran en estado próximo al equilibrio, en playas del litoral del norte de España. En el Capítulo II se presentaron los resultados de la evaluación morfológica, donde se verificó que las dunas primarias presentan morfometrías bastante variables (alturas, anchuras, volúmenes y pendientes). A pesar de esta variación se observó que existen fuertes correlaciones entre estos parámetros, llamadas relaciones alométricas. También fue posible definir que el perfil puede ser dividido en tres tramos distintos, un tramo de playa seca, un tramo de duna cóncava y un tramo de duna convexa. Se verificó que la forma de las dunas primarias, principalmente su tramo cóncavo, es poco variable, si se compara con la forma del tramo de playa seca.

Con el objetivo de identificar cuáles eran los parámetros ambientales, indicadores de la dinámica eólica y marina, que influyen en los parámetros morfométricos, en el Capítulo III se hizo un análisis de los mismos. Se verificó una correlación lineal positiva entre el transporte eólico potencial y el tamaño de las dunas. Se identificó que la cota de localización del pie las dunas primarias se corresponde con la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI\_10a). En cuanto a la influencia de la dinámica marina en el tamaño de las dunas primarias, se pudo observar que las playas más expuestas (mayores alturas de ola, flujo medio de energía y cota de inundación) presentaron las dunas más grandes. Esto se justifica porque cuanto más intensa es la dinámica marina, más alejadas se encontrarán las dunas del nivel medio de mar. Esto hace que se tenga un mayor fetch y un

mayor volumen de arena seca para el transporte eólico en períodos de buen tiempo, además de la protección frente a inundaciones más frecuentes. Por lo tanto, las condiciones de temporal asociadas a la CI\_10a definirán la anchura de playa seca mínima donde se localiza las dunas primarias en equilibrio. Una propuesta de modelo de funcionamiento a largo plazo de las dunas primarias ha sido presentada en el Capítulo IV, que explica el tamaño de las dunas primarias en función de las dinámicas ambientales.

De acuerdo con el objetivo general de la tesis y habiendo estudiado la morfología y la influencia de las dinámicas sobre la misma, en este capítulo se propone un modelo conceptual de perfil de equilibrio de las dunas primarias. Se presenta una metodología para la aplicación del modelo en proyectos de regeneración de playas y sus dunas primarias. Finalmente, se compara los resultados de la aplicación del modelo con los datos reales de los perfiles.

## **2. Propuesta de un modelo conceptual**

Basado en los resultados obtenidos en esta tesis, se propone un modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias. Inicialmente, se recuerdan las bases teóricas utilizadas en la definición del modelo conceptual. Posteriormente, se presenta la configuración general del modelo. Por último, se ajusta el modelo propuesto a los perfiles reales, con el fin de obtener los coeficientes de la ecuación y su dependencia con los parámetros morfodinámicos.

### **2.1. Bases teóricas**

Mediante la evaluación de 193 perfiles de dunas primarias en equilibrio de la costa norte de España, se ha verificado que los parámetros morfométricos indicadores de su tamaño pueden ser bastante variables, con registro de dunas de 1.4 a 9.1m en altura, de 11 a 59m en anchura (desde la cresta hasta el pie) y con volumen entre 11 y 270m<sup>3</sup>/m. Estas medidas están muy bien correlacionadas, permitiendo la definición de las relaciones alométricas.

Las dunas primarias presentan como característica de forma una curvatura convexa en la porción próxima a la cresta y una curvatura cóncava próxima al pie de la duna, que muchas veces se extiende hasta la playa seca. Uno de los aspectos bastante discutido fue la dificultad en la definición del pie de la duna, debido a que, en muchos casos, la intersección entre playa seca y duna primaria se da de manera bastante suave en función de la fuerte interacción entre ellas. A pesar de esta dificultad, el pie de la duna se definió a través del cambio de pendiente. La diferenciación entre el tramo cóncavo y el tramo convexo de la duna primaria se da por la identificación de la pendiente máxima de la duna primaria (Figura II.6, Capítulo 2).

En un 35% de los perfiles evaluados no fue posible detectar la forma de la duna tramo convexo. Esto está relacionado a su tamaño, pues dunas más pequeñas presentaron

este tramo con poca anchura, lo que hace que, debido a la resolución de los datos de los perfiles (5m en el eje X), no sea posible la definición de su forma. La evaluación de la forma de cada tramo, mediante uso del algoritmo *k*-medias, indicó que, de manera general, los tramos pertenecientes a la duna primaria son poco variables, especialmente el tramo cóncavo.

Una consecuencia de la dificultad en la identificación del pie de la duna es la necesidad de definición del inicio de su perfil. Por lo tanto, se hizo una modificación del sistema de abscisa y ordenada a un punto más fácilmente detectable. Se definió que el perfil debe empezar en la cresta de la duna, con X e Y=0 en el punto más alto del primer cordón arenoso entre playa y dunas costeras (Figura II.4, Capítulo 2), desde que este primer cordón se refiera a la duna primaria y no a una duna incipiente. El eje X aumenta en dirección al mar (anchura de la duna) y eje Y aumenta negativamente para abajo (altura de la duna).

En trabajo realizado por Bochev-van der Burgh et al. (2011) se verificó que el comportamiento de la parte frontal de la duna es fuertemente dependiente del comportamiento del pie de la duna, o sea, los cambios en la forma de la cara hacia el mar están concentrados en la parte de abajo del perfil, con posición de la cresta más estable a lo largo del tiempo. Esta afirmación está de acuerdo con las bases teóricas desarrolladas en esta tesis: (i) el tramo de la duna que presenta mayor interacción con la playa y que representa su estado de equilibrio es el más cerca del pie, característicamente cóncavo; (ii) la utilización de la cresta de la duna como punto de inicio del perfil es una buena solución, debido a su estabilidad respecto a las dinámicas y a la forma de equilibrio.

La cota del pie de las dunas primarias en equilibrio se localiza cerca de la cota correspondiente a la de inundación con período de retorno de 10 años (CI\_10a; suma entre marea astronómica, marea meteorológica y *runup* causado por el oleaje). Basado en que la anchura mínima de la playa seca corresponderá a la situación que ocurre cuando la cota de inundación alcanza el pie de la duna, o sea, la de período de retorno de 10 años, en el Capítulo II se ha propuesto una metodología para su cálculo. En situaciones extremas como esta, la playa presentará una condición disipativa y su pendiente ( $m_{CI10años}$  podrá ser estimada a través del modelo propuesto por Díez et al. (2017b). Por lo tanto, es posible estimar la anchura de playa seca mínima a través de la definición de la  $m_{CI10años}$  y de la cota de la playa seca.

Los resultados de la evaluación de la dinámica ambiental y su correlación con el tamaño de las dunas primarias indicaron que la dinámica marina y el transporte eólico potencial actúan conjuntamente en el desarrollo de las dunas primarias y en la definición de su tamaño de equilibrio. El modelo de funcionamiento a largo plazo, presentado en el Capítulo IV, propone dos condiciones (dominadas por la dinámica eólica o dominada por la dinámica marina) y algunas situaciones teóricas. Los perfiles evaluados en esta tesis pueden ser agrupados en la situación “Playas con transporte eólico potencial alto y cota de inundación alta”. En esta situación, si la anchura de playa determinada por la CI\_10a es

mayor que la anchura del fetch crítico ( $F_c$ ), la duna estará totalmente desarrollada y su tamaño será proporcional al transporte eólico potencial. Si la anchura de la playa resultante es menor que la anchura del  $F_c$ , el tamaño de las dunas será una función del transporte eólico potencial y un coeficiente que refleje la limitación del fetch. Una limitación de la aplicación de este modelo es la falta de un método para calcular el fetch crítico y verificar si la playa presenta o no limitación de fetch.

A pesar de las evidencias de que la cota de inundación presenta correlación positiva con el tamaño de las dunas primarias, en esta primera aproximación del modelo de perfil de equilibrio se asume que las dunas primarias evaluadas en esta tesis están totalmente desarrolladas y tendrán su tamaño proporcional al transporte eólico potencial con relación a la dirección de la línea de costa ( $DP\alpha$ ). En otras palabras, se asume que la anchura de playa será mayor que la anchura del fetch crítico.

## **2.2. Modelo conceptual**

Por todo lo dicho, se propone un modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias, presentado en la Figura V.1. Los principales elementos y suposiciones de este modelo son:

- La curva teórica que mejor describe la forma de las dunas primarias deberá ajustarse a su tramo cóncavo. Eso se justifica porque es el tramo que mejor representa la interacción entre la dinámica conjunta playa seca/ duna primaria. A pesar de la existencia del tramo convexo, su forma puede ser despreciada, pero no su volumen. Por lo tanto, la forma cóncava deberá ser extendida hasta la cota de la cresta de la duna. La distancia entre  $X=0$  y donde la curva cruza el eje  $X$  se denominada  $x_0$ , y representará la cresta de la duna.

- El volumen de la duna calculado con la cresta en forma de meseta será mayor que el volumen real (cresta con forma convexa), sin embargo, esta diferencia puede ser considerada como un excedente sin grandes impactos en el volumen final de la duna primaria, como se demostrará en el apartado 4.

- Debido a la importancia en la interacción entre la playa seca y el tramo cóncavo de la duna, y a que su intersección muchas veces no es evidente, el ajuste de la curva que mejor describe la forma de las dunas primarias considera parte del tramo perteneciente a la playa seca, donde hay la disminución de la pendiente. Sin embargo, para efectos de cálculo de volumen de las dunas y su posición con relación al nivel medio del mar, se supone que el pie de las dunas se localiza en la cota equivalente a la de inundación con período de retorno de 10 años

- La forma de la curva de las dunas primarias dependerá de un parámetro indicador de concavidad. Con base a la evidencia de que la parte cóncava de la duna presenta una forma bastante homogénea, se supone que este parámetro deberá tener un valor constante o muy poco variable.

- La altura máxima en el eje  $Y$  donde llega la curva, es decir, cuando esta se aproxima a una asíntota equivalente al tramo de menor pendiente del perfil, que es la playa

seca (Figura V.1), es llamada de altura del ajuste ( $H_{max}$ ) y será ligeramente mayor que la altura real de la duna primaria ( $H_{duna}$ ), sin embargo, estarán íntimamente relacionadas.

- El parámetro  $H_{max}$  y el parámetro  $x_0$ , de la misma manera que los demás parámetros morfométricos indicadores del tamaño de las dunas primarias, podrán tener su valor definido en función del transporte eólico potencial ( $DP\alpha$ ).

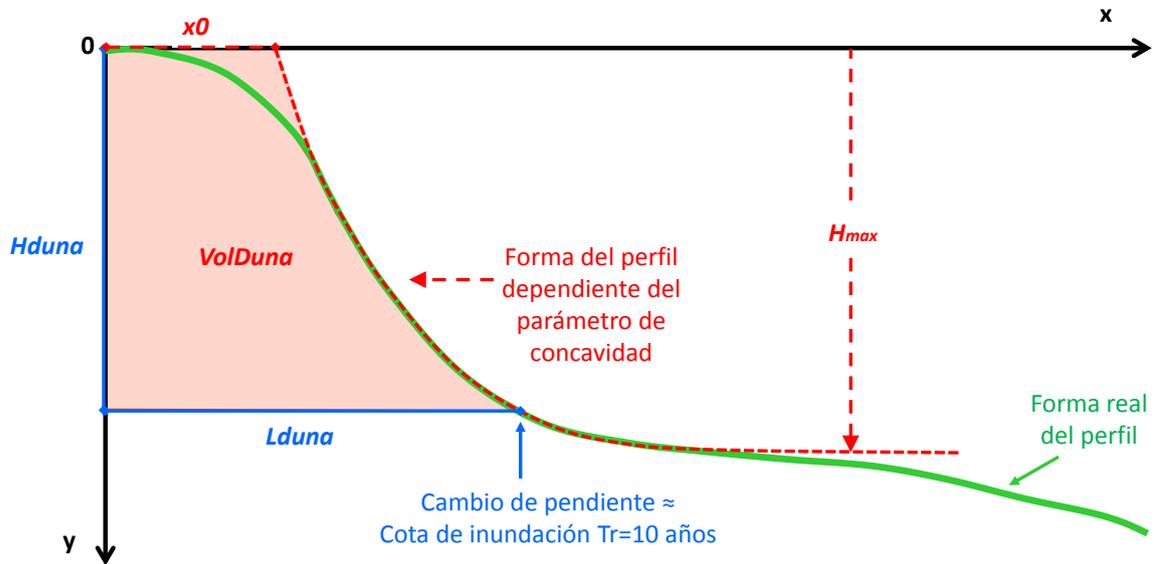


Figura V.1 – Propuesta de un modelo conceptual que describe la forma del perfil de equilibrio de dunas primarias.

A partir de la definición de este modelo conceptual, se ajustaron diferentes ecuaciones de forma del perfil de duna a perfiles reales, quedando con el de mejor ajuste.

### 2.3. Definición de la ecuación del perfil de equilibrio de las dunas primarias

Para proponer una ecuación que describa la forma de las dunas primarias, y considerando el modelo conceptual expuesto anteriormente, en este apartado se presentan los resultados encontrados de la aplicación de dos ecuaciones, que se ajustan al modelo conceptual. Se hizo la comparación entre ellas y se definió la que mejor describe la forma del perfil de las dunas primarias.

#### Ecuaciones de ajuste propuestas

De acuerdo a la forma del perfil, se propuso dos modelos:

Exponencial

$$y = a * e^{-b*x} - c \quad (V.1)$$

Potencial de 2º orden:

$$y = a * x^b - c \quad (V.2)$$

Se aplicó estos dos modelos a los 193 perfiles de dunas en equilibrio, y por los mínimos cuadrados se definieron los coeficientes de estas ecuaciones.

Se obtuvieron los parámetros de la bondad de cada ajuste de la siguiente forma:

- $R^2$  (Coeficiente de determinación): Esta estadística mide cuan exitoso es el ajuste en explicar la variación de los datos. Sus valores varían de 0 a 1, con 1 indicando el ajuste perfecto.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (f(x_i) - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (V.3)$$

- RMSE (*Root mean squared error - standard error*; raíz cuadrada del error cuadrático medio): se trata de una estimación de la desviación estándar del componente aleatorio en los datos, considerando los grados de libertad de residuos. Los grados de libertad de residuos se define como el número de valores de respuesta  $n$  menos el número de coeficientes ajustados  $m$  estimados a partir de los valores de respuesta. Valores cerca de 0 indican que el modelo tiene un componente de error aleatorio menor.

$$RMSE = \frac{SSE}{n-m} \quad (V.4)$$

Donde el SSE (*Sum of squares due to error*, suma cuadrática debido al error), que mide la desviación total de los valores ( $y_i$ ) a partir del ajuste ( $f(x_i)$ ), se calcula por:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 \quad (V.5)$$

### Comparación entre las ecuaciones

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros obtenidos con las dos ecuaciones propuestas, la exponencial y la potencial, en la Figura V.2 y la Figura V.3.

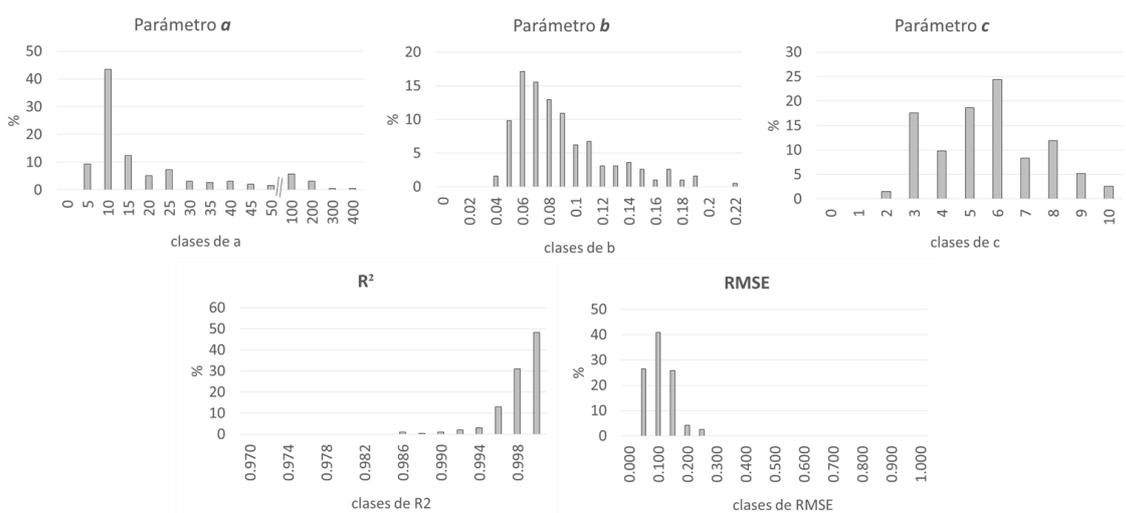


Figura V.2 – Parámetros de la ecuación obtenidos con el ajuste exponencial

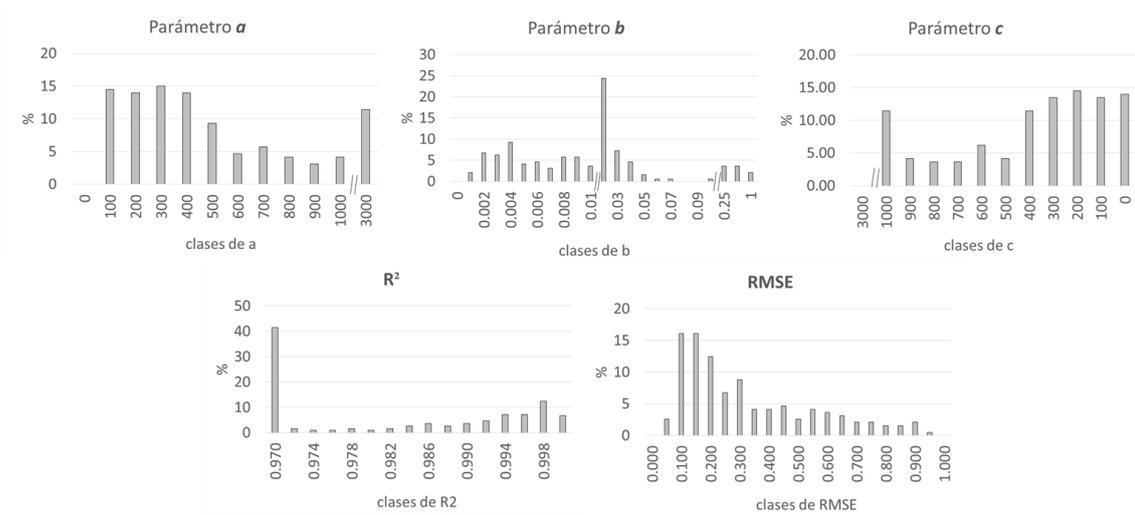


Figura V.3 – Parámetros de la ecuación obtenidos con el ajuste potencial

Utilizando los coeficientes de bondad  $R^2$  y RMSE se comparó la calidad de los ajustes para cada uno de los 193 perfiles, cuyos resultados se muestran en la Figura V.4. Se puede observar que el ajuste exponencial presenta un comportamiento más uniforme de acuerdo a estos coeficientes indicadores de la bondad de los ajustes. Además, los coeficientes  $R^2$  y RMSE indican que la ecuación exponencial, en la gran mayoría de los casos, se ajusta mejor a la forma de las dunas primarias.

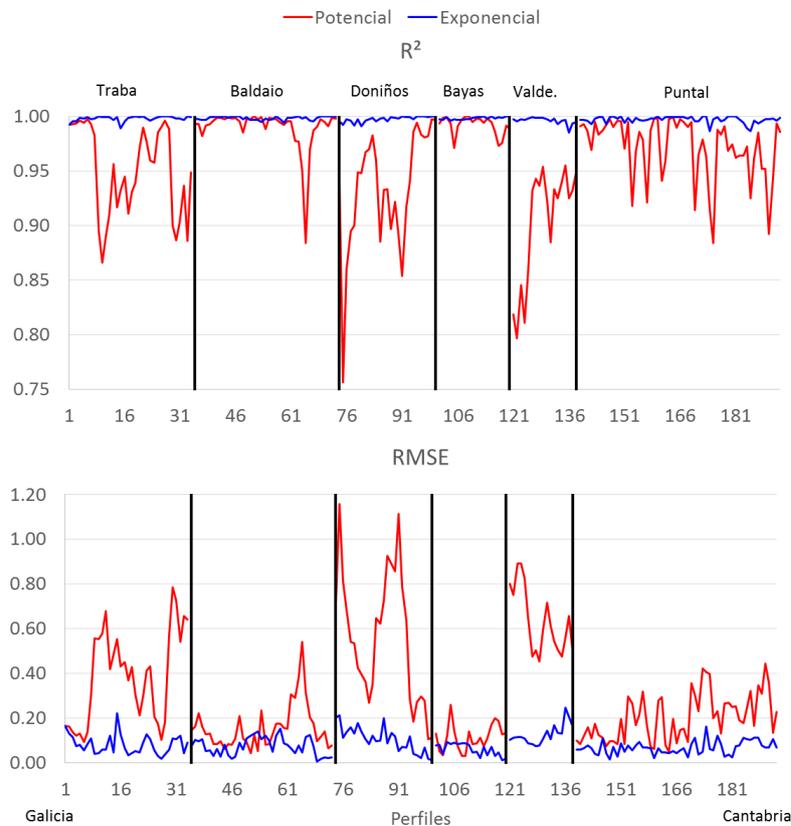


Figura V.4 – Variación espacial de la calidad de los ajustes (por  $R^2$  en la gráfica superior y RMSE en la gráfica inferior) para todos los 193 perfiles evaluados.

Como se aprecia en cada playa separadamente (Tabla V.1), todas presentaron un mejor ajuste con la ecuación exponencial. De los 193 perfiles evaluados solamente 13 presentaron mejor descripción con la ecuación potencial.

Tabla V.1 – Porcentaje de perfiles que mejor ajustan a cada una de las ecuaciones propuestas, basado en los valores de RMSE

Playas	Puntal	Valdear.	Bayas	Doniños	Baldaio	Traba	Todos (193)
% de perfiles cuyo ajuste es mejor el exponencial	100.00	100.00	75.00	100.00	82.05	97.06	<b>93.26%</b>
% de perfiles cuyo ajuste es mejor el potencial	0.00	0.00	25.00	0.00	17.95	2.94	<b>6.74%</b>

Definición de la mejor ecuación de equilibrio y sus parámetros

Como se ha visto en el apartado anterior, en general la ecuación que mejor explica la forma de la duna primaria, (considerando la parte cóncava del perfil y su conexión con la playa seca) es la V.1:

$$y = a * e^{-b*x} - c$$

Donde y es la localización del punto en la vertical del perfil, que a su vez depende de la distancia horizontal de la cresta de la duna (x) y de los parámetros de forma de la curva (parámetros a, b y c).

La ecuación exponencial tiene la ventaja de presentar una asíntota que es equivalente a la parte de menor pendiente perteneciente a la playa seca/berma.

En concordancia con el modelo conceptual, se hace la interpretación de cada parámetro de la ecuación, para que se pueda entender su significado y aplicación (Figura V.5):

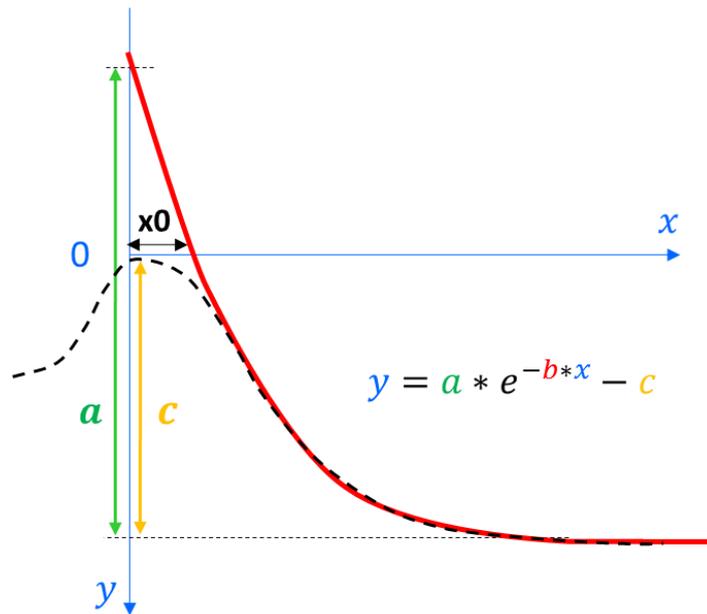


Figura V.5 –Presentación visual de los parámetros de la ecuación exponencial para las dunas primarias

$a$ = es el parámetro que indica la distancia en el eje Y desde la asíntota de la curva hasta donde la curva cruza el eje Y.

$b$ = representa la concavidad o el cuán rápido la curva llega a su asíntota. Cuanto mayor el valor de  $b$  mayor es la concavidad de la curva.

$c$ = corresponde a la distancia vertical entre  $Y=0$  y la asíntota de la curva, o sea, la llamada altura del ajuste ( $H_{max}$ ) del modelo conceptual. Estará correlacionado a la altura de la duna primaria.

$x_0$  = representa la distancia horizontal de la cresta de la duna, o sea, desde el  $X=0$  hasta donde la curva del modelo del perfil cruza el eje X. Estará relacionado a la anchura del tramo convexo de la duna primaria o la anchura de la cresta de la duna. Considerando la ecuación exponencial V.1, si  $y=0$  se obtiene  $x_0$  por:

$$x_0 = \left(-\frac{1}{b}\right) * \ln(c/a) \quad (V.6)$$

Si sabemos el valor de  $x_0$ ,  $c$  y  $b$ , calculamos  $a$  con:

$$a = c * e^{b*x_0} \quad (V.7)$$

#### 2.4. Parámetros de la ecuación de perfil de equilibrio de las dunas primarias

A partir de la definición de la ecuación exponencial y la interpretación de sus parámetros, en este apartado se analiza detalladamente cada uno de estos. Para cada parámetro, se comprueba su relación con los parámetros morfométricos de los 193 perfiles y de la dinámica marina y eólica de cada playa estudiada.

##### Parámetro $b$

Tal y como se ha explicado anteriormente, el parámetro  $b$  representa tan rápido la duna aumenta su altura desde la parte recta de la playa seca, o sea, la concavidad de la duna. En la Figura V.6 y la Tabla V.2 se muestran los resultados encontrados para los valores de  $b$ .

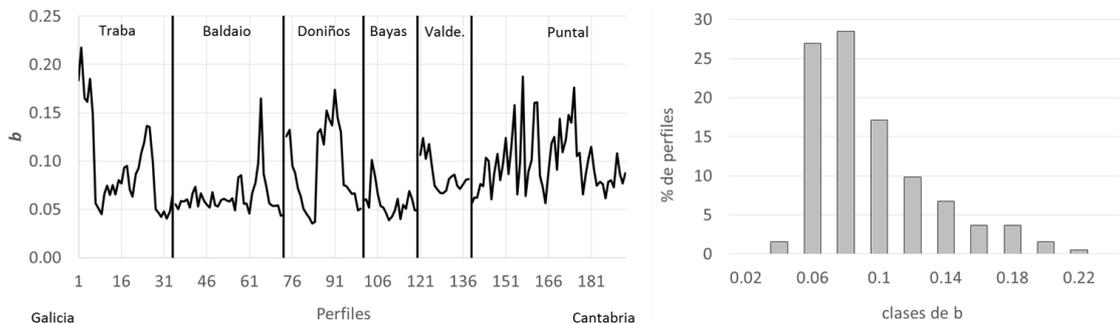


Figura V.6 – Variación por perfil/ playa de los valores de  $b$  e histograma de frecuencia de cada clase de  $b$ .

Tabla V.2 – Resultado de los valores del parámetro  $b$  de la ecuación exponencial, para cada playa y general (todos los datos)

Playa	PuntalSomo	Valdear.	Bayas	Doniños	Baldaio	Traba	General
<b><math>b</math> media</b>	0.1	0.08	0.06	0.09	0.06	0.09	<b>0.08</b>
<b><math>b</math> mediana</b>	0.09	0.08	0.05	0.08	0.06	0.08	<b>0.07</b>
<b>mínima</b>	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	<b>0.04</b>
<b>máxima</b>	0.19	0.12	0.1	0.17	0.16	0.22	<b>0.22</b>
<b>desviación</b>	0.03	0.02	0.01	0.04	0.02	0.05	<b>0.04</b>

A partir de las evidencias obtenidas a través del análisis de evaluación de la forma de las dunas primarias por el algoritmo  $k$ -medias, presentado en el Capítulo II, se puede suponer que, a pesar de la variación de valores encontrados para  $b$ , la concavidad de las dunas en equilibrio es relativamente constante. Correlaciones de  $b$  con el tamaño del sedimento, con los indicadores del potencial eólico o con la dinámica marina demostraron que este parámetro parece no ser influenciado por las características ambientales. Tampoco se encontró correlaciones relevantes entre los parámetros morfométricos de los perfiles y el  $b$  (datos no enseñados). Merece la pena mencionar que, teóricamente, la característica morfológica de una forma suavemente cóncava en la parte inferior de la duna tiene sentido si consideramos que la duna está en equilibrio. Descripciones de la morfología de las dunas frente a las dinámicas suelen afirmar que una forma convexa en su tramo inferior puede indicar que hay mucha deposición por el viento y que la duna está avanzando sobre la playa; sin embargo, si la forma tiene una característica acercándose a un escarpe, indicará impacto frecuente del oleaje y, por lo tanto, una condición de retroceso de la duna con relación a la línea de costa.

Por consiguiente, se propone utilizar el valor de la mediana  $b=0.07$  y volver a ajustar todos los perfiles a la ecuación:

$$y = a * e^{-0.07*x} - c \quad (V.8)$$

Aunque los ajustes con  $b$  fijo son menos buenos, comparado con los ajustes realizados con  $b$  libre (mejor ajuste) (Figura V.7), siguen presentando excelentes coeficientes de bondad  $R^2$  y RMSE (Figura V.8) con más de 85% de ajustes con  $R^2 > 0.97$  y  $RMSE < 0.3$ .



Figura V.7 - Comparación de la bondad de los ajustes con el parámetro  $b$  libre o fijo al valor de 0.07.

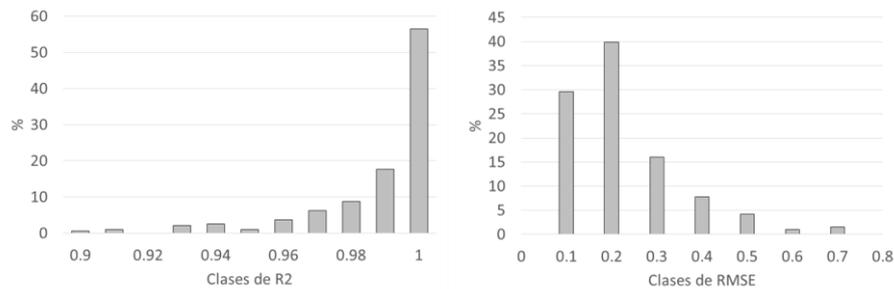


Figura V.8 – Bondad de los ajustes considerando  $b$  fijo (0.07)

Por lo tanto, se decidió utilizar la ecuación con el parámetro  $b$  fijo (ecuación V.8). A continuación, se presentan los resultados de los demás parámetros, obtenidos con este nuevo ajuste de la ecuación del perfil de equilibrio de las dunas primarias. Se presentan también los resultados de las correlaciones propuestas por el modelo conceptual.

### Parámetro $c$

Según el modelo conceptual (Figura V.1) y la interpretación de la ecuación exponencial (Figura V.5), el parámetro  $c$  refleja la distancia vertical desde la cresta de la duna primaria hasta la asíntota de la curva del perfil. El valor de  $c$  refleja la altura de la duna, aunque su valor es un poco mayor, puesto que hay una zona de intersección entre la parte de menor pendiente (asíntota de la curva correspondiente a la playa seca) y el cambio de pendiente que caracteriza el inicio de las dunas primarias. Se debe recordar que la cota

de este cambio de pendiente del perfil, es decir, el pie de la duna, corresponde a la cota de inundación con período de retorno de 10 años (CI\_10a).

En la Figura V.9 se presenta la comparación entre la altura de la duna (desde la cota correspondiente a la de inundación de 10 años hasta la cresta de la duna) y los valores de  $c$  obtenidos con el ajuste de los perfiles a la ecuación V.8.

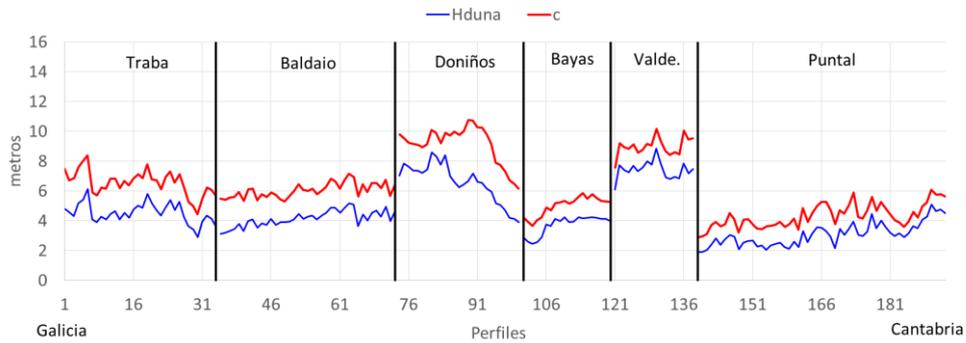


Figura V.9 - Variación de valores de  $c$  y altura de la duna ( $H_{duna}$ , desde cota de inicio=CI\_10a hasta la cresta de la duna) para cada uno de los 193 perfiles.

La diferencia entre los valores de  $c$  y de altura de la duna es relativamente constante, siendo que en más de 85% de los perfiles esta diferencia varía entre 1 y 2.5m, con media de 1.7m. Esto indica que esta es la altura de la zona de transición entre la parte recta de la playa seca y la duna primaria, donde hay una curvatura cóncava, pero no suficientemente marcada como para caracterizar un cambio de pendiente a la hora de identificar el pie de la duna primaria.

El diagrama de correlación-dispersión entre altura de la duna y el parámetro  $c$  está presentado en la Figura V.10.

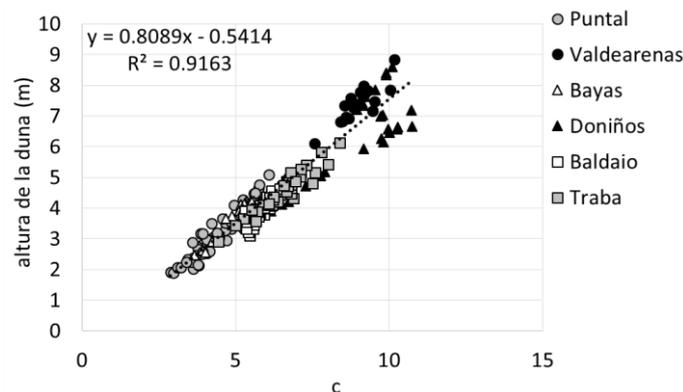


Figura V.10 – Correlación entre el parámetro  $c$  y la altura de la duna (desde cota de inicio=CI\_10a hasta la cresta de la duna)

Como se ha indicado en las bases teóricas, el transporte eólico potencial medio, considerando la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP\alpha$ ), es el parámetro que mejor estima el tamaño de las dunas primarias en equilibrio, para la condición asumida, es decir, sin restricción del fetch. Si el parámetro  $c$  está correlacionado con la altura de las dunas primarias, también estará con  $DP\alpha$ . Se hizo esta correlación y los

resultados están presentados en la Figura V.11, donde se observa que esta relación se confirma, siendo el mejor ajuste una potencial.

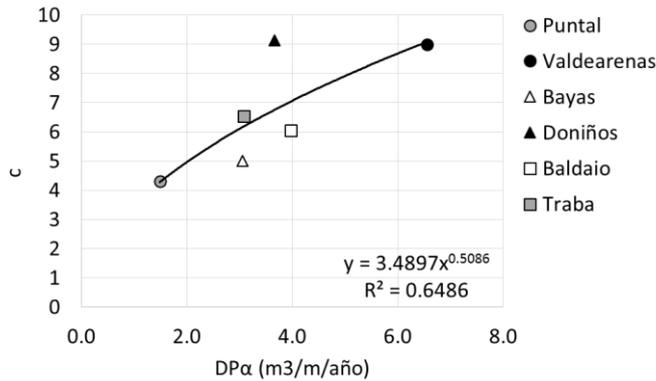


Figura V.11 – Correlaciones entre el parámetro  $c$  y el parámetro del transporte eólico potencial considerando la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP\alpha$ ).

### Parámetros $a$ y $x_0$

El parámetro  $a$  no presenta directamente un significado en la forma de la duna primaria, sin embargo, es importante, junto con el parámetro  $c$  y con el  $b$  fijo en 0.07, en la definición del parámetro  $x_0$ . El parámetro  $x_0$  representará la anchura del tramo convexo de la duna, correspondiente a la cresta de la duna, y estará relacionado con la anchura de toda la duna primaria. Estas correlaciones se muestran en la Figura V.12.

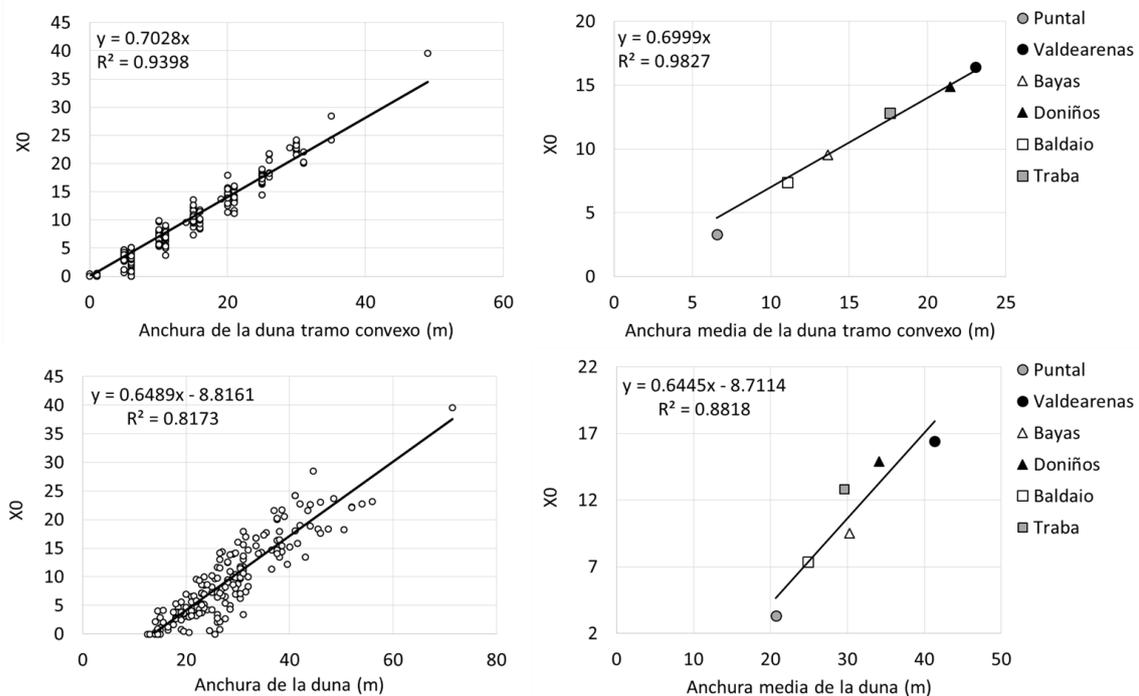


Figura V.12 - Relación entre  $x_0$  y la anchura de la duna solamente del tramo convexo (arriba) y de toda la duna (abajo)

Considerando que existen fuertes correlaciones entre los parámetros indicadores de tamaño de las dunas primarias (relaciones alométricas presentadas en el Capítulo II), se

supone que, si  $x_0$  está relacionado con la anchura de la duna también estará relacionado con el parámetro definidor del tamaño de la duna, que es el  $DP\alpha$ . El resultado de esta correlación está presentado en la Figura V.13.

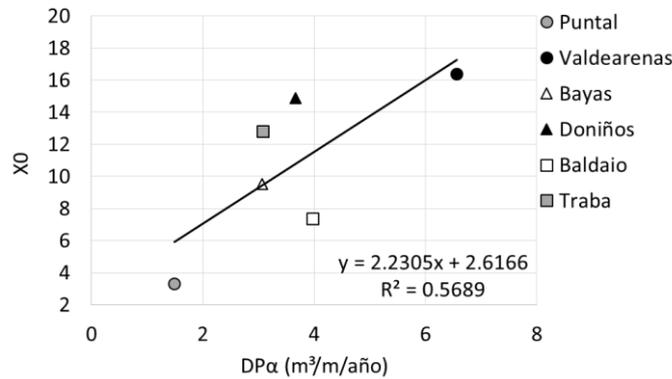


Figura V.13 – Correlación entre el parámetro  $x_0$  y el transporte eólico potencial considerando la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP\alpha$ ).

### 3. Metodología para aplicar el modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias

Basado en lo expuesto anteriormente se propone que la metodología para determinar las características del perfil de equilibrio de una duna primaria, a ser construida o recuperada en una determinada playa, es la siguiente:

- El tamaño del sedimento a ser utilizado en las dunas será semejante al utilizado en la playa seca. Sin embargo, hay que recordar que, debido a la selección por la actividad eólica, el tamaño del sedimento de las dunas tiende a tener la proporción de 0.95 del tamaño del sedimento de la playa seca y de 0.87 del tamaño del sedimento de la zona intermareal.

- Con los datos de tamaño de grano de la duna, velocidad y dirección del viento que actúan en la playa, medidos durante varios años, se calcula el transporte eólico potencial medio anual, considerando la dirección del viento ( $DP\alpha$ ). Para estos cálculos se utilizan las ecuaciones propuestas por *Coastal Engineering Manual* de *US Army Corps of Engineers* (Hsu & Weggel 2002) y la corrección por la dirección del viento por la ecuación de Nickling & Davidson-Arnott (1990) (formulaciones recogidas en el apartado 2.2 del Capítulo III de esta tesis).

- A partir de  $DP\alpha$  se calcula el parámetro  $c$  mediante la relación:

$$c = 3.49 * DP\alpha^{0.51} \quad (V.9)$$

- El parámetro  $x_0$  se obtiene a partir de la relación:

$$x_0 = 2.23 * DP\alpha + 2.62 \quad (V.10)$$

- Por lo tanto, es posible obtener  $a$  mediante la ecuación (V.7), utilizando valor de  $b$  fijo en 0.07.

- La altura de la duna desde la cresta hasta el pie se obtiene como en función de  $c$ , a partir de la relación:

$$H_{duna} = 0.81c - 0.54 \quad (V.11)$$

- A partir de estos valores es posible dibujar la duna primaria, considerando que entre  $X=0$  y  $X=x_0$  la forma de la duna será una meseta. A partir de  $x_0$  se aplica la ecuación de perfil de equilibrio propuesta (ecuación V.8) hasta la altura  $H_{duna}$ .

- A partir de este punto la anchura de playa seca mínima necesaria será determinada por la metodología presentada en el apartado 4.4 del Capítulo III.

Resultados de la aplicación de esta metodología

Al aplicar la metodología se define un perfil de equilibrio de la duna primaria y playa seca mínima por playa (Figura V.14).

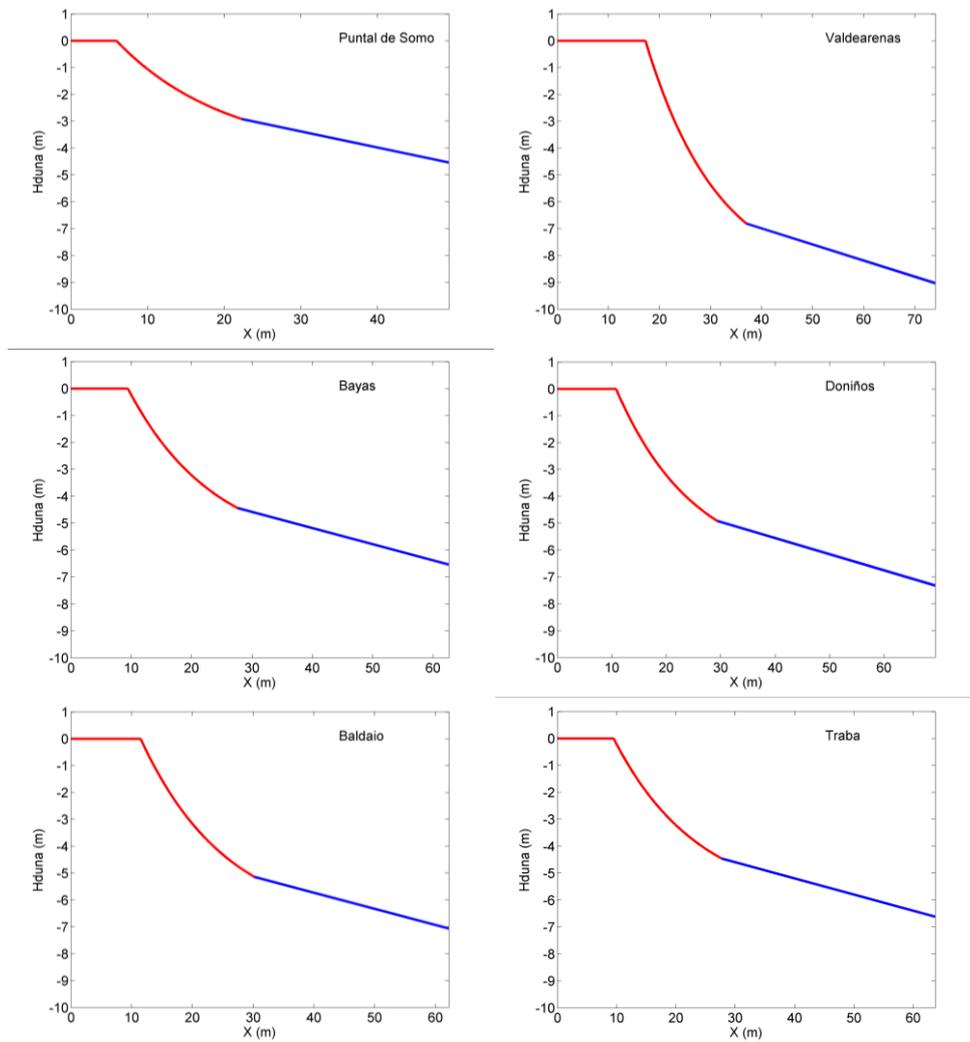


Figura V.14 – Perfiles de equilibrio de la duna primaria y playa seca mínima, de las áreas de estudio de esta tesis, obtenidos a partir de la metodología propuesta.

#### 4. Comparación del modelo con datos reales

La evaluación y propuesta de modelos de perfil de equilibrio de playa fue realizada por varios autores, con diversas variaciones en el tipo de ecuación, sus parámetros y configuración del perfil de equilibrio (Bruun 1954; Dean 1977; Dean 1991; Bodge 1992; Komar & McDougal 1994; González et al. 1999; Bernabeu et al. 2001; Bernabeu et al. 2002; Requejo et al. 2005; Romańczyk et al. 2005; Dai et al. 2007; Aragonés et al. 2016; Díez et al. 2017b). De acuerdo con la revisión bibliográfica, esta es la primera vez que un modelo de perfil de equilibrio para dunas primarias es propuesto. A continuación, se presenta una evaluación de su ajuste y capacidad de predicción del modelo, además de posibles dificultades a la hora de ser aplicado.

##### Comparación entre el modelo y los perfiles reales

Los ajustes de los perfiles reales a la ecuación exponencial V.8 demostraron ser muy buenos, con más de 85% de los ajustes con  $R^2 > 0.97$  y  $RMSE < 0.3$ . El modelo propuesto no considera la forma convexa de la parte superior del perfil y, por lo tanto, su volumen será superior al real. Se comparó el volumen obtenido con el modelo y el real y se constató que la diferencia no es importante, siendo en media un 3.4% superior, con máximo de 6.5-7% para las dunas más grandes (Tabla V.3). Algunos ejemplos del ajuste pueden ser apreciados en la Figura V.15.

Tabla V.3 – Porcentaje medio (considerando los 193 perfiles evaluados) de diferencia entre el volumen obtenido por el modelo exponencial y los valores de volumen real (desde el inicio de las dunas =CI\_10a hasta la cresta)

	<b>Ecuación exponencial con <math>b=0.07</math></b>
<b>Puntal</b>	0.78%
<b>Valdearenas</b>	6.49%
<b>Bayas</b>	2.30%
<b>Doniños</b>	6.93%
<b>Baldaio</b>	2.63%
<b>Traba</b>	4.67%
<b>Todos los perfiles</b>	<b>3.4%</b>

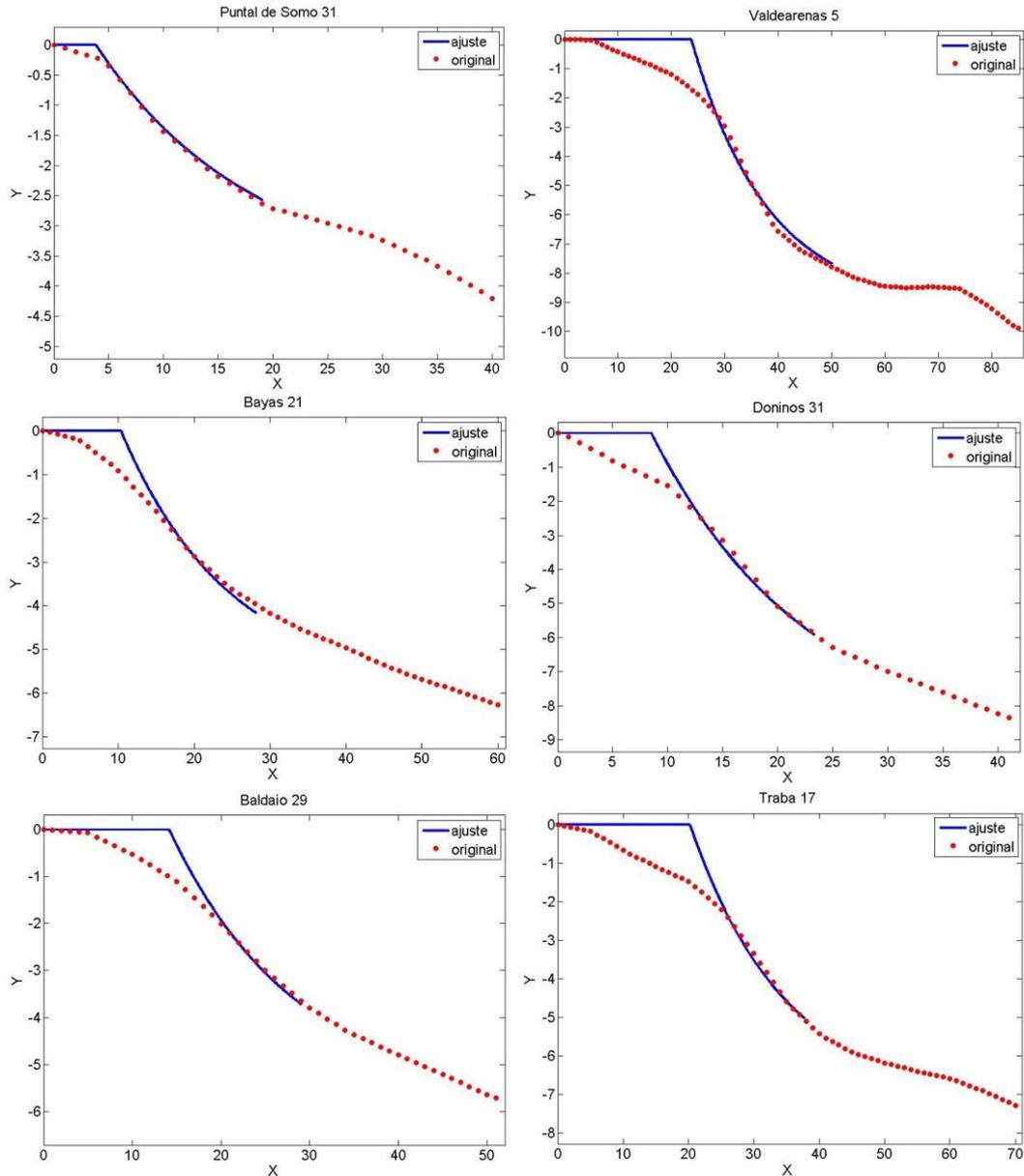


Figura V.15 - Ejemplos de aplicación del modelo de perfil de equilibrio con la ecuación exponencial y  $b=0.07$  (ecuación V.8).

### Capacidad de predicción del modelo

Un punto a tenerse en cuenta es que, en esta primera aproximación, se considera que las dunas estarán totalmente desarrolladas, o sea, la anchura del fetch disponible (anchura de la playa) es mayor que la anchura del fetch crítico y su tamaño dependerá exclusivamente de  $DP\alpha$ . Son necesarias futuras investigaciones para poder definir una metodología que permite calcular el fetch crítico y un coeficiente que refleje la limitación del fetch, si existente.

Se ha propuesto que el parámetro  $c$  de la ecuación V.8 y la anchura  $x_0$  (cresta de la duna) sean una función del transporte eólico potencial considerando la dirección del viento con relación a la costa ( $DP\alpha$ ). La correlación de estos parámetros y  $DP\alpha$  no es perfecta

( $R^2 \approx 0.6$ ) lo que puede ser causa de algún error a la hora de su estimación. Debido a que hay solamente un valor de  $DP\alpha$  por playa, habrá solamente una forma de perfil de equilibrio de dunas primarias por playa. Si se quiere tener varios perfiles de equilibrio de duna por playa, se necesita el transporte eólico potencial (medio, considerando varios años) a lo largo de la misma, lo cual es difícil de tener con datos medidos, a no ser que se utilicen modelos numéricos de viento forzados con datos de varios años medidos en boyas.

Se comparó las estimaciones de alturas, volúmenes y anchuras de la cresta, que equivale a la anchura del tramo convexo y está representado en el modelo por el parámetro  $x\theta$ , con los valores reales medios medidos. Los resultados de esta comparación se muestran en la Figura V.16 y Tabla V.4. Se puede observar que de manera general el modelo subestima la anchura de la parte convexa de las dunas primarias y parece ser que el parámetro  $x\theta$  es el que presenta la peor previsión a través del modelo. Eso puede ocurrir porque esta parte de las dunas presenta alguna variación de forma, como ha sido verificado en el Capítulo II. Posiblemente la vegetación y el historial de avance y retroceso de la duna primaria influirán de manera importante en este tramo de la duna. Se propone en futuras líneas de investigación evaluar la influencia de la vegetación en la forma y extensión del tramo convexo de las dunas primarias, además de otros posibles parámetros, mejorando así el cálculo de su anchura.

A pesar de ser una primera aproximación y que la relación entre  $DP\alpha$  y los parámetros de tamaño de la duna primaria no son perfectos, la comparación entre los valores medios reales de altura y volumen de la duna y los estimados a partir del modelo parecen ser razonables (Figura V.16 y Tabla V.4), excepto para las playas de Baldaio y Doniños.

Para la playa de Baldaio el modelo sobrestimó el volumen de la duna en casi 70%. Si analizamos las relaciones obtenidas entre el potencial eólico y los parámetros de tamaño de las dunas primarias (Capítulo III), verificamos que Baldaio presenta un tamaño medio de duna menor que el que indica el potencial eólico (Figura III.8). Con la inserción del ángulo del viento en el cálculo del potencial eólico, el volumen de duna se acerca más a lo previsto por la relación (Figura III.9), pues esta playa presentó un ángulo medio de incidencia del viento bastante alto ( $\alpha=55^\circ$ ), pero su tamaño sigue por debajo del previsto por este parámetro ambiental. En este caso, se puede suponer que otros factores influyen en la playa y hacen con que su anchura sea menor que la anchura del fetch crítico, y por lo tanto esta duna no estaría totalmente desarrollada.

La playa de Doniños presentó un volumen estimado de un 40% menor que el volumen real. Un hecho que hay que considerar es que esta playa presenta variaciones importantes en la anchura y cota de la playa causadas por la presencia de mega cúspides, que pueden generar imprecisiones en sus medidas morfométricas. Otra hipótesis que podría explicar esta diferencia es que, para esta playa, no fue posible obtener valores de tamaño del sedimento de las dunas, siendo estimados a partir del tamaño del sedimento de la zona

intermareal. Existe la posibilidad de que el tamaño del sedimento sea más pequeño, lo que resultaría en un transporte eólico potencial más alto, lo que justificaría su tamaño.

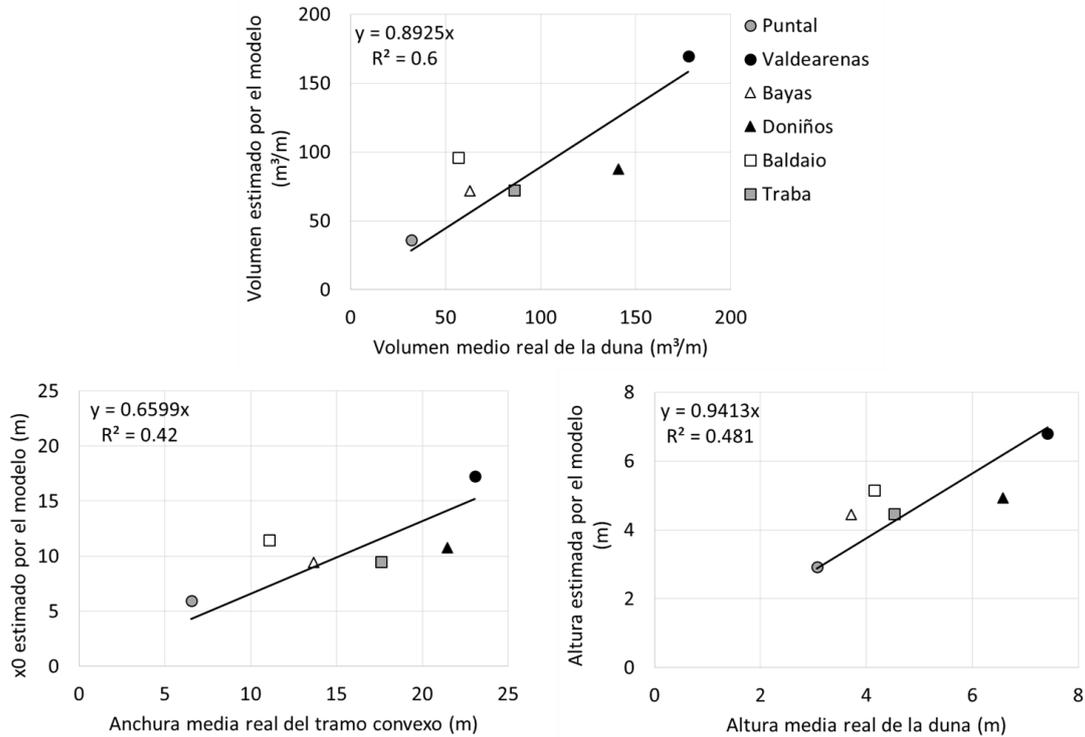


Figura V.16 – Comparación entre los parámetros de tamaño de la duna primaria medidos y obtenidos a partir de la aplicación del modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias.

Tabla V.4 –Parámetros de tamaño de la duna primaria medidos y obtenidos a partir de la aplicación del modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias y comparación a través del porcentaje de diferencia (Lconvex= anchura del tramo duna convexa (m); Hduna=altura de la duna (m); VolDuna= volumen de la duna primaria (m³/m).

		Puntal	Valdea.	Bayas	Doniños	Baldaio	Traba
Valores medios medidos	Lconvex	6.55	23.06	13.65	21.44	11.08	17.59
	Hduna	3.07	7.42	3.72	6.58	4.15	4.53
	VolDuna	31.85	177.63	62.77	140.96	56.77	85.96
Valores medios obtenidos a partir de la aplicación del modelo ( $b=0.07$ , $c$ y $x_0$ dependientes de $DP\alpha$ , Hduna dependiente de $c$ )	$x_0$	5.94	17.25	9.44	10.78	11.47	9.49
	Hduna	2.92	6.81	4.44	4.92	5.15	4.46
	VolDuna	36.08	169.59	71.82	87.62	96.08	72.10
% de diferencia entre el modelo y el valor medido	$x_0$ y Lconvex	-9.3%	-25.2%	-30.8%	-49.7%	3.6%	-46.1%
	Hduna	-4.9%	-8.3%	19.6%	-25.2%	24.1%	-1.5%
	VolDuna	13.3%	-4.5%	14.4%	-37.8%	69.2%	-16.1%

A pesar de estos casos de menor exactitud en el volumen estimado de las dunas primarias, las demás playas presentaron diferencias de entre 4 y 16%, bastante aceptables, especialmente cuando se trata de una estimación a ser aplicada en la recuperación de una duna primaria.

#### Otras limitaciones y dificultades en la aplicación del modelo

Una limitación existente en la aplicación del modelo propuesto para definir el perfil de equilibrio de dunas primarias es su dependencia con datos de vientos de varios años. Los datos normalmente disponibles, registrados en aeropuertos, muchas veces no reflejan las características de los datos de vientos en la playa. A pesar de que no se utilizó datos de medidas de viento *in situ*, los datos medidos en boyas (durante varios años y con las debidas correcciones) son representativos de la dinámica eólica en la playa. Cabe resaltar que las metodologías de reanálisis para generación de datos de vientos evolucionaron mucho en los últimos años y pueden ser una fuente de datos interesantes a falta de medidas directas de largo plazo (Menendez et al. 2014).

En el caso de datos medidos en boyas y/o de reanálisis, existe la necesidad de seleccionar los vientos *onshore*, no influenciados por los acantilados y/o que tengan un ángulo entre  $\pm 75^\circ$  con respecto a la perpendicular a la línea de las dunas. Esta selección depende de la evaluación de la zona circundante a la playa y puede depender parcialmente de la decisión del investigador.

De acuerdo con el modelo teórico de funcionamiento propuesto en el capítulo IV de esta tesis, debido a que no se evaluaron casos de la situación donde la influencia de la dinámica marina es despreciable, esta metodología solamente servirá para áreas donde la actuación de la dinámica costera es importante y genera playas con anchuras suficientes para que las dunas sean totalmente desarrolladas. Además, probablemente no pueda ser aplicada a playas que sufran erosión por eventos de dinámica marina excepcionales, como la inundación causada por huracanes. Esto porque en estas zonas, cada cierto tiempo, las dunas sufren rebase e inundación, pudiendo ser destruidas o seriamente impactadas. El tiempo necesario para la recuperación de la duna a su estado de equilibrio, tras un evento catastrófico, es de aproximadamente 40 años como fue indicado por Mathew et al. (2010) y, por lo tanto, en zonas afectadas por huracanes las dunas primarias, muchas veces, no tienen el tiempo suficiente entre eventos para llegar a una condición de equilibrio a largo plazo.

El modelo propuesto probablemente funciona mejor en playas intermedias, dado que es el estado morfodinámico de la mayoría de los perfiles analizados en la presente tesis. Las playas reflejantes suelen caracterizarse por tener tamaño de grano grueso y poca energía del oleaje que hace que la anchura de playa sea muy restringida. Además, suelen tener una cresta de berma que causa una separación en el flujo del viento, ocasionando un potencial de transporte eólico menor, tal como afirman Short & Hesp (1982). Estos autores

indican que las características de playas reflejantes hacen que haya poca capacidad de transporte eólico y, debido a esto, menor probabilidad de desarrollo de las dunas primarias.

Para las playas disipativas, la teoría de Short & Hesp (1982) indica que son las que presentan mayor potencial para el desarrollo de las dunas primarias, debido a la presencia de sedimento fino y una playa típicamente recta y de poca pendiente. A pesar de que este modelo es un buen indicador (*proxy*) de la morfodinámica conjunta entre playa y duna primaria, el mismo no contempla las situaciones de limitación en el desarrollo de dunas primarias en playas disipativas. Tal como se discutió previamente en el Capítulo III, algunos estudios verificaron que en casos de playas disipativas, justamente debido a su playa característicamente plana y con poca pendiente, el fetch es constantemente inundado, minimizando el transporte eólico, y las dunas primarias son más frecuentemente impactadas por el oleaje (Houser & Mathew 2011). Otra característica que puede limitar el desarrollo de las dunas primarias es el hecho de que las playas disipativas presentan una playa intermareal ancha, no obstante, la playa seca muchas veces es estrecha, y como además presenta una continuidad muy suave con la playa intermareal, el sedimento estará constantemente mojado, lo que hace que el transporte eólico se vea reducido (p.ej. tal como se ha visto en el estudio de Miot da Silva 2011). Esta tendencia de que perfiles de playas próximas al estado morfodinámico disipativo presentan dunas primarias más pequeñas también fue observada en esta tesis. Supuestamente se cree que, para las playas disipativas, la aplicación del modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias propuesto en esta tesis deberá agregar coeficientes que contemplen esta limitación.

Finalmente, es necesario resaltar que este modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias se refiere a “media duna primaria”, pues solamente evalúa y propone el perfil de equilibrio de la cara hacia el mar. No se propone una forma para la parte de la depresión de deflación eólica existente por detrás de las dunas primarias, por entender que esta será fuertemente influenciada por la vegetación, el historial de progresión/regresión de las dunas primarias y otros factores que escapan del objeto de esta investigación. Vale recordar que existen modelos que prevén el retroceso causado por eventos extremos (Kriebel & Dean 1993; Komar et al. 1999; Larson et al. 2004) y que las dunas primarias tendrán que tener una anchura y un volumen mínimos para soportar tales eventos.

## 5. Conclusiones

Partiendo de los resultados encontrados de la evaluación morfológica de las dunas primarias (Capítulo II), de su relación con la dinámica ambiental (Capítulo III) y de su funcionamiento a largo plazo (Capítulo IV) se propuso un modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias.

Este modelo plantea que la forma de la duna primaria será una recta en la cresta y una curvatura cóncava hasta encontrar con la playa seca. Esta curvatura es descrita por una ecuación exponencial. El parámetro  $b$  que define la concavidad de la curva es,

aparentemente, constante y con valor de 0.07. Por lo tanto, la forma de la duna primaria en equilibrio puede ser descrita por:

$$y = a * e^{-0.07*x} - c \quad (V.8)$$

El parámetro  $c$  está asociado a la altura de la duna, que va desde la cota asociada a la de inundación con período de retorno de 10 años en su base hasta el punto máximo de la cresta de la duna. El parámetro  $x_0$ , que representa la anchura de la cresta de la duna, está asociado a la anchura del tramo duna convexa. Tanto el parámetro  $c$  como  $x_0$  pueden ser obtenidos a partir del transporte eólico potencial considerando la dirección del viento con relación a la línea de costa ( $DP\alpha$ ), a partir de las relaciones:

$$c = 3.49 * DP\alpha^{0.51} \quad (V.9)$$

$$x_0 = 2.23 * DP\alpha + 2.62 \quad (V.10)$$

La metodología del cálculo de  $DP\alpha$  se muestra en el apartado 2.2 del Capítulo III de esta tesis.

A partir de los parámetros  $b=0.07$ ,  $x_0$  y  $c$  se obtiene  $a$  como:

$$a = c * e^{0.07*x_0} \quad (V.7)$$

La altura de la duna es una función de  $c$ :

$$H_{duna} = 0.81c - 0.54 \quad (V.11)$$

Se aplicó este modelo en 192 perfiles (seis playas) mostrando una buena predicción a la hora de estimar parámetros asociados a la morfología de la duna primaria, como son su altura y volumen. Existe una menor precisión a la hora de estimar  $x_0$ , lo cual se debe a que este parámetro depende de otras variables que no han sido tenidas en cuenta, como la vegetación y el comportamiento histórico de avance y retroceso de una duna primaria.

# CAPÍTULO VI

## Consideraciones finales y futuras líneas de investigación



## **IV. Consideraciones finales y futuras líneas de investigación.**

El objetivo general de esta tesis, titulada “*Análisis morfológico de las dunas primarias costeras y definición de los parámetros controladores de su forma de equilibrio*”, es el de proponer un modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias.

Para alcanzar este objetivo general se evaluó la morfología y forma de 193 perfiles de dunas primarias próximas al estado de equilibrio, pertenecientes a 6 playas del litoral norte de España. Tras esta caracterización, se trató de identificar qué aspectos de la dinámica ambiental determinan las características del perfil de equilibrio de las dunas primarias, como tamaño y posición, además de proponer un modelo de funcionamiento a largo plazo. Basado en los resultados encontrados, se propone un modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias y una metodología para su aplicación.

A continuación, se resume las principales conclusiones y contribuciones de esta tesis. Al final se presenta una serie de sugerencias de futuras líneas de investigación a realizar, con el intuito de complementar, validar y mejorar la primera aproximación del modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias.

### **1. Conclusiones finales y aportaciones de esta tesis**

Fueron evaluados 193 perfiles perpendiculares a la línea de costa, obtenidos a partir de un modelo digital de terreno, seleccionados rigurosamente con el objetivo de obtener los que representen la duna primaria en equilibrio.

Al evaluar la morfología de esos perfiles fue posible verificar una variación en los parámetros de tamaño de las dunas primarias. Se observó que las dunas primarias en equilibrio representan un importante porcentaje ( $\approx 50\%$ ) del volumen de todo el backshore, lo que confirma que este elemento morfológico es importante como almacenamiento de sedimento a ser transferido a la playa durante eventos extremos, contribuyendo así para la estabilidad de la zona litoral. Aparentemente la morfología de las dunas primarias en equilibrio es parcialmente independiente del tamaño del sedimento, por sí solo, y de las características de la playa adyacente. Se identificó que hay una fuerte relación entre los parámetros morfométricos indicadores del tamaño de la duna primaria, o sea, altura, anchura, volumen y pendiente, denominada relaciones alométricas. Al final de este análisis se comparó los resultados con investigaciones previas y se verificó que son relativamente pocos los estudios que evalúan la morfometría de las dunas primarias y sus relaciones. Por lo tanto, esta tesis viene a contribuir para la caracterización de las dunas primarias consideradas en equilibrio y sus relaciones alométricas.

Se aplicó el algoritmo *k*-medias para evaluar la variación de la forma del perfil de las dunas primarias. Aparentemente es la primera vez que se evalúan posibles variaciones en la forma del perfil de dunas primarias en equilibrio. A partir de una segmentación del perfil del sistema playa seca/dunas primarias, y adimensionalización de sus tramos “duna

tramo convexo”, “duna tramo cóncavo” y “playa seca”, se verificó que las dunas primarias presentan una forma poco variable, principalmente en su tramo cóncavo, a pesar de los diferentes tamaños y pendientes de las dunas primarias y tipos de playa seca.

Con el propósito de identificar y cuantificar la influencia de la dinámica ambiental en la morfología de la duna primaria en equilibrio, se caracterizó la dinámica eólica y marina en cada playa, a través de bases de datos de varios años. Los parámetros indicadores de estas dinámicas fueron correlacionados con los parámetros de las dunas primarias.

Los resultados indican que el tamaño de las dunas primarias está bien correlacionado con el potencial eólico. El transporte eólico potencial, estimado a través de las ecuaciones propuestas por el *Coastal Engineering Manual* de *US Army Corps of Engineers* (Hsu & Weggel 2002), con corrección en función de la dirección del viento con relación a la normal a la costa de Nickling & Davidson-Arnott (1990) ( $DP\alpha$  en  $m^3/m/año$ ), fue el parámetro que presentó la mejor correlación con los parámetros de tamaño de las dunas primarias.

La dinámica marina parece ser la responsable de la localización de las dunas primarias, pues los resultados indicaron que el posicionamiento de la duna primaria está relacionado a la cota de inundación con un periodo de retorno de 10 años. Se verificó que playas que presentaron dinámicas marinas más intensas (mayores olas, flujo medio de energía y cota de inundación) también presentaron dunas primarias más grandes. Aparentemente esto se explica por el hecho de que la dinámica marina determina la localización de la duna y cuanto más dinámica marina, más lejos la duna primaria estará del nivel medio del mar. Esto permite que las dunas primarias tengan las condiciones necesarias para su total desarrollo hasta el tamaño de equilibrio, según el modelo de funcionamiento propuesto, explicado más detalladamente a continuación.

El modelo de funcionamiento propone dos situaciones extremas: (i) si la dinámica marina no es importante, la duna primaria recibirá sedimento de la playa debido al transporte eólico, crecerá y avanzará sobre la playa. Debido a que la playa es su propia fuente de sedimento, ocurrirá una autorregulación, recibiendo cada vez menos sedimento a medida que avanza. Su posición de equilibrio será a una distancia de la línea de costa que se llamó “fetch de autorregulación”, que comprende la anchura de playa donde la duna ya no puede crecer y avanzar. Este fetch de autorregulación puede ser definido o porque la duna avanza hasta un punto donde pierde la misma cantidad de sedimento que recibe, o porque la forma de la duna impide que el transporte eólico suministre más sedimento a la misma. Estas dunas presentarán como característica de equilibrio tamaño pequeño y playa seca adyacente estrecha. La vegetación tendrá importante participación en la definición de estas características debido a su función estabilizadora. Sin esto las dunas serían erosionadas por el propio viento, retrocediendo a medida que el aporte de sedimento sea menor que su retirada.

La otra situación es: (ii) que predomine la dinámica marina. Al desarrollarse, la duna primaria recibirá sedimento de la playa, crecerá y avanzará sobre la misma. A diferencia de la situación anterior, si la dinámica marina es intensa esta impedirá el avance de las dunas primarias a partir de un cierto punto, determinado por los eventos extremos. Es decir, la dinámica marina será el parámetro responsable de la definición de la localización de la duna y de la anchura de playa mínima. Si la anchura de playa seca definida por la dinámica marina (desde la pleamar media hasta el pie de la duna) es mayor que la anchura de fetch crítico, las condiciones favorecen a la generación de dunas totalmente desarrolladas. En este caso el tamaño de las dunas primarias será una función únicamente del transporte eólico potencial anual medio.

En una situación intermedia, donde la localización de la duna es definida por la dinámica marina, pero la anchura de playa es menor que la anchura del fetch crítico, el tamaño de las dunas primarias será una función del transporte eólico potencial y un coeficiente que refleje la limitación del fetch.

Se concluyó que la actuación conjunta de las dinámicas marina y eólica es la responsable de la definición de las características morfológicas del perfil de dunas primarias en equilibrio. Este modelo de funcionamiento permite explicar las observaciones de diversos autores y alcanza exponer la actuación conjunta y la ponderación de cada una de las dinámicas en la definición de la morfología de equilibrio de las dunas primarias. Por lo tanto, esta investigación contribuye para el entendimiento del funcionamiento del sistema playa seca-duna primaria y la definición de las condiciones necesarias para obtener una duna/playa en estado estable.

Por último, como aportación innovadora, se propone una ecuación que describe la forma del perfil de equilibrio de las dunas primarias. Esta ecuación está basada en un modelo conceptual en que la cresta tendrá forma recta horizontal y el frente de la duna hacia el mar tendrá una curvatura cóncava hasta una asíntota, que está relacionada con la parte de menor pendiente del perfil, perteneciente a la playa seca. La ecuación que mejor describe este modelo conceptual es una ecuación exponencial. Considerando que las dunas estudiadas pertenecen a la condición “dunas totalmente desarrolladas”, o sea, sin limitación de fetch, los parámetros de altura de la duna y anchura de la cresta podrán ser estimados a partir del parámetro de transporte eólico potencial  $DP\alpha$ . La localización del pie de la duna será equivalente a la cota de inundación con período de retorno de 10 años. Se propone una manera de estimar la anchura de playa seca mínima necesaria para la reconstrucción de una duna primaria en equilibrio. La metodología propuesta para estimar la anchura de playa seca mínima también es innovadora.

Por lo tanto, se considera que la presente tesis viene a contribuir para el desarrollo de una metodología que permita estimar el diseño de una duna primaria en equilibrio y su playa adyacente, determinada a partir de las características ambientales del área donde se pretende implementarla.

## 2. Consideraciones para las futuras líneas de investigación

Se tiene conciencia de que algunas de las premisas definidas con el modelo conceptual son simplificaciones de una realidad extremadamente compleja, sin embargo, es una aproximación bastante aceptable y relativamente fácil de ser aplicada a proyectos de recuperación de dunas primarias y de la playa seca adyacente. Algunas de estas premisas, que pueden generar imprecisión en las estimaciones, son:

- La determinación de que la concavidad de la duna primaria es invariable ( $b=0.07$ ). Tal vez, debido a la similitud entre las áreas de estudio evaluadas, no fue posible determinar de qué depende el parámetro de concavidad  $b$ . Es posible que este parámetro sea influenciado por algún aspecto ambiental o tenga valores particulares para regiones distintas, en función del clima o de la vegetación.

- Partir de la hipótesis de que la anchura de playa disponible en los perfiles estudiados es mayor que la anchura del fetch crítico  $y$ , por lo tanto, de que el tamaño de las dunas primarias será definido solamente por el transporte eólico potencial  $DP\alpha$ . Existe la posibilidad de que las dunas estudiadas no estén totalmente desarrolladas y su tamaño dependa, en algún grado, de la anchura de playa seca. Sin embargo, debido a la dificultad en estimar el fetch crítico de las playas, no es posible comprobar esta hipótesis y/o proponer un coeficiente que relacione anchura de playa, determinada por la dinámica marina, con transporte eólico potencial para la determinación del tamaño de las dunas primarias.

- La anchura de la cresta de la duna ( $x_0$ ) también es estimada a partir de la evidencia de que esta medida está correlacionada al tamaño de las dunas  $y$ , por lo tanto, correlacionada al  $DP\alpha$ . Este parámetro fue el que presentó la menor capacidad de predicción a partir de la aplicación del modelo, probablemente por ser influenciado por otros parámetros no considerados en esta tesis, como vegetación, morfología de la parte a sotavento de la duna y/o historial de avance y retroceso de la duna primaria.

- La localización de la duna y la anchura mínima de playa seca serán determinadas por la cota de inundación con período de retorno de 10 años. Las estimaciones de cota de inundación, en régimen extremal, dependen del cálculo de la marea meteorológica, de la propagación de una base de datos de oleaje de muchos años y estimación del consecuente *runup* (ecuación de Stockdon et al. 2006), que a su vez será influenciada por la topobatimetría y determinación de la pendiente de la zona litoral. En virtud de la falta de una calibración de estas estimaciones o datos de campo que comprueben que la localización de las dunas primarias es equivalente a la cota de inundación con período de retorno de 10 años, este parámetro puede no ser exacto. Se considera correcto el supuesto de que la cota de inundación de eventos extremos es la responsable de la localización de la duna primaria y altura del pie de la duna, sin embargo, el período de retorno a ser utilizado puede presentar otros valores, dependiendo de las bases de datos utilizadas y de la precisión de las condiciones topobatimétricas seleccionadas.

Además, una aparente limitación de esta metodología es que podrá ser aplicada solamente a playas morfodinámicamente intermedias y con intensa dinámica marina. Existen evidencias de que las playas disipativas presentan factores particulares que limitan el crecimiento de las dunas primarias.

En síntesis, la propuesta de un modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias es bastante novedoso. Este modelo es una primera aproximación, con la necesidad de validar/calibrar algunas premisas. Sin embargo, los resultados de su aplicación parecen ser prometedores y aceptables en el ámbito de la ingeniería costera.

A continuación, se proponen diversas líneas de investigación a ser desarrolladas, consideradas necesarias para la calibración/validación y mejora del modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias.

### **3. Futuras líneas de investigación**

La evaluación más importante a ser realizada, tras la propuesta de este modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias, es su aplicación a otras playas y verificación de la capacidad de predicción del modelo.

Una de las limitaciones y/o dificultades de la presente tesis se refiere a bases de datos, principalmente de largo plazo, de los diversos aspectos evaluados. Por lo tanto, se sugieren estudios básicos o planes de monitorización, que permitan el mejor entendimiento de la dinámica de las playas y dunas primarias de España, como:

- Programas de obtención de datos de perfiles de playa/duna primaria de largo plazo, con alta resolución. A partir de este tipo de datos se puede identificar las situaciones en que la duna se encuentra en equilibrio y la condición de playa adyacente, colaborando así para mejorar las estimaciones de localización y tamaño de las dunas primarias en equilibrio y anchura de playa seca mínima necesaria.
- Datos reales de varios años de cotas de inundación en las playas, necesario para validar/calibrar las estimaciones de cota de inundación y su relación con la cota de inicio de las dunas primarias. Para este tipo de análisis y parte del análisis anterior es muy útil el uso de cámaras de video
- Datos de viento medidos directamente en playas, a lo largo de diversos años, y su comparación con los datos medidos en boyas. De esta manera se puede proponer correcciones del viento medido en boyas para determinar su valor en tierra, tanto de velocidad como de dirección. También merece la pena evaluar más detalladamente la posibilidad de utilizar datos de vientos de reanálisis en las estimaciones de transporte eólico potencial.

Otras sugerencias de futuras líneas de investigación se refieren al desarrollo de metodologías y/o estudios de aspectos específicos que pueden ser utilizadas para confirmar o mejorar el modelo de perfil de equilibrio de las dunas primarias:

- Determinar una metodología para estimar la anchura del fetch crítico en una playa en función de las características ambientales, como granulometría, vientos, morfología del perfil y dinámica marina. También es interesante determinar el decaimiento del transporte eólico en función de la anchura de fetch disponible respecto a la anchura de fetch crítico. La necesidad de estimar este parámetro también fue apuntalada por Davidson-Arnott et al. (2008) y Delgado-Fernandez (2010). A partir de estas metodologías sería posible confirmar la condición de dunas totalmente desarrolladas y, si no, proponer un coeficiente que, juntamente al potencial eólico  $DP\alpha$ , determinará el tamaño de equilibrio de las dunas primarias.

- Otro aspecto relacionado al transporte eólico es la determinación de la posible contribución de la zona intermareal en el transporte eólico del sedimento de la playa hacia las dunas primarias. En esta tesis se consideró que este tramo de la playa, debido al hecho de que es continuamente inundado por la marea, no contribuiría significativamente en la determinación de la condición de equilibrio de las dunas primarias. Sin embargo, algunos autores consideran que esta zona puede contribuir para el aporte de sedimento hacia las dunas primarias (p.ej. Houser 2009 y de Vries et al. 2015).

- Entender el mecanismo de transferencia de arena del perfil sumergido a la playa seca y a la duna primaria, teniendo en cuenta el estado morfodinámico de la playa y las dinámicas eólica y marina.

- Probar y/o desarrollar un modelo de perfil de equilibrio de dunas primarias para playas disipativas, evaluando si realmente existen las condiciones limitantes sugeridas por los resultados de esta tesis y por el trabajo de otros investigadores (Davidson-Arnott & Law 1996; Miot da Silva 2011; Houser & Mathew 2011). Con eso se pudo verificar si la relación entre el parámetro indicador del estado morfodinámico ( $\Omega$ ) y el tamaño de las dunas primarias se ajusta mejor a una curva gaussiana que una correlación simple, apuntalada anteriormente por Short & Hesp (1982). Si es así, será necesario incluir aspectos de estas condiciones, propiciando la propuesta de una metodología de reconstrucción de dunas primarias en playas disipativas.

- Evaluar la influencia de la vegetación en la forma de equilibrio de las dunas. Se partió de la idea de que en las dunas primarias en equilibrio hay presencia de vegetación justamente debido a su carácter estable en función del equilibrio entre fuerzas de la dinámica ambiental. Se reconoce que la vegetación tiene la importante función de estabilizar la duna primaria y, a pesar de entender que la localización y desarrollo de la vegetación será una función de la dinámica ambiental, se entiende que el estudio de su influencia en la morfología de la duna primaria en equilibrio puede complementar este modelo, principalmente en la definición de la anchura de la cresta de la duna.

- Desarrollar una metodología que pueda estimar el fetch de autorregulación, propuesto en el modelo a largo plazo de dunas en equilibrio localizadas en playa donde la influencia de la dinámica marina es despreciable.

- Evaluar la condición de equilibrio dinámico de las dunas primarias. Se supone que esta condición puede existir cuando la duna primaria no presenta estabilidad suficiente

y pierde sedimento a sotavento, pero con entrada de la misma cantidad por el lado a barlovento.

- Una vez identificados los parámetros ambientales más relevantes que definen la morfología de la playa/duna, estudiar el efecto del cambio climático en dichos parámetros (ascenso del nivel medio del mar, variación en los parámetros, como la  $H_s$ ,  $DP\alpha$ , cota de inundación,  $\Omega$ ) y sus posibles efectos a muy largo plazo en la estabilidad y características morfológicas de las dunas y playas.

- Integrar en un solo perfil del sistema playa/duna: el perfil de playa sumergida, el perfil de playa seca y el perfil de dunas primarias; definiendo sus interacciones en escalas de corto, medio y largo plazo.



# ANEXO I

## Estado del arte



## A.I. Estado del arte

### 1. Definiciones

Livingstone & Warren (1996) discutieron el fundamento teórico del término “dunas costeras”: algunas dunas están localizadas cerca de la costa debido a su generación a partir del suministro de arena, mientras otras están morfodinámicamente relacionadas a los procesos del ambiente costero. Las dunas que tuvieron como fuente, en el momento de su generación, el sedimento de la playa, pero que actualmente se encuentran en la región tierra adentro son esencialmente independientes de los procesos costeros y tienen comportamiento muy semejante a las dunas desérticas. Pueden ser dunas costeras debido a su geografía, pero no un producto directo de la dinámica de la costa. Por otra parte, las dunas que están en intercambio constante de sedimento con la playa están posicionadas en porción superior de su perfil a causa de esta interrelación, haciendo parte del sistema playa-duna, siendo llamadas dunas frontales (en inglés *foredunes*) o dunas primarias, este último término es adoptado en el presente trabajo.

Hesp (2002) y Psuty (2004) refuerzan esta definición, afirmando que las dunas primarias intercambian sedimento activamente con la playa y ocupan la posición más delantera, hacia mar, del sistema de dunas, pero no todas las dunas delanteras son dunas primarias. Otros tipos de dunas pueden ocupar la posición frontal en costas erosionadas o costas donde no es posible la formación de las dunas primarias. Ellas pueden ser transgresiva hacia tierra, debido al movimiento de todo el perfil de duna-playa, estable en su localización geográfica o moverse hacia mar (Psuty 2004).

Otras importantes unidades adyacentes a las dunas primarias, que merecen ser definidas, son:

- Dunas embrionarias: son acumulaciones arenosas incipientes de escasa altura que representan los primeros estadios de construcción dunar, localizadas en la playa alta y en transición al primer cordón dunar, habitualmente colonizadas por plantas pioneras (Gracia et al. 2009). Se encuentran en un sistema dunar progradante, pero los oleajes de los temporales invernales a menudo destruyen estas proto-dunas, que pueden volver a reconstruirse en los períodos de buen tiempo (Ley Vega et al. 2007).

- Dunas secundarias: son los cordones dunares sucesivos a la duna primaria, localizados en la parte hacia tierra. La mayoría de las veces se refiere a antiguas dunas primarias que en costas progradantes fueron sustituidas por nuevas debido al avance de la línea de costa sobre el mar. Pueden ser activas, creadas como modificación de las dunas primarias o transferencia de la arena de la playa hacia interior. En este caso representa una condición en que la arena está siendo transferida hacia tierra y pérdida del sistema de reparto de arena duna-playa (Psuty 2004).

- Depresión de deflación eólica (*Swale*): es la depresión a sotavento de la duna, generalmente creada por una acreción hacia mar de la duna primaria. Suelen ser continuos

a lo largo de la costa donde los vientos son predominantemente hacia tierra y la cobertura vegetal de las dunas primarias son de moderadas a altas (Hesp 2002).

- Casquete erosivo o caldera de abrasión (*blowouts*): es una cavidad o depresión en forma de canal, taza o platillo formada por la erosión del viento en un depósito de arena pre-existente (Hesp 2002).

- Playa seca (*subaerial beach* o *berm*): comprende la parte subaérea de la playa entre el final de la zona intermareal y el borde en tierra, que puede ser un acantilado, una duna primaria o un muro. Es la zona que es episódicamente impactada por el lavado de las olas y donde ocurre la mayor parte del transporte eólico de sedimento, formando una frontera entre la zona dominada por oleaje (playa sumergida) y dominada por vientos (dunas) (Short 1999). Algunos artículos se refieren a esta zona como berma (Sabatier et al. 2009; Hanson et al. 2010).

- Backshore: debido a que no hay un término común que denomine toda la zona que comprende el sistema playa seca/ duna primaria, algunos autores (Short & Hesp 1982; Hesp et al. 2005; Longhitano 2015) han utilizado el término backshore para referirse a estos dos sistemas: playa seca + duna primaria; el mismo adoptado en la presente tesis.

En la Figura AI.1 se muestra un esquema de un perfil del sistema playa/duna con sus principales referencias:

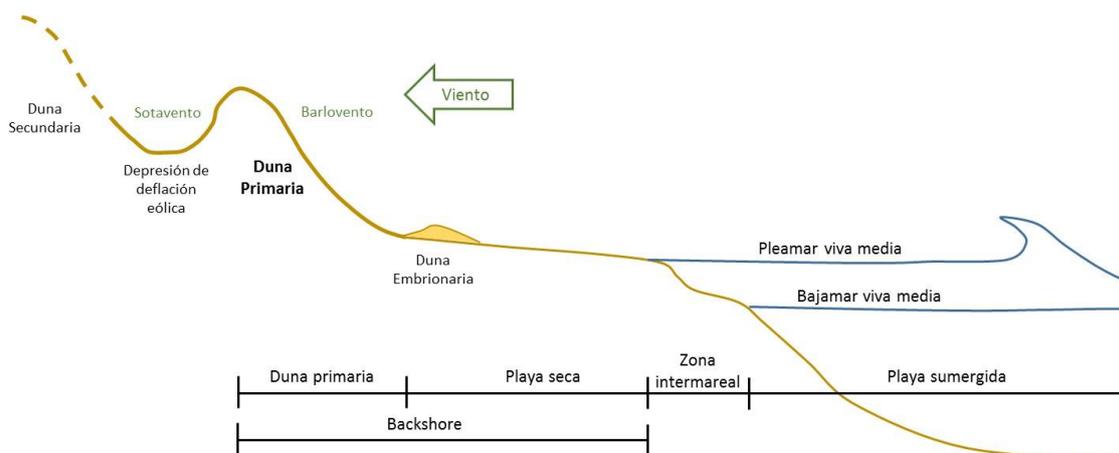


Figura AI.1 – Perfil del sistema playa-duna y sus principales referencias

## 2. Desarrollo de las dunas primarias

El inicio de la acumulación de sedimento que puede generar una duna primaria se produce cuando el flujo de arena y aire encuentra un obstáculo a su paso o algún elemento que aumente la rugosidad de la playa (Pluis & Winder 1990). Ley Vega et al. (2007) explica que estos elementos causan una reducción local del caudal de transporte, que se produce por una convergencia de las líneas de corriente a sotavento del obstáculo o por una disminución de la velocidad del viento, causando la deposición del sedimento. En la mayoría de los casos este elemento es la vegetación, pero pueden ser también detritos y obstáculos topográficos (cambios de pendiente, formas de lecho relictas, etc.). En el caso de la vegetación, el desarrollo inicial de los embriones dunares y su posterior crecimiento,

influenciados por los modos de germinación y supervivencia de las semillas, comúnmente se localizan en la cota máxima de lavado (swash) de la marea de sicigia (Hesp 1989; Hesp et al. 2005). La formación de la duna continuará hasta que, o bien el sector de costa deje de ser progradante, o bien comience a formarse una nueva duna embrionaria. En ambas situaciones el resultado será una disminución del aporte de arenas, que tendrá como consecuencia una parada en el crecimiento del cordón dunar en altura y anchura (Hesp & Martínez 2007). En el último caso se produce una sucesión de cordones dunares separados por depresiones, características de numerosos sistemas dunares costeros y que reflejan la crono-secuencia de formación de los mismos (Ley Vega et al. 2007).

La evolución del sistema de dunas transgresivas y dunas primarias, tras un evento catastrófico con eliminación total de la morfología anterior, fue descrita por Mathew et al. (2010), que utilizaron fotos históricas de 1936 hasta 2005. Proponen un modelo de evolución para las dunas de Greenwich, en Prince Edward Island (Canadá), basados en la identificación de 5 estadios:

1) Lavado (*Overwash*): ocurrió una tormenta extrema en 1923 que removió todo el sistema de dunas, creando una terraza de lavado que se extendía de 300 a 600m tierra adentro;

2) Lavado y desarrollo de dunas transgresivas (*Overwash and transgressive dune development*): en la fase de curación (*healing*) no había un sistema de dunas vegetada. La zona se caracterizaba por extensas áreas de arena desnuda sobre las terrazas, que permitieron el transporte de sedimento eólico para la formación de dunas transgresivas. En este estadio aún eran registradas inundaciones de la terraza durante las mareas vivas, lo que sugiere que los sedimentos seguían siendo suministrados a las áreas de lavado por acción de las olas. Las dunas transgresivas parecen haber sido construidas por arena de la terraza de lavado y sedimento nuevo traído por el oleaje y por el viento, desde la playa;

3) Establecimiento de la vegetación e inicio de las dunas primarias (*Vegetation stablishment and foredune initiation*): entre 1936 y 1953 ocurrió el desarrollo de las dunas primarias a lo largo del tramo de costa. La estabilización de la vegetación fue muy lenta. A partir del establecimiento de la vegetación a lo largo de la parte frontal del backshore, el suministro de sedimento de la playa hacia las áreas en tierra probablemente se redujo en esta fase. Una gran proporción del suministro de sedimento hacia las dunas transgresivas debió de haber venido de las áreas de deflación en tierra

4) Crecimiento de las dunas primarias y estabilización de las dunas transgresivas (*Foredune growth and transgressive dune stabilization*): en 1971, tras 50 años del evento, las dunas primarias eran continuas a la línea de costa, con el sedimento del litoral siendo atrapado por estas, que crecieron en anchura y altura. El crecimiento de las dunas primarias probablemente cortó el suministro de arena nueva hacia las dunas transgresivas de tierra, aunque todavía habían fuentes de sedimento en tierra y estas crecían en altura.

5) Estabilización y curación (*Stabilization and healing*): el estadio final es la estabilización de las dunas transgresivas por el esparcimiento de la vegetación.

Mathew et al. (2010) resumen que el establecimiento de estas dunas primarias tardó más de 40 años tras el evento catastrófico. A partir de entonces el sedimento proveniente de la playa se quedará atrapado en las dunas primarias y el crecimiento de las dunas transgresivas ocurrirá debido al sedimento proveniente de las zonas de deflación. Uno de los posibles factores que llevaron a la estabilización de las dunas transgresivas fue que el nivel freático (con generación de lagos de agua dulce) aumentó debido a la estabilización de las dunas primarias, lo que disminuyó el suministro de sedimento y estimuló el desarrollo de la vegetación del campo de dunas. En total, la estabilización de todo el sistema (dunas primarias + campo de dunas) tardó 60 años.

### 3. Morfología de las dunas primarias

Arens & Wiersma (1994) resumen los factores que influyen en la forma de las dunas de la costa holandesa, presentado en la Figura AI.2: la forma de la duna es influenciada de manera directa por la variación de la línea de costa a través de la erosión costera (1); por la gestión a través del (re)modelamiento mecánico de las dunas primarias (3); y por la efectividad eólica en la formación de la duna (5). Las influencias indirectas se refieren a la variación en el suministro de arena debido a la dinámica costera (2) y la influencia en la velocidad del viento por introducción de vegetación (4). La forma de la duna, a su vez, influye en la gestión, p.ej. en la definición de las intervenciones debido a requerimientos de seguridad (6); y en la dinámica eólica, p.ej. la velocidad del viento es influenciada por la altura y pendiente de la duna (7). La interferencia entre los factores se resume en las flechas (8) p. ej. la gestión debido a la erosión o acreción costera; (9) p. ej. efectos en el transporte de sedimento a largo plazo debido a la fijación de las dunas primarias; (10) p. ej. disponibilidad de arena para el transporte eólico; (11) p. ej. efectos en el transporte de sedimento a largo plazo debido a la retirada de arena por rápido transporte hacia tierra; (12) p. ej. el control de procesos eólicos por las cercas de protección; y (13) p. ej. intervención después del desarrollo de casquetes erosivos.

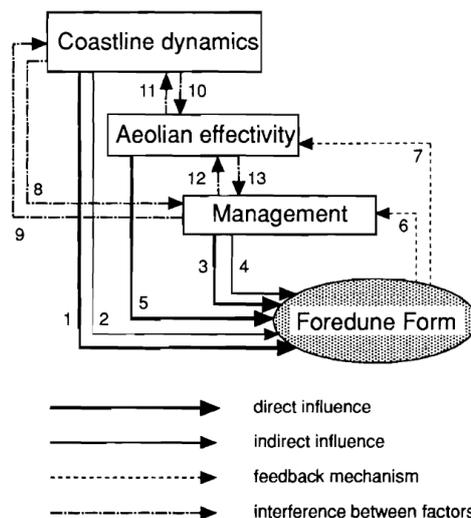


Figura AI.2 – Relaciones entre la dinámica de la línea de costa, el manejo, la actividad eólica y la forma de las dunas. (Figura obtenida de Arens & Wiersma 1994).

Un aspecto importante que influye en las características morfológicas de las dunas primarias es su interacción con la playa adyacente. Las características de la playa son muchas veces consideradas como las que definen los factores constructivos (aporte de sedimento) o destructivos (retirada de sedimento) en la duna. Los factores constructivos normalmente están relacionados con la capacidad de transferencia del sedimento de la playa hacia la duna, y dependerán de su anchura (Bauer et al. 2009; Delgado-Fernandez 2010; Hanson et al. 2010), pendiente (Iversen and Rasmussen, 1994; de Vries et al. 2012), longitud y orientación con relación al viento (Bauer & Davidson-Arnott 2002) y su grado de humedad (Nickling & Davidson-Arnott 1990; Bauer et al. 2009; de Vries et al. 2011). Los factores destructivos están definidos por la erosión de las dunas a través del impacto de olas de temporal, y que ocurrirá en mayor o menor grado dependiendo de la anchura, altura y pendiente de la playa (Larson et al. 2004; Sabatier et al. 2009; Hanson et al. 2010).

En función de la variedad de formas y de los factores que pueden influir en la morfología de las dunas y de las playas, diversos autores propusieron clasificaciones, basados en diferentes aspectos. A continuación, se presenta las clasificaciones más difundidas.

#### **4. Clasificación de la morfología de las dunas primarias**

##### Clasificación basada en el nivel de desarrollo de las dunas primarias

Hesp (2002) indicó la existencia de dos clases principales de dunas primarias:

- Dunas primarias incipientes: son las dunas primarias nuevas o en desarrollo formadas por comunidades de plantas pioneras. Dunas primarias incipientes generalmente presentan uno de los 3 siguientes tipos morfológicos: rampas (*ramps*), terrazas (*terraces*) y crestas (*ridges*). Están en un ambiente muy hostil (seco, alta salinidad, falta de humus y pH alcalino) y pocas especies son capaces de sobrevivir, con cobertura vegetal del 20%. Los oleajes de los temporales invernales muchas veces destruyen estas proto-dunas, que pueden volver a reconstruirse en los períodos de buen tiempo.

- Dunas primarias establecidas: se desarrollan a partir de las dunas primarias incipientes y son comúnmente diferenciadas por el crecimiento de especies de plantas intermediarias, muchas veces leñosas y con mayor complejidad morfológica, altura, anchura, edad y posición geográfica. Ley Vega et al. (2007) las denomina antedunas o dunas primarias (*foredune*) e indica que se sitúan inmediatamente detrás de la duna embrionaria. Estas dunas son más antiguas y altas y con frecuencia se denominan dunas blancas debido a su cobertura parcial de vegetación, del orden del 80%. Este tipo de duna es el objeto de esta tesis, pues es el tipo de duna inter-dependiente de la playa y puede alcanzar un posible equilibrio en función de los agentes constructivos y destructivos.

Clasificación basada en la variación de la línea de costa y su evolución

Hesp (2002) también propuso una clasificación cualitativa de la forma de las dunas primarias establecidas y su evolución de medio a largo plazo, en función de la variación de la línea de costa y establecimiento de la vegetación, que sintetiza la investigación de diversos autores.

Clasifica las dunas desde estables y bien vegetadas (estadio 1) hasta dunas erosionadas, con presencia de casquetes erosivos, discontinuidad lateral y poca vegetación (estadio 5) (Figura AI.3). Una duna puede permanecer por toda su existencia en un mismo estadio o evolucionar de uno a otro en función de cambios en las condiciones. El comportamiento de migración de las crestas de las dunas o cambio en su altura se muestra en las cajas A (costa estable-progresiva), B y C (costa estable-erosiva) de la Figura AI.3. La caja D señala la importancia del escarpe de las dunas durante eventos extremos, que puede ocurrir en cualquiera de los estadios (Hesp 2002).

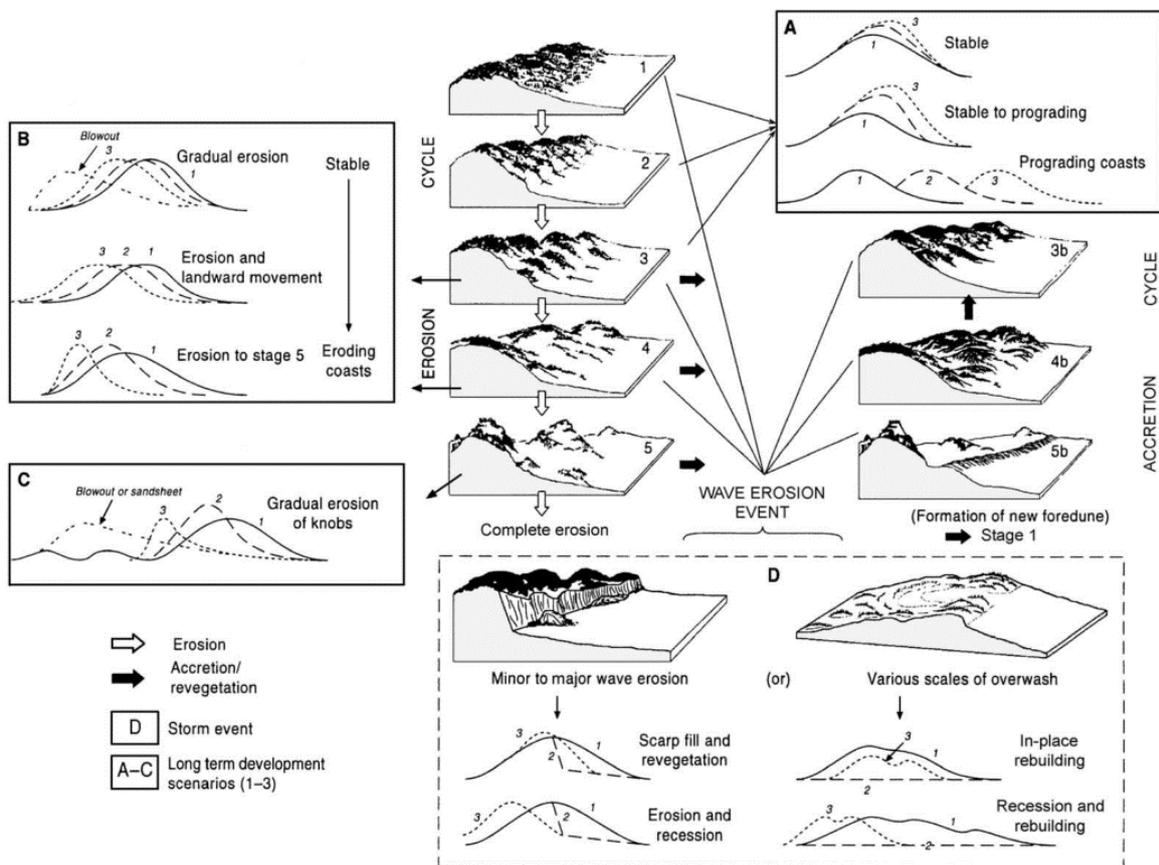


Figura AI.3 – Clasificación propuesta por Hesp (2002), que varía del estadio 1 (más estable) hasta el estadio 5 (más erosionado). Las dunas estables pueden aumentar de altura en costas estables o avanzar sobre la playa en costas progradantes (cuadro A); las dunas que sufren erosión pueden retroceder, perder altura o crear casquetes erosivos (*blowout*), dependiendo del grado de retroceso de la línea de costa (cuadro B y C). A cualquiera de los estadios un evento de temporal puede causar la formación de un escarpe (cuadro D) (Figura obtenida de Hesp 2002).

Clasificación de la forma en función de la recuperación de la duna tras un evento erosivo

Otra clasificación de la forma de la duna primaria fue desarrollada por Ollerhead et al. (2013), basada en medidas de perfiles en una playa de Canadá. Estos perfiles sufrieron erosión por eventos extremos y se recuperaron posteriormente. Las características de cada forma dependen de la pendiente de la duna primaria, las características de transporte sobre las mismas y la cobertura de la vegetación. Ollerhead et al. (2013) identifican cuatro formas características de perfil, que están ilustradas esquemáticamente en la Figura AI.4:

- Pendiente a barlovento con escarpe (*Cliffed stoss slope* - CS): se forma después de un gran evento de tormenta, cuando la erosión por la acción de las olas produce un frente escarpado ( $>40^\circ$ ), sin vegetación y que se extiende hasta la cresta de la duna. El pie y la cresta coinciden (Giles & McCann 1997). En el análisis de variación de deposición se ha demostrado que muy poco sedimento llega a la cresta de la duna o a la pendiente de sotavento.

- Pendiente a barlovento con escarpe más suave (*Cliffed lower stoss slope* - CLS): se forma por una tormenta poco intensa que erosiona la porción de la pendiente de barlovento, produciendo un escarpe inclinado, con la parte superior de la pendiente permaneciendo vegetada. El pie está más cerca del mar que la cresta de la duna. Si la rampa se extiende sobre una porción importante de la parte inferior de la cara a barlovento, cantidades de moderadas a altas de sedimento son transferidas hacia la parte superior de la cara a barlovento, cresta y a sotavento.

- Pendiente a barlovento (*Stoss slope* - S): se caracteriza por ser continuamente vegetada, desde el pie de la duna hasta la cresta, con pendiente suave ( $<40^\circ$ ). Existe la posibilidad de que la vegetación se extienda hasta la parte superior de la playa. Cantidades moderadas de sedimento llegan a la parte superior de la cara a barlovento y cresta; cantidades más limitadas llegan a sotavento.

- Pendiente de barlovento con duna embrionaria (*Stoss slope with embryo dune* - SE): se caracteriza por una pendiente continuamente vegetada y la presencia de una embrio-duna vegetada en la parte superior de la playa, que es capaz de atrapar significativas cantidades de arena transportada hacia fuera de la playa. Una cantidad sustancial de sedimento es atrapada en la duna embrionaria y en la parte inferior de la pendiente de barlovento, de tal manera que llega poca cantidad de sedimento a la cresta y a sotavento.

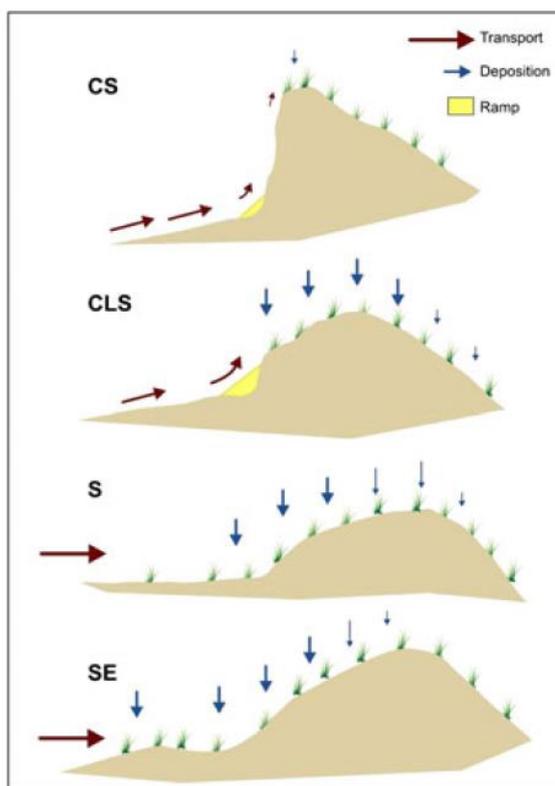


Figura AI.4 – Características de la forma del perfil y su comportamiento de transporte y deposición de sedimento (Figura obtenida de Ollerhead et al. 2013).

#### Clasificación basada en la condición de estabilidad y desarrollo de las dunas primarias

Arens & Wiersma (1994) hicieron una clasificación de las dunas primarias a lo largo de toda la costa de Holanda. Separaron las dunas primarias en función del desarrollo en el largo plazo, basado en la migración del pie de la duna y en los cambios de volumen. Estas diferencias en el desarrollo ocurren debido a diferencias de dinámica costera, pero también debido a diferencias en la gestión de las dunas, actividad eólica y situaciones locales.

Los tipos encontrados son (Figura AI.5): regresiva (R), estable (S) y progresiva (P). El grupo principal de dunas estables, objeto de la presente tesis, fue dividido en 5 subtipos dependiendo de la deposición eólica: (S1) deposición en la cresta (aumento de altura), (S2) deposición en el frente (temporario o debido a las cercas de protección), (S3) deposición tanto en el frente como en la cresta, (S4) deposición en la parte de atrás de la duna y (S0) no deposición.

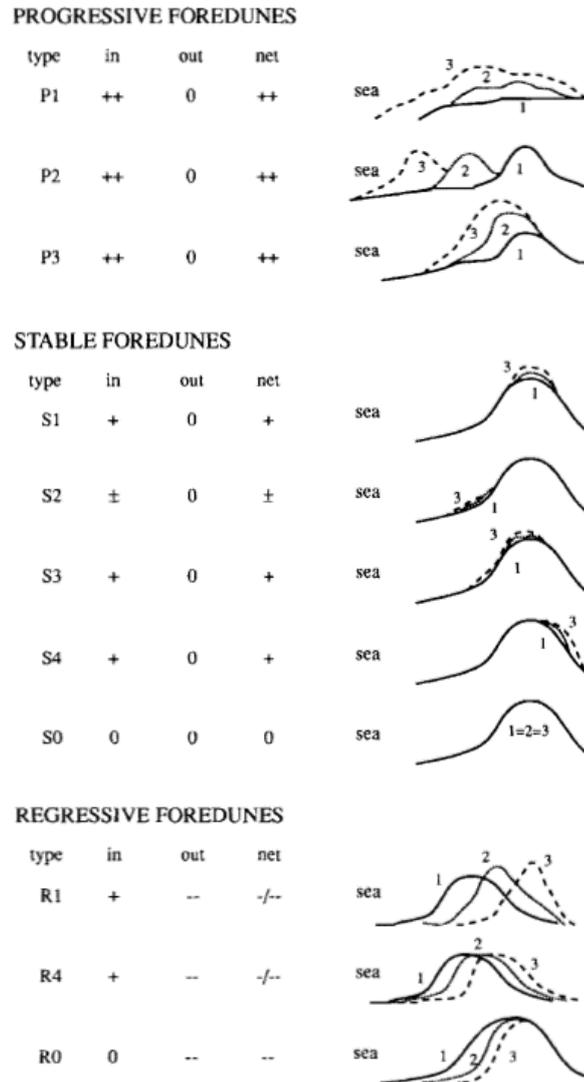


Figura AI.5 – Clasificación de los tipos de perfil de dunas primarias en función del desarrollo a largo plazo. (Figura obtenida de Arens & Wiersma, 1994)

Clasificación basada en las características morfológicas que reflejan su estado de conservación

Brodie & Spore (2015) clasificaron las dunas primarias de la costa norte del estado de Carolina del Norte (EE.UU.) con el objetivo de poder utilizar, en un futuro, esta clasificación en correlaciones entre el estado de la duna antes de una tormenta y su respuesta frente a este tipo de evento. Su clasificación fue basada únicamente en características morfológicas. Utilizó el número de picos (kpk) en la curvatura del perfil entre la cresta y el pie de la duna para describir la rugosidad de la cara de la duna, que, si existente, indican actividad eólica. La pendiente media de la duna ( $\beta_{dune}$ ) y su volumen ( $V_{dune}$ ) indican la frecuencia, magnitud y capacidad de recuperación de las dunas frente a la erosión causada por las olas de eventos extremos. Fueron definidas 4 clases:

- Dunas recuperadas (*recovering*):  $kpk > 0$ , pues tal como indicó Hesp (2012) anteriormente, en el pie de la duna en recuperación puede surgir una duna incipiente,

mientras que la pendiente de la cara sigue alta, indicando un ataque de olas reciente y, por lo tanto, con  $\beta_{dune} > 0.6$

- Dunas sanas (*healthy*):  $k_{pks} > 0$ ; presentan pendiente cerca del ángulo de reposo debido a la continua deposición y re-trabajamiento por los procesos eólicos, con  $\beta_{dune} < 0.6$ . El volumen es mayor debido a una menor frecuencia de erosión generada por el impacto de oleajes de eventos extremos.
- Escarpadas (*scarped*): normalmente la pendiente es más lineal, con altos valores medios, muchas veces llegando a 1 (cara vertical), o sea,  $\beta_{dune} > 0.6$ . No presentan señales de recuperación eólica, con  $k_{pks} = 0$ , y el volumen es pequeño.
- Construidas (*man-made*):  $k_{pks} = 0$ ; con pendientes característicamente lineales, pero, al contrario de las dunas escarpadas, presenta valores cerca del ángulo de reposo en la base de la duna, con  $\beta_{dune} < 0.6$ . Presentan grandes volúmenes y el pie de la duna está en cotas más bajas.

Delante de las clasificaciones de las dunas primarias presentadas anteriormente, se verifica que las que abarcan la caracterización de la forma lo hacen basados en la diferenciación de dunas erosionadas o no y su consecuente recuperación. No se identificó estudios que verifiquen específicamente si la forma de la duna en equilibrio varía o es siempre la misma, a pesar de la variación de su tamaño. Para playas, importantes trabajos fueron desarrollados en este sentido y serán presentados a continuación.

### Clasificación de la morfología de las playas

#### Forma de perfil de equilibrio de playas

El reconocimiento de que hay, a largo plazo, una forma constante en el perfil de la playa subacuática, a pesar de variaciones en escalas relativamente pequeñas (ver Figura AI.6), tanto espaciales (barras, cavas, ...) cuanto temporales (variación del perfil en función de la época del año), viene desde la propuesta de una ecuación del perfil de equilibrio por Bruun (1954), siendo ampliamente evaluada y difundida a través de la investigación de Dean (1977 y 1991).

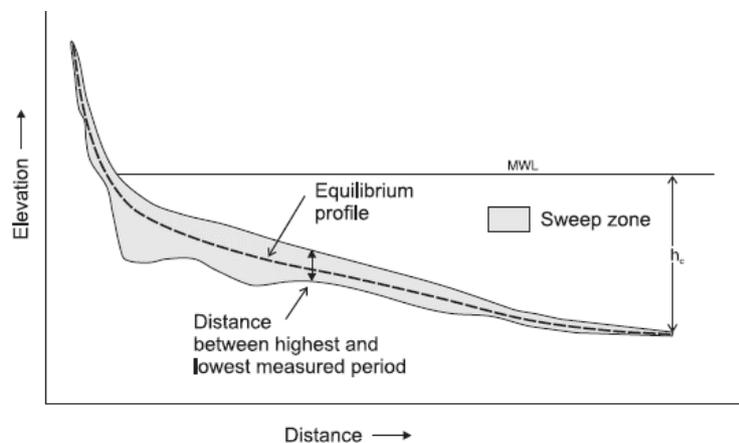


Figura AI.6 – Representación esquemática de la zona de variación del perfil de playa subacuática y su forma de equilibrio (figura obtenida de Davidson-Arnott 2010)

El concepto de perfil de equilibrio y su forma fue ampliamente estudiada y otros modelos fueron propuestos, por ejemplo el de Bernabeu et al. (2001) (Figura AI.7) y Bernabeu et al. (2002) (Figura AI.8), para la parte subacuática del perfil de playa.

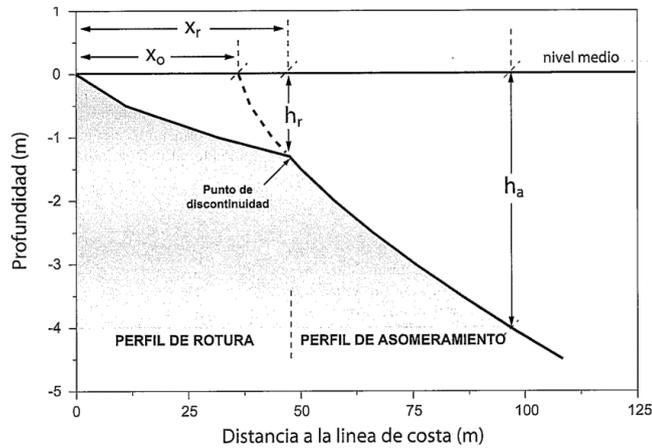


Figura AI.7 – Esquema del modelo de perfil de equilibrio en dos tramos propuesto por Bernabeu et al. (2001)

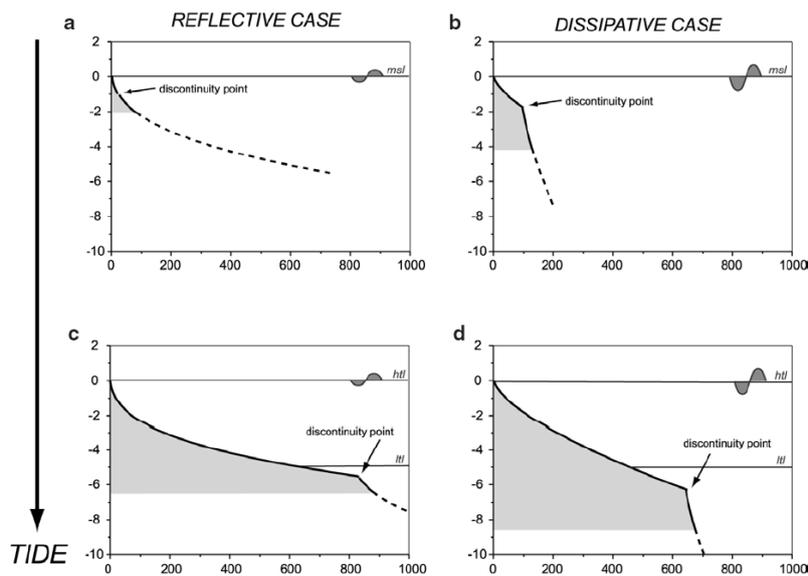


Figura AI.8 – Esquema del perfil de equilibrio en dos tramos con la influencia de la morfodinámica de la playa y marea, propuesto por Bernabeu et al. (2002)

Dai et al. (2007) evaluaron la configuración de los perfiles de equilibrio en playas al sur de China y propusieron 3 tipos de forma del perfil, con extensión hasta la berma de la playa subacuática (Figura AI.9).

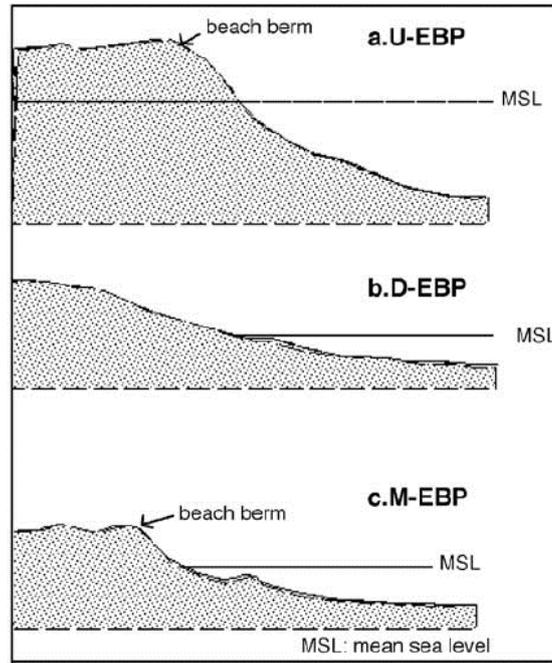


Figura AI.9 – Tipos de perfil de equilibrio propuestas por Dai et al. (2007): cóncavo en la parte superior con bermas altas reflejantes, pendiente inclinada del frente de playa (U-EBP); Cóncavo en la parte inferior del perfil, sin berma reflejante, pendiente suave del frente de playa (D-EBP); Características medias con bermas reflejantes; los sectores por encima del agua presentan perfil cóncavo en la parte superior y en los sectores abajo del nivel del mar presentan perfil cóncavo en la parte inferior (M-EBP).

### Forma de la playa subacuática en función del estado morfodinámico

La clasificación morfológica del perfil de las playas en la zona de surf y sus características tridimensionales, dependiendo de las características morfodinámicas en su parte subacuática, fue propuesta primeramente por Wright & Short (1984) (Figura AI.10) y expandida por Masselink & Short (1993), que incluyeron los efectos de la variación del nivel de agua causada por las mareas (Figura AI.11).

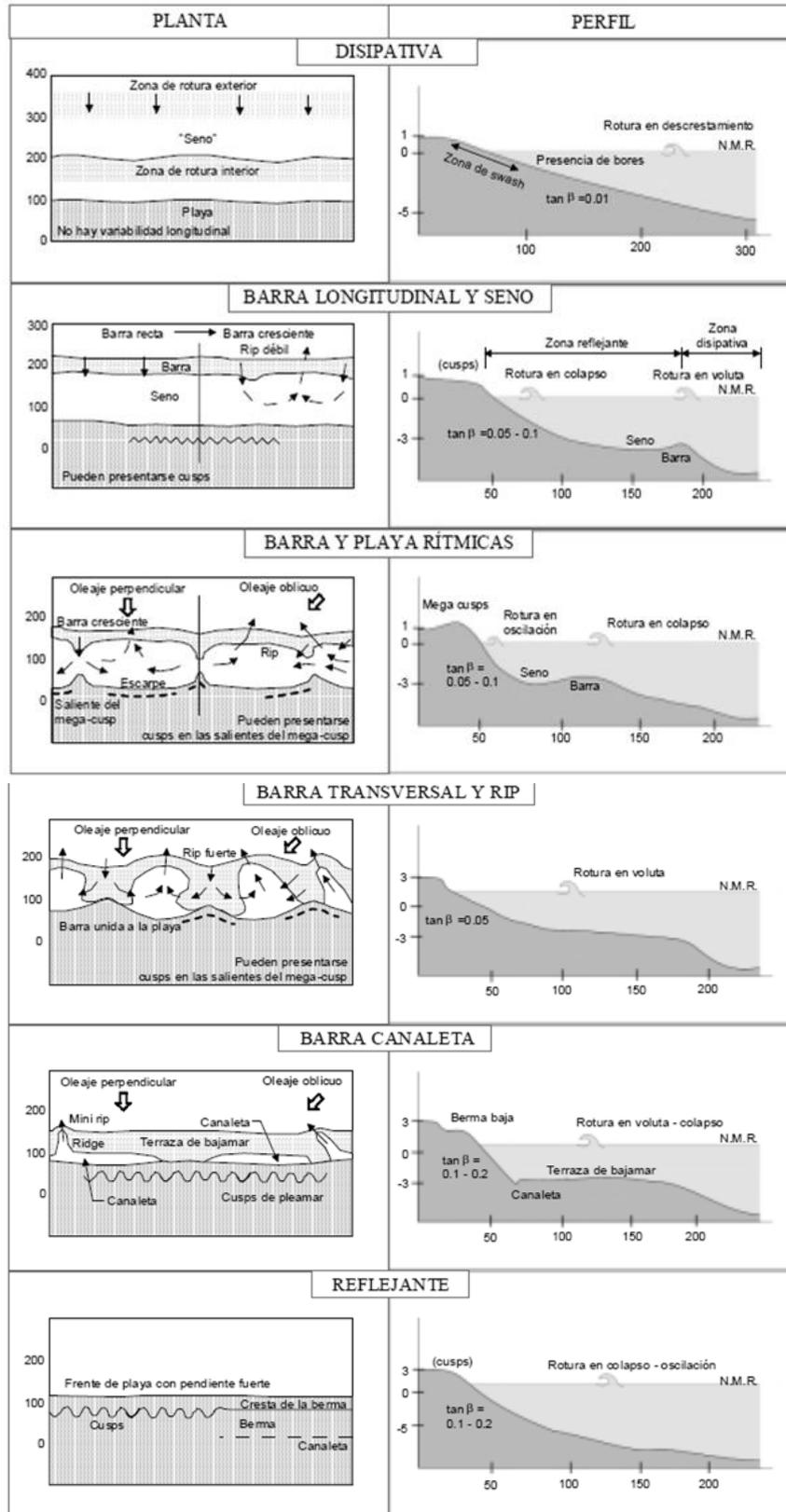


Figura A1.10 – Clasificación de la forma de playas, dependiendo del estado morfodinámico, propuesta por Wright & Short (1984) (figuras obtenidas de GIOC 2003).

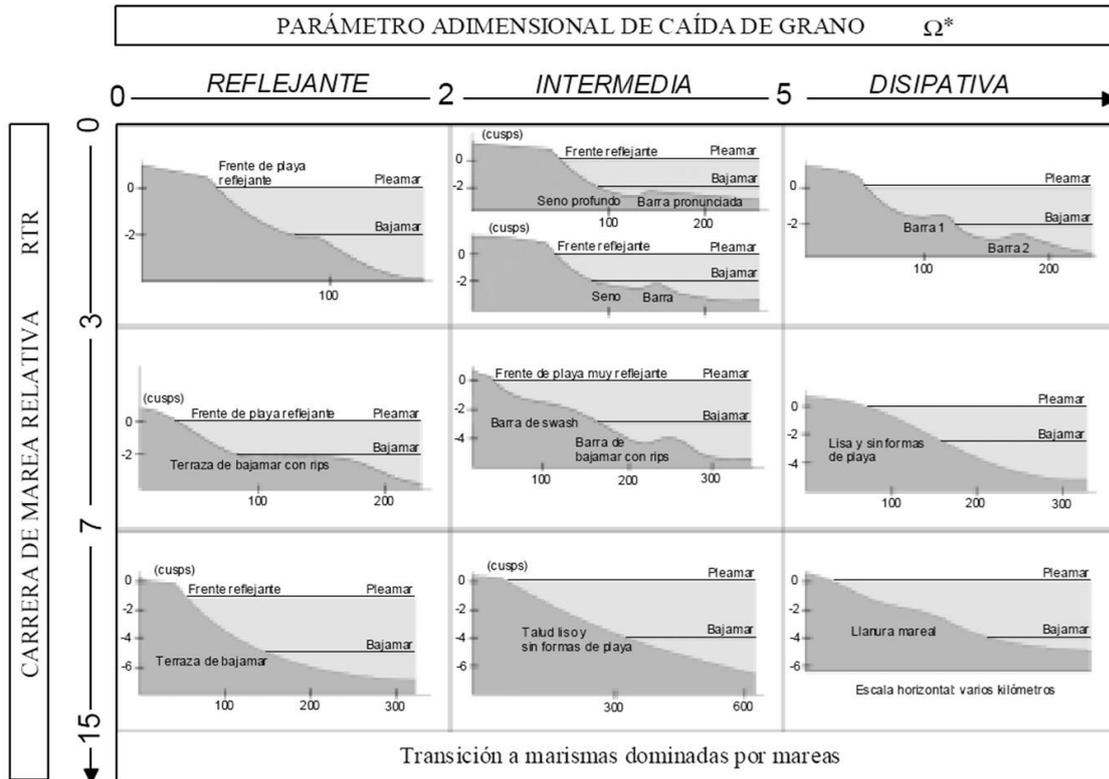


Figura AI.11 - Clasificación de la forma de perfil de playas, dependiendo del estado morfoodinámico y de la marea, propuesta por Masselink & Short (1993) (figuras obtenidas de GIOC 2003).

Forma de la playa seca en función del estado morfoodinámico

La forma de la playa seca, en función del estado morfoodinámico de la playa subacuática, fue utilizada por algunos autores, como Short & Hesp (1982), para discutir diferencias en la capacidad de transporte de sedimento hacia las dunas primarias. Díez et al. (2017a), siguiendo esta hipótesis, proponen una clasificación de forma de playa seca, también en función del tipo morfoodinámico de la playa y de su variación estacional. Para confirmar esta clasificación utilizó la metodología de clasificación automática *k*-medias. El resultado está presentado en la Figura AI.12 y los tipos propuestos fueron:

- Tipo 1: ocurre en playas de arena fina, con estado morfoodinámico entre disipativa e intermedia/disipativa. Son comunes en playas expuestas y presentan un amplio sistema de dunas costeras. Exhiben una diferenciación entre el perfil de invierno y de verano en su segmento estacional: en el invierno ocurren fuertes tormentas que hacen que el nivel del mar suba e inunde todo el perfil, atacando el pie de la duna y muchas veces generando un escarpe en la misma, o limitando el fetch eólico efectivo. Durante el verano una berma estacional puede aparecer debido a condiciones menos energéticas. Estas playas presentan un perfil plano y con pendiente suave. El segmento estacional varía de tamaño a lo largo del año, dado que en el invierno la parte del perfil donde ocurre el *runup* es más amplia.

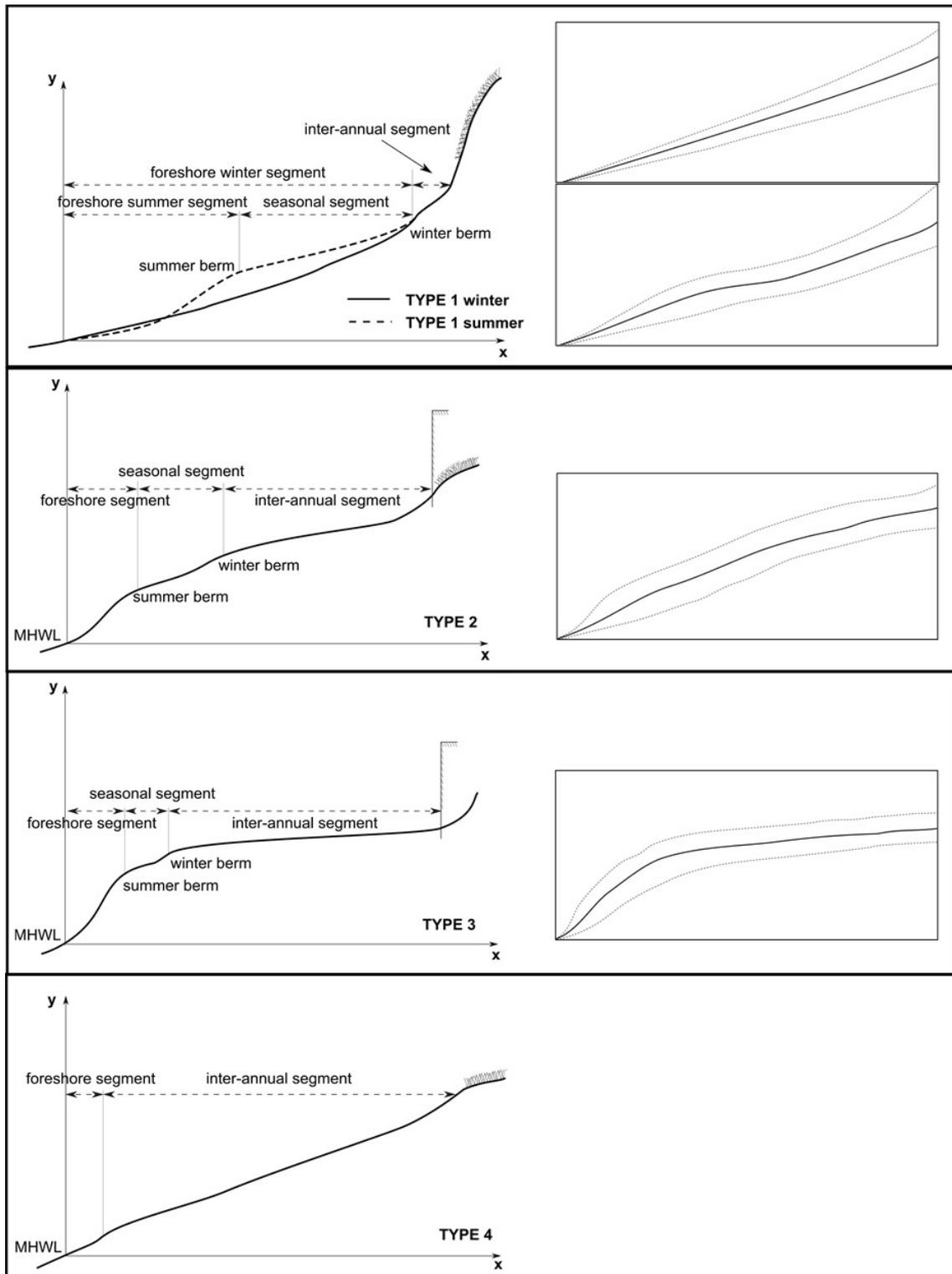


Figura AI.12 – Clasificación de formas de perfil de playa seca (izquierda de la figura), dependientes del estado morfodinámico de la playa, y perfiles “tipo” (*clusters*) obtenidos con la aplicación del *k*-medias a perfiles reales adimensionalizados (derecha de la figura. No presentado para el Tipo 4): Tipo 1 = playas disipativas; Tipo 2 = playas intermedias; Tipo 3 = playas reflejantes; Tipo 4 = playas ultradisipativas (figura adaptada de Díez et al. 2017a).

- Tipo 2: ocurre en playas con clima de olas de baja a media energía y normalmente el sedimento está compuesto por arena media, con estado morfodinámico

intermedio. El grano es más grueso que del Tipo 1, generando un perfil más inclinado y alto. En función de su composición granulométrica puede tener dunas primarias en la zona más alta del perfil. Las inundaciones durante tormentas son menos frecuente. Estos perfiles presentan segmento de *runup* estrecho, con gradiente de moderado a alto dependiendo del tamaño del grano, con parábola suave y convexa. El segmento entre bermas es estrecho y suave y el tamaño es menos afectado por la estacionalidad. El segmento interanual presenta anchura variable (de media a amplia) dependiendo del tamaño del sedimento y su disponibilidad, con una pendiente ligeramente positiva.

- Tipo 3: ocurre en perfiles de playas con arena gruesa y/o en playas con clima de olas de baja energía, normalmente con poca variabilidad estacional, clasificados morfodinámicamente como playas reflejantes. Estas playas no soportan un sistema de dunas debido a la limitación del transporte eólico por el tamaño del sedimento. Estas playas presentan segmento de *runup* estrecho y de pendiente pronunciada, terminando en una berma marcada y estable, que reduce la probabilidad de inundación. La baja variabilidad a lo largo del año puede no permitir la formación del segmento estacional. El segmento interanual es estable y amplio, normalmente con pendiente suave positiva u horizontal.

- Tipo 4: ocurre en playas dominadas por mareas, localizadas en el interior de estuarios o bahías, donde los efectos de las olas son despreciables. Compuesto por arena muy fina, con configuración de playas ultradisipativas. Estas playas no presentan cambios estacionales. Debido a la ausencia de procesos de lavado, presenta un perfil estable y recto, con una pendiente positiva muy suave.

## **5. Parámetros ambientales que influyen en la morfología de las dunas primarias**

A continuación, se presentan los principales parámetros controladores de la morfología de las dunas primarias, según teorías y estudios desarrollados por diversos autores.

### **5.1. Viento y potencial de transporte eólico**

El viento es el motor de la generación y mantenimiento de las dunas primarias. Los períodos erosivos de grandes olas y altos niveles del mar, asociados a tormentas, están separados por períodos muy largos donde el agua no alcanza las dunas y los procesos eólicos son los únicos que gobiernan el desarrollo de las mismas. Cuando existen vientos hacia tierra suficientemente fuertes y el sedimento está disponible para ser transportado este es llevado hacia las dunas, causando el aumento de su volumen (de Vries et al. 2012). Por otro lado, hay que tener en cuenta que el viento puede causar la erosión de las dunas primarias, con migración del sedimento de las mismas hacia mar o hacia tierra (Sabatier et al. 2009).

La velocidad, dirección, duración, variabilidad espacial y temporal del viento afectan el transporte de los sedimentos; y el contenido de sal, que a su vez afectará la vegetación (Short & Hesp 1982; Lancaster 1988; Sherman 1995; Kuriyama & Mochizuki 1999). La velocidad del viento necesaria para transportar sedimento desde una playa es del orden de >5-10m/s (Arens 1996b).

Para un mismo tamaño de sedimento, pueden existir diferencias espaciales en la capacidad eólica de transportar, debido al contenido de humedad superficial (Jackson & Nordstrom 1997; Davidson-Arnott et al. 2005; Davidson-Arnott et al. 2008; Bauer et al. 2009), de la pendiente de la playa (Hardisty & Whitehouse 1988; Iversen & Rasmussen 1994; de Vries et al. 2012) y/o debido a la ocurrencia de “depósitos residuales” (*lag deposits*, se queda el sedimento grueso e ya no transporta el fino que está abajo) (Carter 1976; van der Wal 1998). Estos parámetros pueden influir tanto en la velocidad mínima necesaria para el inicio del movimiento como en la cantidad de sedimento transportado.

En playas, tanto el contenido de humedad como la pendiente son muy variables en el tiempo, debido a las mareas y variaciones de las condiciones meteorológicas y morfológicas. Como resultado las tasas de transporte de sedimento pueden variar temporalmente independientemente de las condiciones del viento (de Vries et al. 2012). Davidson-Arnott et al., (2005) midió el transporte eólico de arena a lo largo de una playa y encontró que este responde instantáneamente a la velocidad del viento, pero que es muy dependiente del contenido de humedad. Por lo tanto, la humedad puede ser uno de los principales factores limitante del suministro de arena hacia las dunas (Aagaard et al. 2004).

Modelos que predicen el transporte eólico de sedimento generalmente presumen de un sistema de equilibrio simple en el cual la tasa de transporte es parametrizada en función de la velocidad del viento (o velocidad de corte), densidad del aire, densidad del mineral y tamaño del sedimento (p. ej. Bagnold 1941; Kadib 1964). Estos modelos son capaces de estimar el orden de magnitud de la tasa de transporte, si aplicados en condiciones ideales. Estas ecuaciones pueden ser refinadas si se incluye la humedad (Arens 1996b; Hsu & Weggel 2002; Davidson-Arnott et al. 2005) y pendiente (Hardisty & Whitehouse 1988; Iversen & Rasmussen 1994; Iversen & Rasmussen 1999). Pero, de manera general, las tasas reales de transporte medidas en campo son mucho más bajas que las tasas predichas por las ecuaciones de transporte (Davidson-Arnott & Law 1996; Arens 1996b; Delgado-Fernandez 2010).

A pesar de la importancia dada al viento y al transporte eólico para las dunas primarias, los trabajos de de Vries et al. (2012) y de Vries et al. (2015) verificaron, en la costa holandesa, que el potencial de arrastre del viento y la variación del volumen de las dunas primarias no presentan correlación en el tiempo y espacio. Esta falta de correlación subraya la importancia de procesos limitantes del transporte, y que los modelos tradicionales de transporte eólico por viento, desarrollados para dunas desérticas, sobreestiman la importancia de la variabilidad en las condiciones del viento en el transporte eólico desde la playa hacia las dunas primarias. Los resultados del estudio de

Davidson-Arnott et al. (2008), que evaluaron los efectos de humedad y precipitación sobre el transporte eólico medido en una playa, realzan su complejidad sobre playas naturales; en particular el papel de la humedad, tanto en el umbral de movimiento del sedimento como en las tasas de transporte.

Las condiciones extremas con altas velocidades de viento normalmente coinciden con precipitación, que impiden el transporte eólico debido a que la superficie arenosa se torna mojada y no-erosionable. Por lo tanto, el efecto acumulativo del transporte de sedimento es altamente gobernado por condiciones relativamente suaves/moderadas en lugar de condiciones extremas raras (Wolman & Miller 1960; Jungerius et al. 1991; Arens 1996b).

Un concepto importante a tener en cuenta a la hora de evaluar el transporte eólico en playas es el llamado efecto del fetch. Bauer et al. (2009) resumen que hay una cascada de saltación del sedimento en la dirección del viento, donde el número de partículas saltando aumenta exponencialmente y asintóticamente hasta una condición límite máxima, considerando un estrese constante del viento y un número fijo medio de partículas que se dislocan desde la superficie debido al impacto de un grano. Esta variación de la tasa de transporte, que va desde cero en la zona de ascenso/descenso de las olas hasta el máximo (saturación por saltación de granos), es llamada efecto de fetch (Gillette et al. 1996). Generalmente se asume que cuanto mayor el fetch, mayor es el transporte, bajo ciertas condiciones de viento, hasta que un límite es alcanzado. La longitud de fetch donde este límite es alcanzado es el fetch crítico ( $F_c$ ), donde el viento alcanza la saturación del transporte, es decir, la anchura mínima necesario para el desarrollo máximo de la saltación del sedimento (Bauer & Davidson-Arnott 2002). Delgado-Fernandez (2010) apuntó que, en áreas donde el fetch disponible es menor que el fetch crítico, para una dada velocidad de viento, la cantidad erosionada (transportada), o la tasa de transporte, será menor que la calculada por las ecuaciones de transporte eólico tradicionales (por ejemplo, la de Bagnold 1941).

El  $F_c$  depende principalmente de la velocidad del viento: cuanto mayor la velocidad, mayor será el  $F_c$ . Una visualización de este efecto se muestra en la Figura AI.13, que representa los resultados de medidas de la tasa de transporte para diferentes velocidades de viento, realizados por Davidson-Arnott & Law (1990) en una playa. Con el aumento del viento se ve que la tasa aumenta más rápidamente y cuesta más a llegar a la parte de saturación (parte recta de la gráfica que indica el  $F_c$ ). Aquí se observa que para velocidades de viento muy próximas a la velocidad de corte crítica (5.8m/s) el  $F_c$  parece ser de 15m de playa; para velocidades de 8.5m/s el transporte máximo ocurrió con  $F_c$  de aproximadamente 30m; para vientos más fuertes (13.9m/s) el experimento no fue capaz de identificar el  $F_c$ .

Lynch et al. (2008) señalan que, bajo ciertas condiciones, cualquiera de las variables mencionadas que controla el transporte de sedimento puede afectar el fetch

crítico, influyendo en la distancia requerida para que la tasa de transporte alcance un valor máximo.

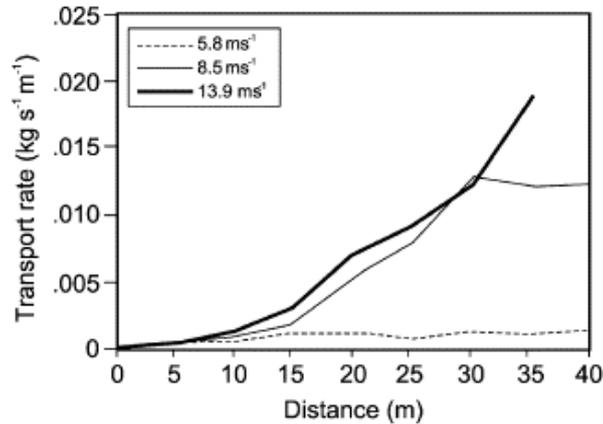


Figura AI.13 – Cambios en el flujo de sedimento con la distancia de fetch para tres diferentes velocidades de viento, medidos por Davidson-Arnott & Law (1990). Gráfica obtenida de Bauer & Davidson-Arnott (2002).

Estudios que verificaron la evidencia de los efectos de fetch, realizados con experimentos de túneles de viento y simulaciones numéricas, encontraron valores muy variados para  $F_c$ : Bagnold (1941) sugiere una longitud mínima de 9m; Shao & Raupach (1992) probaron con un túnel de viento de 17m y no llegaron a la saturación; simulaciones numéricas realizadas por Spies & McEwan (2000) sugieren que el  $F_c$  puede ser mayor que 50m, dependiendo de la velocidad del viento cuando se incluyen efectos de ráfagas y turbulencia. Como se ha mostrado anteriormente, en medidas realizadas en playas los valores de  $F_c$  variaron entre 10 y 40m (Davidson-Arnott & Law 1990), pero hay evidencias de  $F_c$  muy largos en muchas playas comunes, específicamente debido al contenido de humedad u otros factores limitantes de suministro, con valores de  $F_c$  de 80-200m (Davidson-Arnott et al. 2008) o de 50-150m (Bauer et al. 2009). A pesar de eso, algunos autores afirman que los efectos del fetch pueden ser despreciables en playas con poco viento (8-10m/s) y sedimento homogéneo (0.17mm) (Jackson & Cooper 1999; Lynch et al. 2008).

La aplicación de los conceptos “efecto de fetch” y “fetch crítico” ( $F_c$ ) en playas es importante porque cuando el fetch disponible, es decir, la anchura de la playa, es menor que el  $F_c$ , el transporte eólico de sedimento hacia las dunas está limitado por la anchura de la playa (de Vries et al. 2012). Esto significa que playas con anchuras variables pueden inducir a tasas de transporte de sedimento variable hacia las dunas y consecuentemente cambios en su volumen (Bauer & Davidson-Arnott 2002). Pero, si la anchura de la playa es más grande que el  $F_c$ , el cambio de anchura de playa no resultará en un cambio del volumen de la duna (de Vries et al. 2011)

A pesar de la importancia de la incorporación del efecto del fetch en la previsión del suministro de sedimento hacia las dunas, hay factores críticos para su implementación: (1) un método que calcule  $F_c$  (Davidson-Arnott et al. 2008) y (2) la determinación de una

relación funcional que describa un aumento en el transporte del sedimento con la distancia, cuando el fetch disponible es menor que el  $F_c$  (Delgado-Fernandez 2010).

## 5.2. Sedimento

La característica principal del sedimento, que influirá en la formación, desarrollo y forma de las dunas primarias, es el tamaño de grano, pues casi siempre refleja la capacidad de ser transportado eólicamente hacia las dunas primarias (Short & Hesp 1982; Lancaster 1988; Psuty 2004; Sherman 1995).

La disponibilidad de sedimento también es un factor esencial y actúa como una de las variables dominantes en la caracterización del desarrollo de las dunas primarias. Partiendo del concepto de que hay una continuidad de respuestas morfológicas a las condiciones ambientales, si hay un cambio en el balance sedimentario de la zona costera habrá un cambio en el balance sedimentario de las dunas primarias (Psuty 1988; Arens 1994; Hesp 1999). Parte de este razonamiento se basa en que las dunas primarias son formas cumulativas y necesitan un balance sedimentario positivo, en algún momento y durante cierto período de tiempo, para que sea posible su existencia (de Vries et al. 2015).

La migración hacia tierra de las barras intermareales, bajo condiciones de calma de energía de olas, es un mecanismo primario y de medio/largo plazo, en que el frente de playa aumenta (Masselink et al. 2006) y los sedimentos se tornan disponibles en la playa seca para ser llevado hacia las dunas (Aagaard et al. 1998; Christiansen & Davidson-Arnott 2004; Aagaard et al. 2004). Los aportes de sedimento también son fuertemente influenciados por la distancia de las desembocaduras de ríos (Psuty 1988) y la migración de ondas de arena longitudinalmente a la costa (Stewart & Davidson-Arnott 1988; Ruessink & Jeuken 2002), además de aportes provenientes de regeneración de playas.

## 5.3. Características de la playa

Las características de la playa, tal como la pendiente, la topografía, el estado morfodinámico y la anchura, influirán en el flujo aerodinámico a través de la playa y consecuentemente en el cambio de sedimento entre la playa y la duna primaria (Short & Hesp 1982; Davidson-Arnott 1988; Davidson-Arnott & Law 1990; Iversen & Rasmussen 1994; Bauer & Davidson-Arnott 2002; Christiansen 2003; Houser 2009; Davidson-Arnott 2010). A su vez, estas características dependen principalmente del sedimento (calidad y cantidad) y de la dinámica costera (Short 1979; Wright & Short 1984; Sherman & Lyons 1994; Aagaard et al. 2004).

La relación entre el fetch crítico y la anchura de la playa es dinámica porque la anchura del fetch disponible está fuertemente influenciada por la marea astronómica y meteorológica, por el *set-up* y *runup* de las olas (Bauer et al. 2009). Además, un aumento en la velocidad del viento aumentará el fetch crítico así como disminuirá temporalmente la anchura de la playa (debido a un aumento del nivel del mar y *runup* por olas). Esto implica que eventos con viento capaz de transportar cantidades substanciales de arena de la playa

hacia la duna primaria ocurren con poca frecuencia en playas estrechas, a menos que el ángulo del viento sea oblicuo (Bauer & Davidson-Arnott 2002).

Tal como fue revisado por Hesp (2012), la morfología de la playa, que depende de su estado morfodinámico, es importante ya que cuanto mayor la variabilidad morfológica, mayores las variaciones y la desaceleración del viento sobre la zona intermareal y playa seca. En esto se basa el modelo propuesto por Short & Hesp (1982), expuesto en detalle más adelante: las playas disipativas presentan una variación mínima del flujo, con una aceleración gradual sobre el backshore, de tal manera que maximiza el transporte eólico potencial. En las playas reflejantes normalmente hay una berma que causa una separación del flujo de viento en el sotavento de su cresta y las velocidades son marcadamente reducidas, con transporte eólico mínimo de sedimento hacia las dunas (Figura AI.14).

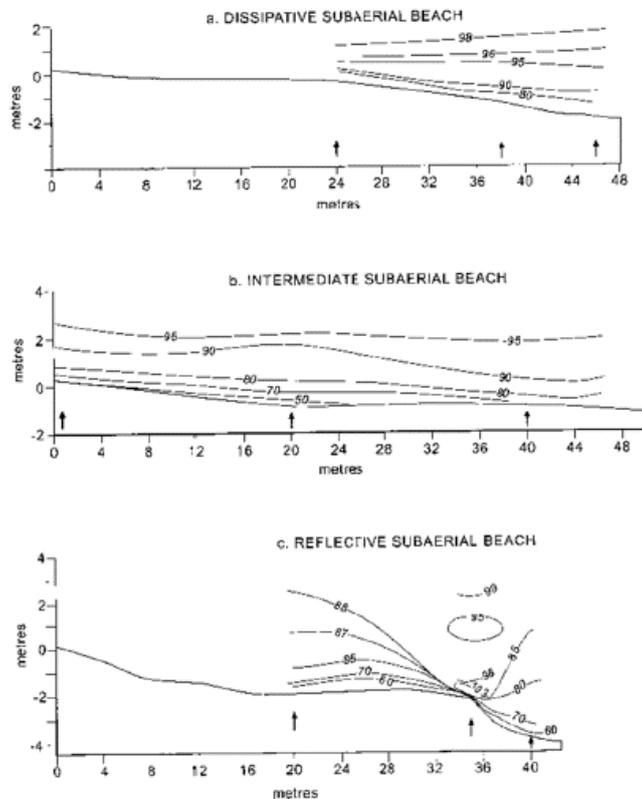


Figura AI.14 – Iso-líneas de velocidad media del viento medidas en playas disipativas, intermedias y reflejantes (Figura obtenida de Hesp 2012)

Sherman & Lyons (1994) confirmaron estas observaciones conceptuales y empíricas al modelar el flujo del viento y el transporte de sedimento potencial sobre tres diferentes morfologías de playa. Encontraron que el transporte de sedimento en playas disipativas era 20% mayor que en playas reflejantes si solo se consideraba la pendiente y el tamaño del grano. Cuando se tenía en cuenta el contenido de humedad, las tasas de transporte fueran aproximadamente 2 órdenes de magnitud mayores para playas disipativas que para las playas reflejantes. Sin embargo, en este modelado las dos playas tenían la misma anchura (100m), y lo que ocurre es que normalmente las playas reflejantes y

muchas intermedias son considerablemente más estrechas que playas disipativas (Hesp 2012).

La extensión de la erosión y la posibilidad de rebase de las dunas primarias ocasionadas por tormentas también están controladas por las variaciones de la anchura de la playa a lo largo de la costa, que a su vez están asociadas a células de corriente de retorno y mega-cúspides (Komar 1971; Thornton et al. 2007), migración de barras intermareales (Aagaard et al. 2004; Anthony et al. 2006) y ondas de arena a lo largo de la costa (Davidson-Arnott & Law 1990; Ruessink & Jeuken 2002; Davidson-Arnott & Van Heyningen 2003). Playas excepcionalmente anchas han sido documentadas con limitada extensión de la erosión de las dunas o daños causados por las olas durante eventos extremos (Hallermeier & Rhodes 1988). La erosión de la duna no es una respuesta solamente de la intensidad de las tormentas y nivel de agua, sino que también está controlada por la elevación de la parte superior de la playa (Ruz & Meur-Ferec 2004; Sabatier et al. 2009).

En resumen, una playa ancha no irá solamente proteger la duna del impacto de la actividad de la tormenta por un aumento de la disipación de la energía de la ola, comparado con una playa estrecha, sino que también proporcionará arena, proveniente del transporte eólico, hacia las dunas primarias, aumentando su volumen y/o altura (Davidson-Arnott & Law 1996; Houser & Mathew 2011). Tal como se ha explicado anteriormente, la anchura de la playa (y su relación con la longitud), así como su orientación con relación a la dirección del viento, es importante en la determinación del fetch disponible, que a su vez es esencial en la determinación del volumen de arena transportada sobre el backshore y las dunas (Davidson-Arnott & Law 1990; Bauer & Davidson-Arnott 2002; Houser 2009; de Vries et al. 2011).

Saye et al. (2005) intentaron identificar una anchura crítica mínima de playa para la estabilidad de las dunas, para la costa de Inglaterra y Gales, pero encontraron que, en los sitios estudiados, no siempre hay una relación entre la variación de las dunas primarias con la anchura de la playa. Concluyeron que posiblemente otros factores definen la forma, extensión y desarrollo de las dunas primarias, que incluyen factores de gran escala como las tasas de suministro de sedimento, la distribución de tamaño de granos en la playa, el clima del oleaje y del viento, características de la vegetación e influencias humanas. En resumen, concluyó que los valores críticos de los parámetros de morfología de la playa son específicos de cada lugar.

Hanson et al. (2010) desarrollaron una aproximación matemática que intenta calcular la anchura de playa en equilibrio, a través del cálculo del avance y retroceso de la duna primaria en función del transporte eólico y erosión por olas, respectivamente. Este modelo fue complementado por Larson et al. (2016) y probado por Palalane et al. (2016) que, a pesar de los buenos resultados, indicaran la necesidad de obtener coeficientes específicos para cada playa.

#### 5.4. Características de la dinámica costera

Los factores oceanográficos son determinantes en el sistema sedimentario litoral, debido a que afectan al balance de sedimento de las playas (energía del oleaje y de las corrientes), la extensión de la playa expuesta al viento (condicionada por el rango de mareas), o la salinidad ambiental (efecto aerosol del oleaje o *sea spray*) (Sanjaume et al. 2011). Las olas, que actúan de manera continua en una costa, determinan el estado morfodinámico y consecuentemente las características de la playa (Wright & Short 1984), que a su vez influyen en la disponibilidad de sedimento hacia la duna primaria, según el modelo propuesto por Short & Hesp (1982).

Además de la influencia de las olas ordinarias, los eventos extremos son de suma importancia en la dinámica de las dunas primarias. de Vries et al. (2012), evaluando la variación del volumen de las dunas, concluyeron que la capacidad de los procesos eólicos de construir dunas es del orden similar a la capacidad de eventos marinos (extremos) de erosionar las dunas. En general, se cree que estos eventos son importantes impulsores de los sistemas costeros, logrando mucho más cambio morfológico en tormentas únicas que durante largos períodos de condiciones de buen tiempo (Morton et al. 1995). Sin embargo, la importancia relativa de diversos parámetros que influyen en la erosión de las dunas todavía no está clara, como se puede observar en la descripción de diversos artículos científicos.

Los resultados de van de Graaff (1986) sobre un análisis probabilístico de la erosión de las dunas causada por eventos extremos indica que el nivel máximo del mar es el factor más importante para la erosión de la duna y que una segunda tormenta, con un mismo nivel máximo de la primera, no aumenta considerablemente la cantidad de erosión. Explica que después de la primera tormenta la arena es transferida hacia la parte de abajo del perfil, la pendiente general de la playa disminuye y consecuentemente la tasa de erosión de las dunas también disminuye. Concluyó que cuatro condiciones de contorno afectan directamente la cantidad de sedimento erosionado: el nivel máximo de la marea meteorológica (factor más importante), la altura de ola significativa durante el nivel máximo, el diámetro de la partícula y la forma inicial del perfil de la playa, además de la altura de la duna. Otros factores que pueden afectar son: la duración de la tormenta y ocurrencia de oscilaciones de lluvia y ráfagas de viento. Overton et al. (1994), en un ensayo de laboratorio, verificaron que el tamaño del grano y la densidad de la duna son parámetros significativos en la relación entre la fuerza de las olas y la erosión. Ellos encontraron que generalmente una disminución del tamaño del grano y un aumento de la densidad de la duna aumentan la resistencia de la misma.

La morfología de las dunas exhibe una fuerte dependencia con la frecuencia de los eventos de temporal (Christiansen & Davidson-Arnott 2004). El trabajo de Ruessink & Jeuken (2002), corrobora esta idea. Estos autores evaluaron los efectos de las tormentas (aumento del nivel del mar y oleaje) en escala de años en la costa de Holanda, concluyendo que el temporal que induce a la erosión de las dunas está relacionada con el evento máximo

anual, más que los efectos cumulativos de los temporales, asumiendo que un evento de temporal máximo puede erosionar las dunas primarias más que un grande número de eventos relativamente menores. Resultados similares fueron encontrados por de Vries et al. (2012). Sin embargo, en el trabajo de Guillén et al. (1999) concluyeron que el efecto acumulado de los eventos de tormenta son los que están mejor relacionados con las características de erosión y acreción de la posición de las dunas primarias. De todos modos los trabajos coinciden que los eventos erosivos influyen de manera importante en el comportamiento de las dunas.

Hallermeier & Rhodes (1988) indican que uno de los factores más importantes en la erosión de las dunas es el tiempo de duración de las tormentas. Houser (2009) afirma que, independientemente de la disponibilidad de sedimento, la altura, forma y extensión de las dunas primarias depende del impacto de tormentas, su frecuencia y de la habilidad de las dunas de recuperarse entre dos eventos extremos. Una alta frecuencia de temporales limita la recuperación de las dunas, llevando a perfiles de dunas bajos, recubiertos por vegetación tolerante al enterramiento. Sin embargo, Zhang et al. (2002) contradicen lo expuesto anteriormente, afirmando que las tormentas no son importantes en la regresión costera en escala de décadas en EE.UU., debido a que los mecanismos de recuperación post-tormenta de la playa y duna primaria son relativamente rápidos.

En el estudio desarrollado por van Gent et al. (2008) para verificar el efecto del período de ola sobre la erosión de las dunas primarias, se concluye que: (i) el volumen erosionado de las dunas aumenta con el aumento del período de la ola; (ii) el retroceso del frente de la duna aumenta con el aumento del período de la ola; (iii) la pendiente del perfil transversal de la duna en la cota del nivel de agua se torna más suave con el aumento del período de la ola; (iv) el perfil final de erosión aparentemente es independiente del perfil inicial, si hay un periodo de tiempo suficiente del proceso de erosión.

La erosión de las dunas primarias es causada por la colisión de los bores de oscilación de las olas con su frente hacia mar (Carter & Stone 1989; Sallenger et al. 2000), siempre y cuando el nivel del agua sea más alto que la cota donde se encuentra la duna primaria (Sallenger 2000; Houser 2013). Es decir, el nivel de agua ejerce un papel importante en la erosión de la base de la duna y también limita el transporte eólico de sedimento sobre la playa (Sabatier et al. 2009).

En un estudio desarrollado en diferentes playas de la costa francesa se verificó que durante las tormentas la relación entre la intensidad de los agente forzadores (energía de olas, *runup*) y la respuesta morfológica (erosión de la duna primaria) no son directas en todos los sitios: en algunos lugares las fases de erosión de las dunas están bien correlacionadas al máximo nivel de agua e intensidades de tormentas; en otros el análisis indicó que la morfología antecedente de la playa controla la erosión de las dunas más que las intensidades de las tormentas (Sabatier et al. 2009).

Para la costa holandesa, la erosión de las dunas por tormentas puede tener un orden de magnitud de  $400\text{m}^3/\text{m}$  en 5-10 horas. Estos valores significan una retracción de aproximadamente 70m de dunas (van de Graaff 1986).

### 5.5. Vegetación

La vegetación es considerada por muchos autores como el factor principal de la génesis de las dunas primarias y de su estabilización (Cowles 1899; Hesp 1989; Bauer & Sherman 1999; Kuriyama & Mochizuki 1999; Hesp 2002; Psuty 2004; Martínez & Psuty 2007). Eso ocurre principalmente debido a su influencia en el flujo del viento y transporte eólico. Wolfe & Nickling (1993) afirman que la vegetación afecta el transporte de diversas maneras: extrae *momentum* del viento, parte de la superficie que está cubierta por la vegetación no alimenta el sistema sedimentario y los elementos de la vegetación actúan como obstáculo para la saltación de los granos. Cuando la densidad de la vegetación disminuye, la arena es transportada hacia la parte de arriba de la cara a barlovento de la duna, y esto puede aumentar la altura de la duna primaria y/o aumentar la pendiente (Arens 1996a). Davidson-Arnott (2005) teoriza que bajo una condición de aumento del nivel del mar, las mayores tormentas producirán un escarpe severo de la cara hacia mar de las dunas, llevando a una pérdida parcial o total de la vegetación. Cada vez que eso ocurre los vientos hacia tierra transportarán este sedimento, depositando en la cresta y la cara a sotavento, produciendo poco a poco la migración de la forma de las dunas.

La extensión hacia mar del crecimiento de la vegetación está controlada por el lavado de la marea de sicigia y la inundación de las olas de temporal (Hesp 1984a; Hesp 1984b; Hesp 2002). En las dunas primarias la cobertura vegetal, riqueza de especies y su zonación son determinadas por diversos factores, como la región biogeográfica, los niveles de aerosol salino, y principalmente el suministro de sedimento y la tasa de deposición de la arena (Maun 2009).

Duran & Moore (2013) propusieron un modelo que evalúa el papel de la localización de la vegetación pionera en la altura de la duna y la configuración de la duna primaria, secundarias y campo de dunas. La explicación es que el inicio de las dunas, que depende de la presencia de vegetación pionera y de la distancia en que la vegetación se localiza con relación a la orilla (Lveg), determinará el flujo de arena: si todos los otros factores son iguales, una duna primaria incipiente que se forme en un sitio con Lveg pequeño puede resultar en un reducido flujo de arena, comparando con una duna incipiente formada en un sitio con Lveg grande. Un bajo flujo de arena implica una tasa potencial de erosión/ deposición eólica baja, con el consecuente aumento de la velocidad crítica del viento (mínima necesaria para inicio del movimiento del grano) debido a la vegetación, por lo que tiene como consecuencia una duna primaria más estable. Por lo contrario, dunas primarias formadas donde Lveg es ancha se tornan más inestables por los fuertes vientos y generan una amplia gama de morfologías de duna móviles y casi-móviles (casquetes erosivos, dunas parabólicas, dunas crecienticas, ...). Además, la Lveg determina el

volumen de arena transportado hacia tierra a través del control de la capacidad de almacenamiento. En playas reflejantes con poca anchura se formaría una única duna primaria mientras que en playas disipativas anchas se formaría un campo de dunas transgresivas. Por lo tanto, se consideran que la vegetación es la que define la altura de la duna.

La vegetación también puede influir en la manera de cómo la duna es afectada por la erosión de olas y mareas causadas por eventos extremos. Sigren et al. (2014) verificaron, a partir de experimentos de pequeña escala, que la presencia de raíces de plantas haz con que aumente el tiempo y la cantidad de estrés necesario para romper una duna. Además, la presencia de plantas en la cara hacia mar disminuye la retracción de la costa y la generación de un escarpe en las dunas en aproximadamente un 30% en un evento extremo. La recuperación de las dunas con especies con capacidad de expansión acelerada, muchas veces exóticas, causan una fuerte estabilización de las dunas primarias lo que puede impedir la transferencia de sedimento de la playa/ dunas primaria para el campo de dunas costeras, cambiando la dinámica natural de este sistema, tal como es observado por Darke et al. (2016).

Zarnetske et al. (2015), intentando definir cuál es la contribución relativa de la vegetación y del suministro de sedimento en la forma de las dunas (altura y anchura) verificó que hay fuertes evidencias de que la evolución de la duna primaria en escala de años y décadas está correlacionada tanto con la tasa de suministro como con cambios en el tipo de vegetación dominante. Sin embargo, a pesar de que ambos factores son importantes, encontraron que cambios absolutos de altura de la duna estaban mejor correlacionados con el suministro de sedimento que con la vegetación, en ambas escalas de tiempo, y que la vegetación presenta mejor correlación con la anchura de la duna, principalmente en escala de décadas.

## **6. Influencia humana sobre las dunas primarias**

Hay que tener en cuenta que los humanos manipulan los procesos, los sedimentos y los accidentes geográficos, cambiando el balance de sedimento, moldeando o destruyendo la morfología de las dunas, desplazando líneas de costa, es decir, influyendo directa o indirectamente sobre los procesos y respuestas. Hay que considerar que somos parte del sistema y no se puede ignorar el papel de los agentes humanos en los procesos de manipulación, sedimento disponible, así como respuestas morfológicas y ecológicas (Turner et al. 1990; Nordstrom 1994; Nordstrom & Arens 1998; Psuty 2004). Esta influencia puede ser tanto destructiva como constructiva.

Las causas de la degradación de las dunas en España, igual que en muchos países, han sido evaluadas por diversos autores, y resumida por Gómez-Pina et al. (2002): (1) desarrollo masivo del turismo; (2) construcción de estradas y paseos; (3) retirada de arena de las dunas; (4) presión recreacional en las dunas; (5) construcciones inadecuadas en el frente marino; (6) pisoteo humano; (7) vehículos todo terreno y aparcamientos; (8)

prácticas agrícolas y reforestación; (9) vertedero de basura; (10) extracción de agua; (11) trabajo de ingeniería civil; (12) uso militar. En España el desarrollo urbano a larga escala sobre las dunas primarias ocurrió entre los años 60 y 70, causando la destrucción de muchos sistemas de dunas. A partir de 1988 la Ley de Costas (España) protege las dunas contra retirada de arena, desarrollo en dominio público y cambios de uso del suelo, pero hay otras causas de degradación de las dunas que siguen ocurriendo. El turismo, y en general las actividades de ocio en las playas, supone una degradación de la vegetación dunar (y en consecuencia del resto de la red trófica) motivada por el tránsito de personas, vehículos y aparcamientos incontrolados. Estos usos reducen la cubierta vegetal y su capacidad de regeneración, aumentan la inestabilidad dunar, alteran el perfil de la duna y contribuyen a la compactación del terreno, que dificulta en gran medida posteriores labores de revegetación.

La alteración o destrucción de los sistemas dunares se puede producir de manera directa por el desarrollo de actividades humanas sobre las dunas, tal como ha sido enumerado anteriormente, así como también de manera indirecta. Entre las causas indirectas se puede citar la disminución de aportes de sedimento, por la alteración del transporte litoral y/o disminución de la carga sedimentaria proveniente de los sistemas fluviales; y la subida del nivel del mar (Sanjaume & Pardo-Pascual 2005).

Debido al actual reconocimiento de la importancia ecológica y económica de las dunas primarias, hay un creciente interés en la recuperación de las mismas. El manejo tradicional suele estar basado en estrategias reactivas donde las dunas son protegidas, estabilizadas y/o reforzadas cuando algún criterio de seguridad no es encontrado (de Vries et al. 2012), mediante el uso de trampas de sedimento, revegetación, cercados, pasarelas y carteles informativos (Gómez-Pina et al. 2002; Ley Vega et al. 2007).

La efectividad de estas técnicas muchas veces no está clara. Carter & Stone (1989) notaron que la recuperación vegetal de las dunas primarias puede tener como consecuencia una diferencia en el modo de fallo de las mismas durante una tormenta, pero no en la reducción de las tasas de erosión. Bochev-van der Burgh et al. (2011) observaron que a pesar de la estabilización a larga escala de las dunas primarias en Holanda, practicadas desde el principio del siglo XIX, el área de las dunas primarias permanece variable tanto en el tiempo como en el espacio, siendo por lo tanto dependientes más de la dinámica local que de las intervenciones humanas. A pesar de todas las medidas de estabilización de las dunas primarias realizadas en la costa de Holanda, al final el pie de las dunas sigue exhibiendo cambios en el espacio y el tiempo, afectando fuertemente el comportamiento de toda la pendiente de la cara de la duna hacia mar, principalmente la parte cóncava de la duna primaria. La parte convexa de la duna parece ser más estático en el tiempo y en el espacio, en lo cual puede indicar que las medidas de estabilización (cercas, captadores y vegetación) fueron efectivas en la parte alta del perfil.

No obstante, es altamente aceptado que las intervenciones han tenido y todavía tienen un efecto profundo sobre la morfología de las dunas (Nordstrom 1994). Por

ejemplo, Zarnetske et al. (2012) comprobaron diferencias morfológicas de una duna recuperada con especies de plantas no nativas. Wijnberg et al. (2011) verificaron que existen cambios morfológicos entre una duna generada naturalmente y otra con presencia de un retentor de sedimento.

Otra vertiente de la recuperación de las dunas primarias es la reconstrucción en sí, sea por la ausencia de las dunas debido a destrucciones catastróficas causadas por temporales extraordinarios, o la retirada de las dunas en épocas en que no estaban protegidas, o simplemente como técnica de preservación de playas creadas artificialmente o con serios problemas erosivos. Las técnicas de reconstrucción topográfica de las dunas primarias pueden ser a través de captadores de sedimento, que tienen la ventaja de ser más baratos, crean la morfología de las dunas naturalmente y presentan menor impacto sobre el ecosistema; o a través de reconstrucción con maquinaria, que presenta la ventaja de ser más rápido (Ley Vega et al. 2007). Sin embargo, estrategias de manejo costero recientes exploran la posibilidad de utilizar los procesos naturales de una manera proactiva de construcción, mantenimiento y refuerzo de las dunas (por ejemplo Aarninkhof et al. (2010) y Hanley et al. (2014)).

## **7. Modelos de funcionamiento de las dunas primarias**

Diversos trabajos fueron desarrollados para entender la formación y el funcionamiento de las dunas primarias en las diferentes escalas de tiempo, o sea, corto plazo (días a meses), medio plazo (estaciones a años) y largo plazo (décadas).

A continuación, se presenta un resumen de los modelos más importantes.

### **7.1. Modelos a corto plazo**

Las investigaciones que evalúan el comportamiento de las dunas primarias en el corto plazo (de días a meses) se refieren casi siempre a entender los impactos y consecuencias de eventos extremos sobre las mismas. En cualquier tiempo, pequeños cambios o cambios catastróficos pueden ser introducidos por eventos de tormenta de moderados a severos. Dichos eventos obligan a las dunas primarias a saltar a una forma potencialmente más erosiva (p. ej. formación de escarpes, caída y muerte de la vegetación, o remoción parcial o total a través de los procesos de rebase). El desarrollo subsecuente de las dunas primarias (y sus estadios) depende del grado de revegetación y re-estabilización (Hesp 2002). Christiansen & Davidson-Arnott (2004) sugieren que, en una escala de días a meses, las fuerzas dominantes de los procesos en las dunas son el balance sedimentario local de la playa (anchura de playa), la frecuencia y magnitud de las mayores tormentas y el patrón de dirección y velocidad del viento como control de transporte eólico de sedimento.

Existen básicamente dos abordajes clásicos en los modelos que intentan estimar el impacto de tormentas en las dunas primarias: a través del perfil de equilibrio (Edelman

1972; Vellinga 1982; Kriebel & Dean 1993; Komar et al. 1999) y a través del impacto de las olas (Overton et al. 1987; Overton et al. 1994; Larson et al. 2004). La teoría del perfil de equilibrio asume que el perfil de la playa tiende hacia un estado de equilibrio definido por las condiciones de nivel del agua y se puede determinar geoméricamente el impacto de una subida del nivel del mar. En este caso hay una limitada descripción de los procesos físicos y una mayor atención a los resultados finales. Considerando el impacto de olas se tiene en cuenta los procesos físicos de cada uno de los impactos de la ola sobre la duna, pero tiene la dificultad de ser mucho más complejos y la probabilidad de no incorporar comportamientos en escalas de tiempo más largas no previstas por las ecuaciones de impacto sumado de varias olas. La mayoría de los modelos que evalúan el impacto de los eventos extremos en las dunas primarias intentan prever el retroceso de las dunas y no tienen en cuenta la forma del perfil real de la dunas, considerando solamente la variación de su altura (p. ej. en van de Graaff 1986; Larson et al. 2004; van der Burgh et al. 2007).

A continuación, se presenta un resumen de algunos modelos:

- Hallermeier & Rhodes (1988) sugieren una relación empírica simple para datos de eventos extremos (con período de retorno de más de 100 años) donde estima la erosión de la duna (o su eliminación) en función de las condiciones de esta tormenta.
- Kriebel & Dean (1993) proponen un modelo de perfil de equilibrio que asume que el volumen de sedimento erosionado de la duna primaria durante una tormenta es depositado en la zona de rompientes como un nuevo perfil de equilibrio. Considera el perfil de equilibrio inicial de la playa y la rotura de las olas, además del nivel máximo de agua causada por la tormenta y su duración.
- Komar et al. (1999) desarrollaron un modelo de erosión geométrico conservativo, que asume que la distancia erosionada es una función de la diferencia entre los niveles máximos que llega el agua y la elevación del pie de la duna, y de la pendiente de la playa seca.
- Sallenger (2000) desarrolló una escala que clasifica el impacto potencial de una tormenta basado en las elevaciones relativas de varias características de las dunas y la elevación alcanzada por el nivel de agua durante un evento. En términos simples, cuanto mayor la duna, más baja la probabilidad de ocurrencia del rebase o inundación durante las mayores tormentas y menor su vulnerabilidad.
- Larson et al. (2004) proponen un modelo analítico que asume que la anchura de erosión de las dunas es función lineal de la fuerza de impacto de las olas, siempre y cuando el nivel del agua sea más alto que la cota del pie de la duna. Por lo tanto, depende de la cota del pie de la duna, de la pendiente de la playa seca, además del período de ola y de un coeficiente que debe ser ajustado para cada local.

## **7.2. Modelos a medio plazo**

Los modelos de medio plazo (de estaciones a años) se refieren a las variaciones y comportamiento de las dunas respecto a cambios estacionales e inter-anales de entrada de energía y sedimento en el sistema.

En general el concepto tradicional de variación estacional de las dunas primarias es el de erosión en invierno y recuperación en verano (Komar 1976). Un argumento importante es el de que la acumulación de sedimento en las dunas depende de la sincronización del transporte potencial (dirección y velocidad del viento) con la disponibilidad de sedimento depositado en el frente de playa y en el backshore por procesos costeros y eólicos. Las épocas en que la velocidad del viento aumenta y más sedimento podría ser llevado hacia las dunas coinciden con que los niveles de agua también aumentan y, por lo tanto, hay una gran posibilidad de que el suministro de arena sea erosionado (Christiansen & Davidson-Arnott 2004; Houser 2009).

La importancia de la sincronización entre transporte potencial y disponibilidad de sedimento en la playa seca fue descrito por Ruz & Meur-Ferec (2004) en la costa de Francia: mientras las condiciones “óptimas” de transporte (vientos fuertes) fueron observadas durante invierno y primavera, la acumulación de arena en las dunas fue observada solamente durante el período de verano. Se observó un aumento del transporte potencial durante otoño e invierno, pero estaban asociados a un aumento de las mareas meteorológicas, que llevó a una disminución de la playa seca y retroceso de la duna por la formación de un escarpe. Sería razonable pensar que esta época sería la más propicia para la recuperación de las dunas pero la inundación de la playa superior limita el transporte. Solamente después de que la playa y el backshore se recuperen empieza a haber acumulación de sedimento en las dunas, en una época de transporte eólico potencial moderado (Houser 2009).

Sin embargo, este patrón no puede ser universalmente aplicado a todas las playas. Sabatier et al. (2009) verificaron que la mayoría de las playas estudiadas por ellos en la costa de Francia sí que presentaban suministro de sedimento hacia las dunas durante primavera y verano, pero encontraron que en la costa de Camargue el patrón era distinto, debido a que el viento hacia tierra, suministrador de las dunas, ocurría durante otoño e invierno, mientras que los vientos hacia mar ocurrían predominantemente en verano.

Ollerhead et al. (2013) verificó que el patrón estacional de suministro de sedimento de la playa hacia las dunas, en una playa de la costa en el este de Canadá, era la siguiente: durante el verano se transporta poca arena debido a que los vientos tienen velocidades bajas. En otoño la velocidad de los vientos aumenta y el sedimento es transferido hacia la cresta y a sotavento de la duna, pues las dunas primarias presentan una rampa bien desarrollada. La arena puede dejar de ser transferida hacia estas zonas si ocurre erosión por eventos extremos que escarpen las dunas. El mayor potencial de transporte de arena se da al final de otoño e inicio del invierno, pero es cuando hay mayores intensidades de tormentas y erosión de la duna. Durante el invierno ocurre que la playa se queda cubierta

de nieve en esta región y no hay transferencia de sedimento. En primavera la nieve desaparece y hay fuertes vientos, con aumento de la actividad de transporte eólico, siendo esta la estación de reconstrucción de las dunas primarias.

Los procesos a escala anual pueden estar relacionados con ciclos de aporte de sedimento a la playa. Uno de estos aportes cíclicos puede ser la migración de ondas de arena longitudinalmente a la costa, tal como fue observado por Stewart & Davidson-Arnott (1988) y Ruessink & Jeuken (2002), que verificaron que con la llegada de estas ondas de arena ocurre una extensión de la anchura de la playa en una escala de años, aumentando el área fuente de sedimento hacia las dunas primarias. Otro aporte es la migración de barras de la playa sumergida. Aagaard et al. (2004) evaluaron perfiles de playa/duna medidos bi-anualmente durante tres décadas en la costa de Dinamarca y verificaron que la migración de las barras hacia tierra, con consecuente aumento de la extensión de la playa seca y transporte de arena para las dunas, ocurren en ciclos de 8 años, con una velocidad de 20-30m/año.

### **7.3. Modelos a largo plazo**

Actualmente, poco se sabe sobre el comportamiento de las dunas en un intervalo de tiempo de décadas o siglos. La mayoría de las investigaciones sobre la dinámica de las dunas costeras ha sido centrada principalmente en el análisis de transporte de sedimento de la playa hacia la duna y viceversa en escala de eventos o procesos; o en estudios de la evolución de la costa en el Holoceno, a muy larga escala (Bochev-van der Burgh et al. 2011). Los pocos estudios que existen sobre la dinámica de las dunas en intervalo de tiempo de décadas a siglos presentan modelos más conceptuales que informaciones cuantitativas sobre las variaciones morfológicas (Psuty 1988; Sherman & Bauer 1993; Davidson-Arnott 2005), pero este tipo de modelo es importante para la gestión costera (Sherman & Bauer 1993).

Los modelos a largo plazo (décadas) existentes normalmente evalúan el tamaño de las dunas en función del balance sedimentario.

Uno de los más conocidos es el **modelo conceptual de Short & Hesp (1982)**, que se basa en el concepto de que el aporte de sedimento a través del transporte eólico hacia tierra es función del volumen de arena de la playa disponible a ser transportada, su forma y anchura, características estas que influirán en la naturaleza del flujo aerodinámico. Consecuentemente, la morfología de la playa seca o su topografía tienen un efecto directo sobre el volumen y tasa de transporte de sedimento hacia las dunas (Hesp 1982). De esta manera proponen que:

- Playas disipativas: presentan suministro abundante de arena media-fina; máximo potencial de transporte inducido por las olas hacia la costa; la morfología de la zona subaérea se caracteriza por ser amplia, plana y con pendiente suave del frente de la playa y playa seca, con máximo transporte eólico de sedimento hacia tierra, principalmente durante la bajamar. La línea de costa es moderadamente estable, con baja frecuencia de temporales,

pero cuando ocurren son continuos a lo largo de la costa causando escarpes paralelos en la playa seca y duna primaria. Las playas disipativas de alta energía son potencialmente las que presentan las dunas primarias más grandes, pero pueden ser inestables.

- Playas reflejantes: el transporte potencial hacia la costa inducido por las olas es mínimo. Los sedimentos son almacenados en la playa seca como una berma inclinada y reflejante. La morfología de la playa seca está caracterizada por un frente/berma inclinado y, detrás de la berma, una playa seca plana o con pendiente suave hacia la tierra. La parte de detrás de la berma y la parte más alta de la playa normalmente son estrechas. Ocurre una separación del flujo de viento a sotavento de la cresta de la berma y las velocidades son marcadamente reducidas, con transporte eólico potencial mínimo de sedimento hacia las dunas primarias. Erosiones ocurren con poca frecuencia y son de poca importancia, con limitada extensión y duración (Wright 1980). El recubrimiento de la playa es rápido y la duna primaria, excepto erosión ocasional, tiende a permanecer relativamente estable. Este tipo de playa presentará dunas primarias muy pequeñas o no hay el desarrollo de las mismas.

- Playas intermediarias: presentan características entre playas totalmente disipativas y reflejantes y consecuentemente las dunas primarias tendrán características más de playas disipativas o reflejantes dependiendo del nivel de energía que entra en el sistema. Playas intermediarias son caracterizadas por erosión localizada, arqueadas, durante eventos de temporal. Estas erosiones arqueadas se extienden hasta las dunas primarias en eventos extremos resultando a largo plazo, pero localmente, en dunas primarias escarpadas. La canalización del viento en estos locales puede resultar en casquetes erosivos y eventualmente dunas parabólicas (Hesp 2012).

Como resumen, Hesp (2002) afirma que los tres (de varios) factores que controlan el desarrollo de las dunas son la anchura de la playa, el suministro de sedimento y la velocidad del viento, y que los dos primeros factores están relacionados con el tipo de zona de surf de la playa. Si todos los otros factores son iguales (p. ej. suministro de sedimento potencial igual) las mayores dunas primarias ocurren en playas disipativas (playas más amplias y máximo potencial de suministro de sedimento) y las menores ocurren en playas reflejante (playas estrechas y mínimo potencial de suministro de sedimento). En este modelo el suministro de sedimento es claramente un factor crítico. Si no hay suministro de sedimento, o muy poco, el sistema de playa disipativo necesitará utilizar todo el sedimento disponible para construir la zona de surf y playa y puede no haber dunas del todo. En el otro extremo, un suministro de alto a muy alto de sedimento en playas reflejantes de baja energía van a resultar en el desarrollo de una duna primaria amplia y plana (Hesp 2012).

La estabilidad del sistema de playa también presenta un importante papel en la frecuencia y magnitud de las perturbaciones. Por ejemplo, playas de tipo reflejante suelen ser más estables en escalas de largo plazo (décadas), comparando con playas disipativas (Hesp 1991). Puede ocurrir una variación espacial de tamaño de las dunas en función de la exposición de la línea de costa a distintos vientos hacia la tierra (por ejemplo en playas con planta de equilibrio en forma de zeta). Sin embargo, los autores acreditan que a pesar de

que la exposición sea una importante variable, la morfología de la playa, el gradiente y la anchura son mucho más importantes en la determinación de la tasa de transporte eólico de sedimento hacia tierra (Short & Hesp 1982).

Otra teoría muy aceptada es la del **modelo de Psuty** (Psuty 1988; Psuty 1992; Psuty 2004) que relaciona la disponibilidad y distancia de la fuente de sedimento con las características de las dunas primarias. En este modelo se identifican cuatro situaciones posibles (Figura AI.15).

Si el balance sedimentario en cada parte del sistema es:

- (a) Playa negativo, duna primaria negativo: las dunas están asociadas a posibilidad de rebase o erosión frecuente, causando su degradación, con presencia de casquetes erosivos, entrantes parabólicos o *hummocks*;
- (b) Playa negativo, duna positivo: asociado al desarrollo de la duna, con máxima altura ocurriendo cuando la playa es ligeramente erosiva;
- (c) Playa positivo y duna negativo: asociado a topografía de playa con un cordón arenoso;
- (d) Playa positivo y duna positivo: asociado a topografía de múltiples cordones dunares;

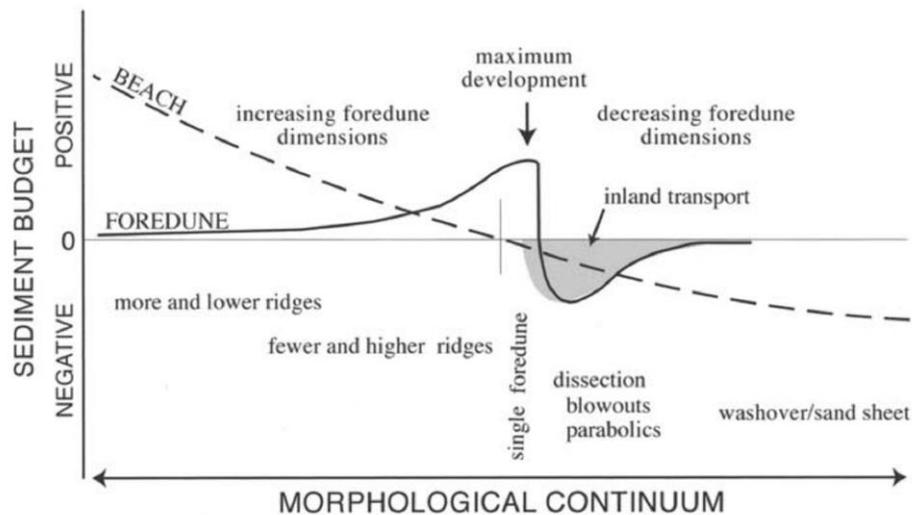


Figura AI.15 - Modelo conceptual de la relación de balance de sedimento de la playa y el balance de sedimento de las dunas primarias, transferencia de arena hacia interior, y topografías resultantes en el sistema de reparto de arena propuesto por Psuty (Figura obtenida de Psuty, 2004).

El elemento esencial de este modelo es que con un balance sedimentario positivo de la playa (playas progradantes), las dimensiones de las dunas primarias son inversamente relacionadas con la tasa de acreción de playa. Altas tasas de progradación de la línea de costa no permite mucho tiempo a la transferencia de la arena hacia la posición de las dunas primarias; de esta manera la acumulación de las dunas primarias nunca es muy grande. En presencia de una alta disponibilidad sedimentaria en la playa, la morfología resultante se

correspondería con una serie de cordones costeros paralelos y de poca altura. Conceptualmente, el número de crestas de dunas primarias pueden decrecer hacia lejos de la desembocadura del río (la fuente de sedimento), hasta que solamente haya una gran cresta de dunas primarias en intercambio activo de sedimento entre playa y duna. Cuando la progradación de la playa es lenta, la oportunidad de transferir arena para las dunas primarias aumenta y por lo tanto hay un aumento en las dimensiones de las dunas. El mayor desarrollo de las dunas primarias respecto a su altura se daría en una condición en que la playa tiene balance sedimentario ligeramente negativo y las dunas balance sedimentario positivo. Una explicación para esto estaría ligado al hecho de que las dunas migran hacia tierra y sigue ocurriendo la transferencia de sedimento de la playa hacia las porciones más altas de la duna, de tal manera que la playa registre una pérdida neta (Psuty 1993). Para playas con balance sedimentario muy negativo, el crecimiento de las dunas será limitado por rebase y casquetes erosivos.

La oportunidad de maximización del desarrollo de las dunas primarias (línea negra continua en la Figura AI.15) y maximización del transporte de sedimento hacia interior (sombreado), que soportarían dunas parabólicas secundarias, están estrechamente posicionadas y pueden coincidir en el continuo espacial / temporal.

En las playas de Inglaterra y Gales, estudiadas por Saye et al. (2005), este modelo parece ser el más adecuado para explicar el hecho de que las dunas primarias más altas se encuentran en playas más estrechas, donde una retracción lenta o una costa estable dan la oportunidad a la duna de crecer verticalmente y moverse lentamente hacia tierra. Ruggiero et al. (2011) también confirman el modelo conceptual de Psuty: las diferencias en la evolución de las dunas de la costa noroeste de EE.UU. (litoral del río Columbia) demuestra que bajo altas tasas de suministro de sedimento a la playa, se forman nuevas morfologías en una posición hacia mar y las dunas primarias anteriores se quedan sin alimentación de arena. Bajo cambios de línea de costa de moderado a bajo, las dunas primarias aumentan en volumen y altura.

La componente más problemática del modelo es cuando la línea de costa es estable o con balance de sedimento negativo menor. Ejemplos de dunas primarias bien desarrolladas en costas erosivas sugiere que existen condiciones en las que la transferencia de arena hacia las dunas primarias es similar a las pérdidas durante los episodios de erosión (Psuty 2004).

El modelo propuesto por **Sherman & Bauer** (1993) sigue la teoría de Psuty, pero amplía el modelo, considerando los estados de balance sedimentario estable.

Las situaciones que se pueden encontrar, en cuanto al balance sedimentario de cada parte del sistema, son:

(a) Playa positivo, duna positivo: tal como el modelo de Psuty, es esperado el desarrollo de un campo de cordones dunares.

(b) Playa positivo, duna estable: esta relación es esperada solamente en ambientes donde la velocidad del viento está por debajo de la velocidad de corte de inicio de movimiento (hay transporte a través de las dunas pero no acumulación neta). Se espera el desarrollo de cordones de playa, planicies de playa o planicies de *chenier*. La duna no presentará necesariamente una forma característica, pero su tamaño será pequeño y la cobertura vegetal podrá ser mínima.

(c) Playa positivo, duna negativo: en este escenario hay una deposición en la playa, pero el transporte de las playas hacia las dunas es más pequeño que hacia fuera de las dunas. Ocurre normalmente en lugares donde la vegetación fue degradada, resultando en dunas de deflación, casquetes erosivos y formación de dunas parabólicas. Esta situación se puede dar cuando ocurre un aumento de sedimento de la playa.

(d) Playa estable, duna positivo: en condiciones ideales, una playa en equilibrio puede ser mantenida cuando la tasa de retirada de sedimento de la playa eólicamente es igual a la tasa de suministro por el sistema costero. La característica morfológica de la playa y la localización de la línea de costa son aproximadamente constantes a lo largo del tiempo. Sin embargo, con el balance de la duna positivo, el sistema de dunas litorales deberá crecer en su lugar hasta que colisione con la zona intermareal y de lavado, la geometría de las dunas empieza a interactuar con el campo de viento y reduce la arena transportada, o hasta que dunas parabólicas se desarrollen y se muevan hacia tierra.

(e) Playa estable, dunas estables: para un periodo de años, el sistema playa-dunas puede llegar a un estado estable donde los sedimentos se mueven a través de los dos ambientes con poca alteración de sus volúmenes. La indeterminación morfológica es especialmente aparente bajo estas condiciones debido a que las dunas pueden ser estáticas, especialmente si ancladas por vegetación densa, o pueden envolver una secuencia de formas sin cambio volumétrico neto. Esta condición es inusual.

(f) Playa estable y duna negativo: ocurre la erosión de la duna mientras que el balance sedimentario de la playa es estable. Puede ocurrir en las mismas situaciones que descritas para el caso (c), donde la mayoría de los casos resulta de la desestabilización de la vegetación debido al impacto humano o como resultado de un ataque frecuente de olas de temporal sobre el frente de la duna.

(g) Playa negativo; duna positivo: probablemente esta sea la relación del balance sedimentario más común encontrado en sistemas de playas y dunas. Se ha estimado que el 70% de las playas está en retracción (Bird 1985) aunque los sistemas de dunas primarias son características morfológicas prominentes en muchos ambientes costeros. Psuty (1992) presenta esto como una evidencia de que la erosión de la playa puede beneficiar el balance sedimentario de las dunas primarias debido a la destrucción de la vegetación estabilizadora en la pendiente hacia mar de las dunas, que re-expone los sedimentos para el proceso eólico.

(h) Playa negativo; duna estable: este es el caso clásico del sistema de dunas primarias que migran hacia tierra como una etapa de la retracción de la línea de costa y está comúnmente asociada a transgresiones de larga escala que responden al aumento del nivel del mar. En cuanto la playa erosione, el frente de la duna se desestabilizará y la arena de la duna se tornará disponible para ser transportada por el sistema de viento. La línea de cresta de las dunas migra en la tasa aproximada de la retracción de la playa si el sistema eólico es relativamente vigoroso. El perfil playa-duna puede no estar en forma de equilibrio en cortos periodos de tiempo y el volumen de la duna puede oscilar algunos metros.

(i) Playa negativo; duna negativo: cuando la playa está seriamente y crónicamente erosionada, las dunas primarias serán frecuentemente atacadas por las olas de tormentas. La rotura y lavado de las dunas contribuye a la destrucción de las dunas primarias. Esta situación es comúnmente asociada a retracción de islas barreras.

Los últimos trabajos desarrollados que intentan modelar las dunas primarias a largo plazo lo hacen desde un enfoque matemático, como lo presentado en el artículo de **Hanson et al. (2010)**, **Duran & Moore (2013)**, **Goldstein & Moore (2016)** y **Larson et al. (2016)**. Se basan en ecuaciones de transporte eólico, que alimenta las dunas primarias, y de erosión debido al impacto de olas sobre las playas y dunas. A continuación, se presenta las principales consideraciones de estos modelos:

- **Hanson et al. (2010)** desarrollan una aproximación matemática y modelo numérico para simular el comportamiento de la playa y duna en respuesta a los cambios sedimentarios transversales. Calcula la posición del pie de la duna en función de la anchura de playa. Se basa en el concepto de que la anchura de la playa seca, o berma, controlará tanto el transporte eólico (hasta que la anchura de la playa llegue al fetch crítico) como la erosión de las olas. Considera que la altura y forma de la duna permanece constante y que lo que cambia es su volumen, que hace que la duna avance o retroceda con relación a la línea de costa. Propone una ecuación para el cálculo de la anchura de playa en equilibrio.

- **Duran & Moore (2013)** proponen un modelo de desarrollo de dunas costeras basado en la localización de la vegetación pionera que equivale a la localización de la duna primaria. El modelo consiste en ecuaciones diferenciales para procesos físicos y biológicos que describen el transporte eólico de arena sobre una superficie vegetada, bajo un viento hacia tierra constante sobre una superficie plana. En este trabajo, las simulaciones indican la importancia de la distancia entre la vegetación pionera y la orilla ( $L_{veg}$ ): si todos los otros factores son iguales, una duna primaria incipiente que se forme cuando  $L_{veg}$  es pequeño puede resultar en un reducido flujo de arena, relativamente a una duna incipiente formada en  $L_{veg}$  grande. Un bajo flujo de arena implica en una tasa potencial de erosión/deposición baja, que puede aumentar el umbral de movilidad debido a la vegetación y generar una duna primaria más estable. En contraste, dunas primarias formadas donde  $L_{veg}$  es ancha se tornan más inestables por los fuertes vientos y generan una amplia gama

de morfologías de duna móviles y casi-móviles (*blowouts*, dunas parabólicas, dunas crecienticas, ...). Además la *Lveg* determina el volumen de arena transportado hacia tierra a través del control de la capacidad de almacenamiento.

- **Goldstein & Moore** (2016) desarrollan un modelo no lineal de una dimensión para simular la estabilidad de la altura de las dunas primarias. En este modelo consideran que las dunas primarias costeras crecen continuamente de una manera logística como resultado de una retroalimentación biofísica (proceso eólico y vegetación). Ellas son destruidas/erosionadas por eventos recurrentes de tormenta, que son discretos en el tiempo. Los resultados obtenidos indicaron que las dunas modeladas pueden ser de uno los dos tipos: (i) una “duna resistente” alta (*hight resistant-dune state*); (ii) una “planicie de rebase” baja (*low overwash-flat state*). El estado estable (altura de la duna en equilibrio) depende del valor de dos parámetros: la frecuencia adimensional de tormenta (proporción entre frecuencia de tormenta con relación a la tasa de crecimiento intrínseco de la duna) y la magnitud adimensional de la tormenta (la proporción entre el nivel total de agua durante la tormenta y la altura máxima teórica de las dunas).

- **Larson** et al. (2016) complementan el modelo de Hanson et al. (2010), incluyendo procesos de rebase de la duna y cambios entre los tramos subaéreo y subacuático, con desarrollo de barras. La aplicación del modelo indica que el cambio y posterior estabilización de la localización del pie de la duna tarda más tiempo que la localización de la cresta de la berma o de la barra, tras un evento que cambie las condiciones (un relleno o la retirada de espigones de la playa). Verificaron también que el modelo depende de coeficientes que son, en principio, específicos de cada playa y deben ser obtenidos a partir de datos reales para una aplicación fiable.



# ANEXO II

## Caracterización de las áreas de estudio y sus dunas primarias



## AII. Caracterización de las áreas de estudio y sus dunas primarias

### 1. Caracterización morfométrica y morfológica

Como se ha presentado en el Capítulo II, se seleccionaron 6 playas de la costa Atlántica, en el norte de España, pertenecientes a tres comunidades autónomas: Cantabria, Asturias y Galicia (Figura AII.1). A continuación se describe cada una de las playas/dunas seleccionadas y sus parámetros morfométricos.

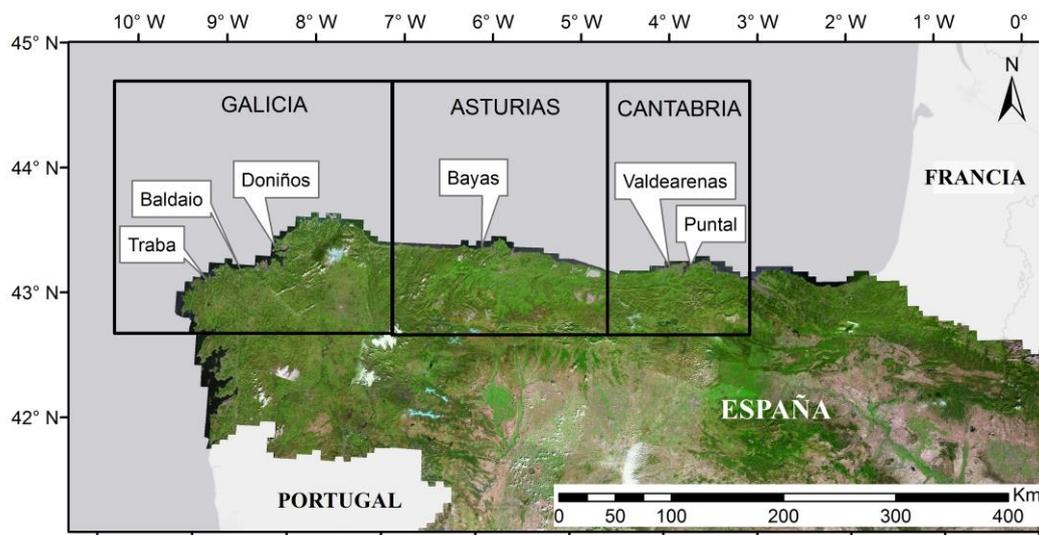


Figura AII.1 – Localización de las playas seleccionadas en la costa atlántica española, para la evaluación de sus dunas primarias.

#### 1.1. Puntal de Somo

Datos presentados en el Capítulo II.

#### 1.2. Valdearenas

La playa de Valdearenas (lat. 43° 26' 45" N; long. 03° 58' 21" W), también conocida como playa de Liencres (Municipio de Piélagos, Cantabria, Figura AII.2) está adyacente al puntal localizado en la desembocadura del río Pas y presenta una longitud de aproximadamente 1400m, orientada hacia el noroeste (321°).

Este puntal y su sistema de dunas, declarado Parque Natural de las Dunas de Liencres en 1986, es una de las formaciones más importantes del mar Cantábrico, no solamente por sus dimensiones pero también por su naturalidad y valor ecológico. El amplio sistema de dunas de Liencres ha sufrido un proceso continuo de degradación debido a extracción de arena, presión turística excesiva y también debido a ocurrencia de

diversos eventos desfavorables de vientos, mareas y tormentas. Como resultado la cara hacia mar de las dunas ha socavado y colapsado, perdiendo vegetación y volviéndose muy vulnerable. En 1999 comenzaron los trabajos de restauración de las dunas que consistieron en trampas, trasplante de vegetación, cercas, construcción de pasarelas y carteles educativos (Gómez-Pina et al. 2002). Hay evidencias de que el sistema de dunas recibe importante aporte de sedimentos, pues el campo de dunas está migrando hacia tierra, alimentado por el sedimento proveniente de las dunas primarias (Arteaga et al. 2008), que sufrieron erosión causada por eventos extremos como el que ocurrió en 1995 (Arteaga & Gonzalez 2005) y 2014. Por lo tanto, se consideró que, a pesar de sufrir erosión esporádica por eventos extremos, este sistema presenta alta capacidad de regeneración y en el periodo de obtención de datos de topografía (año 2012) este sistema estaba recuperado y con características de un sistema en equilibrio.

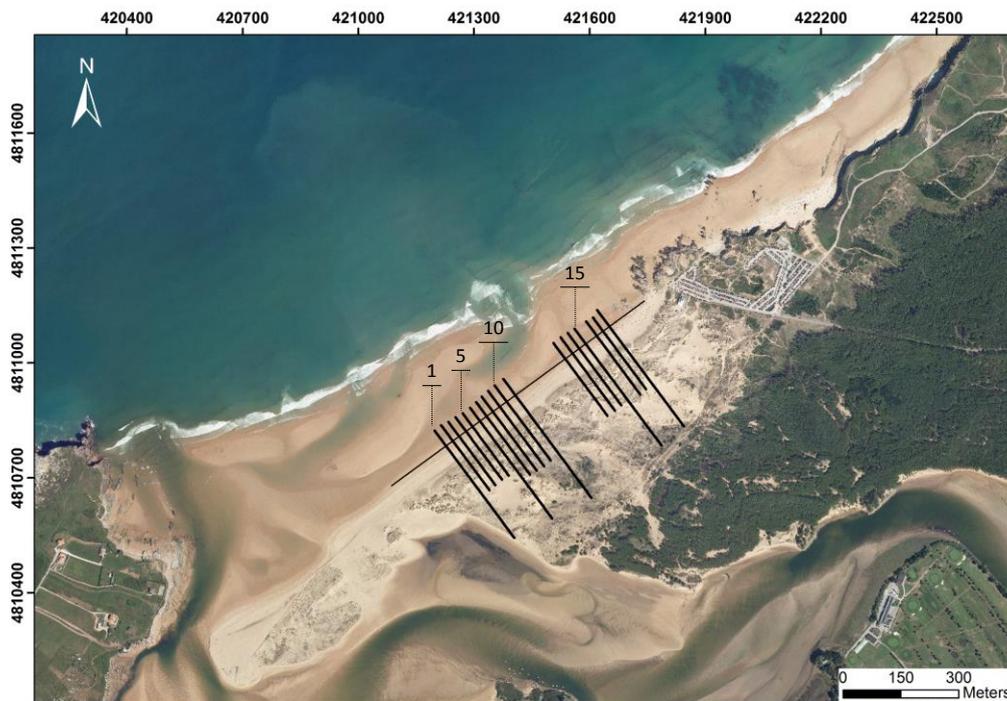


Figura AII.2 – Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) de la playa de Valdearenas y perfiles evaluados en este estudio.

Esta playa presenta arenas muy bien clasificadas con tamaño medio de 0.36mm; la duna adyacente presenta sedimento más fino, con tamaño medio de 0.31mm, según Martínez Cedrun et al. (2014) y Triax (2015).

Los perfiles de la playa seca y dunas primarias de la playa de Valdearenas son bastante homogéneos (Figura AII.3; Figura AII.4 y Tabla AII.1). Presentan como forma característica una cresta convexa bastante pronunciada, fuerte pendiente en la zona mediana de la duna, base cóncava y playa relativamente más suave, casi plana, adyacente al pie de la duna. La pendiente que define el pie de la duna es de  $5.7^\circ$ , que se localiza, de media, a una cota de 4.1m por encima del nivel medio del mar. Esta playa presenta las mayores dunas entre las playas españolas evaluadas, con valores medios de cota de coronación de 11.6m por encima del nivel medio del mar. El volumen medio del backshore y de las dunas primarias presentan el mismo comportamiento de variación espacial (media de  $310.6$  y  $182.7\text{m}^3/\text{m}$ ; respectivamente), lo que indica que las dunas contribuyen fuertemente en este volumen total. La playa seca es más estrecha que las dunas primarias (media de 35 y 42m; respectivamente). Las dunas presentan pendientes característicamente inclinadas (media de  $12.0^\circ$  y máximo absoluto de  $28.8^\circ$ ), y los perfiles de playa con pendientes bastante suave (media de  $2.8^\circ$ ).

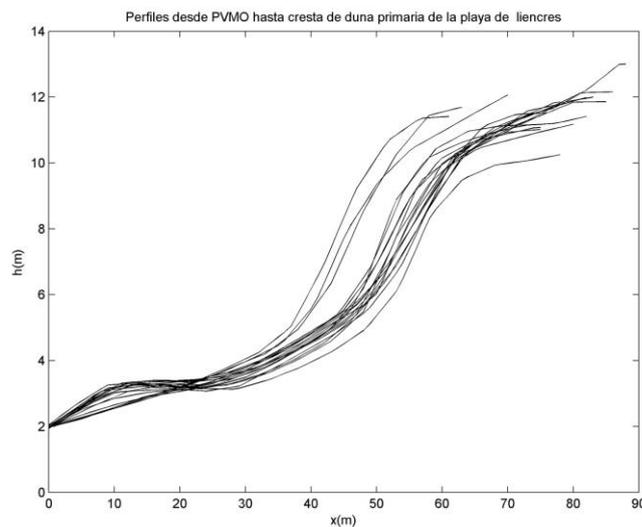


Figura AII.3 – Perfiles de la playa/duna primaria de Valdearenas (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar).

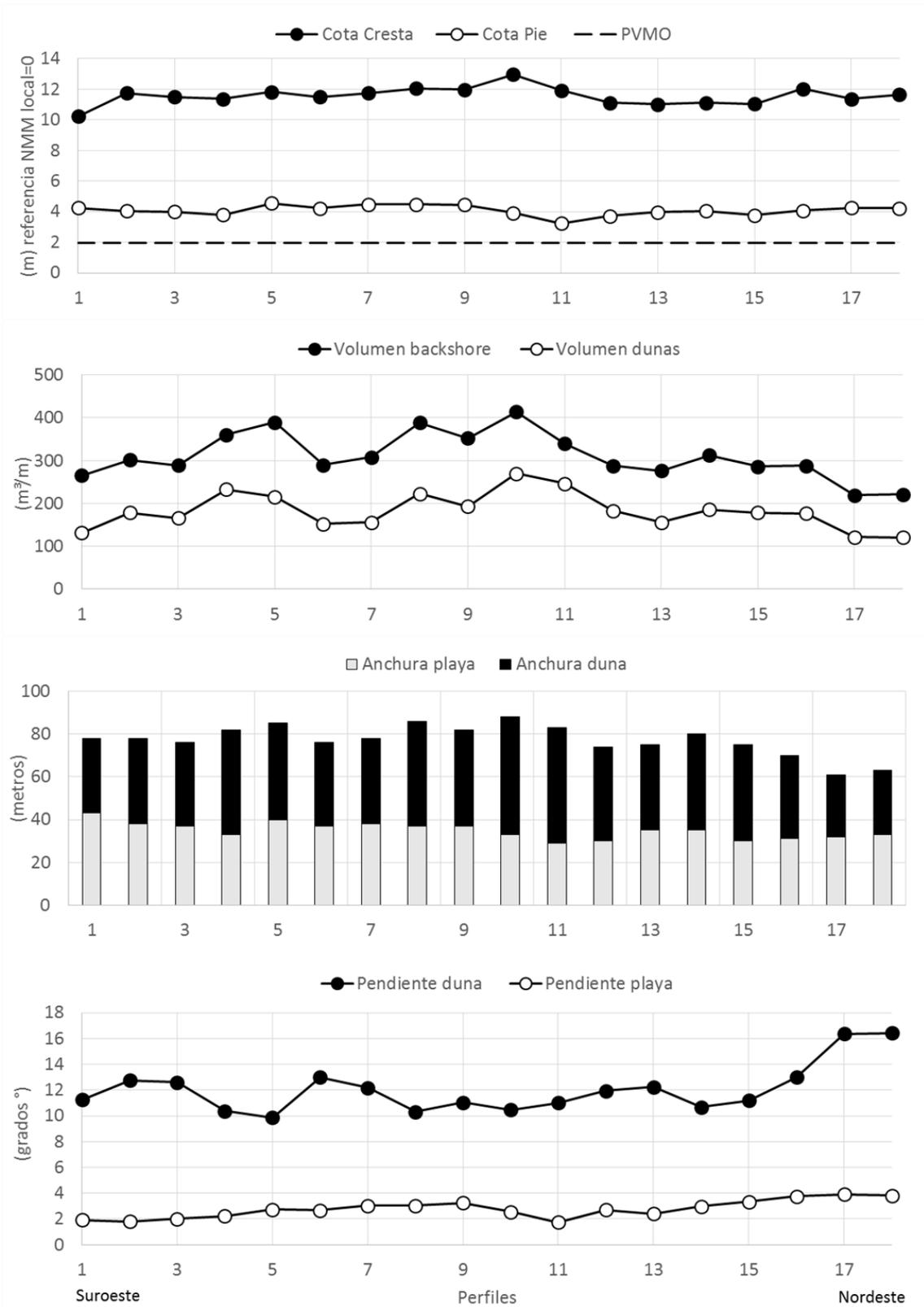


Figura AII.4 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa de Valdearenas.

Tabla AII.1 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Valdearenas (Número de perfiles evaluados=18).

<i>Parámetro</i>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación típica</b>
<i>Lbackshore (m)</i>	61.00	88.00	77.22	78.00	7.21
<i>VolBackshore (m<sup>3</sup>/m)</i>	219.59	414.45	310.63	295.87	54.31
<i>Cota de coronación dunas (ref.NMM)</i>	10.24	12.97	11.57	11.57	0.58
<i>Cota de inicio de las dunas (ref. NMM)</i>	3.23	4.56	4.08	4.05	0.33
<i>Hduna (m)</i>	6.00	9.09	7.53	7.46	0.66
<i>Lduna (m)</i>	29.00	55.00	42.33	42.00	7.07
<i>VolDuna (m<sup>3</sup>/m)</i>	121.03	269.92	182.72	178.67	41.99
<i>PendMedDuna(°)</i>	9.88	16.42	12.04	11.61	1.86
<i>PendMax Duna (°)</i>	17.54	28.77	22.89	23.49	2.74
<i>Hplaya (m)</i>	1.21	2.60	2.10	2.07	0.34
<i>Lplaya (m)</i>	29.00	43.00	34.89	35.00	3.80
<i>PendPlaya (°)</i>	1.73	3.92	2.77	2.72	0.68

### 1.3. Bayas

La playa de Bayas (lat. 43° 34' 34" N; long. 06° 02' 25" W), perteneciente al municipio de Castrillón, Asturias (Figura AII.5), está al este de la desembocadura del río Nalón, su principal suministrador de sedimento, segundo Flor & Flor-Blanco (2014). Presenta una extensión de aproximadamente 2000m y una orientación norte-noroeste (327°). El tramo que presenta dunas primarias con características típicas de un estado estable es de cerca de 750m, de donde fueron obtenidos los perfiles evaluados en esta tesis.

Sus dunas primarias sufrieron procesos de erosión entre 1930 y 1950, probablemente debido a procesos de dragado de la desembocadura del río (Flor & Flor-Blanco 2005). Una vez que los procesos de dragado se detuvieron en la década de los 70, la playa volvió a progradar y se desarrolló una nueva duna primaria (Flor 2004). Por lo tanto, las dunas primarias fueron formadas en los últimos 50 años (Diego Cavada 2014). Según este estudio, que hizo la evaluación de los campos dunares por imágenes de satélite, el frente del campo de dunas externas, que en esta tesis denominamos intersección entre playa y duna, presentó una importante progradación hacia mar desde la década de 70 hasta 1989. A partir de esta fecha el frente del campo de dunas presenta estabilidad, con pequeña oscilación de progradación y retroceso, pareciendo estar estable hasta 2011, última imagen evaluada.



Figura AII.5 – Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) de la playa de Bayas y perfiles evaluados en este estudio

Es una playa con carácter disipativo y sedimento de tamaño medio de cerca de 0.33mm en la playa y tamaño algo menor en las dunas primarias, de 0.30mm (Diego Cavada 2014).

Los perfiles de la playa seca y dunas primarias se muestran homogéneos en forma, pero con algunos perfiles ligeramente más bajos al suroeste (Figura AII.6; Figura AII.7; Tabla AII.2), presentando valor medio de cota de coronación de 7.7m por encima del nivel medio del mar. La pendiente que define el pie de la duna es de 5.7°, que se localiza, de media, a una cota de 4.3m por encima del nivel medio del mar. El volumen de las dunas primarias aumenta del suroeste hacia el nordeste, acompañado del volumen del backshore. Sin embargo, la anchura de la playa no parece presentar el mismo patrón. La playa presenta una pendiente bastante homogénea ( $3.7 \pm 0.3^\circ$ ). Las dunas primarias tienen una

pendiente media de entre 5.5 y 10.6°, con una máxima pendiente registrada entre todos los perfiles de 16°.

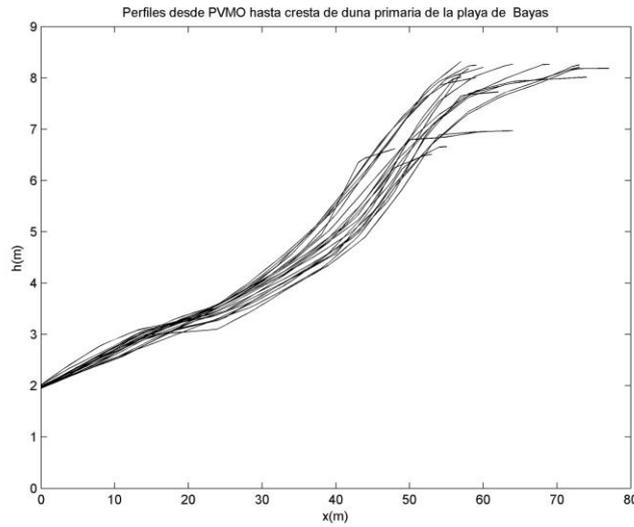


Figura AII.6 – Perfiles de la playa/duna primaria de Bayas (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar).

Tabla AII.2 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Bayas (Número de perfiles evaluados=20).

<i>Parámetro</i>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación típica</b>
<i>Lbackshore (m)</i>	48.00	77.00	62.00	59.50	7.66
<i>VolBackshore (m<sup>3</sup>/m)</i>	92.14	236.82	159.03	153.61	41.80
<i>Cota de coronación dunas (ref.NMM)</i>	6.47	8.26	7.74	8.01	0.63
<i>Cota de inicio de las dunas (ref. NMM)</i>	3.80	4.98	4.33	4.32	0.32
<i>Hduna (m)</i>	2.15	4.44	3.44	3.66	0.77
<i>Lduna (m)</i>	15.00	40.00	27.15	30.00	7.97
<i>VolDuna (m<sup>3</sup>/m)</i>	18.96	96.39	55.62	63.41	26.64
<i>PendMedDuna (°)</i>	5.54	10.58	8.23	8.66	1.56
<i>PendMax Duna (°)</i>	9.39	16.16	12.23	11.77	1.78
<i>Hplaya (m)</i>	1.83	3.01	2.36	2.35	0.32
<i>Lplaya (m)</i>	27.00	42.00	34.85	34.00	4.72
<i>PendPlaya (°)</i>	3.09	3.95	3.68	3.76	0.28

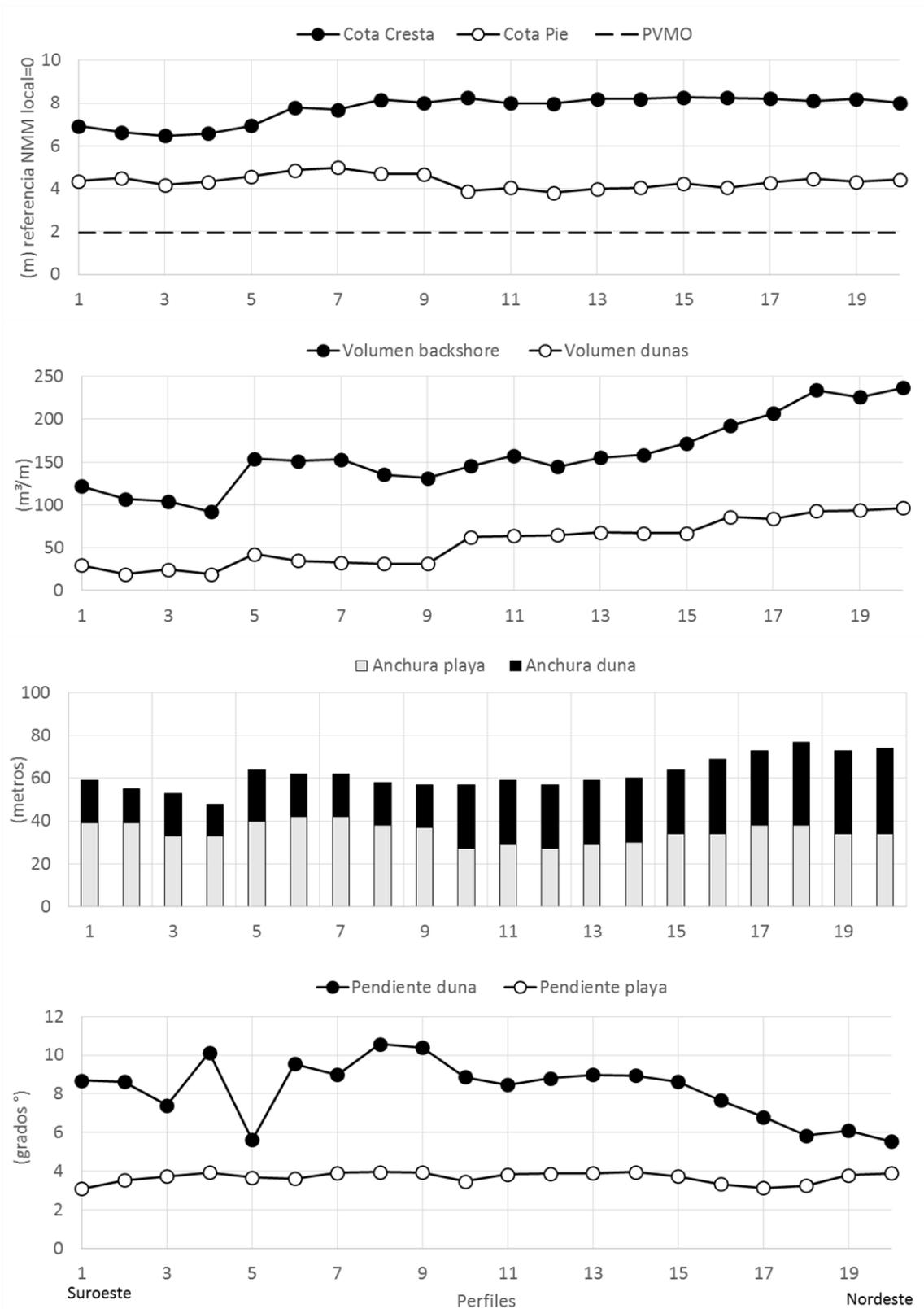


Figura AII.7 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa de Bayas.

#### 1.4. Doniños

La playa de Doniños (Figura AII.8) (lat. 43° 29' 34.13" N; long. 08° 19' 10.9" W) pertenece al municipio de Ferrol y presenta una longitud de 1850m, aproximadamente, con orientación oeste (284°). Es parte de un sistema sedimentario tipo barrera con una laguna costera localizada por detrás del campo de dunas. Presenta diversos cordones dunares paralelos que indican antiguas dunas primarias, en una aparente progradación del sistema playa/duna en periodos anteriores (Flor 1992).

Los únicos datos de granulometría del sedimento obtenidos a partir de la bibliografía fueron de la zona intermareal (Junoy et al. 2005). Presenta un valor de tamaño medio del grano de 0.48mm. La literatura indica que la fuente de sedimento es proveniente del acantilado (Pérez Alberti & Vázquez Paz 2011; Galicia 2011) o de la ría de Ferrol (Flor 1992).

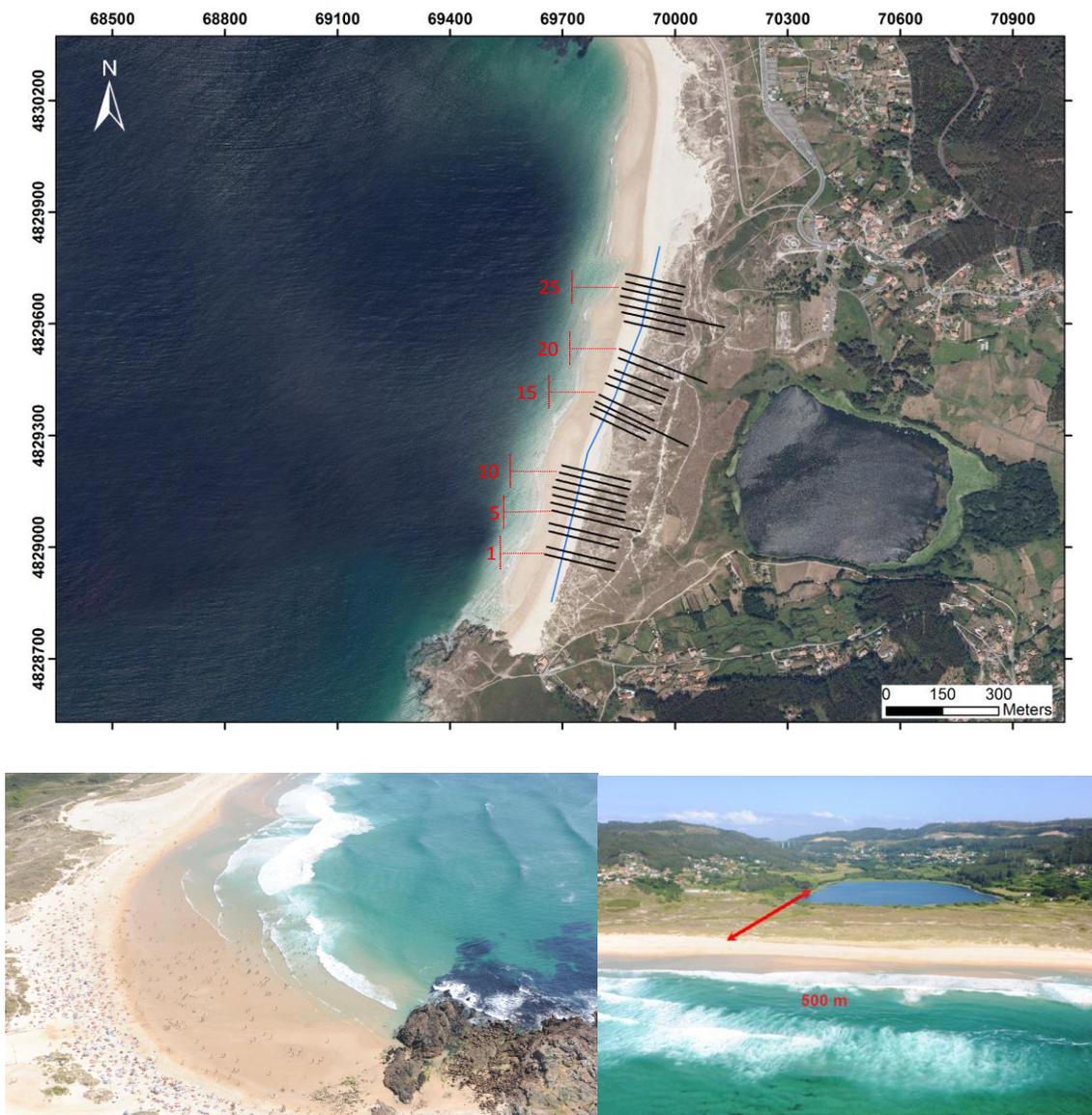


Figura AII.8 – Imágenes (fuente: Galicia (2011)) de la playa de Doniños y perfiles evaluados en este estudio.

Como se puede ver en la Figura AII.9, los perfiles del sistema playa seca/duna presentan básicamente dos formas, una con la playa más corta y diferenciación entre cambio de pendiente más sutil, y otra con la presencia de una playa más recta a principio, que luego aumenta su pendiente hasta que es posible caracterizar el pie de la duna. Eso ocurre probablemente debido al acoplamiento de una barra a la playa o de un mega-cúspide, pues imágenes de satélite sacadas en diversas fechas enseñan que la morfología de barras y canales cambia de manera importante, causando una variación en la playa tanto en el tiempo como en el espacio. Con la base de datos utilizada en esta tesis, eso se refleja en la característica de la playa seca, habiendo una clara diferenciación entre los perfiles de 1-11 y de 12-27, que se puede observar en las gráficas de variación espacial de anchura de playa y volumen del backshore (Figura AII.10). La intersección entre playa seca y duna tiene una pendiente (PendPie) de  $7.4^\circ$ , y se localiza de media a una cota de 3.9m (ref. NMM). La cota de coronación de las dunas primaria presenta una tendencia de presentar valores más bajos en los perfiles más al norte, pero el valor medio es de  $10.8 \pm 1.3$ m por encima del nivel medio de mar local.

Los valores medios de volumen, altura y anchura de la duna primaria son de  $146.4 \pm 50 \text{m}^3/\text{m}$ ;  $6.9 \pm 1.1$ m y  $34.6 \pm 7.8$ m; respectivamente. La pendiente media de la playa presenta valores bastante variables (entre  $1.8$  y  $7.0^\circ$ ), así como las dunas primarias (entre  $7.4$  y  $19.6^\circ$ ). Esta playa fue la que presentó una duna primaria con mayor valor de pendiente máxima registrado entre las playas evaluadas (Pendiente máxima= $34.5^\circ$ ). Los valores de los parámetros morfométricos y sus variaciones están presentados en la Tabla AII.3.

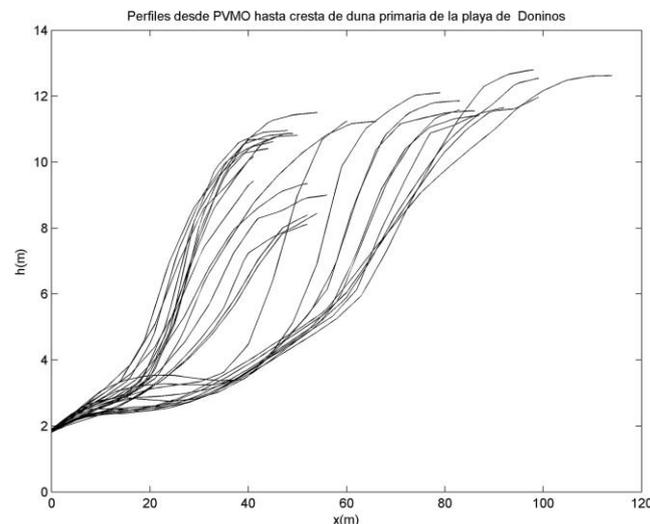


Figura AII.9 – Perfiles de la playa/duna primaria de Doniños (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar).

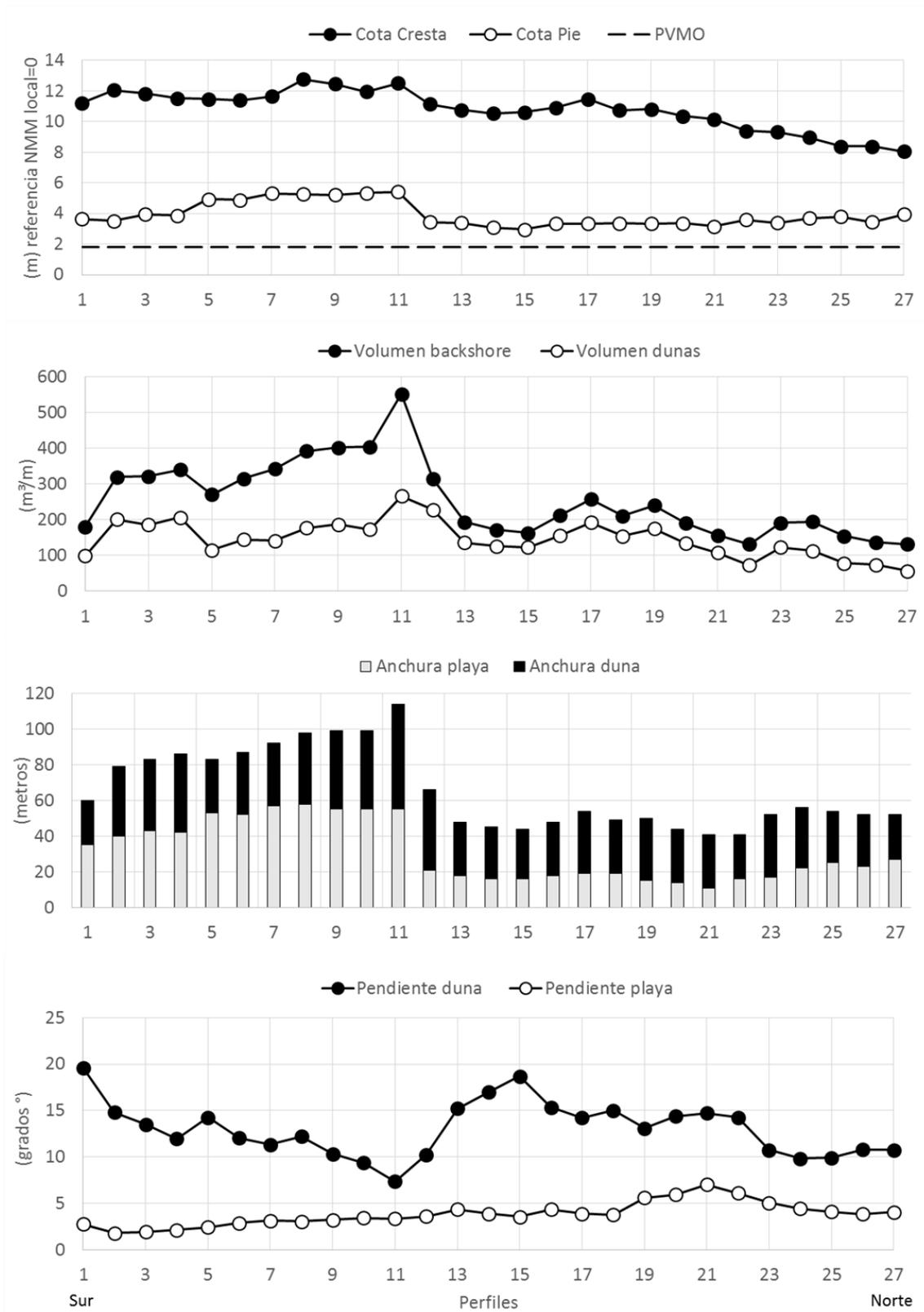


Figura AII.10 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa de Doniños.

Tabla AII.3 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Doniños (Número de perfiles evaluados=27).

<i>Parámetro</i>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación típica</b>
<i>Lbackshore (m)</i>	41.00	114.00	65.78	54.00	22.04
<i>VolBackshore (m<sup>3</sup>/m)</i>	131.39	551.75	255.52	212.55	105.01
<i>Cota de coronación dunas (ref.NMM)</i>	8.04	12.77	10.77	10.90	1.30
<i>Cota de inicio de las dunas (ref. NMM)</i>	2.96	5.42	3.92	3.57	0.81
<i>Hduna (m)</i>	4.18	8.58	6.90	7.34	1.11
<i>Lduna (m)</i>	25.00	59.00	34.59	34.00	7.82
<i>VolDuna (m<sup>3</sup>/m)</i>	56.80	266.55	146.44	141.96	50.55
<i>PendMedDuna(°)</i>	7.35	19.59	12.99	13.09	2.90
<i>PendMax Duna (°)</i>	11.09	34.51	21.88	21.14	6.21
<i>Hplaya (m)</i>	1.08	3.52	2.07	1.74	0.81
<i>Lplaya (m)</i>	11.00	58.00	31.19	23.00	16.59
<i>PendPlaya (°)</i>	1.79	7.02	3.84	3.76	1.27

### 1.5. Baldaio

Esta playa (Figura AII.11) (lat. 43° 17' 51,3" N; long. 08° 40' 48,26" W), localizada en el municipio de Carballo, funciona como una barrera arenosa que protege el complejo marismeño-lagunar de Baldaio, con la desembocadura localizada al este de la playa. La región de la playa que presenta dunas primarias con características de estabilidad tiene una longitud de 1600m, aproximadamente, dado que el total de la playa se acerca a los 3500m. Presenta orientación norte-noroeste (335-346°).

Sus dunas primarias son citadas como uno de los mejores ejemplos de este tipo de duna en la costa de Galicia (Galicia 2011; Pérez Alberti & Vázquez Paz 2011). De la misma manera que Doniños, presenta cordones dunares paralelos que indican antiguas dunas primarias en una aparente progradación del sistema playa/duna en períodos anteriores al actual (Flor 1992).

Los datos de granulometría del sedimento de la playa presentados por Junoy et al. (2005) se refieren a la zona intermareal, con valor de tamaño medio del grano de 0.37mm. Los sedimentos derivan del conjunto de rías La Coruña, Betanzos, Ares y Ferrol (Flor 1992).



Figura AII.11 – Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) de la playa de Baldaio y perfiles evaluados en este estudio.

Los perfiles del sistema playa seca/ duna de Baldaio (Figura AII.12, Figura AII.13, Tabla AII.4) presentan formas bastante homogéneas: la playa presenta pendiente relativamente pronunciada (media de  $4.2 \pm 0.8^\circ$ ) y la intersección de la playa y duna no es muy marcada, estando caracterizada por un cambio de pendiente en  $7.4^\circ$ , que se localiza a una cota media de 3.8m por encima del nivel medio del mar. La variación espacial de los parámetros morfométricos no presentó un patrón marcado. La cota de coronación es prácticamente constante, estando a aproximadamente 8m por encima del nivel medio del mar, pero el volumen del backshore y de la duna primaria varía considerablemente.

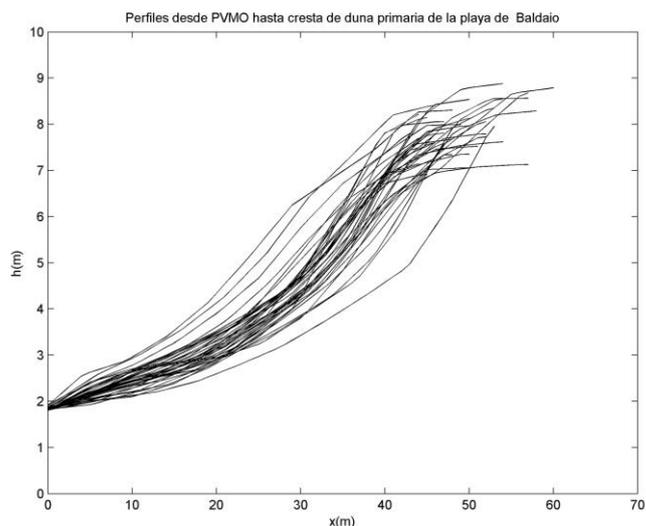


Figura AII.12 – Perfiles de la playa/duna primaria de Baldaio (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar).

Tabla AII.4 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Baldaio (Número de perfiles evaluados=39).

<b>Parámetro</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación típica</b>
<i>Lbackshore (m)</i>	43.00	60.00	49.56	49.00	4.48
<i>VolBackshore (m<sup>3</sup>/m)</i>	93.36	179.62	124.99	120.87	24.36
<i>Cota de coronación dunas (ref.NMM)</i>	6.88	8.83	7.86	7.79	0.49
<i>Cota de inicio de las dunas (ref. NMM)</i>	2.85	4.82	3.82	3.80	0.48
<i>Hduna (m)</i>	3.13	5.30	4.07	3.97	0.55
<i>Lduna (m)</i>	11.00	35.00	23.97	24.00	5.64
<i>VolDuna (m<sup>3</sup>/m)</i>	16.07	96.48	55.92	51.91	20.44
<i>PendMedDuna(°)</i>	7.10	16.44	11.03	10.59	2.12
<i>PendMax Duna (°)</i>	11.00	20.51	15.18	14.41	2.98
<i>Hplaya (m)</i>	1.00	3.00	1.99	1.96	0.49
<i>Lplaya (m)</i>	14.00	42.00	25.59	26.00	5.37
<i>PendPlaya (°)</i>	2.65	5.82	4.21	4.15	0.80

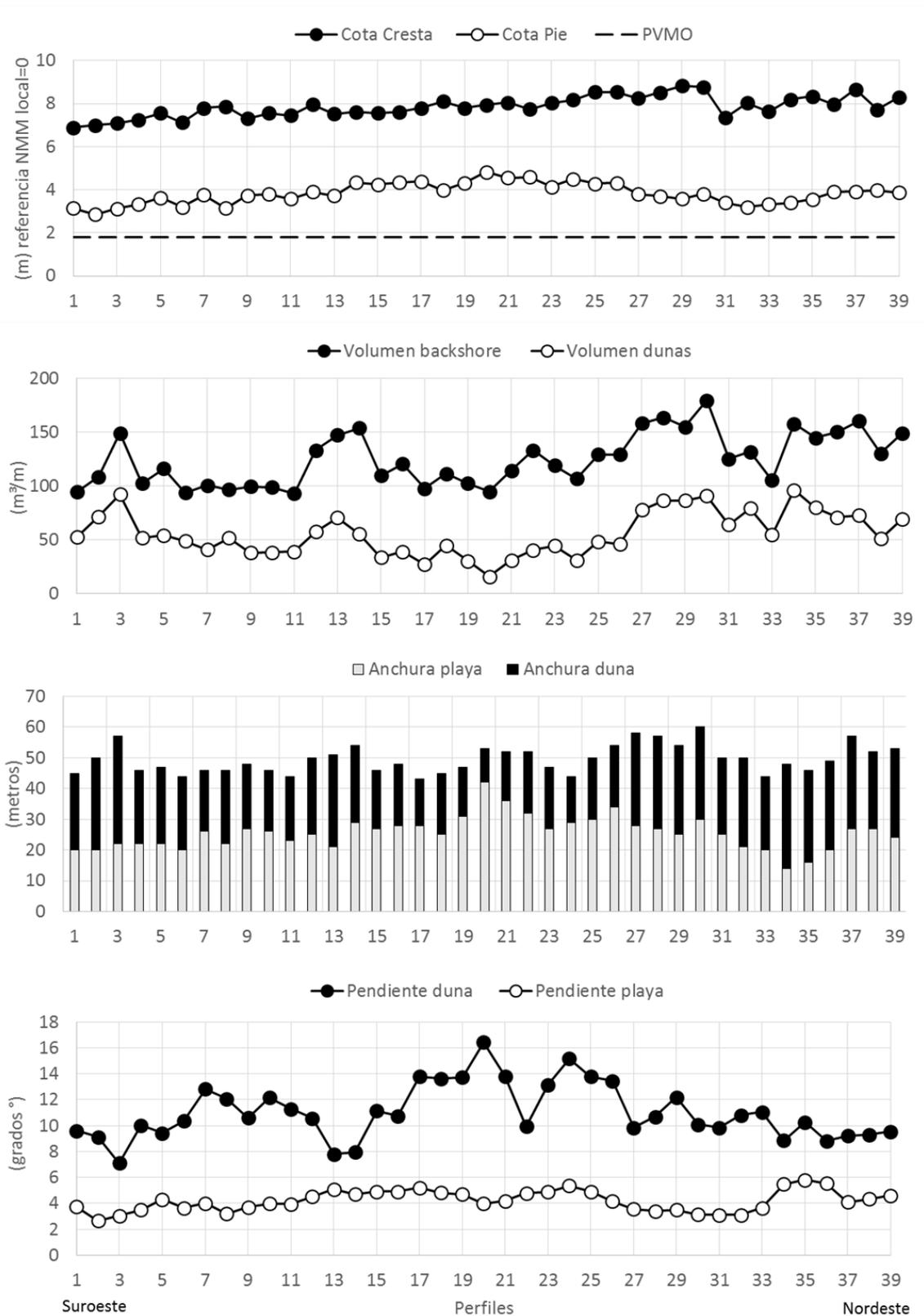


Figura AII.13 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Baldaio.

## 1.6. Traba

Esta playa pertenece al municipio de Laxe (Galicia) (lat. 43° 11' 16,9" N; long. 09° 02' 55,46" W) y presenta una longitud de aproximadamente 2500m (Figura AII.14), con orientación noroeste (323°). Es parte de un sistema sedimentario tipo barrera con una laguna costera localizada por detrás del campo de dunas. Sus dunas primarias son citadas como uno de los mejores ejemplos de este tipo de duna en la costa de Galicia (Galicia 2011; Pérez Alberti & Vázquez Paz 2011).

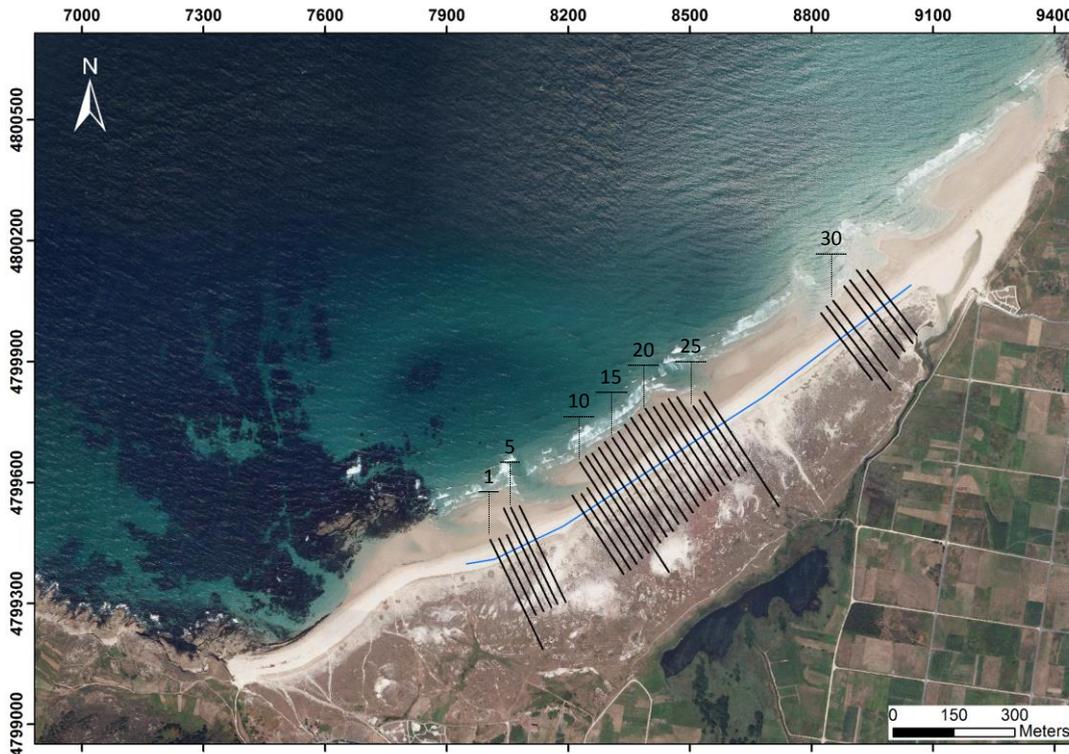


Figura AII.14 – Imágenes (fuente: MAGRAMA (2016)) y perfiles evaluados en este estudio de la playa de Traba

González-Villanueva et al. (2013) evaluaron la evolución de la playa, campo de duna y laguna, a través de fotografías aéreas, desde la década de los 40 hasta 2008 y verificaron que hubo momentos de retracción de la línea de costa en la década de los 50,

debido a una pérdida generalizada de la vegetación del campo de dunas, y en la década de los 80 debido al pasaje de dos ciclones tropicales. De 1957 hasta 2008 la vegetación se recuperó gradualmente, lo que indica la estabilidad del sistema como un todo.

Los únicos datos de granulometría del sedimento, obtenidos a partir de la bibliografía, fueron de la zona intermareal (Junoy et al. 2005) que presentaron un tamaño medio del grano de 0.35mm. Los sedimentos derivan del conjunto de la ría Corme-Laxe (Flor 1992).

Los perfiles de playa/duna primaria están presentados en la Figura AII.15 y los datos morfométricos en la Figura AII.16 y Tabla AII.5. Esta playa presenta dunas primarias bastante desarrolladas, con cota de coronación localizada de media 8.5m por encima del nivel medio del mar. Se puede verificar que la cota media del pie de las dunas de Traba se encuentra alrededor de 3.9m donde la pendiente es superior a  $6.8^\circ$  (PendPie). La pendiente media de la playa presenta valores bastante homogéneos (media de  $3.35 \pm 0.7^\circ$ ) comparado con la pendiente media de las dunas primarias (media de  $10.4 \pm 3.3^\circ$ ). La pendiente máxima absoluta observada fue de  $30^\circ$ . A pesar de que la cota de coronación sea bastante homogénea, el volumen del backshore y de la duna primaria varía considerablemente a lo largo de la playa, pero sin presentar un patrón en esta variación. Se puede observar un aumento de anchura de playa del suroeste hacia el nordeste.

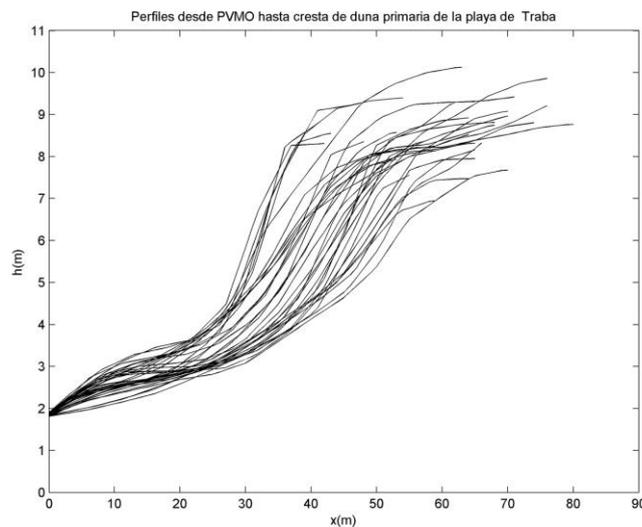


Figura AII.15 – Perfiles de la playa/duna primaria de Traba (desde la pleamar viva media observada hasta la cresta de la duna primaria, referencia es el nivel medio del mar).

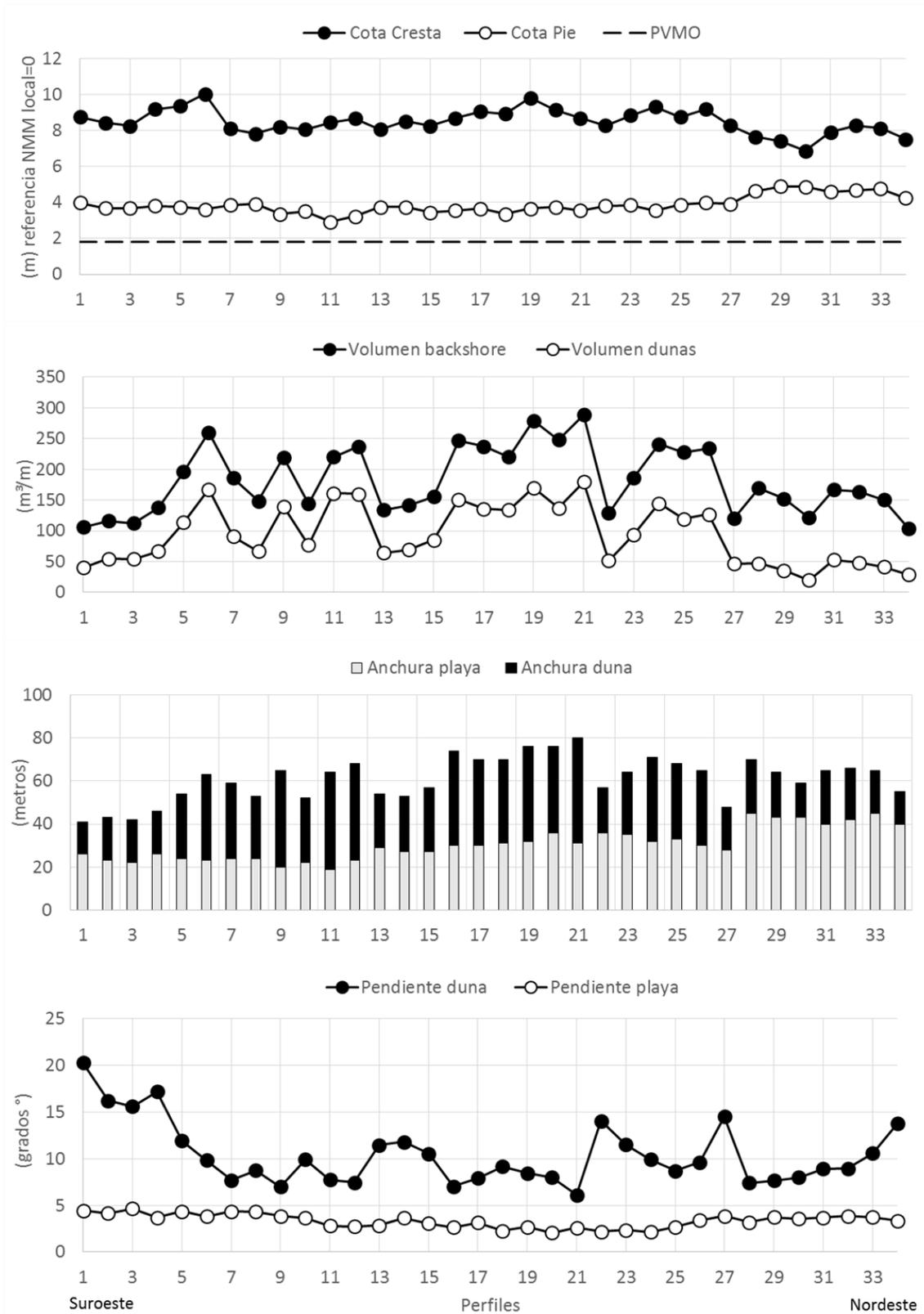


Figura AII.16 – Variación espacial de los parámetros morfométricos del sistema playa- duna primaria de la playa de Traba.

Tabla AII.5 – Parámetros morfométricos del sistema playa-duna primaria de la playa de Traba (Número de perfiles evaluados=34).

<b><i>Parámetro</i></b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación típica</b>
<b><i>Lbackshore (m)</i></b>	41.00	80.00	61.09	64.00	10.15
<b><i>VolBackshore (m<sup>3</sup>/m)</i></b>	103.36	288.45	182.32	167.93	54.32
<b><i>Cota de coronación dunas (ref.NMM)</i></b>	6.88	10.05	8.51	8.45	0.68
<b><i>Cota de inicio de las dunas (ref. NMM)</i></b>	2.92	4.90	3.87	3.75	0.48
<b><i>Hduna (m)</i></b>	2.07	6.51	4.70	4.84	1.02
<b><i>Lduna (m)</i></b>	15.00	49.00	30.47	29.50	10.14
<b><i>VolDuna (m<sup>3</sup>/m)</i></b>	20.13	179.25	93.34	80.93	48.64
<b><i>PendMedDuna(°)</i></b>	6.13	20.30	10.41	9.39	3.34
<b><i>PendMax Duna (°)</i></b>	10.42	30.39	17.40	15.81	4.91
<b><i>Hplaya (m)</i></b>	1.06	3.05	2.01	1.92	0.49
<b><i>Lplaya (m)</i></b>	19.00	45.00	30.62	30.00	7.58
<b><i>PendPlaya (°)</i></b>	2.06	4.64	3.35	3.50	0.74

## 2. Caracterización de la dinámica

En primer lugar se presenta la caracterización de los parámetros de dinámica a nivel regional, tanto de viento como de oleaje, basada en datos provenientes de los registros de boyas *offshore* (Figura AII.17, puntos azules). A continuación se presenta la dinámica de cada playa separadamente, considerando sus características particulares de granulometría de sedimento, características topobatimétricas y orientación de la línea de costa. Esta segunda evaluación, más local, utiliza los datos de viento provenientes de las boyas *offshore* y los datos de oleaje provenientes de datos de reanálisis de 60 años (DOW, Figura AII.17, puntos rojos) en profundidades indefinidas/intermedias y la propagación de la base de datos DOW hasta pie de playa (puntos POI).

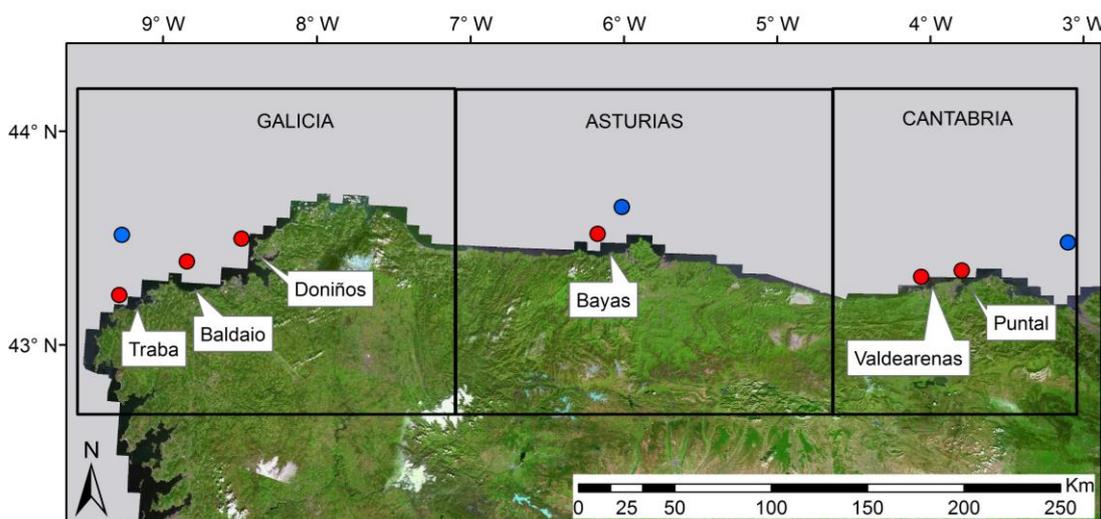


Figura AII.17 – Localización de las playas estudiadas, las boyas *offshore* de donde se obtuvieron datos de viento y de oleaje a nivel regional (puntos azules) y los puntos de datos de oleaje obtenidos por reanálisis (DOW) utilizados en cada playa (puntos rojos).

### 2.1. Caracterización de la dinámica regional

La energía incidente del oleaje y del viento condiciona la dinámica costera de una región e influye fuertemente en la dinámica de las dunas primarias. Esta fue evaluada a partir de datos registrados en boyas *offshore* localizadas delante de cada una de las regiones estudiadas y los resultados de la dinámica de vientos (Tabla AII.6 y Tabla AII.7) y oleaje (Tabla AII.9) se presenta a continuación.

#### Caracterización de la dinámica eólica

Se presenta la caracterización general de los vientos registrados en las boyas (Tabla AII.6) para los años seleccionados (registro de más de 5600hs/año). A continuación se presenta la caracterización regional solamente de los vientos con capacidad de transporte de sedimento en las playas, es decir, la velocidad registrada es mayor que la velocidad de inicio del movimiento del sedimento (Tabla AII.7). Para esta segunda evaluación se utilizó

para las 3 regiones un mismo umbral de velocidad de corte necesario para el inicio del movimiento ( $u^*_t$ ), el indicado por Bagnold (1941) para arenas medias y sueltas típicas de una duna, de 0.23m/s. Esta velocidad fue corregida para las condiciones de registro obtenidas en este estudio y se obtuvo que la velocidad de viento mínima en tierra, registrada a 3m de altitud, capaz de mover el sedimento, es de 5.5m/s ( $U_{t,3m}$ ). La proporción de registros que presentaron esta condición, con relación al total registrado en cada boya, está presentada en la Figura AII.18, y en media representan un 16%; 18% y 35% de los vientos registrados en Cantabria, Asturias y Galicia, respectivamente.

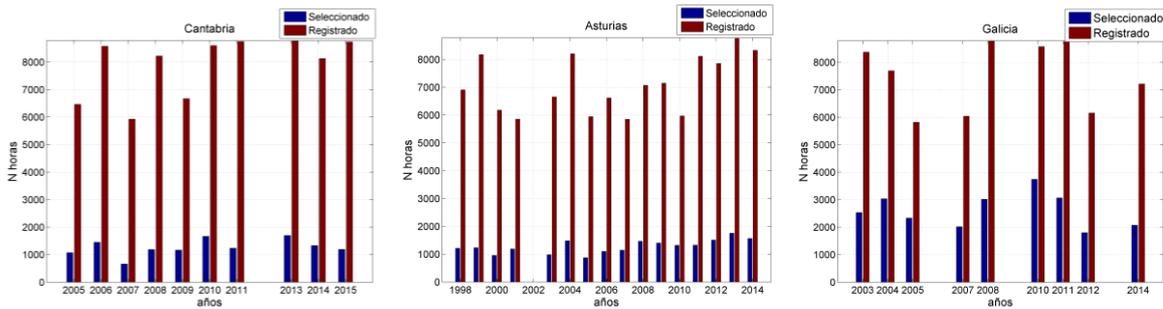


Figura AII.18 – Evaluación de los datos de viento de cada una de las boyas, con presentación del número de horas registradas y seleccionadas (>5.5m/s) en cada año evaluado.

Para la costa de Cantabria se puede observar (Tabla AII.6) que de manera general la principal componente del viento es del oeste/noroeste, seguida de vientos del este/nordeste y vientos del sur. La velocidad media es de 5.1m/s (a 3m, en *offshore*) y el comportamiento estacional indica vientos con mayor velocidad en invierno (noviembre hasta marzo) y menor en verano (mínimos entre junio y agosto).

Estas características también fueron descritas en investigaciones realizadas por otros autores, que explican que la fachada costera de Cantabria está sometida a un clima oceánico dependiente de los flujos atlánticos, pero también está bajo la influencia del anticiclón de las Azores. Los vientos del oeste son los más frecuentes, mientras que en condiciones de anticiclón los vientos del NE dominan. En otoño e invierno destaca la gran intensidad de los vientos del tercer y cuarto cuadrante, con mayor concentración de lluvias, mientras que en verano rolan al cuarto y primer cuadrante, disminuyendo de fuerza y con predominio de tiempo más seco (Fernández García & Rasilla 1992; Flor et al. 2003; Flor & Flor-Blanco 2005). Algunas bibliografías indican una mayor participación de vientos del noreste, en datos de vientos registrados en aeropuertos, en comparación con los datos registrados por boyas (Flor et al. 2011). Esta diferencia se debe probablemente debido a procesos de modificación de dirección al encontrar la orografía local.

Si consideramos solamente los vientos capaces de transportar sedimento (Tabla AII.7) es posible observar el fuerte predominio de los provenientes del oeste/ oeste-noroeste. Los vientos del este con velocidad mayor que la del inicio del movimiento presentan un porcentaje muy pequeño. La componente sur sigue presentando importancia. El valor medio de la velocidad de los vientos (considerando aquellos registros con valores superiores a la de inicio del movimiento) es de 7.35m/s.

Los registros de la boya *offshore* localizada delante de Asturias indican que las direcciones predominantes de vientos son del suroeste/oeste y del este-noreste (Tabla AII.6). La velocidad media es de 5.1m/s con mayores velocidades en invierno que en verano, mismas características que la costa de Cantabria, pues está bajo el mismo sistema atmosférico: en otoño-invierno el paso de frentes atlánticos es más frecuente que en primavera-verano, con predominio de vientos desde el suroeste hasta el noroeste, con gran intensidad; los vientos del este son propios de condiciones anticiclónicas (Flor & Flor-Blanco 2014; Diego Cavada 2014). La evaluación de los vientos potencialmente transportadores de sedimento (Tabla AII.7) refuerza todavía más la importancia de los vientos provenientes del oeste-suroeste y oeste. La media de la velocidad de los vientos con capacidad de transportar sedimento es de 7.3m/s.

La región de Galicia, localizada al noroeste de la península Ibérica, está más expuesta. Pérez Alberti & Vázquez Paz (2011) explican que climáticamente Galicia se trata de una costa de paso de las borrascas atlánticas hacia el continente, con lo que los sistemas frontales asociados suelen barrer el litoral norte peninsular. Estas son, por tanto, las primeras tierras peninsulares en recibir los efectos de la inestabilidad asociada a los frentes con predominio de los vientos del oeste o suroeste en invierno, con mayor fuerza, y del noreste en verano, más débiles. La boya *offshore* localizada más al oeste de la costa peninsular indica el predominio de vientos del 1º y 3º cuadrante, tanto para todos los datos (Tabla AII.6) como para los datos de viento potencialmente transportadores de sedimento (Tabla AII.7), con velocidades medias de 6.7m/s y 7.5m/s, respectivamente para cada uno de los análisis.

Tabla AII.6 – Caracterización de viento para cada región de España estudiada, **considerando todos los datos de viento** para los años con registro de más de 5600h/año.

Región	Rosa de los Vientos	Histograma de Velocidad del Viento	Variación de la velocidad del viento/mes
Cantabria			
Asturias			
Galicia			

Tabla AII.7 – Caracterización de viento para cada región de España estudiada, **corregidos para tierra**, considerando solamente las velocidades superiores a la velocidad de inicio de movimiento de los granos ( $U_{t,3m} = 5.5\text{m/s}$ ).

Región	Rosa de los Vientos	Histograma de Velocidad del Viento	Variación de la velocidad del viento/mes
Cantabria			
Asturias			
Galicia			

Caracterización de la dinámica marina

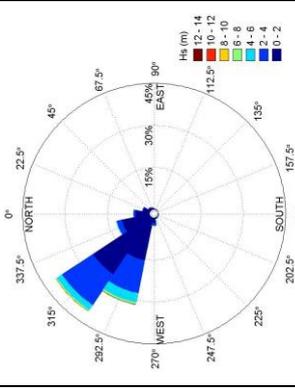
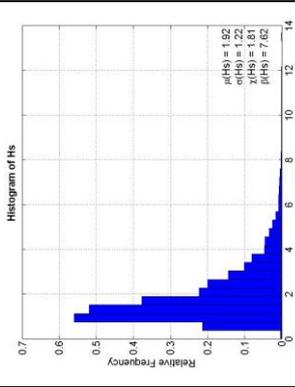
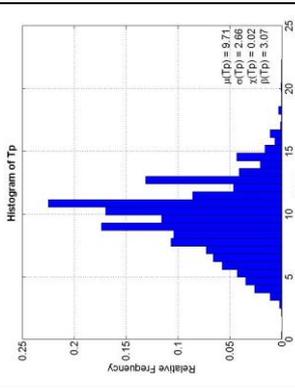
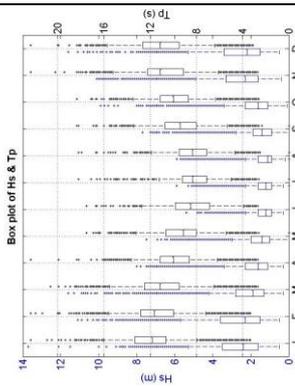
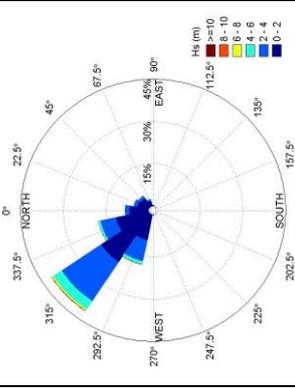
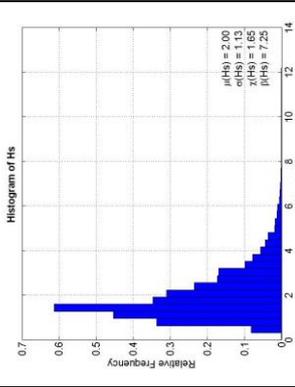
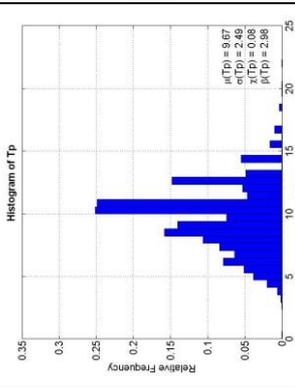
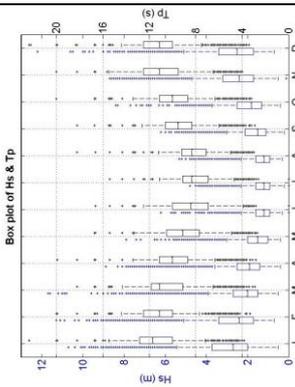
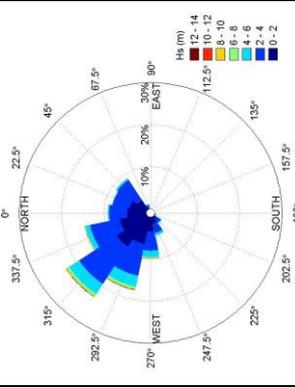
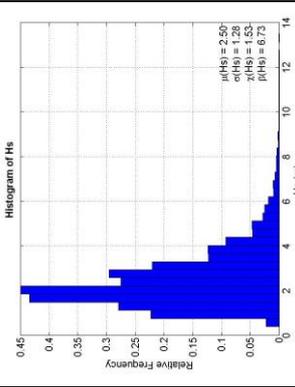
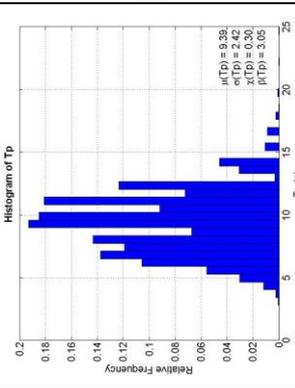
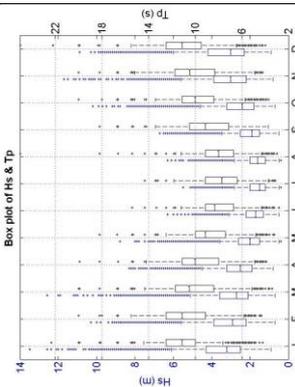
El clima marítimo de la costa norte de España está determinado por la actuación de oleaje de *swell* generado en altas latitudes en el océano Atlántico, con un patrón estacional marcado, con mayor frecuencia de olas más grandes en los meses de invierno. Los datos registrados en las boyas localizadas delante de Cantabria y Asturias (Tabla AII.9) demuestran que esta región presenta dominio de oleaje del noroeste, con valores medios de altura de ola significativa de cerca de 2m y período de pico asociado de 10s y valores máximos (cuartil 95%) de  $H_s > 4\text{m}$  y  $T_p > 13\text{s}$ . Las mayores olas registradas en estas boyas fueron de más de 10m. En Galicia, la costa está más expuesta y eso se refleja en el oleaje que, a pesar de presentar dominancia de olas del noroeste, se puede observar un mayor abanico de direcciones actuantes en la costa. La mayor frecuencia de olas grandes ( $> 3\text{m}$ ) se produce en invierno y con direcciones de NW y W, generadas por las borrascas que se desplazan desde estas direcciones (Pérez Alberti & Vázquez Paz 2011). Los valores característicos del oleaje indican mayor energía, con altura de ola significativa media de 2.5m y período de pico medio de aproximadamente 10s; mientras que los máximos (cuartil 95%) son de  $H_s > 5\text{m}$  y  $T_p > 13\text{s}$ . Las mayores olas registradas presentan una altura de más de 12m.

Las 3 regiones presentan régimen de marea astronómica semejante, semidiurnas y mesomareales, con rangos de marea muerta entre 1.4 y 1.6mm, de marea viva entre 3.6 y 3.9m y máximos entre 4.4 y 4.9m, con valores aumentando de Galicia hacia Cantabria (Tabla AII.8)

Tabla AII.8 – Niveles de marea registrados en puertos del norte de España (Fuente: Puertos del Estado)

<b>Puerto / Región</b>	<b>Santander/ Cantabria</b>	<b>Gijón/ Asturias</b>	<b>Coruña/ Galicia</b>
<b>Máximo nivel observado (cm)</b>	252	266	257
<b>Máxima pleamar astronómica (cm)</b>	240	235	220
<b>Pleamar viva media observada (cm)</b>	194	194	180
<b>Pleamar muerta media observada (cm)</b>	76	76	69
<b>Nivel medio del mar (cm)</b>	0	0	0
<b>Bajamar muerta media observada (cm)</b>	-81	-79	-71
<b>Bajamar viva media observada (cm)</b>	-196	-190	-175
<b>Mínima bajamar astronómica (cm)</b>	-246	-240	-220
<b>Mínimo nivel observado (cm)</b>	-258	-258	-247
<b>NMMA con relación a cero Redmar (cm)</b>	-40.5	-37.9	-40.2
<b>Carreras mínimas (cm)</b>	87	87	77
<b>Carreras medias (cm)</b>	277	274	251
<b>Carreras máxima (cm)</b>	492	498	450

Tabla AII.9 – Caracterización del oleaje para cada región de España estudiada, con datos provenientes de las boyas offshore (todos los datos registrados en la boya)

Región	Rosa de oleaje	Histograma de Hs	Histograma de Tp	Variación mensual de Hs y Tp
Cantabria		 <p> <math>\mu(Hs) = 1.92</math>  <math>\sigma(Hs) = 1.22</math>  <math>\chi^2(Hs) = 1.81</math>  <math>\rho(Hs) = 7.62</math> </p>	 <p> <math>\mu(Tp) = 9.71</math>  <math>\sigma(Tp) = 2.66</math>  <math>\chi^2(Tp) = 0.02</math>  <math>\rho(Tp) = 3.07</math> </p>	
Asturias		 <p> <math>\mu(Hs) = 2.00</math>  <math>\sigma(Hs) = 1.13</math>  <math>\chi^2(Hs) = 2.48</math>  <math>\rho(Hs) = 7.25</math> </p>	 <p> <math>\mu(Tp) = 9.67</math>  <math>\sigma(Tp) = 2.49</math>  <math>\chi^2(Tp) = 2.88</math>  <math>\rho(Tp) = 2.88</math> </p>	
Galicia		 <p> <math>\mu(Hs) = 2.50</math>  <math>\sigma(Hs) = 1.28</math>  <math>\chi^2(Hs) = 1.53</math>  <math>\rho(Hs) = 6.73</math> </p>	 <p> <math>\mu(Tp) = 9.39</math>  <math>\sigma(Tp) = 2.42</math>  <math>\chi^2(Tp) = 0.30</math>  <math>\rho(Tp) = 3.05</math> </p>	

## 2.1. Caracterización de la dinámica de cada playa

En este apartado se presentan los resultados de los análisis realizados para evaluar la dinámica de cada una de las playas. Para la dinámica eólica se exponen los rangos de direcciones que definen la actuación del viento hacia tierra, respetando las limitaciones impuestas por los acantilados y por la dirección de la línea de costa de cada playa, evaluando los vientos desde oblicuos hasta perpendicular. Los valores de velocidad media del viento, volumen y dirección del transporte eólico potencial anual consideran el rango dentro de estas direcciones, además de las correcciones necesarias y del tamaño del sedimento de cada playa.

Para la caracterización de la dinámica costera se presentan las características generales de los datos del oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias delante de cada playa, utilizando la serie de datos de 60 años, generadas a partir de reanálisis por IHCantabria (puntos DOW entre 60 y 200m de profundidad). Posteriormente, a partir de los resultados de las propagaciones desde mayores profundidades hasta la línea de costa y reconstrucción de la serie de oleaje en profundidades reducidas (puntos POI, 10m de profundidad con relación a la bajamar), se caracteriza la dinámica marina media de la playa, con resultados del oleaje a pie de playa, su condición morfodinámica media y los valores estimados de cota de inundación. La caracterización de los puntos DOW y cada uno de los POI de cada playa, además de ejemplos de propagaciones de eventos extremos, están presentados a continuación.

### Puntal de Somo

Datos presentados en el Capítulo II.

### Valdearenas

La playa de Valdearenas/ dunas de Liencres está expuesta directamente a vientos provenientes de 268 a 36°, los más frecuentes y de mayores velocidades en la costa cantábrica (Figura AII.19). La caracterización de los vientos dentro de este rango y con velocidades superiores a 7.19m/s ( $U_{t,3m}$ ) ocurren en una proporción de 3.9% de los registros, con velocidad media de 8.9m/s y dirección predominante del oeste-noroeste. El transporte de sedimento causado por estos vientos presenta un potencial de 8m<sup>3</sup>/m/año con dirección media de 295°. Si se considera la dirección del viento con relación a la línea de costa, el transporte (DP $\alpha$ ) fue estimado en 6.6m<sup>3</sup>/m/año.

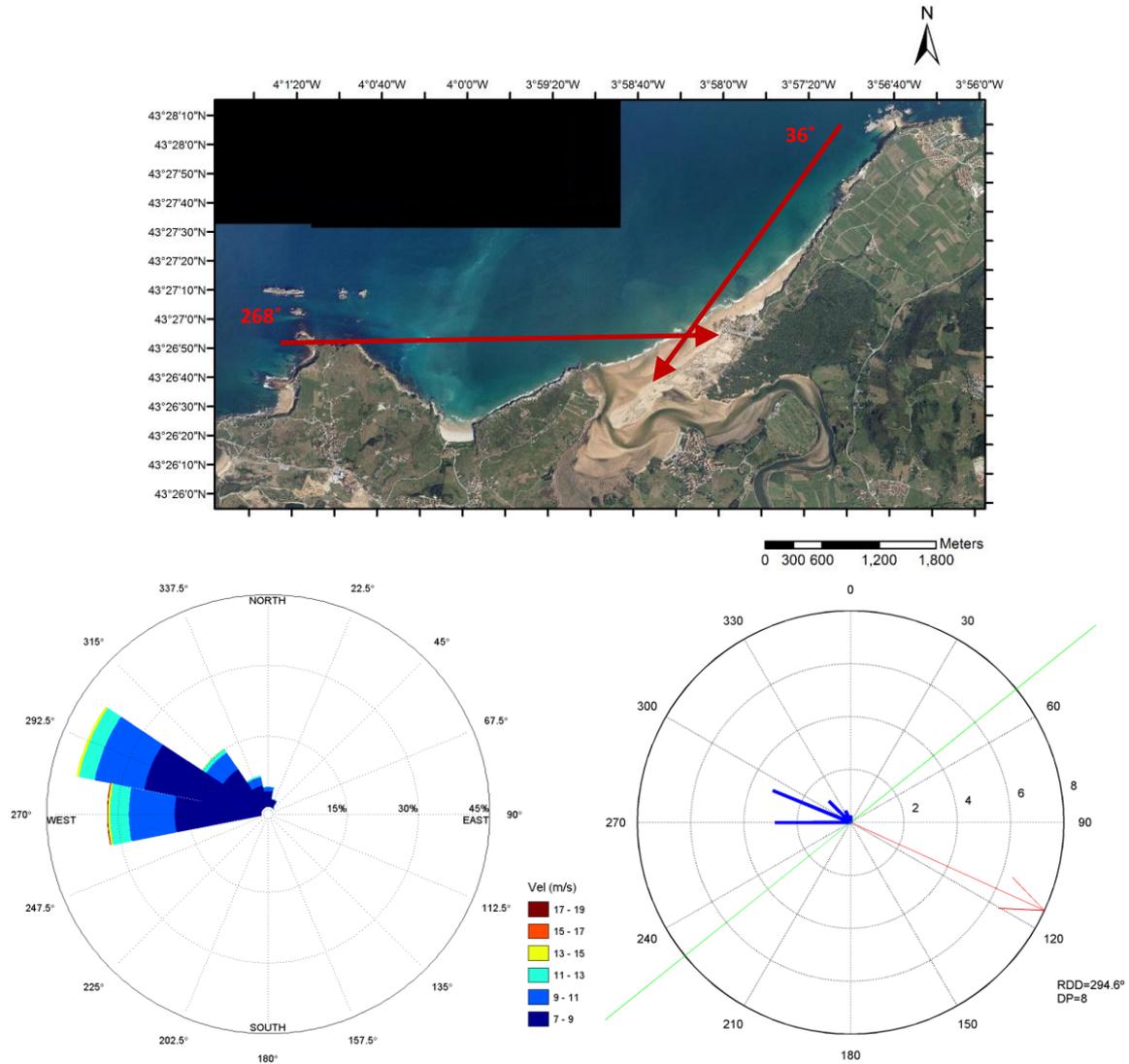


Figura AII.19 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Valdearenas, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea,  $U_{3m} > U_{t,3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en  $m^3/m/año$ ).

Para la caracterización del oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias el punto DOW utilizado se localiza en: long.=  $-4.040^\circ$ ; lat.=  $43.500^\circ$ ; profundidad= 100m. El clima marítimo en profundidades indefinidas/intermedias (Figura AII.20) es semejante al otro punto evaluado en el mar cantábrico, delante de la playa del Puntal de Somo: oleajes predominantemente provenientes del NW (56%) seguido de WNW (17%) y NNW (12%), con condición media de  $H_{s50\%}=1.6m$  y  $T_{p50\%}=11s$  y condición asociada a eventos del temporal del año de  $H_{s12}=7.9m$  y  $T_{p12}=15s$ .

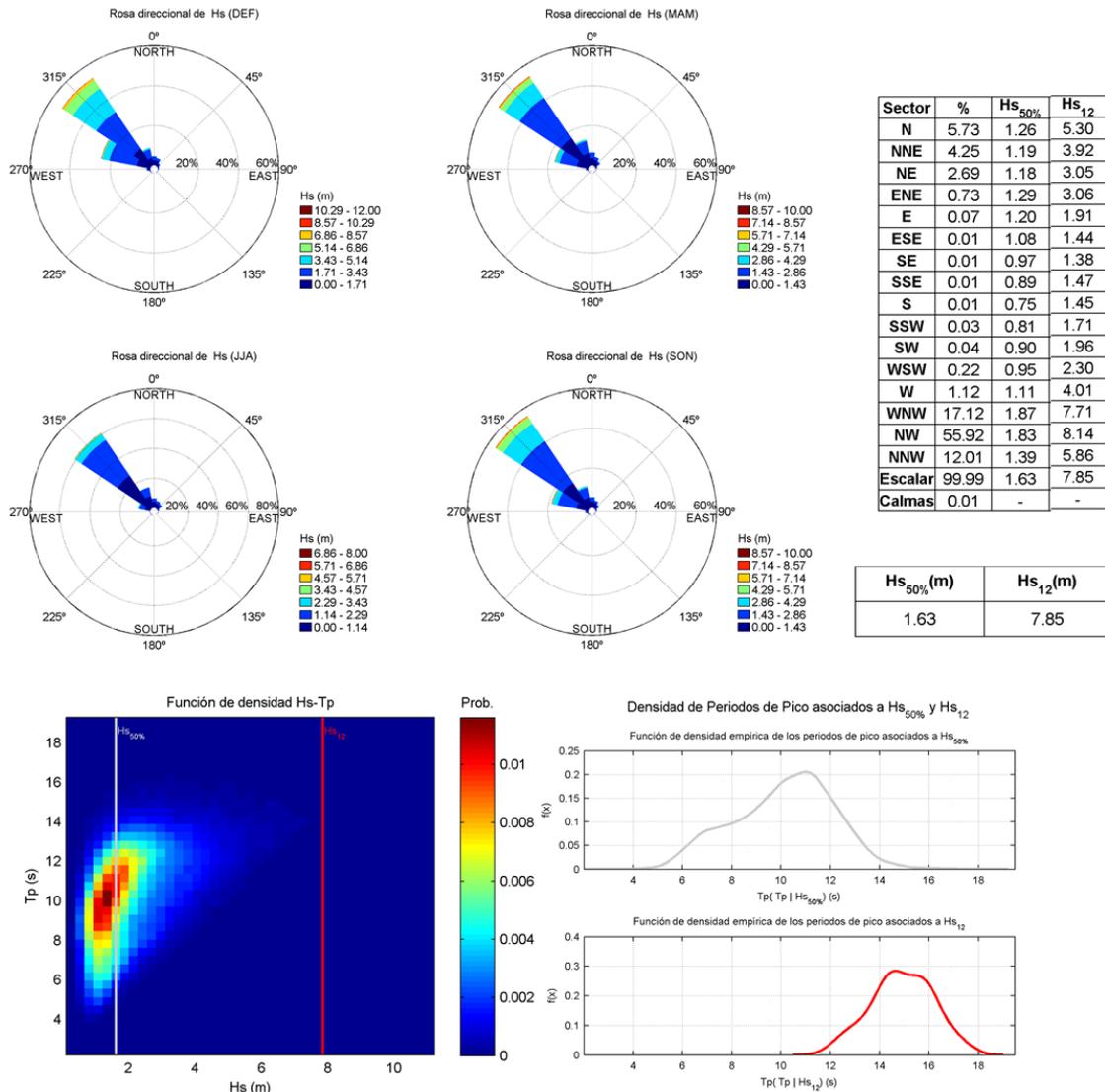


Figura AII.20 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Valdearenas: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp.

Un ejemplo de propagación de un caso de evento extremo, con dirección más frecuente, en pleamar, puede ser observado en la Figura AII.21. La caracterización del oleaje en profundidad reducida fue realizada en los puntos/perfiles presentados en la Figura AII.22. Al propagar las olas hasta la línea de costa se puede verificar (Tabla AII.10) que esta playa está más expuesta que el Puntal de Somo, con valores medios a 10m de profundidad de  $Hs_{50\%}=1.4m$  ( $Tp_{50\%}=11s$ ),  $Hs_{12}=5.7m$  ( $Tp_{12}=14.8s$ ) y  $FME=34247J/m/s$ , sin grandes variaciones a lo largo de la playa. Los cálculos de cota de inundación y la distribución del régimen medio indica que el valor superado solamente 12 horas al año es en media de 3.7m por encima del nivel medio del mar, mientras que la aplicación del régimen de extremos (máximos anuales) estima una cota de inundación de 3.9m y 4.2m por encima del nivel medio del mar, para periodos de retorno de 2 y 10 años, respectivamente. El parámetro adimensional de caída del grano ( $\Omega$ ) indica una condición morfodinámica intermedia, pues, a pesar de presentar una dinámica marina energética, tiene tamaño del sedimento más grueso (0.36mm) que la playa del Puntal de Somo.

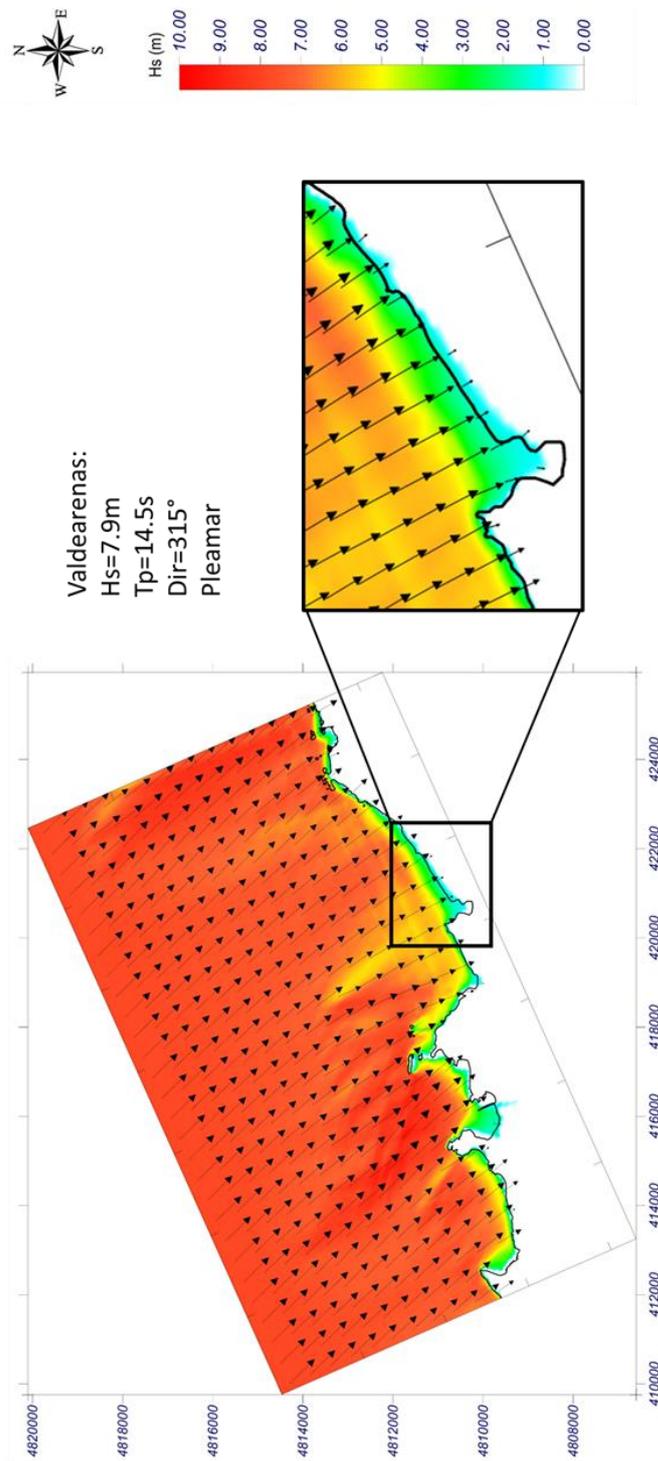


Figura AII.21 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/intermedias hasta la playa de Valdearenas.

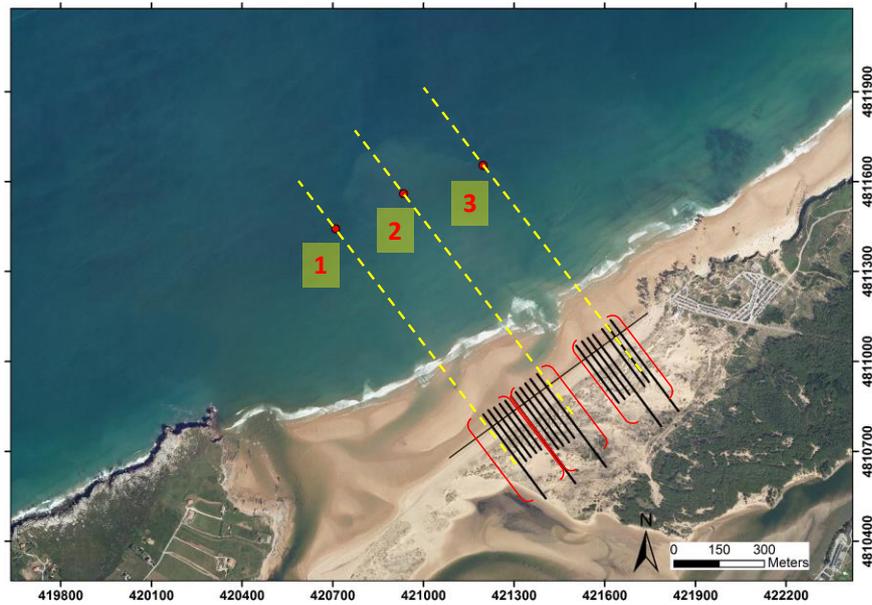


Figura AII.22 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Valdearenas.

Tabla AII.10 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Valdearenas

POI	Hs <sub>50%</sub>	Tp <sub>50%</sub>	Hs <sub>12</sub>	Tp <sub>12</sub>	dFME (°)	FME (J/m/s)	CI <sub>99%</sub>	CI <sub>12h</sub>	CI <sub>2a</sub>	CI <sub>10a</sub>	Ω medio
1	1.38	11	5.48	14.74	328.16	33211	3.36	3.67	3.87	4.13	3.6
2	1.38	11	5.69	14.67	329.23	33127	3.37	3.68	3.89	4.17	3.6
3	1.44	11	5.80	15.03	327.69	36404	3.39	3.71	3.93	4.20	3.8

### Bayas

Los vientos del noroeste son los más efectivos en el desarrollo de cordones dunares en Asturias, que orlan el backshore y están expuestos a la influencia de los vientos de mar a tierra, intercambiando la arena con la playa (Tsoar 2001; Flor & Flor-Blanco 2014). Teniendo en consideración la dirección de la costa y los acantilados circundantes de la playa de Bayas, se definió que el rango de viento que actúa directamente sobre el sistema playa/duna es de entre 275 y 42° (Figura AII.23). La velocidad de inicio de movimiento del sedimento ( $U_{t\_3m}$ ) calculado para esta playa presentó valor de 7.1m/s. Por lo tanto, vientos dentro del rango de direcciones y con velocidad mayor que  $U_{t\_3m}$  ocurrieron en 2.2% de los registros, con dirección dominante de oeste-noroeste y una media de velocidad de 8.6m/s. El transporte eólico potencial (DP) medio fue estimado en 3.9m<sup>3</sup>/m/año con dirección media resultante de 301°. El cálculo del transporte anual considerando el ángulo del viento con relación a la dirección de línea de costa ( $DP\alpha$ ) resulta en un valor medio de 3.1m<sup>3</sup>/m/año.

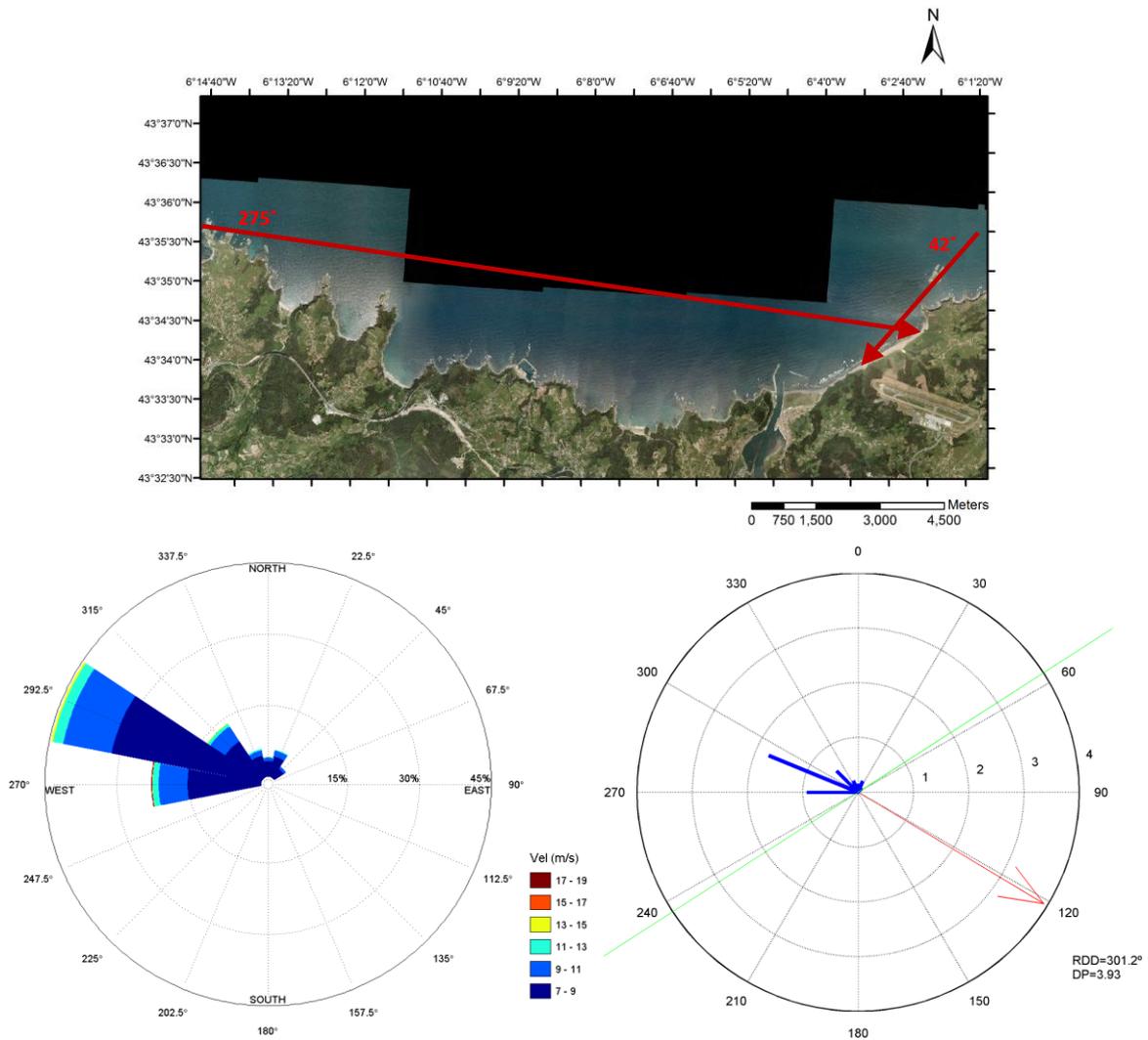


Figura AII.23 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Bayas, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea,  $U_{3m} > U_{t,3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en  $m^3/m/año$ ).

El punto DOW seleccionado para caracterizar el clima marítimo delante de la playa de Bayas se localiza en longitud=  $-6.125^\circ$ , latitud=  $43.664^\circ$  y a una profundidad= 92m. El oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias presenta dirección predominante del NW (40.8%), pero con importante participación del oleaje del NNW (25%), con valores de  $Hs_{50\%}=1.7m$  y  $Hs_{12}=7.2m$  (Figura AII.24).

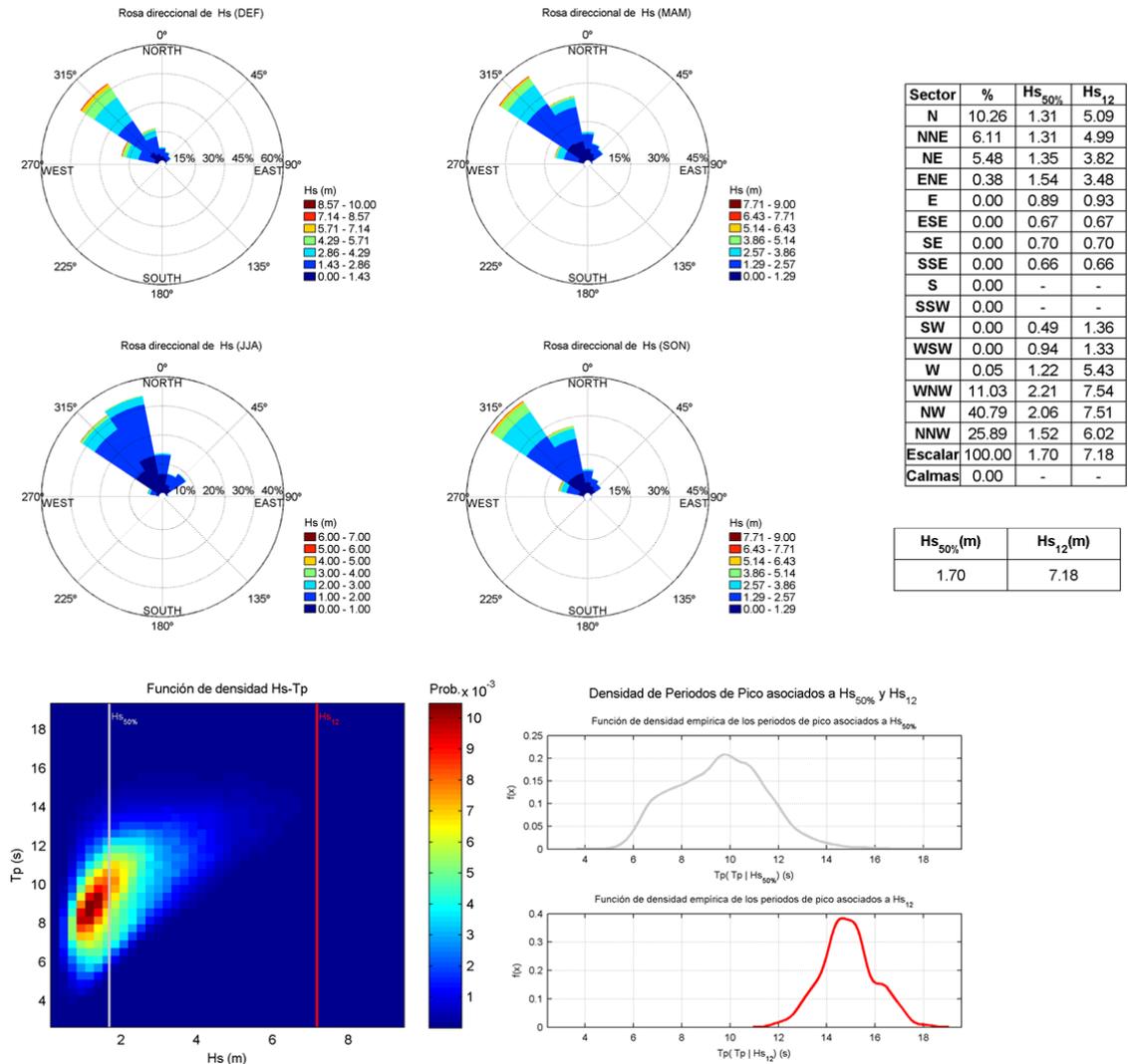


Figura AII.24 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Bayas: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp.

Un ejemplo de propagación de un caso de evento extremo, con dirección más frecuente, en pleamar, puede ser observado en la Figura AII.25.

Al propagar toda la base de datos de 60 años hasta los perfiles y puntos en profundidades reducidas (Figura AII.26) se observa que es una playa bastante expuesta, con valores característicos del oleaje a 10m de profundidad de Hs<sub>50%</sub>=1.7m, Tp<sub>50%</sub>=10.5s, Hs<sub>12</sub>=5.8m, Tp<sub>12</sub>=14.3s y FME= 46877J/m/s, sin fuertes variaciones a lo largo de la costa (Tabla AII.11). El valor estimado de cota de inundación extremal con un periodo de retorno de 2 años es de 3.8m por encima del nivel medio del mar; para 10 años este valor sube a 4.0m. El régimen medio indica una cota de inundación media superada solamente 12 horas al año de 3.6m. El valor medio de  $\Omega$  indica una condición morfodinámica intermedia.

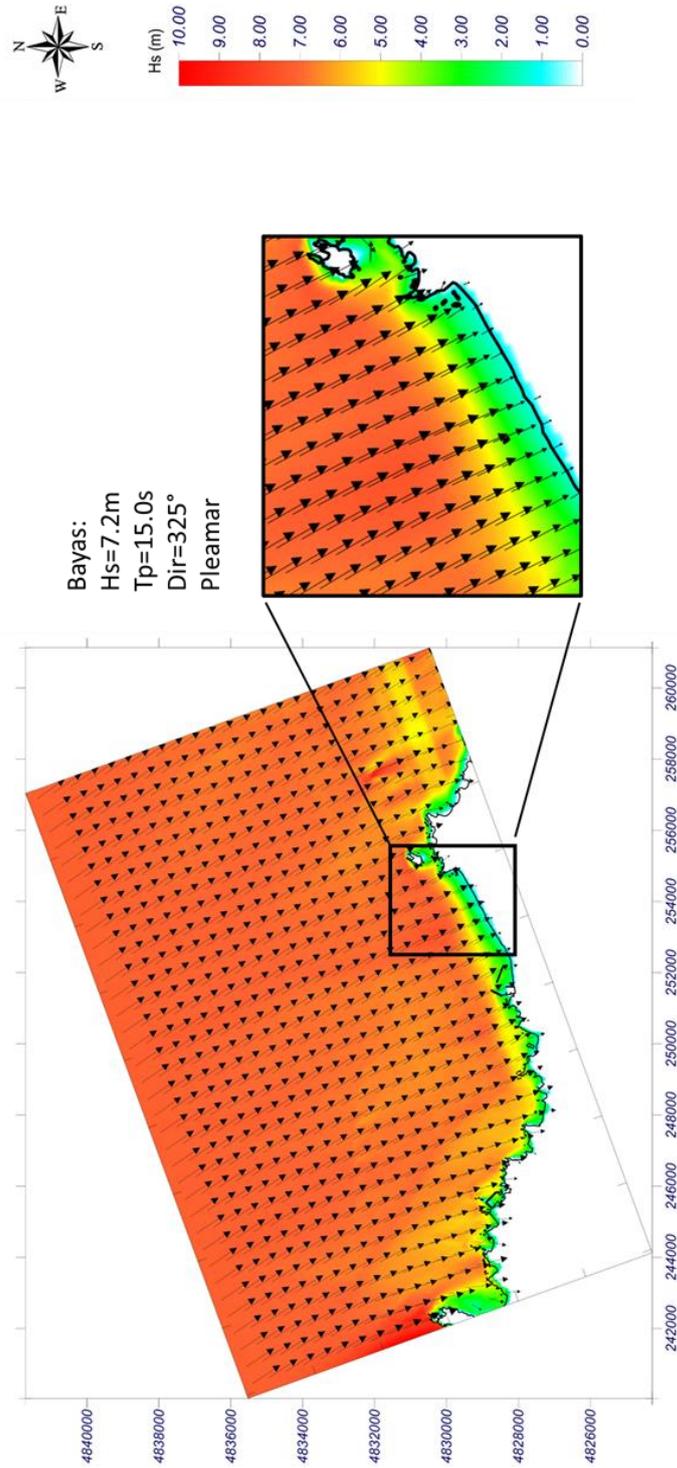


Figura AII.25 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/intermedias hasta la playa de Bayas.

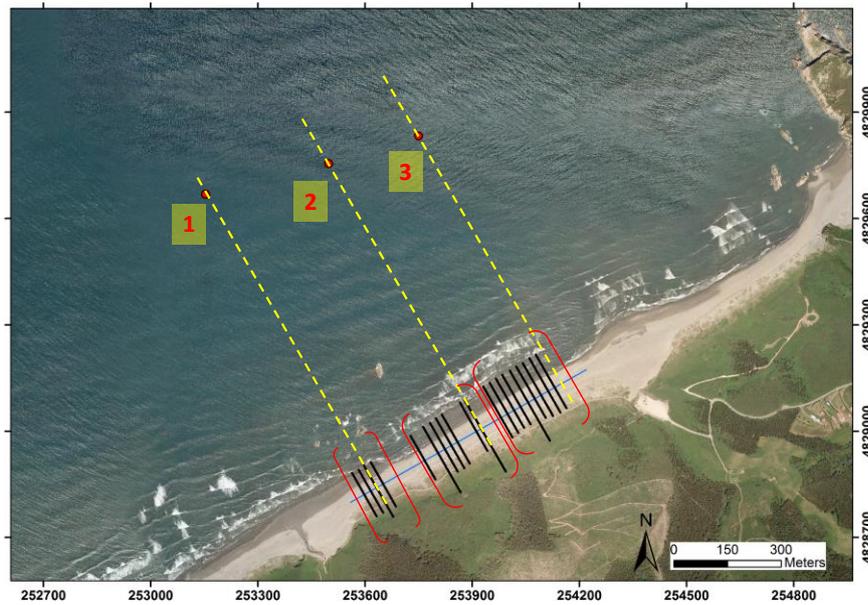


Figura AII.26 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Bayas.

Tabla AII.11 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Bayas

POI	Hs <sub>50%</sub>	Tp <sub>50%</sub>	Hs <sub>12</sub>	Tp <sub>12</sub>	dFME (°)	FME (J/m/s)	CI <sub>99%</sub>	CI <sub>12h</sub>	CI <sub>2a</sub>	CI <sub>10a</sub>	Ω medio
1	1.70	10	5.75	14.58	330.37	47183.73	3.29	3.58	3.80	4.02	4.8
2	1.70	10.5	5.84	14.10	331.11	48896.35	3.30	3.60	3.83	4.05	4.8
3	1.61	10.5	5.76	14.17	329.56	44552.86	3.28	3.58	3.81	4.03	4.6

### Doniños

La playa de Doniños está relativamente protegida de los vientos del norte/noroeste y expuesta a vientos del suroeste, siendo esta la dirección predominante para el rango de direcciones de viento que actúan directamente sobre las dunas, hacia tierra (entre 209° y 343°, Figura AII.27). La caracterización de los vientos dentro de este rango y con velocidades superiores a 8.4m/s ( $U_{t_{3m}}$ ) ocurren en 2.2% de los registros y presentan media de 9.8m/s. A pesar de que el sedimento sea relativamente grueso (0.48mm en la playa y 0.42mm en la duna, estimado) la alta frecuencia de fuertes vientos genera un transporte potencial (DP) considerable, de 5.8m<sup>3</sup>/m/año, proveniente de media de 244°, lo que resulta en un transporte de sedimento hacia las dunas (considerando la dirección del transporte con relación a la línea de costa, DP $\alpha$ ) de 3.7 m<sup>3</sup>/m/año.

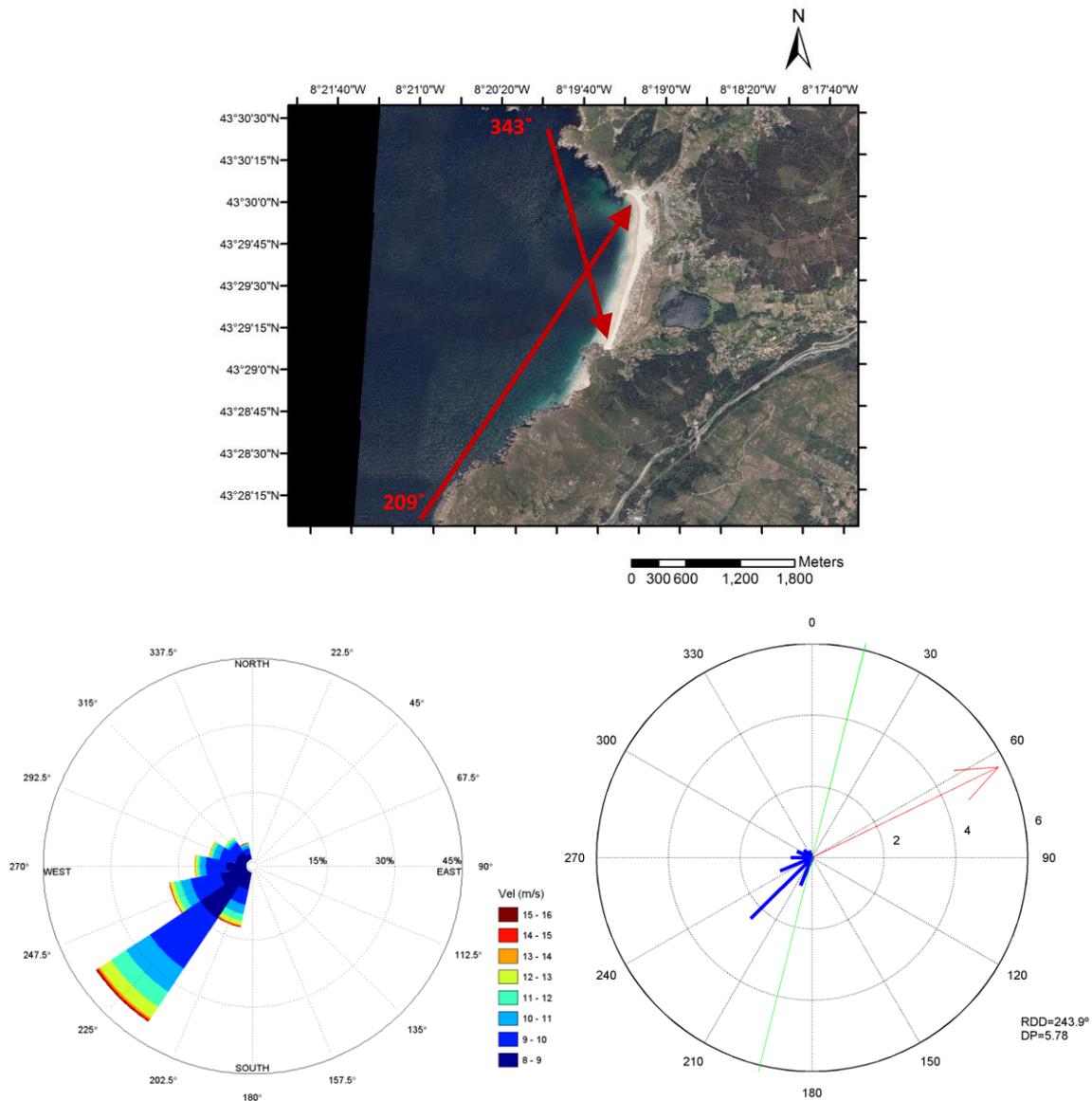


Figura AII.27 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Doniños, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea,  $U_{3m} > U_{L,3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en  $m^3/m/año$ ).

En cuanto a la dinámica marina en aguas exteriores, el punto DOW (long.= -8.405°; lat.= 43.556°; profundidad= 100m) indica que ésta está caracterizada por incidencia de los oleajes provenientes del WNW (27%) y NW (26%), con alturas de ola significativa medias de  $Hs_{50\%}=2m$  y de eventos extremos de  $Hs_{12}=8.7m$  (Figura AII.28).

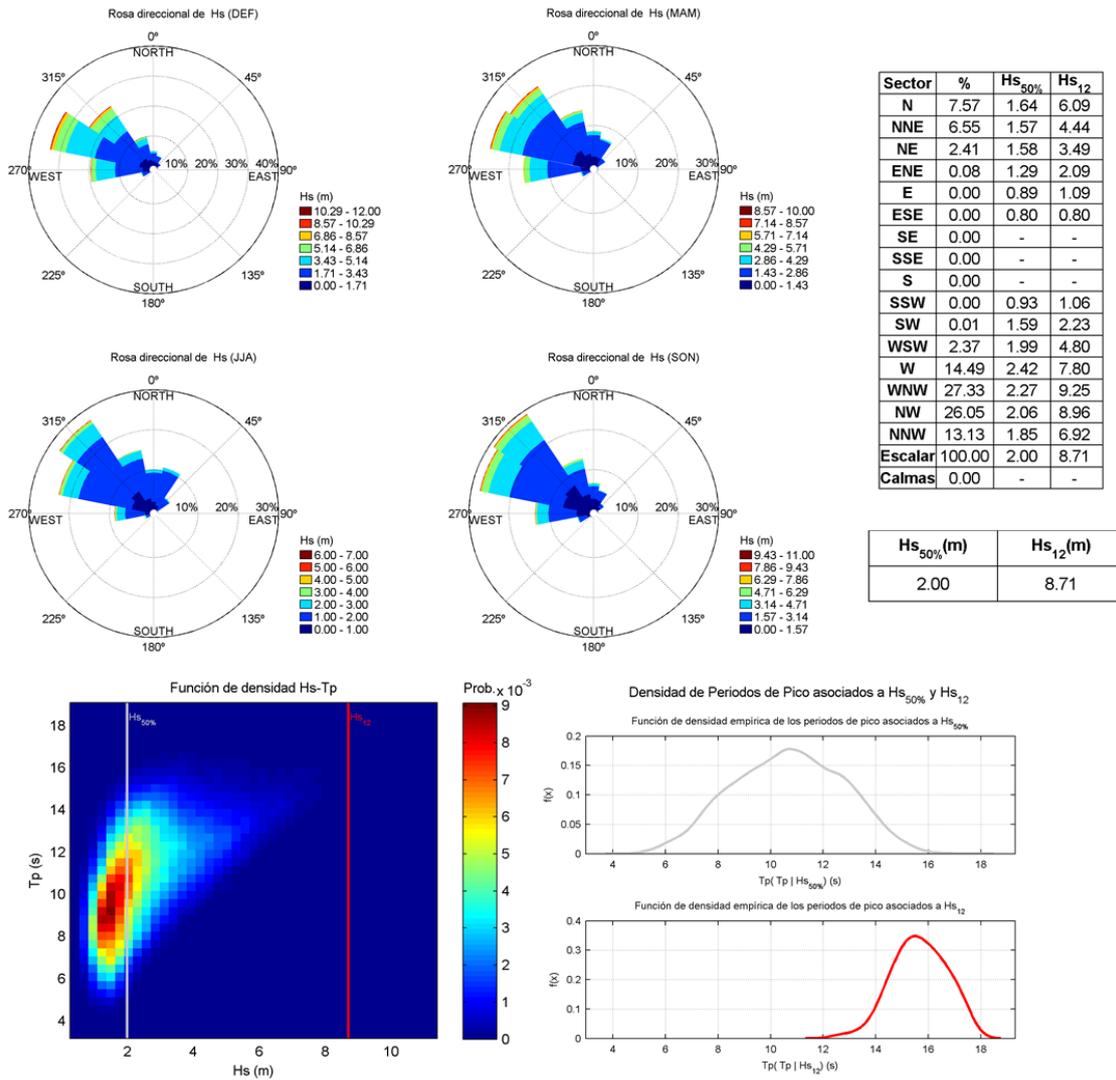


Figura AII.28 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Doniños: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp.

Un ejemplo de propagación de un caso de evento extremo, desde la zona exterior hasta la línea de costa, puede ser observado en la Figura AII.29.

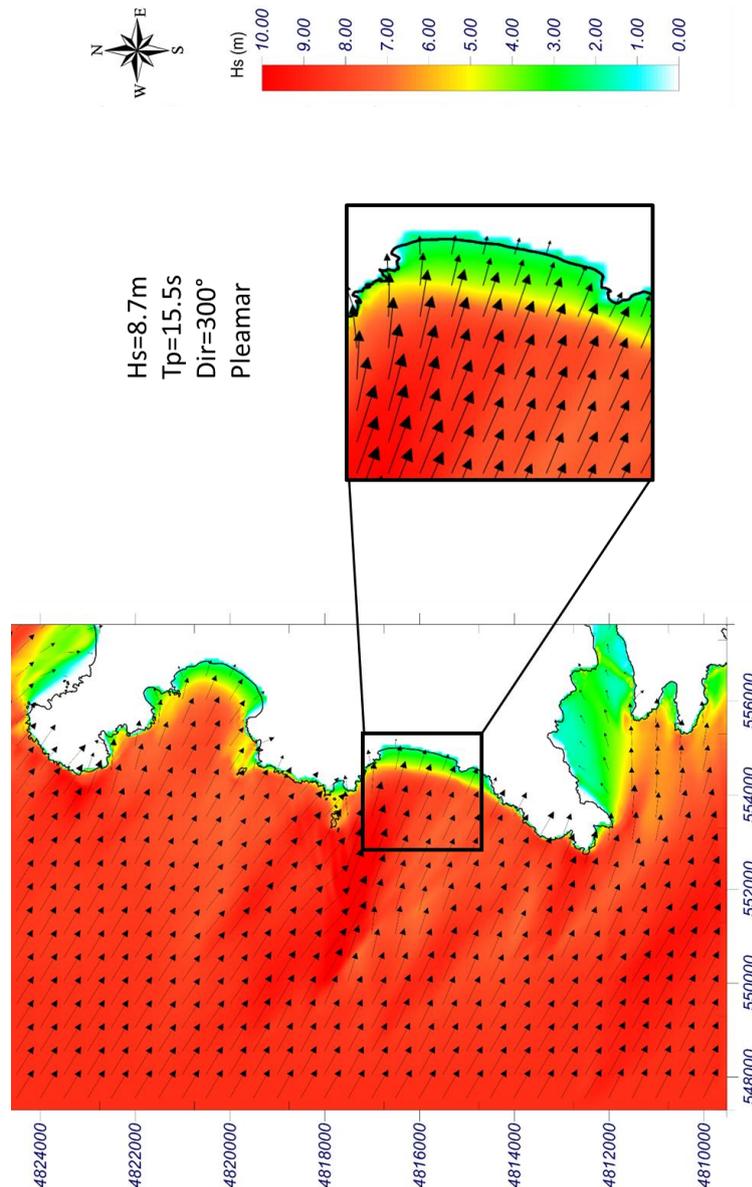


Figura AII.29 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/intermedias hasta la playa de Doniños.

El clima marítimo en profundidad reducida (10m de profundidad), indica que esta es la playa más energética entre las evaluadas (Figura AII.30 y Tabla AII.12). Se caracteriza por presentar  $H_{s50\%} = 1.8\text{m}$ ;  $T_{p50\%} = 11.2\text{s}$ ;  $H_{s12} = 7.0\text{m}$ ;  $T_{p12} = 15.4\text{s}$ ,  $FME = 57813\text{J/m/s}$ , con una cota de inundación superada 12 horas al año de 3.7m (régimen medio) y de 3.9m por encima del nivel medio del mar para un período de retorno de 2 años y de 4.2m para 10 años (régimen extremal). Presenta un parámetro adimensional de caída del grano ( $\Omega = 3.2$ ) que indica una condición morfodinámica intermedia.

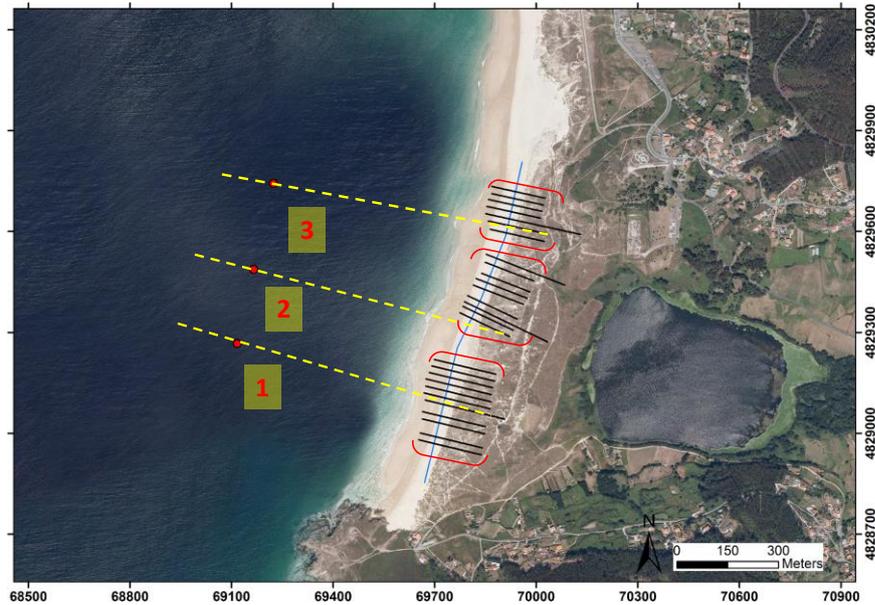


Figura AII.30 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Doniños.

Tabla AII.12 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Doniños

POI	Hs <sub>50%</sub>	Tp <sub>50%</sub>	Hs <sub>12</sub>	Tp <sub>12</sub>	dFME (°)	FME (J/m/s)	CI <sub>99%</sub>	CI <sub>12h</sub>	CI <sub>2a</sub>	CI <sub>10a</sub>	Ω medio
1	1.79	11.5	6.96	15.51	289.15	56933.55	3.41	3.73	3.92	4.18	3.2
2	1.76	11	7.04	14.99	286.74	56869.07	3.40	3.72	3.93	4.18	3.2
3	1.80	11	7.13	15.54	285.63	59637.43	3.41	3.72	3.96	4.21	3.2

### Baldaio

Es una playa que difiere de las descritas anteriormente para la costa de Galicia por estar protegida de vientos del oeste y suroeste y bastante expuesta a los vientos del noroeste hasta el noreste, con rango de direcciones de viento *onshore* que actúan directamente en la dinámica de las dunas primarias variando entre 290° y 50° (Figura AII.31). La velocidad mínima del viento medido a 3m de altura capaz de transportar el sedimento ( $U_{t,3m}$ ) fue estimada en 7.3m/s. Vientos con velocidades superiores a  $U_{t,3m}$  y dentro del rango de direcciones señalado anteriormente fue registrado en la boya *offshore* en 4.5% de los casos, presentando una velocidad media de 8.4m/s. El transporte potencial resultante de estos vientos fue estimado en 7.3m<sup>3</sup>/m/año con dirección media de 24°. Debido a que los vientos actuantes, capaces de transportar sedimento hasta las dunas, presentan importante oblicuidad con relación a la línea de costa, la estimación de la cantidad de sedimento entregue por metro de dunas primarias, (DP $\alpha$ ), disminuye considerablemente para 4.0m<sup>3</sup>/m/año.

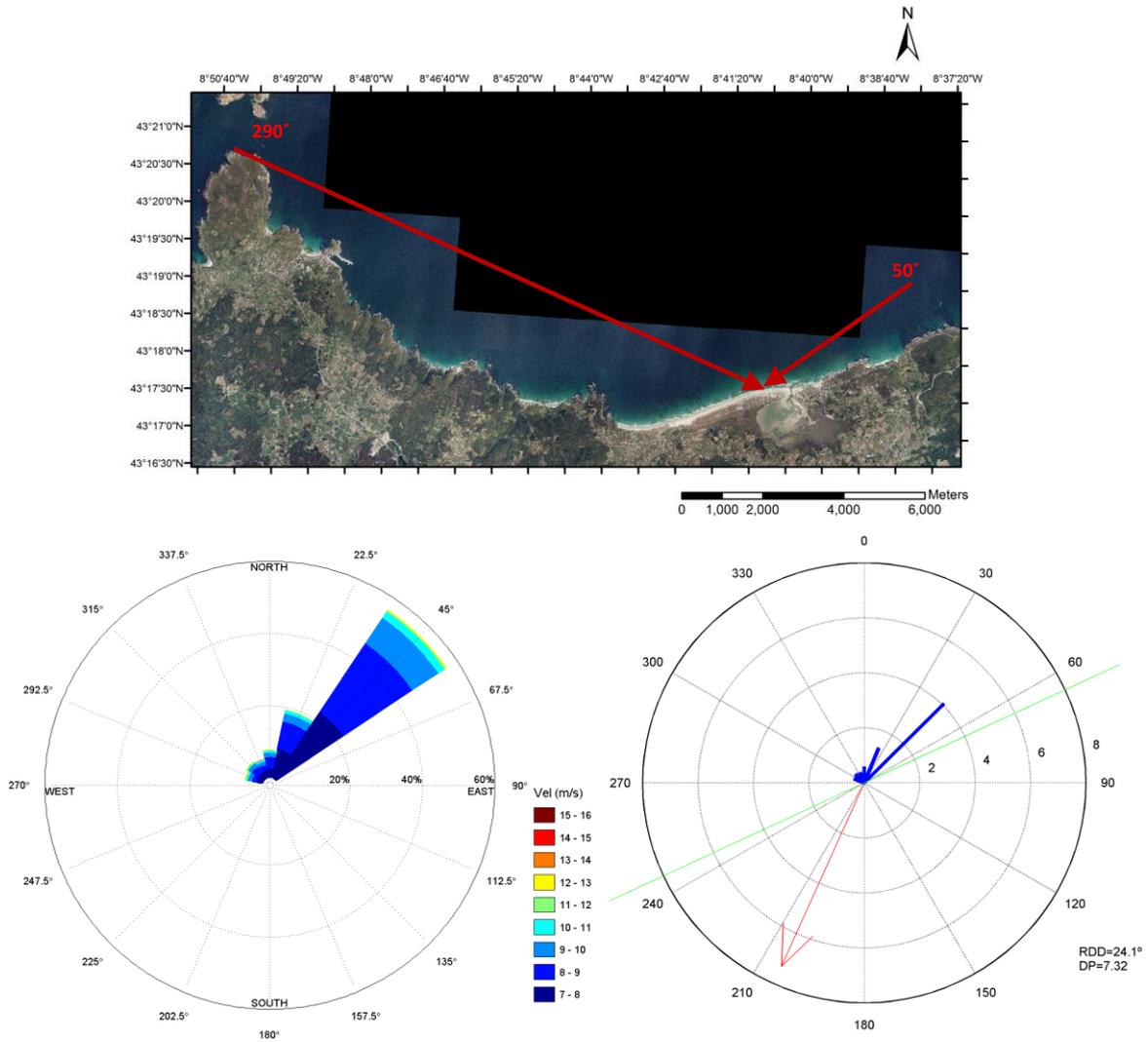


Figura AII.31 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Baldaio, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea,  $U_{3m} > U_{L3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en  $m^3/m/año$ ).

Los datos del oleaje en profundidades indefinidas/intermedias en un punto localizado a una profundidad de 100m (Punto DOW: long.= -8.745°; lat.= 43.432°; Figura AII.32) demuestran que las olas son predominantemente provenientes del WNW (26%) y del NW (25%), con valores de altura de ola significativa media de  $Hs_{50\%}=2.1m$  ( $Tp$  asociado de 10.5s) y extremal de  $Hs_{12}=8.7m$  ( $Tp$  asociado de 15.5s).

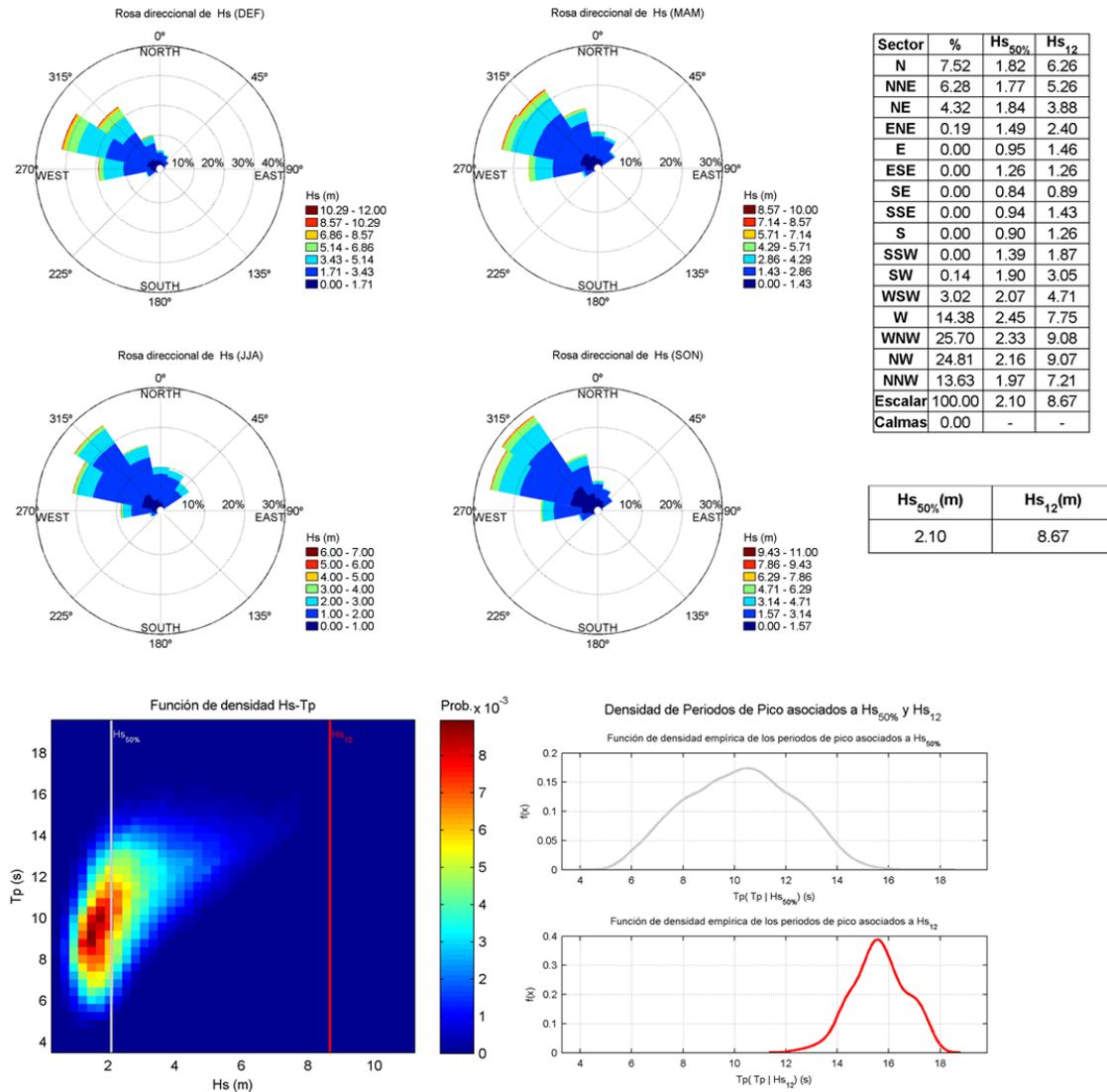


Figura AII.32 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Baldaio: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp.

Al propagar este oleaje (ejemplo en la Figura AII.33) se puede observar que, debido a la presencia del acantilado más al sur, que causa difracción, y a procesos de refracción, ocurre un giro del oleaje, con tendencia a poner los frentes paralelos a la línea de costa. Además, la presencia de lajas rocosas delante de la playa causa concentración de energía y aumento de altura de ola en algunas zonas, aunque, debido a que se localizan lejos de la línea de costa, su efecto es disipado. No se observó gran variación longitudinal de los parámetros de dinámica marina en profundidades reducidas (10m, Figura AII.34 y Tabla AII.13), que presentaron valores medios de  $Hs_{50\%}=1.4\text{m}$  ( $tp_{50\%}=10.4\text{s}$ ),  $Hs_{12}=5.2\text{m}$  ( $Tp_{12}=15.1\text{s}$ ),  $FME= 27024\text{J/m/s}$ . El valor estimado de cota de inundación superada solamente 12 horas al año, a partir del régimen medio, indica un valor de 3.3m por encima del nivel medio del mar, mientras que para el régimen extremal de máximos anuales los valores suben a 3.5m y 3.7m por encima del nivel medio del mar, para un período de retorno de 2 y 10 años, respectivamente. Presenta un parámetro adimensional de caída del grano ( $\Omega=3.3$ ) que indica una condición morfodinámica intermedia.

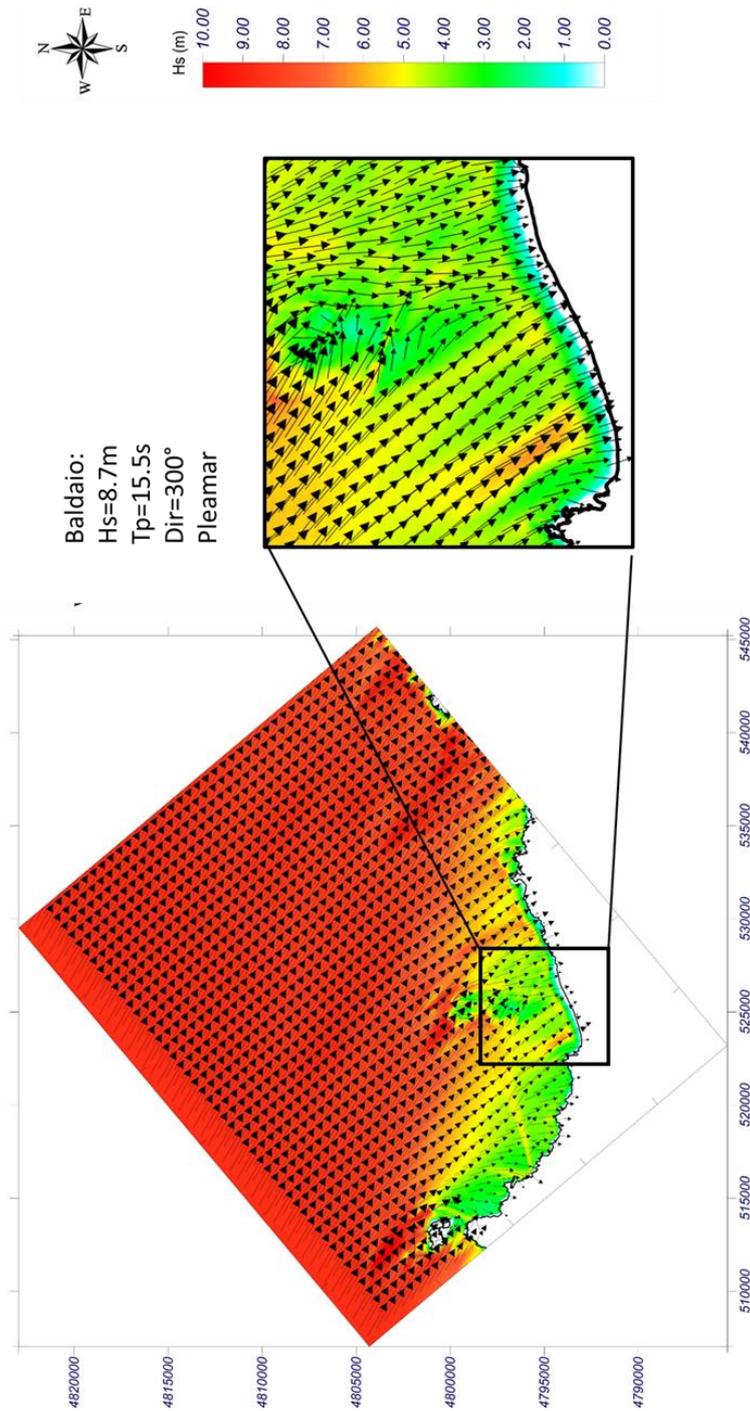


Figura AII.33 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/intermedias hasta la playa de Baldaio.

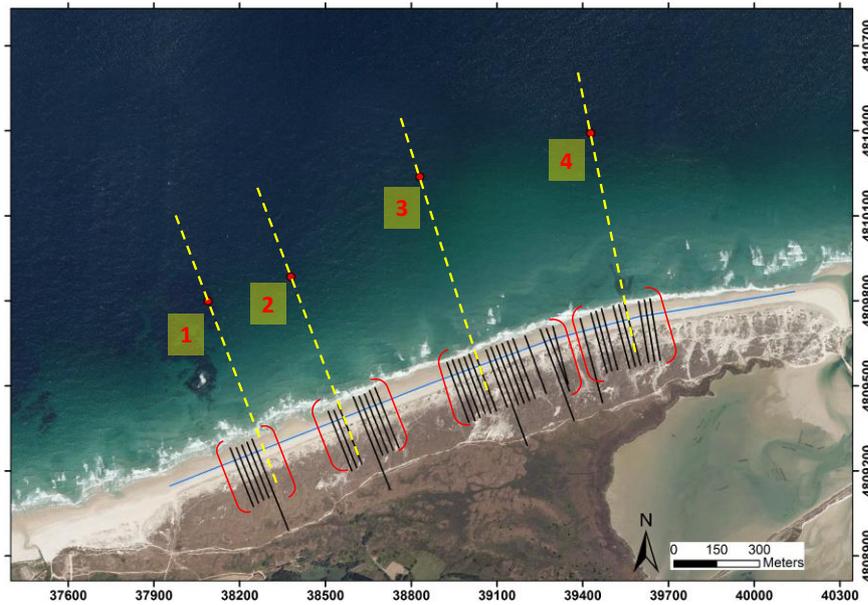


Figura AII.34 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Baldaio.

Tabla AII.13 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Baldaio

POI	Hs <sub>50%</sub>	Tp <sub>50%</sub>	Hs <sub>12</sub>	Tp <sub>12</sub>	dFME (°)	FME (J/m/s)	CI <sub>99%</sub>	CI <sub>12h</sub>	CI <sub>2a</sub>	CI <sub>10a</sub>	Ω medio
1	1.35	10	5.50	14.96	336.48	28047.67	3.08	3.35	3.56	3.77	3.3
2	1.35	10	5.38	15.19	335.49	27591.78	3.08	3.36	3.54	3.78	3.3
3	1.33	11	5.04	15.09	340.30	24429.43	3.03	3.29	3.45	3.69	3.1
4	1.44	10.5	4.74	14.94	339.51	28029.88	3.05	3.31	3.49	3.68	3.4

### Traba

Es una playa protegida orográficamente de los vientos provenientes del suroeste y del este-noreste, con un rango entre 270-35° actuando *onshore* directamente sobre la duna primaria. Dentro de este rango la dirección principal del viento es norte-noreste (Figura AII.35). La velocidad del viento mínima considerada es de 7.1m/s ( $U_{t,3m}$ ). Los vientos dentro del rango de actuación sobre la playa, con velocidades superiores a  $U_{t,3m}$  ocurrieron en 2.8% de los registros de la boya, presentando una media de velocidad de 8.4m/s. El transporte potencial (DP) de esta playa fue estimado en 4.4m<sup>3</sup>/m/año, siendo la dirección media de este transporte de 341°. El transporte considerando el ángulo de actuación del viento (DP $\alpha$ ) fue estimado en 3.1 m<sup>3</sup>/m/año.

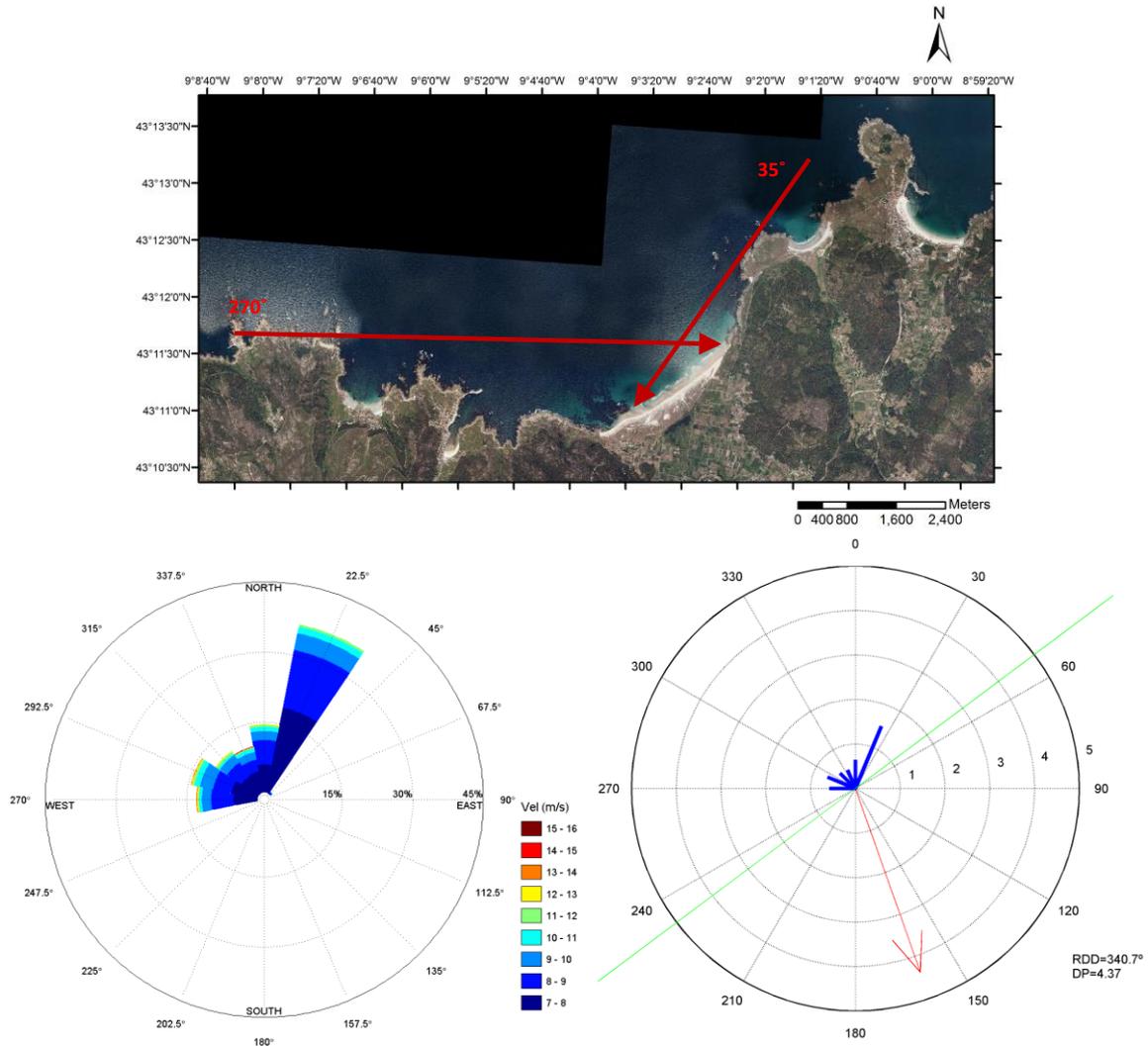


Figura AII.35 – Direcciones de vientos que pueden actuar sobre las dunas de Traba, rosa de viento (corregidos hacia tierra, solamente de los vientos capaces de transportar sedimento, o sea,  $U_{3m} > U_{L,3m}$ ) y rosa de transporte de sedimento (la línea de costa es la verde; la RDD y DP están indicadas por la flecha roja y apunta para donde va en transporte; la DP por sector son las azules y apuntan de donde viene el viento, en  $m^3/m/año$ ).

Como las demás playas de Galicia presentadas, en profundidades indefinidas/intermedias (Punto DOW: long.= -9.160°; lat.= 43.252°; profundidad= 101m) el oleaje proviene principalmente del WNW (24%) y NW (23%), con parámetros característicos de condición media de  $Hs_{50\%}=2.2m$  ( $Tp_{50\%}= 10.5s$ ) y de condiciones de temporal de  $Hs_{12}=8.7m$  ( $Tp_{12}=15.5s$ ) (Figura AII.36).

La propagación del oleaje enseña que la playa es bastante expuesta, con pocas transformaciones del oleaje, siendo la más importante la refracción, con una tendencia de los frentes de ola a llegar paralelos a la línea de costa. Un ejemplo de propagación de un caso extremal puede ser observado en la Figura AII.37. El oleaje (base de datos de reanálisis de 60 años) propagado hasta la línea de costa (10m de profundidad; Figura AII.38 y Tabla AII.14) presenta como características:  $Hs_{50\%}=1.8mm$ ;  $Tp_{50\%}= 11.0s$ ;  $Hs_{12}=6.2m$ ;  $Tp_{12}=15.9s$ ,  $FME=47411J/m/s$ . La cota de inundación superada solamente 12 horas al año, calculada con régimen medio, fue estimada en 3.6m por encima del NMM; la

evaluación del régimen extremal de máximos anuales indica una cota de inundación con período de retorno de 2 años de 3.7m por encima del nivel medio del mar. Para período de retorno de 10 años la estimación sube a 4.0m. El valor medio del parámetro adimensional de caída del grano ( $\Omega=4.6$ ) indica una condición morfodinámica intermedia.

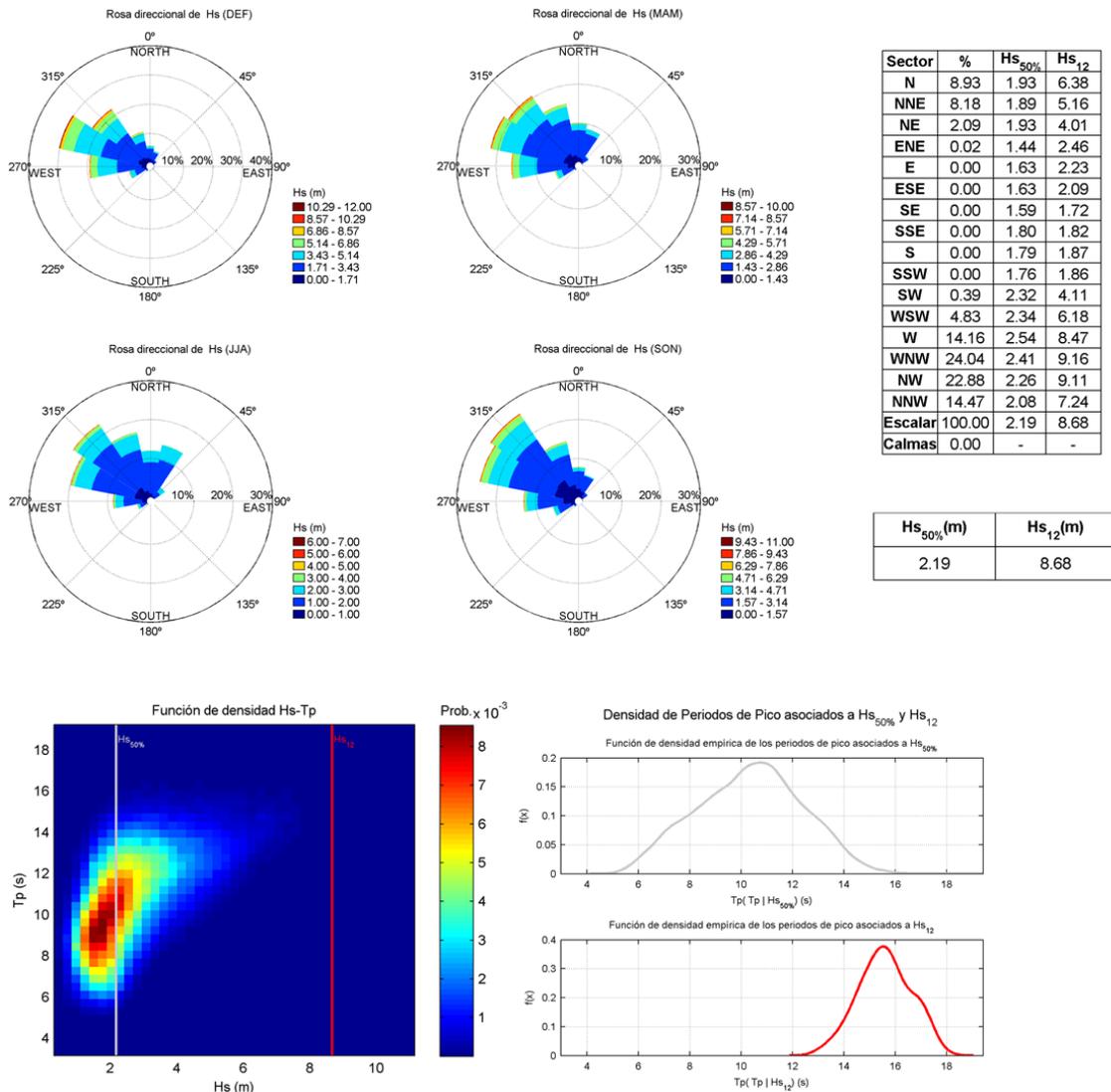


Figura AII.36 – Clima de oleaje en profundidades indefinidas/ intermedias (Punto DOW) delante de la playa de Traba: rosas por trimestre, tabla de frecuencia por dirección y función de densidad Hs-Tp.

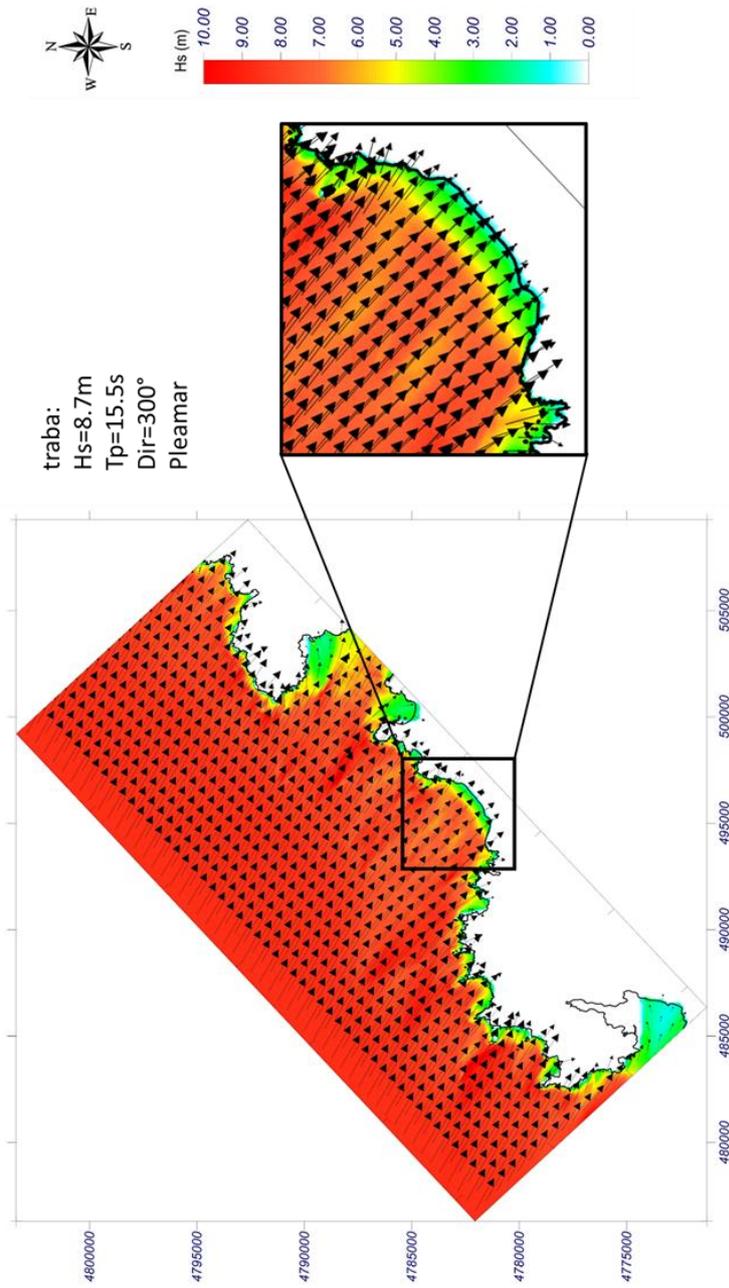


Figura AII.37 – Propagación de un caso de ejemplo de un evento extremo desde profundidades indefinidas/intermedias hasta la playa de Traba.

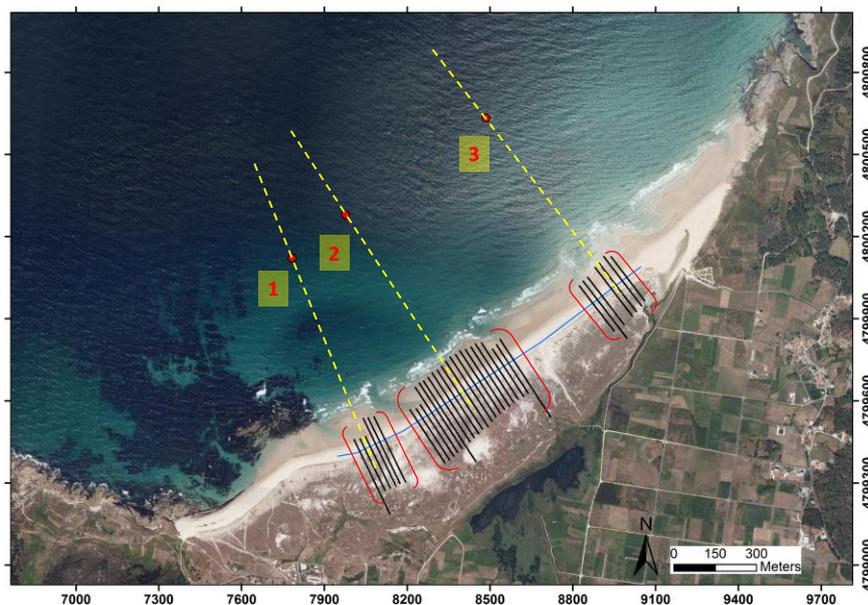


Figura AII.38 – Puntos POI y perfiles asociados, para evaluación del clima marítimo en profundidades reducidas en la playa de Traba.

Tabla AII.14 - Dinámica marina en los puntos POI de la playa de Traba

POI	Hs <sub>50%</sub>	Tp <sub>50%</sub>	Hs <sub>12</sub>	Tp <sub>12</sub>	dFME (°)	FME (J/m/s)	CI <sub>99%</sub>	CI <sub>12h</sub>	CI <sub>2a</sub>	CI <sub>10a</sub>	Ω medio
1	1.76	11	6.17	16.04	320.21	43716.54	3.25	3.56	3.69	3.97	4.5
2	1.89	11	6.41	15.92	316.83	50601.38	3.29	3.60	3.74	4.01	4.8
3	1.83	11	6.14	15.78	313.94	47915.57	3.29	3.60	3.73	4.00	4.7



## Referencias bibliográficas



## Referencias bibliográficas

- Aagaard, T.; Nielsen, J.; Davidson-Arnott, R.; Greenwood, B. & Nielsen, N., 1998. Coastal Morphodynamics at Skallingen , SW Denmark : High Energy Conditions. *Danish Journal of Geography*, 98, pp.20–30.
- Aagaard, T.; Davidson-Arnott, R.; Greenwood, B. & Nielsen, J., 2004. Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution. *Geomorphology*, 60(1–2), pp.205–224.
- Aarninkhof, S.G.J.; Dalfsen, J.A. Van; Mulder, J.P.M. & Rijks, D., 2010. Sustainable development of nourished shorelines. In *PIAC MMX Congress*. Liverpool, pp. 1–12.
- Anthony, E.J.; Vanhee, S. & Ruz, M.-H., 2006. Short-term beach–dune sand budgets on the north sea coast of France: Sand supply from shoreface to dunes, and the role of wind and fetch. *Geomorphology*, 81(3–4), pp.316–329.
- Aragonés, L.; Serra, J.C.; Villacampa, Y.; Saval, J.M. & Tinoco, H., 2016. New methodology for describing the equilibrium beach profile applied to the Valencia's beaches. *Geomorphology*, 259, pp.1–11.
- Arens, S.M., 1994. *Aeolian Processes in the Dutch Foredune*. PhD thesis. Universiteit van Amsterdam. 150p.
- Arens, S.M., 1996a. Patterns of sand transport on vegetated foredunes. *Geomorphology*, 17(4), pp.339–350.
- Arens, S.M., 1996b. Rates of aeolian transport on a beach in a temperate humid climate. *Geomorphology*, 17, pp.3–18.
- Arens, S. & Wiersma, J., 1994. The Dutch foredunes: inventory and classification. *Journal of Coastal Research*, 10(1), pp.189–202.
- Arens, S.M.; Van Kaam-Peters, H.M.E. & Van Boxel, J.H., 1995. Air flow over foredunes and implications for sand transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(4), pp.315–332.
- Arteaga, C.C. & Gonzalez, J.A., 2005. Natural and Human Erosive Factors in Liencres Beach Spit and Dunes (Cantabria, Spain). *Journal of Coastal Research, Special Issue*, (49), pp.70–75.
- Arteaga, C.; Juan de Sanjosé, J. & Serrano, E., 2008. Terrestrial photogrammetric techniques applied to the control of a parabolic dune in the Liencres dune system, Cantabria (Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(14), pp.2201–2210.
- Bagnold, R.A., 1941. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. *Nature*, 148, pp.480–481.
- Bauer, B.O. & Sherman, D.J., 1999. Coastal dune dynamics: problems and prospects. In A. S. Goudre, I. Livingston, & J. Stokes, eds. *Aeolian environments, sediments and landforms*. London: J. Wiley and Sons Ltd, pp. 71–104.
- Bauer, B.O. & Davidson-Arnott, R.G.D., 2002. A general framework for modeling sediment supply to coastal dunes including wind angle, beach geometry, and fetch effects. *Geomorphology*, 49(1–2), pp.89–108.
- Bauer, B.O.; Davidson-Arnott, R.G.D.; Hesp, P. a.; Namikas, S.L.; Ollerhead, J. & Walker, I.J., 2009. Aeolian sediment transport on a beach: Surface moisture, wind fetch, and

- mean transport. *Geomorphology*, 105(1–2), pp.106–116.
- Bauer, B.O.; Davidson-Arnott, R.G.D.; Walker, I.J.; Hesp, P.A. & Ollerhead, J., 2012. Wind direction and complex sediment transport response across a beach-dune system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(15), pp.1661–1677.
- Bernabeu, a M.; Medina, R. & Muñoz-pérez, C.V.J.J., 2001. Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 14(3–4), pp.227–236.
- Bernabeu, A.M.; Medina, R. & Vidal, C., 2002. An equilibrium profile model for tidal environments. *Scientia Marina*, 66(4), pp.325–335.
- Bird, E.C.F., 1985. *Coastline change: a global review*, New York: John Wiley and Sons Inc.
- Bochev-van de Burgh, L.M.; Wijnberg, K.M. & Hulscher, S.J.M.H., 2009. Dune morphology along a nourished coastline. *Journal of Coastal Research*, ICS2009 (56), pp.292–296.
- Bochev-van der Burgh, L.M.; Wijnberg, K.M. & Hulscher, S.J.M.H., 2011. Decadal-scale morphologic variability of managed coastal dunes. *Coastal Engineering*, 58(9), pp.927–936.
- Bodge, K., 1992. Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. *Journal of coastal research*, (August 1991), pp.47–55.
- Booij, N.; Ris, R.C. & Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4), pp.7649–7666.
- Brodie, K.L. & Spore, N.J., 2015. Foredune classification and storm response : automated analysis of terrestrial lidar dems. In *Coastal Sediments 2015*. San Diego, California, pp. 1–14.
- Bruun, P., 1954. *Coast Erosion and the Development of Beach Profiles*. In Beach Erosion Board Technical Memorandum no 44. U.S. Army.
- Camus, P.; Mendez, F.J. & Medina, R., 2011a. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9), pp.851–862.
- Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R. & Cofiño, A.S., 2011b. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), pp.453–462.
- Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R.; Tomas, A. & Izaguirre, C., 2013. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, 72, pp.56–68.
- Cariolet, J.-M. & Suanez, S., 2013. Runup estimations on a macrotidal sandy beach. *Coastal Engineering*, 74(0), pp.11–18.
- Carter, R.W.G., 1976. Formation, Maintenance and Geomorphological Significance of an Aeolian Shell Pavement. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 46(2), pp.418–429.
- Carter, R.W.G., 1991. Near-future sea level impacts on coastal dune landscapes. *Landscape Ecology*, 6(1–2), pp.29–39.

- Carter, R.W.. & Stone, G., 1989. Mechanisms associated with the erosion of sand dune cliffs, Magilligan, Northern Ireland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, pp.1–10.
- Christiansen, M.B., 2003. Effects of dune ramps on sediment supply to coastal foredunes: Skallingen, SW Denmark. In *Proceeding of Coastal Sediments '03*. Corpus Christi, TX: World Scientific Publishing Corp. and East Meets West Productions.
- Christiansen, M.B. & Davidson-Arnott, R., 2004. Rates of Landward Sand Transport over the Fore dune at Skallingen, Denmark and the Role of Dune Ramps. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 104, pp.31–43.
- Cid, A.; Castanedo, S.; Abascal, A.J.; Menéndez, M. & Medina, R., 2014. A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset. *Climate Dynamics*, 43(7–8), pp.2167–2184.
- Cowles, H.C., 1899. The Ecological Relations of the Vegetation on the Sand Dunes of Lake Michigan. *Botanical Gazette*, 27, pp.97–117.
- Dai, Z.J.; Du, J.Z.; Li, C.C. & Chen, Z.S., 2007. The configuration of equilibrium beach profile in South China. *Geomorphology*, 86(3–4), pp.441–454.
- Damsma, T., 2009. *Dune growth on natural and nourished beaches: A new perspective*. M.Sc. Thesis. Delft University of Technology.
- Darke, I.B.; Walker, I.J. & Hesp, P.A., 2016. Beach-dune sediment budgets and dune morphodynamics following coastal dune restoration, Wickaninnish Dunes, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(10), pp.1370–1385.
- Davidson-Arnott, R.G.D., 1988. Temporal and spatial controls on beach/dune interaction, Long Point, Lake Eire. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 3, pp.131–136.
- Davidson-Arnott, R.G.D., 2005. Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts. *Journal of Coastal Research*, 216, pp.1166–1172.
- Davidson-Arnott, R., 2010. *Introduction to Coastal Processes & Geomorphology*. Cambridge University Press. 442p.
- Davidson-Arnott, R.G.D. & Law, M.N., 1990. Seasonal patterns and controls on sediment supply to coastal foredunes, Long Point, Lake Erie. In K. F. Nordstrom, N. Psuty, & R. W. G. Carter, eds. *Coastal Dunes: Form and Process*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 177–200.
- Davidson-Arnott, R.G.D. & Law, M.N., 1996. Measurement and Prediction of Long-Term Sediment Supply to Coastal Fore dunes. *Journal of Coastal Research*, 12(3), pp.654–663.
- Davidson-Arnott, R.G.D. & Van Heyningen, A.G., 2003. Migration and sedimentology of longshore sandwaves, Long Point, Lake Erie, Canada. *Sedimentology*, 50(6), pp.1123–1137.
- Davidson-Arnott, R.G.D.; MacQuarrie, K. & Aagaard, T., 2005. The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on sand transport on a beach. *Geomorphology*, 68(1–2), pp.115–129.
- Davidson-Arnott, R.G.D.; Yang, Y.; Ollerhead, J.; Hesp, P.A. & Walker, I.J., 2008. The effects of surface moisture on aeolian sediment transport threshold and mass flux on a beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, pp.55–74.

- de Vriend, H.J.; Capobianco, M.; Chesher, T.; Swart, H.E.; Latteux, B. & Stive, M.J.F., 1993. Approaches to long-term modelling of coastal morphology: A review. *Coastal Engineering*, 21(1–3), pp.225–269.
- de Vries, S.; Arens, B.; Stive, M. & Ranasinghe, R., 2011. Dune Growth Trends and the Effect of Beach Width on Annual Timescales. *The Proceedings of the Coastal Sediments 2011*, pp.712–724.
- de Vries, S.; Southgate, H.N.; Kanning, W. & Ranasinghe, R., 2012. Dune behavior and aeolian transport on decadal timescales. *Coastal Engineering*, 67, pp.41–53.
- de Vries, S.; Harley, M.D.; Schipper, M.A. de & Ruessink, G., 2015. Dune growth due to aeolian sediment transport and the role of the beach and intertidal zone. In *Coastal Sediments 2015*. San Diego, California, pp. 1–14.
- Dean, R.G., 1977. *Equilibrium Beach Profiles: US Atlantic and Gulf Coasts, Newark, DE*. Ocean Engineering Report No. 12. University of Delaware.
- Dean, R.G., 1991. Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), pp.53–84.
- Delgado-Fernandez, I., 2010. A review of the application of the fetch effect to modelling sand supply to coastal foredunes. *Aeolian Research*, 2(2–3), pp.61–70.
- Delgado-Fernandez, I., 2011. Meso-scale modelling of aeolian sediment input to coastal dunes. *Geomorphology*, 130(3–4), pp.230–243.
- Delgado-Fernandez, I. & Davidson-Arnott, R., 2011. Meso-scale aeolian sediment input to coastal dunes: The nature of aeolian transport events. *Geomorphology*, 126(1–2), pp.217–232.
- Diego Cavada, J.M., 2014. *Sedimentología, morfología y evolución del campo dunar de Bayas (Asturias)*. Tesina de Máster. Universidad de Oviedo. 85p.
- Díez, J.; Cánovas, V.; Uriarte, A. & Medina, R., 2017a. Characterization of the dry beach profile. A morphological approach. *Coastal Engineering*, in press.
- Díez, J.; Uriarte, A. & Medina, R., 2017b. A parametric model for the dry beach equilibrium profile. *Journal of Coastal Research*, in press.
- Duran, O. & Moore, L.J., 2013. Vegetation controls on the maximum size of coastal dunes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(43), pp.17217–17222.
- Edelman, T., 1972. Dune erosion during storm conditions. In *13th Conference on Coastal Engineering*. Vancouver, pp. 1305–1312.
- Egbert, G.D. & Erofeeva, S.Y., 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), pp.183–204.
- Egbert, G.D.; Bennett, A.F. & Foreman, M.G.G., 1994. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research*, 99(15), pp.821–24.
- Fernández García, F. & Rasilla, D., 1992. El viento en la cornisa cantábrica: avance de un estudio sobre los temporales del S. *Cuadernos de Sección, Historia-Geografía*, 20, pp.271–295.
- Fita, L.; Fernandez, J.; Gutiérrez, J.M. & Cofiño, A.S., 2009. SeaWind project: Analysing the sensitivity on horizontal and vertical resolution on WRF simulations. In *II*

JMCMO. Valencia.

- FitzGerald, D.M.; Fenster, M.S.; Argow, B. a. & Buynevich, I. V., 2008. Coastal Impacts Due to Sea-Level Rise. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36(1), pp.601–647.
- Flor, G., 1978. Relación entre la distribución de sedimentos y la circulación costera en la región del Cabo Peñas. *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 10.
- Flor, G., 1992. Tipología, catalogación y tendencias de los procesos de erosión/sedimentación en los campos dunares de la costa de Galicia (NW de España). *Thalassas*, 10, pp.9–39.
- Flor, G., 2004. Modelos evolutivos de los grandes campos dunares de Asturias. El factor antrópico. In R. Blanco Chao, J. López Bedoya, & J. Pérez Alberti, eds. *Proc II Reunión de Geomorfología Litoral*. Santiago de Compostela, pp. 167–181.
- Flor, G. & Flor-Blanco, G., 2005. An Introduction to the Erosion and Sedimentation Problems in the Coastal Regions of Asturias and Cantabria (NW Spain) and its implications on environmental management. *Journal of Coastal Research*, (49), pp.58–63.
- Flor, G. & Flor-Blanco, G., 2014. Componentes de viento generadores de morfologías y campos de dunas costeras en Asturias (NO de España). *Cuaternario y Geomorfología*, 28(3–4), pp.47–68.
- Flor, G.; Flor-Blanco, G. & Martínez, J.F., 2003. Evolución del campo dunar en El Puntal ( Laredo ). In *II Reunión de Geomorfología Litoral*. Santiago de Compostela.
- Flor, G.; Martínez Cedrun, P. & Flor-Blanco, G., 2011. Campos dunares de Asturias, Cantabria y País Vasco. In E. Sanjaume & J. Gracia, eds. *Las dunas de España*. Sociedad Española de Geomorfología, pp. 127–159.
- Franke, R., 1982. Scattered data interpolation: tests of some methods. *Mathematics of Computation*, 38(157), pp.181–181.
- Fryberger, S. & Dean, G., 1979. Dune Forms and Wind Regime. In E. McKee, ed. *A study of global sand seas*. Washington: United States Government Printing Office, pp. 137–169.
- Galicia, X. de, 2011. *Plan de Ordenación del litoral*. Xunta de Galicia.
- García de Lomas, J.; Gracia, F.J. & García, C.M., 2011. Las dunas como hábitats de interés comunitario. problemas de conservación. In E. Sanjaume & J. Gracia, eds. *Las dunas en España*. Sociedad Española de Geomorfología, pp. 585–606.
- Giles, P.T. & McCann, S.B., 1997. Foredune development on Iles de la Madeleine (Quebec), Atlantis Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 34, pp.1467–1476.
- Gillette, D.A.; Herbert, G.; Stockton, P. & Owen, P.R., 1996. Causes of the fetch effect in wind erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, pp.641–659.
- GIOC, 2003. *Documento Temático: Regeneración de Playas*. Universidad de Cantabria; Ministerio de Medio Ambiente/ Dirección General de Costas
- Goldstein, E.B. & Moore, L.J., 2016. Stability and bistability in a one-dimensional model of coastal foredune height. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(5), pp.964–977.

- Gómez-Pina, G.; Muñoz-Pérez, J.J.; Ramírez, J.L. & Ley, C., 2002. Sand dune management problems and techniques, Spain. *Journal of Coastal Research*, 36, pp.325–332.
- González, M.; Medina, R. & Losada, M.A., 1999. Equilibrium beach profile model for perched beaches. *Coastal Engineering*, 36(4), pp.343–357.
- González, M.; Medina, R.; Gonzalez-Ondina, J.; Osorio, A.; Méndez, F.J. & García, E., 2007. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Computers & Geosciences*, 33(7), pp.916–931.
- González-Villanueva, R.; Costas, S.; Pérez-Arlucea, M.; Jerez, S. & Trigo, R.M., 2013. Impact of atmospheric circulation patterns on coastal dune dynamics, NW Spain. *Geomorphology*, 185, pp.96–109.
- Gracia, F.; Hernández, L.; Hernandez, A.I.; Sanjaume, E. & Flor, G., 2009. Dunas móviles embrionarias. In VV.AA, ed. *Bases Ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, p. 54.
- Guillén, J.; Stive, M.J.F. & Capobianco, M., 1999. Shoreline evolution of the Holland coast on a decadal scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, pp.517–536.
- Hall, K., 2015. Assessment of decadal and annual beach width and dune height patterns on Masonboro island, North Carolina. In *Coastal Sediments 2015*. San Diego, California, pp. 1–14.
- Hallermeier, R.J. & Rhodes, P.E., 1988. Generic treatment of dune erosion for 100-year event. In *Coastal Engineering Proceedings*. pp. 1197–1211.
- Hanley, M.E.; Hoggart, S.P.G.; Simmonds, D.J.; Bichot, A.; Colangelo, M. a.; Bozzeda, F.; Heurtefeux, H.; Ondiviela, B.; Ostrowski, R.; et al., 2014. Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes. *Coastal Engineering*, 87, pp.136–146.
- Hanson, H.; Larson, M. & Kraus, N.C., 2010. Calculation of beach change under interacting cross-shore and longshore processes. *Coastal Engineering*, 57(6), pp.610–619.
- Hardisty, J. & Whitehouse, R.J.S., 1988. Evidence for a new sand transport process from experiments on Saharan dunes. *Nature*, 332, pp.532–534.
- Hastie, T.; Tibshirani, R. & Friedman, J., 2009. *The Elements of Statistical Learning 2º.*, New York: Springer. 745p.
- Heathfield, D.K. & Walker, I.J., 2011. Analysis of coastal dune dynamics, shoreline position, and large woody debris at Wickaninnish Bay, Pacific Rim National Park, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48(7), pp.1185–1198.
- Heathfield, D.K.; Walker, I.J. & Atkinson, D.E., 2013. Erosive water level regime and climatic variability forcing of beach-dune systems on south-western Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(7), pp.751–762.
- Hellemaa, P., 1999. *The development of coastal dunes and their vegetation in Finland*. Thesis. University of Helsinki.
- Hesp, P.A., 1982. *Morphology and Dynamics of Foredunes in S.E. Australia*. Thesis. University of Sydney.

- Hesp, P.A., 1984a. Foredune formation in Southeast Australia. In B. G. Thom, ed. *Coastal Geomorphology in Australia*. Academic Press, pp. 69–97.
- Hesp, P.A., 1984b. The Formation of Sand “Beach Ridges” and Foredunes. *Search*, 15(9–10), pp.289–291.
- Hesp, P.A., 1988. Surfzone, beach and foredune interactions on the Australian south east coast. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 3, pp.15–25.
- Hesp, P.A., 1989. A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 96B, pp.181–201.
- Hesp, P.A., 1991. Ecological processes and plant adaptations on coastal dunes. *Journal of Arid Environments*, 21, pp.165–191.
- Hesp, P.A., 1999. The Beach Backshore and Beyond. In A. D. Short, ed. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. New York: J. Wiley & Sons, pp. 145–170.
- Hesp, P.A., 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48(1–3), pp.245–268.
- Hesp, P.A., 2011. The relationships between sea level, “beach ridge” and foredune evolution. In *XIII ABEQUA Congress - The South American Quaternary: Challenges and Perspectives*. pp. 30–32.
- Hesp, P.A., 2012. Surfzone-beach-dune interactions. In *NCK-days 2012 : Crossing borders in coastal research : jubilee conference proceedings*. Enschede, the Netherlands: University of Twente, Department of Water Engineering & Management.
- Hesp, P.A. & Hastings, K., 1998. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans. *Geomorphology*, 22(2), pp.193–204.
- Hesp, P.A. & Martínez, M.A., 2007. Disturbance Processes and Dynamics in Coastal Dunes. In E. A. Johnson & K. Miyanishi, eds. *Plant disturbance ecology: the process and the response*. Elsevier, pp. 215–247.
- Hesp, P.A.; Dillenburg, S.R.; Barboza, E.G.; Tomazelli, L.J.; Ayup-Zouain, R.N.; Esteves, L.S.; Gruber, N.L.S.; Toldo-Jr., E.E.; Tabajara, L.L.C.A.; et al., 2005. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77(3), pp.493–508.
- Hesp, P.A.; Smyth, T.A.G.; Nielsen, P.; Walker, I.J.; Bauer, B.O. & Davidson-Arnott, R., 2015. Flow deflection over a foredune. *Geomorphology*, 230, pp.64–74.
- Houser, C., 2009. Synchronization of transport and supply in beach-dune interaction. *Progress in Physical Geography*, 33(6), pp.733–746.
- Houser, C., 2013. Alongshore variation in the morphology of coastal dunes: Implications for storm response. *Geomorphology*, 199, pp.48–61.
- Houser, C. & Hamilton, S., 2009. Sensitivity of post-hurricane beach and dune recovery to event frequency. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(March), pp.613–628.
- Houser, C. & Mathew, S., 2011. Alongshore variation in foredune height in response to transport potential and sediment supply: South Padre Island, Texas. *Geomorphology*, 125(1), pp.62–72.

- Houser, C.; Hapke, C. & Hamilton, S., 2008. Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms. *Geomorphology*, 100(3–4), pp.223–240.
- Hsu, S.A., 1977. Boundary Layer Meteorological Research in the Coastal Zone. *Geoscience and Man*, 18, pp.99–111.
- Hsu, S.A., 1986. Correction of Land-Based Wind Data for Offshore Applications: A Further Evaluation. *Journal of Physical Oceanography*, 16, pp.390–394.
- Hsu, S.A. & Weggel, J.R., 2002. Wind-Blown Sediment Transport. In *Coastal Engineering Manual*. US Army Corps of Engineers, p. 84pg.
- IHCantabria, 2016. *Ameva*. Software. <http://ihameva.ihcantabria.com/>
- Iversen, J.D. & Rasmussen, K.R., 1994. The effect of surface slope on saltation threshold. *Sedimentology*, 41(4), pp.721–728.
- Iversen, J.D. & Rasmussen, K.R., 1999. The effect of surface slope on sand transport. *Sedimentary Geology*, 46, pp.723–731.
- Jackson, D.W.T. & Cooper, J.A.G., 1999. Beach fetch distance and aeolian sediment transport. *Sedimentology*, 46(3), pp.517–522.
- Jackson, N.L. & Nordstrom, K.F., 1997. Effects of time-dependent moisture content of surface sediments on aeolian transport rates across a beach, Wildwood, New Jersey, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(7), pp.611–621.
- Jungerius, P.D.; Witter, J.V. & van Boxel, J.H., 1991. The effects of changing wind regimes on the development of blowouts in the coastal dunes of The Netherlands. *Landscape Ecology*, 6, pp.41–48.
- Junoy, J.; Castellanos, C.; Viéitez, J.M.; De La Huz, M.R. & Lastra, M., 2005. The macroinfauna of the Galician sandy beaches (NW Spain) affected by the Prestige oil-spill. *Marine Pollution Bulletin*, 50(5), pp.526–536.
- Kadib, A.L., 1964. *Calculation procedure for sand transport by wind on natural beaches*. Report. US Army Corps of Engineers.
- Kennard, R.W. & Stone, L.A., 1969. Computer Aided Design of Experiments. *Technometrics*, 11(1), pp.137–148.
- Klijjn, A., 1990. The younger dunes in The Netherlands; chronology and causation. In T. W. Bakker, P. D. Jungerius, & J. A. Klijn, eds. *Dunes of the European coasts: Geomorphology, Hydrology, Soils*. Catena Verlag, pp. 89–100.
- Komar, P.D., 1971. Nearshore cell circulation and the formation of giant cusps. *Geological Society of America Bulletin*, 82(9), pp.2643–2650.
- Komar, P.D., 1976. *Beach processes and sedimentation*. London: Prentice-Hall. 429p.
- Komar, P.D. & McDougal, W.G., 1994. The Analysis of Exponential Beach Profiles. *Journal of Coastal Research*, 10(1), pp.59–69.
- Komar, P.; McDougal, W.; Marra, J. & Ruggiero, P., 1999. The rational analysis of setback distances: applications to the Oregon Coast. *Shore and Beach*, 67(1), pp.41–49.
- Kriebel, D.L. & Dean, R.G., 1993. Convolution Method for Time-Dependent Beach-Profile Response. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*,

- 119(2), pp.204–226.
- Kuriyama, Y. & Mochizuki, N., 1999. Aeolian sand transport and vegetation in front of a foredune. In *Coastal Sediments 99 Vols 13*. New York: ASCE, pp. 2597–2608.
- Lancaster, N., 1988. The development of large aeolian bedforms. *Sedimentary Geology*, 55(1–2), pp.69–89.
- Larson, M. & Kraus, N.C., 1991. Mathematical modeling of the fate of beach fill. *Coastal Engineering*, 16(1), pp.83–114.
- Larson, M.; Erikson, L. & Hanson, H., 2004. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, 51(8–9), pp.675–696.
- Larson, M.; Palalane, J.; Fredriksson, C. & Hanson, H., 2016. Simulating cross-shore material exchange at decadal scale. Theory and model component validation. *Coastal Engineering*, 116, pp.57–66.
- Ley Vega, C.; Gallego, J.B. & Vidal, C., 2007. *Manual de restauración de dunas costeras*, Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas.
- Livingstone, I. & Warren, A., 1996. *Aeolian Geomorphology: an Introduction* Addison We., London.
- Long, J.W.; de Bakker, A.T.M. & Plant, N.G., 2014. Scaling coastal dune elevation changes across storm-impact regimes. *Geophysical Research Letters*, 41(8), pp.2899–2906.
- Longhitano, S.G., 2015. Short-Term Assessment of Retreating vs. Advancing Microtidal Beaches Based on the Backshore/Foreshore Length Ratio: Examples from the Basilicata Coasts (Southern Italy). *Open Journal of Marine Science*, 5(1), pp.123–145.
- Losada, M.A.; Medina, R.; Vidal, C. & Roldán, A., 1991. Historical Evolution and Morphological Analysis of “El Puntal” Spit, Santander (Spain). *Journal of Coastal Research*, 7(3), pp.711–722.
- Lynch, K.; Delgado-Fernandez, I.; Jackson, D.W.T.; Cooper, J.A.G.; Baas, A.C.W. & Beyers, J.H.M., 2013. Alongshore variation of aeolian sediment transport on a beach, under offshore winds. *Aeolian Research*, 8(October 2015), pp.11–18.
- Lynch, K.; Jackson, D.W.T. & Cooper, J.A.G., 2008. Aeolian fetch distance and secondary airflow effects: the influence of micro-scale variables on meso-scale foredune development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(7), pp.991–1005.
- MAGRAMA, 2016. Guía de playas. (*Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*). <http://www.mapama.gob.es/es/costas/servicios/guia-playas/>.
- Martínez Cedrun, P.; Flor, G.; Flor-Blanco, G. & González, G.M., 2014. Relaciones Texturales y Composición Mineralógica de los Sistemas de Playa/Duna en una Costa Rocosa: Caso de Cantabria (NO de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27(2), pp.13–27.
- Martínez, M.L. & Psuty, N.P., 2007. *Coastal Dunes: ecology and Conservation*, New York: Springer.
- Masselink, G. & Short, A.D., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9(3), pp.785–800.

- Masselink, G.; Kroon, A. & Davidson-Arnott, R.G.D., 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings - A review. *Geomorphology*, 73, pp.33–49.
- Mathew, S.; Davidson-Arnott, R.G.D. & Ollerhead, J., 2010. Evolution of a beach–dune system following a catastrophic storm overwash event: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, 1936–2005. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 47(3), pp.273–290.
- Maun, M.A., 2009. *The Biology of Coastal Sand Dunes*, Oxford: Oxford Univ. Press.
- McLean, R. & Shen, J., 2006. From Foreshore to Foredune: Foredune Development Over the Last 30 Years at Moruya Beach, New South Wales, Australia. *Journal of Coastal Research*, 221(221), pp.28–36.
- Menendez, M.; García-Díez, M.; Fita, L.; Fernández, J.; Méndez, F.J. & Gutiérrez, J.M., 2014. High-resolution sea wind hindcasts over the Mediterranean area. *Climate Dynamics*, 42(7–8), pp.1857–1872.
- Mínguez, R.; Espejo, A.; Tomás, A.; Méndez, F.J. & Losada, I.J., 2011. Directional calibration of wave reanalysis databases using instrumental data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(11), pp.1466–1485.
- Mínguez, R.; Reguero, B.G.; Luceño, A. & Méndez, F.J., 2012. Regression models for outlier identification (Hurricanes and typhoons) in wave hindcast databases. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(2), pp.267–285.
- Miot da Silva, G., 2011. Wave dynamics and beach–dune interactions: Moçambique Beach, Santa Catarina Island, Brazil. In *Proceedings of the Coastal Sediments*. Miami, Florida, pp. 725–738.
- Miot da Silva, G. & Hesp, P., 2010. Coastline orientation, aeolian sediment transport and foredune and dunefield dynamics of Moçambique Beach, Southern Brazil. *Geomorphology*, 120(3–4), pp.258–278.
- Miot da Silva, G.; Hesp, P.; Peixoto, J. & Dillenburg, S.R., 2008. Foredune vegetation patterns and alongshore environmental gradients: Moçambique Beach, Santa Catarina Island, Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(10), pp.1557–1573.
- Miot da Silva, G.; Siadat Mousavi, S.M. & Jose, F., 2012. Wave-driven sediment transport and beach-dune dynamics in a headland bay beach. *Marine Geology*, 323–325, pp.29–46.
- Momiji, H. & Bishop, S.R., 2002. Estimating the windward slope profile of a barchan dune. *Sedimentology*, 49(3), pp.467–481.
- Momiji, H. & Warren, A., 2000. Relations of sand trapping efficiency and migration speed of transverse dunes to wind velocity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(10), pp.1069–1084.
- Morton, R.A.; Gibeaut, J.C. & Paine, J.G., 1995. Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement. *Marine Geology*, 126(1–4), pp.161–179.
- Mull, J. & Ruggiero, P., 2014. Estimating Storm-Induced Dune Erosion and Overtopping along U.S. West Coast Beaches. *Journal of Coastal Research*, 298(6), pp.1173–1187.
- Muller, M.C.; Roelvink, D.; Luijendijk, A.; De Vries, S. & Van Thiel de Vries, J., 2012. Process-based modeling of coastal dune development. In *33rd Conference on Coastal Engineering*. Santander, pp. 1–8.

- Nickling, W.G. & Davidson-Arnott, R.G.D., 1990. Aeolian sediment transport on beaches and coastal sand dunes. In R. G. D. Davidson-Arnott, ed. *Proceedings of Symposium on Coastal Sand Dunes*. Ottawa: National Research Council of Canada, pp. 1–35.
- Nordstrom, K.F., 1994. Beaches and dunes of human-altered coasts. *Progress in Physical Geography*, 18(4), pp.497–516.
- Nordstrom, K.F. & Arens, S.M., 1998. The role of human actions in evolution and management of foredunes in The Netherlands and New Jersey, USA. *Journal of Coastal Conservation*, 4, pp.169–180.
- Ollerhead, J.; Davidson-Arnott, R.; Walker, I.J. & Mathew, S., 2013. Annual to decadal morphodynamics of the foredune system at Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(3), pp.284–298.
- Overton, M.F.; Fisher, J.S. & Fenaish, T., 1987. Numerical analysis of swash forces on dunes. In *Coastal Sediments '87*. ASCE, pp. 632–641.
- Overton, M.F.; Pratikto, W.A.; Lu, J.C. & Fisher, J.S., 1994. Laboratory investigation of dune erosion as a function of sand grain size and dune density. *Coastal Engineering*, 23(1–2), pp.151–165.
- Palalane, J.; Fredriksson, C.; Marinho, B.; Larson, M.; Hanson, H. & Coelho, C., 2016. Simulating cross-shore material exchange at decadal scale. Model application. *Coastal Engineering*, 116, pp.26–41.
- Pawlowicz, R.; Beardsley, B. & Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TDE. *Computers and Geosciences*, 28(8), pp.929–937.
- Pereira, P.S.; Calliari, L.J. & Barletta, R.C., 2010. Heterogeneity and homogeneity of Southern Brazilian beaches: A morphodynamic and statistical approach. *Continental Shelf Research*, 30(3–4), pp.270–280.
- Pérez Alberti, A. & Vázquez Paz, M., 2011. Caracterización y dinámica de sistemas dunares costeros de Galicia. In *Las dunas de España*. Sociedad Española de Geomorfología.
- Pluis, J.L.A. & Winder, B., 1990. Natural stabilization. In T. W. Bakker, P. D. Jungerius, & J. A. Klijn, eds. *Dunes of the European coasts: Geomorphology, Hydrology, Soils*. Catena Verlag, pp. 195–208.
- Polidoro, A.; Dornbusch, U. & Pullen, T., 2013. Improved maximum run-up formula for mixed beaches based on field data. In *ICE Coasts, Marine Structures and Breakwaters Conference*. Edinburgh, pp. 389–398.
- Psuty, N.P., 1988. Sediment budget and dune/beach interaction. *Journal of Coastal Research*, (Special Issue n°3), pp.1–4.
- Psuty, N.P., 1992. Spatial variation in coastal foredune development. In R. W. . Carter, T. G. . Curtis, & M. Sheehy-Skeffington, eds. *Proceedings of the Third European Dune Congress*. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, pp. 3–13.
- Psuty, N.P., 1993. Foredune morphology and sediment budget, Perdido Key, Florida, USA. In K. Pye, ed. *The Dynamics and Environmental Context of Aeolian Sedimentary Systems*. Geological Society, London, Special Publications, pp. 145–157.
- Psuty, N.P., 2004. The Coastal Foredune : A Morphological Basis. In M. L. Martinez & N.

- P. Psuty, eds. *Coastal Dunes, Ecology and Conservation. Ecological Studies*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 11–27.
- Pye, K. & Blott, S.J., 2008. Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates: An investigation of the significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast, UK. *Geomorphology*, 102(3–4), pp.652–666.
- Requejo, S.; Medina, R. & González, M., 2005. Equilibrium Beach Profile for Refraction-Diffraction Areas. In *Coastal Dynamics 2005*. pp. 1–13.
- Romańczyk, W.; Boczar-Karakiewicz, B. & Bona, J.L., 2005. Extended equilibrium beach profiles. *Coastal Engineering*, 52(9), pp.727–744.
- Ruessink, B.G. & Jeuken, M.C.J.L., 2002. Dunefoot dynamics along the Dutch coast. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(10), pp.1043–1056.
- Ruggiero, P.; Kaminsky, G.M.; Komar, P.D. & McDougal, W.G., 1997. Extreme waves and coastal erosion in the Pacific Northwest. In *Ocean Wave Measurement and Analysis, Proceedings of the 3rd International Symposium, Waves '97*. Virginia, pp. 947–961.
- Ruggiero, P.; Kaminsky, G.M.; Gelfenbaum, G. & Voigt, B., 2005. Seasonal to Interannual Morphodynamics along a High-Energy Dissipative Littoral Cell. *Journal of Coastal Research*, 21(3), pp.553–578.
- Ruggiero, P.; Mull, J.; Zarnetske, P.; Hacker, S. & Seabloom, E., 2011. Interannual To Decadal Foredune Evolution. *The Proceedings of the Coastal Sediments 2011*, pp.698–711.
- Ruz, M.H. & Meur-Ferec, C., 2004. Influence of high water levels on aeolian sand transport: Upper beach/dune evolution on a macrotidal coast, Wissant Bay, northern France. *Geomorphology*, 60, pp.73–87.
- Ruz, M.H.; Hequette, A. & Maspataud, A., 2009. Identifying Forcing Conditions Responsible for Foredune Erosion on the Northern Coast of France. *Journal of Coastal Research*, (56), pp.356–360.
- Sabatier, F.; Anthony, E.J.; Héquette, A.; Suanez, S.; Musereau, J.; Ruz, M.H. & Regnaud, H., 2009. Morphodynamics of beach/dune systems: examples from the coast of France. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1, pp.3–22.
- Sallenger, A.H., 2000. Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, 16(3), pp.890–895.
- Sallenger, A.H.; Stockdon, H.; Haines, J.; Krabill, W.; Swift, R. & Brock, J., 2000. Probabilistic Assessment Of Beach And Dune Changes. In *Coastal Engineering 2000*. pp. 3035–3047.
- Sanjaume, E. & Gracia, J., 2011. *Las dunas en España*. Sociedad Española de Geomorfología. 747p.
- Sanjaume, E. & Pardo-Pascual, J.E., 2005. Erosion by human impact on the Valencian coastline (E of Spain). *Journal of Coastal Research, Special Issue*, (49), pp.76–82.
- Sanjaume, E.; Gracia, F.J. & Flor, G., 2011. Introducción a la geomorfología de sistemas dunares. In E. Sanjaume & F. J. Gracia, eds. *Las dunas en España*. pp. 13–63.
- Saunders, K.E. & Davidson-Arnott, R.G., 1990. Coastal dune response to natural disturbances. In *Canadian Symposium on Coastal Sand Dunes*. pp. 321–345.

- Saye, S.E.; van der Wal, D.; Pye, K. & Blott, S.J., 2005. Beach–dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology*, 72(1–4), pp.128–155.
- Scott, T.; Masselink, G. & Russell, P., 2011. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, 286(1–4), pp.1–20.
- Shand, R.D. & Bailey, D.G., 1999. A review of net offshore bar migration with photographic illustrations from Wanganui, New Zealand. *Journal Of Coastal Research*, 15(2), pp.365–378.
- Shao, Y. & Raupach, M.R., 1992. The overshoot and equilibration of saltation. *Journal of Geophysical Research*, 97(D18), p.20559.
- Shchepetkin, a F. & McWilliams, J.C., 2003. The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography-following coordinates ocean model. *Ocean Modeling*, 9, pp.347–404.
- Sherman, D.J., 1995. Problems of scale in the modeling and interpretation of coastal dunes. *Marine Geology*, 124, pp.339–349.
- Sherman, D.J. & Bauer, B.O., 1993. Dynamics of beach-dune systems. *Progress in Physical Geography*, 17(4), pp.413–447.
- Sherman, D.J. & Lyons, W.F., 1994. Beach state controls on aeolian sand delivery to coastal dunes. *Physical Geography*, 15, pp.381–395.
- Short, A.D., 1979. Three dimensional beach stage model. *The Journal of Geology*, 87(5), pp.553–571.
- Short, A.D., 1999. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Chichester: Wilen. 379p.
- Short, A.D. & Hesp, P.A., 1982. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. *Marine Geology*, 48(3–4), pp.259–284.
- Short, A.D. & Jackson, D.W.T., 2013. Beach Morphodynamic. In J. F. Shroder, ed. *Treatise on Geomorphology*. San Diego: Academic Press, pp. 106–129.
- Sigren, J.M.; Figlus, J. & Armitage, A.R., 2014. Coastal sand dunes and dune vegetation: Restoration, erosion, and storm protection. *Shore & Beach*, 82(4), p.5.
- Small, C. & Nicholls, R.J., 2003. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 19(3), pp.584–599.
- Spies, P.-J. & McEwan, I.K., 2000. Equilibration of saltation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(4), pp.437–453.
- Stallins, J.A. & Parker, A.J., 2003. The influence of complex systems interactions on barrier Island dune vegetation pattern and process. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(1), pp.13–29.
- Stewart, C.J. & Davidson-Arnott, R.G.D., 1988. Morphology, formation and migration of longshore sandwaves; Long Point, Lake Erie, Canada. *Marine Geology*, 81(1–4), pp.63–77.
- Stockdon, H.F.; Holman, R.A.; Howd, P.A. & Sallenger, A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), pp.573–588.
- Stockdon, H.F.; Sallenger, A.H.; Holman, R.A. & Howd, P.A., 2007. A simple model for

- the spatially-variable coastal response to hurricanes. *Marine Geology*, 238(14), pp.1–20.
- Svasek, J.N. & Terwindt, J.H.J., 1974. Measurements of sand transport by wind on a natural beach. *Sedimentology*, 21(2), pp.311–322.
- Taylor, E.B.; Gibeaut, J.C.; Yoskowitz, D.W. & Starek, M.J., 2015. Assessment and Monetary Valuation of the Storm Protection Function of Beaches and Foredunes on the Texas Coast. *Journal of Coastal Research*, 31(5), pp.1205–1216.
- Thieler, E.R. & Young, R.S., 1991. Quantitative evaluation of coastal geomorphological changes in South Carolina after Hurricane Hugo. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 8, pp.187–200.
- Thom, B.G. & Hall, W., 1991. Behaviour of beach profiles during accretion and erosion dominated periods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(2), pp.113–127.
- Thornton, E.B.; MacMahan, J. & Sallenger, A.H., 2007. Rip currents, mega-cusps, and eroding dunes. *Marine Geology*, 240(1–4), pp.151–167.
- Tomás, A.; Méndez, F.; Medina, R.; Jaime, F.; Higuera, P.; Lara, J.; Ortiz, M.D. & Álvarez de Eulate, M., 2015. A methodology to estimate wave-induced coastal flooding hazard maps in Spain. *Journal of Flood Risk Management*, 9(3), pp.1-17.
- Triax, 2015. *Toma de Muestras y cálculo granulométrico de los sistemas dunares y playas asociadas de Cantabria*. Informe geotécnico. Demarcación de Costas de Cantabria/ Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar/ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Tsoar, H., 1985. Profiles Analysis of Sand Dunes and Their Steady State Signification. *Physical Geography*, 67(1), pp.47–59.
- Tsoar, H., 2001. Types of Aeolian Sand Dunes and Their Formation. In N. J. Balmforth & A. Provenzale, eds. *Geomorphological Fluid Mechanics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 403–429.
- Turner, B.L.I.; Clark, W.C.; Kates, R.W.; Richards, J.F.; Mathews, J.T. & Meyer, W., 1990. The earth as transformed by human action: Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years. *Forest Ecology and Management*, 55, p.684p.
- van Boxel, J.H.; Arens, S.M. & Van Dijk, P.M., 1999. Aeolian processes across transverse dunes. I: Modelling the air flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(3), pp.255–270.
- van de Graaff, J., 1986. Probabilistic design of dunes; an example from the Netherlands. *Coastal Engineering*, 9(5), pp.479–500.
- van de Graaff, J., 1990. How to analyse beach profile measurements? In *Proceedings of Coastal Engineering Conference*. New York: ASCE, pp. 2682–2695.
- van der Burgh, L.M.; Wijnberg, K.M.; Hulscher, S.; Mulder, J.P.M. & van Koningsveld, M., 2007. Linking Coastal Evolution and Super Storm Dune Erosion Forecasts. In *Sixth International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Process*. New Orleans, pp. 1813–1826.
- van der Wal, D., 1998. The Impact of the Grain-size Distribution of Nourishment Sand on Aeolian Sand Transport. *Journal of Coastal Research*, 14(2), pp.620–631.
- van der Wal, D., 2004. Beach-Dune Interactions in Nourishment Areas along the Dutch

- Coast. *Journal of Coastal Research*, 201, pp.317–325.
- van Dijk, P.M.; Arens, S.M. & Van Boxel, J.H., 1999. Aeolian processes across transverse dunes. II: Modelling the sediment transport and profile development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(3), pp.319–333.
- van Gent, M.R.A.; van Thiel de Vries, J.S.M.; Coeveld, E.M.; de Vroeg, J.H. & van de Graaff, J., 2008. Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods. *Coastal Engineering*, 55(12), pp.1041–1051.
- Vellinga, P., 1982. Beach and dune erosion during storm surges. *Coastal Engineering*, 6(4), pp.361–387.
- Vousdoukas, M.I.; Wziatek, D. & Almeida, L.P., 2012. Coastal vulnerability assessment based on video wave run-up observations at a mesotidal, steep-sloped beach. *Ocean Dynamics*, 62(1), pp.123–137.
- Walker, I.J.; Hesp, P.A.; Davidson-Arnott, R.G.D. & Ollerhead, J., 2006. Topographic steering of alongshore airflow over a vegetated foredune: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Journal of Coastal Research*, 22(5), pp.1278–1291.
- Walker, I.J.; Davidson-Arnott, R.G.D.; Hesp, P.A.; Bauer, B.O. & Ollerhead, J., 2009. Mean Flow and Turbulence Responses in Airflow over Foredunes: New Insights from Recent Research. *Journal of Coastal Research*, 1(56), pp.366–370.
- Whalley, W.B., 1990. Physical Properties. In A. S. Goudie, ed. *Geomorphological Techniques*. London: Unwin Hyman, p. 570.
- White, P.S., 1987. Natural disturbance, patch dynamics, and landscape pattern in natural areas. *Natural Areas Journal*, 7, pp.14–22.
- Wijnberg, K.M. & Terwindt, J.H.J., 1995. Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis. *Marine Geology*, 126, pp.301–330.
- Wijnberg, K.M.; Burgh, L.M.B. Der & Hulscher, S.J.M.H., 2011. Coastal management and long-term foredune behavior : characterizing semi-natural foredune evolution. *Journal of Coastal Research*, (SI 64), pp.329–333.
- Wolfe, S.A. & Nickling, W.G., 1993. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Progress in Physical Geography*, 17(1), pp.50–68.
- Wolman, M.G. & Miller, J.P., 1960. Magnitude and Frequency of Forces in Geomorphic Processes. *The Journal of Geology*, 68, pp.54–74.
- Wright, L.; Chappell, J.; Thom, B.; Bradshaw, M. & Cowell, P., 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. *Marine Geology*, 32(1–2), pp.105–140.
- Wright, L.D. & Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56(1–4), pp.93–118.
- Wright, L.D., 1980. Beach cut in relation to surf zone morphodynamics. In *Proceedings to 17th Coastal Engineering Conference*. pp. 978–996.
- Zarnetske, P.L.; Hacker, S.D.; Seabloom, E.W.; Ruggiero, P.; Killian, J.R.; Maddux, T.B. & Cox, D., 2012. Biophysical feedback mediates effects of invasive grasses on coastal dune shape. *Ecology*, 93(6), pp.1439–1450.

- Zarnetske, P.L.; Ruggiero, P.; Seabloom, E.W. & Hacker, S.D., 2015. Coastal foredune evolution: the relative influence of vegetation and sand supply in the US Pacific Northwest. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(20150017), pp.1–13.
- Zarnetske, P.L.; Ruggiero, P.; Seabloom, E.W. & Hacker, S.D., 2015. Coastal foredune evolution: the relative influence of vegetation and sand supply in the US Pacific Northwest. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(20150017), pp.1–13.
- Zhang, K.; Douglas, B. & Leatherman, S., 2002. Do Storms Cause Long-Term Beach Erosion along the U.S. East Barrier Coast? *The Journal of Geology*, 110(4), pp.493–502.