



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Monitorización tridimensional del impacto de distintos
temporales sobre el sistema de dunas en la playa del Ahuir

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Evaluación y Seguimiento Ambiental de
Ecosistemas Marinos y Costeros

AUTOR/A: Navarro Leblond, Manon

Tutor/a: Estornell Cremades, Javier

Cotutor/a: Cabezas Rabadán, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

Los ecosistemas dunares son sistemas altamente dinámicos que juegan un papel clave en la estabilización de la costa, por lo que resulta esencial llevar un registro preciso de los cambios que experimentan y monitorizar su evolución a lo largo del tiempo. En este trabajo se ha analizado la evolución espacio-temporal del sistema dunar de l'Ahuir durante el periodo 2008-2022, evaluando el posible impacto de las tormentas y extracciones de arena sobre los cambios observados. Para ello se compararon diferentes Modelos Digitales de Superficies (MDS), los cuales fueron generados a partir de nubes de puntos 3D procedentes de tecnología LiDAR y técnicas fotogramétricas automatizadas (*Structure from Motion-SfM*) aplicadas sobre imágenes aéreas. Los resultados revelan la existencia de un comportamiento diferencial entre las distintas partes del sistema. Mientras que el área dunar se ha mantenido relativamente estable durante los catorce años de estudio, mostrando una tendencia acumulativa y un avance generalizado de su frente costero, la zona de playa emergida ha presentado un comportamiento mayoritariamente erosivo. Esta tendencia parece invertirse durante el último periodo (2020-2022), aunque las causas todavía están por determinar. Con estos resultados se ha podido verificar el potencial de los datos LiDAR y de las fotografías aéreas como fuentes de información para la generación de MDS de precisión, permitiendo efectuar seguimientos a largo plazo de sistemas dunares de forma eficiente y a un bajo coste.

Palabras clave: dunas costeras, MDS, LiDAR, fotogrametría, respuesta a temporales

Abstract

Dune ecosystems are highly dynamic systems that play a key role in coastal stabilization, so it is essential to keep an accurate record of the changes that take place and monitor their evolution over time. This work explores the spatio-temporal evolution of the dune system of l'Ahuir between 2008 and 2022. Storms impact and sand extractions were also analyzed and compared to the observed morphological changes. For this purpose, different Digital Surface Models (DSM) were generated from 3D point clouds using LiDAR technology and automated photogrammetric techniques (Structure from Motion-SfM) applied on aerial images. The results show differential evolution between the beach and the dune zones. While the dune area has remained relatively stable during the fourteen years of study, showing a cumulative trend and a generalized advance of its coastal front, the emerged beach area has shown an erosive behavior. This negative trend seems to reverse during the last period (2020-2022), although the causes have yet to be determined. With these results it has been possible to verify the potential of LiDAR data and aerial photographs as sources of information for the generation of accurate DSMs, allowing efficient and low-cost monitoring of dune systems in the long-term.

Key words: coastal dunes, DSM, LiDAR, photogrammetry, storm response

Índice

Resumen	1
Abstract.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS	9
3. ZONA DE ESTUDIO	9
3.1. Características generales.....	9
3.2. Estado actual de las dunas de l´Ahuir	11
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
4.1. Datos de partida	14
4.2. Procesado de los datos	17
4.2.1. <i>Generación de los Modelos Digitales de Superficies (MDS)</i>	17
4.2.2. <i>Detección de offsets entre fechas</i>	18
4.3. Identificación de cambios morfológicos	20
4.4. Identificación de los temporales marítimos más significativos	23
4.4.1. <i>Adquisición de datos oceanográficos</i>	23
4.4.2. <i>Selección y caracterización de temporales marítimos</i>	24
4.5. Identificación de intervenciones humanas	25
5. RESULTADOS.....	25
5.1. Evolución histórica del sistema dunar.....	25
5.1.1. <i>Cambios volumétricos y altimétricos</i>	25
5.1.2. <i>Cambios en el perfil dunar</i>	29
5.2. Respuesta del sistema dunar a los temporales marítimos	32
5.2.1. <i>Temporales marítimos identificados entre 2007 y 2022</i>	32
5.2.2. <i>Respuesta del sistema dunar a los temporales</i>	37

5.3.	Respuesta del sistema dunar a las intervenciones humanas	40
6.	DISCUSIÓN	42
6.1.	Evolución morfológica del sistema dunar	42
6.2.	Respuesta del sistema a los temporales marinos más extremos y las intervenciones humanas	45
7.	CONCLUSIONES	50
8.	OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	51
9.	BIBLIOGRAFÍA	53
10.	ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	62
	Figuras.....	62
	Tablas	64

1. INTRODUCCIÓN

Las dunas litorales son ecosistemas frágiles gobernados por un equilibrio dinámico que depende de la interacción de numerosos factores ambientales, constituyendo un medio altamente sensible a las perturbaciones humanas (Hernández et al., 2023; Ley et al., 2007). Estos sistemas son generalmente escasos, ya que se distribuyen solamente en zonas no erosivas de las costas (Ibáñez, 2024). En Europa (**Figura 1**), los complejos dunares más importantes se localizan en las costas atlánticas bajas de carácter sedimentario expuestas a vientos de poniente: Dinamarca, Holanda, Bélgica y Francia, y, en menor medida, Portugal y el SO de España. En las costas mediterráneas y del Mar Negro también se evidencian sistemas dunares continuos, aunque de menor envergadura que los presentes en el Atlántico, debido al menor rango de marea y de aportes sedimentarios (García et al., 2009).

Actualmente, al igual que ocurre con el resto de hábitats costeros, la mayor parte de los ecosistemas dunares se encuentran degradados o han sido destruidos debido a la intervención humana (Ley et al., 2007). En Europa se estima que apenas el 15% de las dunas costeras que teníamos a principios del siglo pasado se encuentran en buen estado de conservación, habiéndose perdido un cuarto de la superficie neta dunar (Rodríguez, 2022). Entre los factores que han conducido a la precaria situación actual de estos ecosistemas se incluyen (Cabezas-Rabadán et al., 2019; Comisión Europea, 2005): i) la alteración del transporte sedimentario debido a la proliferación de infraestructuras costeras (puertos, diques, escolleras ...); ii) la regulación fluvial (especialmente la construcción de presas), la cual ha supuesto una disminución en el aporte de sedimentos que nutren las playas y dunas; iii) la extracción de gravas y arenas para fines constructivos; y iv) la destrucción directa de los cordones litorales derivada de la masiva ocupación urbanística, motivada esta por una falta de protección legal.

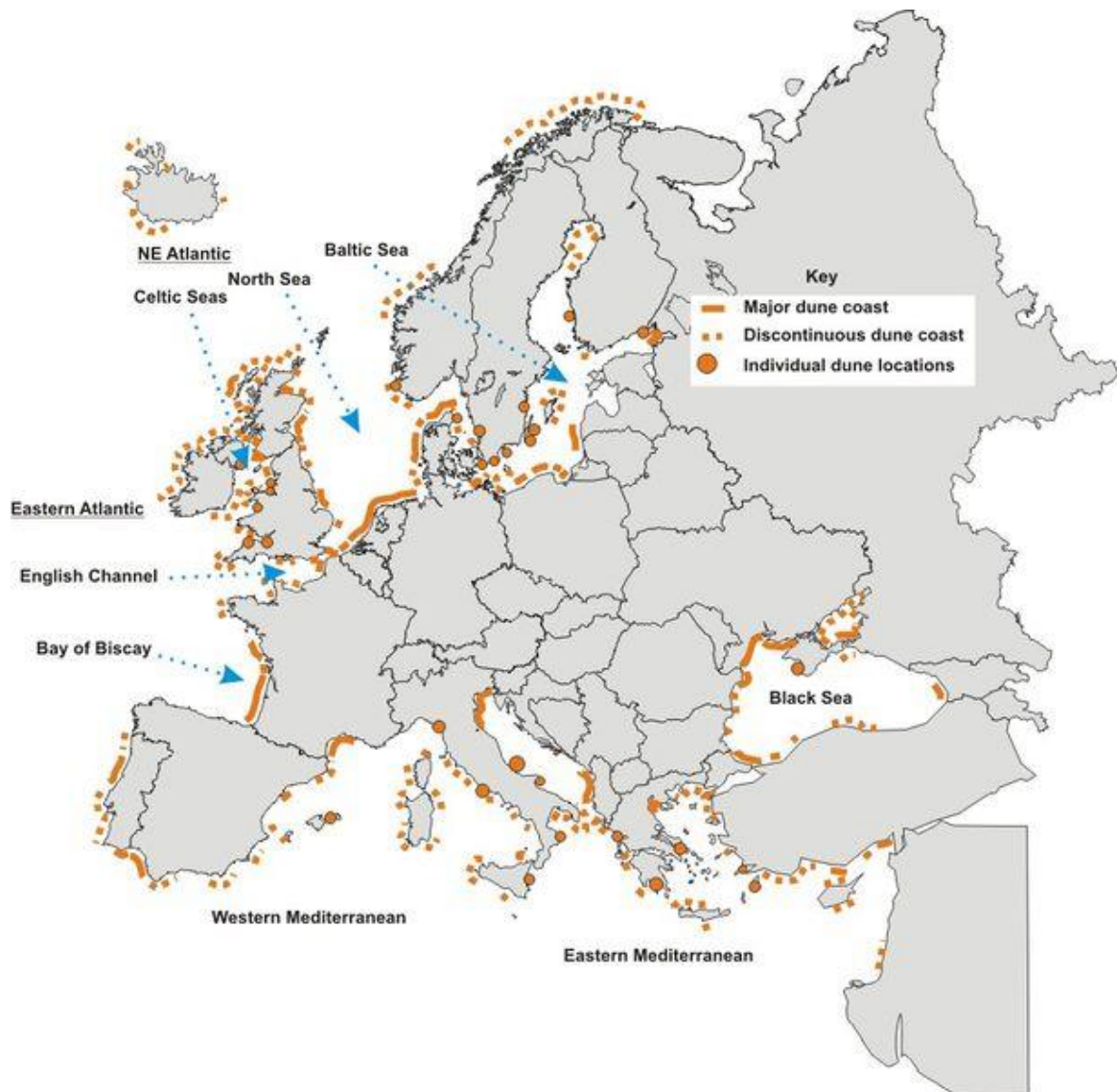


Figura 1. Distribución de las dunas costeras en Europa. Fuente: Doodly (2001)

Bajo un contexto de erosión costera acelerada, la desaparición de los sistemas dunares merece una atención especial. Estas formaciones ofrecen servicios ecosistémicos únicos, por lo que su conservación no se limita al mantenimiento de su atractivo paisajístico o a la característica biodiversidad que albergan. Desde el punto de vista funcional, las dunas aceleran el reciclado de nutrientes (Pagán et al., 2020), contribuyen a la recarga de acuíferos costeros (filtrando el agua de lluvia y actuando de tampón frente a la intrusión salina) (Balaguer y Roig-Munar, 2016) y ejercen de barrera natural frente a fenómenos meteorológicos extremos, jugando un papel crítico en la estabilidad de la costa (García et al., 2009; Ley et al., 2007). Los sistemas dunares probablemente sean la medida más eficiente y económica para paliar los efectos de la erosión costera (Pagán

et al., 2020). Esto es debido a que las dunas, en particular las primarias, conforman junto a las playas un sistema integrado en el que se produce un continuo intercambio sedimentario entre la zona sumergida (controlada por la hidrodinámica marina) y la parte emergida (dominada por la dinámica eólica) (Roig-Munar et al., 2012). Es decir, las dunas actúan como reservorio de arena para las playas y viceversa. Esto se traduce en que, cuando se producen temporales de gran magnitud, el oleaje erosiona la playa y socava la base de las dunas primarias, arrastrando los sedimentos hasta la playa sumergida, donde se depositan formando barras de arena. Estas barras de arena provocan que la rotura de las olas se produzca a mayores profundidades, disipando la energía de las olas. Cuando regresan las condiciones de estabilidad y el oleaje vuelve a ser más débil las olas arrastran nuevamente los sedimentos desde la playa sumergida hacia la playa emergida, donde, una vez secos, pueden volver a ser transportados por el viento hasta la duna primaria, cerrándose así el ciclo (Ribas, 2017).

Ante un escenario de cambio climático, donde se prevé una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos y un aumento en el nivel del mar (Hernández et al., 2023), resulta esencial conocer cómo evolucionan los sistemas playa-duna a eventos tan variables en el espacio y en el tiempo como pueden ser el impacto de las olas, las inundaciones, la erosión o los procesos sedimentarios. Uno de los posibles métodos para estudiar la evolución de los sistemas playa-duna consiste en la monitorización de los cambios morfológicos (Pagán, Bañón et al, 2019). La determinación de las ganancias y pérdidas volumétricas en diferentes partes del sistema, como pueden ser la zona de playa y la duna primaria, proporciona una visión detallada de los cambios que tienen lugar y permite explicar qué está sucediendo dentro del sistema. Esta información constituye, por consiguiente, una herramienta de gran utilidad para los gestores.

El estudio de los sistemas dunares es un proceso que puede resultar complejo, en parte, debido a las dificultades que entraña la adquisición generalizada, continua y sincrónica de datos topográficos de detalle sobre los mismos (Vallejo et al., 2009). El uso de la topografía tradicional para la adquisición precisa de datos topográficos es un método laborioso que requiere de tiempo y personal, incluso empleando tecnologías más modernas como los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) con medición cinemática en tiempo real (RTK) (Pagán, López et al., 2019), lo que limita su aplicación

a escalas de detalle y áreas reducidas. El uso de estas técnicas presenta a su vez limitaciones en las escalas temporales a las que son aplicables, debido al elevado dinamismo de los sistemas dunares. Realizar una correcta caracterización volumétrica requeriría de una elevada frecuencia de muestreo, pudiendo no ser viable si la extensión dunar es demasiado amplia (Ojeda et al., 2007). Además, este tipo de métodos requieren acceder físicamente al área de estudio, por lo que es preferible optar por metodologías que generen la menor alteración posible en el ecosistema, especialmente cuando estos cuentan con figuras de protección.

En los últimos años, los avances en teledetección han impulsado el desarrollo de nuevos métodos y técnicas de adquisición de información topográfica que han revolucionado la calidad de los modelos digitales de elevaciones (MDE), mejorando su resolución espacial, alcance y precisión (Westoby et al., 2012). La tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ha demostrado ser una de las herramientas de teledetección más útiles para la extracción precisa de variables topográficas (Cruz et al., 2010). Sus principales ventajas en el campo de la investigación de dunas litorales residen en su buena cobertura espacial y alta densidad (superando en ocasiones los 500 puntos/m²) (Pinton et al., 2023), su gran exactitud altimétrica, con niveles situados por encima de los 0,25 m (Vallejo et al., 2009) y la posibilidad que ofrece para realizar análisis multitemporales y caracterizar microtopografías (Cruz et al., 2010). Sin embargo, organizar vuelos con esta tecnología es complejo y costoso, por lo que esta fuente de datos depende en la mayoría de los casos de entes gubernamentales, lo que se traduce en coberturas de datos con resoluciones temporales bajas o interrumpidas (Bañón et al., 2019).

A lo largo de la pasada década, el aumento de la disponibilidad de vehículos aéreos no tripulados (VANT, UAV en inglés) de uso civil junto al desarrollo de técnicas fotogramétricas como el *Structure from Motion* (StM), han permitido el uso de la fotogrametría automatizada basada en UAV (Pagán, López et al., 2019). Ésta se presenta como una alternativa más económica al sistema LiDAR, teniendo como ventaja la posibilidad de estudiar áreas concretas de forma rápida, con la frecuencia de muestreo deseada y, todo ello, cumpliendo con los objetivos demandados de calidad fotorrealística (Bañón et al., 2019; Fernández, 2019).

2. OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es doble: por una parte, realizar un análisis espacio-temporal del sistema dunar de l'Ahuir, haciendo uso de la fotogrametría digital automatizada y la tecnología LiDAR como fuentes para la generación de Modelos Digitales de Superficies (MDS) para diferentes fechas: 2008, 2009, 2015, 2018, 2020, 2022; por otra, analizar los cambios observados considerando las condiciones hidroclimáticas de la zona, concretamente los temporales marítimos ocurridos durante dicho periodo de observación, y los movimientos de arena artificiales.

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. Características generales

El ecosistema dunar objeto de estudio se encuentra en la playa de l'Ahuir, una playa semi-natural situada en la mitad sur del Golfo de Valencia, entre la desembocadura del río Vaca, en Xeraco, y la playa norte de Gandía (Figura 2).



Figura 2. Ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat.

La zona de estudio se configura como una costa sedimentaria de origen deltaico aluvial, constituida, principalmente, por materiales cuaternarios. Estos depósitos litorales tienden a formar restingas que encierran en su interior marjales, albuferas y lagunas litorales, ocupados hoy en día, en gran parte, por infraestructuras urbanas (Estrada Port Consulting, 2020). Dada la fuerte reducción de aportes sedimentarios sufridas en el río Júcar en los últimos dos mil años, se presume que la principal fuente natural responsable de la generación de la doble restinga situada al sur de la desembocadura del Júcar y que alimenta el sistema dunar de l'Ahuir es el río Vaca (Sanjaume y Pardo, 2011). La tendencia tradicionalmente acumulativa de este sector costero queda patente en los restos de *foredunes* que encontramos, además de en la playa de l'Ahuir, en el sector Tavernes-Xeraco; así como en la posición de la torre vigía de Tavernes de la Vallidigna, perteneciente al siglo XVII y que actualmente se encuentra unos cientos de metros tierra adentro (Pardo-Pascual et al., 2021; Sanjaume y Pardo, 2011).

En este tramo de costa la marea astronómica no suele superar los 20 cm de altura (Almonacid-Caballer, 2014) y el oleaje se caracteriza por ser suave, con olas que en el 76% de los casos no superan los 1,5 m de altura significativa (Puertos del Estado, 2021). Sin embargo, bajo condiciones meteorológicas adversas el nivel del mar puede experimentar cambios sustancialmente mayores (Almonacid-Caballer, 2014; Cabezas-Rabadán et al., 2017); por ejemplo, el ocurrido durante el temporal Gloria (20 de enero de 2020), en el que la boya oceanográfica del puerto de Valencia registró una altura de ola significativa de 8,67 m (boya 2630 – Red de Boyas de Aguas Profundas de Puertos del Estado) (Pardo-Pascual et al., 2022).

Los oleajes de mayor energía proceden fundamentalmente de la dirección ENE y, en menor medida, de la NE (**Figura 3**) (Puertos del Estado, 2021), lo que, teniendo en cuenta la orientación de este segmento costero, ha favorecido históricamente el transporte sedimentario longitudinal hacia el sur (Pardo-Pascual et al., 2021).

ROSA DE ALTURA SIGNIFICATIVA

LUGAR : Boya de Valencia
CRITERIO DE DIRECCIONES: Procedencia
INTERVALO DE CALMAS : 0 - 0.2

PERIODO : Anual
SERIE ANALIZADA : Sep. 2005 - Feb. 2023
PORCENTAJE DE CALMAS : 2.17 %

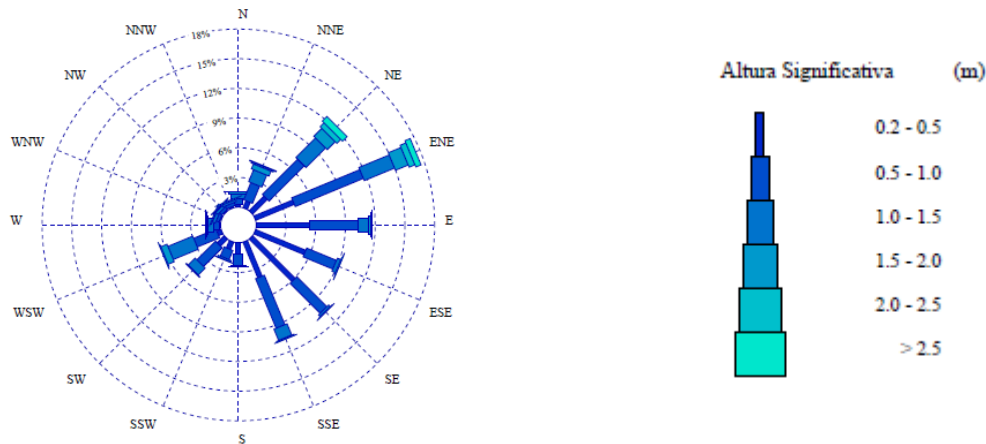


Figura 3. Dirección media anual de procedencia del oleaje en función de su altura significante. Fuente: Puertos del Estado (2021)

3.2. Estado actual de las dunas de l'Ahuir

Este espacio natural constituye uno de los pocos sistemas dunares bien desarrollados que siguen permaneciendo a día de hoy en la provincia de Valencia (Pardo-Pascual et al., 2021). Gracias a su ubicación y grado de protección cuenta con un buen estado de conservación, aunque en 2010 se empezaron a detectar primeras etapas degradativas en algunos tramos de vegetación (Albertos et al., 2010).

Las dunas se extienden a lo largo de una franja costera de 1800 m de longitud y ocupan una anchura que alcanza fácilmente los 60-70 m en la mayoría de los tramos. Este sistema continúa hacia el norte hasta la playa de Tavernes de la Valldigna, aunque su anchura va disminuyendo, encontrando zonas en las que el primer cordón dunar desaparece. La arena que forma la playa de l'Ahuir es fina y dorada, con un tamaño medio de partícula de entre 0,2 y 0,3 mm (Pardo-Pascual et al., 2021). La textura del sedimento es más fina conforme nos alejamos de la orilla, con valores medios de 0,247 mm en la zona de rompiente, 0,244 mm en el estrán y 0,213 mm a pie duna (Cabezas-Rabadán, 2015). El color de la arena en las dunas es similar al de la playa, encontrando tonos algo más oscuros en zonas de acumulación de materia orgánica y crecimiento de la vegetación.

El perfil longitudinal dunar es continuo y regular, sin entrantes o salientes significativos a excepción de los tramos correspondientes a accesos peatonales, donde se aprecia una disminución en la anchura del cordón. En lo que respecta a su perfil transversal, se observa una distribución típica de un sistema dunar costero progradante, donde los cordones dunares se disponen paralelamente a la orilla, desde el más joven o duna embrionaria, situado en la parte alta de la playa seca, hasta los más antiguos, dunas terciarias o estabilizadas (Ley et al., 2007) (**Figura 4**). En el caso concreto de las dunas de l'Ahuir, el perfil transversal se extiende como mucho hasta la duna secundaria, encerrando distintos hábitats de interés comunitario: dunas móviles embrionarias (2110), dunas móviles de litoral con *Ammophila arenaria* (dunas blancas) (2120), dunas fijas de litoral del *Crucianellion maritimae* (2210), dunas con céspedes del *Malcomietalia* (2230) y dunas con vegetación esclerófila de *Cisto-Lavanduletalia* (2260) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.). Esta riqueza ecológica y ecosistémica motivó en 2001 su inclusión en la Red Natura 2000 como Lugar de Interés Comunitario (LIC), declarada hoy en día ya como Zona de Especial Conservación (ZEC) (ES5233038 "Dunes de la Safor").

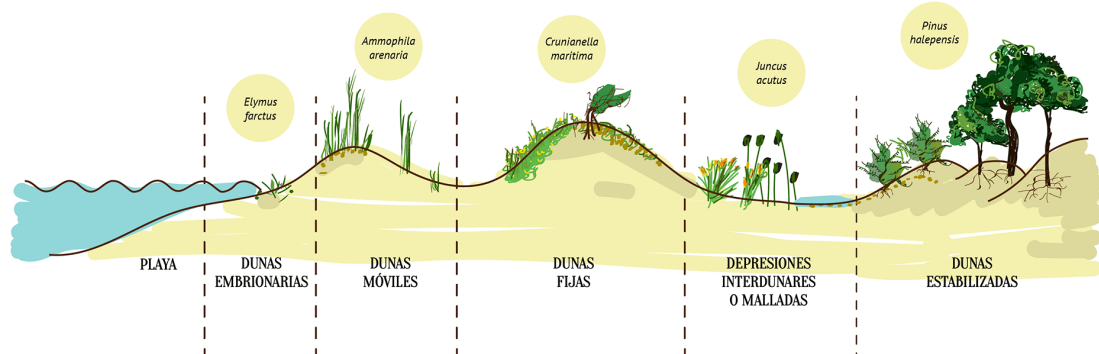


Figura 4. Corte transversal típico de un sistema dunar costero progradante. Fuente: Diputació de Valencia (2021)

La playa de l'Ahuir, a diferencia de sus playas vecinas, se enmarca en un paisaje agrícola exento de edificaciones e infraestructuras costeras, lo que ha permitido mantener cierta conectividad ecológica con la Marjal de la Safor (**Figura 5**), un enclave natural de gran valor incluido tanto en la Red Natura 2000 como en el catálogo de Zonas Húmedas de la Comunidad Valenciana (**Tabla 1**).

Tabla 1. Figuras de protección en el sistema playa-duna de l’Ahuir y la Marjal de la Safor. Fuente: Visor cartográfico GVA (<https://visor.gva.es/visor/>).

Espacio protegido	Protección Red Natura 2000	Protección autonómica
Cordón dunar de la playa de l’Ahuir	ZEC ¹ ES5233038 “Dunes de la Safor”	No cuenta con protección específica pero el sector norte del cordón dunar se encuentra dentro de la zona de influencia de las Zonas Húmedas “Marjal de la Safor” y “Desembocadura del Riu Xeraco”.
Marjal de la Safor	ZEC ¹ ES5233030 “Marjal de la Safor”	Zona Húmeda “Marjal de la Safor”
	ZEPA ² ES0000451 “Montdúver-Marjal de la Safor”	Zona Húmeda “Desembocadura del Riu Xeraco”

¹Zona de Especial Conservación; ²Zona de Especial Protección para las Aves

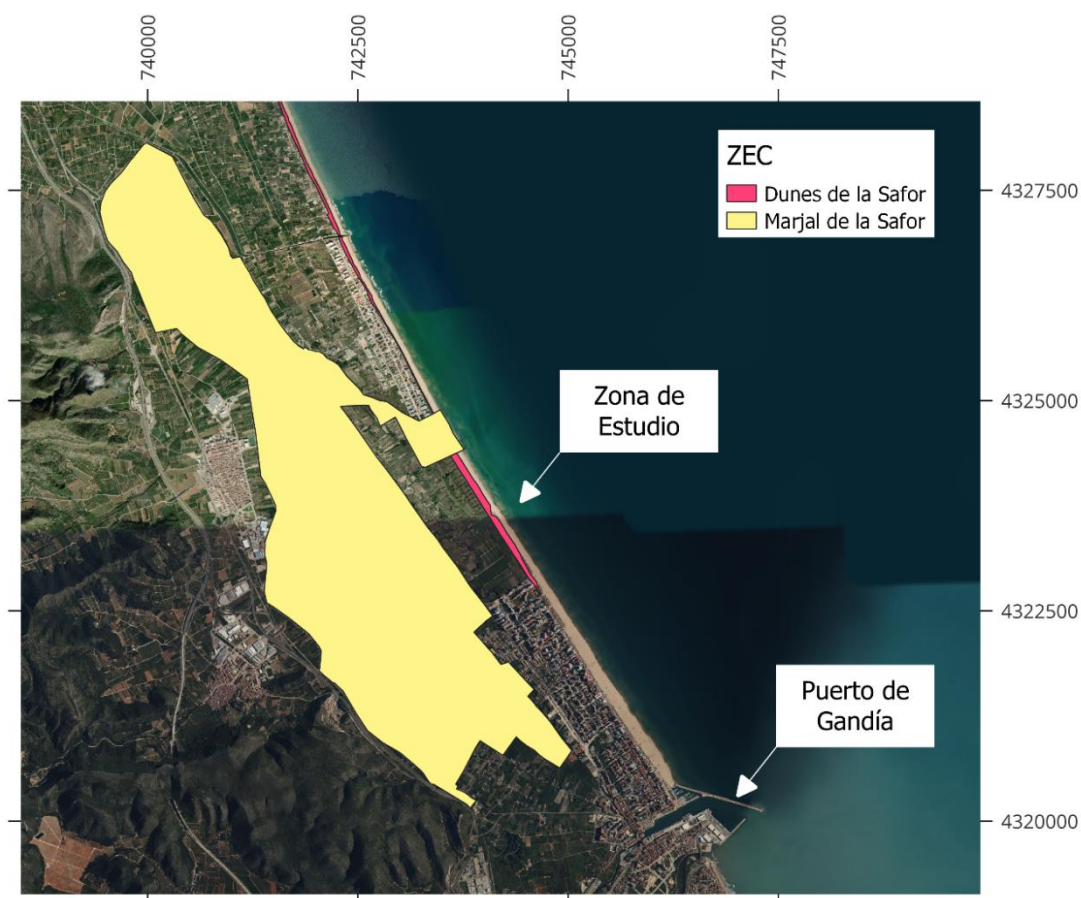


Figura 5. Conectividad de la zona de estudio con la Marjal de la Safor. Fuente: Elaboración propia.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó a partir del análisis de un conjunto de puntos 3D obtenidos mediante tecnología LiDAR aerotransportada y utilizando un conjunto de imágenes aéreas con solape a las que se les aplicó un proceso fotogramétrico basado en la técnica *Structure from Motion* (SfM). Las nubes de puntos, tras ser correctamente procesadas, permitirán generar modelos digitales de superficies (MDS) que recogerán la información espacial necesaria para identificar los cambios experimentados por el sistema playa-duna entre 2008 y 2022. Además, se analizarán las intervenciones humanas y las tormentas sucedidas en dicha franja de tiempo con objeto de determinar su potencial influencia en la magnitud de los cambios morfológicos en el área de estudio.

4.1. Datos de partida

Actualmente, la adquisición de datos 3D con fines geomorfológicos se realiza principalmente a través de dos técnicas de teledetección: la tecnología LiDAR aerotransportada y la fotogrametría digital (Riquelme et al., 2017).

El LiDAR aerotransportado es un sistema activo de detección remota basada en un sensor láser integrado en una plataforma aérea (p.e. un avión, dron o helicóptero) (Navarro, 2019). En estos sistemas, el sensor láser emite haces de luz pulsada que inciden sobre la superficie sobrevolada, rebotan y se reflejan sobre el sensor, el cual registra el tiempo de ida y vuelta de cada pulso láser (Navarro, 2019; Salinas et al., 2014) (**Figura 6a**). El sistema LiDAR cuenta, adicionalmente, con un sistema de posicionamiento y de navegación que permiten, mediante un software especializado, asignar coordenadas x,y,z de alta precisión a cada retorno de luz registrado por el sensor láser. El conjunto de estos retornos conforma lo que se conoce como una nube de puntos LiDAR y contienen la elevación tanto del terreno como de los obstáculos interceptados (vegetación, edificios, ...) (Salinas et al., 2014).

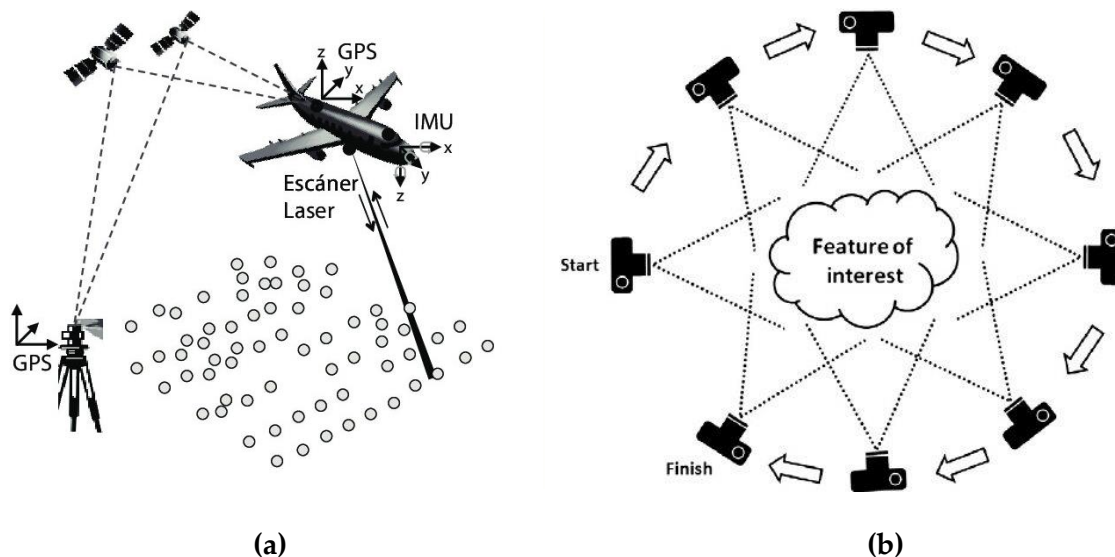


Figura 6. (a) Componentes de un sistema LiDAR topográfico aerotransportado (Salinas et al., 2014); **(b)** Structure From Motion (SfM). En lugar de un par homólogo de fotografías, la técnica SfM requiere de varias imágenes solapadas como dato de entrada para los algoritmos de extracción de características y reconstrucción 3D (Westoby et al., 2012).

La segunda técnica, la fotogrametría digital, es una herramienta que nace en los años 80 al desarrollarse los primeros algoritmos de correlación automática (Navarro, 2019). Esta tecnología opera bajo los mismos principios que la fotogrametría clásica basada en pares estereoscópicos, es decir, en la reconstrucción de modelos 3D a partir de la superposición de dos o más fotografías de un mismo elemento tomadas desde distintos ángulos (Westoby et al., 2012).

Gracias a los avances computacionales y a la mejora de algoritmos de visión por computador y de los métodos fotogramétricos, como podría ser el *Structure from Motion* (SfM), este proceso se ha automatizado de tal manera que es posible generar modelos 3D a partir de imágenes realizadas con cualquier cámara fotográfica (p.e. ortofotos o fotografías aéreas obtenidas mediante drones) (Navarro, 2019). A diferencia de la fotogrametría tradicional, ya no se requiere establecer una red de puntos control de coordenadas 3D conocidas para determinar una primera aproximación a la geometría de la escena y la posición y orientación de la cámara (Tomás et al., 2020). Estos algoritmos procesan e identifican automáticamente puntos homólogos entre multitud de imágenes solapadas, que serán utilizados posteriormente para calcular en bloque la posición y orientación de las cámaras y

generar así una nube densa de puntos 3D (**Figura 6b**) (Navarro, 2019; Westoby et al., 2012).

Para este estudio, se ha partido de un conjunto de siete ficheros de datos 3D (**Tabla 2**), tres de ellos obtenidos mediante tecnología LiDAR aerotransportada (2008, 2009 y 2015) y el resto mediante técnicas de fotogrametría automatizada (SfM) aplicadas sobre ortofotos procedentes del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV) (2018, 2019, 2020 y 2022).

Las nubes de puntos correspondientes a los años 2009 y 2015, pertenecientes al Plan Nacional de Ortofotografía aérea (PNOA), se adquirieron a través del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN); mientras que el resto de los ficheros fueron directamente proporcionados por el Grupo CGAT del Departamento de Cartografía, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia (CGAT-UPV), ya procesados y exportados a formato ráster (MDS).

Tabla 2. Características de los datos de partida. Fuente: Elaboración propia.

Año	Fecha vuelo	Obtención nubes puntos 3D	Fuente	Densidad puntos (pt/m²)
2008	22/02/2008	LiDAR	UPV	1,02
2009	1/11/2009	LiDAR	PNOA-IGN	0,5
2015	28-29/10/2015	LiDAR	PNOA-IGN	0,5
2018	13/06/2018-24/08/2018	Fotogrametría automatizada aplicada sobre ortofotos ICV	CGAT-UPV	-
2019	14/05/2019-30/06/2019	Fotogrametría automatizada aplicada sobre ortofotos ICV	CGAT-UPV	-
2020	02/05/2020	Fotogrametría automatizada aplicada sobre ortofotos ICV	CGAT-UPV	-
2022	08/05/2022-11/06/2022	Fotogrametría automatizada aplicada sobre ortofotos ICV	CGAT-UPV	-

4.2. Procesado de los datos

4.2.1. Generación de los Modelos Digitales de Superficies (MDS)

Las nubes de puntos correspondientes a los años 2009 y 2015 fueron sometidos a un proceso previo de filtrado con objeto de descartar aquellos puntos atípicos (*outliers*) que introdujesen ruido en el conjunto de datos y pudiesen interferir en el posterior proceso de identificación de cambios en el sistema dunar. Estos puntos constituyen uno de los errores más frecuentes entre los datos LIDAR y se caracterizan por presentar una elevación desmesuradamente grande o pequeña respecto a sus puntos vecinos (Matkan et al., 2014). Véase, por ejemplo, la nube de puntos 3D ilustrada en la **Figura 7**, donde se distinguen fácilmente cuatro *outliers*: dos de ellos situados muy por encima del suelo, los cuales podrían atribuirse a la presencia de aves u otros elementos suspendidos en el aire; y otros dos localizados por debajo de la nube de puntos, lo que podría deberse a una dispersión de los fotones durante los pulsos de luz.



Figura 7. Ejemplo de *outliers* en datos LiDAR. La imagen corresponde a una visión de perfil de los datos LiDAR del año 2015 en el tramo norte del área de estudio. La visualización de los datos se realizó a través del programa Cloud Compare (<https://www.cloudcompare.org/>). Fuente: Elaboración propia.

Una vez eliminados los *outliers* de los datos LiDAR se generaron los correspondientes MDS, asignándoles una resolución espacial de 1 m y referenciándolos al sistema europeo ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*). Dada la escasa vegetación presente en la zona de trabajo se decidió trabajar con Modelos Digitales de Superficies en vez de Modelos Digitales de Elevación para no perder información relevante en el primer cordón dunar. Tanto los MDS como los MDE contienen un valor de elevación en cada uno de los píxeles que forman la imagen. La diferencia entre ellos reside en el objeto al que hace referencia dicho valor de elevación. Mientras que en un MDS se representa la cota de cada uno de los elementos del terreno (suelo, vegetación, edificios, ...), en un MDE sólo se plasma la elevación del suelo, eliminando el resto de los elementos.

Ambos procesos se llevaron a cabo a través del software libre FUSION (<http://forsys.sefs.uw.edu/fusion/>).

4.2.2. *Detección de offsets entre fechas*

Para estimar la precisión de los MDS generados (2009 y 2015) y los cedidos por el grupo CGAT-UPV (2008, 2018, 2019, 2020, 2022), se tomó como referencia una serie de puntos sobre el terreno que permanecieran invariantes a lo largo del tiempo, como terrenos asfaltados, caminos o superficies planas (**Figura 8**).



Figura 8. Puntos de referencia empleados en la calibración de los MDS. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat

La cota de estos puntos control, definida mediante un equipo GNSS Leica GS18 en estudios de campo previos, fue comparada con la cota correspondiente de cada MDS, de tal manera que:

$$Desviación_z = Cota_{MDS} - Cota_{GNSS}$$

La desviación media resultante de cada año dio lugar a valores comprendidos entre los -2,3 cm y 20,7 cm (**Tabla 3**). Aunque la mayor desviación media se produjo con el MDS del año 2020, se consideró que esta era lo suficientemente pequeña como para que el MDS pudiera emplearse en el posterior análisis geoespacial. En consecuencia, se procedió a corregir los distintos MDS restando a cada modelo su desviación media respecto a la altura GPS.

Tabla 3. Desviación media de la cota de cada MDS respecto a la cota de los puntos invariantes medidos mediante DGNSS diferencial (m). Fuente: Elaboración propia.

Puntos control	2008	2009	2015	2018	2019	2020	2022
1	0,203	-0,073	-0,035	0,066	0,153	0,230	0,126
2	-0,050	0,104	0,014	-0,051	-0,136	0,127	-0,261
3	0,005	0,163	0,048	-0,060	-0,146	0,194	0,011
4	0,065	0,084	-0,036	0,058	0,027	0,322	0,205
5	-0,236	-0,252	1,033	0,090	0,138	0,191	0,110
6	-0,029	0,073	-0,060	-0,093	-0,140	0,228	0,010
7	-0,004	0,133	0,050	-0,034	-0,019	0,229	-0,032
8	0,052	0,114	-0,402	-0,215	-0,268	0,086	-0,202
9	-0,015	-0,115	-0,108	-0,045	-0,046	0,165	0,128
10	0,016	-0,095	0,032	0,023	0,020	0,244	0,184
11	-0,094	-0,208	-0,105	-0,147	-0,143	0,088	0,041
12	0,081	-0,033	0,025	0,048	0,068	0,291	0,208
13	-0,013	0,056	0,091	-0,074	0,051	0,146	0,112
14	0,048	-0,143	0,074	0,063	0,084	0,293	0,294
15	0,059	0,870	0,048	0,031	0,026	0,269	0,307
Desviación media z (m)	0,006	0,045	0,045	-0,023	-0,022	0,207	0,083

Los MDS resultantes de esta operación se ilustran en la **Figura 9**, donde se puede apreciar con nitidez el primer cordón dunar (en tonos marrón y verdes).

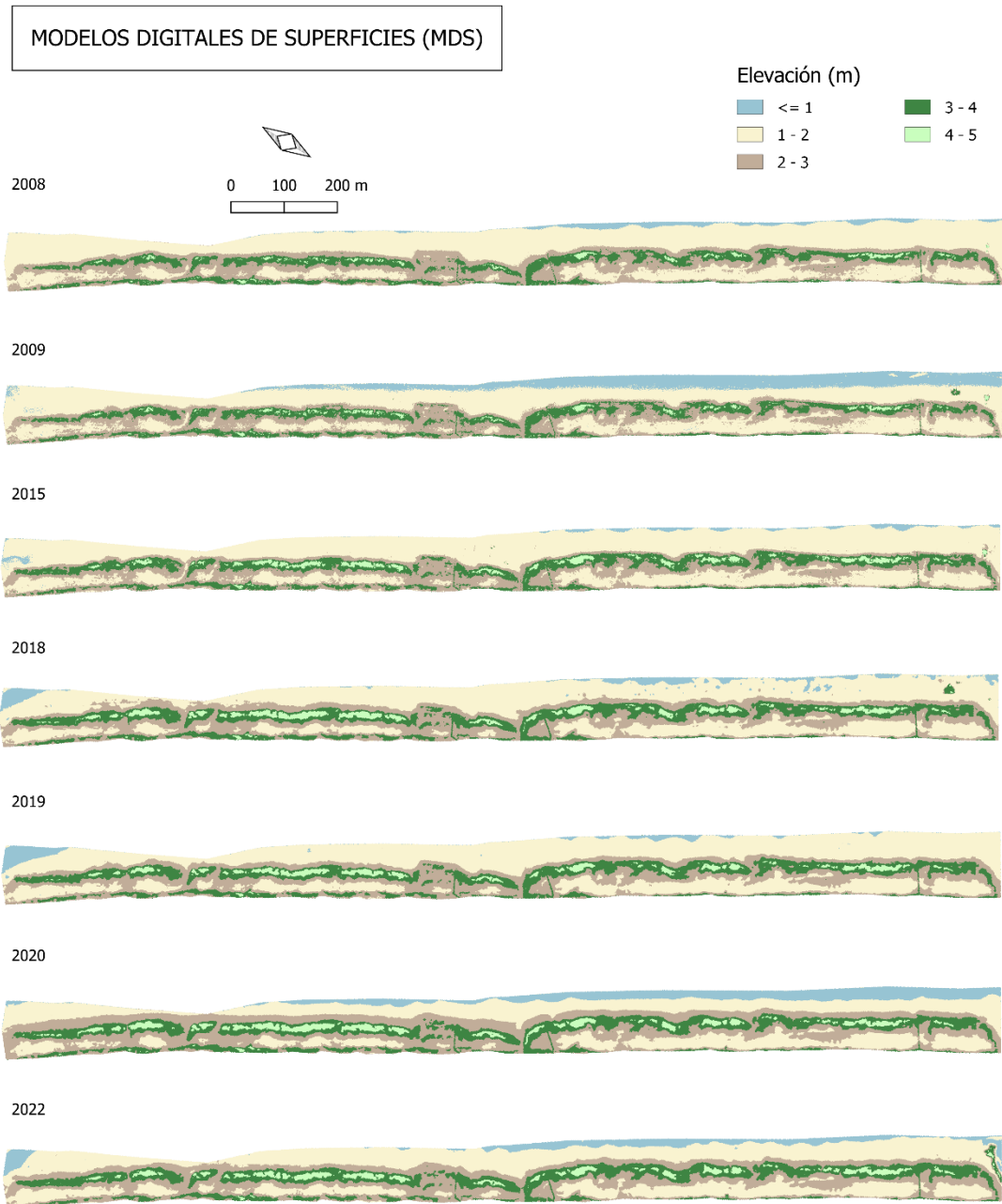
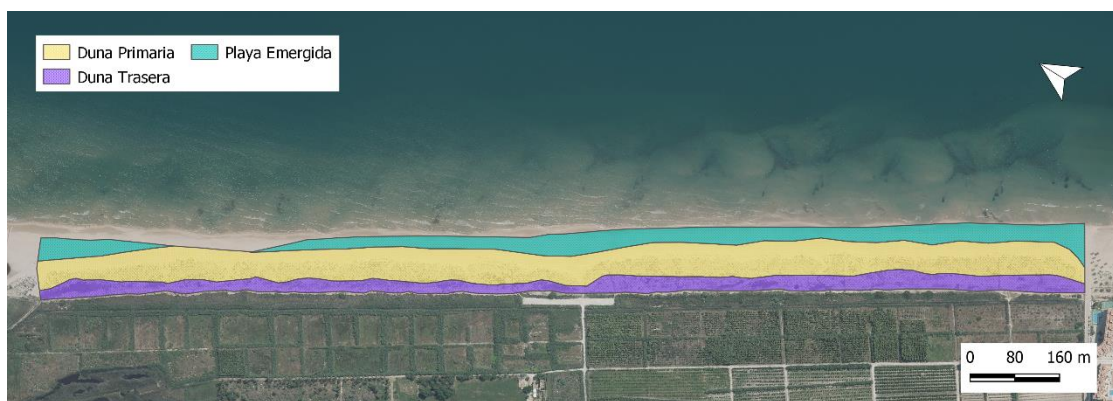


Figura 9. Modelos Digitales de Superficies corregidos. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Identificación de cambios morfológicos

La siguiente etapa consistió en estudiar la evolución histórica del sistema playa-duna. Para ello, se hizo necesario incorporar los MDS en un entorno GIS (Sistema de Información Geográfica), donde se llevarían a cabo los diferentes análisis geoespaciales. En este trabajo, se empleó la versión 3.28.4 del software libre Quantum GIS (<https://www.qgis.org>).

Existe una gran variedad de enfoques metodológicos para la cuantificación de cambios morfológicos, dependiendo de las características de los datos y la naturaleza y dinámica del fenómeno estudiado (Gómez-Gutiérrez et al., 2021). Uno de los métodos más tradicionales, y que se empleará en este caso, es el conocido como DoD (del inglés *DEMs of Differences*). Se trata de un enfoque muy simple basado en la sustracción de MDE (Gómez-Gutiérrez et al., 2021), que permite identificar y cuantificar cambios entre distintas fechas. La aplicación de este método se efectuó en dos fases. La primera de ellas consistió en calcular la diferencia de altitud entre los MDS de cada fecha con el fin de obtener una representación espacial de las áreas de pérdida y acumulación de arena en toda la superficie objeto de estudio. La segunda, referida a la estimación del balance sedimentario global del sistema, se llevó a cabo mediante la resta de los volúmenes de arena de un MDS y el MDS adquirido en la fecha anterior, diferenciando entre la zona de playa emergida, la primera alineación dunar y las dunas traseras (en su mayoría, restos de un cordón dunar secundario) (**Figura 10.a**). Resulta necesario mencionar que, debido a la falta de cobertura de datos topográficos en el MDS del año 2008, el tramo norte de la playa emergida no ha podido representarse en su totalidad (**Figura 10.b**), por lo que los balances sedimentarios realizados en este sector tendrán valores aproximados.



(a)



(b)

Figura 10. (a) Zonificación del área de estudio; (b) Falta de cobertura de datos en la zona de playa emergida en el MDS 2008. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat

Adicionalmente, con el propósito de analizar el avance o retroceso del frente dunar a lo largo del tiempo, se definieron treinta y tres transectos topográficos sobre el área de estudio (**Figura 11**), separados por una distancia aproximada de 50 m, y se tomaron los datos de altura y posición dentro de cada transecto tanto de la base como del pico de la duna primaria en los diferentes años. La base de la duna se identificó como el punto en el que se produjo un cambio abrupto en la pendiente, mientras que la cresta se asoció al valor máximo de elevación más próximo a la línea de costa (Fabbri et al., 2021).

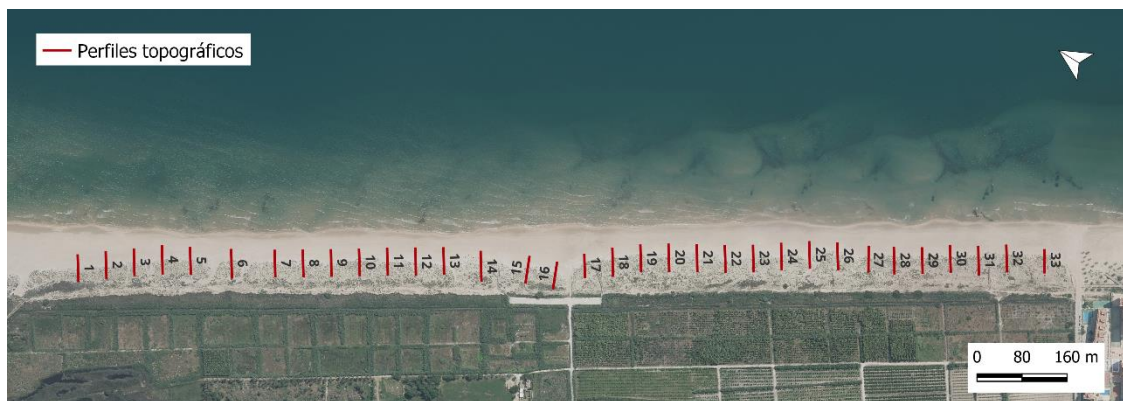


Figura 11. Transectos topográficos definidos en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat

4.4. Identificación de los temporales marítimos más significativos

4.4.1. Adquisición de datos oceanográficos

El primer paso para seleccionar los temporales más extremos es la preparación de una serie de datos de observaciones de las variables de oleaje. Para ello, se empleó como fuente principal los datos de oleaje correspondientes al punto SIMAR 2082109 (0,167 W, 39,083 N) para el periodo 2007-2022, los cuales se encuentran disponibles para su descarga en el Banco de Datos Oceanográficos de Puertos del Estado (www.puertos.es). Los datos oceanográficos correspondientes al año 2007 se analizaron con el fin de identificar temporales previos al periodo de estudio (2008-2022) y, en particular, que pudiesen estar vinculados a los cambios morfológicos observados entre 2008 y 2009. Los datos de oleaje empleados proceden de modelos numéricos, concretamente, de la concatenación de los conjuntos de datos simulados SIMAR-44 y WANA, por lo que no representan medidas directas de la naturaleza (Puertos del Estado, s.f.-a). No obstante, permiten tener una serie temporal continua de información y seleccionar un punto que, por proximidad, sea más representativo del área de estudio.

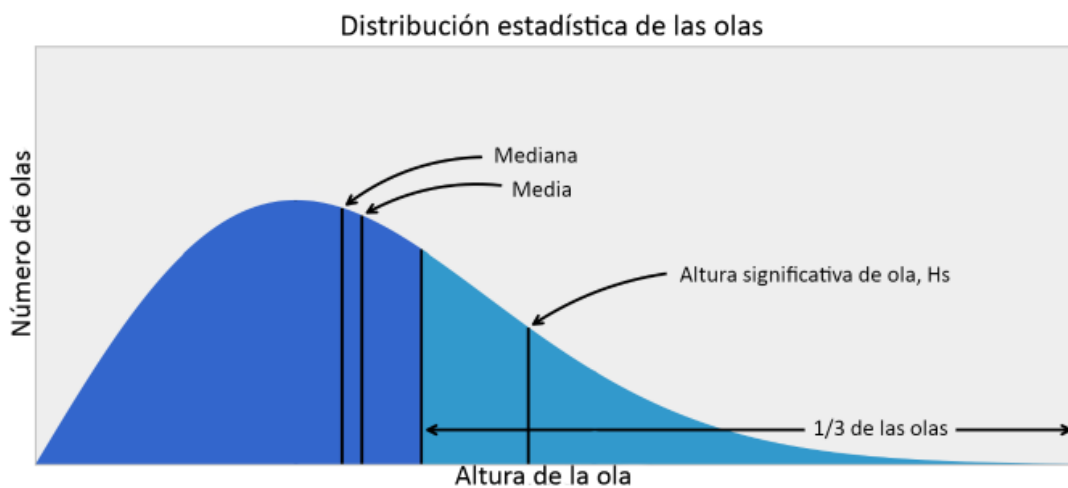


Figura 12. Distribución de la altura de las olas. Fuente: Wikipedia.

Los parámetros del oleaje aportados por el modelo SIMAR incluyen la altura de ola significativa (H_s , metros), el periodo de pico (T_p , segundos), la dirección del oleaje y viento (grados) y su velocidad (metros/segundos). En este trabajo, sólo se ha empleado la altura de ola significativa, definida como la media aritmética del tercio

con mayor altura de las olas registradas durante un tiempo determinado (Departament d'Acció Climàtica Alimentació i Agenda Rural, 2021) (Figura 12).

4.4.2. Selección y caracterización de temporales marítimos

El reconocimiento de episodios de temporal marino durante el periodo de estudio se realizó siguiendo una metodología cuantitativa basada en la altura de ola significativa. Concretamente, se empleó el método de excedencias sobre un umbral (*Peak Over Threshold, POT*), donde el suceso extremo viene definido por aquellos valores que superan un valor umbral de altura de ola significativa prefijado (Izaguirre, 2010). Tal y como se observa en la Figura 13, una vez alcanzado este umbral, la intensidad del suceso aumenta hasta llegar a un máximo, tras el cual comienza a perder energía y vuelve a situarse por debajo del umbral (Martín, 2015).

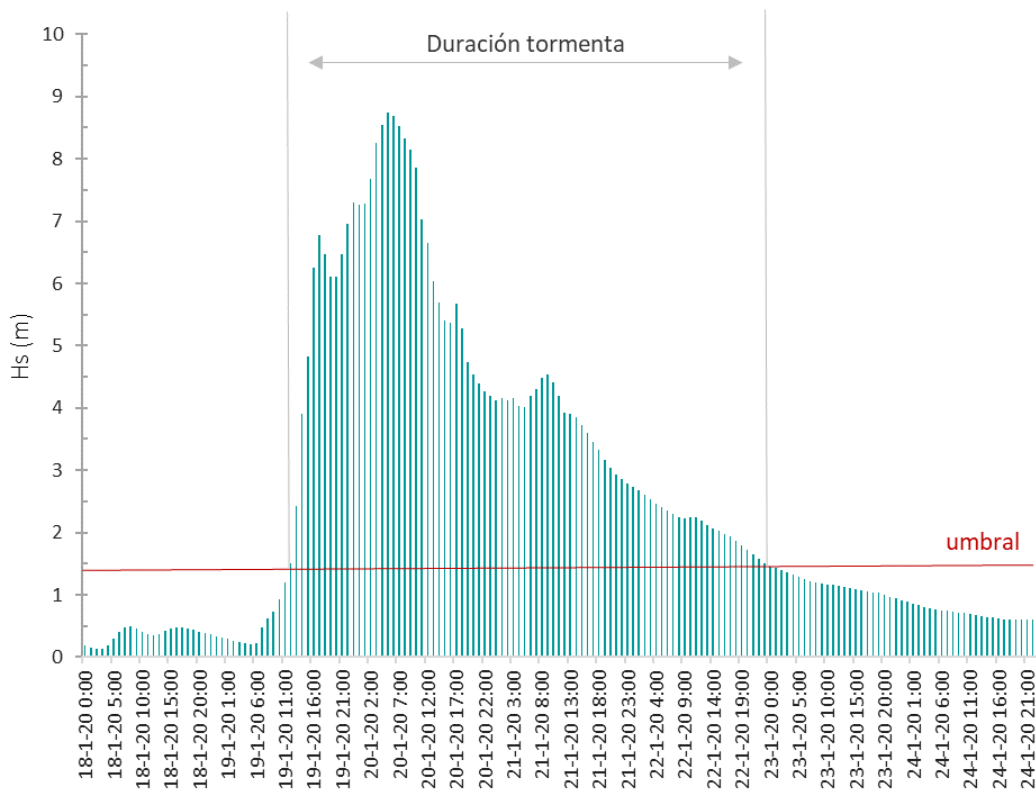


Figura 13. Definición de tormenta utilizando como ejemplo el umbral de $H_s=1,42$ m obtenido en este estudio. Fuente: Elaboración propia.

El umbral de excedencia se fijó considerando una probabilidad de ocurrencia del 5%, siguiendo el criterio aceptado en la literatura (Angnuureng et al., 2017; Cabezas-Rabadán et al., 2019), lo que permitió identificar episodios de temporal con una altura significativa de ola igual o superior a 1,42 m. Adicionalmente, se determinó,

siguiendo el criterio de Angnuureng et al. (2017), que la duración mínima de cada suceso fuese mayor a un ciclo de marea (en nuestro caso, 12h) y que el tiempo mínimo entre la aparición de dos temporales fuese de cinco días para garantizar la independencia de los eventos identificados (Puertos del Estado, s.f.-b).

Con objeto de comparar la magnitud de los eventos seleccionados y su potencial erosivo sobre la costa, se empleó el índice propuesto por Dolan y Davis (1994) (Ecuación 1), el cual proporciona información sobre la intensidad relativa de las tormentas a partir de la máxima altura de ola significativa y la duración de la tormenta:

$$I = H_{S_{max}}^2 \cdot D \quad (\text{Ec.1})$$

donde I es la intensidad relativa de la tormenta medida en m^2h , D la duración de la tormenta en horas y $H_{S_{max}}$ la máxima altura de ola significativa en metros. La duración se obtuvo mediante la suma de horas en las que la altura significativa del oleaje estuvo por encima del umbral de referencia, y se seleccionó como $H_{S_{max}}$ el valor máximo de la altura significativa de cada temporal.

4.5. Identificación de intervenciones humanas

En lo que respecta a las intervenciones humanas, se hizo uso de un conjunto de datos extraídos en estudios previos, los cuales fueron recopilados por el grupo CGAT-UPV a partir de las informaciones aportadas por la Dirección General de Costas de Valencia. De dicho documento se seleccionaron las actuaciones realizadas en la playa de l'Ahuir durante el periodo 2008-2022.

5. RESULTADOS

5.1. Evolución histórica del sistema dunar

5.1.1. Cambios volumétricos y altimétricos

El primer bloque de resultados se inicia con la detección de cambios volumétricos y altimétricos en el sistema a partir de la aplicación de operaciones algebraicas sobre los MDS generados. El resultado de estas operaciones se presenta en las **Figuras 14 y 15**, donde se ilustran, respectivamente, los balances sedimentarios globales para

cada área diferenciada (playa emergida, primer cordón dunar y dunas traseras) y la distribución espacial de los cambios altimétricos para cada periodo. En este último caso, los tonos cálidos se han asignado a aquellas celdas en las que se ha visto favorecida la pérdida de arena, mientras que los tonos fríos corresponden a celdas en las que el proceso predominante ha sido el de acumulación. Los tonos grises serían representativos de celdas en los que no ha habido cambios significativos entre fechas (diferencias altimétricas absolutas inferiores a 0,5 m).

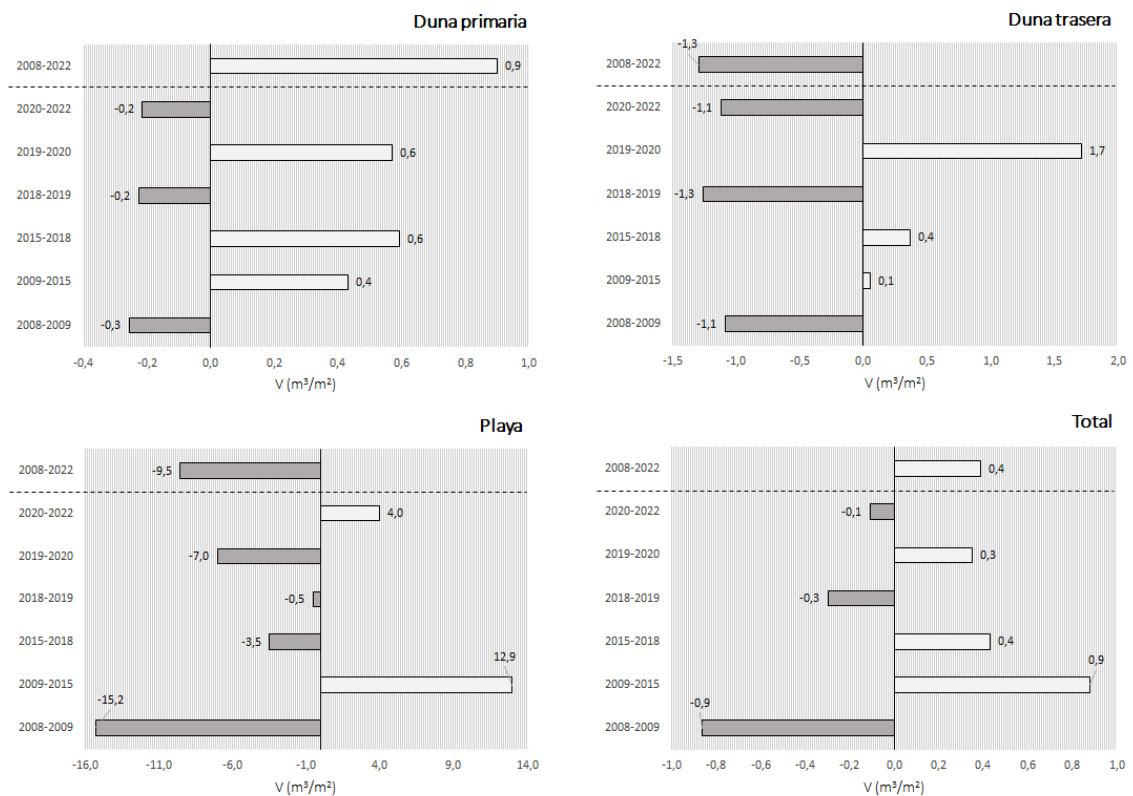


Figura 14. Balance sedimentario global en el área de estudio, diferenciando entre el primer cordón dunar, dunas traseras y playa emergida. Los valores negativos y positivos se atribuyen, respectivamente, a fases de pérdidas y ganancias volumétricas. Fuente: Elaboración propia.

Si analizamos el sistema de forma global, es decir, para todo el periodo de estudio (2008-2022), se observa un balance positivo neto de 0,4 m³/m², lo que refleja una tendencia acumulativa propia de este tramo de costa. Los cambios más significativos se producen tanto en la primera alineación dunar, con ganancias de más de 1 metro de altura a lo largo de toda su extensión, como en el ambiente de playa, donde se registran pérdidas de entre 0,5 y 1 m de altura. También se han

detectado pérdidas significativas ($>1\text{m}$) en una pequeña zona situada en el extremo norte del área de estudio, en las inmediaciones de la desembocadura del río Vaca.

Si, por el contrario, nos centramos en cada periodo, es posible detectar tres etapas erosivas. La primera de ellas corresponde al periodo 2008-2009 y destaca por ser la fase más erosiva de la serie, con una pérdida neta de $0,9\text{ m}^3/\text{m}^2$. El área más afectada corresponde al ambiente de playa, con pérdidas generalizadas de más de medio metro de altura, seguido del primer cordón dunar ($0,3\text{ m}^3/\text{m}^2$) y las dunas traseras ($1,1\text{ m}^3/\text{m}^2$). En las siguientes etapas, referidas a los años 2018-2019 y 2020-2022, el volumen neto perdido se reduce a $0,3$ y $0,1\text{ m}^3/\text{m}^2$, respectivamente, siendo de nuevo la playa emergida el área que experimenta la mayor variación entre periodos y, por lo tanto, la que ejerce como zona de amortiguación. El primer cordón dunar y las dunas traseras permanecen más estables y los cambios volumétricos no difieren significativamente entre estas etapas (pérdidas de $0,2\text{ m}^3/\text{m}^2$ en el caso del primer cordón dunar y de $1,1-1,3\text{ m}^3/\text{m}^2$ para las dunas traseras). Si bien no se producen pérdidas significativas de altura durante las etapas 2018-2019 y 2020-2022; sí se aprecia una progresiva disminución de la erosión desde la zona norte, próxima a la desembocadura del río Vaca, hacia la zona sur, colindante con la playa norte de Gandía.

Los tres periodos restantes conforman, pues, las etapas acumulativas de la serie temporal. Los cambios volumétricos más significativos se producen durante la primera etapa (2009-2015), donde se ha podido observar una recuperación total del volumen perdido en los años anteriores ($0,9\text{ m}^3/\text{m}^2$). Estas ganancias se distribuyen a lo largo de todo el frente costero, entre la playa emergida y el primer cordón dunar, registrándose variaciones de más de medio metro de altura. En los siguientes periodos de acumulación, la magnitud de los cambios se reduce a $0,4\text{ m}^3/\text{m}^2$ en 2015-2018 y $0,3\text{ m}^3/\text{m}^2$ en 2019-2020 debido a la erosión producida en la zona de playa (especialmente notoria durante 2019-2020). Los sedimentos depositados durante estas etapas se concentran en el primer cordón dunar y, en menor medida, en las dunas traseras. Asimismo, del mismo modo que ocurría con algunas etapas erosivas, se ha detectado una acumulación diferencial entre la zona norte y la zona

sur del área de estudio, siendo mayores las ganancias en el tramo más próximo a la desembocadura del río Vaca.

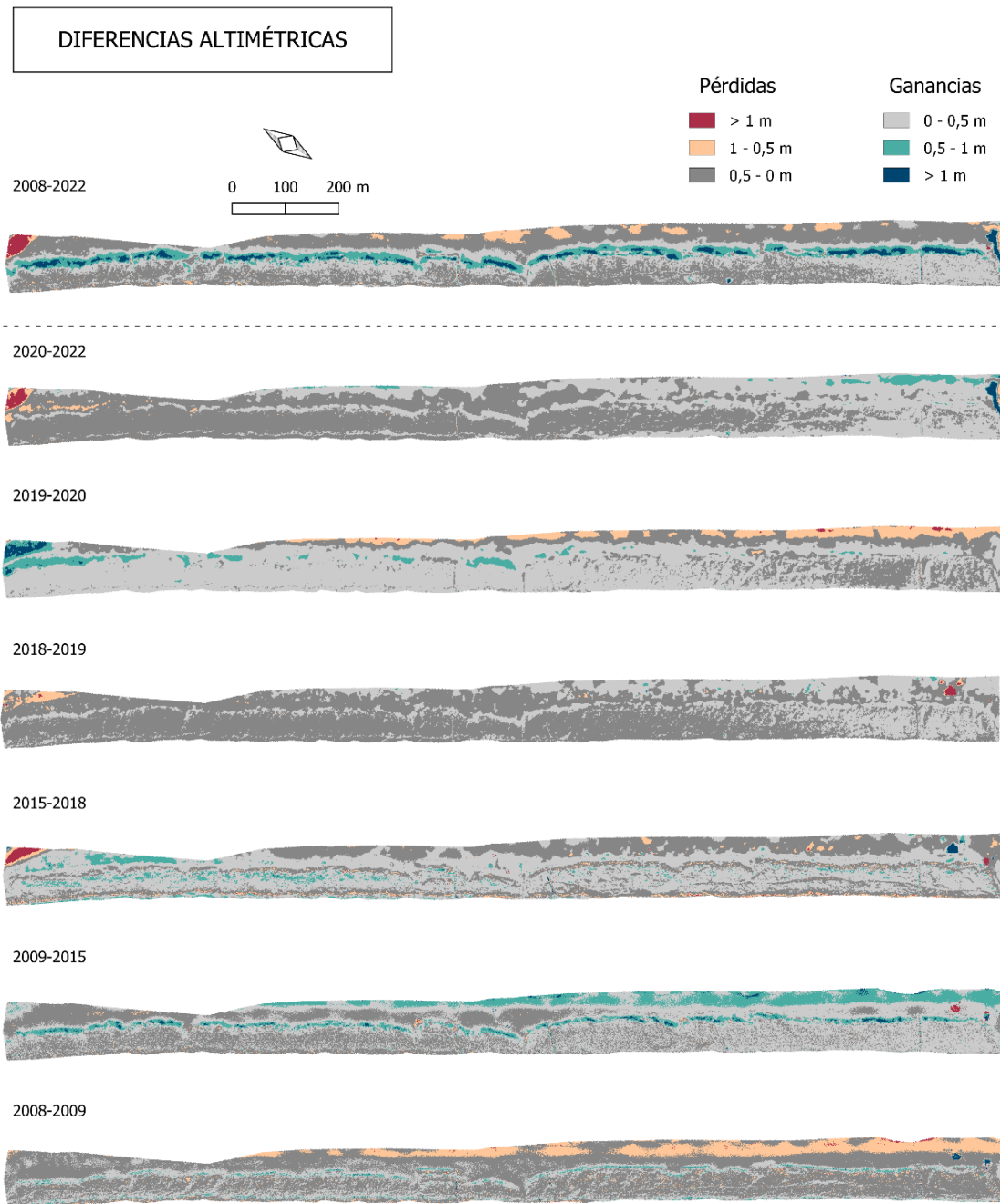


Figura 15. Diferencias altimétricas experimentadas por el sistema dunar a lo largo del periodo de estudio. Los tonos cálidos (rojo, naranja) representan las pérdidas, los tonos fríos (verde, azul) las ganancias y los tonos gris oscuro/claro a pérdidas/ganancias poco significativas. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Cambios en el perfil dunar

El segundo bloque de resultados nace del análisis de 33 perfiles distribuidos a lo largo del primer cordón dunar y transversalmente a la línea de costa. La evolución de la posición y elevación tanto del pie de talud como de la cresta de la duna en cada uno de los perfiles y periodos estudiados se ilustra en la **Tabla 4** y **Figura 16**. El estudio de estos parámetros muestra un avance generalizado del frente dunar entre 2008 y 2022, coincidiendo con la tendencia acumulativa ya observada durante el análisis de los cambios volumétricos y altimétricos. Los mayores cambios se han detectado en el pie de duna, el cual ha experimentado un avance medio de 7 m durante dicho periodo. La cresta, en cambio, ha permanecido más estable, con un avance medio de 2 m y una ganancia media en altura de 32 cm. Si nos detenemos a comparar las tasas de cambio anuales es posible diferenciar periodos de mayor celeridad, como puede ser el correspondiente a 2019-2020, con una tasa de cambio en el pie de duna de 1,45 m/año.

Tabla 4. Variación media de la posición (dx) y elevación (dz) del pie de duna y la cresta para cada periodo analizado, en metros. Entre paréntesis se indica la tasa de cambio anual (m/año). Los valores positivos y negativos indicarían, respectivamente, un desplazamiento hacia el mar y tierra adentro. Fuente: Elaboración propia.

	2008-2009	2009-2015	2015-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2022	2008-2022
dx pie	0,406	3,621	1,013	0,688	1,454	0,169	7,350
duna (m)	(0,406)	(0,604)	(0,338)	(0,688)	(1,454)	(0,084)	(0,525)
dx cresta	1,496	1,500	-0,839	0,070	0,037	-0,248	2,016
duna (m)	(1,496)	(0,250)	(-0,280)	(0,070)	(0,037)	(-0,124)	(0,144)
dz pie	-0,183	-0,027	0,257	-0,119	0,280	-0,191	0,016
duna (m)	(-0,183)	(-0,005)	(0,086)	(-0,119)	(0,280)	(-0,096)	(0,001)
dz cresta	0,015	0,220	0,112	-0,053	0,091	-0,063	0,322
duna (m)	(0,015)	(0,037)	(0,037)	(-0,053)	(0,091)	(-0,032)	(0,023)

A raíz de la **Figura 16** también se ha podido detectar la estabilidad que presenta la cresta de cada perfil entre cada una de las fechas, percibiéndose cambios que oscilan entre los 0,5 y 0,8 m. La base de la duna, en cambio, ha variado considerablemente entre fechas en cada uno de los perfiles (hasta 14 m en alguno de ellos), lo que refleja el gran dinamismo asociado a esta parte de la duna.

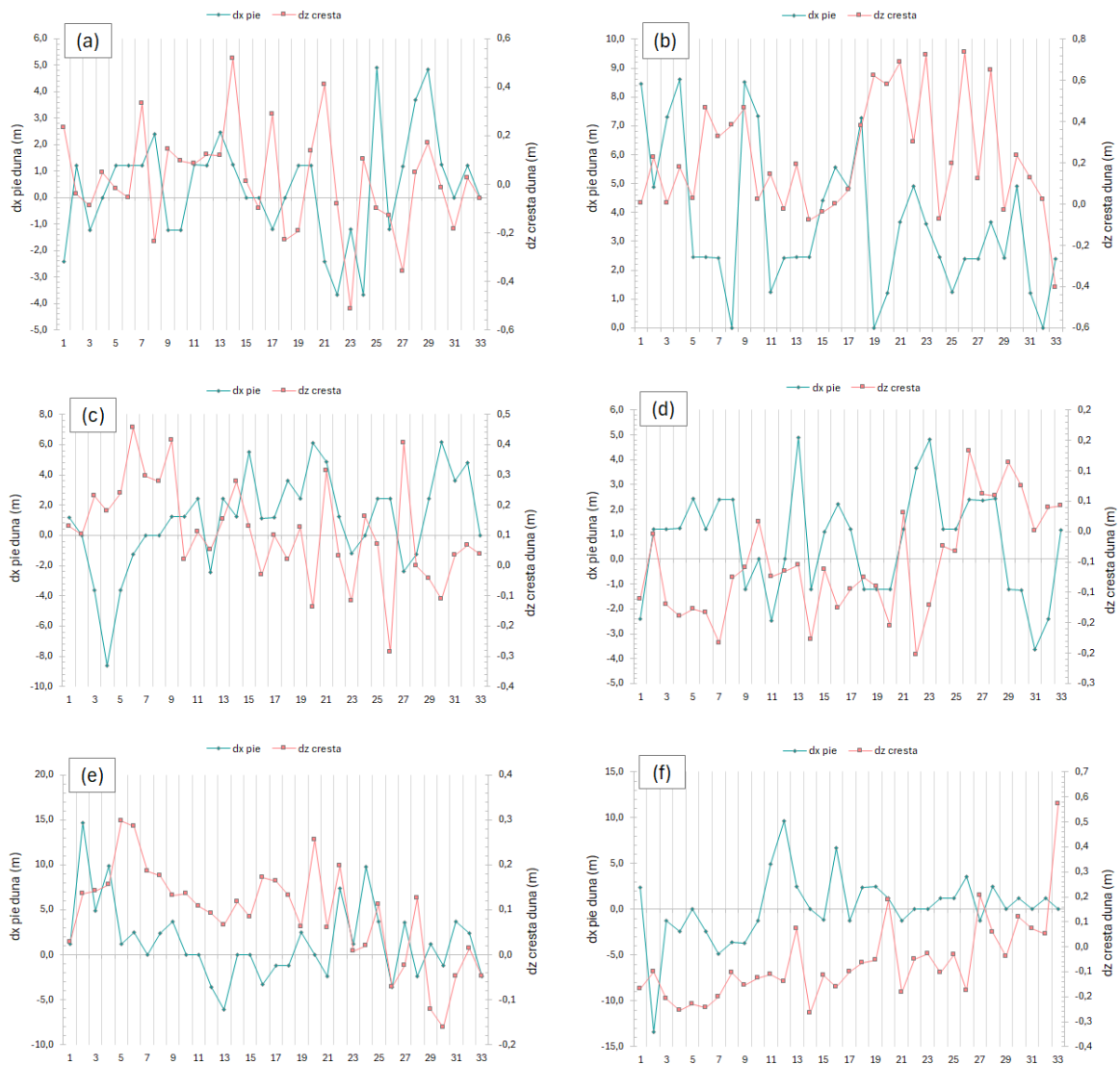


Figura 16. Cambios en la altura de la cresta (dz) y la posición del pie de duna (dx) en cada perfil para los distintos periodos analizados: **a)** 2008-2009; **b)** 2009-2015; **c)** 2015-2018; **d)** 2018-2019; **e)** 2019-2020 y **f)** 2020-2022. Los valores positivos reflejan ganancias en la altura de la cresta y avance hacia el mar del pie de duna, mientras que los negativos indican pérdidas en la altura de la cresta y retroceso del pie de duna. Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la distribución espacial de los cambios, se ha observado un mayor avance del pie de duna en los perfiles situados más al sur del área de estudio (**Figura 17**), mientras que las mayores ganancias de altura en la cresta se han producido en perfiles alejados de zonas de paso (**Figura 18**). Curiosamente, el avance del frente de duna no necesariamente va acompañado de una ganancia en altura, como podemos evidenciar en algunos de los perfiles. Ejemplo de ello lo constituye el perfil 16 (**Figura 19**), en el cual se produce una pérdida de altura de 25

cm entre 2008 y 2022, pero un avance del pie de duna de 12 m, lo que supone una considerable ganancia de volumen de arena.



Figura 17. Avance del pie de duna en cada perfil a lo largo del periodo de estudio (2008-2022). Los perfiles con ganancias superiores a la media se indican mediante recuadros. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat

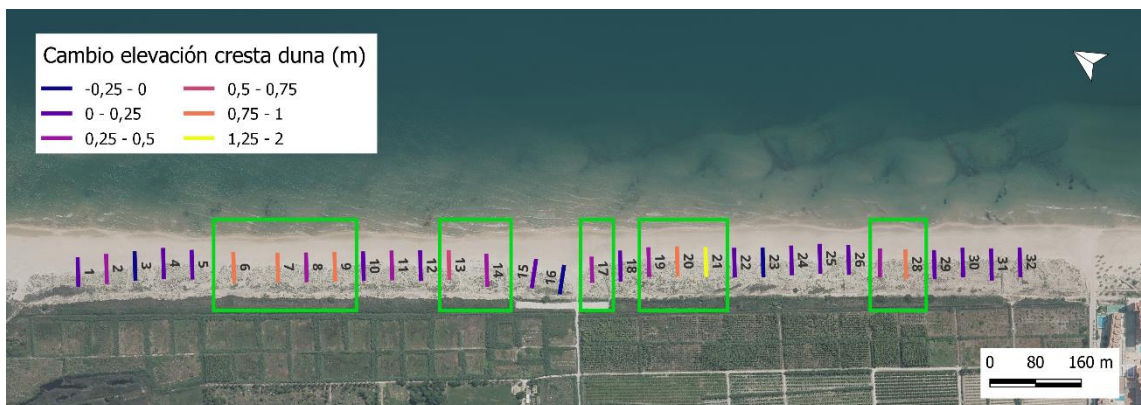


Figura 18. Cambios en la elevación de la cresta de la duna en cada perfil a lo largo del periodo de estudio (2008-2022). Los perfiles con ganancias superiores a la media se indican mediante recuadros. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat

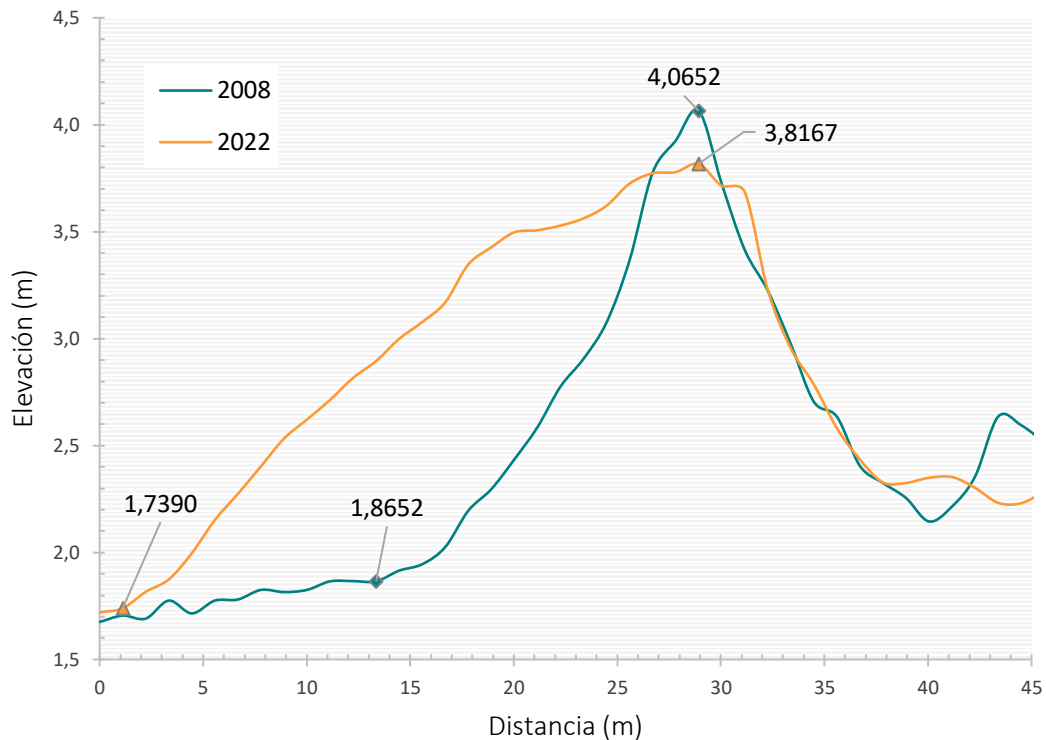


Figura 19. Evolución del perfil nº16 entre 2008 y 2022. La parte de la izquierda del perfil se corresponde con la zona hacia el mar y la derecha con la zona hacia tierra. El resto de perfiles se encuentran disponibles en el **Anexo 1**. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Respuesta del sistema dunar a los temporales marítimos

5.2.1. Temporales marítimos identificados entre 2007 y 2022

El empleo de un umbral de 1,42 m de altura de ola significativa permitió individualizar un total de 283 eventos de temporal durante los quince años de estudio. De estos eventos, sólo 175 mantuvieron una altura de ola significativa por encima del umbral de referencia durante al menos doce horas, los cuales se redujeron en última instancia a 131 tras aplicar la condición de independencia entre eventos (el listado de eventos se encuentra disponible en el **Anexo 2**).

Los resultados evidencian, por un lado, que la frecuencia de las tormentas es, por término medio, de ocho eventos por año y que estos se presentan de forma muy irregular entre los años analizados (**Tabla 5**). Si bien hay ciertas fechas, como los años 2014, 2016 y 2021, en los que tan sólo se registraron 4 y 6 eventos de temporal, durante 2007, 2019 y 2020 se llegaron a registrar hasta 11 y 12. Por otro lado, a nivel

estacional (**Tabla 6**) se ha detectado que el 40,46% de las tormentas ocurre en invierno, el 32,82% en otoño, el 24,43% en primavera, y sólo un 2,29% en verano.

Tabla 5. Temporales marinos identificados en Gandía entre 2007 y 2022 y promedio anual de su duración (h), Hs máx (m), Hs mín (m), Hs (m), dirección del viento e intensidad (m²h). Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Nº eventos	Duración media (h)	Hs máx media (m)	Hs mín media (m)	Hs media (m)	Dir. Media viento 0=N, 90=E
2007	11	39,6	2,4	1,4	1,9	51,8
2008	7	37,4	2,2	1,4	1,8	67,4
2009	7	24,4	2,4	1,5	1,9	99,4
2010	7	43,1	2,7	1,4	1,9	53,4
2011	7	30,3	2,1	1,4	1,7	54,0
2012	8	40,1	2,8	1,5	2,1	45,9
2013	9	54,1	2,5	1,4	1,9	47,1
2014	4	33,5	2,4	1,4	1,8	53,0
2015	9	39,4	2,5	1,4	1,9	54,4
2016	6	44,3	2,3	1,4	1,9	52,0
2017	10	40,2	2,3	1,4	1,8	48,0
2018	8	37,3	2,4	1,4	1,8	51,8
2019	11	53,0	3,0	1,4	2,0	49,3
2020	12	39,3	2,8	1,4	2,0	51,3
2021	6	76,5	2,7	1,4	2,0	54,0
2022	9	59,7	2,5	1,5	1,9	53,6
Promedio	8,2	43,3	2,5	1,4	1,9	55,4

Tabla 6. Temporales marinos en Gandía, distribuidos en meses y estaciones del año (2007-2022). Fuente: Elaboración propia.

Estación	Meses	Nº temporales	Total	%
Invierno	Diciembre	20	53	40,46
	Enero	18		
	Febrero	15		
Primavera	Marzo	23	32	24,43
	Abril	8		
	Mayo	1		
Verano	Junio	0	3	2,29
	Julio	0		
	Agosto	3		
Otoño	Septiembre	8	43	32,82
	Octubre	17		
	Noviembre	18		

La duración media de los eventos suele ser de casi dos días (43,3 horas), aunque se han dado casos de temporales que han duplicado esta duración e incluso llegado casi a las dos semanas (324 horas) (**Figura 20**). En cuanto a la Hs máxima, la mayoría de las tormentas se mantienen por debajo de los 3 m; mientras que sólo unas pocas llegan a los 4-5 m (**Figura 21**). El mayor registro de la serie se produce en enero de 2020 durante el temporal Gloria, con una Hs máxima de 8,8 m.

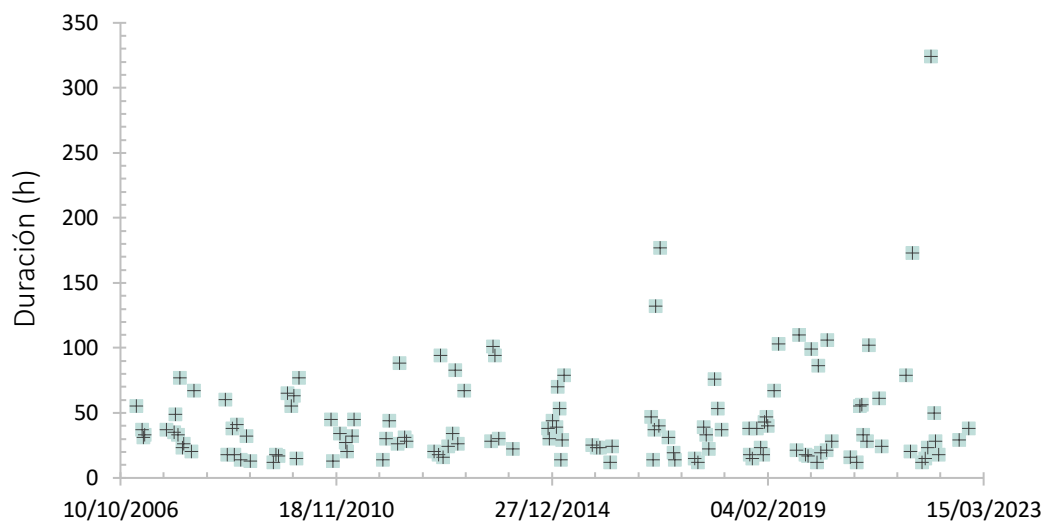


Figura 20. Duración de cada temporal ocurrido entre 2007 y 2022. Fuente: Elaboración propia.

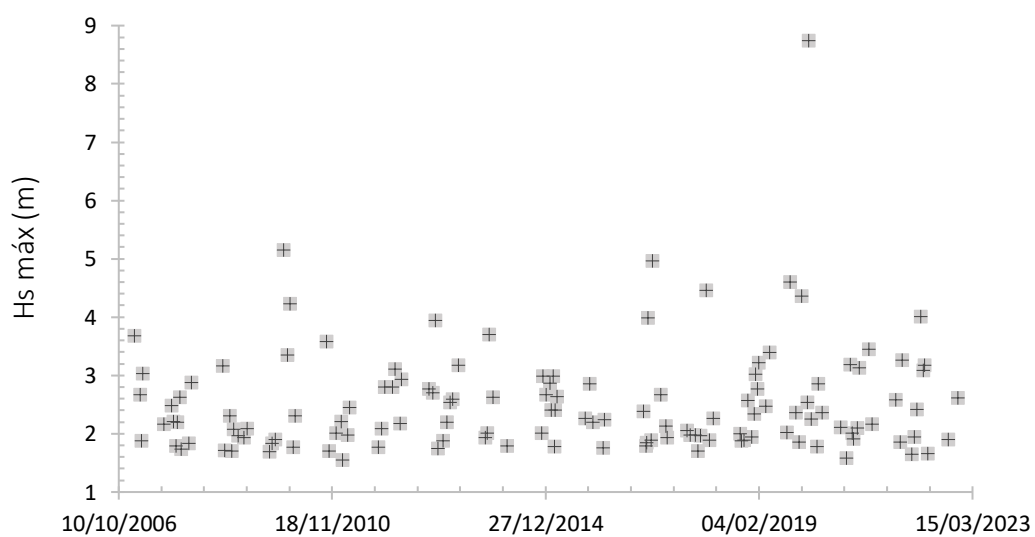


Figura 21. Hs máxima de cada temporal ocurrido entre 2007 y 2022. Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la intensidad de los temporales registrados, se han observado grandes cambios anuales e interanuales (**Tabla 7**). Así, resulta llamativo el cambio experimentado en los últimos cuatro años (2019-2022) frente al resto de fechas. Durante dicho periodo se registran los temporales más intensos de la serie, siendo el año 2020 el que alcanza el valor máximo (749 m²h), seguido del año 2022 (735 m²h), 2021 (715 m²h) y 2019 (667 m²h). La intensidad media anual en fechas anteriores, por el contrario, fluctúa aproximadamente entre los 200-500 m²h, siendo mínima en 2014 (81 m²h). Considerando el factor estacional se detecta que los temporales de mayor intensidad se producen en invierno y primavera, concretamente en los meses de enero y marzo, con una intensidad media de 911 m²h y 497 m²h, respectivamente.

Tabla 7. Cronograma anual, estacional y mensual de los temporales marinos y su Intensidad (m²h) en Gandía (2007-2022). Fuente: Elaboración propia.

Año	Invierno			Primavera			Verano			Otoño			Promedio anual
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	
2007	159 79	745		264 110 305					174		217	239 106 373	252
2008	53 177		68	556							603 53	203	245
2009	1731	54		120 57						35 61	62		303
2010	139	617 1127	47	411							580 38		423
2011		132 48		125 270							44 131	347	157
2012		205	851	147 242						153	132	1467 49	406
2013	1294 208	85	165 535	176		678					105	408	406
2014	76 90 117				40								81
2015		321	407 474 44	168 551							129	188 111	266
2016	127 2101		37 120									268 45	450
2017	96 85	143 4372		221	87 53					64	47	153	532
2018	87		1512	189 191						152	64 54	253	313
2019	1882	99 392 361	415	412		1191			87	2338	101	59	667
2020	122 123	77 6584	97	67 867		157			71		30	560 229	749
2021		999		726		113				530	69	1850	715
2022	261	33	57 135	5210		477 283 50				106			735
Promedio mensual	450	911	331	497	380	50	0	0	111	430	145	384	443
Promedio estacional	573			454			111			298			

Intensidad (m²h)



5.2.2. Respuesta del sistema dunar a los temporales

Con el objetivo de estudiar la repercusión de los temporales sobre la evolución del sistema playa-duna, se seleccionó el 20% de los temporales con mayor intensidad del conjunto de eventos identificados entre 2007 y 2022. Como resultado, se obtuvo un total de 26 fechas, las cuales se ilustran en la **Tabla 8** junto a sus respectivos parámetros descriptivos de oleaje.

Tabla 8. Temporales de mayor intensidad registrados entre 2007 y 2022. Fuente: Elaboración propia.

Periodo	Fecha inicio-fin	Duración (h)	Hs máx (m)	Hs mín (m)	Hs med (m)	Dir. viento med 0=N, 90=E	Intensidad (m ² h)
-	26-28/01/2007	55	3,7	1,4	2,2	54,8	744,8
2008-2009	4-7/03/2008	67	2,9	1,5	2,1	32,7	555,7
	9-11/10/2008	60	3,2	1,4	2,0	55,2	602,9
2009-2015	13-15/12/2009	65	5,2	1,5	2,7	53,5	1730,7
	7-9/01/2010	55	3,4	1,5	2,2	88,2	617,2
	25-28/01/2010	63	4,2	1,4	2,3	54,5	1127,3
	11-13/10/2010	45	3,6	1,4	2,2	43,5	580,0
	02-11/02/2012	88	3,1	1,4	2,2	43,4	851,1
	11-15/11/2012	94	4,0	1,4	2,5	51,4	1466,6
	23/02-02/03/2013	83	2,5	1,4	1,8	50,0	535,5
	24-29/04/2013	67	3,2	1,4	2,3	47,6	677,5
	26/11-03/12/2013	94	3,7	1,4	2,2	51,6	1293,8
	18-26/03/2015	79	2,6	1,4	2,0	54,6	550,6
2015-2018	17-22/12/2016	132	4,0	1,4	2,4	54,0	2101,5
	17-24/01/2017	177	5,0	1,4	2,7	50,1	4372,1
	27/01-7/02/2018	76	4,5	1,4	2,1	47,8	1511,8
2018-2019	18-22/04/2019	103	3,4	1,4	2,4	50,6	1190,7
2019-2020	10-15/09/2019	110	4,6	1,4	2,2	54,1	2337,7
	2-6/12/2019	99	4,4	1,4	2,5	49,1	1882,0
	19-23/01/2020	86	8,8	1,4	4,3	52,0	6584,4
	24/03-03/04/2020	106	2,9	1,4	1,9	55,0	867,0
2020-2022	4-6/11/2020	55	3,2	1,4	2,1	60,3	559,7
	7-11/01/2021	102	3,1	1,5	2,3	52,6	999,3
	18-21/03/2021	61	3,5	1,4	2,2	56,0	726,1
	5-17/11/2021	173	3,3	1,4	2,0	53,8	1849,9
	14-27/03/2022	324	4,0	1,5	2,4	58,6	5210,0
Promedio		96,9	3,8	1,4	2,3	52,9	1597,1

Para evaluar el efecto de los temporales sobre el sistema playa-duna se superpusieron sobre un eje temporal todos los eventos ocurridos (incluidos los 26 temporales más extremos) y los balances sedimentarios globales (**Figura 22a**). Además, se comparó la intensidad media anual de los eventos con la posición media anual del frente costero (**Figura 23**). A raíz de ello, se ha podido observar que el primer cordón dunar y el ambiente de playa respondieron de forma diferente a los eventos.

La serie temporal se inicia con una fase erosiva que afecta a todo el sistema, tanto a las dunas como al ambiente de playa. Durante este periodo acontecen dos eventos significativos en marzo y octubre de 2008, seguidos de temporales de menor magnitud (entre 50-200 m²h). En este caso, resulta interesante prestar atención no sólo a la intensidad de los eventos, sino también a su proximidad a la fecha de los vuelos con los que se obtuvieron los datos de partida para la generación de los MDS. En esta etapa el tiempo de recuperación entre el último evento extremo del periodo (9-11/10/2008) y la fecha del siguiente vuelo (1/11/2009) es de alrededor de un año, lo que indicaría que, si el sistema no ha logrado recuperarse pasado este tiempo es porque el balance sedimentario del sistema podría haberse visto afectado además por otros factores, por ejemplo, movimientos de arena o la existencia de fases erosivas previas.

Finalizado este periodo, comienza una nueva etapa en la que se alternan periodos energéticos con otros de calma que permiten que el sistema se recupere y acumule de nuevo sedimento, lo que produce ganancias de forma generalizada. Esta tendencia acumulativa se invierte tras el temporal de enero de 2017, momento a partir del cual la zona de playa experimenta un déficit sedimentario sostenido en el tiempo (**Figura 22b**). A lo largo de esta larga etapa erosiva tienen lugar eventos de menor intensidad, pero muy seguidos en el tiempo, especialmente entre los meses de enero y mayo de 2019. Los efectos de los temporales entre 2018-2019 se materializan también en las dunas, las cuales, a diferencia del ambiente de playa, logran recuperarse durante 2019-2020. Este último fue un periodo compuesto, como ya hemos visto, por uno de los eventos más intensos de la serie temporal, el temporal Gloria (enero 2020), cuyos efectos fueron claramente perceptibles en la

zona de playa. No fue hasta el periodo 2020-2022 en el que se detecta una recuperación efectiva de la misma. Curiosamente, esta recuperación viene acompañada de una pérdida volumétrica en las dunas, lo que podría sugerir que se produjo una redistribución del sedimento tras los temporales sucedidos en estas fechas. El más significativo de ellos tuvo lugar en marzo de 2020, con una duración de 324 h y una Hs máxima de 4 m de altura.

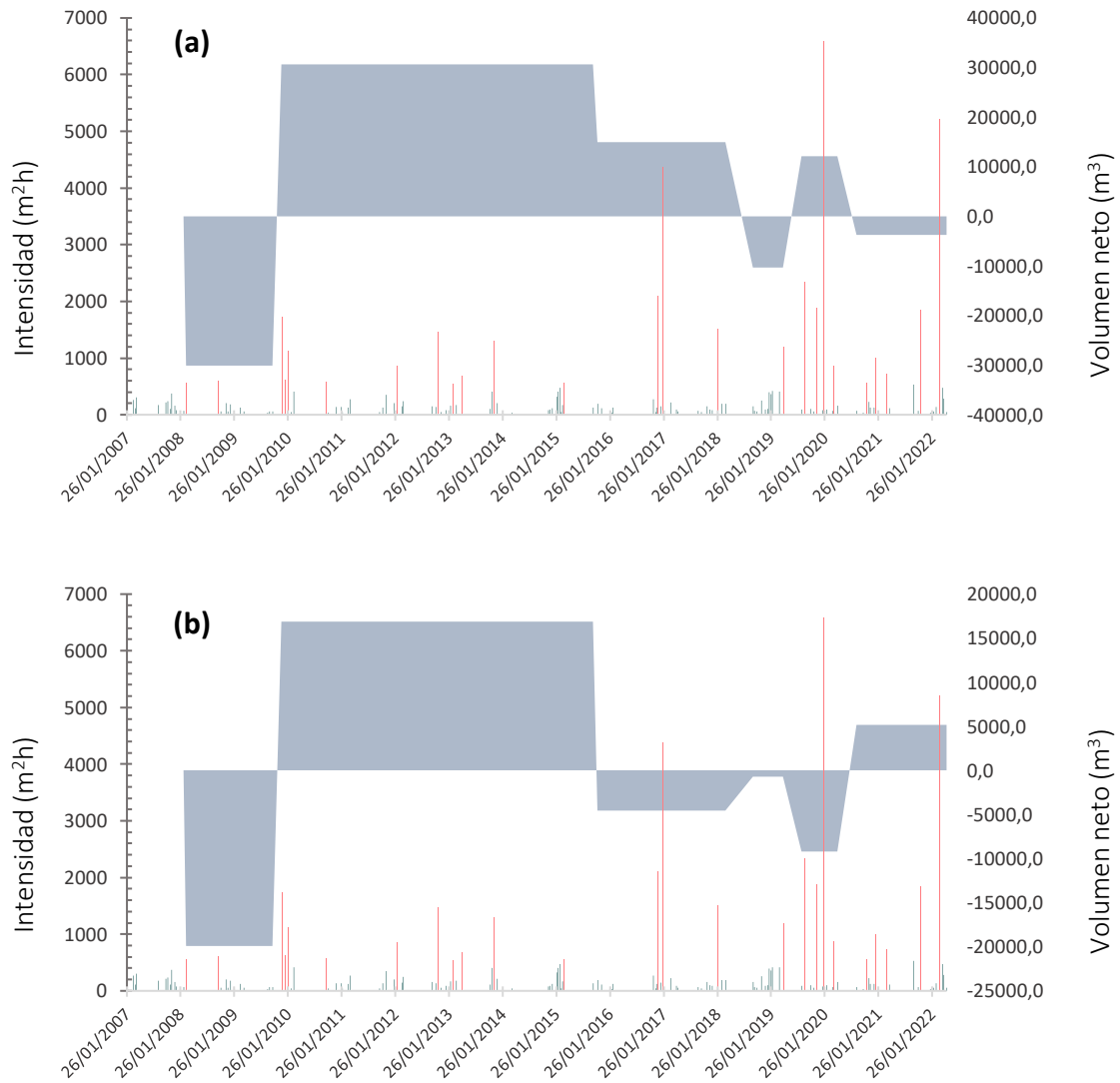


Figura 22. Intensidad de los temporales ocurridos entre 2007 y 2022 frente a los balances sedimentarios globales del sistema (a) y del ambiente de playa (b). En color rojo se indica el 20% de los temporales más extremos. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, si nos detenemos en la **Figura 23**, podemos afirmar que, independientemente de la intensidad media anual de los eventos, el primer cordón dunar experimentó a lo largo del periodo 2008-2022 un progresivo avance hacia el

mar, como ya se mencionaba en el apartado 5.1. Estos resultados sugieren que, a pesar de que se produzca una redistribución de los sedimentos entre las zonas de playa y duna durante los eventos de fuerte oleaje, la posición del frente dunar no parece verse afectada a largo plazo, permaneciendo estable durante todo el periodo de estudio.

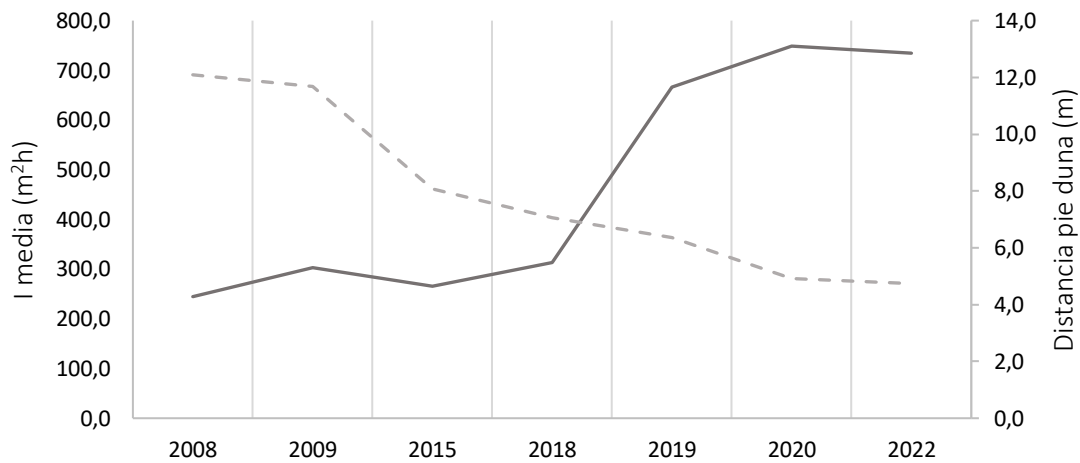


Figura 23. Intensidad media anual de las tormentas (línea continua) y promedio anual de la posición del pie de duna (línea discontinua). Menores valores en la distancia del pie de duna indican mayor proximidad al mar y, en consecuencia, mayor avance del frente dunar. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Respuesta del sistema dunar a las intervenciones humanas

En la **Tabla 9** se exponen las extracciones artificiales de arena realizadas en la playa de l'Ahuir y zonas adyacentes (playa norte de Gandía, sur de Xeraco y desembocadura del río Vaca) para cada periodo de estudio. Entre febrero y mayo de 2009 se extrajeron más de 86000 m³ de arena en las playas de l'Ahuir y norte de Gandía. Estos movimientos de arena se producen dentro del periodo 2008-2009, en el cual se registró un balance sedimentario negativo importante (30095 m³), con un 66% de las pérdidas concentradas en la zona de playa. Los siguientes movimientos de arena se produjeron durante el periodo acumulativo de 2019-2020, entre noviembre y diciembre de 2019, cuyos efectos se manifiestan nuevamente en el ambiente de playa, donde se produce una pérdida de 9174 m³. Del mismo modo, entre mayo y junio de 2022 se realizó otro traslado de arena en la playa de l'Ahuir, cuyo volumen se desconoce, pero que coincide con el último periodo erosivo de la serie, viéndose afectados el primer cordón dunar y las dunas más antiguas. Las

extracciones realizadas en las áreas colindantes, si bien no se producen dentro del área de estudio, sí podrían haber afectado al balance sedimentario del sistema playa-duna en algunos periodos, modificando el transporte sedimentario longitudinal (N-S) y/o el intercambio de arena entre la playa y la duna.

Tabla 9. Extracciones realizadas en la playa de l’Ahuir (resaltadas en negrita) y en las zonas próximas al área de estudio: Xeraco y río Vaca al norte y Gandía en el sur; entre 2008-2022. Fuente: Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por el grupo CGAT-UPV.

Periodo	Fecha extracción	Lugar de extracción	Lugar de vertido	Volumen extraído (m³)
2008-2009	mar 08-jun 08	Playa norte de Gandía	Piles	46542
	feb 09-may 09	Playa norte de Gandía y playa de l’Ahuir	Brosquil	86288
	feb 09-may 09	Playa norte de Gandía	Bellreguard	50419
	feb 09-mar 09	Playa norte de Gandía	Miramar	49669
	mar 09-may 09	Playa norte de Gandía	Piles	50789
2009-2015	oct 13-nov 13	Norte del río Vaca	La Goleta	4750
	dic-13	Norte del río Vaca	La Goleta	6055
	mar 15-abr 15	Norte del río Vaca	Marenyet	6400
2015-2018	dic-15	Norte del río Vaca	La Goleta	4164
	dic 16-mar 17	Norte del río Vaca	La Goleta	6000
	nov-17	Playa norte de Gandía	Daimus	3684
	nov-17	Playa norte de Gandía	Bellreguard	2022
	nov-17	Playa norte de Gandía	Piles	4536
	may 18-jun 18	Playa norte de Gandía	La Goleta	12968
	may 18-jun 18	Xeraco sur	La Goleta	8944
2018-2019	oct 18-dic 18	Xeraco sur	La Goleta	26556
2019-2020	nov 19-dic 19	Playa de l’Ahuir	La Goleta	28049,64
	nov 19-dic 19	Xeraco sur- Playa de l’Ahuir	Brosquil	16337,75
	ene-20	Playa norte de Gandía	La Goleta	11969
	feb-20	Desembocadura del río Vaca	Marenyet	10402,87
	feb-20	Desembocadura del río Vaca	El Cordobes	1200
2020-2022	may 22-jun 22	Playa de l’Ahuir	Desconocido	Desconocido

6. DISCUSIÓN

6.1. Evolución morfológica del sistema dunar

Las playas y las dunas conforman un sistema sedimentario integrado que adaptan su forma y perfil a las condiciones del oleaje y al balance sedimentario local (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2001). Poder identificar y cuantificar los cambios volumétricos que tienen lugar es, por consiguiente, fundamental para comprender cómo evoluciona el sistema y qué medidas de gestión adoptar a corto, medio y largo plazo.

Analizando el sistema de forma global, se hace evidente que la evolución de las dunas de l'Ahuir se ha mantenido en línea con su tendencia tradicionalmente acumulativa (Sanjaume y Pardo, 2011), presentando un patrón de acreción a lo largo del primer cordón dunar y un avance generalizado de su frente costero. Esta tendencia permite corroborar el modelo comportamental propuesto por Ribas (2017), según el cual, durante los catorce años de estudio el sistema se habría erosionado y habría acumulado sedimento alrededor de una morfología de equilibrio, presentando una estabilidad a largo plazo.

Si bien estos resultados permiten realizar un primer diagnóstico del estado evolutivo del sistema dunar, resulta necesario profundizar en los cambios que se han ido sucediendo a lo largo del tiempo en cada una de las partes integrantes del sistema.

Al evaluar de forma independiente cada una de las partes, queda patente el gran dinamismo que presenta la zona de playa emergida, la cual registra un comportamiento mayoritariamente erosivo a lo largo de toda la serie temporal analizada. Los cambios volumétricos que tienen lugar en esta zona son de gran magnitud, y se manifiestan en toda su extensión de forma más o menos regular. Se presume que las ganancias y pérdidas registradas en la playa emergida podrían ser atribuibles a la alternancia de diferentes perfiles de playa asociados a distintas condiciones de oleaje. Así, por ejemplo, para el primer periodo erosivo (2008-2009), los sedimentos habrían sido arrastrados mar adentro por el oleaje y depositados en la playa sumergida para formar barras de arena, provocando una reducción en la

anchura de la playa emergida (perfil de invierno). Mientras que en el siguiente periodo (2009-2015), la presencia de temporales alternada con mayores periodos de calma habría permitido devolver una fracción de la arena a la parte emergida del sistema, acumulando sedimento y mostrando, como indican los resultados, un balance sedimentario positivo en todas las zonas. Sin embargo, para poder corroborar esta hipótesis sería necesario un análisis más robusto, donde se incluyera una mayor cantidad de datos 3D a lo largo del tiempo o se dispusiera de información batimétrica para detectar si la arena erosionada se encuentra efectivamente depositada en forma de barra sumergida. Muchas playas presentan por lo general una o varias barras de arena paralelas a la costa, siendo mayor el número cuanto más suave sea la pendiente de la playa. Además, se ha llegado a observar que estas barras de arena tienden a migrar mar adentro, desapareciendo al llegar a alta mar (Coco et al., 2022). Esto permite liberar espacio y generar nuevas barras de arena, pero a su vez podría traer como consecuencia una menor capacidad de recuperación de las playas tras los temporales si la entrada de sedimentos en el sistema es deficitaria.

Otro de los motivos que podrían explicar algunos de los cambios morfológicos observados sería la presencia de topografías estacionales en la costa. Algunas mesoformas como los “beach cusps” o cúspides de playa aparecen con frecuencia durante eventos altamente energéticos, desapareciendo de forma progresiva al cesar la tormenta (Ortega, 2015). Se trata de morfologías rítmicas compuestas por cúspides (o cuernos) que apuntan hacia el mar separadas por pequeñas bahías formadas por materiales más finos que los que se encuentran en las cúspides (**Figura 24**) (Coco et al., 2022; Ortega, 2015). Aunque la continuidad y el tamaño de los “beach cusps” suele ser mayor durante los meses de otoño-invierno, también pueden llegar a formarse en los meses de primavera-verano, bajo condiciones de baja energía del oleaje (Ortega, 2015).



Figura 24. Ejemplo de *beach cusps* en la Playa de Trafalgar (Cádiz, España). Fuente: Ortega (2015)

La variación cíclica en el perfil de la playa parece jugar a su vez un papel importante en la estabilidad de las dunas, particularmente en la primaria. La detección de cambios volumétricos de menor magnitud en el primer cordón dunar sugieren que la playa actúa en parte como zona de amortiguación durante las etapas negativas, reduciendo el efecto erosivo del oleaje sobre la misma y favoreciendo su desarrollo en las etapas acumulativas. Este papel amortiguador sería, por consiguiente, una posible explicación a la tendencia acumulativa registrada en las dunas entre 2008 y 2022. Por otro lado, las observaciones derivadas de los perfiles transversales han permitido diferenciar dentro de la duna primaria una parte más estable (la cresta) y otra más dinámica (el pie de duna). Esta última, al estar conectada con la parte alta de la playa, se erosiona con mayor facilidad durante los temporales, cediendo sedimento a la playa y reduciendo las posibles pérdidas de arena en esta zona (Cabezas-Rabadán, 2015).

En cuanto a los cambios registrados en la duna trasera, se ha detectado que sigue un patrón de comportamiento similar al de la duna primaria, perdiendo arena durante las etapas erosivas y recuperando parte del sedimento durante las etapas acumulativas. Sin embargo, debido a la metodología empleada, algunos de los cambios presentados en esta zona podrían ir asociados a cambios en la altura de la vegetación y no de la duna en sí misma, llevando a error en la interpretación de los

cambios volumétricos. Por este motivo, no se profundizará en la discusión de los resultados obtenidos en esta zona.

Finalmente, al analizar la distribución espacial de los cambios se ha podido advertir, por un lado, un mayor avance del pie de duna en los perfiles situados más al sur y, por otro, una mayor acreción/erosión en las proximidades de la desembocadura del río Vaca durante algunos periodos acumulativos/erosivos. La primera de las observaciones sugiere que el desplazamiento y la acumulación de los sedimentos en la parte más al sur del área de estudio podría estar ligada a la presencia del dique norte del puerto de Gandía, el cual actúa como trampa de sedimentos y favorece la acumulación a lo largo de toda la playa norte de Gandía (Sanjaume y Pardo, 2011). La segunda, en cambio, tendría como causa natural más probable el aporte intermitente de sedimentos del río Vaca. Este río se caracteriza por presentar un caudal mínimo muy regular a lo largo del año, con importantes avenidas asociadas a períodos de lluvias torrenciales que aportan grandes cantidades de sedimentos procedentes de los barrancos de la cuenca (Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A, 2011).

6.2. Respuesta del sistema a los temporales marinos más extremos y las intervenciones humanas

Al analizar la alternancia de etapas erosivas y acumulativas durante los catorce años de estudio se pudo detectar que, a pesar de que el sistema parece recuperarse en su conjunto, es decir, en cada etapa acumulativa se recupera la mayor parte del sedimento perdido durante la etapa erosiva anterior, la capacidad de recuperación varía tanto entre zonas como entre periodos.

Si bien todas las zonas logran recuperarse en mayor o menor medida tras el primer periodo erosivo (2008-2009), durante la segunda etapa acumulativa (2015-2018) la zona de playa entra en una fase negativa que se prolonga hasta 2020, observándose recuperación sólo en el área dunar, la cual mantiene un patrón de acreción hasta el inicio del último periodo de la serie (2020-2022). Una de las razones más evidentes que podría haber alterado el equilibrio de la playa y generado este comportamiento erosivo continuado estaría ligada al impacto de los temporales marinos, como bien

indican los trabajos realizados por Cabezas-Rabadán et al. (2019) y Pardo-Pascual et al. (2021), donde también se observaron tendencias erosivas en este tramo de costa durante los periodos 1984-2014 y 2013-2020, respectivamente. En este último trabajo se registró, en particular, una progresiva disminución en la anchura de la playa de l'Ahuir durante el año 2017, sin detectarse recuperación alguna en los años posteriores, pese al haberse tratado de un tramo acumulativo en los años previos. Esta tendencia erosiva quedaría confirmada también por un aumento en el tamaño del sedimento de la playa (Cabezas-Rabadán, 2015).

Cuando se producen cambios a corto plazo inducidos por temporales marítimos, la costa experimenta una rápida erosión seguida de una recuperación que suele ser bastante más lenta (Karunarathna et al., 2014). Dicha capacidad de recuperación depende de la severidad del evento o eventos y cómo de lejos han sido arrastrados los sedimentos mar adentro (Angnuureng et al., 2017). Algunos estudios han determinado que el tiempo de recuperación de playas micromareales se encuentra entre 5 y 10 días (Angnuureng et al., 2017), aunque puede tardar meses; mientras que la recuperación del primer cordón dunar suele llevar años o décadas (Nicolae et al., 2022). Los resultados mostrados en la sección 5.2 parecen indicar que las pérdidas observadas en el ambiente de playa entre 2015 y 2020 guardan relación tanto con la intensidad como con la frecuencia de los temporales ocurridos. Esta erosión da comienzo con el gran temporal de enero de 2017, persistiendo en el tiempo debido a la sucesión de varios episodios de gran magnitud en los años posteriores, algunos de ellos muy próximos en el tiempo. Por lo general, el daño es más importante cuanto mayor sea la altura de la ola (Karunarathna et al., 2014); no obstante la sucesión de eventos de temporal parece haber jugado un papel esencial durante el periodo 2019-2020, donde, si bien el sistema dunar no se ve afectado por los eventos, el ambiente de playa registra una de las mayores pérdidas de la serie temporal ($7\text{m}^3/\text{m}^2$). En la tesis de Almonacid-Caballer (2014) se llegaron a observaciones similares para los sectores del Golfo de Valencia con orientaciones noroeste-sureste, apreciándose cómo el efecto acumulativo de los temporales generaba un retroceso continuo en estas costas.

Son varios los factores que pueden llegar a dificultar la recuperación de una playa tras los temporales, pero uno de los más determinantes es la disponibilidad de sedimentos (Yu et al., 2013). Una disminución en los aportes arenosos procedentes del norte y/o un incremento de la pendiente sumergida (Pardo-Pascual et al., 2021) podrían explicar esta mayor dificultad de recuperación en la playa de l'Ahuir entre 2017 y 2020. Como se mencionaba anteriormente, la playa presenta un comportamiento cíclico, donde se alternan perfiles de invierno con perfiles de verano. La formación de barras de sedimento en la playa sumergida podría indicar que los sedimentos faltantes en la parte emergida del sistema se encuentran localizados en esta zona y no han sido todavía devueltos al sistema.

Curiosamente, esta tendencia erosiva en la zona de playa parece invertirse durante el último periodo (2020-2022), donde se recupera alrededor del 25% de la arena perdida hasta el momento. Una de las posibles causas de este cambio en el patrón evolutivo parece estar asociado a mayores periodos de calma tras el impacto del temporal Gloria, con sólo dos eventos de temporal significativos en noviembre de 2021 y marzo de 2022. Por otro lado, las pérdidas simultáneas que se producen en el área dunar sugieren que la acreción observada en la playa en estos dos años estaría asociada en parte a una redistribución de los sedimentos. Dependiendo de la intensidad de las tormentas, el nivel del mar puede llegar a alcanzar la base de la duna, erosionando grandes volúmenes de arena y arrastrando los sedimentos hacia el frente de playa, reduciendo el efecto erosivo del oleaje sobre la misma, como ya se mencionaba en la sección 6.1. El remonte o *runup* es un parámetro que determina el máximo alcance del oleaje en la costa y se emplea con regularidad para analizar el riesgo de erosión o inundación (Díaz, 2014). Para playas disipativas, donde la pendiente es muy suave, Ruggiero et al. (2001) sugieren que este parámetro puede obtenerse a partir de una ecuación dependiente únicamente de la altura de ola significativa (Ecuación 2).

$$R_{2\%} = 0,5 H_s - 0,22 \quad (\text{Ec.2})$$

donde $R_{2\%}$ es la sobreelevación máxima del nivel del agua (el 2% de las situaciones de mayor nivel) sobre el nivel medio del mar provocado por el run-up, medida en

metros, y H_s la altura de ola significativa medida a profundidades indefinidas, en metros.

Aplicando esta ecuación al 20% de los temporales más extremos (**Tabla 10**) se ha podido observar que son varios los eventos que superan la elevación media anual del pie de duna, lo que podría explicar la erosión registrada en el área dunar durante los distintos periodos erosivos. En la **Figura 25** se ilustra una toma fotográfica de Google Earth con fecha del 13 de noviembre de 2004, donde puede apreciarse cómo el oleaje alcanza el pie de duna en la mayoría de los tramos.

Tabla 10. Sobreelevación máxima del nivel del mar ($R_{2\%}$) aplicado a las H_s medias y H_s máximas de los temporales más extremos, dentro de las fechas para las que se dispone de datos topográficos sobre la elevación del pie de duna. Fuente: Elaboración propia.

Temporal (fecha inicio-fin)	Elevación media del pie de duna (m)	$R_{2\%}$ (H_s med) (m)	$R_{2\%}$ (H_s max) (m)
4-7/03/2008	1,86	0,85	1,22
9-11/10/2008	1,86	0,79	1,37
13-15/12/2009	1,68	1,14	2,36
7-9/01/2010	1,68	0,89	1,46
25-28/01/2010	1,68	0,94	1,90
11-13/10/2010	1,68	0,86	1,58
18-26/03/2015	1,65	0,78	1,10
27/01-7/02/2018	1,91	0,85	2,01
18-22/04/2019	1,79	1,00	1,48
10-15/09/2019	1,79	0,88	2,09
2-6/12/2019	1,79	1,04	1,96
19-23/01/2020	2,07	1,93	4,16
24/03-03/04/2020	2,07	0,74	1,21
4-6/11/2020	2,07	0,85	1,38
14-27/03/2022	1,88	0,96	1,79



Figura 25. Toma fotográfica de la playa de l'Ahuir el 13 de Noviembre de 2004. Fuente: Google Earth Pro

Otro aspecto a mencionar es el impacto de los procesos extractivos sobre la evolución del sistema playa-duna. En la **Tabla 9** de la sección 5.3 se identificaron tres fechas en las que se realizaron extracciones cerca de la desembocadura del Río Vaca y en la playa de l'Ahuir, coincidiendo con periodos de fuertes pérdidas en la zona de playa. Si bien el vertido de la arena extraída tiene lugar dentro de la misma célula sedimentaria (playas del Brosquil y de la Goleta), estos movimientos afectan a los balances sedimentarios locales, por lo que deben tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados. La alimentación de playas a través de vertidos de arenas es una medida que, a pesar de su reiterada implementación, ha demostrado ser habitualmente insuficiente para impedir el retroceso generalizado de la costa a largo plazo (Cabezas-Rabadán, 2021). En el Golfo de Valencia, dicho retroceso se presenta de forma más marcada entre Valencia y Cullera, debilitándose en la zona más meridional del óvalo valenciano (Sanjaume y Pardo, 2011). Algunos modelos de evolución del perfil de playa-duna, como el desarrollado por Davidson-Arnott et al. (2005), consideran que ante una subida del nivel del mar, el sistema playa-duna tenderá a buscar un nuevo perfil de equilibrio, produciéndose un retroceso de la línea de costa y una migración de las dunas tierra adentro, pero manteniendo su forma. En el caso de producirse dicho escenario en el ecosistema de l'Ahuir, será preciso que los gestores adopten las

medidas necesarias para asegurar su pervivencia y funcionalidad. Las metodologías basadas en la caracterización tridimensional y el análisis espacio-temporal, como la presentada en este trabajo, permiten monitorizar estos sistemas de forma holística, constituyendo una herramienta que puede ser esencial en la toma de decisiones por parte de los gestores costeros.

7. CONCLUSIONES

Los resultados derivados del análisis espaciotemporal del sistema dunar de l'Ahuir han permitido reflejar el potencial de la tecnología LiDAR y la fotogrametría digital automatizada en la detección de cambios a largo plazo en sistemas dunares costeros. La principal razón de ello se deriva principalmente en su capacidad de incorporar la variable altura como fuente de información, la cual se considera esencial debido al elevado dinamismo y la gran variabilidad espacial que presentan estos sistemas; además de guardar relación con los procesos geomorfológicos y ecológicos que tienen lugar en las zonas costeras.

Los cambios volumétricos y altimétricos registrados prueban que a partir de fotografías aéreas convencionales puede derivarse información tridimensional de precisión comparable a la del LiDAR aéreo. Si bien es cierto que dicha precisión puede mejorarse eliminando la cota correspondiente a la vegetación durante la generación de los MDS, se considera que la influencia de ésta en la duna primaria (principal objeto de este estudio) es mínima, por lo que los resultados son interpretativamente útiles y fiables en esta zona. Esto no es así para el caso de la duna trasera, cuya densidad de vegetación podría estar introduciendo errores en los datos de partida, y para la zona de playa emergida, donde la falta de información altimétrica en el sector norte impide conocer con exactitud el balance sedimentario en esta parte del sistema, dificultando la interpretación de posibles intercambios de arena entre la duna y la playa. Otra limitación detectada en este trabajo guarda relación con la resolución temporal asociada a los datos de partida. La carencia de información altimétrica en fechas intermedias y a escalas de tiempo más reducidas impide observar cambios que transcurran en cuestión de días o meses, limitando la posibilidad de evaluar en profundidad el impacto de los temporales y la capacidad de recuperación post-

tormenta del sistema. Como se mencionaba anteriormente, los ecosistemas dunares son entornos muy dinámicos, por lo que disponer de información con mayor periodicidad permitiría comprender mejor qué variaciones se producen intra-anualmente (p.e. cambios estacionales).

A pesar de ello, se considera que la calidad de los datos altimétricos empleados ha resultado ser lo suficientemente buena como para generar MDS precisos y a un bajo coste, obteniendo información tanto cualitativa como cuantitativa sobre la evolución del sistema dunar, particularmente del primer cordón, lo que ha permitido alcanzar el primero de los objetivos planteados y responder, parcialmente, al segundo.

En investigaciones futuras sería interesante eliminar la influencia de la vegetación en los datos de partida para optimizar el análisis de la duna trasera y obtener balances sedimentarios más realistas. Asimismo, disponer de una mayor cobertura de datos altimétricos en la zona de la playa emergida, así como información batimétrica y registros de la posición de la línea de costa permitiría monitorizar con más detalle el flujo de sedimentos entre la playa emergida y sumergida, el cual resulta imprescindible para garantizar la estabilidad de las dunas.

8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El ODS que guarda mayor relación con este estudio es el **ODS 13. Acción por el clima**. Los sistemas dunares y las playas constituyen la principal barrera natural frente a eventos climáticos extremos como inundaciones y temporales. Ante una previsible subida del nivel del mar y el actual retroceso de la costa, la monitorización de la evolución de los sistemas dunares se convierte en una herramienta esencial para la planificación y gestión sostenible de la costa. Las estrategias de adaptación a las nuevas condiciones ambientales requieren, a su vez, una alianza y acción coordinada por parte de los entes públicos y privados y la ciudadanía (**ODS 17. Alianzas para lograr objetivos**). Conocer los cambios que tienen lugar dentro de los sistemas playa-duna permite detectar posibles signos de erosión, predecir futuros riesgos para los asentamientos urbanos costeros y adoptar las medidas necesarias para reestructurar la costa e incrementar la resiliencia urbana (**ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles**).

Tabla 11. Relación del Trabajo de Fin de Máster con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030.

Objetivos de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.				X
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.				X
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.		X		
ODS 12. Producción y consumo responsables.			X	
ODS 13. Acción por el clima.	X			
ODS 14. Vida submarina.			X	
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.			X	
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.		X		

9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A. (2011). *Informe de viabilidad de la actuación 3.3.g Laminación y mejora del drenaje de la cuenca del río Vaca (Valencia)*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/planes-y-estrategias/informes-de-viabilidad-de-obras-hidraulicas/958_ACM_Laminacion_y_drenaje_RIO_VACA_tcm30-82570.pdf
- Albertos, B., Miguel, E. S. A. N., Draper, I., Garilleti, R., & Varela, F. L. J. M. (2010). Estado de conservación de la vegetación dunar en las costas de la Comunidad Valenciana. *Revista Digital Del Cedex*, (158), 121–134. <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/160>
- Almonacid-Caballer, J. (2014). *Obtención de líneas de costa con precisión sub-píxel a partir de imágenes Landsat (TM, ETM+ y OLI)* [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/48462>
- Angnuureng, D. B., Almar, R., Senechal, N., Castelle, B., Addo, K. A., Marieu, V., & Ranasinghe, R. (2017). Shoreline resilience to individual storms and storm clusters on a meso-macrotidal barred beach. *Geomorphology*, 290(August 2015), 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.007>
- Balaguer Huguet, P., & Roig-Munar, F. X. (2016). Sistemas dunares litorales y el concepto de gestión integrada de zonas costeras y marinas (GIZCM). En *Restauración y gestión de sistemas dunares. Estudio de casos (Colección Recerca i Territori, 8)* (Primera, pp. 201–220). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15932.64646>
- Bañón, L., Pagán, J. I., López, I., Banon, C., & Aragonés, L. (2019). Validating UAS-based photogrammetry with traditional topographic methods for surveying dune ecosystems in the Spanish Mediterranean coast. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(297). <https://doi.org/10.3390/jmse7090297>
- Cabezas-Rabadán, C., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E., & Soriano-González, J. (2017). Variabilidad de la línea de costa a partir de imágenes de satélite y su relación con la textura del sedimento. *Primer Congreso En Ingeniería Geomática*, 153–

161. <https://doi.org/10.4995/cigeo2017.2017.6628>

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J., & Fernández-Sarría, A. (2019). Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 23, 119–139. <https://doi.org/10.21138/gf.640>

Cabezas-Rabadán, C. (2015). *Análisis de la línea de costa y su relación con los parámetros morfológicos en playas de la Safor* [Trabajo de Fin de Máster]. Universitat de València. <https://es.slideshare.net/slideshow/analisis-de-la-linea-de-costa-y-su-relacion-con-los-parametros-morfologicos-en-playas-de-la-safor-por-carlos-cabezas/69565091>

Cabezas-Rabadán, C. (2021). *Beach morphology and its dynamism from remote sensing for coastal management support* [Tesis Doctoral]. Universitat Politècnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/165076>

Coco, G., Calvete, D., Bryan, K. R., & Murray, A. B. (2022). Rhythmic Coastal Landforms. En *Treatise on Geomorphology* (Second Edition, Vol. 8). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00133-4>

Comisión Europea. (2005). Vivir con la erosión costera en Europa. Sedimentos y espacios para la sostenibilidad. Resultados del estudio EUROSION. http://www.eurosion.org/project/eurosion_en.pdf

Cruz Avero, N., Vallejo Villalta, I., Hernández Calvento, L., & Ojeda Zújar, J. (2010). Sectorización del campo de dunas de Corralejo (Fuerteventura, Islas Canarias) mediante la integración de características Espectrales Y Morfométricas derivadas de datos LIDAR: propuesta metodológica y resultados preliminares. *Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica (14º. 2010. Sevilla)*, 788–802. <https://idus.us.es/handle/11441/66632>

Davidson-Arnott, R. G., 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), 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.04.008>

- Departament d'Acció Climàtica Alimentació i Agenda Rural. (2021). *Estudio de la evolución de los temporales de mar históricos en la costa catalana a partir de las observaciones y las simulaciones marítimas (1990-2020)*. https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/02_OFICINA/publicacions/publicacions_de_canvi_climatic/Estudis_i_docs_adaptacio/PIMA_Adapta_Costas/PIMA-Informe-temporals-martims-jul2021_v2_correccions_OCCC.pdf
- Díaz Sánchez, R. (2014). *Predicción del remonte extremo en playas: aplicación a los sectores litorales de la costa española* [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/32923/1/Roberto_Diaz_Sanchez.pdf
- Diputació de Valencia. (2021). El sistema dunar. Recuperado el 12 de Junio de 2024 de <https://ecosistemalitoral.dival.es/index.php/es/los-sistemas-dunares/>
- Dolan, R., & Davis, R. E. (1994). Coastal storm hazards. *Journal of Coastal Research*, (12), 103–144. https://www.researchgate.net/publication/284688241_Coastal_storm_hazards
- Doodly, J. P. (2001). *Coastal conservation and management: An ecological perspective*. Springer Science+Business Media, LLC. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0971-3>
- Elosegi, A. (2019, 8 de mayo). Eliminar embalses y presas abandonadas, un respiro para los ríos. *Revista Técnica de Medio Ambiente (RETAMA)*. <https://www.retema.es/actualidad/eliminar-embalses-y-presas-abandonadas-un-respiro-para-los-rios>
- Estrada Port Consulting. (2020). *Documento ambiental estratégico del plan director de infraestructuras del puerto de Gandía*. https://www.puertos.es/es-es/medioambiente/Documents/APVALENCIA_GANDIA_EsAE_PDI_200220_completo.pdf
- Fabrizi, S., Grotoli, E., Armaroli, C., & Ciavola, P. (2021). Using high-spatial resolution UAV-derived data to evaluate vegetation and geomorphological changes on a dune field involved in a restoration endeavour. *Remote Sensing*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/rs13101987>

- Fernández Movilla, S. (2019). *Influencia de los puntos de control sobre el terreno en la precisión de modelos digitales de superficies generados mediante fotogrametría aérea* [Trabajo Fin de Grado]. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/56668/1/TFG_Santiago_Fernandez_Movilla.pdf
- García Prieto, F. J., Sanjaume, E., Flor Rodríguez, G., Hernández Calvento, L., Hernández Cordero, A. I., & Gómez-Serrano, M. Á. (2009). Dunas marítimas y continentales. En *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España* (p. 106). Dirección General de Medio Natural y Política Forestal (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino). https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/2_tcm30-196747.pdf
- Gómez-Gutiérrez, Á., Conesa-García, C., Ibisate González de Matauco, A., Pérez-Cutillas, P., Portillo-Grau, D., & Segura-Méndez, F. J. (2021). Potencial de las imágenes aéreas históricas y la fotogrametría automatizada para elaborar modelos 3D de cauces efímeros mediterráneos y cuantificar cambios morfológicos. *Cuadernos de Geografía de La Universitat de València*, (107), 243. <https://doi.org/10.7203/cguv.107.21119>
- Göransson, G., Van Well, L., Bendz, D., Hedfors, J., & Danielsson, P. (2023). Opportunities for planned retreat and flexible land use in Sweden: Local, regional and national governance perspectives. *Climate Risk Management*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100530>
- Hernández, A., González-Villanueva, R., Carballeira, R., Bao, R., & Sáez, A. (2023). Dinámica de los sistemas dunares costeros ante el Cambio Global: La necesidad de una gestión sostenible. *Cuaternario y Geomorfología*, 37(1-2), 33-50. <https://doi.org/10.17735/cyg.v37i1-2.95891>
- Ibáñez, J. J. (2024, 5 de febrero). Las dunas costeras y su irreversible pérdida. Madridmasd. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2024/02/05/153556>
- Izaguirre Lasa, C. (2010). *Estudio de la variabilidad climática de valores extremos de oleaje*

- [Tesis Doctoral]. Universidad de Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/1304>
- Karunarathna, H., Pender, D., Ranasinghe, R., Short, A. D., & Reeve, D. E. (2014). The effects of storm clustering on beach profile variability. *Marine Geology*, 348, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.007>
- Ley Vega de Seoane, C., Gallego Fernández, J. B., & Vidal Pascual, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Dirección General de Costas (Ministerio de Medio Ambiente). <https://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0652461.pdf>
- Martín Hidalgo, M. (2015). *Caracterización multivariada de los temporales para su aplicación en el dimensionamiento del manto principal* [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.36262>
- Matkan, A. A., Hajeb, M., Mirbagheri, B., Sadeghian, S., & Ahmadi, M. (2014). Spatial analysis for outlier removal from LiDAR data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(2W3), 187–190. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-2-W3-187-2014>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). Fichas Tipos de Hábitat de Interés Comunitario en España. Recuperado el 7 de Junio de 2024 de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/red-natura-2000/rn_tip_hab_esp_espana_acceso_fichas.html
- Navarro Fernández, J. A. (2019). *Aplicaciones de la fotogrametría digital aérea en el inventario forestal* [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.57694>
- Nicolae Lerma, A., Castelle, B., Marieu, V., Robinet, A., Bulteau, T., Bernon, N., & Mallet, C. (2022). Decadal beach-dune profile monitoring along a 230-km high-energy sandy coast: Aquitaine, southwest France. *Applied Geography*, 139(January), 102645. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102645>
- O'Donnell, T. (2022). Managed retreat and planned retreat: a systematic literature review. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1854), 23–29. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0129>

- Ojeda Zújar, J., Vallejo Villalta, I., Hernández Calvento, L., & Álvarez-Francoso, J. I. (2007). Fotogrametría digital y lidar como fuentes de información en geomorfología litoral (marismas mareales y sistemas dunares). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (44), 215–233. <https://hdl.handle.net/11441/73709>
- Ortega Morales, I. (2015). *Estudio de beach cusps en Playa de Palma (Mallorca)* [Trabajo Fin de Máster]. Universitat de les Illes Balears. https://dspace.uib.es/xmlui/bitstream/handle/11201/1929/MAPL_MoralesOrtegaInes.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pagán, J. I., Bañón, L., López, I., Bañón, C., & Aragonés, L. (2019). Monitoring the dune-beach system of Guardamar del Segura (Spain) using UAV, SfM and GIS techniques. *Science of the Total Environment*, 687, 1034–1045. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.186>
- Pagán, J. I., López, I., Bañón, L., & Aragonés, L. (2019). 3D Modelling of Dune Ecosystems Using Photogrammetry From Remotely Piloted Air Systems Surveys. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 125(August), PI-163-PI-171. <https://doi.org/10.2495/CMEM190161>
- Pagán, J. I., López, I., Bañón, L., & Aragonés, L. (2020). Consequences of anthropic actions in Cullera Bay (Spain). *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/JMSE8040240>
- Pardo-Pascual, J. E., Cabezas-Rabadán, C., & Palomar-Vázquez, J. M. (2021). Monitorización de las playas mediante imágenes de satélite: el caso del segmento costero Cullera-Gandía. *Cuadernos de Ordenación Del Territorio*, 6(3), 83–99. <http://hdl.handle.net/10251/186868>
- Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2022). Estudio de los cambios de posición de la línea de costa en las playas del segmento València-Cullera (1984-2020) a partir de imágenes de satélite de resolución media de libre acceso. *Cuadernos de Geografía*, 108–109(1), 79–104. <https://doi.org/10.7203/CGUV.108.23828>
- Pardo-Pascual, J. E., & Sanjaume Saumell, E. (2001). Análisis multiescalar de la

- evolución costera. *Cuadernos de Geografía*, 69–70, 95–126.
<https://ojs.uv.es/index.php/CGUV/article/view/14534>
- Pinton, D., Canestrelli, A., Moon, R., & Wilkinson, B. (2023). Estimating ground elevation in coastal dunes from high-resolution UAV-LIDAR point clouds and photogrammetry. *Remote Sensing*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/rs15010226>
- Puertos del Estado. (s.f.-a). *Clima medio de oleaje. Nodo SIMAR 2082109*.
https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/medios/MED_1_8_2082109.pdf
- Puertos del Estado. (s.f.-b). *Extremos Máximos de Oleaje por Direcciones (altura significativa). Boya de Valencia 2630*.
https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/extremales/EXT_1_2_2630.pdf
- Puertos del Estado. (2021). *Clima medio de oleaje. Boya de Valencia 2630*.
https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/medios/MED_1_2_2630.pdf
- Ribas de Almeida, L. (2017). *Análisis morfológico de las dunas primarias costeras y definición de los parámetros controladores de su forma de equilibrio* [Tesis Doctoral]. Universidad de Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/12104>
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., & Abellán, A. (2017). Identification of rock clope discontinuity sets from laser scanner and photogrammetric point clouds: A comparative analysis. *Procedia Engineering*, 191(December), 838–845.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.251>
- Rodríguez, E. (2022, 14 de septiembre). Sara Muñoz Vallés, ecóloga e investigadora de la Universidad de Sevilla “En Europa sólo sobrevive en buen estado el 15% de las dunas costeras.” *SINC Ciencia Contada En Español*.
<https://www.agenciasinc.es/Entrevistas/En-Europa-solo-sobrevive-en-buen-estado-el-15-de-las-dunas-costeras>
- Roig-Munar, F. X., Pons, G. X., Martín-Prieto, J. A., Rodríguez-Perea, A., & Mir-Gual, M. (2012). Análisis espacio-temporal (1956-2004) de los sistemas dunares de Menorca (Islas Baleares) mediante variables geoambientales de uso y gestion. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (58), 381–404.

<https://doi.org/10.21138/bage.2072>

- Ronglan, E., Rubio, A. P., da Silva, A. O., Fan, D., Gair, J. L., Stathatou, P. M., ... Triantafyllou, M. S. (2024). Architected materials for artificial reefs to increase storm energy dissipation. *PNAS Nexus*, 3(3), 1–9. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae101>
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J., & Beach, R. A. (2001). Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17(2), 407–419. <https://www.jstor.org/stable/4300192>
- Salinas Castillo, W. E., Paredes Hernández, C. U., Martínez Becerra, X., & Guevara Cortina, F. (2014). Evaluación de la exactitud posicional vertical de una nube de puntos topográficos Lidar usando topografía convencional como referencia. *Investigaciones Geográficas*, (85), 5–17. <https://doi.org/10.14350/rig.36934>
- Sanjaume Saumell, E., & Pardo Pascual, J. E. (2011). Las dunas de las costas valencianas. En E. Sanjaume Saumell & F. J. García Prieto (Eds.), *Las dunas en España* (pp. 227–262). Sociedad Española de Geomorfología.
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J. L., Pagán, J. I., Asensio, J. L., & Ruffo, M. (2020). Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. *Revista de Teledetección*, 55, 1–15. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13168>
- Vallejo Villalta, I., Hernández-Calvento, L., Ojeda Zújar, J., Máyer Suárez, P., & Gómez Molina, A. (2009). Caracterización morfométrica y balance sedimentario en el sistema de dunas de Maspalomas (Gran Canaria) a partir de datos LIDAR. *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 22(1–2), 57–65. <http://hdl.handle.net/10553/58804>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179(April), 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Yu, F., Switzer, A. D., Lau, A. Y. A., Yeung, H. Y. E., Chik, S. W., Chiu, H. C., ... Pile, J.

(2013). A comparison of the post-storm recovery of two sandy beaches on Hong Kong Island, southern China. *Quaternary International*, 304, 163–175.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.04.002>

10. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

Figura 1. Distribución de las dunas costeras en Europa. Fuente: Doodly (2001).....	6
Figura 2. Ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat.	9
Figura 3. Dirección media anual de procedencia del oleaje en función de su altura significativa. Fuente: Puertos del Estado (2021)	11
Figura 4. Corte transversal típico de un sistema dunar costero progradante. Fuente: Diputació de Valencia (2021).....	12
Figura 5. Conectividad de la zona de estudio con la Marjal de la Safor. Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 6. (a) Componentes de un sistema LiDAR topográfico aerotransportado (Salinas et al., 2014); (b) Structure From Motion (SfM). En lugar de un par homólogo de fotografías, la técnica SfM requiere de varias imágenes solapadas como dato de entrada para los algoritmos de extracción de características y reconstrucción 3D (Westoby et al., 2012).	15
Figura 7. Ejemplo de outliers en datos LiDAR. La imagen corresponde a una visión de perfil de los datos LiDAR del año 2015 en el tramo norte del área de estudio. La visualización de los datos se realizó a través del programa Cloud Compare (https://www.cloudcompare.org/). Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 8. Puntos de referencia empleados en la calibración de los MDS. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat.....	18
Figura 9. Modelos Digitales de Superficies corregidos. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 10. (a) Zonificación del área de estudio; (b) Falta de cobertura de datos en la zona de playa emergida en el MDS 2008. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat	22
Figura 11. Transectos topográficos definidos en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat	22

Figura 12. Distribución de la altura de las olas. Fuente: Wikipedia.....	23
Figura 13. Definición de tormenta utilizando como ejemplo el umbral de $H_s=1,42$ m obtenido en este estudio. Fuente: Elaboración propia.....	24
Figura 14. Balance sedimentario global en el área de estudio, diferenciando entre el primer cordón dunar, dunas traseras y playa emergida. Los valores negativos y positivos se atribuyen, respectivamente, a fases de pérdidas y ganancias volumétricas. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 15. Diferencias altimétricas experimentadas por el sistema dunar a lo largo del periodo de estudio. Los tonos cálidos (rojo, naranja) representan las pérdidas, los tonos fríos (verde, azul) las ganancias y los tonos gris oscuro/claro a pérdidas/ganancias poco significativas. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 16. Cambios en la altura de la cresta (dz) y la posición del pie de duna (dx) en cada perfil para los distintos periodos analizados: a) 2008-2009; b) 2009-2015; c) 2015-2018; d) 2018-2019; e) 2019-2020 y f) 2020-2022. Los valores positivos reflejan ganancias en la altura de la cresta y avance hacia el mar del pie de duna, mientras que los negativos indican pérdidas en la altura de la cresta y retroceso del pie de duna. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 17. Avance del pie de duna en cada perfil a lo largo del periodo de estudio (2008-2022). Los perfiles con ganancias superiores a la media se indican mediante recuadros. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat.....	31
Figura 18. Cambios en la elevación de la cresta de la duna en cada perfil a lo largo del periodo de estudio (2008-2022). Los perfiles con ganancias superiores a la media se indican mediante recuadros. Fuente: Elaboración propia. Mapa base: Ortofoto 2020 CC BY 4.0 © Institut Cartogràfic Valencià, Generalitat.....	31
Figura 19. Evolución del perfil nº16 entre 2008 y 2022. La parte de la izquierda del perfil se corresponde con la zona hacia el mar y la derecha con la zona hacia tierra. El resto de perfiles se encuentran disponibles en el Anexo 1 . Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 20. Duración de cada temporal ocurrido entre 2007 y 2022. Fuente: Elaboración propia.....	34

Figura 21. Hs máxima de cada temporal ocurrido entre 2007 y 2022. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 22. Intensidad de los temporales ocurridos entre 2007 y 2022 frente a los balances sedimentarios globales del sistema (a) y del ambiente de playa (b). En color rojo se indica el 20% de los temporales más extremos. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 23. Intensidad media anual de las tormentas (línea continua) y promedio anual de la posición del pie de duna (línea discontinua). Menores valores en la distancia del pie de duna indican mayor proximidad al mar y, en consecuencia, mayor avance del frente dunar. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 24. Ejemplo de beach cusps en la Playa de Trafalgar (Cádiz, España). Fuente: Ortega (2015)	44

Tablas

Tabla 1. Figuras de protección en el sistema playa-duna de l’Ahuir y la Marjal de la Safor. Fuente: Visor cartográfico GVA (https://visor.gva.es/visor/).....	13
Tabla 2. Características de los datos de partida. Fuente: Elaboración propia.....	16
Tabla 3. Desviación media de la cota de cada MDS respecto a la cota de los puntos invariantes medidos mediante DGNSS diferencial (m). Fuente: Elaboración propia. ...	19
Tabla 4. Variación media de la posición (dx) y elevación (dz) del pie de duna y la cresta para cada periodo analizado, en metros. Entre paréntesis se indica la tasa de cambio anual (m/año). Los valores positivos y negativos indicarían, respectivamente, un desplazamiento hacia el mar y tierra adentro. Fuente: Elaboración propia.	29
Tabla 5. Temporales marinos identificados en Gandía entre 2007 y 2022 y promedio anual de su duración (h), Hs máx (m), Hs mín (m), Hs (m), dirección del viento e intensidad (m ² h). Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 6. Temporales marinos en Gandía, distribuidos en meses y estaciones del año (2007-2022). Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 7. Cronograma anual, estacional y mensual de los temporales marinos y su Intensidad (m ² h) en Gandía (2007-2022). Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 8. Temporales de mayor intensidad registrados entre 2007 y 2022. Fuente: Elaboración propia.....	37

Tabla 9. Extracciones realizadas en la playa de l’Ahuir (resaltadas en negrita) y en las zonas próximas al área de estudio: Xeraco y río Vaca al norte y Gandía en el sur; entre 2008-2022. Fuente: Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por el grupo CGAT-UPV.....	41
Tabla 10. Sobreelevación máxima del nivel del mar (R ₂ %) aplicado a las Hs medias y Hs máximas de los temporales más extremos, dentro de las fechas para las que se dispone de datos topográficos sobre la elevación del pie de duna. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 11. Relación del Trabajo de Fin de Máster con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030.	52