



MODELIZACIÓN DE DUNAS



TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ciencias Ambientales

Curso: 2015/16



Resumen

Las dunas conforman un sistema complejo por la dinámica que presenta y el cual realiza funciones defensivas importantes en la costa, siendo foco de afecciones antrópicas. Entre las medidas de control y seguimiento se encuentra la monitorización satelital por GPS haciendo uso de Estaciones de Referencia para obtener una alta precisión. En este estudio se aplica el método cinemático en tiempo real (RTK) junto con el empleo de los sistemas de información geográfica (SIG).

De este modo, tomando puntos GPS en una zona delimitada del sistema dunar y aplicando métodos de interpolación, se puede realizar una modelización tridimensional del cordón dunar y así evaluar cambios en el tiempo, utilizando otro tipo de información geográfica disponible como son los datos LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*).

Esta técnica supone crear zonas de control y seguimiento con el fin de obtener áreas piloto para evaluar cambios ambientales y además, permitir calibrar otros métodos.

Palabras clave: Sistema dunar, técnicas GPS, modelo tridimensional, interpolación, LIDAR.

Summary

The dunes comprise a complex system by the dynamics that presents and which perform defensive functions on the coast and is being a focus of anthropogenic affections. Among the control and follow-up measures is included the satellite monitoring by GPS making use of Reference Stations to obtain a high accuracy, which is used in this study by applying the kinematic method in real time (RTK) along with the use of geographic information systems (GIS).

In this way, taking GPS points in a defined area of the dune system and applying interpolation methods, it is able to perform a 3D modeling of the dune string and thus evaluate changes over time using other type of available geographical information such as the LIDAR data (*Laser Imaging Detection and Ranging*).

This technique involves creating zones of control and monitoring in order to obtain pilot areas to evaluate environmental changes and also allow to calibrate other methods.

Key words: Dune system, GPS techniques, 3D model, interpolation, LIDAR.



Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar, a mis tutores tanto por abrirme la puerta a realizar este trabajo con ellos como por orientarme e impartirme los conocimientos necesarios para llevarlo a cabo. Decir, que gracias a ellos me han apasionado los temas relacionados con la cartografía, los SIG y la teledetección aplicados a un amplio espectro de temas como es el propuesto en este trabajo de fin de grado. También me gustaría agradecer a todos aquellos que me han animado a lo largo de la realización del trabajo tanto a la familia como a compañeros y amigos. Por último, agradecer a mi compañero Daniel Santillana por haberme ayudado en la toma de puntos GPS y al Instituto Cartográfico de Valencia, por permitirme utilizar las correcciones diferenciales de la red GNSS ERVA en tiempo real y del mantenimiento de la cual se encarga.



Índice

1. Introducción	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Zona de estudio	2
1.3 Características de la zona de estudio	3
1.4 Antecedentes	4
2. Materiales y Métodos	5
3. Discusión de los resultados	8
4. Conclusión	24
5. Glosario	25
6. Bibliografía	27

Índice de Figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio y alrededores.	2
Figura 2. Equipo GPS RTK Leyca System 1200 en la zona de estudio.	6
Figura 3. Red de puntos GPS tomados en la zona de estudio.	9
Figura 4. Representación 3D de los puntos GPS tomados en la zona de estudio.	10
Figura 5. Puntos de control tomados a partir de cada cuadrícula de la malla.	10
Figura 6. Modelos tridimensionales aplicando los distintos métodos de interpolación.	11
Figura 7. Aplicación del ECM para validar los métodos de interpolación.	12
Figura 8. Modelización 3D de la zona de estudio aplicando el método <i>Natural neighbor</i>.	13



Figura 9. Representación de las medias de los errores e intervalos LSD de Fisher con un 95% de confianza. STATGRAPHICS Centurion XVI.I.	15
Figura 10. Aplicación del ECM para evaluar las distintas selecciones de puntos.	16
Figura 11. Método de interpolación <i>Natural neighbor</i> para 1000 y 2500 puntos GPS.	17
Figura 12. Representación de los datos LIDAR en el ámbito de la zona de estudio.	19
Figura 13. Superficie ráster a partir de datos LIDAR y GPS.	19
Figura 14. Cresta dunar correspondiente a 2009 y a 2016 y superficie entre ambas.	20
Figura 15. Perfiles transversales de la zona de estudio.	21
Figura 16. Gráficos correspondientes a los perfiles transversales.	23

Índice de Tablas

Tabla 1. Análisis de la varianza (ANOVA) de los errores con distintos porcentajes de muestreo. STATGRAPHICS Centurion XVI.I.	14
Tabla 2. Media de los errores con intervalos LSD de Fisher con un 95% de confianza para distintos porcentajes de muestreo. STATGRAPHICS Centurion XVI.I.	15
Tabla 3. Comparación y validación de los puntos GPS y LIDAR. STATGRAPHICS Centurion XVI.I.	18



1. Introducción

En el litoral destaca la presencia de dunas, un sistema natural de protección de la costa que se crea con la acumulación de arena de forma suave y uniforme generada por la dinámica eólica. La presencia de las dunas abarca todo el litoral y actúa formando un cordón dunar cuya misión es la protección del ecosistema. Las características propias de dichas dunas, permiten la presencia de flora y fauna única que favorecen su existencia.

El litoral está gravemente afectado por la ocupación humana y el uso que se hace del mismo. Es por ello que el ecosistema litoral se ha degradado. Como ejemplo de dicho impacto ambiental, cabe destacar que antes de empezar el siglo XXI, se considera que un 95% de las dunas de la Comunidad Valenciana estaban destruidas (Costa *et al.*, 1989). Además, el litoral valenciano solo posee 60 km de dunas delanteras o *foredunes* (Hesp, 1981) de manera interrumpida por las construcciones presentes en la línea de costa, respecto a los 150 km de dunas transversales formando dos alineaciones más o menos paralelas desde las inmediaciones de la ciudad de Castellón hasta Denia (Sanjaume y Pardo, 1992).

Centramos el estudio en un tramo del cordón dunar de Gandia con el objetivo de modelizar las dunas para evaluar posibles cambios producidos y obtener un modelo comparativo para estudios futuros. Para ello se han utilizado un GPS en modo RTK (*Real Time Kinematic*) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Suponen un método que permite modelizar las dunas con una buena precisión, apta para analizar cambios en un sistema dinámico y realizar posteriores análisis.

1.1 Objetivos

El principal objetivo, es realizar una modelización del cordón dunar mediante GPS en modo RTK por medio de una red de puntos tomada en la zona de estudio y utilizar diferentes técnicas de interpolación para obtener el modelo tridimensional. Se analizarán los diferentes resultados obtenidos y se seleccionará el método de interpolación más preciso. Como objetivo secundario se comparará la evolución dunar utilizando los resultados obtenidos y datos LIDAR del año 2009 (*Laser Imaging Detection and*

Ranging) para evaluar posibles cambios de retroceso, altura y dinámica de estas. Además, permitiría comparar los dos métodos en cuanto a su implementación, coste o precisión.

1.2 Zona de estudio

El presente estudio, abarca las dunas del tramo Norte de la playa de l'Ahuir de Gandia localizado cerca de la desembocadura del río Vaca en Xeraco. Se trata de un área rectangular de aproximadamente 140 x 220 m cuya delimitación por coordenadas UTM zona 30 en el sistema de referencia ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) son:

X (mín.)= 743604,63 m Y (mín.)= 4324205,76 m

X (máx.)= 743836,28 m Y (máx.)= 4324470,34 m

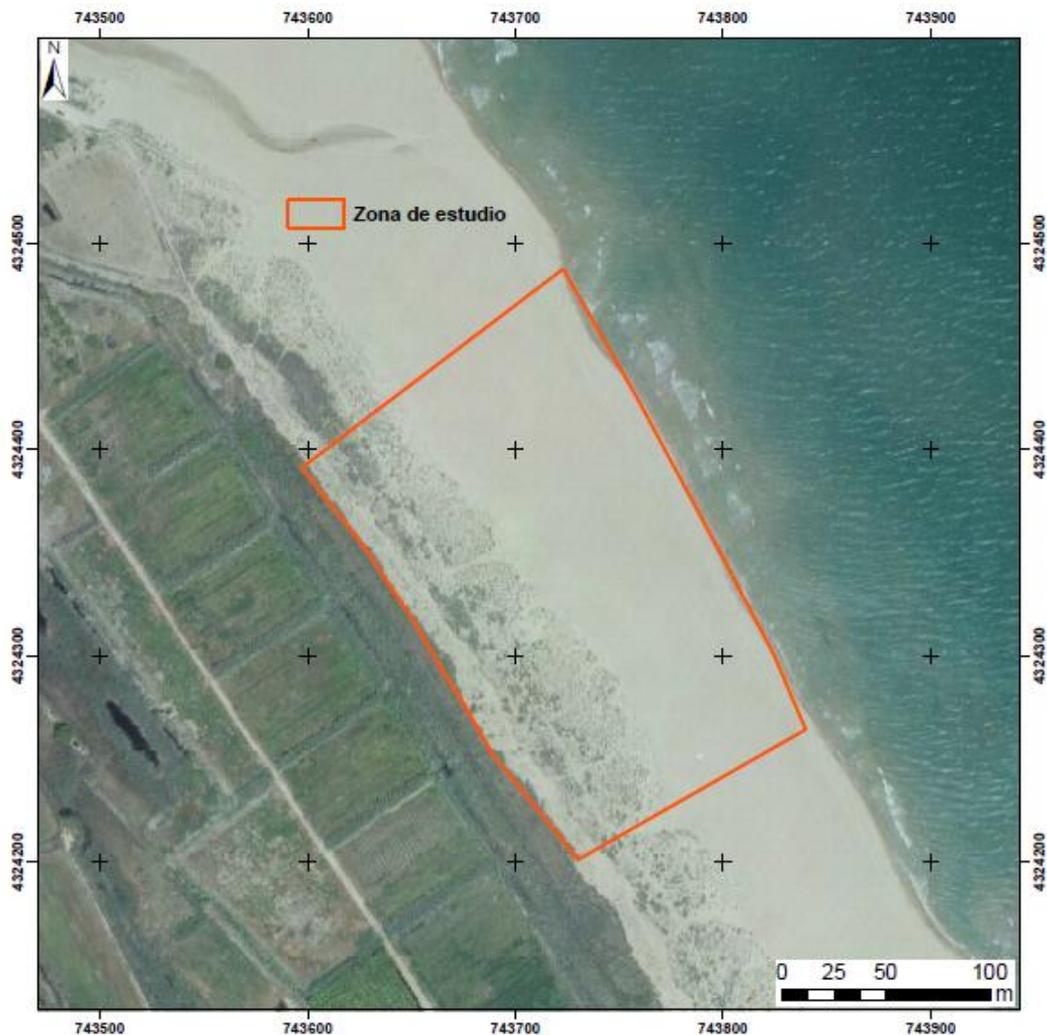


Figura 1. Localización de la zona de estudio y alrededores.



El área de estudio, se encuentra dentro de la Red Natura 2000. Se trata de un espacio declarado como Zona de Especial Conservación (ZEC) y Lugar de Interés Común (LIC) (Dunas de la Safor, código ES5233038), por la relevancia de su hábitat y la necesidad de integrarlo en una red ecológica europea con el fin de conservar su biodiversidad. Además, al situarse en la confluencia de la marjal de la Safor, el Montdúver y la desembocadura del Río Vaca en Xeraco forma parte de las Zonas Especiales de Protección para las Aves (ZEPA) “Montdúver-Marjal de la Safor” (ES0000451), también integradas dentro de la Red Natura 2000 así como también forma parte del Catálogo de Zonas Húmedas de la Comunidad Valenciana (DOCV 4336, de 16/09/2002).

1.3 Características de la zona de estudio

La zona de estudio posee unas características singulares, ya que no cuenta con edificaciones y además no posee paseo marítimo por lo que se encuentra aislada. Estos hechos le confieren el carácter de “playas casi naturales o vírgenes”, nombrada así por diversos autores (Mayoral, 2016; Moreno *et al.*, 2015), en la cual destaca la presencia importante de vegetación, sobre todo en la zona interdunar entre la duna primaria o delantera y la secundaria.

La zona al presentar una protección como ZEC, se encuentra como una zona de conectividad ecológica en las normas de gestión en cuanto a la zonificación por la presencia de hábitats y especies de interés. Los hábitats de interés comunitario presentes en el cordón dunar de la Safor y en la que se ubica nuestra zona de estudio, se encuentran en el Anexo I de la Directiva 92/43/CEE en la cual encontramos: dunas móviles embrionarias (2110), dunas móviles de litoral con *Ammophila arenaria* (2120), dunas fijas de *Crucianellion maritimae* (2210), dunas con céspede de *Malcomietalia* (2230) y dunas con vegetación esclerófila del *Cisto-Lavanduletalia* (2260). Puede verse una muestra de estos hábitats en el área que abarca este estudio (Anejo 1).

Cabe mencionar la importancia que se le da a esta zona por estar en un buen estado de conservación, con baja presión turística y urbanística y con una potencialidad enorme por albergar todo el perfil dunar (Mayoral 2016, pp. 94-95).



1.4 Antecedentes

El estudio de las dunas es complejo por la dinámica que este sistema presenta debido a la interacción de la topografía, la vegetación y los procesos eólicos. Los estudios para modelizar el sistema dunar se basan en métodos de topografía lo más rápidos y fiables ya que en poco tiempo, este sistema puede cambiar considerablemente.

El estudio de las distintas técnicas está creciendo debido a los avances tecnológicos que relegan las técnicas topográficas, con muy buena precisión como son la estación total (+/- 5cm), a un segundo plano debido al coste en tiempo y dinero (Ojeda, 2000). Otro de los sistemas ampliamente empleados es la fotogrametría en la que a través de la restitución digital se genera la ortofoto sobre la que se puede medir con la misma precisión que sobre un mapa (Wolf y Dweitt, 2000). De esta forma, con varias ortofotos en distintos periodos de tiempo, se pueden evaluar cambios en las dunas. Entre las limitaciones de esta metodología están la escala del fotograma, el coste de realizar los vuelos para la obtención de fotogramas y su posterior restitución. La teledetección espacial ha sido tradicionalmente empleada para hacer estudios de evolución y seguimiento de las playas, pero actualmente existen nuevos sensores con mayor resolución así como tecnologías satelitales y aerotransportadas que generan Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) de forma más directa o sencilla, como son el LIDAR y el GPS, empleados en este estudio.

Cabe destacar que los primeros estudios llevados sobre dunas en Valencia fueron sobre las Dunas de la Devesa del Saler, destruidas por causas antrópicas. A partir de los años ochenta empezaron los primeros levantamientos fotogramétricos y con posterioridad se emplearon métodos basados en GPS-RTK y LIDAR.



2. Materiales y Métodos

Para llevar a cabo la modelización, es necesario obtener una serie de mediciones las cuales se han obtenido mediante técnicas GPS (Peñañiel y Zayas, 2001). El GPS se trata de un sistema que proporciona posiciones terrestres mediante la medición de distancias entre las antenas emisoras de los satélites y la antena receptora de los equipos de observación.

El equipo GPS utilizado para este estudio, se trata de un modelo Leica System 1200 con el método RTK (Medición Cinemático en Tiempo Real) mediante el cual se consiguen eliminar errores propios del sistema GPS a partir de dos o más instrumentos GPS. En nuestro caso, se ha utilizado la Red de Estaciones de Referencia de Valencia (ERVA), el mantenimiento de la cual está a cargo del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV). Este organismo provee datos GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) mediante una Red Multi-propósito de medición continua y posicionamiento mediante satélite, cuyos objetivos entre otros son: dotar de coordenadas muy precisas; contribuir a la definición de los nuevos Sistemas de Referencia Globales (ITRF); ser puntos esenciales de la Red Europea EUREF de estaciones permanentes (EPN) como el sistema estándar preciso de coordenadas GPS en toda Europa, apoyado por *EuroGeographics* y respaldado por la UE (Unión Europea) y el cual se trata del sistema de referencia que constituye la columna vertebral para todos los proyectos geográficos y geodinámicos en el territorio Europeo, ya que apoya aplicaciones en tiempo real de correcciones diferenciales (DGNSS) y RTK. Por medio de esta red, se dispone de un sistema de geo-referenciación preciso y continuo en el Sistema de Referencia Geodésico ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) que permite ahorrar tiempo y costes al existir esta infraestructura pública. La estación móvil que se desplaza por el área de levantamiento, se trata del Equipo GPS Leica System 1200. El empleo de este sistema, permite reducir errores aprovechando las correcciones diferenciales de la red GNSS en tiempo real en el equipo GPS móvil empleado obteniéndose las precisiones requeridas.

Para la toma de datos, fue necesario el registro previo en el ICV para poder utilizar las correcciones diferenciales de la red GNSS en tiempo real, además de poseer una conexión

a internet mediante tarjeta SIM móvil para obtener los flujos de datos GNSS mediante el protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM vía Internet Protocol*).

El equipo GPS GNSS utilizado (Figura 2), consta de las siguientes partes: la antena, el sensor, el módem y la controladora o terminal GPS. La función que tiene la antena es recibir las señales emitidas por los satélites y se encarga de demodular la señal original; el receptor, decodifica esta señal y la convierte en información legible. El módem adaptado al receptor, emite una señal con información de la estación y la fase que está recibiendo cada satélite; la controladora es la encargada de controlar el sensor, gestionar la observación y almacenar los datos. A continuación se explicita el modo de trabajo y las pautas marcadas por la controladora.



Figura 2. Equipo GPS RTK Leyca System 1200 en la zona de estudio.

El método de medición utilizado fue el *stop and go*, por medio del cual, el receptor colocado en un jalón, se inicializa en un punto de coordenadas conocido durante un cierto tiempo (unos segundos), para que el sistema almacene la información de cada punto.

La toma de datos constó en medir puntos a lo largo de la zona del cordón dunar de estudio, considerados como críticos: el pie, la cresta y las depresiones entre crestas. Se



tomaron puntos cada metro y en especial en zonas irregulares con importantes desniveles. El cordón dunar fue el foco de medición, pero además se cogieron puntos simétricos hasta la orilla y a lo largo de la costa para realizar la modelización conjunta de la playa. También cabe destacar, la toma de puntos de control fuera de la zona de estudio, en concreto en la zona urbanizada de Xeraco, con el fin de validar la comparación de los puntos GPS muestreados en enero de 2016 y los datos LIDAR de 2009, obtenidos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea).

Los métodos de interpolación utilizados para realizar la modelización de las dunas mediante SIG se utilizaron empleando el software ArcGIS® por Esri. ArcGIS® y ArcMap son propiedad intelectual de Esri y se utilizan aquí bajo licencia. Copyright © Esri. Estos métodos son:

- **IDW (Distancia inversa ponderada):** Herramienta que utiliza los promedios de los valores de los puntos muestreados cercanos a la celda de procesamiento para estimar su valor. Cuanto más cerca este un punto de la celda que se quiere estimar, mayor influencia tendrá en el proceso de cálculo.
- **Kriging:** Se trata de un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie a partir de los puntos de entrada con valores Z (altura). Este método, requiere una investigación del comportamiento espacial del fenómeno representado.
- **Natural neighbor (Vecino natural):** Método que encuentra el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre éstas, basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (Sibson, 1981). Se conoce como interpolación de Sibson.
- **Spline with barrier (Spline con barreras):** Método que interpola una superficie de ráster, con barreras que se introducen como entidades poligonales o de polilínea, a partir de una serie de puntos utilizando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie.



- **Topo to raster (De topo a ráster):** Método diseñado para crear modelos digitales de elevación (DEM), basado en el programa ANUDEM desarrollado por Michael Hutchinson (1988, 1989, 1996, 2000, 2011). A partir de una serie de puntos se le pueden insertar restricciones a la interpolación de los valores de elevación, como son las curvas de nivel puesto que está diseñado específicamente para trabajar de forma inteligente con estos datos de entrada.
- **TIN (Red irregular de triángulos):** Método por el cual se forma una estructura de datos vectorial que divide el espacio geográfico en continuos triángulos sin solapamiento. Se usa para almacenar y visualizar modelos de superficie.

Además de ArcMAP, se ha hecho uso del módulo ArcScene, herramienta de ArcGIS que permite visualizar en 3D datos SIG con el fin de poder aproximar a la realidad la modelización llevada a cabo en el presente estudio. Así como, el software libre QSIG se ha empleado para realizar distintas selecciones aleatorias y las herramientas Statgraphics Centurion XVI.I y MS Excel 2013 se utilizaron para realizar análisis estadísticos y extraer gráficos y tablas.

3. Discusión de los resultados

La toma de puntos GPS en la zona de estudio (Figura 3) llevada a cabo con el fin de realizar una modelización por medio de técnicas de interpolación, supuso tomar 2500 puntos con una precisión inferior a 5 cm sobre zonas a lo largo del pie y la cresta de la duna primaria y secundaria, además de la zona interdunar con abundante vegetación (Figura 4). A la medición tomada, se le sumó 8 cm, en Z, correspondientes a la medida de la punta del jalón que penetró en la arena. En cuanto a la vegetación, los puntos tomados en zonas con presencia de esta, fueron tomados en el centro con el mismo mecanismo. En las zonas interdunar fue más complicado las mediciones por la alta presencia de vegetación dificultando el acceso; en zonas de pie y cresta de la duna los puntos fueron tomados con mayor facilidad.

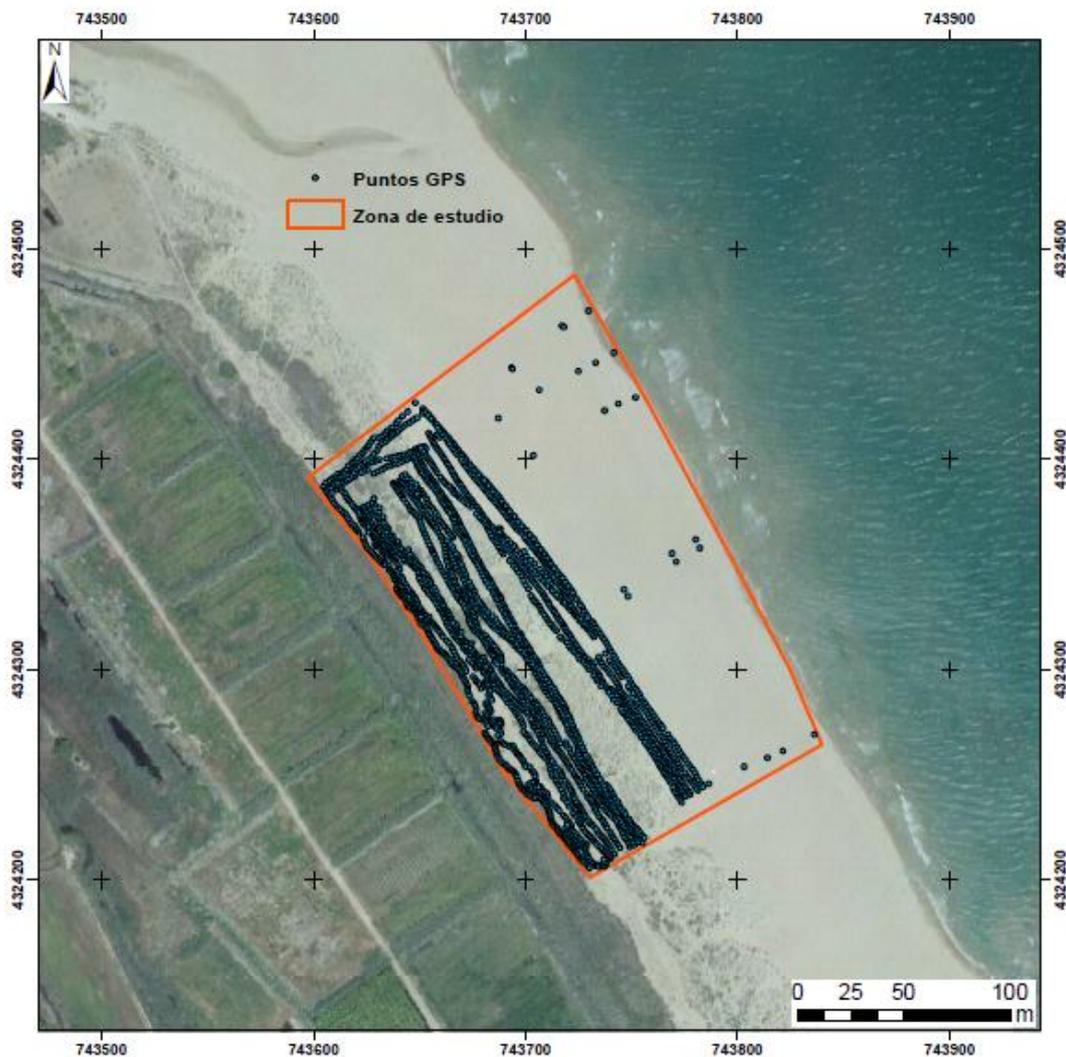


Figura 3. Red de puntos GPS tomados en la zona de estudio.

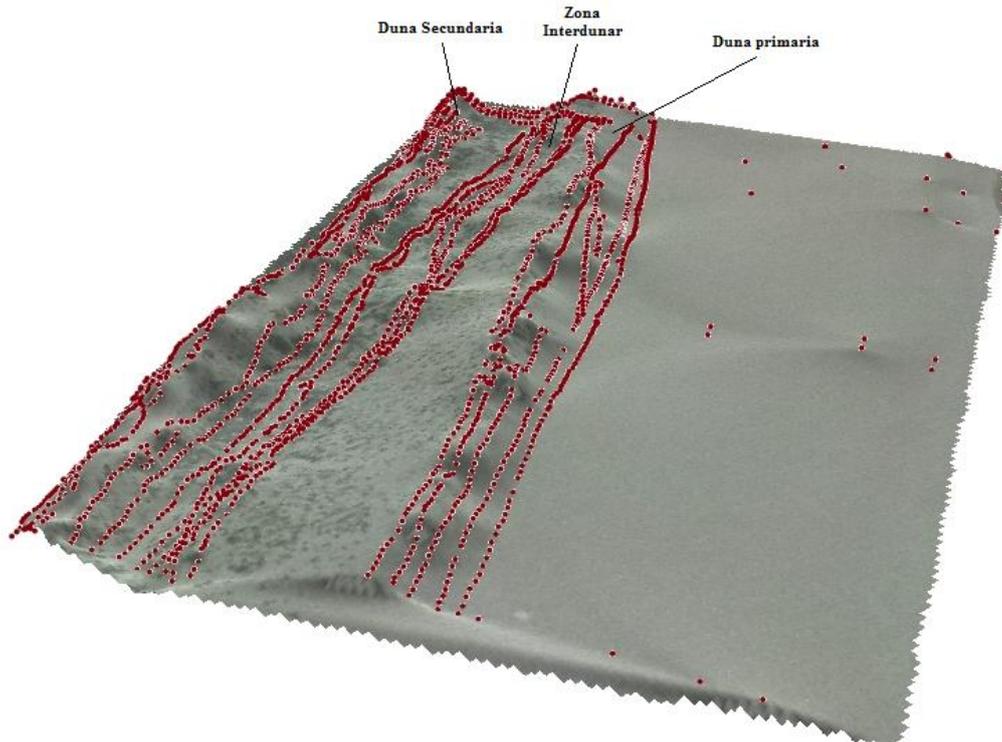


Figura 4. Representación 3D de los puntos GPS tomados en la zona de estudio.

A la hora de realizar las distintas interpolaciones fue necesario crear un sistema de validación que consistió en crear una malla (16 x 22 m). En el interior de cada celda se seleccionó un punto del levantamiento realizado. En total se utilizaron 50 puntos (Figura 5) para validar los diferentes resultados de interpolación (estos puntos no se utilizaron en la interpolación).

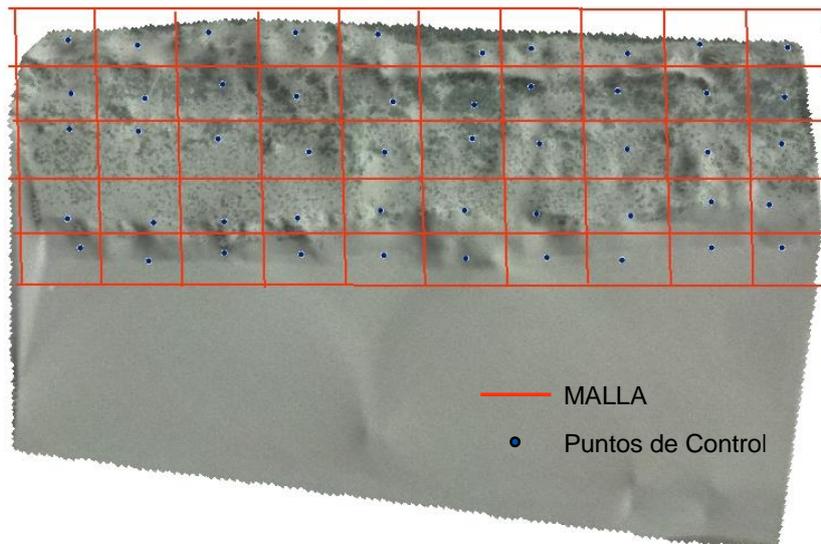


Figura 5. Puntos de control tomados a partir de cada cuadrícula de la malla.

Los puntos de control seleccionados fueron superpuestos con cada una de las modelizaciones realizadas para cada técnica de interpolación. De esta manera se calcularon las diferencias entre las elevaciones medidas en campo y los resultados de cada método para conocer qué modelo se adapta mejor a nuestra zona de estudio. Además se obtuvo el modelo tridimensional de cada método para observar como representa la superficie y se tuvo en cuenta a la hora de elegir cual es el método óptimo de interpolación.

A partir de los puntos tomados en la zona de estudio, se realizaron los distintos modelos tridimensionales aplicando los distintos métodos de interpolación (Figura 6).

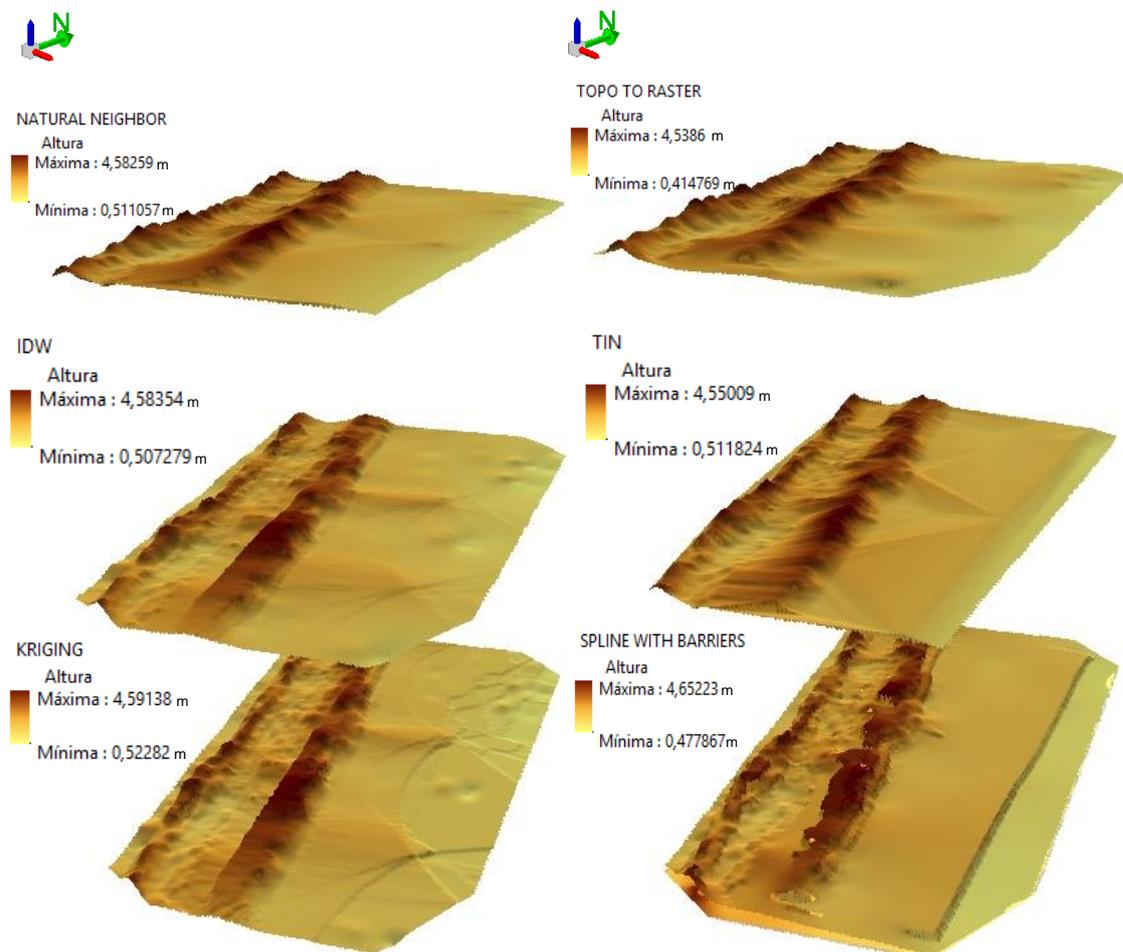


Figura 6. Modelos tridimensionales aplicando los distintos métodos de interpolación.

Se puede observar como representan la superficie los distintos métodos, así como también observar diferencias en cuanto a la forma que le dan a las dunas. Con las



imágenes obtenidas se prosiguió a realizar la validación extrayendo de cada ráster los valores adoptados de altura en las posiciones de los puntos de control. Para evaluar los diferentes métodos se calculó el Error Cuadrático Medio (ECM) para cada método de interpolación (Figura 7) empleando la siguiente fórmula (Ecuación 1):

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_i^*)^2}{n}} \quad [1]$$

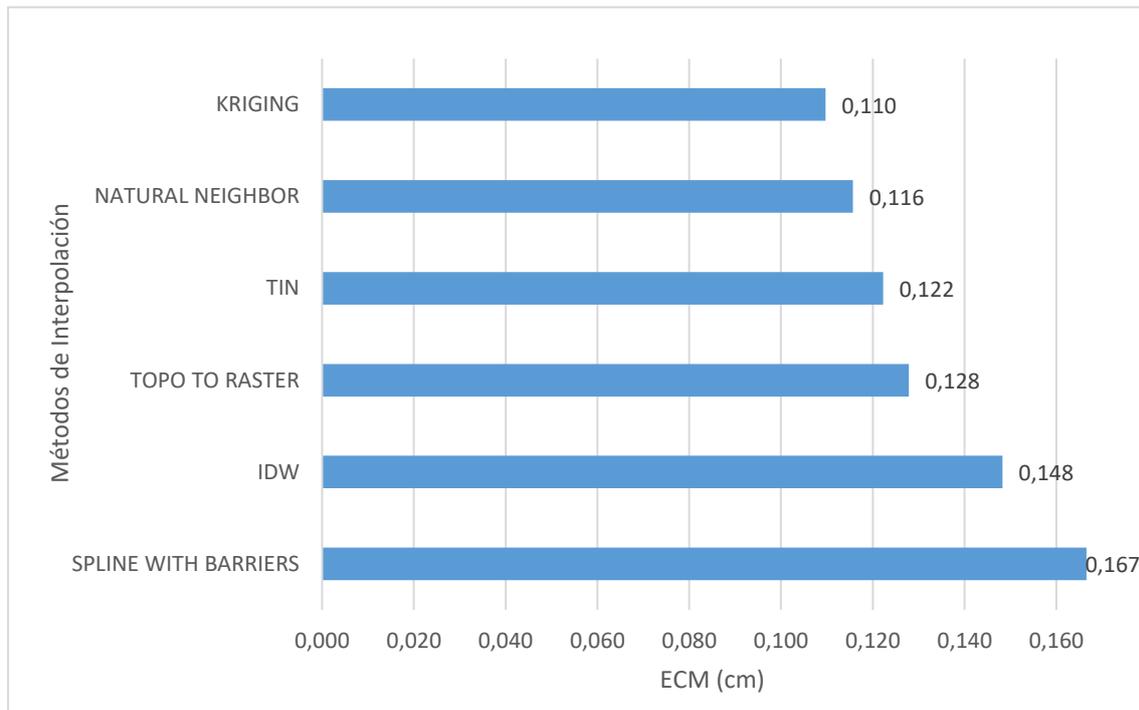


Figura 7. Aplicación del ECM para validar los métodos de interpolación.

Se traduce como la diferencia entre el estimador y lo que se quiere estimar, en este caso entre el valor de altura de los puntos de control y el ráster interpolado de las cincuenta muestras de control. Se puede observar en la *Figura 7* como las distintas interpolaciones se ajustan con buena precisión hallándose pequeñas diferencias entre los métodos llevados a cabo. Los métodos que mejor se ajustan a la morfología de nuestra zona de estudio son el *Kriging* y el *Natural neighbor*, puesto que se adecuan con buena precisión a los valores de las celdas del ráster. Pero teniendo en cuenta el modelo tridimensional generado por cada uno en el que se observa la forma conjunta de modelizar la playa junto con el cordón dunar, se tiene que el método de interpolación *Natural neighbor* es el que mejor se adapta a una zona con una topografía dunar bien definida como se puede observar en la *Figura 8*.

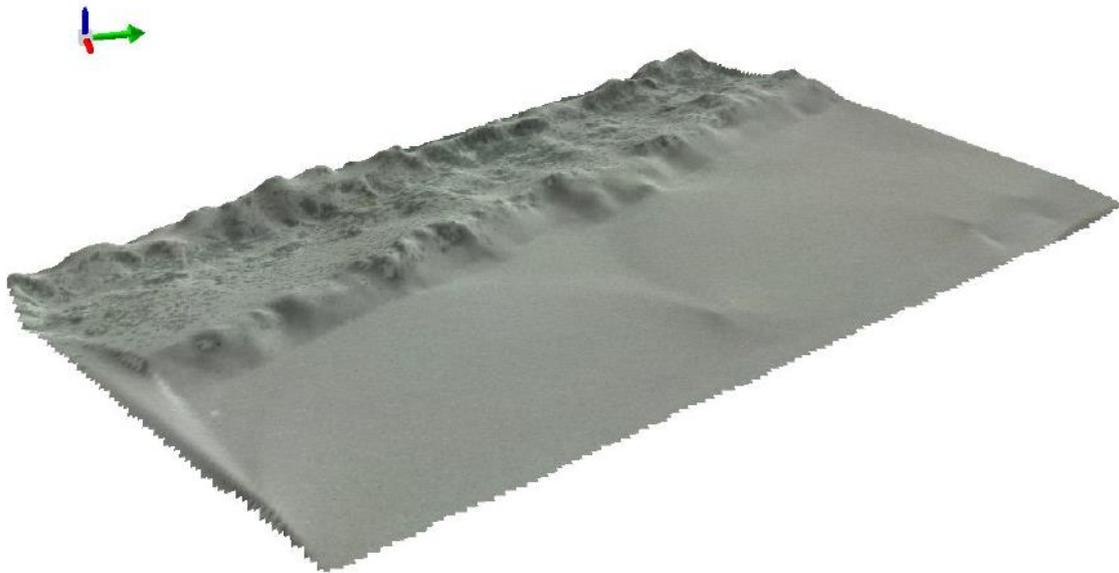


Figura 8. Modelización 3D de la zona de estudio aplicando el método *Natural neighbor*.

Mediante el software QGIS, se han hecho distintas selecciones aleatorias, con el propósito de observar el efecto que tiene el porcentaje de puntos muestreados respecto al error que presenta el modelo de interpolación en los puntos de control seleccionados. El proceso ha sido realizar una interpolación, en concreto, el *Natural neighbor* por haber sido el modelo que mejor se adapta a nuestro ambiente, para distintos porcentajes de puntos aleatorios seleccionados del total de puntos muestreados en la zona de estudio (20, 40, 60, 80 y 100 % de los puntos muestreados). Conocidos tanto el valor de la altura obtenido por el ráster interpolado a cada punto de control y el valor preciso de altura de los puntos de control extraídos, se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA) de los errores que presentan cada selección de puntos mediante Statgraphics, con la finalidad de observar si con menores medidas obtendríamos una mejor representación o un error que nos permitiera ahorrar tiempo de muestreo, bajo la hipótesis de que con una buena precisión y tomando los puntos en zonas críticas, estaríamos realizando una buena modelización apta para evaluar este sistema tan dinámico en el cual las sucesivas medidas permitirían monitorizar su evolución.

A continuación se explicitan las distintas muestras con los rangos correspondientes, las cuales han servido para realizar el análisis de la varianza (ANOVA) correspondiente (Tabla 1).



Muestra 1: 20% (500 puntos): 50 valores en el rango de -0,47096 a 0,653013 m
 Muestra 2: 40% (1000 puntos): 50 valores en el rango de -0,583176 a 0,425421 m
 Muestra 3: 60% (1500 puntos): 50 valores en el rango de -0,436267 a 0,371568 m
 Muestra 4: 80% (2000 puntos): 50 valores en el rango de -0,360692 a 0,430982 m
 Muestra 5: 100% (2500 puntos): 50 valores en el rango de -0,358094 a 0,295061 m

Tabla 1. Análisis de la varianza (ANOVA) de los errores con distintos porcentajes de muestreo. STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0,00294656	4	0,00073664	0,03	0,9987
Intra grupos	7,00749	245	0,028602		
Total (Corr.)	7,01044	249			

Se puede observar en la *Tabla 1*, el análisis de la varianza para los errores que presentan los distintos porcentajes de muestreo en los puntos de control conocidos, extraídos del total de puntos muestreados. Observando la Razón-F, existen pequeñas diferencias entre los valores medios de las muestras y respecto al Valor-P, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las 5 variables con un nivel de confianza del 95%. Se puede decir que dado la morfología dunar que presenta la zona de estudio, el método de interpolación Natural neighbor se ajusta muy bien a este sistema puesto que las distintas selecciones de puntos, se adecuan a la morfología presente. Así mismo, puesto que si existe alguna pequeña diferencia entre cada muestra, esta es respecto a la altura no significativa que le da el ráster a algún punto de control, se han analizado en profundidad las medias de los errores y se tiene que las medias próximas a cero explicarían que porcentaje de puntos muestreados en la zona de estudio sería suficiente para realizar una buena modelización con el fin de realizar un seguimiento de la zona de estudio. A continuación, se analizan las medias en cuanto al intervalo de la diferencia significativa mínima (LSD) de Fisher con un 95% de confianza (Tabla 2) y se representa gráficamente (Figura 9).



Tabla 2. Media de los errores con intervalos LSD de Fisher con un 95% de confianza para distintos porcentajes de muestreo. STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

			<i>Error Est.</i>		
	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>(s agrupada)</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
20 por ciento	50	-0,0117789	0,0239174	-0,0450907	0,0215329
40 por ciento	50	-0,00275639	0,0239174	-0,0360682	0,0305554
60 por ciento	50	-0,00447904	0,0239174	-0,0377908	0,0288327
80 por ciento	50	-0,00343279	0,0239174	-0,0367446	0,029879
100 por ciento	50	-0,00850863	0,0239174	-0,0418204	0,0248032
Total	250	-0,00619115			

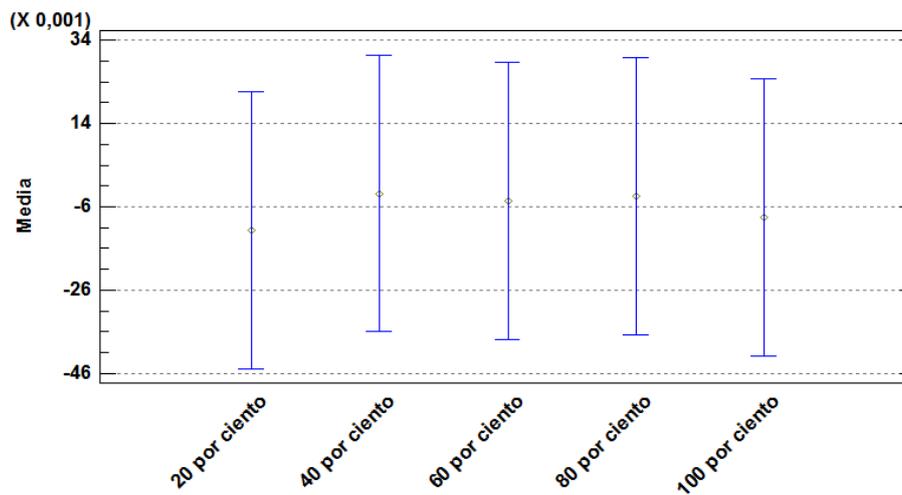


Figura 9. Representación de las medias de los errores e intervalos LSD de Fisher con un 95% de confianza. STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Como se puede observar en la *Figura 9* en la que se muestra las medias e intervalos de la diferencia significativa mínima (LSD) respecto a los errores de cada selección de puntos, se puede ver que los intervalos se solapan lo que significa que no hay diferencias significativas entre cada porcentaje de selección. Tomando la mitad de los puntos muestreados, sobre 1250 puntos GPS, entre un 40 y un 60% de los puntos totales se podría estar modelizando las dunas con una buena precisión ahorrando tiempo, recurso necesario para realizar este tipo de estudios. Así mismo, con el fin de afianzar qué porcentaje de toma de datos es suficiente, se ha calculado el error cuadrático medio (ECM) de las cinco muestras (*Figura 10*) aplicando la misma metodología que para discriminar entre métodos de interpolación. El resultado afianza lo dicho anteriormente sobre tomar la mitad de los puntos totales muestreados, puesto que la diferencia presente entre tomar la mitad o el total de puntos muestreados no es significativa y estaríamos aproximándonos con buena



precisión a la morfología bien definida que presenta la zona de estudio. Además, permitiría poder evaluar en estudios futuros la superficie del cordón dunar que se gana o pierde en un periodo de tiempo, o evaluar cómo y de qué forma se desarrolla este sistema dunar tan dinámico entre otras investigaciones.

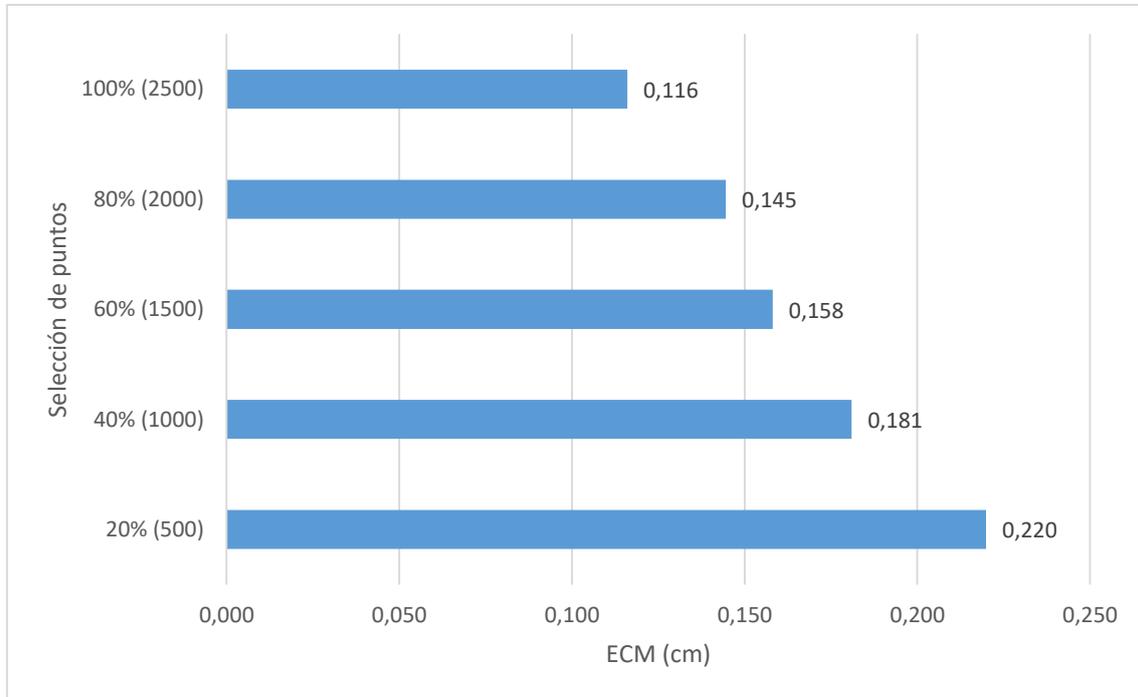


Figura 10. Aplicación del ECM para evaluar las distintas selecciones de puntos.

De forma visual se puede ver en la *Figura 11* donde aplicando el método de interpolación *Natural neighbor* para 1000 y 2500 puntos de muestreo, se obtiene una buena representación. La representación de la cresta dunar, significativa para evaluar cambios de avance o retroceso se definen claramente en las dos interpolaciones llevadas a cabo. Puesto que el valor predicho de toma de puntos corresponde al 50% de los puntos muestreados y tomando en consideración que la representación de estas selecciones se ha tomado de forma aleatoria, se tiene que en el caso de llevarla a cabo en la realidad, estaríamos tomando los puntos en consideración sobre las zonas críticas, permitiendo un monitoreo más eficiente en tiempo y recursos tanto económicos como humanos.

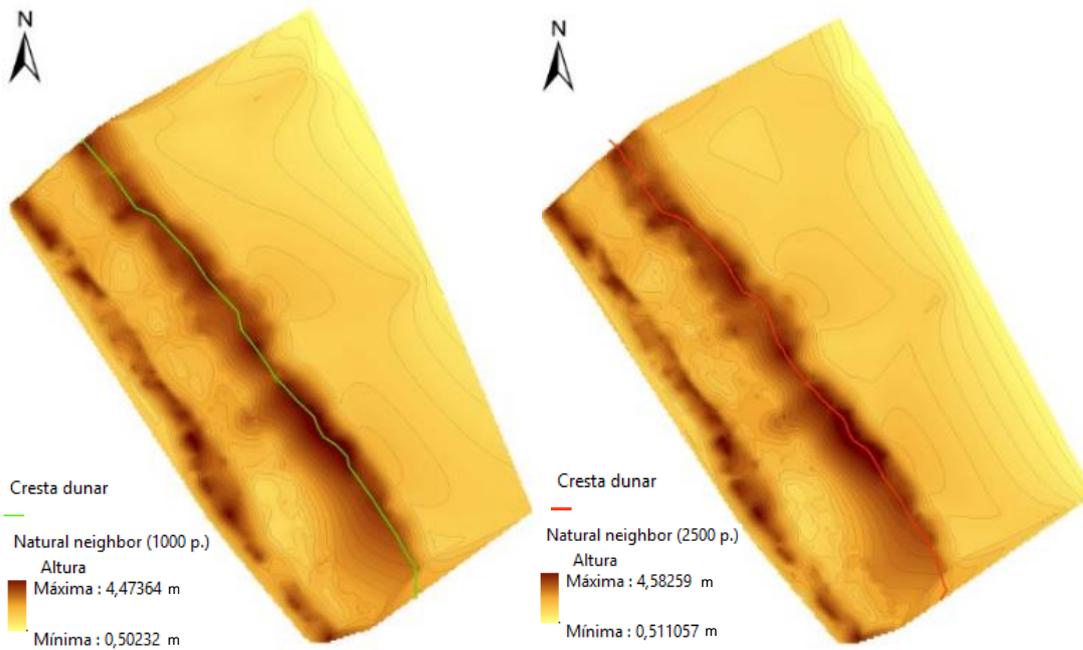


Figura 11. Método de interpolación *Natural neighbor* para 1000 y 2500 puntos GPS.

A continuación se va a comparar los datos LIDAR correspondientes a 2009 y los puntos GPS tomados en enero de 2016. La representación de los datos LIDAR en cuanto a la elevación en el área que abarca nuestra zona de estudio se puede observar en la *Figura 12*.

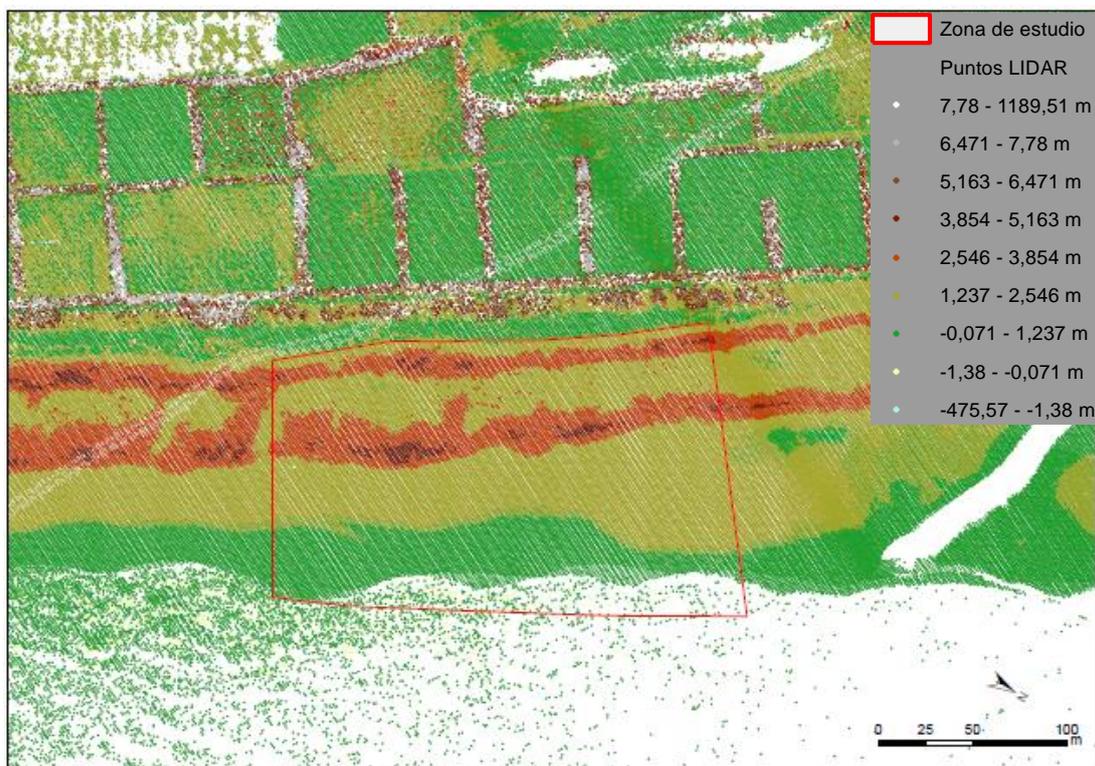


Figura 12. Representación de los datos LIDAR en el ámbito de la zona de estudio.



Para poder llevar a cabo dicha comparación, primero se ha validado teniendo en cuenta los puntos de control GPS tomados en la zona urbanizada de Xeraco y los puntos LIDAR contiguos a estos (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación y validación de los puntos GPS y LIDAR. STATGRAPHICS Centurion XVII.I.

Resumen Estadístico

	<i>Puntos GPS</i>	<i>Puntos LIDAR</i>
Recuento	2	5
Promedio	1,942	2,0
Varianza	0,000338	0,0122
Desviación Estándar	0,0183848	0,110454
Coefficiente de Variación	0,946693%	5,52268%
Error Estándar	0,013	0,0493964
Mínimo	1,929	1,88
Máximo	1,955	2,1
Rango	0,026	0,22

Posteriormente, se han procesado los datos para generar un *Terrain Dataset*, que se trata de una base de datos geográficos que ayuda efectivamente a gestionar, procesar e integrar colecciones masivas de puntos de los datos 3D que resultan de la recogida de observaciones de elevación de alta resolución usando el LIDAR entre otras tecnologías. Esta estructura permite crear un MDE en formato ráster en el que se representa los valores de altura de cada celda.

Se ha centrado el estudio sobre la cresta dunar de la duna primaria y varios perfiles conjuntos de la playa y del cordón dunar, puesto que la duna secundaria es más estable y no se observan cambios tan notorios como se aprecia más adelante en la representación gráfica de dichos perfiles. A continuación se representan los dos rásters correspondientes al LIDAR y al modelo interpolado *Natural neighbor* de los puntos GPS (Figura13).

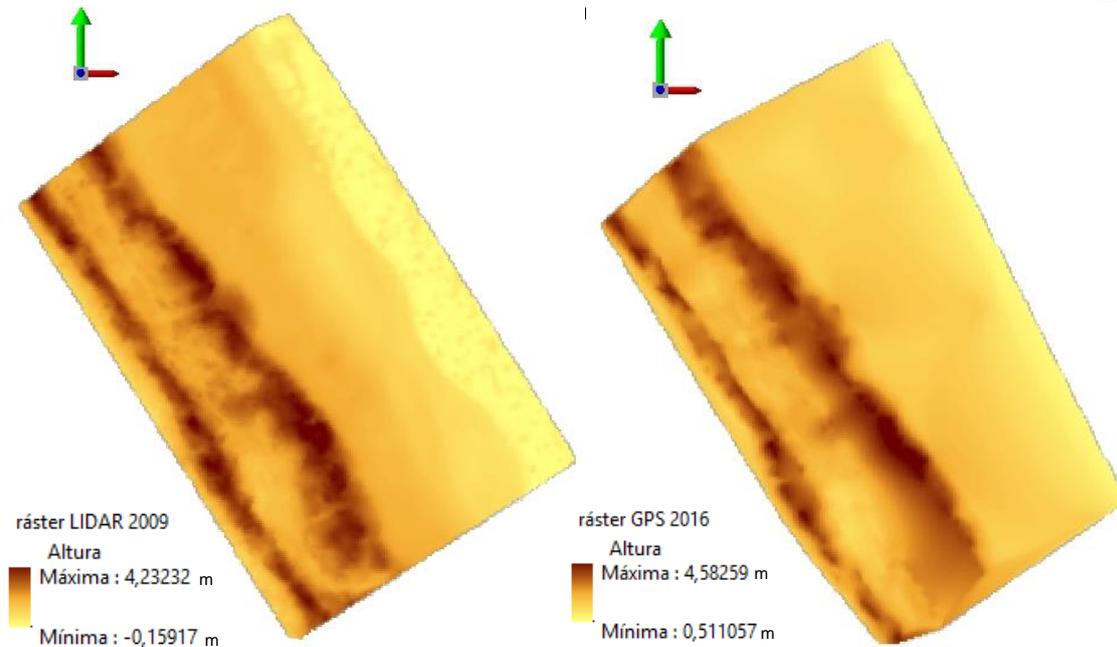


Figura 13. Superficie ráster a partir de datos LIDAR y GPS.

Como se puede apreciar en la *Figura 13* existen cambios en la altura y en la dinámica de las dunas actualmente respecto a los datos LIDAR correspondientes al 2009. Existen diferencias en la cresta dunar actual respecto a la de hace seis años y se observa un avance del frente dunar. Además, hay más arena en la zona de la playa. Esto se puede explicar teniendo en cuenta que hay una tendencia acumulativa de arena en la playa de l’Ahuir además de una disminución de la tasa neta de transporte longitudinal de sedimentos que se refleja en un avance de la línea de costa (Moreno *et al.*, 2015).

Centrando el estudio en la cresta dunar, se puede observar en la *Figura 14* como se ha producido un notable avance del frente de duna delantero en la zona de estudio, siendo la media de avance de unos 5 m y la distancia máxima de desplazamiento de unos 17 m. Respecto a las diferencias en altura, en el año 2009 la cresta dunar contaba con una altura mínima de unos 2,5 m y una altura máxima de unos 4,2 m siendo la altura media de 3,3 m. En cambio, en enero de 2016 se cuenta con una altura mínima inferior de unos 2,2 m pero una altura máxima superior de unos 4,5 m siendo la altura media de unos 3,6 m. Con esto se puede decir que el sistema dunar ha evolucionado y se hace visible en el crecimiento y desplazamiento de la duna delantera o *foredune*.

La superficie total de avance ha sido de unos 1167 m², corroborando que en la zona existe una acumulación de arena y un avance tanto de la línea de costa como del frente dunar, como se refleja en este estudio.

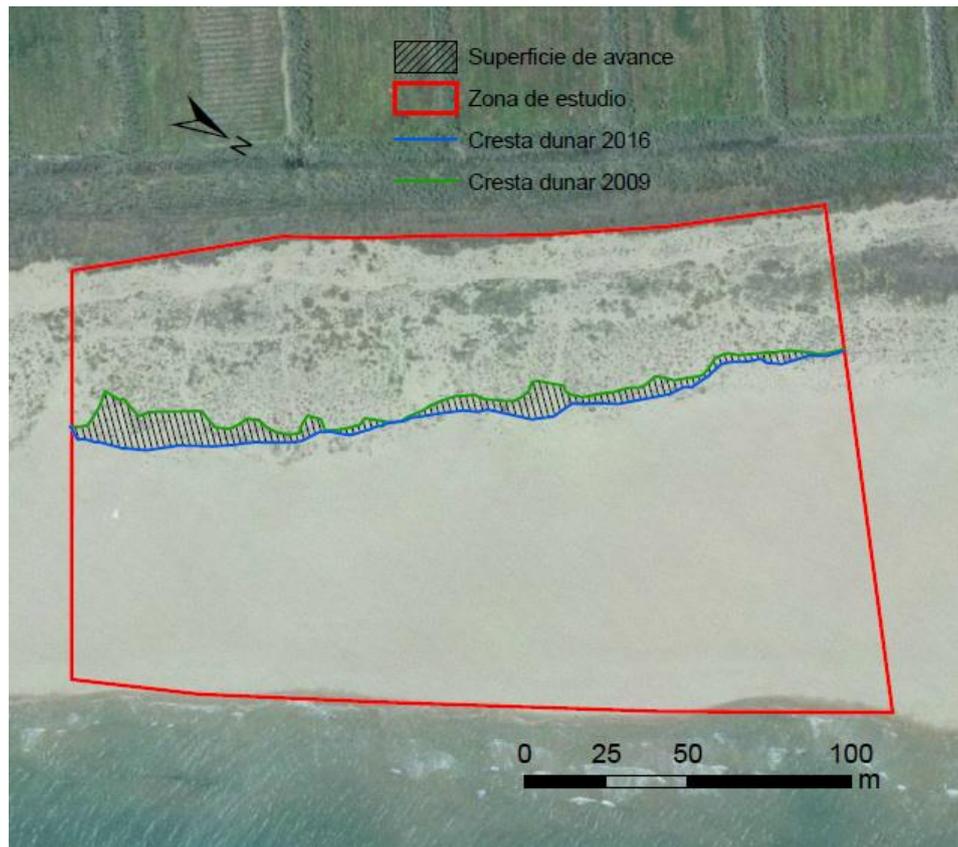
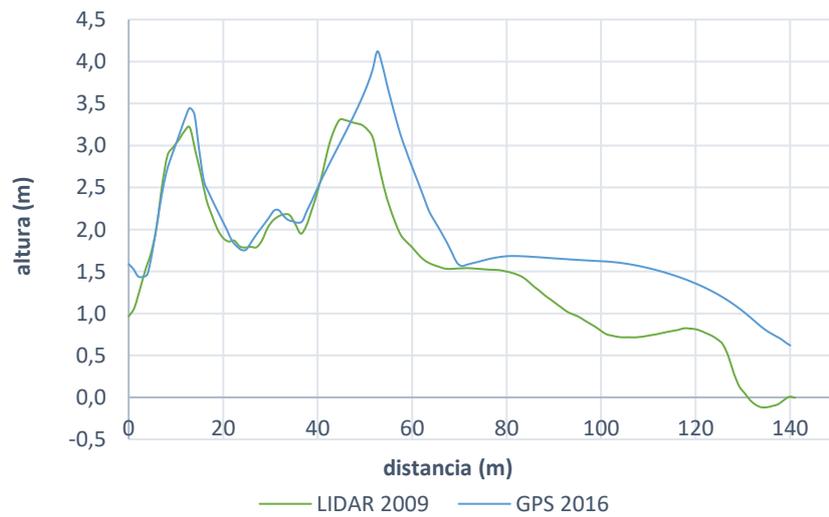


Figura 14. Cresta dunar correspondiente a 2009 y a 2016 y superficie entre ambas.

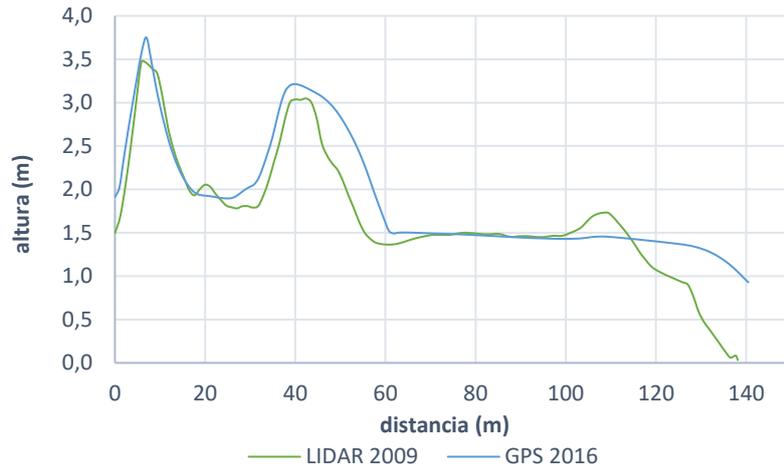
Mediante los diversos perfiles transversales en la zona de estudio (Figura 15), se denota este avance del frente dunar delantero que se refleja en los gráficos correspondientes a cada perfil (Figura 16). Se puede observar cómo no todo el perfil dunar tiene el mismo comportamiento y esto es el reflejo de la dificultad que presenta este sistema en cuanto a la dinámica, ya que el comportamiento a lo largo del cordón dunar es cambiante. Mediante técnicas GPS como la propuesta, se pueden estudiar estos cambios mediante zonas piloto de control y seguimiento de la evolución existente mediante un monitoreo en el tiempo. Además, se ha podido comprobar que de entre las técnicas existentes en cuanto al coste y la precisión, las tecnologías GPS RTK son viables para hacer este tipo de estudios y además permitirían servir como puntos de calibración de otros métodos debido a la precisión alcanzada.



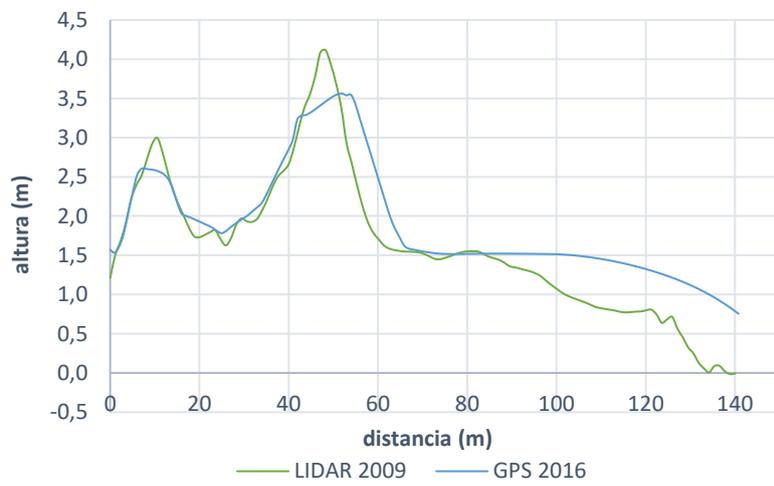
Figura 15. Perfiles transversales de la zona de estudio.



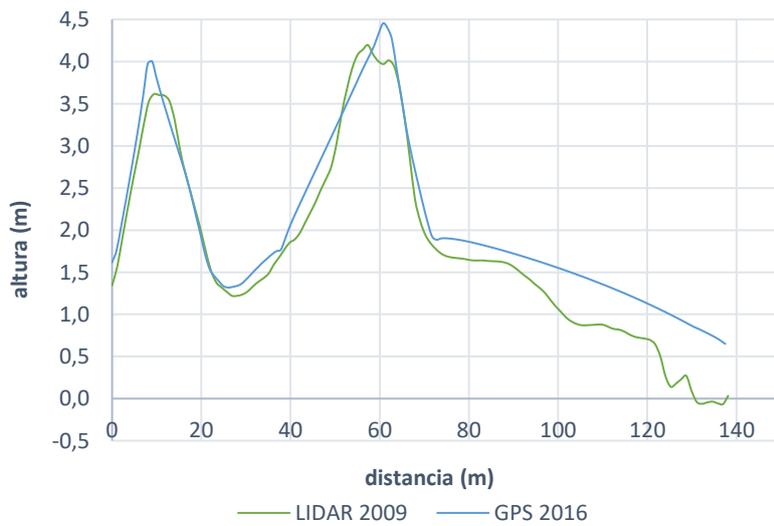
Perfil 1



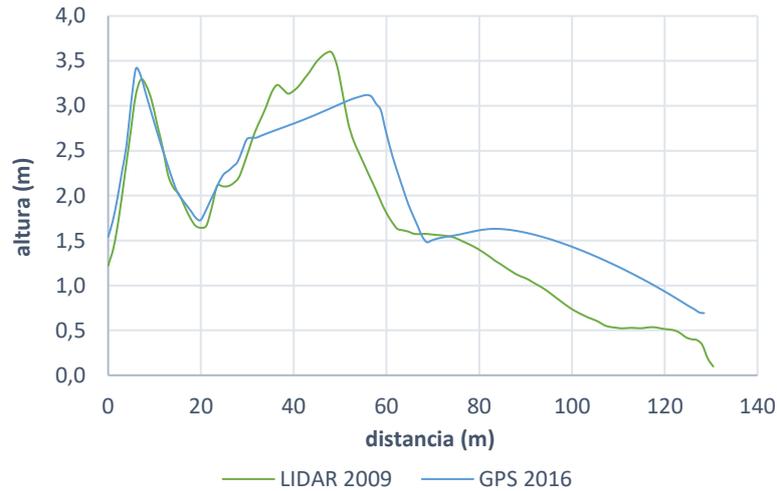
Perfil 2



Perfil 3



Perfil 4



Perfil 5

Figura 16. Gráficos correspondientes a los perfiles transversales.

Como se observa en la *Figura 16* correspondientes a los distintos perfiles transversales a lo largo de la zona de estudio, la duna secundaria es más estable puesto que está resguardada de la acción del viento y la duna primaria ha ganado superficie dunar por acumulación de arena. También es notable que estos cambios no se dan por igual en toda la zona dunar, signo del dinamismo de estos ecosistemas, así como que existe una mayor acumulación de arena en la zona de la playa.



4. Conclusión

Los objetivos planteados en este estudio basado en la aplicación de técnicas GPS RTK en el cordón dunar de Gandia, han demostrado poder llevarse a cabo de una forma sencilla y con muy buena precisión, que comparada con el LIDAR ha llegado a ser incluso favorable en la escala de aplicación en la que se centra este estudio. De este trabajo se ha podido extraer el modelo de interpolación más adecuado y versátil para modelizar las dunas como es el método *Natural neighbor*. Además, se ha podido discriminar entre la totalidad de puntos a tomar para realizar estudios en ambientes de este tipo, así como también se ha podido verificar que la línea de costa de la zona de estudio presenta un claro avance, así como una evolución perceptible del frente del cordón dunar de Gandia.

Respecto a la técnica empleada, cabe destacar tanto el mantenimiento de estaciones de redes de referencia, como es la red ERVA en Valencia proveedora de datos GNSS utilizada para obtener correcciones diferenciales, como también la implantación de nuevos sistemas de radionavegación y posicionamiento por satélite más precisos, como es el programa Galileo a nivel Europeo disponible en el futuro, que hacen posible que el empleo de estas técnicas sirva de cara al futuro tanto para la implantación de zonas piloto de control y seguimiento, como para la calibración de otros métodos por la precisión obtenida en las técnicas GPS empleadas.



5. Glosario

Sistema dunar: se refiere al conjunto de componentes que forman las dunas y las relaciones que tienen entre ellos y el entorno y de los cuales depende su evolución. Entre los principales componentes encontramos la presencia de vegetación que actúa fijando las dunas y los movimientos eólicos que transportan la arena a través del sistema.

SIG: los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son el resultado de aplicar las conocidas como Tecnologías de la Información (TI) a la gestión de la Información Geográfica (IG), que se trata de información georreferenciada. La componen datos, hardware, software, recursos humanos y un esquema organizativo.

Técnicas GPS: conjunto de procedimientos haciendo uso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). El GPS es un sistema de radionavegación que proporciona información sobre posicionamiento, navegación y cronometría, con precisiones de unos pocos metros que pueden llegar hasta los centímetros mediante técnicas diferenciales. Actualmente está basado en una constelación de 27 satélites, NAVSTAR, que varía en función de la vida útil de los satélites, y la constelación GLONASS de la Federación Rusa. En un futuro se prevé la disponibilidad de la constelación GALILEO, una iniciativa de la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea.

Interpolación: proceso que predice los valores para las celdas de una imagen ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Se conoce como imagen ráster la matriz de celdas organizadas en filas y columnas en la que se representa información, por medio del valor que contiene cada celda siendo en este estudio la elevación de la duna.

LIDAR: técnica de teledetección activa que utiliza la luz láser para obtener una muestra densa en forma de una nube de puntos de la superficie de la tierra con coordenadas X, Y y Z. A partir de esta información se puede obtener Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) que contiene información de la topografía del suelo y de los



Modelos Digitales de Superficies (MDS) que incluye información de la elevación de las copas de los árboles y las edificaciones. En suelo desnudo coincide con el MDE.

Modelo tridimensional: se trata de una representación digital de entidades, ya sea real o hipotética, en un espacio tridimensional. Los modelos se pueden crear a partir de una amplia variedad de fuentes de datos. Entre los modelos de interpolación encontramos: *IDW (Inverse Distance Weighting), Kriging, Natural neighbor, Spline, Spline with Barriers, Topo to raster, Topo to Taster by File, Trend* y *TIN (Triangulated Irregular Networking)*.



6. Bibliografía

- ANDREWS, B., GARES, P. A., y COLBY, J. D. (2002). Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology*, 48(1), 289-308.
- COSTA, M., STÜBING, G., y PERIS, J. (1989). Vegetación litoral y continental. *Guía de la Naturaleza de la Comunidad Valenciana. Sec, 2*, 303-372.
- España. Acuerdo de 10 de septiembre de 2002, del Gobierno Valenciano, de aprobación del Catálogo de Zonas Húmedas de la Comunidad Valenciana. *DOCV*, 16 de septiembre de 2002, núm. 4336, p. 23313-23331
- España. Directiva 92/43/CEE, del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 7-50
- España. Ley 11/1994, de 27 de diciembre, de espacios naturales protegidos de la Comunidad Valenciana. *BOE*, 8 de febrero de 1995, núm. 33, p. 4060-4072
- España. Ley 33/2015, de 21 de septiembre, por la que se modifica la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. *BOE*, 22 de septiembre de 2015, núm. 227, p. 83588-83632
- ESRI. *¿Qué son los datos LIDAR?*. <<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/lasdataset/what-is-lidar-data-.htm>> [Consulta: 12 de mayo de 2016]
- ESRI. *¿Qué son los datos ráster?*. <<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>> [Consulta: 12 de Mayo de 2016]
- ESRI. *Comparar métodos de interpolación*. <<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/comparing-interpolation-methods.htm>> [Consulta: 2 de mayo de 2016]
- ESRI. *Fundamentos de las superficies*. <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/3danalyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm>> [Consulta: 16 de Mayo de 2016]



- ESRI. *Terrain Datasets*. <<http://www.esri.com/news/arcuser/0311/terrain-datasets.html>> [Consulta: 2 de mayo de 2016]
- GOLDSMITH, V. (1985). Coastal dunes. *Coastal sedimentary environments*. Springer New York: Springer. 303-378.
- HESP, P. A. (1981). The formation of shadow dunes. *Journal of Sedimentary Research*, 51(1).
- INSTITUTO CARTOGRÀFIC VALENCIÀ. *Red de Estaciones de Referencia GNSS de Valencia: Red ERVA*. <<http://icverva.icv.gva.es:8080/es/gnss>> [Consulta: 5 de mayo de 2016]
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. *Centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica*. <<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadadorCatalogo.do?codFamilia=LIDAR>> [Consulta: 28 de abril de 2016]
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. *Geodesia, Estaciones permanentes GNSS*. <<https://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesGeodesiaGnss.do>> [Consulta: 5 de mayo de 2016]
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. *Modelo Digital de Elevaciones*. <<https://www.ign.es/ign/layoutIn/modeloDigitalTerreno.do>> [Consulta: 10 de mayo de 2016]
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea LIDAR*. <<http://pnoa.ign.es/presentacion>> [Consulta: 12 de mayo de 2016]
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. *Sistemas de Información Geográfica*. <<https://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesSistemaInfoGeografica.do>> [Consulta: 10 de mayo de 2016]
- JIMÉNEZ, M.J., NAVARRO, y S. PAREDES, J.M. (2009). *Descripción y uso del método RTK en los equipos GPS Leica System 1200*. Valencia: Universitat Politècnica de València.



- MAYORAL, O. (2016). *Guia botànica de les dunes de la Safor. Interpretació i educació ambiental*. Gandia: CEIC Alfons el Vell.
- MITAS, L., y MITASOVA, H. (1999). Spatial interpolation. *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications, I*, 481-492.
- MORENO, L., MARTÍN, P., LEGOAS, C., ALMENAR, J., y SUÁREZ, O. (2015). *Evolución de la línea de costa y cuantificación de los volúmenes de arena necesarios para la recuperación del tramo de costa entre la gola del estany y el puerto de Gandia*. Departamento de Puertos y Costas y Demarcación de Costas en Valencia.
- OFICINA DE COORDINACIÓN NACIONAL DE POSICIONAMIENTO, NAVEGACIÓN, y CRONOMETRÍA POR SATÉLITE. *Sistema de Posicionamiento Global*. <<http://www.gps.gov/spanish.php>> [Consulta: 12 de mayo de 2016]
- PARDO-PASCUAL, J.E., PALOMAR VÁZ, J.M., GARCÍA-ASENJO, L., GARRIGUES TALENS, P., y PORRES DE LA HAZA, M.J. (2008). “Métodos y herramientas para la monitorización de cambios tridimensionales de las playas emergidas mediante GPS-RTK y SIG”. *Congreso Internacional de Ingeniería Geomática y Topográfica. IX Congreso Nacional TOP-CART. FIG-SYMPOSIA COM. 2 y 3*. Valencia.
- PEÑAFIEL, J., y ZAYAS, J. (2001). Fundamentos del sistema GPS y aplicaciones en la topografía. *Colegio Oficial de IT en Topografía. Delegación de Madrid, Castilla-La Mancha.*, 135 pp.
- ROYAL OBSERVATORY OF BELGIUM GNSS RESEARCH GROUP. *EUREF Permanent Network*. <<http://www.epncb.oma.be/>> [Consulta: 5 de mayo de 2016]
- SANJAUME, E., y GRACIA, F. J. (2011). *Las dunas de España*. Madrid: Sociedad Española de Geomorfología.



- SANJAUME, E., y PARDO, J. (1992). "The dunes of the Valencian coast (Spain): Past and present". In *Proceedings of the third European dune congress, Galway, IE*.
- SANJAUME, E., y PASCUAL, J. P. (2011). *Las dunas de la Devesa del Saler. Las dunas de España*. Madrid: Sociedad Española de Geomorfología. 263-283.
- SHERMAN, D. J. (1995). Problems of scale in the modeling and interpretation of coastal dunes. *Marine Geology*, 124(1), 339-349.
- SIBSON, R. (1981). A brief description of natural neighbour interpolation. *Interpreting multivariate data*, 21, 21-36.
- SISKA, P. P., y HUNG, I. K. (2001). Assessment of kriging accuracy in the GIS environment. In *21st Annual ESRI International Conference, San Diego, CA*.
- WOLF, P.R. y DEWITT, B.A, (2000). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill, Washington, 624 pp.