



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INSTITUTO DE AGRIMENSURA

# **Guía metodológica de estudio inter-temporal en ecosistemas dunares con tecnología UAV/GNSS**

---

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO/A  
AGRIMENSOR/A

Agustina Perrone, Federico Scocozza

TUTOR

Ing. Agrim. Prof. Luis Alberto Calderón Ruiz

Montevideo. Septiembre de 2022

## **Página de Aprobación**

El Tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba informe de Proyecto Final de grado:

“Guía metodológica de estudio inter-temporal en ecosistemas dunares con tecnología UAV/GNSS”

Autores: Agustina Perrone, Federico Scocozza

Tutor: Ing. Agrim. Prof. Luis Alberto Calderón Ruiz

Carrera: Agrimensura

Puntaje: .....

Tribunal:

Profesor ..... (Nombre y firma)

Profesor ..... (Nombre y firma)

Profesor ..... (Nombre y firma)

Fecha: 14 de septiembre, 2022.

## **Agradecimientos**

A los docentes del Instituto de Agrimensura con los que tuvimos la suerte y el agrado de compartir y aprender a lo largo de todos estos años de formación, y en especial, al Prof. Ing. Agrim. Luis Calderón quien estuvo siempre a disposición para ayudarnos, sobre todo, durante la etapa final de este proceso. A la Aux. Docente Lic. Geóloga y Tec. Cartógrafa Irene Balado, quien desde un principio se interesó y colaboró aportando sus conocimientos sobre ecosistemas dunares, en particular, de los presentes en nuestro país, además de facilitarnos información y documentación al respecto.

A nuestros familiares, amigos y compañeros de clase y trabajo que nos brindaron su apoyo incondicional año tras año.

Gracias por ser parte de este proceso.

## **Tabla de contenido**

<b>Página de Aprobación</b>	<b>1</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>2</b>
<b>Resumen</b>	<b>5</b>
<b>Glosario</b>	<b>6</b>
<b>Introducción</b>	<b>7</b>
<b>Objetivos generales</b>	<b>8</b>
<b>Objetivos específicos</b>	<b>8</b>
<b>Marco teórico</b>	<b>9</b>
GNSS	9
UAV o VANT	11
Ortomosaico	13
Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	13
Modelo Ráster	15
Subproductos de los Modelos Digitales de Elevación	16
Gradiente topográfico	16
Modelo de Pendientes	17
Modelo de Orientación	18
Modelo de Curvatura	19
Perfiles	20
Curvas de Nivel	20
<b>Desarrollo del Proyecto</b>	<b>22</b>
<b>Estudio de zonas de dunas</b>	<b>24</b>
<b>Metodología de vuelo</b>	<b>27</b>
Elección y delimitación de la zona de estudio	27
Elección de parámetros de vuelo adecuados a la zona de estudio y planificación.	28
Salida a campo	30
<b>Procesamiento de datos</b>	<b>35</b>
Procesamiento de imágenes: elaboración de Ortomosaico y Nube de Puntos	35
Procedimiento de comparación inter-temporal	37
Importación de Ortomosaicos	38
Creación del LAS data set.	39
Filtrado de la nube de puntos LAS.	39
Creación del Modelo Digital de Elevación.	40

Alineación de los Modelos de Elevación.	41
Recorte de bordes del Modelo de Elevación.	43
<b>Elaboración de los subproductos</b>	<b>44</b>
Modelo de curvas de nivel	44
Modelo de pendientes	45
Modelo de orientación	47
Modelo de curvatura	48
Modelo de desmonte y terraplén	50
Ortoimágenes	51
Perfiles	52
Volumen	55
<b>Análisis de productos y subproductos</b>	<b>58</b>
1er Análisis: Coherencia de los resultados	58
Curvas de nivel vs. Modelo de pendiente	58
Modelo Digital de Elevaciones vs. Perfiles	59
Perfiles vs. Desmonte y Terraplén	61
2do Análisis: Comparación de subproductos de distinta época	62
Curvas de Nivel	62
Resta de Modelos de Elevación	63
Comparación de perfiles	66
Comparación de Ortomosaicos	67
Comparación de Modelo de Pendientes	68
Comparación de volúmenes	69
<b>Conclusiones</b>	<b>70</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>
<b>Anexo</b>	<b>76</b>
Tabla o “check list” de los pasos a seguir en la ejecución de la metodología.	76
Reporte de calidad del Software Pix4D.	80

## **Resumen**

El presente proyecto consiste en la definición de una metodología que permita llevar adelante un estudio inter-temporal del movimiento de dunas en la zona costera de nuestro país. Este estudio se basa en la **realización de vuelos fotogramétricos en distintas épocas, en una determinada zona dunar, con el fin de detectar cambios en su topografía, analizando los distintos modelos digitales de elevación y sus productos derivados.**

El objetivo de este proyecto es generar una guía metodológica que permita a otros usuarios relevar y obtener la información requerida, en cuanto al movimiento de dunas, de una forma automática, siguiendo una determinada cantidad de pasos, y que los productos obtenidos sean un insumo de datos para los especialistas en la temática.

## Glosario

- **Píxel:** unidad básica de una imagen digital, que se define por su brillo y color.
- **Ortofoto:** fotografía en la cual todos sus elementos se presentan a la misma escala, libre de deformaciones.
- **Modelo:** representación abstracta, conceptual, gráfica o visual de la realidad.
- **Raster:** estructura de datos en la cual los píxeles toman un determinado valor y se ordenan en filas y columnas.
- **Topografía de un lugar:** características que presenta la superficie de un terreno.
- **UAV:** vehículo aéreo no tripulado, comúnmente conocido como drone, hace referencia a una aeronave que vuela sin tripulación, la cual ejerce su función remotamente.
- **Pix4D:** Software de fotogrametría avanzada, utiliza las imágenes capturadas por los drones para generar modelos y mapas 3D, como ortomosaicos, nubes de puntos, modelos 3D y mucho más.
- **ArcMap:** Aplicación central de ArcGIS desarrollada por ESRI, se utiliza principalmente para ver, editar, crear y analizar datos geoespaciales.

## **Introducción**

Los sistemas dunares constituyen un ecosistema de transición entre el medio marino y el medio terrestre. Se consideran barreras protectoras del viento y las fuertes olas que golpean directamente al continente, facilitan el desarrollo de vegetación y fauna de gran relevancia ecológica, protegen las aguas subterráneas al evitar el ingreso de agua salina y conservan un espacio de recreación y esparcimiento por excelencia como son las playas.

Al estar en presencia de un ecosistema muy frágil y sensible a la acción antrópica, debido a millones de bañistas y visitantes que lo pisan, por la acumulación de residuos, la limpieza de las playas con maquinaria, la urbanización, entre otros, a lo largo de los años se han realizado intervenciones sobre la zona costera del país para mitigar esta situación. A los efectos de aportar información para el monitoreo y análisis de posibles soluciones que eviten pérdidas del ecosistema mencionado es que a los autores les resulta motivante elaborar una metodología que tenga como objetivo final generar insumos encargados de modelar y representar la topografía de los sistemas dunares, a lo largo del tiempo.

Tanto en la Agrimensura como en muchas otras profesiones, el gran avance tecnológico y la creación de nuevas metodologías de trabajo han venido de la mano con una mayor eficiencia y calidad en cuanto a la realización de tareas propias de cada rubro. Los vuelos fotogramétricos realizados con tecnología UAV (*unmanned aerial vehicle o vehículo aéreo no tripulado, en Español*) son parte del avance antes mencionado, y su aplicación para el estudio de la zona costera de nuestro país es la principal temática que el presente pretende desarrollar.

### **Objetivos generales**

El objetivo general de la unidad curricular es que los estudiantes, próximos a egresar puedan materializar su aprendizaje obtenido en el diseño, elaboración y ejecución de un proyecto vinculado a la práctica profesional de la carrera de Ingeniero Agrimensor, o en un proyecto de investigación orientado a los aspectos creativos y de desarrollo metodológico. Deberá incluir en su formulación temas que lo diferencien de una simple aplicación de conocimientos o técnicas adquiridas durante el desarrollo de la formación.

### **Objetivos específicos**

Generar una **guía metodológica para detectar cambios inter-temporales en la topografía de zonas dunares, a partir de vuelos fotogramétricos.**

## Marco teórico

### GNSS<sup>1</sup>

Los GNSS o Global Navigation Satellite Systems (Sistemas Satelitales de Navegación Global) nos permiten obtener la posición geoespacial de un receptor referida a un determinado sistema de referencia global, utilizando técnicas de navegación satelital. Éstas últimas se basan en la obtención de la distancia entre el receptor y los satélites a través de la emisión de una señal por parte de este último. Con dicha distancia, se calcula la posición deseada utilizando las efemérides, las cuales brindan información acerca de la posición de los satélites y la época en la cual se realizó la medición.

Para obtener la posición, se requieren de al menos cuatro satélites, ya que además de las tres incógnitas existentes por la ubicación tridimensional, se le agrega una por la incógnita referida al tiempo. Usualmente el sistema utiliza más de cuatro satélites para mejorar las precisiones. Las constelaciones existentes constan de entre 21 y 30 satélites orbitando la Tierra a una distancia desde la superficie de entre 21000 y 25000 kilómetros.

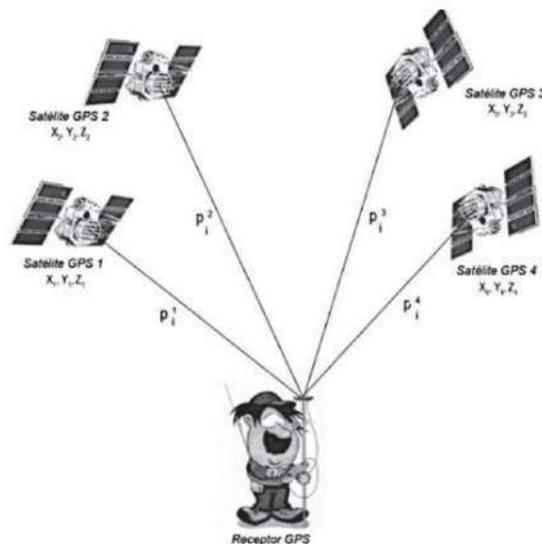


Fig 1. Funcionamiento de GNSS. Fuente: "GNSS-GPS: Fundamentos y Aplicaciones en Geomática"

---

<sup>1</sup> Visto en Unidades Curriculares: Topografía y Geodesia

Un punto importante a destacar en estos sistemas de medición es la posibilidad de realizar correcciones en tiempo real (RTK - Real Time Kinematic) o en post proceso y así obtener una posición más segura y confiable.

Las correcciones en tiempo real pueden ser llevadas a cabo utilizando una base fija en campo que comparte sus correcciones a través de una radio externa o interna del equipo. Otra opción para las correcciones RTK es utilizar el protocolo Ntrip que utiliza internet para conseguir las correcciones de una red de bases ubicadas a lo largo del territorio.

El post proceso se realiza luego de realizado el relevamiento, y utiliza efemérides que son publicadas en internet cada un determinado tiempo, dependiendo de la precisión buscada. Este método no es útil a la hora de replantear un determinado punto, como sí lo son las correcciones en tiempo real.

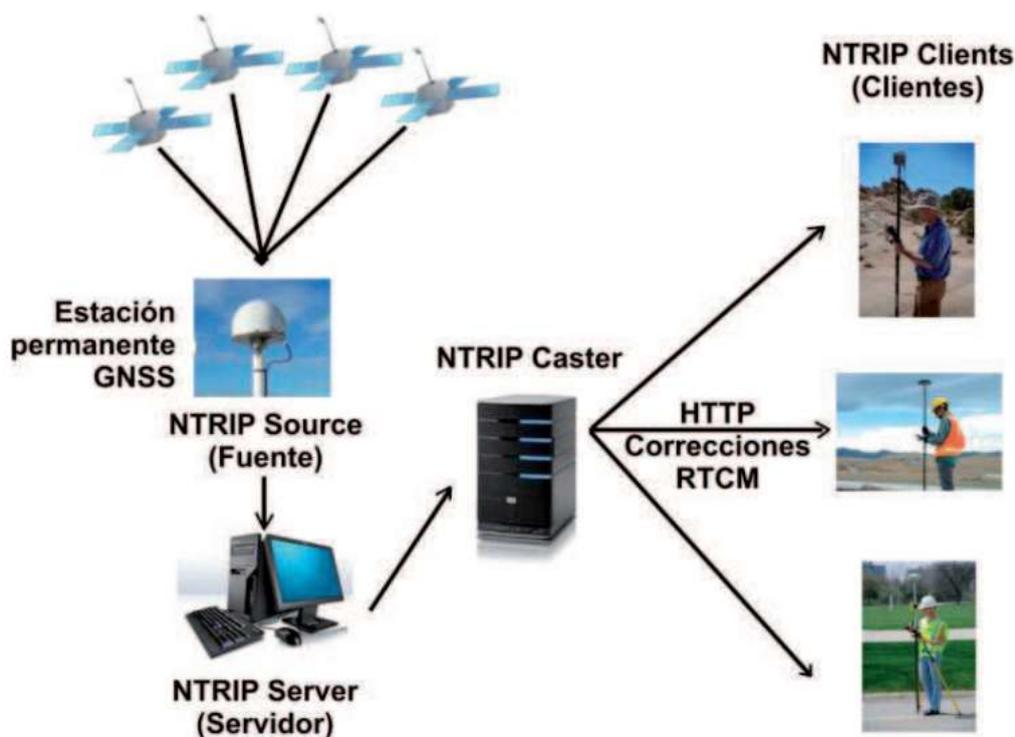


Fig 2. Esquema de funcionamiento de protocolo Ntrip. Fuente: "GNSS-GPS: Fundamentos y Aplicaciones en Geomática"

## UAV o VANT<sup>2</sup>

Un Unmanned Aerial Vehicle (UAV) o Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) es, como lo indica su nombre, un vehículo aéreo dirigido remotamente por un usuario mediante el uso de una controladora por lo que no necesita tripulación.

Estos vehículos suelen tener una cámara fotográfica la cual varía en cuanto a sus características y especificaciones según el tipo de VANT que se esté utilizando.

También son conocidos como Drones y en los últimos años, su uso en la fotogrametría ha tenido un gran crecimiento. Su desarrollo ha logrado que hoy en día, se pueda contar con Drones que navegan con un sistema GNSS, y que obtienen correcciones en tiempo real (RTK) mediante un protocolo Ntrip, a través de una conexión a internet. Como resultado, con un VANT con dichas características, se puede llevar a cabo relevamientos topográficos de gran extensión, obteniendo productos como Ortofotos y Modelos Digitales de Elevación de altas precisiones, en un tiempo considerablemente menor que utilizando técnicas de topografía tradicional, reduciendo así los costos de trabajo en campo.

En cuanto a su clasificación, se pueden diferenciar tres tipos de Drone; de ala fija, de ala rotatoria, y un híbrido entre ambos. Los segundos, de ala rotatoria, son los más comunes del mercado, y a diferencia de los de ala fija, no requieren de una velocidad inicial para su despegue.

---

<sup>2</sup> Visto en Unidades Curriculares: Fotogrametría y Captura de Datos por Percepción Remota



*Fig 3. Drone Phantom 4 RTK - DJI (de ala rotatoria) - Fuente: dji.com*

En la ejecución del presente proyecto se emplea un vehículo aéreo no tripulado Phantom 4 RTK - DJI, brindado por el Instituto de Agrimensura de Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Dispositivo diseñado para aplicaciones fotogramétricas, capaz de alcanzar precisiones centimétricas debido a que posee un sistema GNSS.

Dentro de sus características principales, se destacan:

- Sensor de tipo CMOS, de 1 pulgada y 20 megapíxeles
- Alcance de hasta 7 kilómetros
- Puede lograr un tamaño de píxel en el suelo (GSD, por sus siglas en inglés) de 2,74 centímetros a 100 metros de altitud
- D-RTK2: compatibilidad con estación móvil
- Hasta 30 minutos de autonomía
- Controladora con software de planificación de vuelo integrada, GS RTK
- Se pueden importar archivos en formato KML o KMZ

### Ortomosaico<sup>3</sup>

Un Ortomosaico es una imagen creada a partir de varias fotografías corregidas de forma tal que el punto de vista de la cámara no afecte la posición real de los objetos. Es decir, sin importar qué parte de la imagen estoy observando, el punto de vista siempre será el zenit.

Para lograr este mosaico de fotos ortorrectificadas, se debe contar con una colección de imágenes las cuales han sido corregidas en cuanto a su distorsión geométrica y balance de blancos con el fin de lograr un Ortomosaico continuo. Para lograr este tipo de correcciones, el software utiliza el Modelo Digital de Elevaciones de la zona.

Una de las grandes utilidades de este tipo de productos es la capacidad que tiene el usuario de poder medir distancias y áreas sobre la imagen con un alto grado de precisión.

### Modelo Digital de Elevaciones (MDE)<sup>4</sup>

La realidad puede ser representada de una manera más simple en lo que definimos como modelo. Éste último realiza una versión menos compleja de la realidad ya que no es capaz de reproducir todas las propiedades de un objeto en estudio, sino un número finito de éstas.

Dentro de las categorías de modelos, se tienen los analógicos y los digitales. Los primeros son representaciones en formato físico como por ejemplo un mapa topográfico, mientras que los últimos son representaciones en formato digital, es decir, están codificados en cifras y permiten ser trabajados de una manera cuantitativa por medios informáticos.

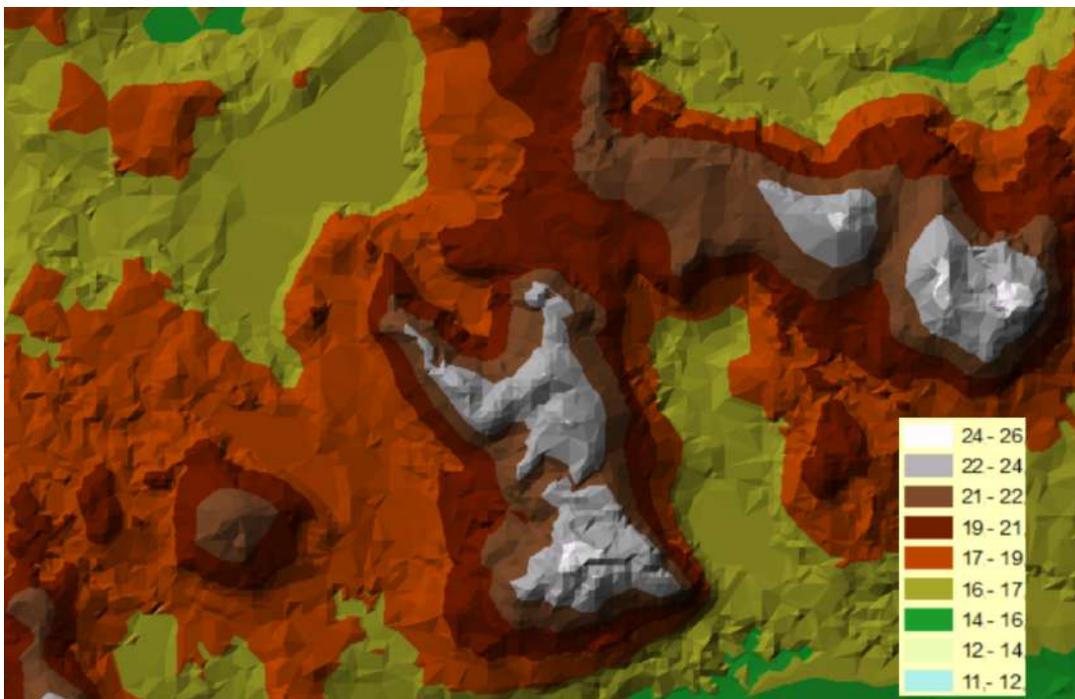
---

<sup>3</sup> Visto en Unidades Curriculares: Sistemas de Información Geográfica y Captura de Datos por Percepción Remota

<sup>4</sup> Visto en la Unidad Curricular: Sistemas de Información Geográfica

Un Modelo Digital de Elevaciones es una categoría dentro de los modelos, la cual utiliza la distribución espacial de las alturas de la superficie como propiedad a representar. Es decir, cada valor de altura es acompañado por sus correspondientes coordenadas, ya sea en un sistema local o global.

Según la forma en la que estos modelos representan los datos, existen dos grupos de MDE; vectorial y raster. El primero utiliza puntos y líneas para definir la altura mientras que el modelo raster representa dicha propiedad mediante píxeles de una determinada superficie.



*Fig 4. Ejemplo de MDE. Fuente: elaboración propia.*

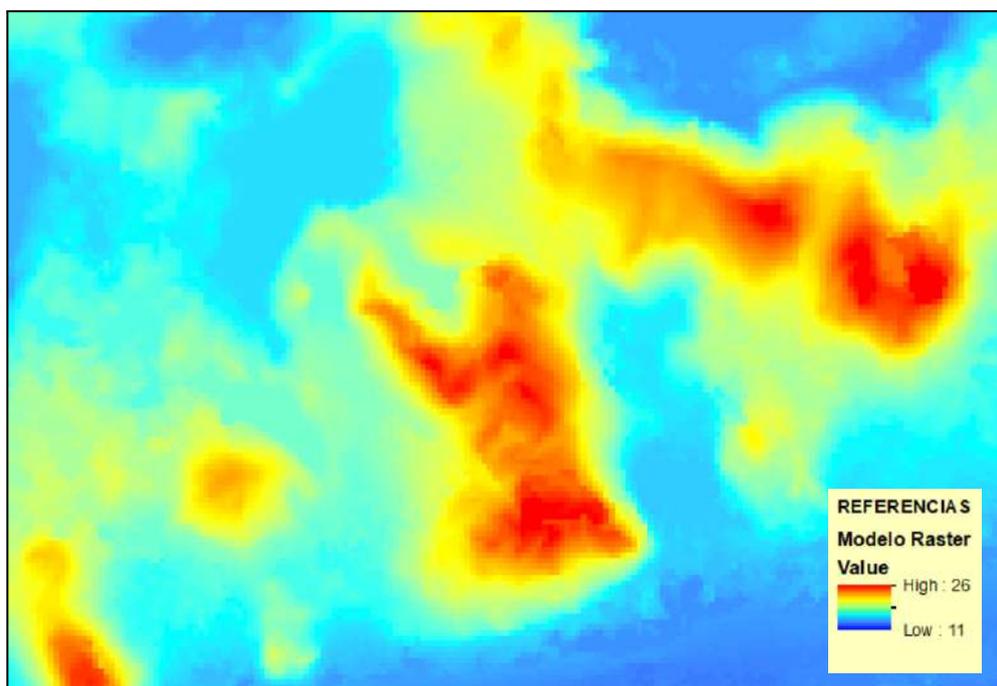
## Modelo Ráster<sup>5</sup>

La estructura de estos modelos se basa en la representación mediante mallas regulares en donde cada unidad elemental de la misma es representada por un píxel, generalmente cuadrado, al cual se le asigna un determinado valor.

En el caso de los MDE representados mediante Modelos Raster, cada píxel tiene un valor de altura, que es el valor que mejor representa las alturas dentro de ese cuadrado. Éste último tendrá un determinado tamaño según la escala de estudio.

Los valores de altura en los píxeles son determinados a partir de la interpolación de otro tipo de modelos o a partir de métodos fotogramétricos.

Estos modelos pueden ser analizados de una manera cualitativa o cuantitativa, mediante distintas operaciones entre matrices, según el objetivo del usuario, y son una buena opción a la hora de representar elementos continuos como la topografía de un lugar.



*Fig 5. Ejemplo de Modelo Raster. Fuente: elaboración propia.*

---

<sup>5</sup> Visto en Unidades Curriculares: Sistemas de Información Geográfica y Captura de Datos por Percepción Remota

## Subproductos de los Modelos Digitales de Elevación<sup>6</sup>

A partir de los MDE definidos previamente, se pueden generar subproductos que describen distintas características del terreno. Éstos son Modelos Digitales derivados exclusivamente de la topografía del terreno, sin la necesidad de incorporar información externa.

Pueden obtenerse Modelos Digitales de Pendientes, Orientación, Curvatura, Rugosidad, Convexidad, entre otros.

Para llevar a cabo dichos subproductos, es necesario definir el concepto de Gradiente Topográfico, ya que el software de procesamiento va a utilizar dicho gradiente para el cálculo de los Modelos Derivados.

### *Gradiente topográfico*

En un determinado punto (X,Y) se puede definir un plano de ajuste “Z” que representa la elevación en dicho punto dentro de un pequeño entorno.

$$Z = a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{01} \cdot y$$

Por definición, los coeficientes  $a_{10}$  y  $a_{01}$  del plano son las derivadas primeras de la altura con respecto a X e Y. Dichas derivadas pueden ser representadas por los vectores definidos de la siguiente forma:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \partial x \\ 0 \\ \partial z \end{bmatrix}; \vec{w} = \begin{bmatrix} 0 \\ \partial y \\ \partial z \end{bmatrix}$$

Entonces, el Gradiente Topográfico es definido como el producto vectorial  $V \times W$ , perpendicular al plano de ajuste “Z”.

---

<sup>6</sup> Visto en Unidades Curriculares: Sistemas de Información Geográfica y Topografía

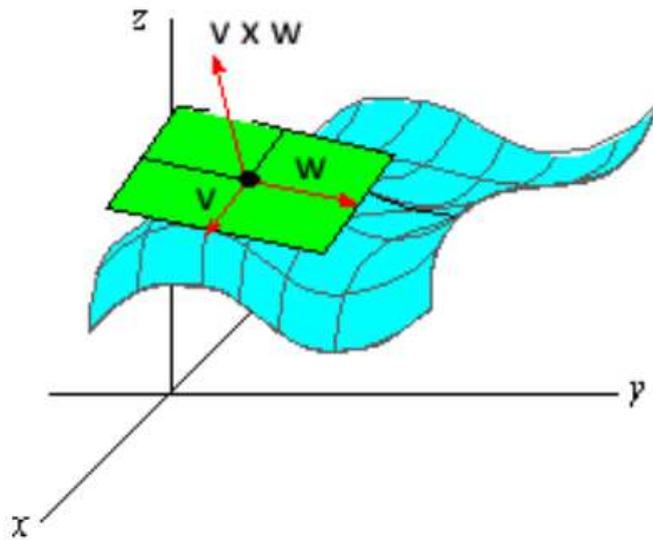


Fig 6. Gradiente Topográfico. Fuente: Material de Estudio del curso SIG Avanzado.

### Modelo de Pendientes

La pendiente en un punto es el ángulo que forma el gradiente en ese punto con el eje vertical Z. El Modelo de Pendientes será un raster en donde cada píxel tiene el valor de dicho ángulo, representando la inclinación de cada celda del ráster.

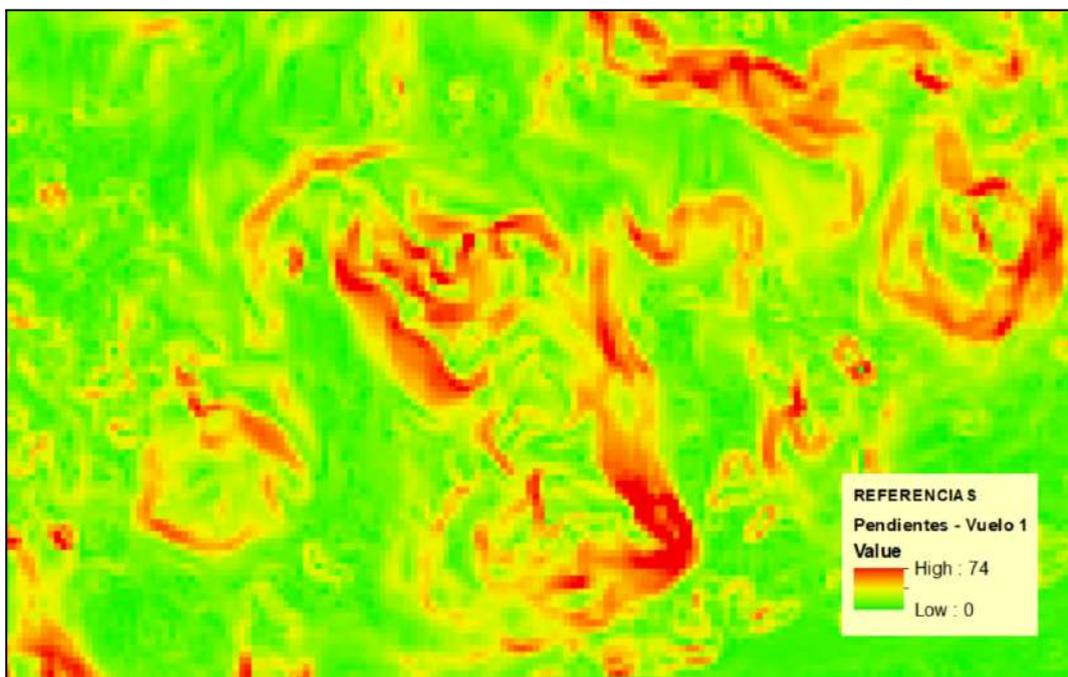
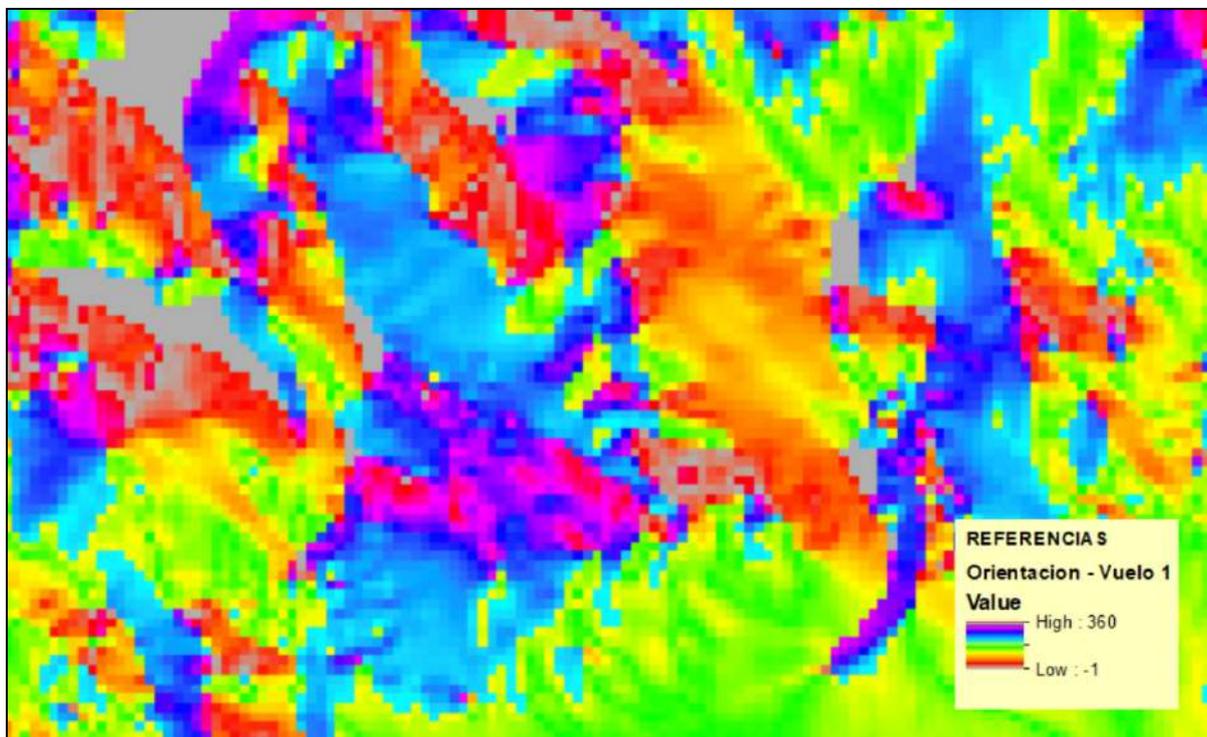


Fig 7. Ejemplo de Modelo de Pendiente. Fuente: elaboración propia.

### *Modelo de Orientación*

La orientación se define como el ángulo que forma la dirección Norte en el plano de ajuste, con la proyección en el mismo plano del Gradiente Topográfico. El Modelo de Orientación, entonces es un raster en donde cada píxel tiene el valor del ángulo.

El valor 0 representa la orientación Norte y se mide en sentido horario hasta 360 grados formando un círculo completo. El valor -1 representa las zonas planas (Fig.9).



*Fig 8. Ejemplo de Modelo de Orientación. Fuente: elaboración propia.*

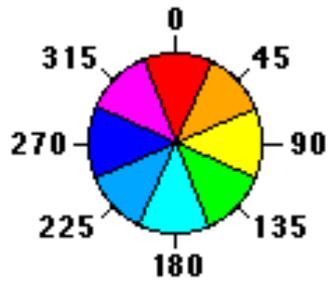


Fig 9. Referencia de valores de píxel. Fuente: <https://pro.arcgis.com>

### *Modelo de Curvatura*

La Curvatura de un punto P es la variación de la pendiente en el entorno del punto y es calculada a partir de las derivadas de segundo orden de la altura de P.

Este producto derivado puede ser práctico a la hora de estudiar la curvatura de manera direccional, analizando cambios bruscos en la pendiente. Además, indica cuando la superficie es cóncava o convexa.

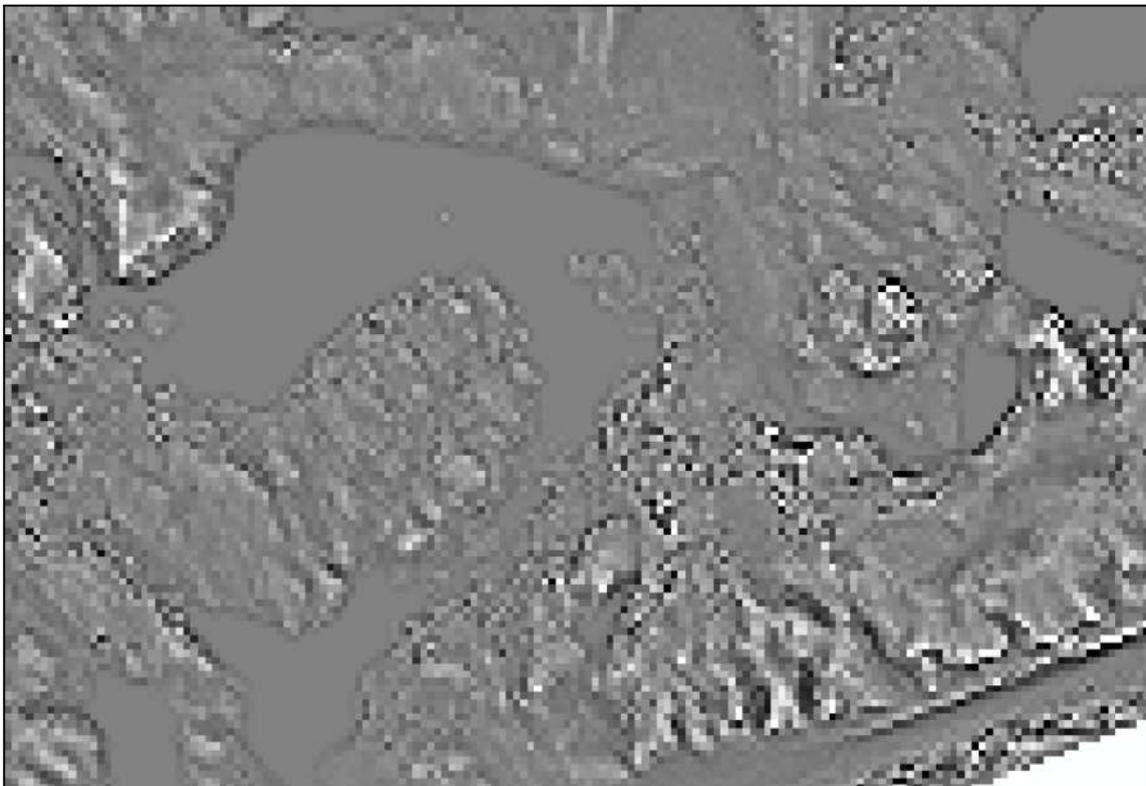


Fig 10. Ejemplo de Modelo de Curvatura. Fuente: elaboración propia.

## Perfiles

Una vez obtenido el Modelo Digital de Elevaciones, es posible realizar perfiles transversales, longitudinales o en cualquier dirección que se desee, dependiendo del objetivo que se quiera alcanzar con el mismo.

Un perfil es la representación gráfica del corte del MDE con un plano vertical, en una determinada dirección. Este subproducto puede brindar información importante en cuanto a la topografía del lugar, y si un mismo perfil es realizado en distintas épocas puede ser útil para observar cambios en el terreno.

Los perfiles son generalmente utilizados en obras civiles como por ejemplo en un proyecto vial, en donde se puede analizar volúmenes de desmonte y terraplén.

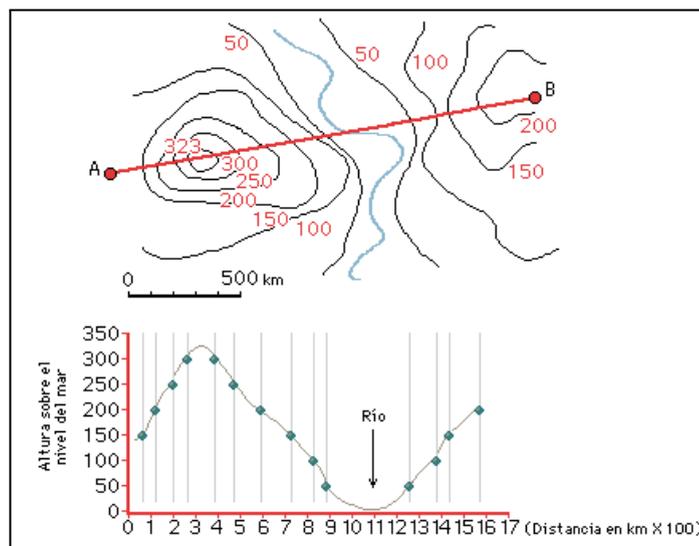


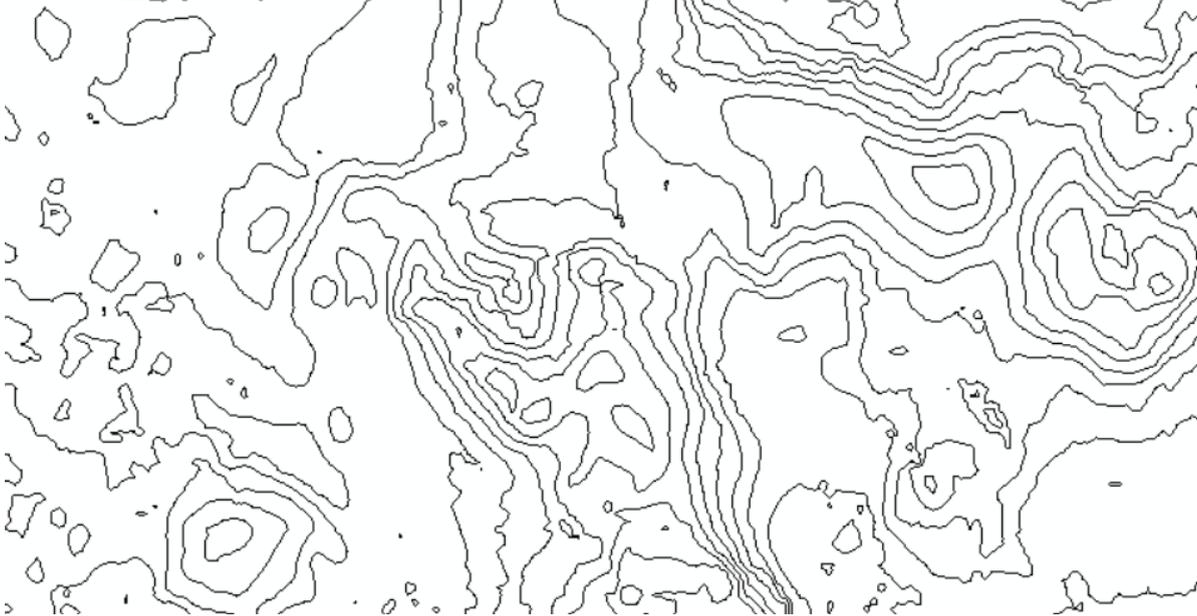
Fig 11. Perfil Topográfico. Fuente: cursosgis.com

## Curvas de Nivel

Las Curvas de Nivel son líneas que representan, a lo largo de un territorio, un mismo valor de la variable altura, o sea de la coordenadas Z.

El usuario puede analizar la distribución de las curvas y diferenciar zonas en donde la topografía posee pequeñas pendientes (las curvas presentan una considerable

separación entre ellas) o grandes pendientes (las curvas presentan poca separación entre ellas).



*Fig 12. Ejemplo de Curvas de Nivel. Fuente: elaboración propia*

## Desarrollo del Proyecto

Para cumplir con los objetivos fue necesario seguir una serie de pasos como muestra la siguiente imagen:



Fig 13. Esquema del paso a paso del Proyecto. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, se opta por elegir una zona de la región costera del país, donde poder realizar el estudio objetivo. Para ello, se tienen una serie de charlas con la Lic. Geóloga y Tec. Cartógrafa Irene Balado, quien ha formado parte de equipos interdisciplinarios abocados al estudio y monitoreo de algunas de las playas uruguayas, con el objetivo de evaluar qué parámetros podrían ser importantes detectar con la metodología que se quiere generar y qué zonas de dunas de la costa del país son interesantes estudiar a efectos de poder aportar insumos que efectivamente brinden información útil.

Luego de elegida la zona, se comienza a planificar posibles metodologías de vuelos fotogramétricos. **Se llevan a cabo dos vuelos de prueba, uno con fecha del 28 de enero y otro el 8 marzo del presente año**, aproximadamente con un lapso de un mes entre ambos para poder detectar cambios significativos en la zona. El

objetivo de esta etapa es poder estudiar el funcionamiento del equipo empleado, dron Phantom 4 con RTK, y evaluar la comparación de los productos que se obtienen de los distintos vuelos. Posteriormente, se los procesa obteniendo como resultado el ortomosaico de ambos. Al importarlos en un software de procesamiento geoespacial como ArcMap, surge un inconveniente con la metodología ejecutada, los ortomosaicos quedan desfasados tanto en planimetría como altimetría, debido a que a la hora de realizar los vuelos, no se utilizaron puntos de apoyo. Esto deriva en la nueva etapa del proyecto, mejorar la metodología antes ejecutada, aumentando el tiempo de trabajo en campo y reduciendo el tiempo de procesamiento, así poder alcanzar mejores precisiones en el producto final.

**Posteriormente, se ejecuta un tercer vuelo, con fecha del 6 de junio del presente año, con la metodología de campo ya ajustada.** El paso siguiente es su procesamiento y con ello, la generación de los subproductos necesarios para evaluar los parámetros que se desean estudiar por parte de los especialistas.

Por último se realiza un análisis de coherencia entre los subproductos generados con la metodología planteada y además, un análisis comparativo inter-temporal entre el último vuelo y el primero, es cual se lo ajusta en planimetría y altimetría en la etapa de procesamiento y así poder utilizarlo como insumo.

## **Estudio de zonas de dunas**

Durante los últimos 90 años las tendencias naturales de las playas uruguayas han sido intervenidas por acciones llevadas a cabo por la sociedad, las cuales han contribuido en un continuo deterioro de las costas uruguayas. La forestación de especies exóticas en la zona, la construcción de viviendas e infraestructura necesaria para que la población se extienda hacia esos lugares, la extracción de arena para construcción, entre otros, han sido las principales actividades responsables del cambio antinatural de la franja costera. Debido a esto, a partir de la década de 1950 se empezó a notar el deterioro de las playas por lo que se buscaron diferentes alternativas para mitigar el impacto de la urbanización. No se obtuvo mayor éxito ya que hoy en día la mayoría de estas playas se encuentran en procesos degradativos y con una línea de costa que cada vez retrocede más y se acerca a las viviendas e infraestructura, lo que causa un impacto negativo en dichos lugares.

En base a una serie de entrevistas realizadas a la Lic. Geóloga Irene Balado, se concluye que a efectos de estudiar los movimientos en la topografía de las dunas, para poder evaluar su retroceso con respecto a la línea costera, deterioro por presencia de vegetación, entre otros factores, **resulta de interés medir, a lo largo del tiempo, principalmente tres parámetros; 1. cambio en la coordenada Z de los distintos puntos del terreno, 2. cambios de volumen y 3. cambios en la zona, a partir de análisis visuales en base a fotografías.**

Con respecto a la elección de la zona de estudio, **se priorizan**, por parte de los autores, **distintos parámetros como la cercanía por cuestiones de logística y tiempo, que exista algún estudio similar realizado anteriormente por especialistas del tema y que la zona presente un ambiente dinámico**, sensible a perturbaciones de origen antrópico, pues el tiempo estipulado para el presente proyecto no admite un estudio inter-temporal demasiado extenso. **La desembocadura de la cuenca del**

**Arroyo Pando, situada en el departamento de Canelones, reúne las características antes mencionadas.**

Se han realizado estudios tanto a nivel de la cuenca del Arroyo, como en las playas aledañas y las dunas costeras, a través de una serie de imágenes y cartografía digital histórica de la zona, con el objetivo de analizar los impactos de diversas obras de infraestructura, forestación de dunas, extracción de áridos sobre el sistema, entre otros.



*Fig 14. Desembocadura de Arroyo Pando, Canelones, Uruguay (Año 1966). Fuente: visualizador de la ideuy.*



*Fig 15. Desembocadura de Arroyo Pando, Canelones, Uruguay (Año 2017-2018). Fuente: visualizador de la ideuy.*

## **Metodología de vuelo**

La presente metodología explica el paso a paso que se recomienda seguir a la hora de ejecutar un vuelo fotogramétrico sobre un sistema dunar, de manera tal de reducir posibles errores en planimetría y altimetría. Además, si se repite a lo largo del tiempo, con el objetivo de realizar un estudio inter-temporal de una determinada zona, los subproductos que se obtengan estarán georreferenciados con altas precisiones, resultando en que puedan ser comparables entre sí.

### **1. Elección y delimitación de la zona de estudio**

En primera instancia se debe determinar la zona de interés en la que se llevará a cabo el vuelo. Para ello, es necesario verificar que el lugar elegido no se encuentre dentro de las zonas restringidas para volar. Para ello, se debe ingresar a la página oficial de DJI (fig. 16) y verificar dicho aspecto. En caso contrario, se debe solicitar una autorización expresa de la Dirección Nacional de Aviación Civil e Infraestructura Aeronáutica (D.I.N.A.C.I.A.).

Definida la zona, se la delimita digitalmente, utilizando un software GIS, por ejemplo ArcGIS, donde poder cargar imágenes satelitales y así crear un polígono georeferenciado que comprenda la zona de interés. Luego, se convierte el archivo a un formato legible para el drone a utilizar, por ejemplo, KMZ o KML y se guarda en la tarjeta de memoria micro SD del drone.

En el caso de volar sobre dunas o grandes masas de arena se recomienda delimitar la zona de vuelo de manera que abarque construcciones, algún tipo de vegetación, calles, caminos aledaños a la arena, etc., de manera que el software de procesamiento de las imágenes tomadas por el drone, por ejemplo Pix4D, pueda encontrar los denominados puntos claves o “keypoints”, aquellos que se repiten en más de una fotografía, de forma más eficiente.

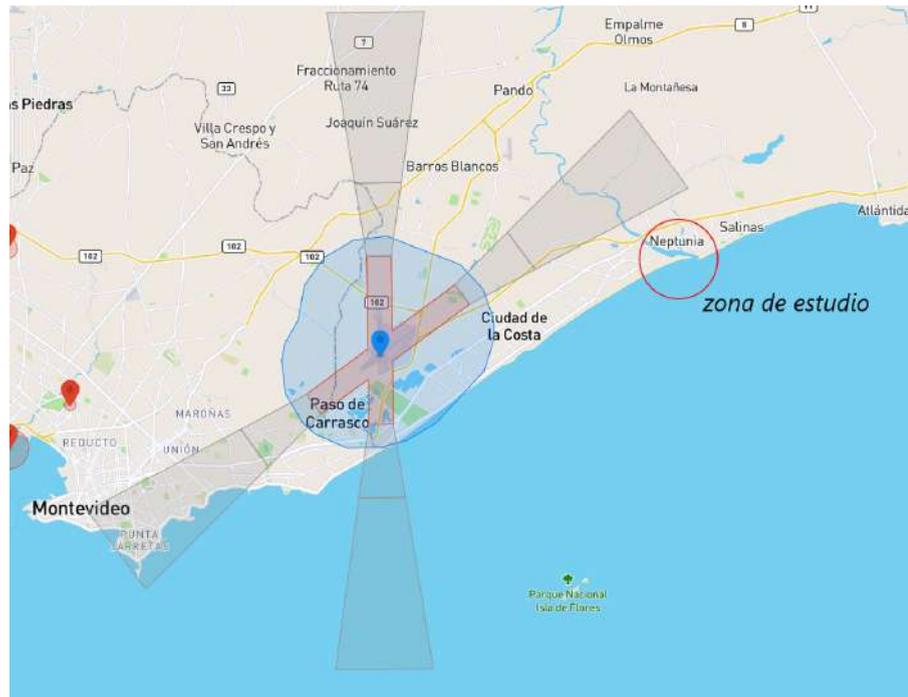


Fig 16. Zona donde el vuelo está restringido. Fuente: <https://www.dji.com/flysafe/geo-map>.

## 2. Elección de parámetros de vuelo adecuados a la zona de estudio y planificación.

Los parámetros de vuelo van a definir el tamaño de píxel, la cantidad de fotos necesarias para cubrir toda la zona, además del tiempo de vuelo estimado para la cobertura total de la zona. Por ejemplo, en el caso que se desee mayor calidad en la imagen, es decir, menor tamaño de píxel, se va a necesitar una velocidad de vuelo menor, o viceversa, a mayor velocidad mayor tamaño de píxel. En el caso de un estudio sobre dunas, se debe tener en cuenta que es un ecosistema propenso a sufrir cambios a corto plazo, ya sea por posibles actividades antrópicas que se pueden presentar durante el vuelo, cambiando la cota de algunos puntos, o por la exposición a fenómenos naturales como mareas o vientos fuertes, por lo que se puede concluir que para estas zonas no es necesario un tamaño de píxel pequeño.

Otro elemento a tener en cuenta es el horario en que se realice el vuelo, pues al estudiar un área arenosa, el brillo en las imágenes tomadas es un parámetro

importante a evaluar, debido a que en horas donde el Sol se encuentra prácticamente perpendicular a la superficie de estudio, puede resultar en fotografías con poco contraste, lo que hace que el programa de procesamiento de las imágenes del vuelo no pueda encontrar los puntos claves.

Los datos de la siguiente tabla se eligen por los autores de manera tal de minimizar fundamentalmente dos parámetros, el tiempo de vuelo y la cantidad de fotos necesarias, por lo que se opta una altura cercana a la máxima permitida y un bajo recubrimiento horizontal y vertical, en comparación con lo que usualmente se utiliza en los vuelos (entre 80% y 90%). Esto resulta en un menor tiempo en campo y menor tiempo de procesamiento, adecuados a las precisiones requeridas para el objetivo del presente estudio.

<b>Parámetros</b>	<b>Valor recomendado</b>
Altura de vuelo	120 metros
Velocidad	8-9 m/s
Solape horizontal	70%
Solape vertical	70%
Trayectoria	Paralelas
Horario del vuelo	Primeras horas de la mañana o últimas horas de la tarde
Período mínimo entre vuelos	1 mes

A efectos de un estudio inter-temporal de la zona, es necesario que los parámetros de vuelo se repitan de igual manera para cada vuelo realizado.

Con el objetivo de detectar cambios en el movimiento de sistemas dunares a lo largo del tiempo, se recomienda, por parte de los autores, un período mínimo entre los vuelos de 1 mes. Este parámetro puede variar dependiendo de varios factores como el clima de la zona y sus elementos, ya sean tormentas, vientos, etc., los objetivos y recursos del proyecto, las precisiones establecidas de los Modelos, entre otros.

Con respecto a la elección del día de vuelo, los parámetros fundamentales a evaluar son: viento y lluvias. No se puede volar con vientos elevados y con presencia de lluvia. Además, se recomiendan condiciones climáticas o de iluminación similares en los distintos vuelos, de esta manera obtener ortofotos que puedan ser comparables, en el caso que se quiera realizar un estudio visual para detectar cambios de movimientos en la zona a simple vista.

### 3. Salida a campo

Como primera instancia para ejecutar la salida a campo se debe establecer los equipos y herramientas necesarias para llevar a cabo la metodología. Dentro de ellos encontramos:

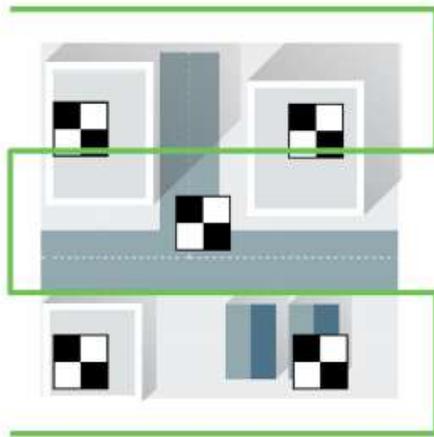
- Drone con RTK
- Equipo GNSS
- Aerosol, preferentemente de color rojo, por contraste con la arena

Una vez en campo, la primera tarea a realizar es la colocación de los Puntos de Apoyo, que luego servirán para ajustar el Modelo. Para ello, se realizan marcas con el pie sobre la arena, de un tamaño de al menos 10 veces mayor que el tamaño de píxel del vuelo y se las pinta con el aerosol (ver fig. 17). Se recomiendan un total de 5 a 8

marcas por vuelo, con una distribución homogénea sobre el área de estudio, evitando que se ubiquen cerca de los bordes (ver fig. 18). Luego, se relevan las coordenadas de las mencionadas marcas con el receptor GNSS (ver fig. 19).



*Fig 17. Construcción de los Puntos de Apoyo. Fuente: elaboración propia.*



*Fig 18. Distribución óptima de puntos de apoyo. Fuente: Presentación del software Pix4D brindada por Alexis Coito al Instituto de Agrimensura.*



*Fig 19. Relevamiento con GNSS de los Puntos de Apoyo. Fuente: elaboración propia.*

En este caso en particular, la distribución elegida para los puntos de apoyo fue la siguiente:



*Fig 20. Distribución de puntos de apoyo sobre zona de estudio. Fuente: elaboración propia.*

Luego de efectuadas y relevadas las marcas, se procede a llevar adelante el vuelo. En primer lugar, se debe definir un sitio desde el cual se va a despegar el Drone, procurando que el mismo esté despejado y alejado de obstáculos que puedan ocasionar contratiempos en el despegue y aterrizaje. El paso siguiente es crear el proyecto en la controladora del Drone, cargando los parámetros de vuelos previamente establecidos y el archivo que contiene delimitada la zona de vuelo. Posteriormente, se verifica la conexión del equipo a internet y a la estación del Instituto Geográfico Militar (SGM) más cercana a la zona del vuelo. De esta manera, nos aseguramos que el Drone va a recibir las coordenadas de su posición con las correcciones correspondientes en tiempo real, y así obtener un conjunto de fotografías georeferenciadas.

Por último, se inicia la misión de vuelo. Para ello, se despegó el Drone.



*Fig 21. Despegue de Drone Phantom 4 RTK. Fuente: elaboración propia.*

## **Procesamiento de datos**

A continuación se pasará a desarrollar el procedimiento realizado en el procesamiento de los datos obtenidos en campo; desde el uso del Pix4D para la obtención de los **productos: Imágen Ortorectificada** y el **Modelo Digital de Elevaciones**, hasta la creación de los **subproductos** utilizando el Software ArcMap 10.8.

### **1. Procesamiento de imágenes: elaboración de Ortomosaico y Nube de Puntos**

Con el objetivo de llevar adelante el presente procedimiento, se debe elegir un software de fotogrametría, de esta manera poder trabajar con las imágenes tomadas en el vuelo de Drone. En este caso, se realiza en base al software Pix4D.

En primera instancia, se descargan las imágenes, capturadas en el vuelo, de la tarjeta micro SD del drone en la computadora. Se abre el Software Pix4D y se crea un nuevo proyecto, seleccionando la carpeta en donde se va a guardar. El siguiente paso, es importar las imágenes georeferenciadas, seleccionar su Sistema de Coordenadas y el tipo de procesamiento que se desea ejecutar.

Posteriormente, se inicia el paso número 1 del procesamiento, denominado “Procesamiento inicial”, chequeando que los parámetros preestablecidos se ajusten a los intereses del proyecto. Luego de terminar con el paso mencionado, el Software crea un Reporte de calidad o “Quality Report”, donde se tendrá que verificar la correcta ejecución de los parámetros del procesamiento, como por ejemplo, que se hayan encontrado los “keypoints”, que las imágenes estén calibradas, el estado del solapamiento del proyecto, la correlación existente entre las fotografías tomadas, entre otros. Si algún parámetro se encuentra con color rojo, se tendría que descartar el paso y comenzar nuevamente.

El siguiente paso consiste en cargar los Puntos de Apoyo que se marcaron y relevaron en campo. Para ello, se deben descargar las coordenadas de los puntos del

equipo GNSS utilizado, en formato .txt y en el Software cargarlos, seleccionando la opción de la barra de menú denominado “Gestor GCP/MTP”. Dentro de la nueva ventana (ver Fig. 22), se escoge la opción “Importar puntos de apoyo” (ver Fig. 23), donde se selecciona el orden en que se tienen guardadas las coordenadas y con la opción “Navegar” se importa el archivo que las contiene. Por último, se edita el Sistema de Coordenadas de los puntos, en el menú “Gestor GCP/MTP”, solo si el que está cargado por defecto no coincide con el Sistema del proyecto.

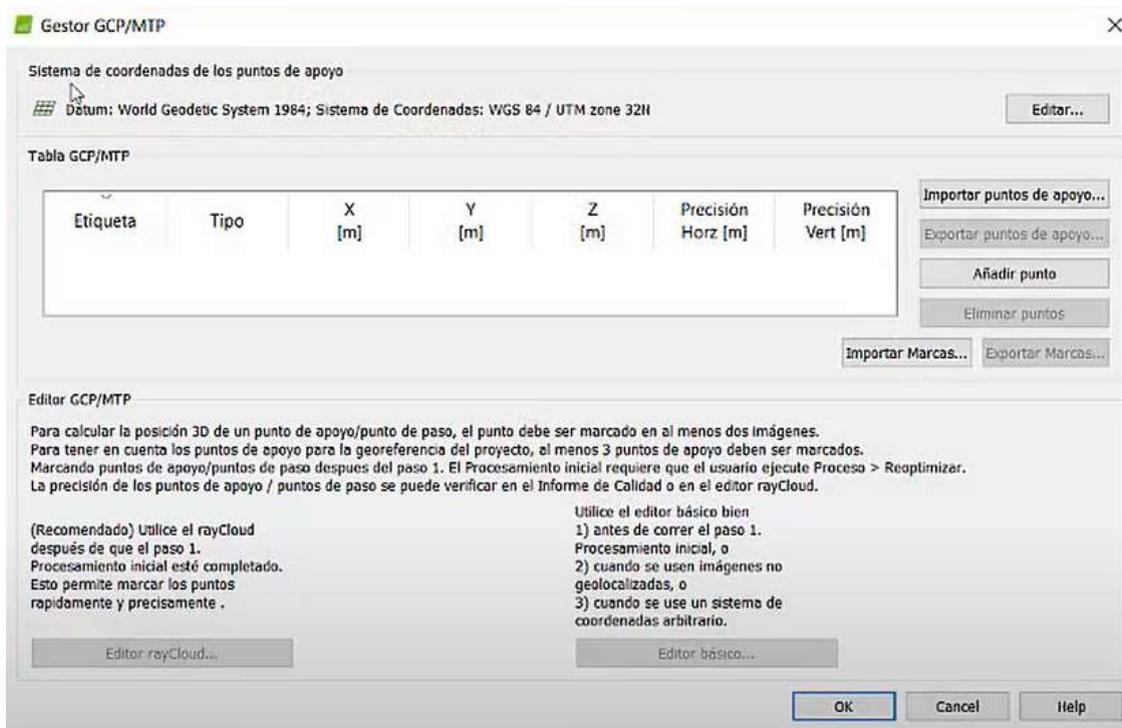


Fig. 22. Menú “Gestor GCP/MTP” del Software Pix4D. Fuente: elaboración propia.

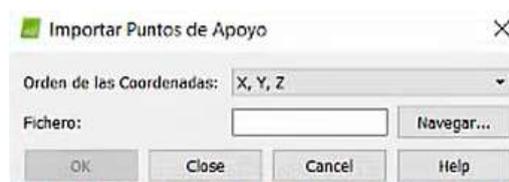


Fig. 23. Ventana emergente del menú “Gestor GCP/MTP” del Software Pix4D. Fuente: elaboración propia.

Cargados los Puntos de Apoyo, se comienza a ajustarlos manualmente. A la izquierda, en la denominada “RayCloud” > “Puntos de Paso” > “GCPs / MTPs” se deben encontrar cargados los puntos, donde se selecciona uno por uno y se traslada manualmente el punto a la marca que efectivamente se ve en las imágenes que aparecen a la derecha de la pantalla. Se recomienda ajustar cada punto en aproximadamente 6 a 8 de las fotografías que aparecen. Luego de que se termina el ajuste manual de los puntos, se selecciona la opción “Aplicar” para cada uno de los puntos y se reoptimiza el proyecto, con la herramienta “Reoptimizar”, para ajustar el modelo con los Puntos de Apoyo.

Finalmente, se ejecutan los pasos 2 y 3 del procesamiento “Nube de puntos y malla” y “MDS, ortomosaico e índices” respectivamente, de igual manera que el paso 1, verificando que los parámetros preestablecidos se ajusten al objetivo del proyecto y que los Reportes de Calidad de cada paso sean aceptables. Se recomienda además, luego de finalizados los pasos, verificar en el Ortomosaico generado por el Software, que efectivamente las coordenadas de los Puntos de Apoyo que se visualizan en la imagen, sean las relevadas en campo.

Como resultado final de esta etapa, se debe obtener el **Ortomosaico** en formato **.tiff** y la **nube de puntos LAS** en formato **.lasd**, ajustados.

## 2. Procedimiento de comparación inter-temporal

De igual manera que en el procedimiento anterior, se debe elegir el software con el que se va a llevar a cabo el estudio de comparación inter-temporal del movimiento de dunas. En esta etapa, los autores eligen trabajar con ArcMap 10.8.

Luego de haber procesado las imágenes en un software de fotogrametría, y obtener como resultado el Ortomosaico de la zona de estudio y su nube de puntos LAS, se abre el software de procesamiento geoespacial ArcMap y deben de ejecutar los siguientes pasos:

### a. Importación de Ortomosaicos

Una vez dentro del software ArcMap se crea un nuevo proyecto. Para ello se selecciona la opción “Blank Map” (ver Fig. 24). Luego, se selecciona con botón derecho la opción “Layer” de la tabla de contenidos > “Add Data” (ver Fig. 25), donde se carga el Ortomosaico del vuelo. Se verifica que se encuentre en el Sistema de Referencia en que se ejecuta el vuelo, clickeando sobre la capa con botón derecho, opción “Properties”. Este paso se repite, tantas veces como vuelos se tengan.

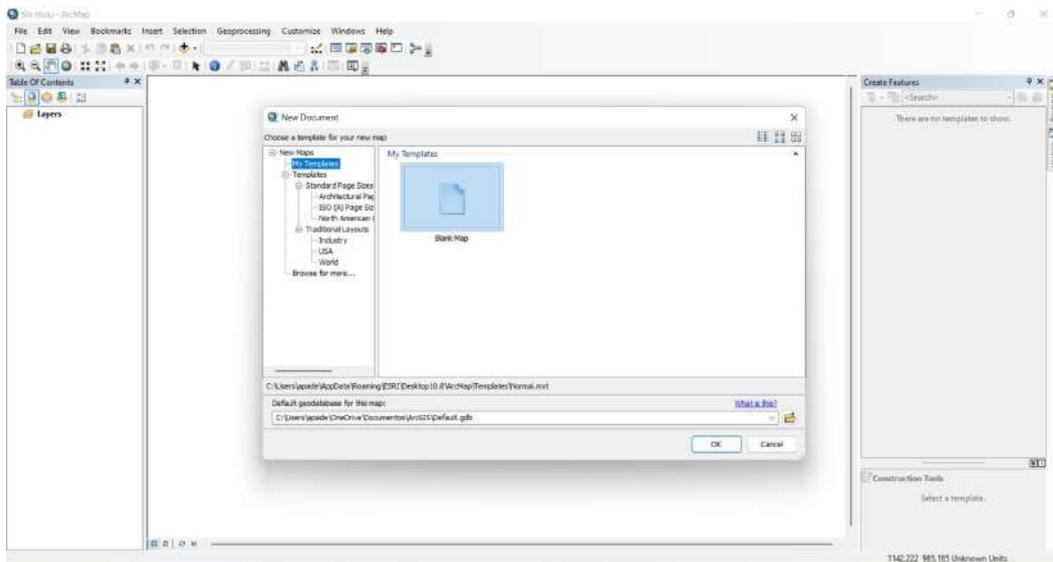


Fig. 24. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8. Fuente: elaboración propia.

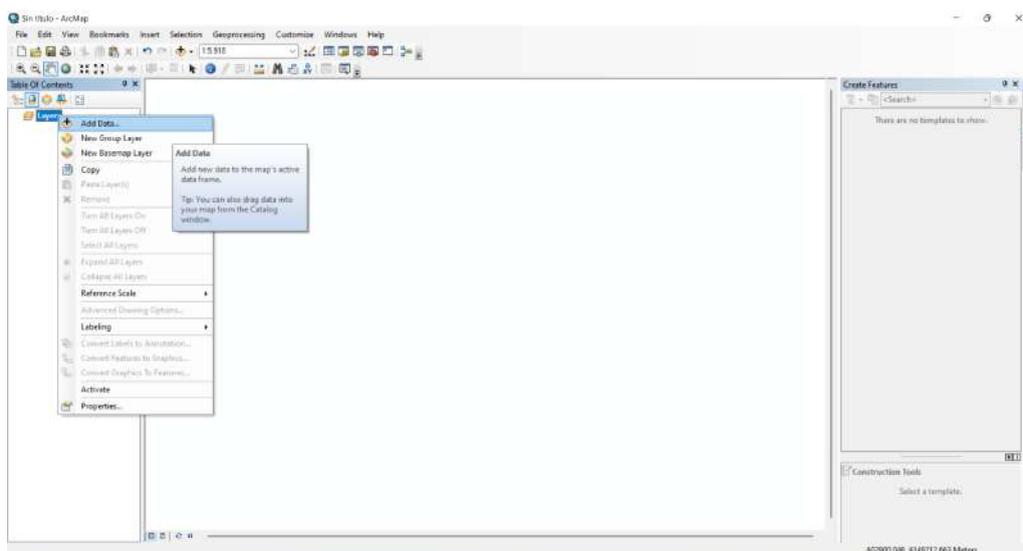


Fig. 25. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8. Fuente: elaboración propia.

### b. Creación del LAS data set.

Con el objetivo de cargar la nube de puntos LAS en el software, se crea un nuevo archivo de datos LAS dentro de la carpeta que se quiere guardar. Se selecciona la carpeta con botón derecho > “New” > “LAS Dataset” (ver Fig. 26) y se cargan las nubes de puntos LAS que se hayan obtenido de los distintos vuelos.

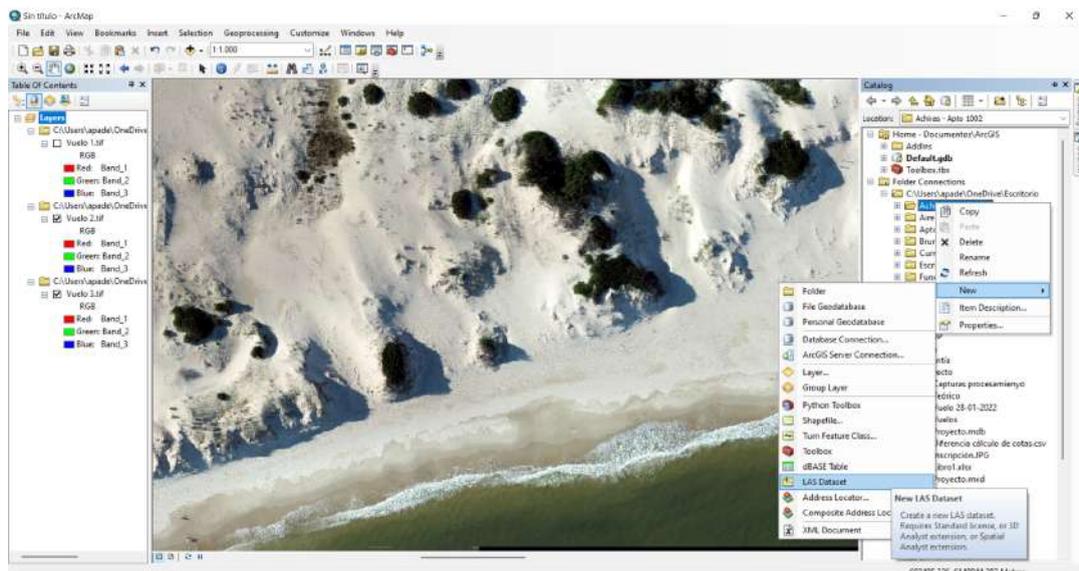


Fig. 26. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8. Fuente: elaboración propia.

### c. Filtrado de la nube de puntos LAS.

Para el filtrado de la nube de puntos LAS, se utiliza el comando “Classify LAS Ground” (Fig. 27), donde se carga el archivo en formato .lasd, se selecciona el método de detección de terreno “standard” y se ejecuta la herramienta.

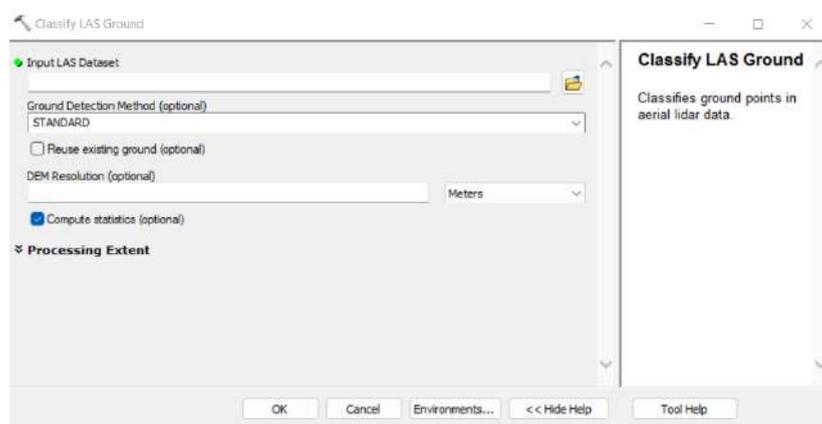


Fig. 27. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Cliffify Ground”. Fuente: elaboración propia.

Como resultado del presente paso se obtiene una nueva categoría de puntos dentro de la nube, denominada “ground” que contiene el terreno “desnudo” sin construcciones.

#### d. Creación del Modelo Digital de Elevación.

Con el fin de crear el **Modelo Digital de Elevación** a partir de la nube de puntos LAS filtrada, se busca en el catálogo del software la herramienta “LAS Dataset to Raster”. A continuación, se despliega la ventana de la fig. 28. donde se puede seleccionar el archivo LAS, dónde se quiere guardar, el tipo de interpolación y el tamaño de pixel. En este caso se opta por una interpolación lineal, que le asigne a cada píxel el valor promedio de la región, con un tamaño de píxel de **1 metro**. Se opta por ese tamaño de píxel pues estamos frente a una **zona de topografía dinámica a corto plazo**, principalmente **por acción antrópica**, pues es **una zona arenosa** y si, por ejemplo, una persona camina por la zona de estudio mientras se realiza el vuelo fotogramétrico, la cota de esos puntos variará significativamente, a diferencia de otros materiales.

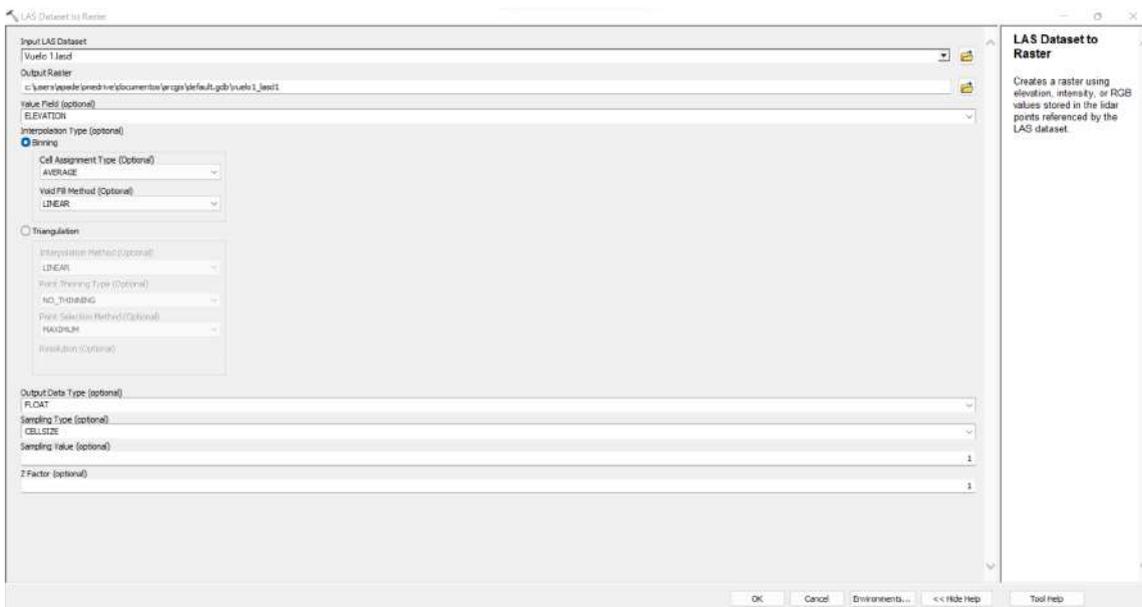


Fig. 28. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “LAS Dataset to Raster”. Fuente: elaboración propia.

e. *Alineación de los Modelos de Elevación.*

A fin de que los Modelos de Elevación puedan ser comparables entre sí, es necesario alinear los píxeles, de manera tal que sus lados sean coincidentes. Para cumplir el mencionado objetivo se utiliza la herramienta “Resample” del catálogo. En la ventana emergente se escoge el ráster que se quiera resamplear y se establecen los parámetros de la fig. 30. Luego, se selecciona la opción “Environments...”, donde se abre el menú de la fig. 31 y en las opciones “Processing Extent” > “Snap Raster” se elige uno de los Modelos de Elevación al cual se alinearán los Modelos de Elevación de los vuelos restantes.

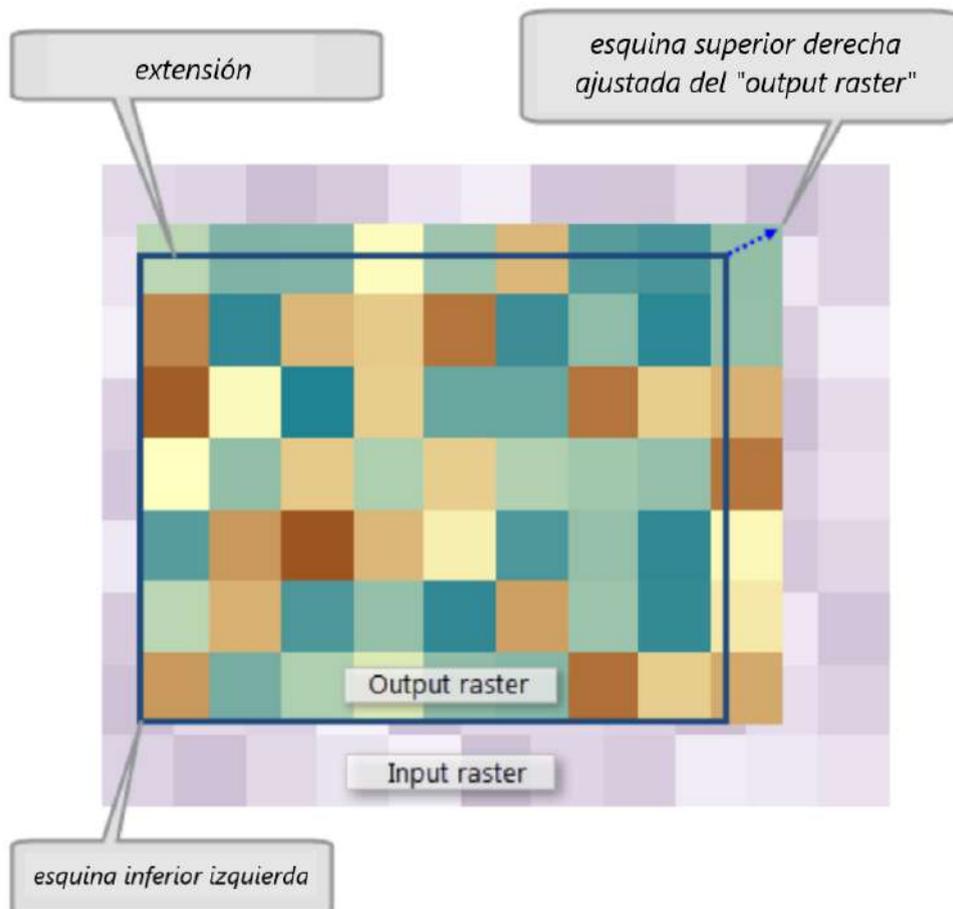


Fig. 29. Funcionamiento de “Snap Raster”. Fuente: elaboración propia.

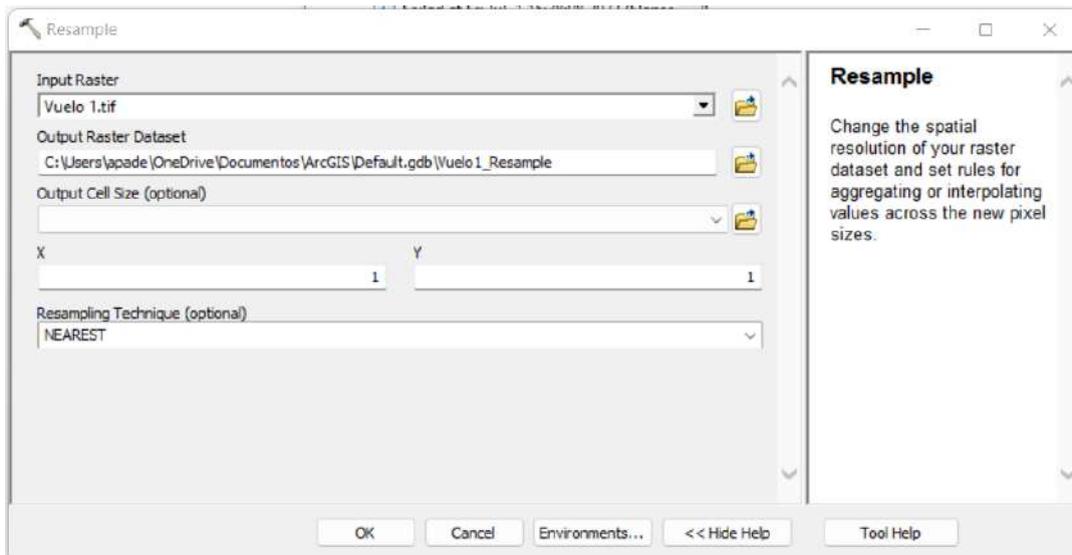


Fig. 30. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Resample”. Fuente: elaboración propia.

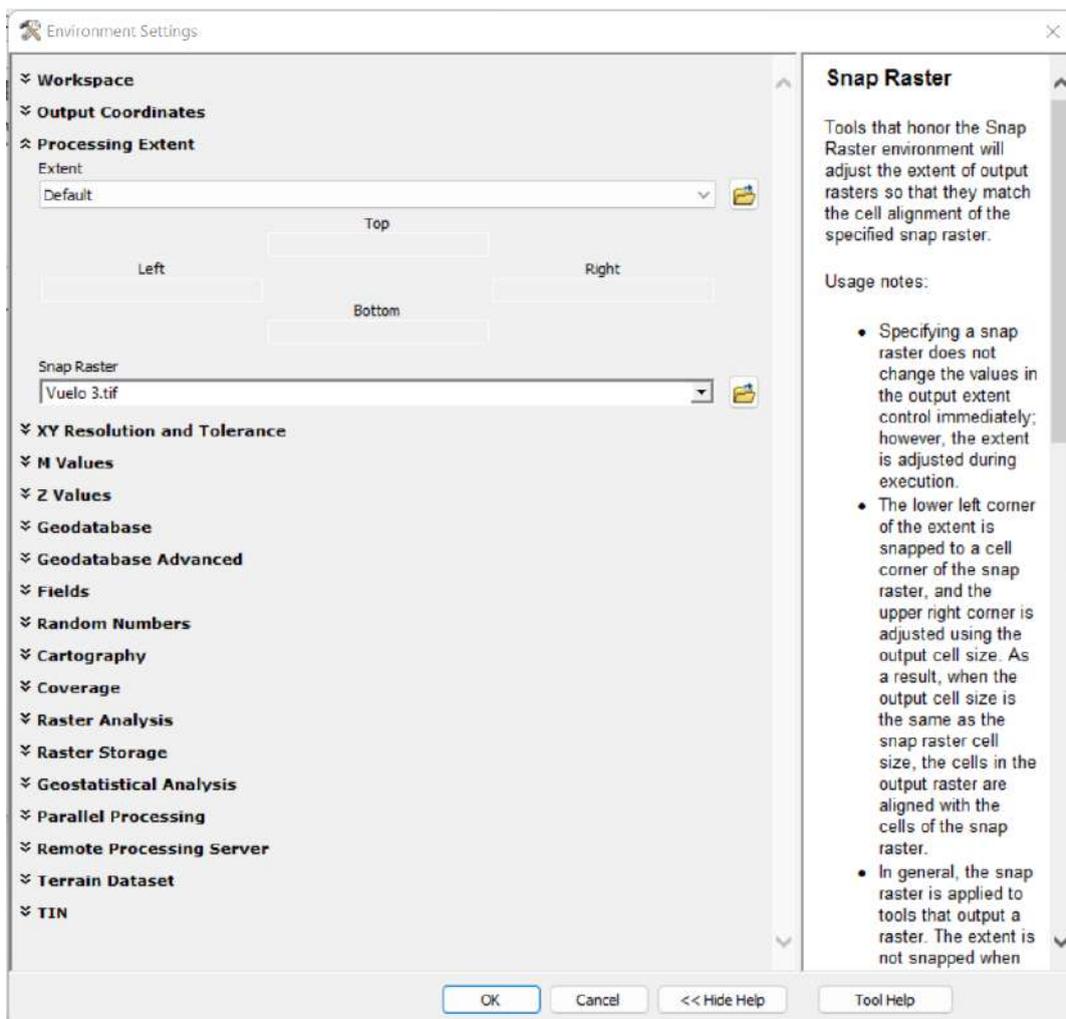
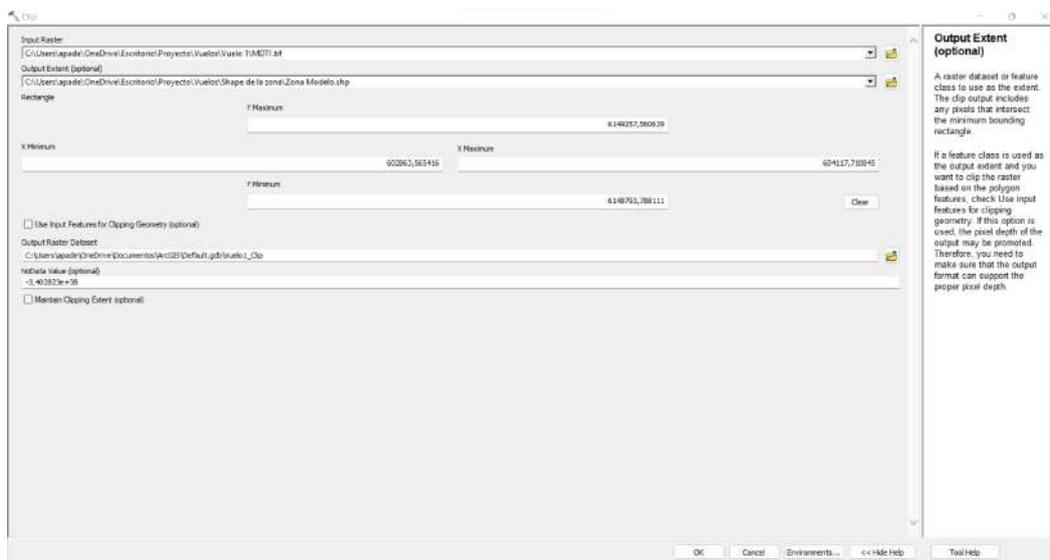


Fig. 31. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Resample”. Fuente: elaboración propia.

*f. Recorte de bordes del Modelo de Elevación.*

Con respecto a los bordes de los Modelos de Elevación resultantes, se sabe que son las zonas donde se puede haber omitido mayor información durante el vuelo, pues es donde menos solapamiento se encuentra, por lo que es recomendable que se recorten. A través de la herramienta “Clip” del software se puede recortar los bordes de un ráster en base a un polígono posteriormente creado.

Entonces, como primer paso se crea un nuevo Shape de polígonos, que contenga la zona que se quiera estudiar, evitando los bordes del Modelo. Luego, con la herramienta antes mencionada, se ejecuta el recorte (ver Fig. 32).



*Fig. 32. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Clip”. Fuente: elaboración propia.*

## Elaboración de los subproductos

En la presente etapa se explica cuál es la herramienta del software ArcMap que se debe ejecutar para elaborar los distintos subproductos que luego servirán de estudio a especialistas del tema para poder evaluar por qué suceden los movimientos de arena existentes en las zonas de dunas.

### 1. Modelo de curvas de nivel

La herramienta que se utiliza para la creación del Modelo de curvas de nivel a partir de una superficie ráster se denomina “Contour” (Fig. 33). La elección de los parámetros como intervalos, el valor base de las curvas y el factor de conversión de unidades utilizado al crear las curvas, depende de la variación de valores de los datos obtenidos en los distintos vuelos.

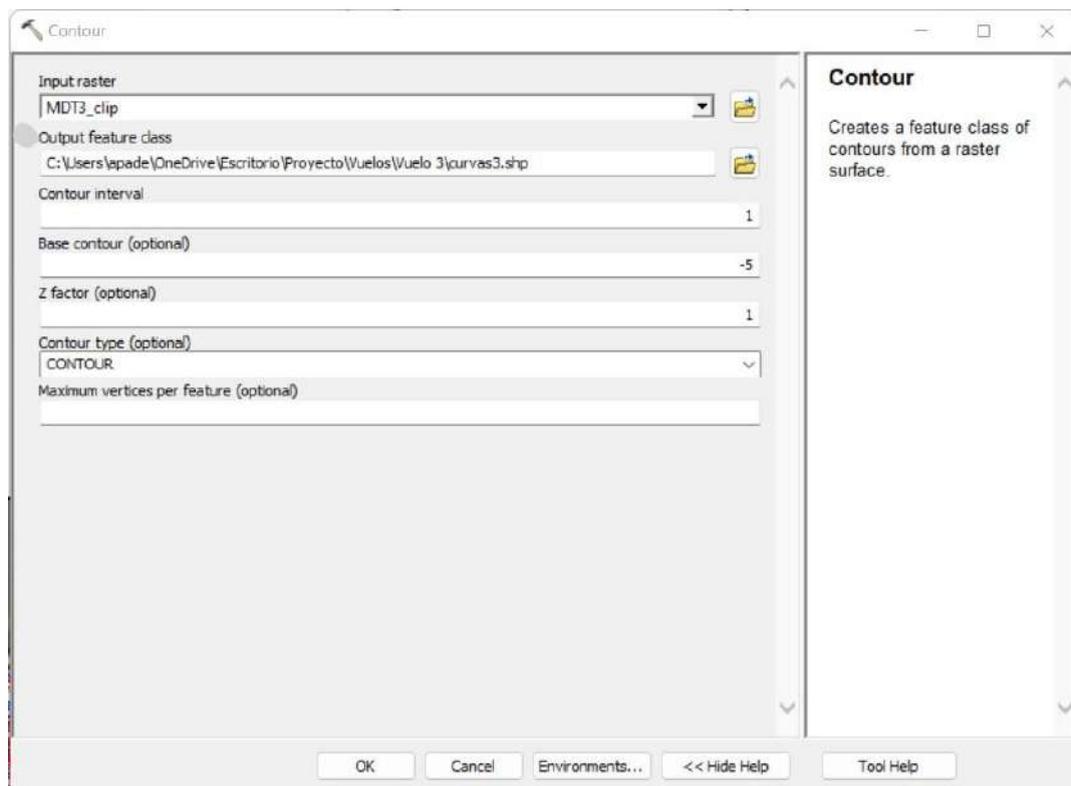
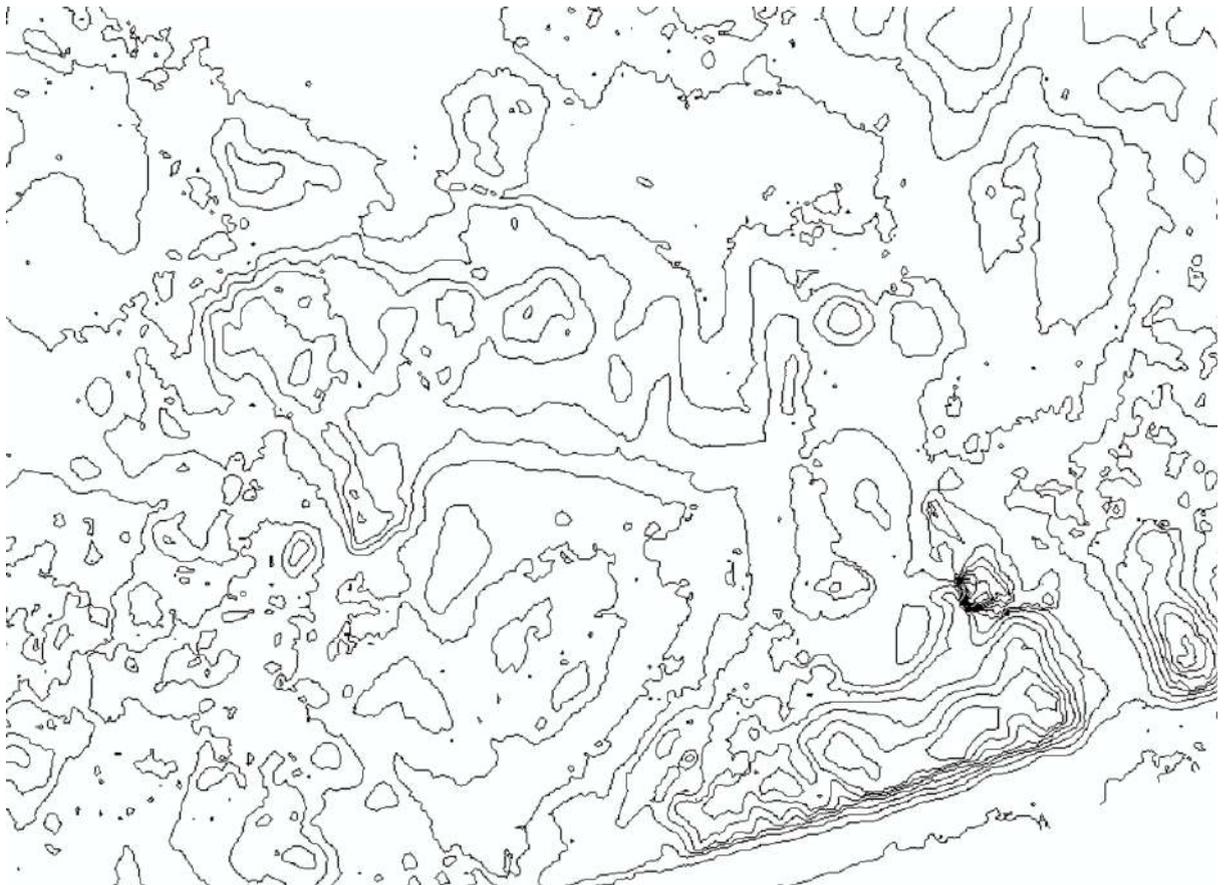


Fig. 33. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Contour”. Fuente: elaboración propia.

A partir del modelo de elevación, hecho en base al primer y último vuelo fotogramétrico llevados a cabo por parte de los autores, con fecha del 28 de enero de 2022 y 6 de junio de 2022 respectivamente, se obtienen dos modelos de curvas de nivel. A continuación se muestra uno de ellos.



*Fig. 34. Curvas de nivel generadas a partir de vuelo fotogramétrico que ejecutaron los autores en la zona del Arroyo Pando. Fecha del vuelo: 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.*

## 2. Modelo de pendientes

En este caso, el Modelo de pendientes se ejecuta a través de la herramienta “Slope”, quien se encarga de asignar a cada píxel del ráster generado el valor de su correspondiente pendiente o gradiente. Se debe cargar el ráster del Modelo de Elevación de la zona, asignar la carpeta de salida del Modelo de pendientes, escoger

las unidades de los valores de los píxeles y seleccionar la forma de la superficie base sobre la que se calcula el ángulo de inclinación de cada píxel.

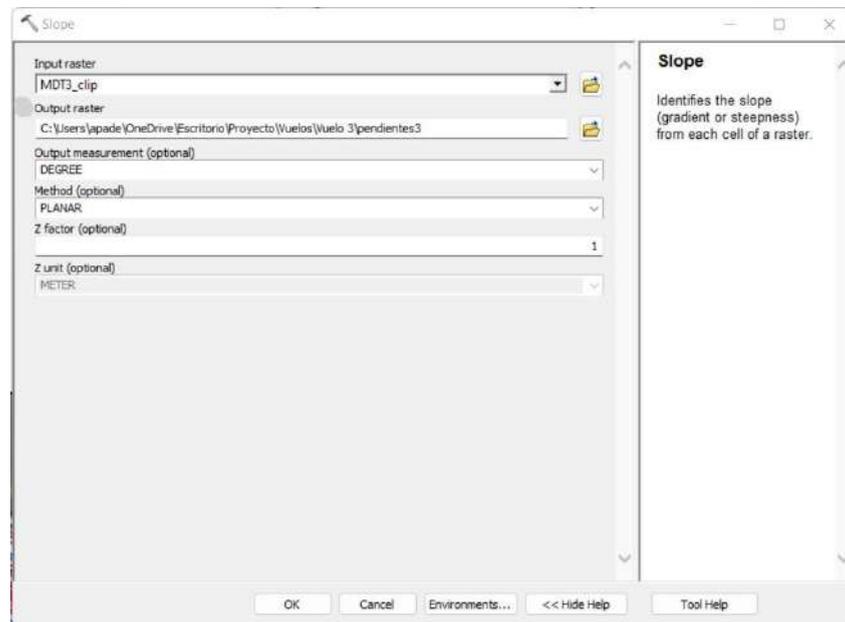


Fig. 35. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta "Slope". Fuente: elaboración propia.

La siguiente imagen (Fig. 36) muestra el modelo de pendientes generado a partir del último vuelo, llevado a cabo por los estudiantes.

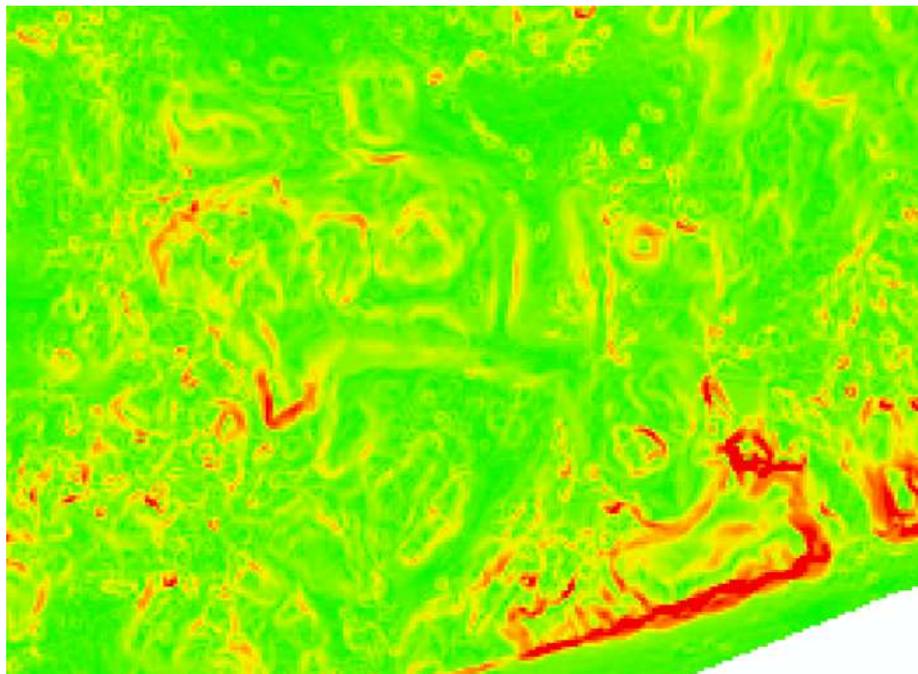


Fig. 36. Modelo de pendientes generado a partir de vuelo fotogramétrico ejecutado por los autores en la zona del Arroyo Pando. Fecha del vuelo: 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.

### 3. Modelo de orientación

Para crear el Modelo ráster de orientación se ejecuta la herramienta denominada “Aspect” en el software mencionado, donde se debe cargar el modelo de elevación de la zona, elegir dónde guardar el archivo resultante y optar por un método de cálculo, como muestra la Fig 37.

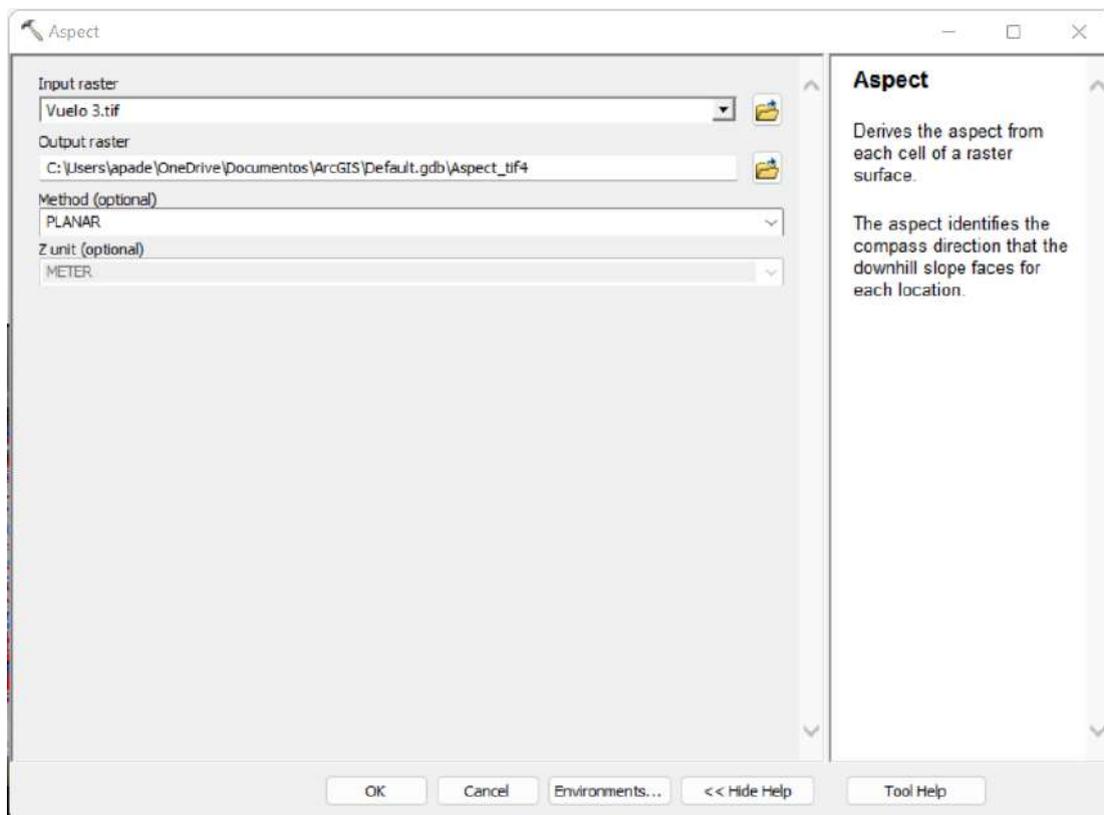
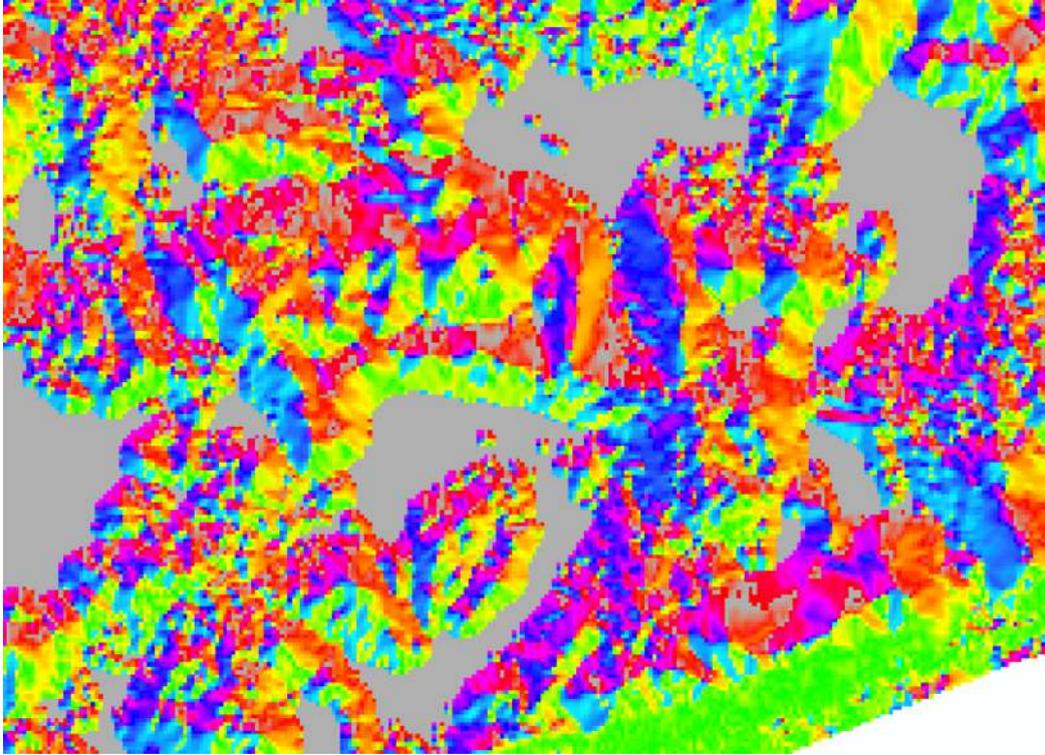


Fig. 37. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Aspect”. Fuente: elaboración propia.

La siguiente imagen (Fig. 38) muestra el modelo de orientación generado a partir del último vuelo ejecutado, llevado a cabo por los estudiantes.



*Fig. 38. Modelo de orientación generado a partir de vuelo fotogramétrico que ejecutaron los autores en la zona del Arroyo Pando. Fecha del vuelo: 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.*

#### 4. Modelo de curvatura

Con el objetivo de generar el Modelo de curvaturas de los distintos vuelos fotogramétricos, se utiliza la herramienta “Curvature” del software ArcMap (ver fig. 39).

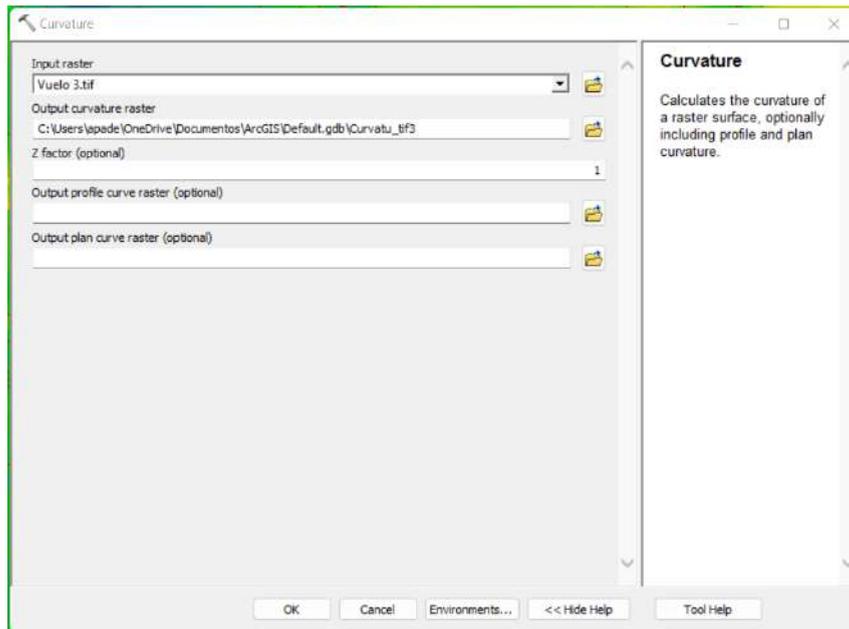


Fig. 39. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta "Curvature". Fuente: elaboración propia.

Como resultado de ejecutar la herramienta mencionada a los Modelos de Elevación de las distintas fechas de la zona de estudio, se obtuvieron los Modelos de curvatura. A continuación se muestra el Modelo de Curvatura obtenido a partir del último vuelo (Fig. 40).

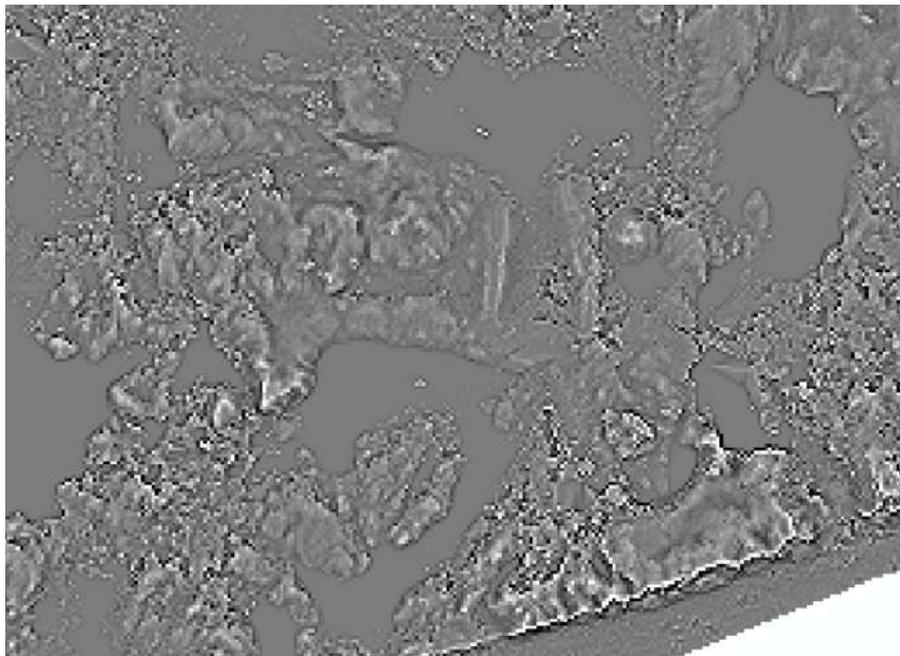


Fig. 40. Modelo de curvatura generado a partir de vuelo fotogramétrico ejecutado por los autores en la zona del Arroyo Pando. Fecha del vuelo: 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.

## 5. Modelo de desmonte y terraplén

Para obtener la variación de volumen de arena que existe entre dos momentos distintos en el tiempo, se ejecuta la herramienta “Cut fill”, donde se eligen las superficies a comparar.

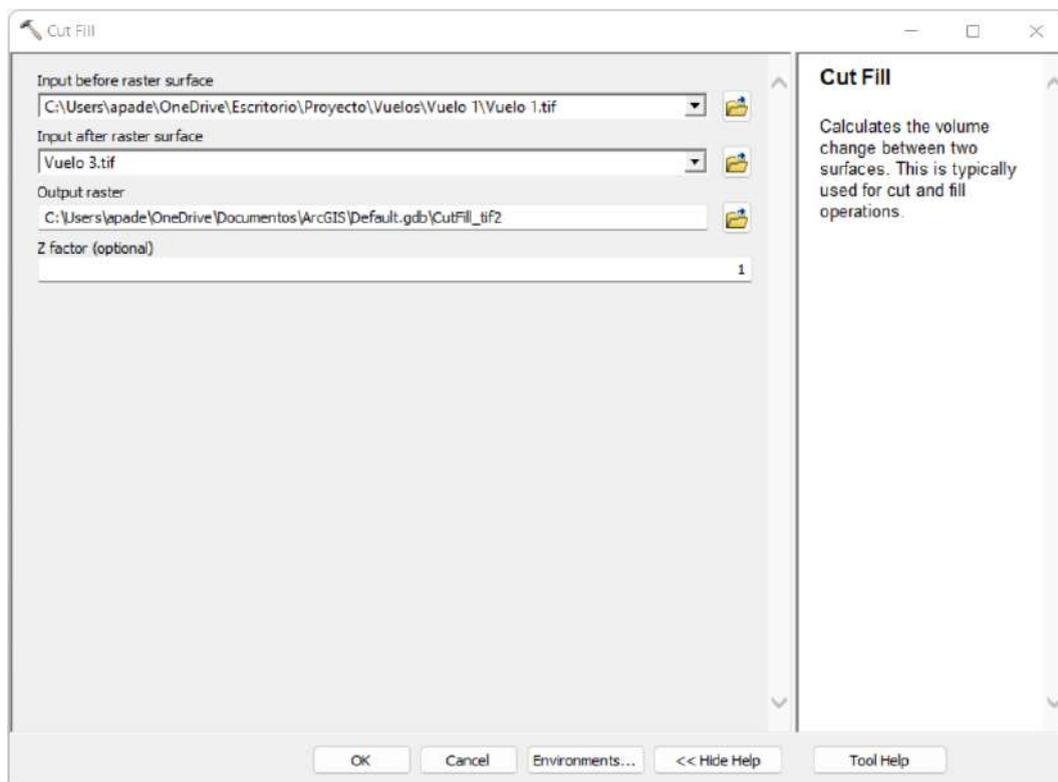
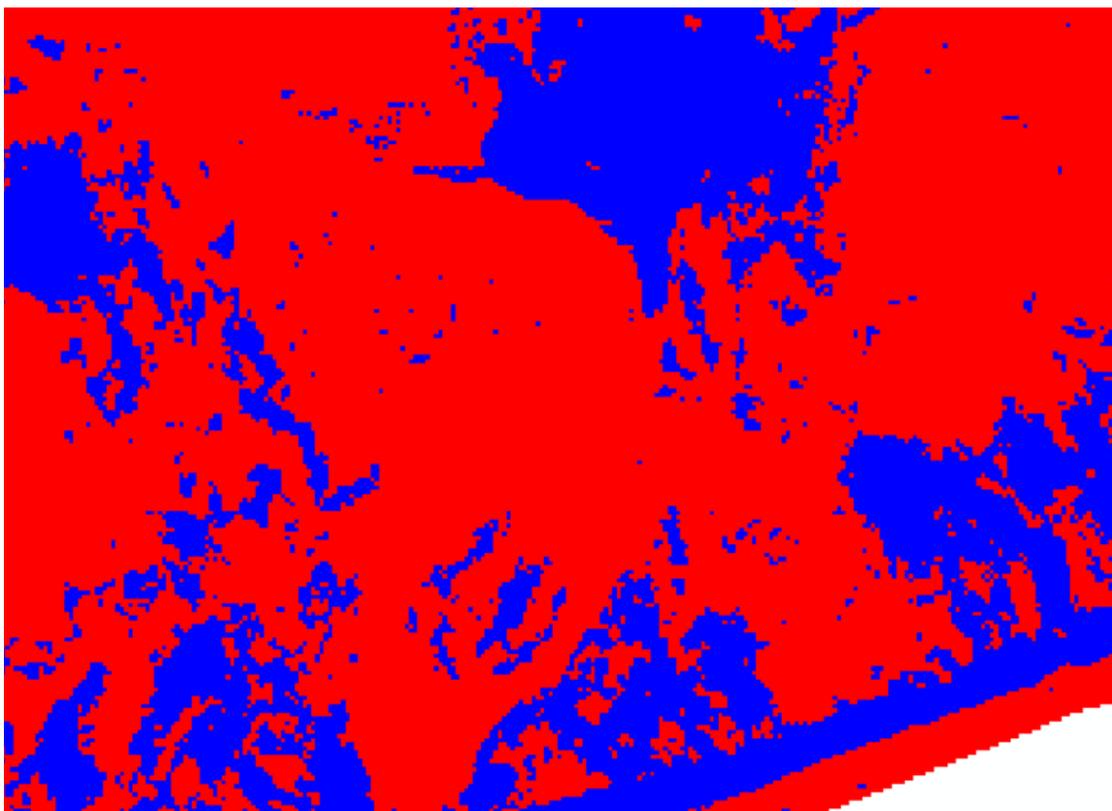


Fig. 41. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Cut fill”. Fuente: elaboración propia.

Como resultado se obtiene un ráster (Fig. 42) que asocia colores de píxeles distintos a las zonas donde se gana volumen (píxeles rojos), donde se pierde volumen (píxeles azules) y otro a las zonas donde el volumen no varía a lo largo del tiempo (píxeles grises).

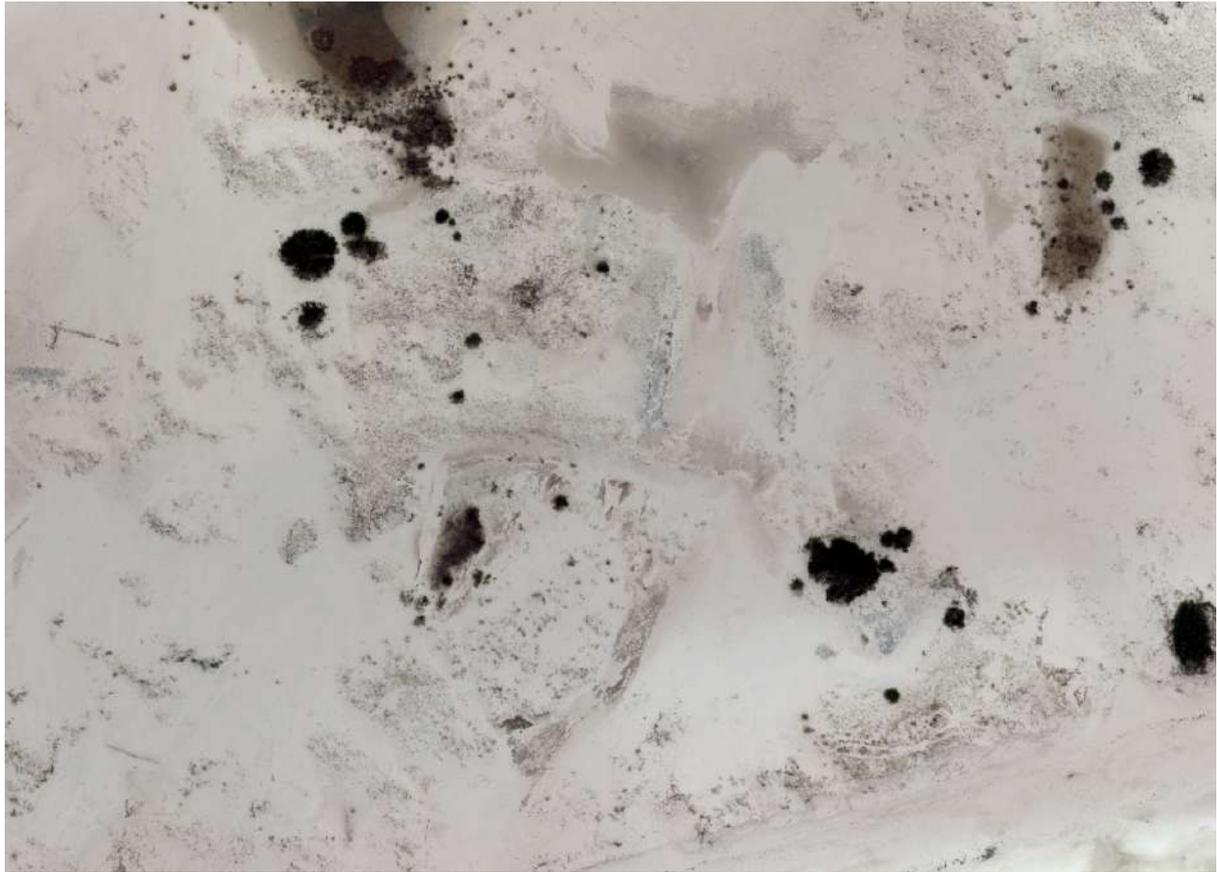


*Fig. 42. Desmonte y Terraplén generado a partir de los vuelos fotogramétricos ejecutados por los autores en la zona del Arroyo Pando. Fecha de los vuelos: 28/01/22 y 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.*

## 6. Ortoimágenes

Las ortoimágenes no se generan en base al software ArcMap, sino que se elaboran en la etapa inicial del procesamiento de imágenes del vuelo, como se describe en el “Procesamiento de datos” del presente informe.

Con el fin de realizar un primer análisis visual de posibles movimientos en zonas de dunares, se recomienda utilizar las ortoimágenes. A continuación se muestran dos de ellas, generadas a partir de los dos vuelos fotogramétricos realizados anteriormente.



*Fig. 43.. Ortomosaico generado a partir de vuelo fotogramétrico que ejecutaron los autores en la zona del Arroyo Pando.*

*Fecha del vuelo: 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.*

## 7. Perfiles

Para la realización de los perfiles, en primer lugar se define la ubicación y dirección de los mismos de manera arbitraria mediante la creación de líneas (Fig. 44), intentando que el resultado que se obtenga sea lo más representativo posible de la realidad. El usuario que desee obtener perfiles del modelo de elevaciones, podrá elegir la ubicación y dirección de los mismos en función de sus necesidades.



*Fig. 44. Ubicación y dirección de perfiles. Fuente: elaboración propia.*

Para obtener este subproducto, se utiliza la herramienta “Raster To TIN” y así generar una superficie en base a redes de triángulos irregulares (Fig. 45). Luego, con la herramienta “Interpolate Shape” se le asigna a las líneas creadas anteriormente la elevación de la superficie TIN (Fig. 46). Por último, solo resta indicar el perfil deseado con la herramienta “Select Features” y luego, en la barra de herramientas “3D Analyst” se hace click en “Profile Graph” y se obtiene el perfil (Fig. 47 y 48).

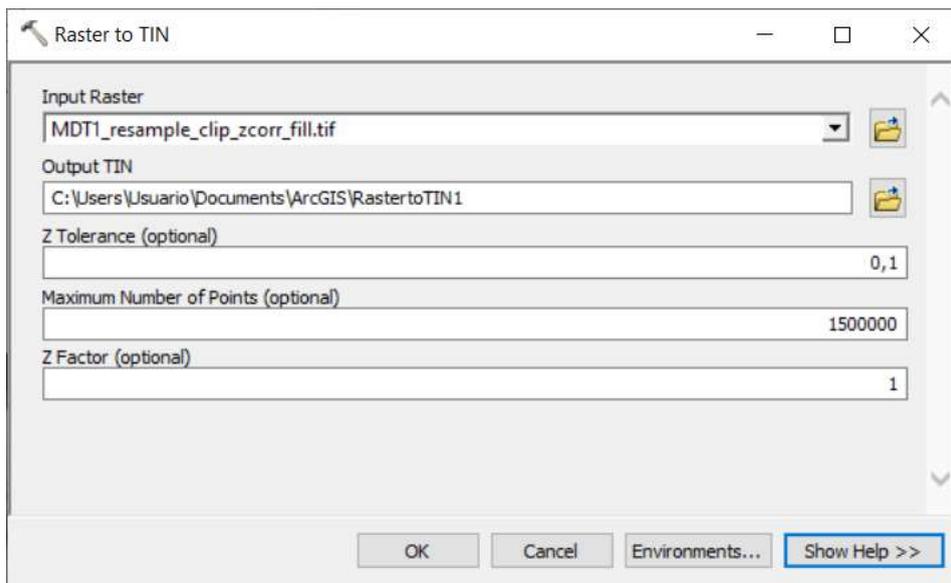


Fig. 45. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Raster To TIN”. Fuente: elaboración propia.

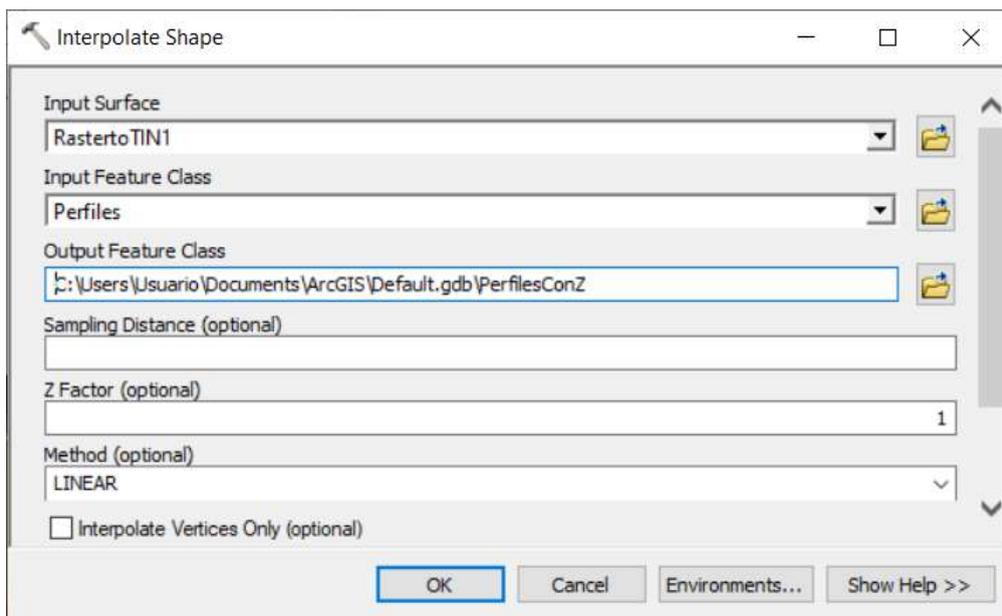


Fig. 46. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “Interpolate Shape”. Fuente: elaboración propia.

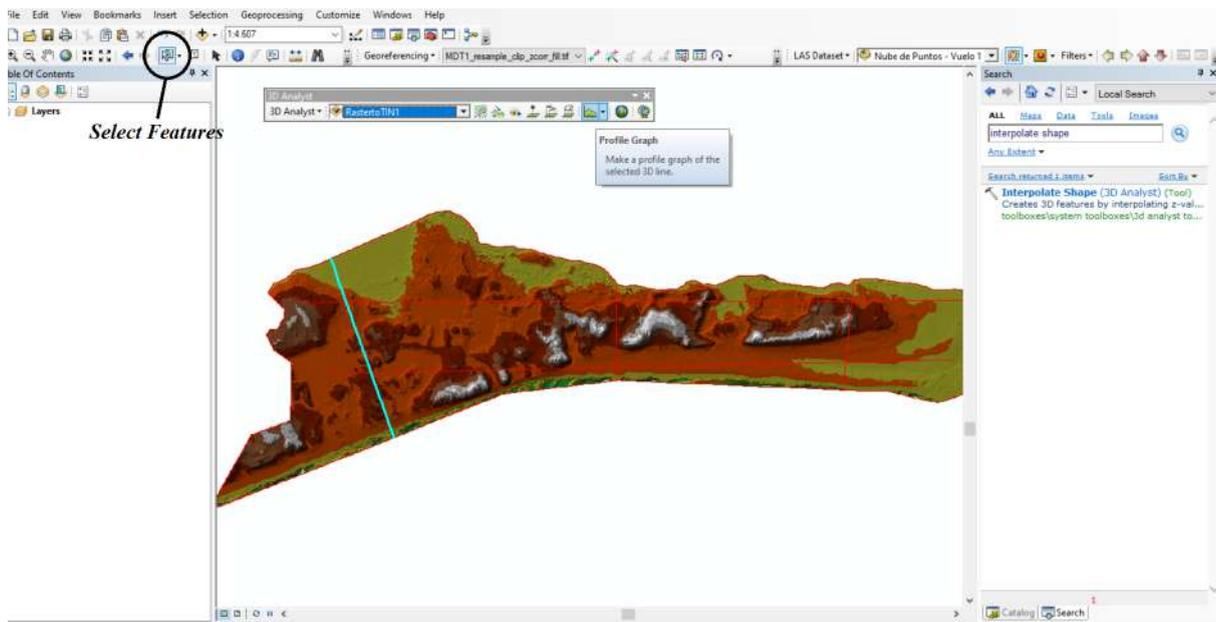


Fig. 47. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta “3D Analyst”. Fuente: elaboración propia.

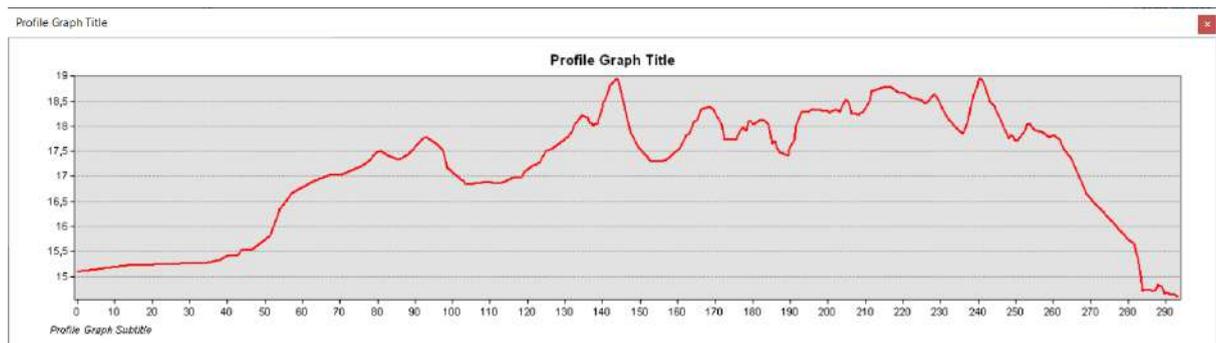


Fig. 48. Perfil de Elevaciones creado a partir del MDE del vuelo del 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.

Para una mejor comparación entre perfiles de distintas épocas, se puede exportar el perfil a un archivo .csv para posteriormente ser visualizado en AutoCAD. Para ello, se debe hacer click derecho sobre el perfil creado y seleccionar “Advanced Properties”. Luego, en “Data” se obtienen las coordenadas de los puntos de quiebre del perfil (Fig. 49), los cuales pueden ser exportados para su posterior visualización en un archivo CAD.

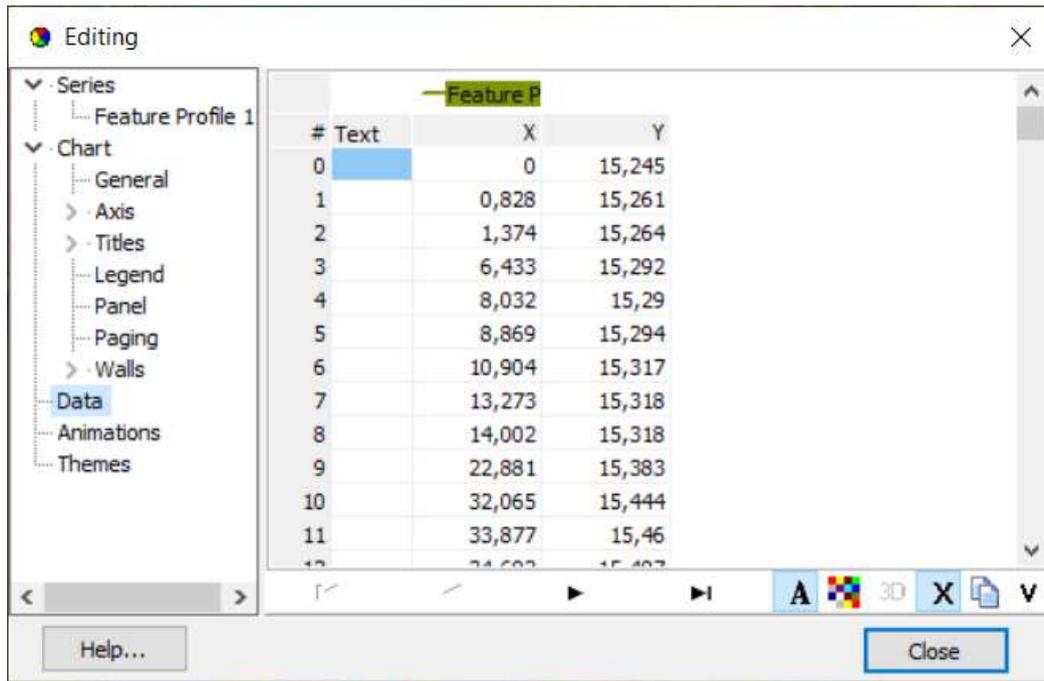


Fig. 49. Puntos de quiebre del Perfil de Elevaciones. Fuente: elaboración propia.

## 8. Volumen

Con el objetivo de analizar el cambio de volumen de arena existente en una zona dunar en distintas épocas, primero se ejecuta la herramienta “Polygon Volume” del software ArcMap, encargada de calcular el volumen que existe entre un polígono de altura constante, creado por el usuario, y una determinada superficie. Al momento de ejecutarla se debe indicar la superficie TIN deseada (para su creación ver *Subproducto 8: Perfiles*) y el polígono de referencia que va a delimitar la zona en la cual se calculará el volumen (Fig. 50).

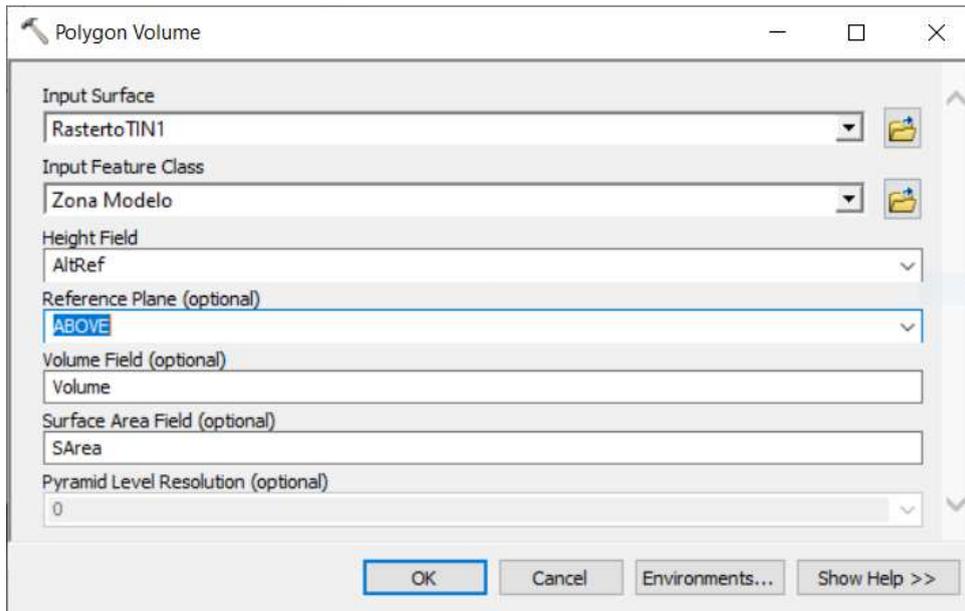


Fig. 50. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta "Polygon Volume". Fuente: elaboración propia.

A dicho archivo shape se le debe agregar una columna en la tabla de atributos en donde se establezca una altura de referencia a partir de la cual se van a realizar los cálculos de volumen. Para este caso particular se determina una altura de referencia de 15 metros (Fig. 51).

FID	Shape *	id	AltRef
0	Polygon	1	15

Fig. 51. Tabla de atributos del archivo shape. Fuente: elaboración propia.

Como resultado se obtendrá el valor de volumen existente entre la altura de referencia definida anteriormente y la superficie. Dicho valor volumen se encontrará en la tabla de atributos del polígono creado.

Para realizar la comparación entre dos épocas, simplemente se repite el procedimiento descrito para cada modelo y se restan los volúmenes.

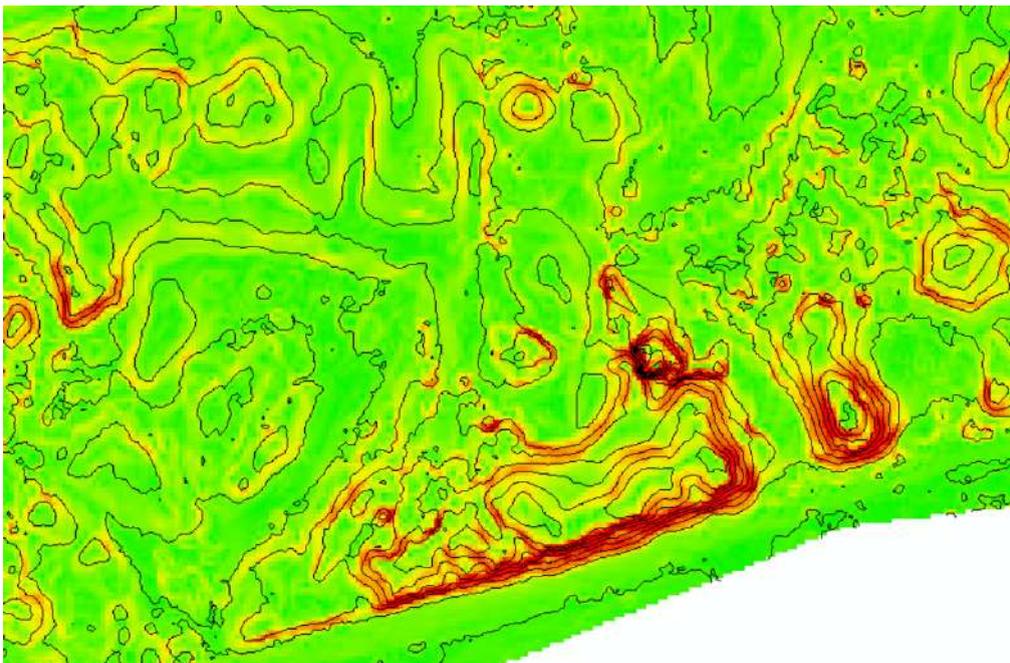
## **Análisis de productos y subproductos**

### 1er Análisis: Coherencia de los resultados

Con el fin de estudiar la coherencia de los resultados obtenidos en el presente proyecto, se realiza un análisis de congruencia entre los productos y subproductos obtenidos en el vuelo realizado el 06/06/2022, pues es el vuelo ejecutado con la metodología desarrollada anteriormente, la cual es más exacta.

#### *Curvas de nivel vs. Modelo de pendiente*

El primer producto derivado que se obtuvo fue el de las Curvas de Nivel, donde, se sabe que a medida que las curvas se encuentran más cerca entre sí, mayor es la pendiente de la superficie. Al comparar dicha característica con el Modelo de Pendiente, donde el color rojo indica las zonas de mayor pendiente y el verde las de menor, se observa una relación directa entre el acercamiento de las curvas y los valores de mayor pendiente. Lo mismo ocurre en el caso contrario donde los menores valores de pendiente coinciden con curvas que se presentan más separadas (Fig. 52).



*Fig. 52. Curvas de Nivel y Modelo de Pendientes. Fuente: elaboración propia.*

### *Modelo Digital de Elevaciones vs. Perfiles*

Para realizar este análisis se eligió un determinado perfil de forma arbitraria y el MDE del vuelo realizado el 06/06/2022 (Fig. 53). A continuación, se compararon las alturas del perfil en determinadas progresivas (Fig. 54 y 55) y las alturas, en las mismas progresivas, que están representadas en el MDE en un píxel de un metro cuadrado.

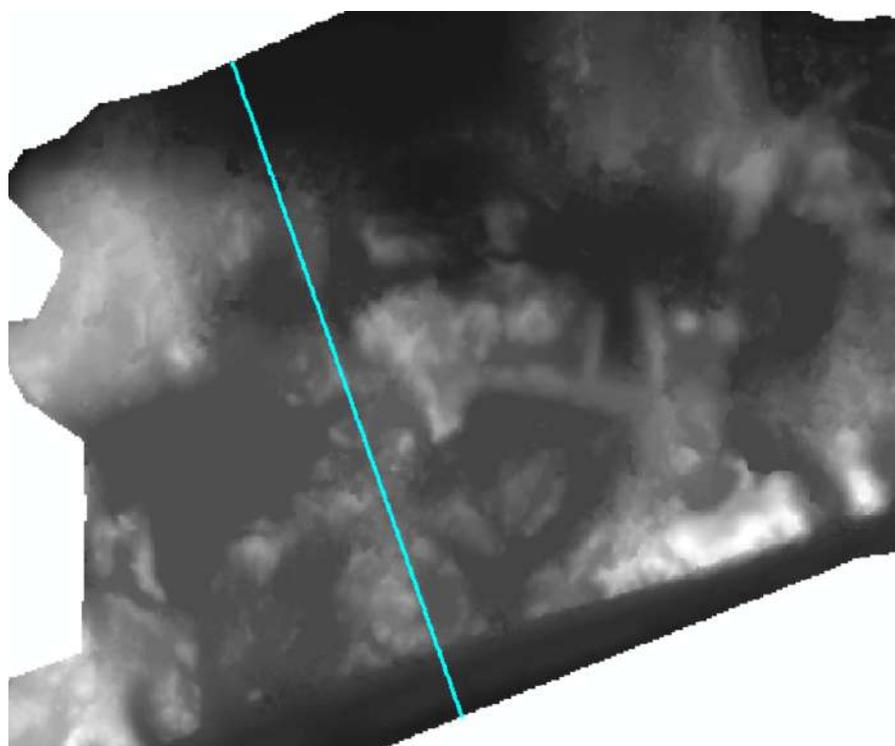


Fig. 53. MDE del vuelo realizado el 06/06/2022 y un perfil de dicho MDE . Fuente: elaboración propia.

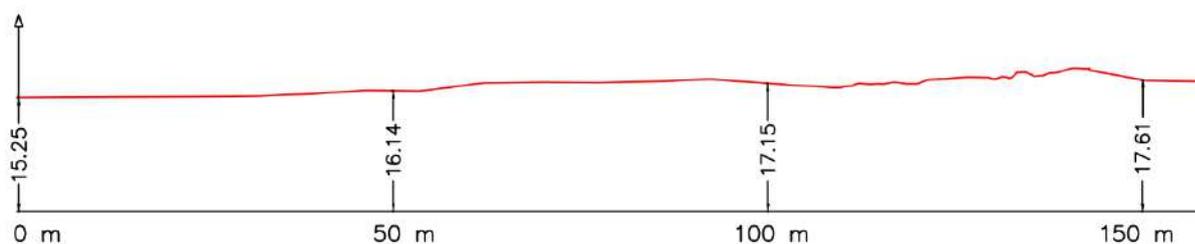


Fig. 54. Perfil del vuelo realizado el 06/06/2022 - Progresivas 0m a 150m . Fuente: elaboración propia.

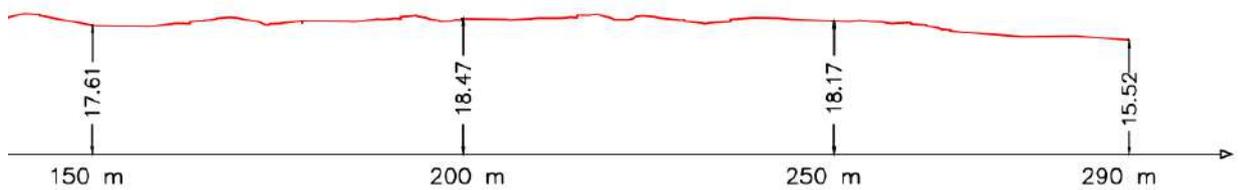


Fig. 55. Perfil del vuelo realizado el 06/06/2022 - Progresivas 150m a 290m . Fuente: elaboración propia.

Aunque en el análisis realizado se observaron diferencias entre ambos subproductos, las mismas no son lo suficientemente significativas como para afirmar que no existe congruencia entre los mismos. Además, se tiene en cuenta que el valor de altura obtenido en el MDE es un promedio de alturas realizado dentro de un cuadrado de un metro cuadrado.

<b>Progresiva</b>	<b>Altura (Perfil)</b>	<b>Altura (MDE)</b>	<b>Diferencia</b>
<b>0</b>	15.25	15.25	0.00
<b>50</b>	16.15	16.20	0.05
<b>100</b>	17.15	17.00	0.15
<b>150</b>	17.60	17.60	0.00
<b>200</b>	18.45	18.25	0.20
<b>250</b>	18.15	17.85	0.30
<b>290</b>	15.50	15.50	0.00

Fig. 56. Tabla comparativa de alturas (en metros, redondeadas a los 5cm) entre el MDE y los perfiles generados . Fuente: elaboración propia.

### Perfiles vs. Desmonte y Terraplén

En esta ocasión, en análisis de coherencia se llevó a cabo mediante la selección arbitraria de las progresivas de un determinado perfil, en diferentes épocas (Fig. 57).

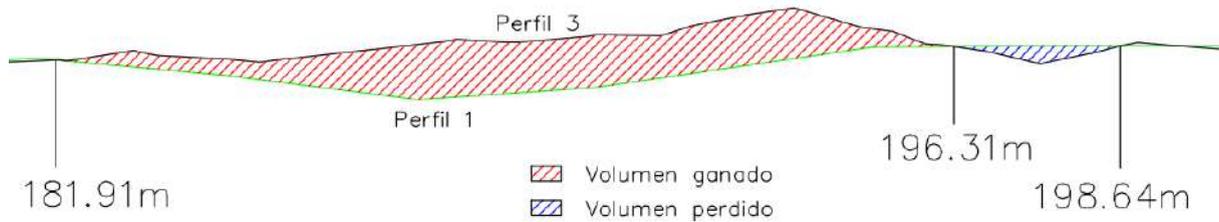


Fig. 57. Perfiles 1 y 3 en las progresivas 181.91m a 198.64m . Fuente: elaboración propia.

En caso de que el perfil del último vuelo (Perfil 3) esté por encima del mismo del primero (Perfil 1), se está frente a una ganancia de volumen. En caso contrario, se está frente a una pérdida de volumen.

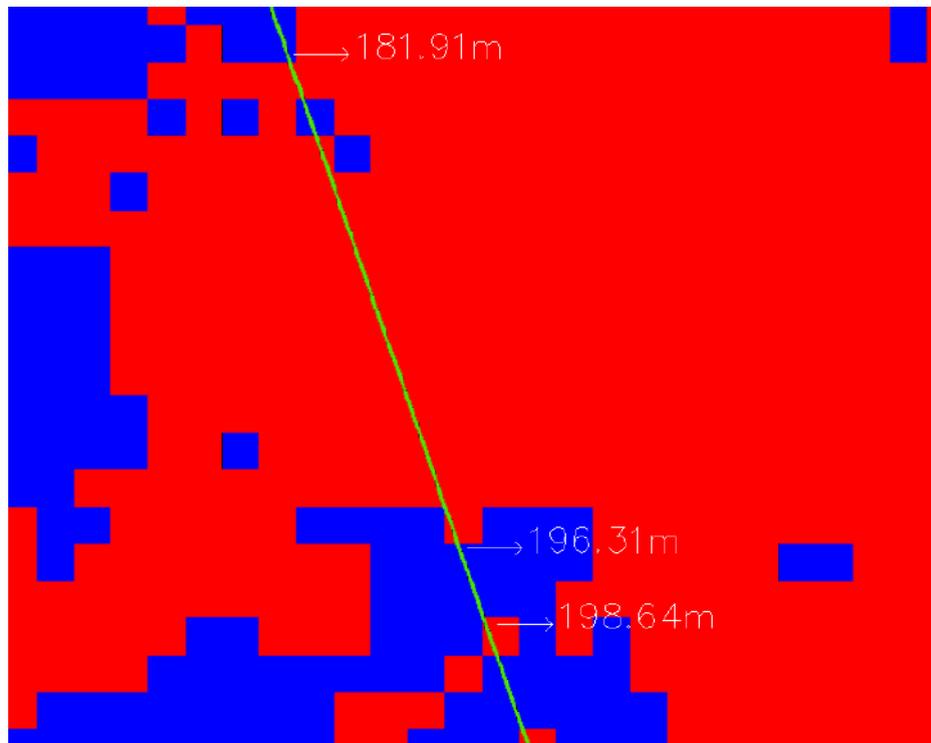


Fig. 58. Desmonte y Terraplén en progresivas 181.91m a 198.64m . Fuente: elaboración propia.

Si se ve dicho perfil en dichas progresivas sobre el modelo de Desmonte y Terraplén se puede afirmar que existe una coherencia entre ambos subproductos, ya que dentro del tramo de progresivas 181.91m a 196.31m la gran mayoría de píxeles son de color rojo, indicando una ganancia de volumen al igual que en la Fig. 57. De igual manera, dentro de las progresivas 196.31m a 198.64m se observan píxeles de color azul indicando una pérdida de volumen coherente con el análisis de perfiles.

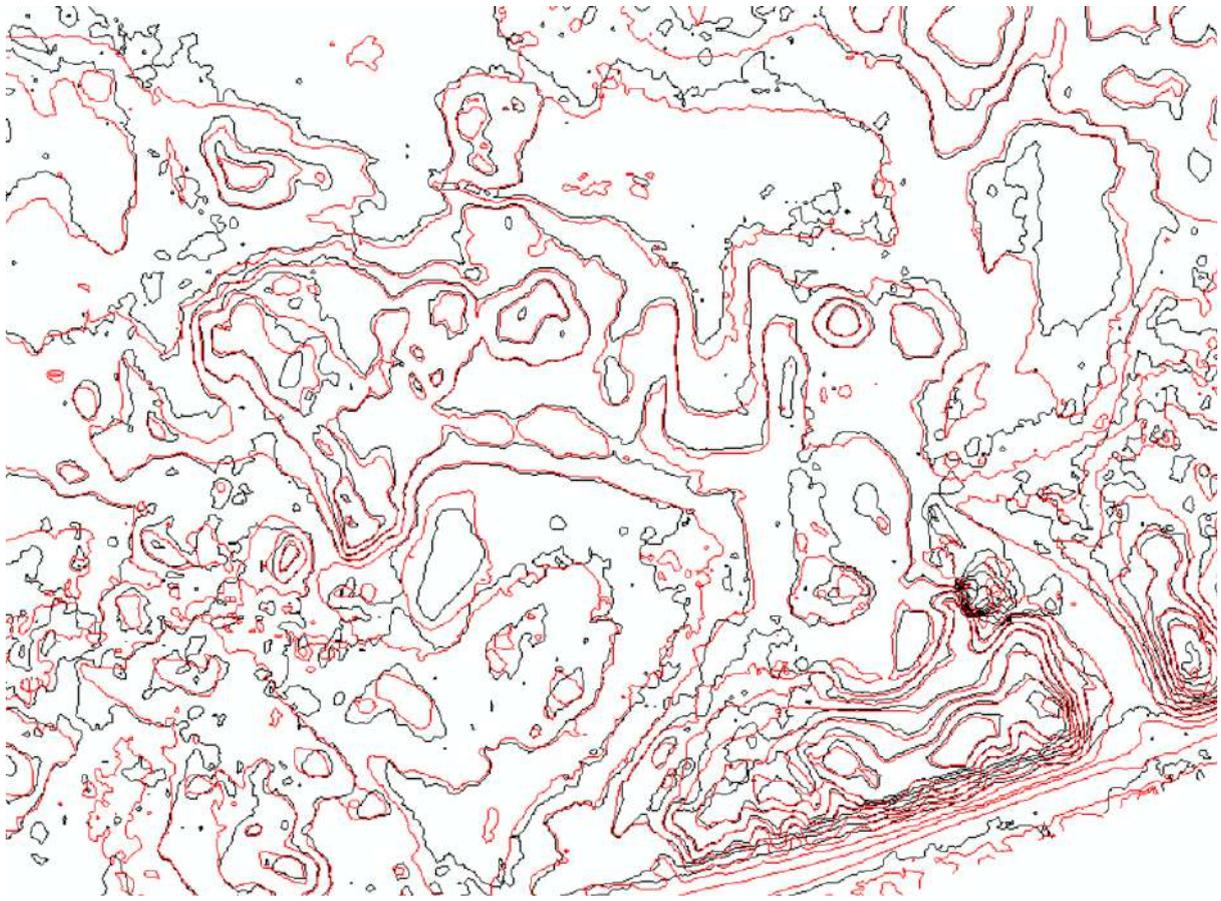
### 2do Análisis: Comparación de subproductos de distinta época

Para realizar el análisis inter-temporal, se utilizan los vuelos realizados el 28/01/2022 (Vuelo 1) y 06/06/2022 (Vuelo 3), con un lapso de 129 días entre ellos.

#### *Curvas de Nivel*

En términos generales, no existen grandes cambios en este subproducto, más allá de pequeñas variaciones en la forma y ubicación de las curvas, pero que no implican un cambio considerable en la superficie dunar. Sin embargo si se analiza localmente determinadas zonas se pueden apreciar cambios notables.

El siguiente detalle (Fig. 59) resulta de superponer las curvas de nivel generadas a partir del primer vuelo fotogramétrico que se lleva a cabo, y las curvas de nivel generadas en base al último vuelo, de color rojo y negro respectivamente. Se puede observar un cambio entre las curvas de nivel de ambas épocas, el subproducto del Vuelo 3 muestra una pérdida de arena considerable respecto al Vuelo 1.



*Fig. 59. Detalle de la comparación inter-temporal de Modelos de curvas de nivel de la zona aledaña a la desembocadura de Arroyo Pando. Fuente: elaboración propia.*

### *Resta de Modelos de Elevación*

A la hora de realizar una comparación cuantitativa y cualitativa de las alturas de dos modelos en distintas épocas, la resta de Modelos de Elevación es un subproducto de gran importancia. El mismo, se realiza utilizando la herramienta “Raster Calculator” en donde se le indica al software que se desean restar los raster de las distintas épocas (fig. 60).

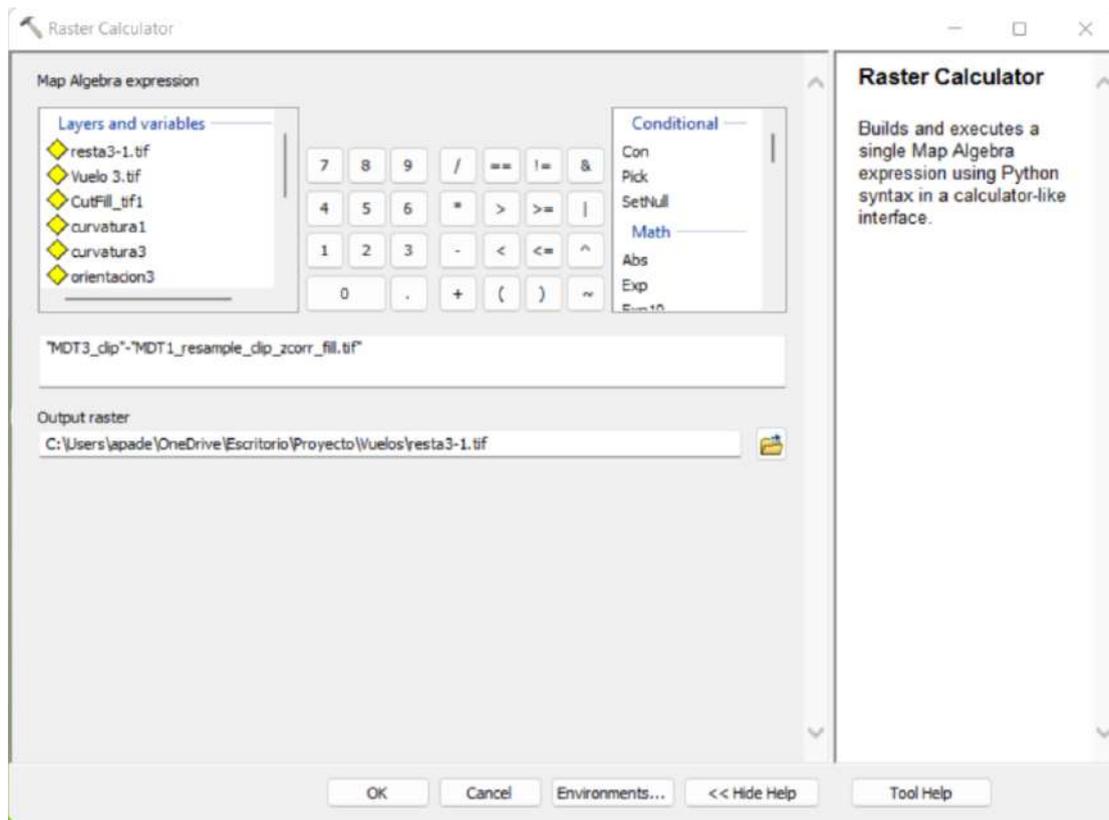


Fig. 60. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, herramienta "Raster Calculator". Fuente: elaboración propia.

Como resultado se obtiene un raster en donde cada píxel indica el valor de la resta de los dos modelos, por lo que al momento de analizarlos se puede determinar si, con el paso del tiempo, la cota de la superficie aumenta o disminuye, detectando así posibles cambios.

Para una mejor visualización gráfica, se puede ir a las propiedades de la capa (Fig. 61) e indicar que la representación gráfica del ráster se muestre clasificada en intervalos iguales. En este caso, se opta por establecer veinte intervalos para la clasificación.

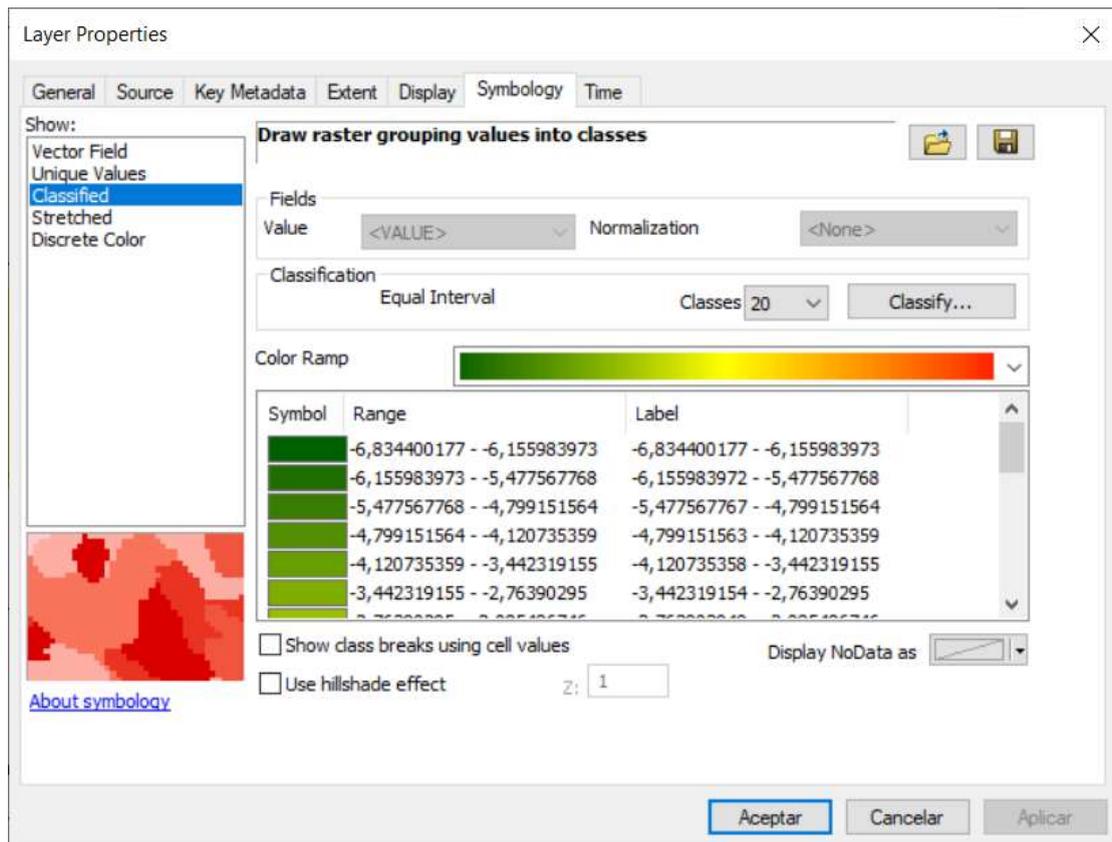


Fig. 61. Captura de pantalla del software ArcMap 10.8, "Layer Properties". Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, la mayoría de los píxeles del modelo de resta de ráster se encuentran en color amarillo, que según la escala son los valores próximos a 0, por lo que no se visualiza mayores cambios en las cotas de la zona en el lapso evaluado. Los píxeles en color verde, presentan valores negativos, lo que se corresponde a zonas donde la cota disminuyó con el paso del tiempo, contrario a aquellos lugares en color rojo, donde la cota aumentó.

Este subproducto permite una rápida visualización de los cambios, con respecto a la coordenada Z, de la zona a través del tiempo.

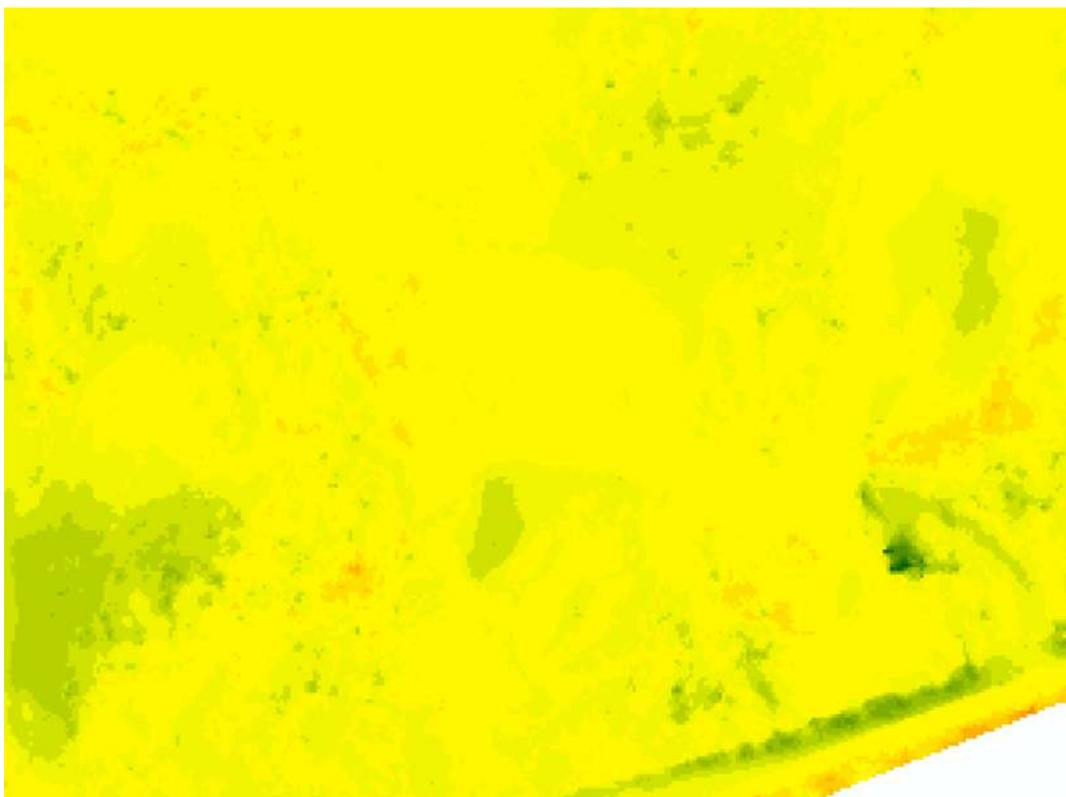


Fig. 62. Resta de los rasters de fecha 28/01/2022 y 06/062022 . Fuente: elaboración propia.

### *Comparación de perfiles*

A efectos de visualizar cambios en volumen y cota a lo largo del tiempo, se generan perfiles de la misma zona a partir de los Modelos Digitales de Elevación de distintas épocas, como resulta en la siguiente imagen (Fig. 63).

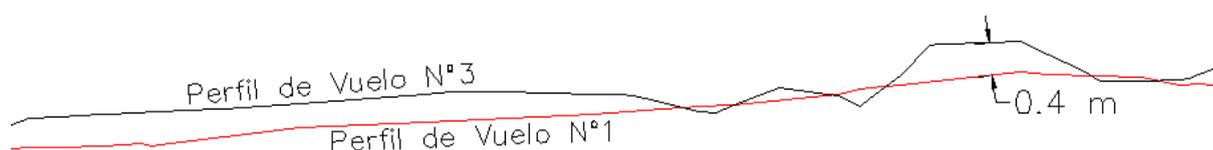


Fig. 63. Ejemplo de visualización de un tramo de dos Perfiles de Elevación generados en distintas épocas. Fuente: elaboración propia.

En este perfil en particular, se observa de manera clara qué zonas se encuentran a mayor y menor altura con respecto a dos vuelos realizados en distintas épocas. Además, también se puede evaluar el aumento o la disminución de volumen de arena, y en dónde se dan.

#### *Comparación de Ortomosaicos*

El cambio más notable detectado mediante la fotointerpretación de los ortomosaicos fué en la zona ubicada más hacia el Este del área de estudio, en la desembocadura del Arroyo Pando. En dicho lugar se observa como hubo un aumento en el área y volumen de arena simplemente observando ambas imágenes (Fig. 64 y 65).

Otro tipo de cambios que pudieron ser detectados están relacionados a la vegetación del lugar, donde se vió un crecimiento de la misma.



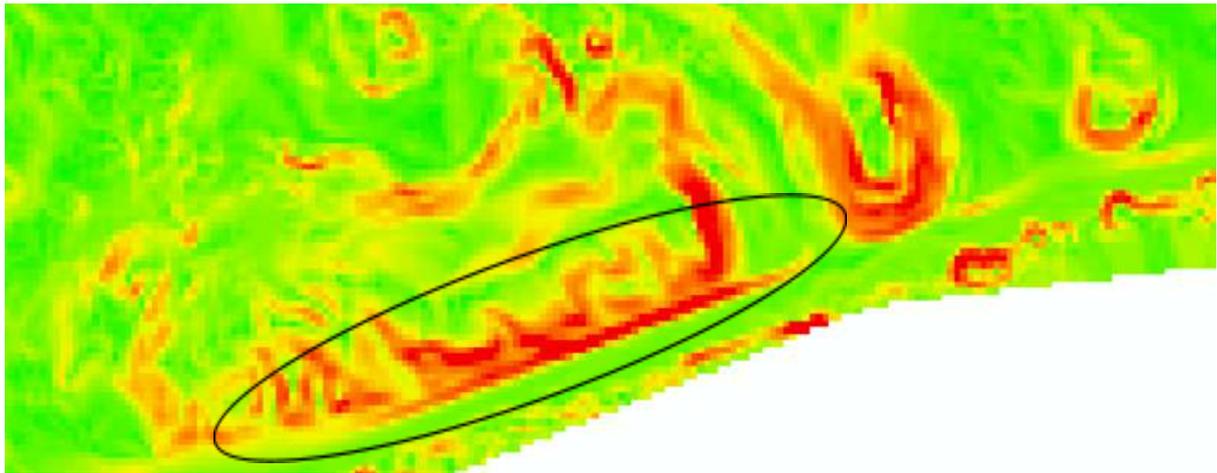
*Fig. 64. Zona Este del Ortomosaico del vuelo realizado el 28/01/2022. Fuente: elaboración propia.*



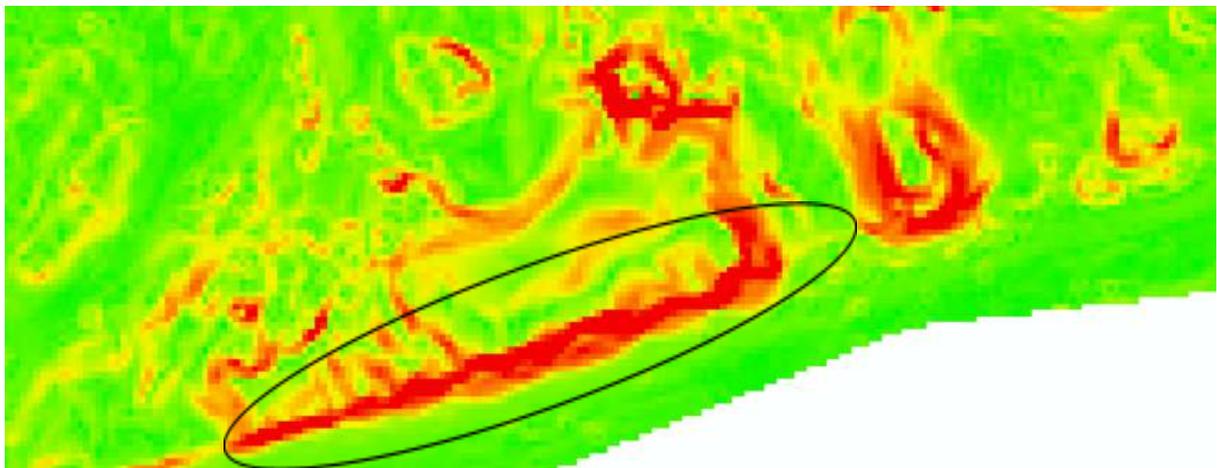
*Fig. 65. Zona Este del Ortomosaico del vuelo realizado el 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.*

### *Comparación de Modelo de Pendientes*

En este caso se detectó un desplazamiento con dirección hacia la ciudad, de las dunas más cercanas al agua. Las zonas de mayor pendiente en las Fig. 66 y 67 indican la ubicación de estas dunas y en las mismas se observó un cambio notable en su planimetría.



*Fig. 66. Modelo de Pendientes del vuelo realizado el 28/01/2022. Fuente: elaboración propia.*



*Fig. 67. Modelo de Pendientes del vuelo realizado el 06/06/2022. Fuente: elaboración propia.*

### *Comparación de volúmenes*

Para el caso de los vuelos realizados el 28/01/2022 y 06/06/2022, se obtuvieron volúmenes de  $533744\text{m}^3$  y  $560306\text{m}^3$  respectivamente, lo que representa un aumento de volumen de  $26.562\text{m}^3$  al paso del tiempo. Esto quiere decir que en aproximadamente 4 meses el volumen de arena de la zona aumenta en un 5% aproximadamente.

## Conclusiones

El objetivo principal del presente Proyecto de Grado es el de generar una metodología para detectar cambios en la topografía de zonas dunares a lo largo del tiempo. Poder **contar con una guía sencilla** que sirva de insumo **para detectar dichos cambios y en dónde se producen puede servir para aplicar políticas más eficientes de regeneración de los** mencionados **ecosistemas, utilizando la menor cantidad de recursos, enfocando la mirada en los lugares específicos donde se presentan los problemas** y evaluando sus causas exactas en base a la **cantidad considerable de variables que se pueden analizar a partir de los productos y subproductos generados**. Además, el hecho de poder llevar a cabo el estudio intertemporal siguiendo un protocolo determinado, automatizado, ayuda a reducir tiempos de campo y procesado, haciendo aún más eficiente la tarea.

Las playas concentran una de las actividades turísticas de mayor entidad en el verano de Uruguay. Además, cumplen importantes funciones de defensa contra tormentas. Por lo tanto, estamos frente a un ecosistema importante a nivel económico y medioambiental para el país. Tanto las dunas como la vegetación y fauna asociadas son ambientes altamente frágiles que requieren de acciones para poder mantener su calidad y funciones.

Es importante destacar, que el desarrollo de la metodología tuvo como propósito poder ser empleada por cualquier individuo, sin necesidad de que se cuente con conocimientos específicos de Agrimensura. Lo cierto es que, a pesar de que el mencionado objetivo en parte se cumplió, pues la mayoría de los pasos a seguir están automatizados si se utilizan los softwares recomendados, existen ciertos análisis de la calidad de los productos generados y su coherencia o maneras de uso de los equipos que se utilizan en la salida a campo, que requieren un conocimiento somero del área, como por ejemplo el manejo básico de algún tipo de equipo receptor GNSS, que, a los

efectos de no querer restringir la presente metodología a uno en específico no se detuvo en su explicación.

Como estudiantes de la carrera de Agrimensura, nos interesó poder emplear tecnologías que utilizamos en nuestra práctica profesional, como son los Drones, (que han tomado protagonismo en los últimos años, ya sea por la obtención de mayor densidad de datos que describen con mayor exactitud la superficie de estudio en un menor tiempo, a diferencia de las tareas topográficas tradicionales, obteniendo Modelos Digitales más próximos a las realidad, como también por la considerable reducción en su costo), orientados a la generación de insumos que sirvan a especialistas y/o organismos estatales interesados en la conservación del ecosistema dunar, como por ejemplo son el caso del Ministerio de Medio Ambiente, la Dirección Nacional de Ordenamiento Territorial así como aquellos Gobiernos Departamentales que concentran playas dentro de su jurisdicción.

Cabe destacar que el propósito de este trabajo es el de detectar, o no, cambios en la zona, más allá del por qué de dicho cambio. La explicación de estos últimos escapa a los objetivos del Proyecto y deberán ser estudiados por especialistas en zonas dunares.

A efectos de obtener una mejor visualización y organización de los pasos desarrollados en la metodología del presente, resultó interesante poder generar una tabla o “check list” (lista de chequeo en español), que contenga los hitos principales y sus sub-tareas, con los tiempos correspondientes a cada uno. La mencionada se puede encontrar en el Anexo del informe.

Una vez ejecutados los vuelos fotogramétricos y elaborados sus correspondientes productos y subproductos, se pudieron detectar en base a los análisis desarrollados, variaciones inter-temporales correspondientes a los aspectos topográficos que se pretendían abordar en primera instancia, por lo que el objetivo de la creación de la guía metodológica fue alcanzado.

Otro aspecto a resaltar es el de la relevancia de cada subproducto. En un principio la Lic. Geóloga Irene Balado indicó tres aspectos importantes a tener en cuenta a la hora del estudio inter-temporal; conocer la cota de cada punto sobre el terreno, conocer la diferencia de volúmenes y ser capaces de detectar cambios utilizando fotografías aéreas. Estas tres necesidades pueden ser cubiertas por los Modelos Digitales de Elevación, las diferencias de Volumen y el análisis visual de los Ortomosaicos. Pero, utilizando un lapso un poco mayor, aproximadamente de 30 a 40 minutos, solo de procesamiento de vuelo se obtienen otros subproductos, como los vistos en el presente, los cuales también pueden ser herramientas para detectar cambios en la zona.

Resulta importante destacar, además, la relevancia de colocar Puntos de Apoyo sobre el terreno para poder ajustar las imágenes del vuelo con respecto a su altimetría y planimetría, de esta manera poder tener un control de posicionamiento y así obtener un modelo más confiable. Esto se pudo corroborar en la realización de dos vuelos de prueba, por parte de los autores, en los que no se colocaron Puntos de Apoyo, lo que arrojó como consecuencia un mayor tiempo de procesamiento de ellos, pues se tuvo que georeferenciar tanto las Ortoimágenes como los Modelos de Elevación en base a la posición de infraestructuras presentes en la zona, como son casas, muros y postes, manualmente. Como resultado se obtuvieron productos de menor confianza, pues no se pudo realizar un control posicional al no contar con puntos con coordenadas conocidas, en este caso, relevados con receptor GNSS. Esto deriva en un análisis de congruencia entre productos y subproductos que podría comprender mayores errores.

También, siguiendo en la línea de la calidad posicional de los Modelos obtenidos, es trascendental la buena elección y distribución de los Puntos de Apoyo, como lo indica la fig. 18 del presente, asimismo, su correcta materialización asegurando una buena visual desde la altura de vuelo del dron.

Por último, la metodología propuesta en el presente Proyecto podrá ser utilizada en las Unidades Curriculares “Taller de Datos Espaciales y Sistemas de Información Geográfica” o “Sistemas de Información Geográfica (Avanzado)” con el fin de que los estudiantes lleven a la práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de dichos cursos y realicen una comparación inter-temporal mediante el análisis de productos y subproductos de distintas épocas.

## Bibliografía

- Calderón, L. (2020). *Apuntes de Sistemas de Información Geográfica Avanzado*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería UDELAR.
- Caram, P. Centi, N. Goyetche, M. (2021). *Propuesta de Actualización del Vuelo Fotogramétrico Nacional*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería, UDELAR.
- Caram, P. Silveira, B. (2020). *Apuntes de Fotogrametría*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería, UDELAR.
- Coito, A. (2019). *Presentación del software Pix4D*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería, UDELAR.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y Aplicación en las ciencias ambientales*.
- Ferrari, V. Lowinger, L. (2021). *Estudio de Planificación y Fraccionamiento de un Barrio Marino*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería, UDELAR.
- Gutiérrez, O. Panario, D. (2005, septiembre). *Dinámica geomorfológica de la desembocadura del Arroyo Pando, Uruguay. Geografía histórica y SIG, análisis de tendencias naturales y efectos antrópicos sobre sistemas dinámicos*. Xeográfica: Revista de xeografía, territorio e medio ambiente. N°. 5. Páginas 107-126.  
[https://www.researchgate.net/publication/283017299\\_Dinamica\\_sedimentaria\\_e\\_n\\_la\\_costa\\_uruguaya\\_evolucion\\_y\\_tendencias\\_de\\_playas\\_urbanas\\_en\\_el\\_marco\\_del\\_Cambio\\_Global](https://www.researchgate.net/publication/283017299_Dinamica_sedimentaria_e_n_la_costa_uruguaya_evolucion_y_tendencias_de_playas_urbanas_en_el_marco_del_Cambio_Global)
- Panario, D. Piñeiro, G. (1993, noviembre). *Dinámica sedimentaria y geomorfológica de dunas y playas en Cabo Polonio, Rocha*. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ciencias, UDELAR.

- Presidencia. (2 de enero de 2018). *Gobierno insta a veraneantes a cuidar las playas y proteger los ecosistemas marinos de Uruguay*. gub.uy. Recuperado el día 18 de agosto de 2022.

## Anexo

Tabla o “check list” de los pasos a seguir en la ejecución de la metodología.

Hitos de la metodología	Desarrollo de tareas específicas de los hitos	Tiempo estimado
<p><b>1. Estudio y delimitación de la zona que se quiera analizar.</b> Estudio de posibles restricciones de vuelo con UAV, delimitación del alcance del proyecto, abarcando uno o varios puntos notables que podrían servir para futuros controles.</p>		<p><b>4-5 horas</b></p>
<p><b>2. Elección de parámetros de vuelo.</b> Dicha elección se debe basar en variables como condiciones climáticas y de luminosidad, como también de los recursos con los que se cuentan y las precisiones que se quieran obtener. Estos parámetros se repetirán durante todos los vuelos que se realicen en la zona, para su posterior estudio inter-temporal.</p>		<p><b>1 hora</b></p>
<p><b>3. Salida a campo.</b> El presente ítem se puede desglosar en una serie de pasos a seguir.</p>	<p>i. <b>Elegir la ubicación de los Puntos de Apoyo</b>, de manera tal que ofrezcan una distribución homogénea a lo largo de la zona de estudio y <b>materializarlos</b> con el objetivo de que sean perfectamente visibles por parte del dispositivo UAV.</p>	<p><b>50 minutos</b></p>
	<p>ii. <b>Relevar los Puntos de Apoyo</b> con el receptor GNSS, conectado a una base del Servicio Geográfico Militar (SGM) y así <b>obtener sus coordenadas</b>.</p>	<p><b>15 minutos</b></p>
	<p>iii. Crear el proyecto en la controladora del Drone, cargando todos los parámetros establecidos anteriormente y el archivo KMZ que delimite el alcance</p>	<p><b>5 minutos</b></p>

	del vuelo.	
	iv. Verificar conexiones a internet y a la base del SGM en la controladora.	<b>2 minutos</b>
	v. <b>Elegir el sitio de despegue</b> , contemplando que no existan posibles obstáculos, posicionar el Drone, con su correspondiente batería, encenderlo y ejecutar el inicio de la misión de vuelo.	<b>5 minutos</b>
<p><b>4. Procesamiento de vuelo.</b> Aquí se elige el software que se va a utilizar, encargado de procesar las imágenes obtenidas en el vuelo y generar el Modelos Digital de Elevaciones, el Ortomosaico, y la nube de puntos LAS.</p>	i. Se deben de <b>cargar las imágenes capturadas en el vuelo</b> realizado en el software elegido.	<b>2 minutos</b>
	ii. Se <b>inicia el primer paso del procesamiento de imágenes</b> , en donde el software chequea los parámetros de calibración de la cámara durante el vuelo, reconoce los “key points” y se cargan las coordenadas de los puntos de control corrigiendo, imagen por imagen la posición de los mencionados manualmente, y así obtener una correcta georeferenciación de las imágenes.	<b>20 minutos</b>
	iii. A partir de las imágenes ya georreferenciadas, <b>se obtienen la nube de puntos LAS y el Ortomosaico.</b>	<b>80 minutos</b>
	iv. Obtenida la nube de puntos y el Ortomosaico, se elige un software de procesamiento geoespacial, a partir del cual <b>se generará el Modelo Digital de Elevación.</b>	<b>30 minutos</b>
<p><b>5. Creación de los subproductos.</b> Se debe elegir el software en el que se trabajará para generar los subproductos a partir del Modelo Digital de Elevaciones. En este caso, se desarrolló la metodología para trabajar en el denominado ArcMap.</p>	i. <b>Se crean las Curvas de Niveles</b> a partir del comando “Contour”, eligiendo una superficie de referencia y su espaciamento.	<b>5 minutos</b>
	ii. <b>Se crea el Modelo de pendientes</b> con el comando “Slope”.	<b>5 minutos</b>
	iii. <b>Se genera el Modelo de orientación</b> , ejecutando el comando “Aspect” en el software.	<b>5 minutos</b>

	iv. A partir del comando “Curvature” se <b>genera el Modelo de curvatura.</b>	<b>5 minutos</b>
	v. En el caso de contar con más de un vuelo, se puede ejecutar el comando “Cut fill” el cual <b>genera un Modelo de desmonte y terraplén</b> en base a dos Modelos de Elevaciones.	<b>5 minutos</b>
	vi. Se <b>generan perfiles transversales y longitudinales</b> de la zona, a partir de la intersección de líneas creadas manualmente sobre el modelo TIN, generado en base al MDE con la herramienta “Raster to TIN” para luego con el comando “Interpolate Shape” asignarle a cada punto de las líneas su elevación y poder obtener una visualización en forma de gráfica de los mismos a través de la herramienta “3d Analyst” > “Profile Graph”.	<b>10 minutos</b>
	vii. Se ejecuta el <b>cálculo de volumen</b> entre la superficie relevada y un polígono de referencia, establecido por el usuario.	<b>5 minutos</b>
<p><b>6. Análisis de coherencia de los resultados.</b> Con el fin de evaluar la calidad de los distintos procesamientos y los productos y subproductos generados se ejecuta un análisis de la congruencia de los mismos, comparándolos en parejas unos con otros. El segundo análisis que se ejecuta es el intertemporal entre vuelos realizados en distintas épocas, detectando así los cambios presentes en la zona.</p>	<b>a) Análisis de coherencia</b>	
	i. Se puede <b>evaluar la calidad del Modelo de curvas de nivel con el de pendientes</b> , sobreponiendo uno con el otro, para poder realizar un análisis visual de la coherencia entre ambos.	<b>10 minutos</b>
	ii. Si se quiere <b>evaluar la coherencia entre el MDE y los perfiles generados</b> , basta con recorrer estos últimos e ir verificando su cota correspondiente en el MDE.	<b>15 minutos</b>
	iii. Para <b>evaluar la calidad del Modelo de desmonte y terraplén</b> se lo puede contrastar con la diferencias de perfiles generados a partir de los dos vuelos que se utilizaron para la creación del primero.	<b>10 minutos</b>

<p><b>7. Repetir los pasos 3, 4, 5 y 6, con la mismas condiciones que se ejecutaron el o los vuelos anteriores (pasos 1 y 2).</b></p>		<p><b>4 horas y 44 minutos</b></p>
<p><b>8. Análisis intertemporal.</b> En esta etapa, se ejecuta el análisis a lo largo del tiempo, de los vuelos ejecutados y de esta manera detectar posibles cambios en los aspectos importantes a evaluar: cambios de volúmenes de arena, cambios en la cota de los puntos e inspecciones visuales para detectar cambios en la zona.</p>	<p>i. Curvas de nivel. Para el presente análisis se deben <b>superponer las curvas de niveles</b> generadas en los <b>distintos vuelos</b> y ejecutar una <b>inspección visual</b> de posibles cambios.</p>	<p><b>10 minutos</b></p>
	<p>ii. Para obtener una <b>diferencia de volumen</b> entre relevamientos ejecutados en distintas épocas se realiza una resta de los MDE generados con la calculadora ráster.</p>	<p><b>5 minutos</b></p>
	<p>iii. <b>Comparación de perfiles.</b> Para una mejor visualización de cambios a lo largo del tiempo con respecto a la coordenadas Z se pueden superponer perfiles correspondientes a cada una y así visualizar las diferencias presentes.</p>	<p><b>10 minutos</b></p>
	<p>iv. Para un análisis visual de cómo varía la zona costera de la dunas, <b>se comparan los ortomosaicos</b> generados en los vuelos.</p>	<p><b>10-15 minutos</b></p>
	<p>v. Con el fin de ejecutar el <b>análisis intertemporal de los Modelos de pendientes</b>, se comparan y analizan las diferencias que presentan visualmente entre ellos.</p>	<p><b>10 minutos</b></p>

## Reporte de calidad del Software Pix4D.

El siguiente reporte fue generado a partir del vuelo realizado el 06/06/2022.

### Quality Report

Generated with Pix4Dmapper version 4.5.6

**Important:** Click on the different icons for:

-  Help to analyze the results in the Quality Report
-  Additional information about the sections

 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

#### Summary

Project	Procesamiento2
Processed	2022-06-07 18:26:26
Camera Model Name(s)	FC6310R_8.8_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	3.52 cm / 1.39 in
Area Covered	0.531 km <sup>2</sup> / 53.1320 ha / 0.21 sq. mi. / 131.3601 acres
Time for Initial Processing (without report)	19m:07s

#### Quality Check

 <b>Images</b>	median of 21966 keypoints per image	
 <b>Dataset</b>	284 out of 284 images calibrated (100%), all images enabled	
 <b>Camera Optimization</b>	0.8% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 <b>Matching</b>	median of 3771.43 matches per calibrated image	
 <b>Georeferencing</b>	yes, 8 GCPs (8 3D), mean RMS error = 0.014 m	

#### Preview

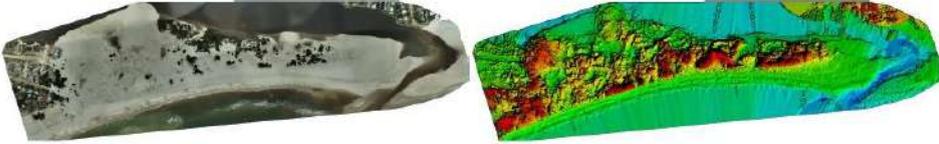


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

#### Calibration Details

Number of Calibrated Images	284 out of 284
Number of Geolocated Images	284 out of 284

#### Initial Image Positions

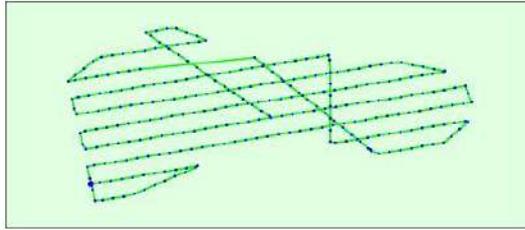
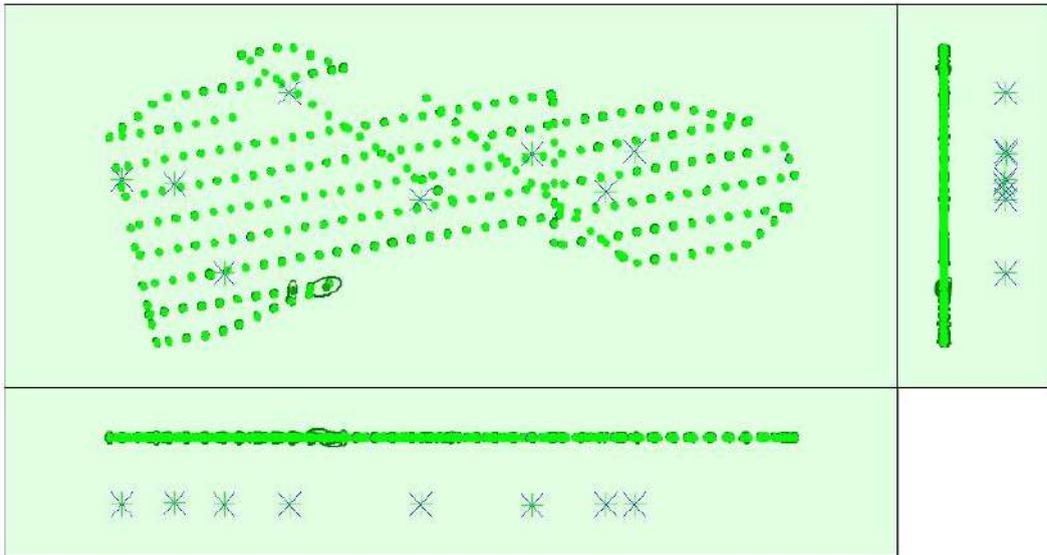


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

## 2 Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 1000x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

## 2 Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.006	0.006	0.007	0.003	0.003	0.002
Sigma	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001

## 2 Overlap

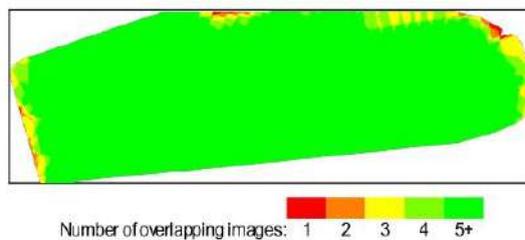


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

## Bundle Block Adjustment Details

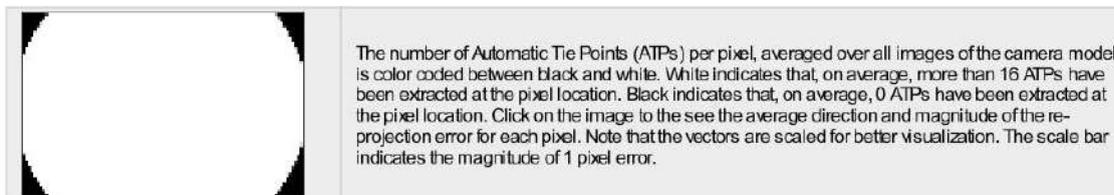
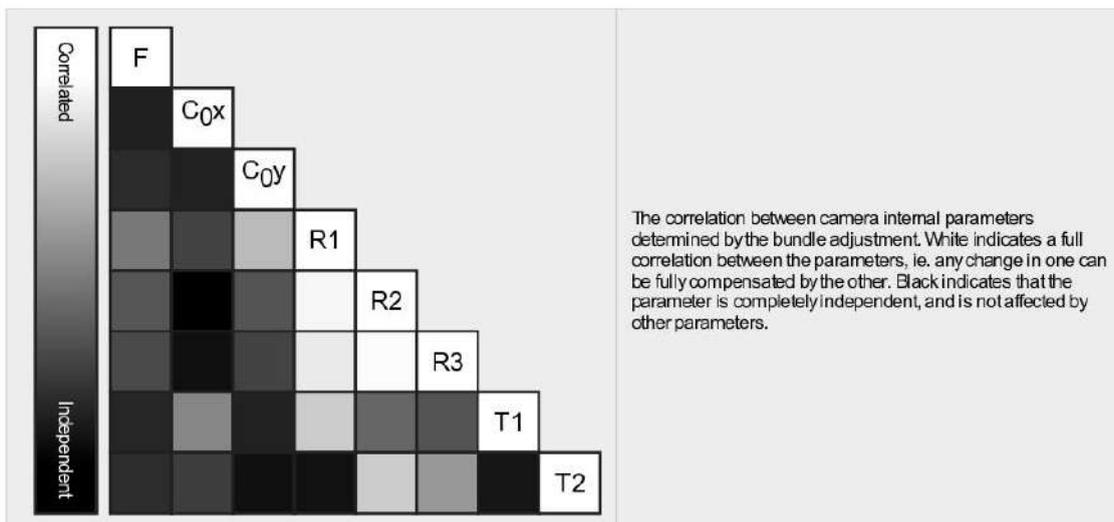
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1519464
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	496216
Mean Reprojection Error [pixels]	0.150

### Internal Camera Parameters

FC6310R\_8.8\_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.833 [mm] x 8.556 [mm]

EXIF ID: FC6310R\_8.8\_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3658.300 [pixel] 8.580 [mm]	2722.500 [pixel] 6.385 [mm]	1835.100 [pixel] 4.304 [mm]	-0.269	0.112	-0.033	0.000	-0.001
Optimized Values	3687.752 [pixel] 8.649 [mm]	2711.919 [pixel] 6.360 [mm]	1799.158 [pixel] 4.220 [mm]	-0.286	0.129	-0.038	0.000	-0.000
Uncertainties (Sigma)	0.103 [pixel] 0.000 [mm]	0.068 [pixel] 0.000 [mm]	0.055 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



### 2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	21966	3771
Mn	19178	72
Max	55131	31191
Mean	22803	5350

### 3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	300253
In 3 Images	84550

In 4 Images	40015
In 5 Images	23310
In 6 Images	15205
In 7 Images	10343
In 8 Images	7223
In 9 Images	5150
In 10 Images	3361
In 11 Images	2302
In 12 Images	1523
In 13 Images	1030
In 14 Images	695
In 15 Images	458
In 16 Images	345
In 17 Images	191
In 18 Images	121
In 19 Images	75
In 20 Images	36
In 21 Images	18
In 22 Images	9
In 23 Images	3

### 2D Keypoint Matches

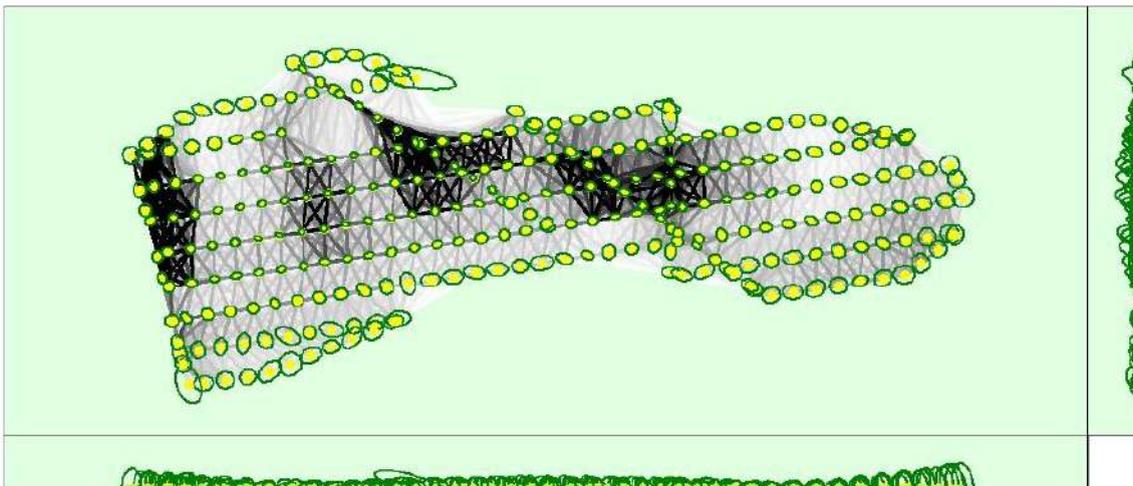


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

### Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.022	0.018	0.028	0.010	0.011	0.004
Sigma	0.009	0.007	0.013	0.004	0.005	0.002

## Geolocation Details

## Ground Control Points



GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
1 (3D)	0.020/ 0.020	0.017	-0.002	-0.026	0.409	10 / 10
2 (3D)	0.020/ 0.020	-0.010	-0.001	0.021	0.514	10 / 10
3 (3D)	0.020/ 0.020	0.003	-0.027	-0.001	0.618	9 / 9
4 (3D)	0.020/ 0.020	0.001	-0.009	0.003	0.796	10 / 10
5 (3D)	0.020/ 0.020	0.013	-0.006	-0.026	1.288	10 / 10
6 (3D)	0.020/ 0.020	-0.012	0.034	0.014	0.746	6 / 6
7 (3D)	0.020/ 0.020	-0.003	0.015	0.009	1.033	10 / 10
8 (3D)	0.020/ 0.020	-0.011	0.007	0.003	0.353	8 / 8
<b>Mean [m]</b>		-0.000355	0.001371	-0.000390		
<b>Sigma [m]</b>		0.010276	0.016752	0.016225		
<b>RMS Error [m]</b>		0.010282	0.016808	0.016230		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

## Absolute Geolocation Variance



Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-0.08	0.00	0.00	0.00
-0.08	-0.06	0.00	0.00	0.00
-0.06	-0.05	0.00	0.00	1.06
-0.05	-0.03	0.71	0.71	4.96
-0.03	-0.02	1.06	6.38	17.73
-0.02	0.00	48.23	43.97	27.66
0.00	0.02	46.81	43.26	24.47
0.02	0.03	2.84	3.90	16.67
0.03	0.05	0.00	1.42	5.67
0.05	0.06	0.00	0.35	1.42
0.06	0.08	0.35	0.00	0.35
0.08	-	0.00	0.00	0.00
<b>Mean [m]</b>		-0.025100	0.008044	-0.069963
<b>Sigma [m]</b>		0.008382	0.011077	0.021042
<b>RMS Error [m]</b>		0.026462	0.013690	0.073059

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-0.025025	0.007940	-0.070345

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

## Relative Geolocation Variance



Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	98.58	93.62	96.81
[-2.00, 2.00]	99.29	99.29	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
<b>Mean of Geolocation Accuracy [m]</b>	0.020864	0.020864	0.045336
<b>Sigma of Geolocation Accuracy [m]</b>	0.000880	0.000880	0.002213

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	0.370
Phi	0.820
Kappa	5.418

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

## Initial Processing Details

### System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i5-9400F CPU @ 2.90GHz RAM: 24GB GPU: NVIDIA GeForce GT 710 (Driver: 26.21.14.3200)
Operating System	Windows 10 Education, 64-bit

### Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 21S
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 21S

### Processing Options

Detected Template	3D Maps
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

## Point Cloud Densification details

### Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	36m:36s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	07m:04s

### Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	22964419
Average Density (per m <sup>3</sup> )	69.15

## DSM, Orthomosaic and Index Details i

### Processing Options i

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (3.52 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	14m:52s
Time for Orthomosaic Generation	39m:59s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s