



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INSTITUTO DE AGRIMENSURA**

Proyecto de Grado para optar al Título de Ingeniero Agrimensor

**ANÁLISIS DEL CÁLCULO DE VOLUMETRÍA EN UNA  
CANTERA A PARTIR DE RELEVAMIENTOS CON  
TECNOLOGÍAS GNSS Y UAV**

**TUTOR:** Prof. Adj. Ing. Agrim. Luis Alberto Calderón Ruiz (C.I.: 2.512.612-2)

**AUTORES:** Bach. Sebastián Gordienko Sorondo (C.I.: 4.494.226-4)

Bach. Martín Wainstein Rocha (C.I.: 4.465.894-2)

Montevideo, Uruguay  
2017



## PÁGINA DE APROBACIÓN

### FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Proyecto de Grado:

Título

.....  
.....

Autor/es

.....  
.....

Tutor

.....  
.....

Carrera

.....  
.....

Puntaje

.....  
.....

Tribunal

Profesor ..... (Nombre y firma)

Profesor ..... (Nombre y firma)

Profesor ..... (Nombre y firma)

4 de setiembre de 2017



## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, queremos agradecer a aquellas personas que incidieron en nuestra formación académica, en particular a nuestro tutor, Ing. Agrim. Luis Calderón, por el planteamiento de la idea para realizar el proyecto, y el apoyo brindado durante la ejecución del mismo.

A su vez, queremos dar gracias especiales, a los docentes Ing. Agrim. Hebenor Bermúdez e Ing. Agrim. Ricardo Yelicich, del Instituto de Agrimensura por estar a la orden en todo momento para brindar información, materiales y evacuar dudas.

En tercer lugar, reconocemos la disposición y la dedicación del Lic. en Geología Alejandro Schipilov, para facilitarnos el acceso al lugar de estudio. También a la empresa minera, Cañada Grande S.R.L., por permitirnos realizar los estudios dentro de la cantera.

Siguiendo en esta línea, agradecemos a la empresa UAV Agrimensura y al Ing. Agrim. Patricio Birriel, por su interés y por brindar su equipo UAV para realizar el relevamiento fotogramétrico. De igual manera, al Ing. Agrim. Juan Ignacio Beyhaut, por posibilitar el uso del instrumental GNSS y sus instalaciones, para el procesamiento fotogramétrico.

Por último, y no menos importante, queremos agradecer a nuestras familias, amigos y compañeros, que hicieron sentir su apoyo incondicional a lo largo de toda esta etapa universitaria.



## RESUMEN

El crecimiento en la utilización de dispositivos UAV, permite afirmar que en pocos años los mismos forman parte del uso cotidiano en distintas actividades profesionales relacionadas a las amplias y diversas ramas de la Ingeniería y, en particular, a la Agrimensura. Sin embargo, son escasos o no se encuentran accesibles, los libros o publicaciones que documentan hasta qué punto es apropiada o confiable, la utilización de ellos en ciertos ámbitos.

El objetivo principal del Proyecto es realizar una comparación entre un relevamiento fotogramétrico con UAV y un relevamiento topográfico con GNSS aplicado al cálculo de volumetría en una cantera en actividad.

Se realizó una comparación en cuanto a: los resultados obtenidos, las diferencias en el tiempo de relevamiento, la dificultad en el procesamiento de los datos, la precisión en los puntos relevados, la densidad de información recabada, los costos económicos, los riesgos físicos que genera esta actividad.

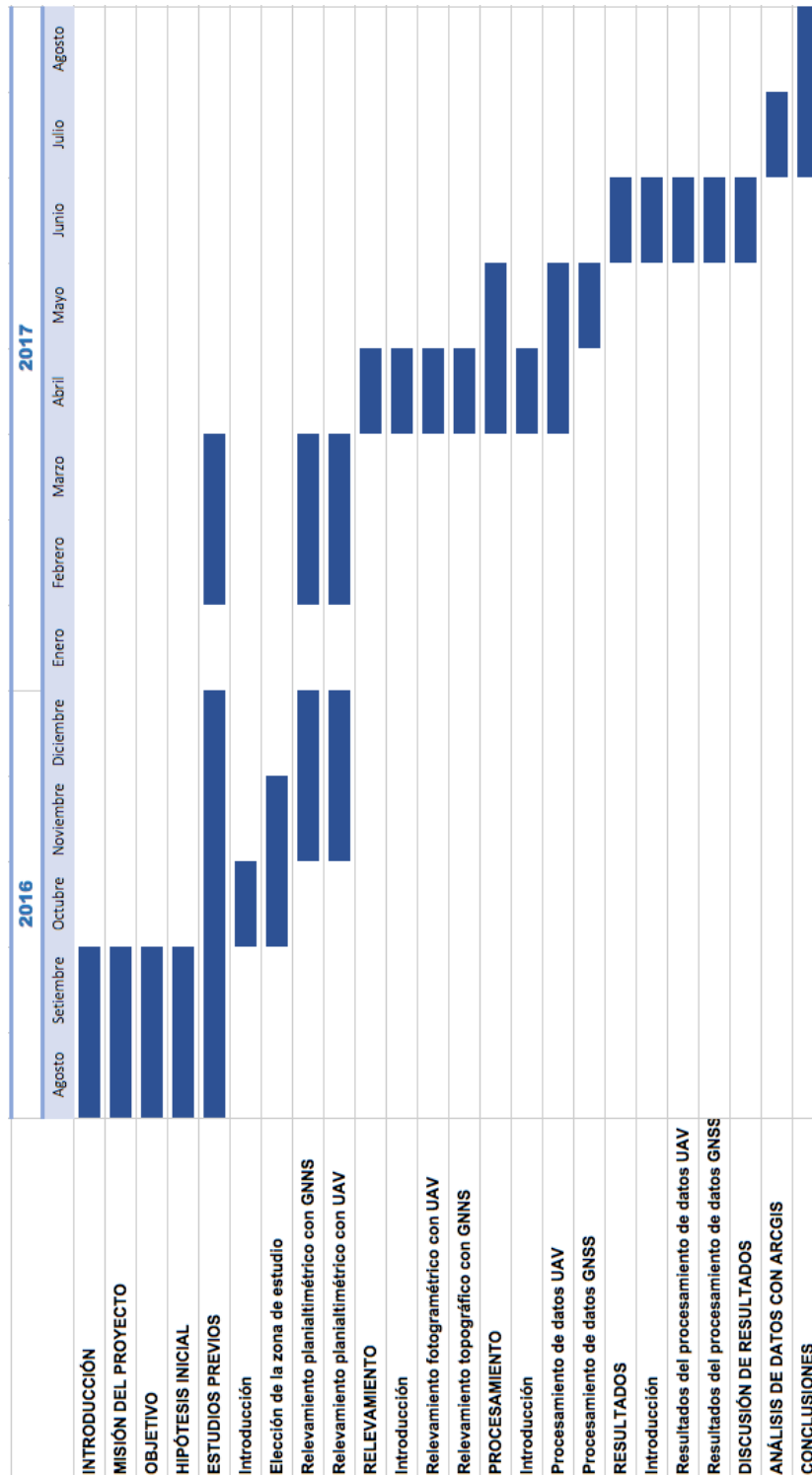
Se analizó la viabilidad de la utilización de los dispositivos UAV de acuerdo a las restricciones legales en materia de espacio aéreo. A partir de esto, se realizó el relevamiento topográfico en una cantera específica, utilizando las tecnologías GNSS y UAV, con los cuales se generaron distintos modelos digitales de terreno, para realizar posteriormente el cálculo de volumen extraído en la misma. A su vez, se analizaron diferencias puntuales entre los distintos modelos, y posibles errores que se pueden cometer con las distintas tecnologías empleadas.

Al momento del cálculo de volumen extraído, se obtuvieron diferencias menores al 5 % entre los distintos modelos generados. Se evaluaron los costos y los tiempos de relevamiento y procesamiento, obteniéndose una relación tiempos-costos mayor a la hora de utilizar el UAV. En cuanto a la seguridad, el relevamiento con GNSS implica mayores riesgos físicos por estar en mayor contacto con la cantera. Además, el uso del UAV, a pesar de ser más costoso, permite obtener cierto valor agregado que puede servir como insumo extra.

**Palabras clave:** GNSS, UAV, Minería, Volumetría.



## CRONOGRAMA





## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	IV
CRONOGRAMA.....	V
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. MISIÓN DEL PROYECTO .....	2
3. OBJETIVO.....	3
4. HIPÓTESIS INICIAL.....	3
5. ESTUDIOS PREVIOS .....	4
5.1. Introducción .....	4
5.2. Elección de la zona de estudio .....	4
5.2.1. Canteras del Parque Rodó .....	5
5.2.2. Cantera en explotación .....	6
5.2.3. Elección final del área de trabajo.....	11
5.3. Relevamiento planialtimétrico con GNSS .....	14
5.3.1. Pre-análisis .....	14
5.3.2. Evaluación del instrumental GNSS.....	19
5.3.3. Evaluación de la calidad posicional en un MDE .....	23
5.4. Relevamiento planialtimétrico con UAV .....	27
5.4.1. Plan de vuelo .....	27
5.4.2. Calibración de la cámara .....	31
5.4.3. Selección de puntos de apoyo.....	33
5.4.4. Señalización de los puntos de apoyo .....	37
5.4.5. Control de calidad del relevamiento planialtimétrico con UAV ....	39
6. RELEVAMIENTO .....	41
6.1. Introducción .....	41
6.2. Relevamiento fotogramétrico con UAV .....	41
6.2.1. Pre-señalización y mensura de los puntos de apoyo y de control	

---



de calidad .....	41
6.2.2. Condiciones para la toma de fotografías aéreas .....	43
6.2.3. Vuelo .....	44
6.3. Relevamiento topográfico con GNSS .....	49
6.3.1. Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS) .....	49
6.3.2. Relevamiento .....	50
7. PROCESAMIENTO .....	52
7.1. Introducción .....	52
7.2. Procesamiento de datos UAV .....	52
7.2.1. Descripción metodológica de la herramienta en el marco del proyecto .....	53
7.2.2. Procedimiento .....	54
7.3. Procesamiento de datos GNSS .....	67
7.3.1. Procedimiento .....	67
8. RESULTADOS .....	71
8.1. Introducción .....	71
8.2. Resultados del procesamiento de datos UAV .....	73
8.2.1. Resultados con 20 puntos de apoyo .....	73
8.2.2. Resultados con 10 puntos de apoyo .....	80
8.2.3. Resultados con 5 puntos de apoyo .....	83
8.2.4. Resultados con 29 puntos de apoyo .....	86
8.2.5. Resultados sin puntos de apoyo .....	89
8.2.6. Observaciones .....	91
8.3. Resultados del procesamiento de datos GNSS .....	91
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	92
10. ANÁLISIS DE DATOS CON ARCMAP .....	94
10.1. Introducción .....	94
10.2. Cálculo de volumen a partir de datos GNSS .....	94

---



10.3. Cálculo de volumen a partir de datos UAV .....	100
10.4. Resultados y análisis .....	104
10.4.1. Cálculo de volumen .....	104
10.4.2. Diferencias entre los modelos .....	105
10.4.3. Diferencias puntuales entre los modelos .....	109
10.4.4. Variación del plano de referencia en los distintos modelos para un volumen fijo .....	117
11. CONCLUSIONES.....	120
11.1. Conclusión de resultados obtenidos .....	120
11.2. Conclusión de tiempos requeridos (relevamiento).....	122
11.3. Conclusión de tiempos requeridos (procesamiento).....	122
11.4. Conclusión de costos .....	123
11.5. Conclusión de seguridad .....	125
11.6. Conclusión de valor agregado .....	126
11.7. Conclusión general y aspectos a mejorar .....	127
TABLA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	129
GLOSARIO.....	135
ANEXOS .....	137
BIBLIOGRAFÍA .....	168





## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como cometido exponer las tareas efectuadas y las conclusiones obtenidas en la realización de la materia *Proyecto*, de la carrera Agrimensura de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR.

Las tareas se iniciaron en el mes de agosto de 2016 y dieron fin en agosto de 2017. Dicho trabajo, se llevó a cabo por los estudiantes Sebastián Gordienko y Martín Wainstein, bajo la tutoría del Profesor Adjunto Ingeniero Agrimensor Luis Calderón, docente grado 3 del Instituto de Agrimensura.

El Proyecto de Grado está concebido como un trabajo de carácter científico o tecnológico que, por su contenido, desarrollo y metodología, constituye un aporte del estudiante a la comprensión y/o solución de un problema de carácter teórico o práctico concreto. Es un trabajo final del proceso formativo del estudiante terciario, en cuya elaboración se aplican las competencias laborales (conocimientos, habilidades, destrezas y valores) desarrolladas durante los años de estudio de la figura profesional que corresponda, en este caso, la del Ingeniero Agrimensor.

Es importante mencionar que el documento final, obtenido luego del estudio, debe contener conceptos claros y una terminología adecuada para que cualquier Ingeniero, cualquiera sea la orientación que haya elegido, sea capaz de comprender el mismo.



## 2. MISIÓN DEL PROYECTO

Todo proyecto busca mejorar una situación o solucionar una necesidad sentida o un problema existente. Hoy en día, el uso de los UAV está creciendo de manera vertiginosa, y no es ilógico pensar que en pocos años estos sean de uso cotidiano en distintas actividades profesionales relacionadas a la Ingeniería en general y, en particular, a la Agrimensura. Sin embargo, son escasos o no se encuentran accesibles, los libros o publicaciones que documentan hasta qué punto es apropiada o confiable, la utilización de ellos en ciertos ámbitos.

Algunas aplicaciones de los drones abarcan la cartografía forestal, la agricultura de precisión, la hidrología, la prospección, exploración y explotación minera, etc.

En el artículo 45 del Código de Minería - Ley N° 15242 de 8 de enero de 1982<sup>1</sup>, actualizado el 28 de febrero de 2014, se establece que las empresas mineras deben pagar un canon de producción anual a DINAMIGE por la explotación de las canteras que utilizan de acuerdo al volumen extraído de la mina.

Son muchos los Ingenieros Agrimensores y Licenciados en Geología, que están usando los dispositivos UAVs para el relevamiento de las canteras y el posterior cálculo de volúmenes, dejando de lado el relevamiento topográfico con GNSS, y aún más, el uso de la Estación Total para esta actividad. A pesar de esto, la precisión y la exactitud no son fácilmente accesibles.

---

<sup>1</sup> Se puede obtener de <http://www.dinamige.gub.uy>



### 3. OBJETIVO

El objetivo principal del Proyecto es comparar la relación costo-beneficio entre un relevamiento fotogramétrico con UAV y un relevamiento topográfico con GNSS aplicado al cálculo de volumetría en una cantera en actividad, generando a su vez, una propuesta metodológica.

Se realizará una comparación en cuanto a: los resultados obtenidos, las diferencias en el tiempo de relevamiento, la dificultad en el procesamiento de los datos, la precisión en los puntos relevados, la densidad de información recabada, los costos económicos, los riesgos físicos que genera esta actividad.

### 4. HIPÓTESIS INICIAL

Previo a la realización del estudio que engloba el proyecto, se planteó la siguiente hipótesis: el relevamiento con UAV no maneja mejores precisiones puntuales que un relevamiento con GNSS.

A pesar de esto, dada la gran cantidad de datos recabados, y su importante densificación (contiene una mayor cantidad de datos en un mismo espacio), aporta información más detallada de la topografía del lugar y, por lo tanto, surge la hipótesis de que permite un cálculo de volumetría más preciso.

A su vez, posiblemente el relevamiento con UAV implique una mayor cantidad de tiempo que el llevado a cabo con GNSS, a pesar de que la tarea en campo seguramente sea más rápida. Esto es porque la preparación que implica realizar un vuelo, desde la planificación del vuelo en sí, a la colocación y medición de los puntos de apoyo, y el procesado de los datos requiere una mayor dedicación.

En cuanto a costos, se espera que sean mayores los gastos a la hora de realizar el relevamiento con UAV en comparación al efectuado con Sistema GNSS. Esto surge de los precios de mercado de los equipos a utilizar.

Se considera que el relevamiento con GNSS requiere de un mayor conocimiento topográfico, es necesario saber qué medir, mientras que el vuelo requiere simplemente conocer y saber utilizar el dron. Esto supone que el error "humano" será mayor en la medición con GNSS. A lo largo del desarrollo del proyecto se confirmarán o descartarán cada una de estas hipótesis.

---



## 5. ESTUDIOS PREVIOS

### 5.1. Introducción

El objetivo de esta etapa se centra en definir los elementos que intervienen a la hora de realizar el levantamiento topográfico con GNSS y UAV.

La realización de un relevamiento topográfico requiere, antes de comenzar los trabajos, una planificación cuidadosa. Esta planificación implica la elección de la zona de trabajo, el estudio de posibles errores a cometer, la realización del plan de vuelo en un software adecuado, entre otros. De su buena ejecución dependerá la comodidad, rapidez y precisión del resto de los trabajos.

Al realizar la planificación hay que tener en cuenta todos los factores que inciden en el relevamiento para evitar retrasos, errores y cambios de planes en los momentos críticos.

### 5.2. Elección de la zona de estudio

La zona de trabajo implica un aspecto previo primordial a la hora de hacer el relevamiento debido a que es un caso único, y sobre éste se realizará todo el estudio. Ya que este proyecto intenta solucionar una problemática en la vida profesional de los Ingenieros Agrimensores y, eventualmente de los Licenciados en Geología, es importante elegir un área en la cual se puedan obtener resultados a partir de datos lo más reales posible.

Las opciones que se tuvieron en cuenta fueron: las Canteras del Parque Rodó y tres canteras en explotación (*Canteras Montevideo S.A.*, *Tomeo* ubicada en La Paz y *Cañada Grande S.R.L.* en Empalme Olmos).

Para la elección, se tuvieron en cuenta las siguientes características:

- Ubicación del predio.
- Accesibilidad.
- Situación actual de la cantera.
- Visibilidad aérea.



### 5.2.1. Canteras del Parque Rodó

Las *Canteras del Parque Rodó* se ubican entre la Avda. Dr. Juan Andrés Cachón y la Rambla Presidente Wilson, en la ciudad de Montevideo. Estas fueron creadas en el entorno de las antiguas canteras de granito existentes en el lugar.

Su ventaja principal es que se encuentran dentro de la ciudad, lo que implica un menor tiempo de llegada a las mismas y, por ende, la posibilidad de relevar durante una mayor cantidad de horas en una misma jornada.

A su vez, dada su cercanía a la Facultad de Ingeniería, se podría utilizar el equipamiento GNSS disponible en el Instituto de Agrimensura.

Otro aspecto a favor de estas canteras es que pertenecen al espacio público, haciendo que el acceso a las mismas no sea un impedimento.

Por último, estas canteras han sido objeto de estudio en cursos anteriores para su modelado y análisis de cálculo de volumen, por lo que se cuenta con la experiencia y resultados previos.

Como contrapartida, por no ser precisamente una cantera en explotación al día de hoy, los datos que se recogen no satisfacen del todo la problemática establecida.

La zona es parte de la Rambla y se utiliza para recreación, esto limita el procesamiento fotogramétrico debido al tránsito vehicular y de personas. Por lo tanto, se deberían tomar algunas precauciones.

Otro punto en contra es que, a simple vista, no existe un sector amplio, libre de obstáculos y de acceso público, que permitan el despegue y aterrizaje del UAV en el caso de utilizar uno del tipo de ala fija.

En menor medida, pero aspectos desfavorables también para el vuelo son, la existencia de vegetación, que impide visualizar el terreno y, por lo tanto, favorece el desarrollo de conclusiones no acertadas, y la presencia de vientos fuertes, que pueden provocar movimientos no deseados del dron.



Figura 1 - Vista aérea de las Canteras del Parque Rodó

### 5.2.2. **Cantera en explotación**

La gran importancia de utilizar una cantera activa como zona de estudio es poder estar en contacto con las dificultades reales que puedan llegar a existir en la práctica profesional, adaptarse a los tiempos que se exigen para la toma de datos y el procesamiento de los mismos, tener la posibilidad de poder contar con datos de desmonte y producción de años anteriores, etc.

Es un lugar que se encuentra libre de árboles, libre de personas ajenas a la industria y posiblemente con un amplio espacio para eventuales despejes y aterrizajes.

A su vez, es de gran ayuda contar con el apoyo del Geólogo responsable.

Como desventaja considerable, las canteras suelen encontrarse emplazadas a una distancia mucho mayor respecto a la del Parque Rodó. Por lo tanto, dificultaría coordinar la utilización del equipamiento topográfico del Instituto de Agrimensura, y habría que considerar conseguirlo prestado de algún particular.



A su vez, por ser un espacio privado, se requiere permiso de los titulares mineros para su acceso.

Otro inconveniente es que, al estar en explotación, existe un constante movimiento de suelos lo que significa que debería realizarse en **simultáneo** el relevamiento con UAV y con GNSS para poder obtener resultados comparables.

Se consiguieron tres canteras en explotación, entre las cuales se eligió la que será efectivamente objeto de estudio del proyecto. Las tres opciones fueron: *Canteras Montevideo S.A.*, cantera *Tomeo* y cantera *Cañada Grande S.R.L.*

#### 5.2.2.1. Canteras Montevideo S.A.

La empresa *Canteras Montevideo S.A.* se encuentra ubicada en la zona de Carrasco Norte, más precisamente en Camino Pavia 3112. Fue fundada en el año 1945.

Esta cantera se encuentra en constante explotación, los productos que extrae son:

- Piedra granítica triturada para mezclas asfálticas y hormigones.
- Piedra de diferentes tamaños para escolleras.
- Piedra para drenes, filtros, control de erosión.
- Piedra o material de balastaje para vías férreas.
- Piedra granítica para uso decorativo/jardines.

Esta cantera tiene la ventaja de que se encuentra dentro de la ciudad de Montevideo, por lo que el traslado hacia la zona de relevamiento no sería un inconveniente. A pesar de esto, la Resolución 291/014 de 1º de setiembre de 2014<sup>2</sup> de la DINACIA establece para los UAV en su Art. 2º, inciso “e” que, “*Para todos los dispositivos se prohíbe salvo autorización expresa de la Autoridad Aeronáutica el vuelo en zonas de tráfico de aeropuertos y aeródromos*” y dada la cercanía de la cantera al Aeropuerto Internacional de Carrasco (aproximadamente 4 km en línea recta), no podría realizarse el vuelo, por lo que se descartó.

---

<sup>2</sup> Se puede obtener de <http://www.dinacia.gub.uy>



Figura 2 - Vista aérea de las Canteras Montevideo S.A. y su proximidad al Aeropuerto Internacional de Carrasco

#### 5.2.2.2. Cantera “Tomeo”

La cantera se encuentra emplazada en La Paz, Canelones, en una zona donde existen varias concesiones mineras. Esta cantera, particularmente, está ubicada sobre Camino Sacomani.

Tiene como ventaja que, a pesar de ser una cantera en explotación, al momento que fue ofrecida, se encuentra casi quiescente (muy poco uso). Por lo tanto, facilita el recorrido dentro del predio y permite obtener una buena comparación entre los métodos de relevamiento.



La zona explotada es relativamente pequeña y tiene una forma bastante regular, lo que hace que el relevamiento topográfico pueda estar mejor organizado y permite utilizar la totalidad de la cantera para el estudio (esto se acerca más a la realidad de la actividad profesional).

Sin embargo, esta cantera tuvo que ser descartada, nuevamente por no poder volar el UAV según la normativa vigente establecida por la DINACIA, ya que se encuentra a menos de 5 km del Aeropuerto de Melilla. Este aeropuerto tiene mayor tránsito de aviones pequeños que el Aeropuerto de Carrasco que vuelan bajo en esa zona, lo que implica un gran riesgo.



Figura 3 - Vista aérea de la cantera Tomeo y su proximidad al Aeropuerto de Melilla

### 5.2.2.3. Cantera Cañada Grande S.R.L.

*Cañada Grande S.R.L.* es titular de una explotación de balasto y tosca con destino a la industria de la construcción (áridos). El yacimiento conforma el subsuelo de los padrones 54871, 55430 y 6562 de la 7ª Sección Catastral del Departamento de Canelones; se encuentra sobre el camino Luis Alberto de Herrera, a metros de la Ruta 82 (*Figura 4*).

La empresa comenzó a explotar para obtener material para la obra de la Ruta 102, luego de obtener la Autorización Ambiental de Operación en julio de 2012 bajo el expediente N° 0800712005944<sup>3</sup>.

Luego que dichas obras culminaron, la cantera entró en un período de quietud, aunque existe algún movimiento de tierra eventualmente.

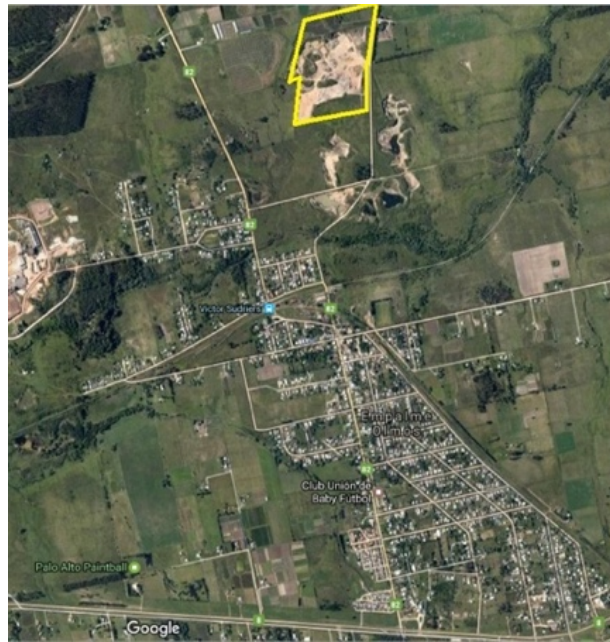


Figura 4 - Ubicación de la cantera Cañada Grande S.R.L.

Tiene poca vegetación, y se percibió la presencia de grandes cantidades de agua solamente en un sector. Ya que la cantera abarca una gran superficie, se podría dividir y trabajar solo en una parte.

La cantera tiene como gran ventaja, estar apartada lo suficiente de la ciudad y de los aeropuertos, en una zona rural. Por lo tanto, no habría dificultad para el relevamiento aéreo, teniendo además una zona libre para eventuales despegues y aterrizajes.

---

<sup>3</sup> Datos del Visualizador Geológico Minero de DINAMIGE (<http://visualizadorgeominero.dinamige.gub.uy>)



Figura 5 - Vista aérea de la cantera Cañada Grande S.R.L.

### 5.2.3. Elección final del área de trabajo

Consideradas todas las opciones, se optó por elegir la última, la cantera *Cañada Grande S.R.L.* Se realizó una visita el 13 de noviembre de 2016 para obtener algunas impresiones previas y aspectos significativos a tomar en cuenta para el relevamiento. Algunos de estos fueron:

- La cantera está quiescente (casi sin uso). Eventualmente existe tráfico de camiones para cargar acopio, así que es muy probable que esté totalmente libre el día del relevamiento.
- Se puede dividir la superficie total de la cantera para realizar el estudio sobre una zona de menor área (ver *Figura 6*).
- Se observó una buena zona de despegue y aterrizaje para el UAV en la esquina Sureste del predio (aunque no se sabe si se va a utilizar el dron de ala fija o el cuadricóptero). Es una zona amplia y despejada.
- Existe una línea de alta tensión sobre el alambrado Sur, pero el geólogo la ha sobrevolado con su dron (no topográfico) a una altura de 100 m y no tuvo problemas, así que no debería generar inconvenientes.
- Se midió la altura de los taludes para tener una idea del material excavado y así realizar el Pre-análisis.
- Existe un mojón que, de conocer la cota, se podría utilizar para definir la superficie durante el cálculo de volumen<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Esto posteriormente no fue tenido en cuenta ya que se utilizó como referencia una superficie plana de cota promedio.



Figura 6 - Zona de estudio

A continuación, se adjuntan algunas fotos tomadas en la visita previa.



Figura 7 - Taludes Este y Noreste de la cantera



Figura 8 - Piso de la cantera



Figura 9 - Talud Sureste y línea de alta tensión



## 5.3. Relevamiento planialtimétrico con GNSS

### 5.3.1. Pre-análisis

El objetivo del Pre-análisis es definir el instrumental y la metodología a utilizar para el relevamiento planialtimétrico con GNSS para la zona donde se realizará el estudio.

Todas las suposiciones, imágenes y ecuaciones fueron extraídas del texto *Estudio previo para un relevamiento planialtimétrico* redactado por los docentes del área de Teoría de Errores del Departamento de Geodesia del Instituto de Agrimensura, y utilizados en los cursos de Topografía del mismo.

Suponiendo que el relevamiento de puntos se realizara definiendo una cuadrícula, dado que es una forma sencilla y organizada de trabajar, se debe **determinar qué largo tendrán los cuadrantes de ésta**, siendo este dato, el primer parámetro que se pretende obtener en esta etapa de Pre-análisis. El segundo parámetro será el **error que se puede admitir en la cota altimétrica de cada punto relevado**.

Se parte del cálculo volumétrico, fijando una tolerancia ( $T_{vol}$ ) igual al 5 % del volumen de tierra que se estima, de forma aproximada, que será el resultado final del relevamiento de la cantera. Esto es resultado del producto entre el área de la misma y una diferencia de cotas promedio, entre la superficie del terreno y un plano teórico que servirá como base para realizar los cálculos.

Se consideró como superficie de referencia el terreno natural de la cantera, supuesto como plano a efectos de este cálculo aproximado. Por lo tanto, todo lo que se encuentre por debajo de éste, se toma como volumen extraído. Las alturas de los taludes fueron medidas de forma aproximada, con cinta métrica, cuando se realizó el reconocimiento de la zona.

$$V_T = 230000 \text{ m}^3 \Rightarrow T_{vol} = 12000 \text{ m}^3$$

A partir de la tolerancia, se puede determinar la desviación estándar del volumen:

$$\sigma_{vol} = \frac{T_{vol}}{3} = 4000 \text{ m}^3$$

Como se dijo, el levantamiento de puntos del terreno se supone realizado siguiendo una cuadrícula, por lo que, se distinguen dos fuentes de error que aportan al error en el volumen a terraplenar.

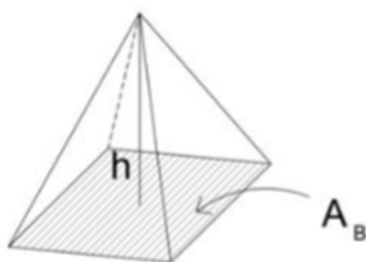
Estos son, el error intrínseco al cálculo del volumen ( $\sigma_{V_{cal}}$ ), y el error debido a las irregularidades del terreno ( $\sigma_{V_{irr}}$ ). Entonces,

$$\sigma_{vol}^2 = \sigma_{V_{cal}}^2 + \sigma_{V_{irr}}^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

1) Primero se estudiará el error  $\sigma_{V_{irr}}$ .

El error en el volumen a causa de las irregularidades del terreno puede ser asociado a una forma piramidal, siendo el área de la base ( $A_B$ ) de dicha pirámide igual al área de cada cuadrante de la cuadrícula, y su altura ( $h$ ) igual al límite de percepción visual por debajo del cual no es posible distinguir irregularidades en el terreno.

Este último valor se debe estimar. Entonces,



$$V = \frac{A_B \times h}{3}$$

Donde:

$$V = \sigma_{V_{irr}};$$

$$h = \sigma_{ap} = 1,5 \text{ m, error de apreciación.}$$

Figura 10 - Error en el volumen a causa de las irregularidades del terreno

El error  $\sigma_{V_{irr}}$  se repite para cada cuadrante de la cuadrícula, por lo tanto, el error total en el volumen a causa de las irregularidades del terreno es la sumatoria cuadrática de cada error en el volumen del cuadrante.

$$\sigma_{V_{irr}}^2 = \left(\frac{A_{B_1}}{3} \times \sigma_{ap}\right)^2 + \dots + \left(\frac{A_{B_N}}{3} \times \sigma_{ap}\right)^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{B_i}}{3} \times \sigma_{ap}\right)^2 = \frac{\sigma_{ap}^2}{9} \times \sum_{i=1}^N A_{B_i}^2$$

$$\sigma_{V_{irr}}^2 = \frac{\sigma_{ap}^2}{9} \times N \times A_B^2$$



Dónde:

$N$ , número de cuadrantes;

$A_B$ , área de cada cuadrante.

Además,  $A_B = \frac{A}{N}$ , donde  $A = 38000 \text{ m}^2$ , es la superficie total de la cantera.

Sustituyendo,

$$\sigma_{V_{irr}}^2 = \frac{\sigma_{ap}^2}{9} \times N \times \frac{A^2}{N^2}$$

$$\sigma_{V_{irr}}^2 = \frac{A^2 \times \sigma_{ap}^2}{9N} \quad \text{Ecuación 2}$$

Utilizando la fórmula de Pre-análisis, bajo la hipótesis de que en la *Ecuación 1* se asume que  $\sigma_{V_{cal}}$  y  $\sigma_{V_{irr}}$  influyen en partes iguales sobre el error total en el volumen ( $\sigma_{vol}$ ), se tiene que:

$$\sigma_{V_{irr}} = \frac{\sigma_{vol}}{\sqrt{2}} = 2828 \text{ m}^3 \quad \text{Ecuación 3}$$

Sustituyendo en la *Ecuación 2* el valor de  $\sigma_{V_{irr}}$ , obtenido en la *Ecuación 3*, se obtiene:

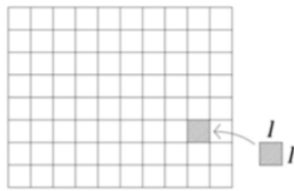
$$\frac{\sigma_{vol}^2}{2} = \frac{A^2 \times \sigma_{ap}^2}{9N}$$

Luego, se puede despejar  $N$  obteniendo:

$$N = \frac{2 \times A^2 \times \sigma_{ap}^2}{9\sigma_{vol}^2} = 45$$

Finalmente, con los valores de  $A$  y  $N$  se puede determinar el lado  $l$  de cada cuadrante de la cuadrícula como:



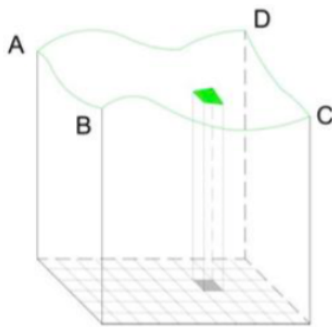


$$A_B = \frac{A}{N} = l^2$$

$$l = \sqrt{\frac{A}{N}} = 29 \text{ m}$$

Figura 11 - Cuadrícula de cuadrante de lado  $l$

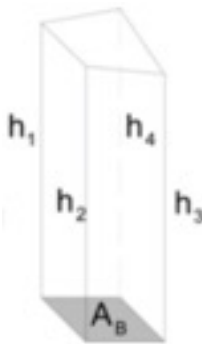
2) Ahora se procederá a estudiar el error  $\sigma_{V_{cal}}$ .



El volumen calculado ( $V_{cal}$ ) se puede ver como la sumatoria de volúmenes de prismas desde la superficie de referencia a la superficie modelada.

Figura 12 - Volumen del terreno

Para calcular el volumen hasta el terreno  $V_{cal}$ , se parte de un prismoide de base  $A_B$  y alturas  $h_1, h_2, h_3, h_4$  y volumen  $V$ .



$$V = \frac{A_B}{4} \times (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)$$

Donde  $A_B$  es el área de una cuadrícula y  $h_i$  es la cota de cada punto del terreno que delimita  $A_B$ ,  $\forall i = 1, 2, 3, 4$ .

Figura 13 - Prismoide de base  $A_B$

El volumen  $V_{cal}$  es la sumatoria de todos los volúmenes de los prismoides incluidos en  $ABCD$ .

Entonces,

$$V_{cal} = \sum_{i=1}^N V_i = \frac{A_B}{4} \times \sum_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} h_{i,j} + h_{i,j+1} + h_{i+1,j} + h_{i+1,j+1} \quad \text{Ecuación 4}$$



Donde:

$i, j$  posición de un punto en la cuadrícula de  $\left(\frac{d_2}{l}\right) \times \left(\frac{d_1}{l}\right)$  cuadrantes;

$$m = \left(\frac{d_2}{l}\right) - 1 = 4;$$

$$n = \left(\frac{d_1}{l}\right) - 1 = 8.$$

Para el cálculo de  $m$  y  $n$  se supone una cuadrícula de dimensiones  $d_1 = 250 \text{ m}$ ,  $d_2 = 150 \text{ m}$ , aproximadamente el largo y ancho de la zona de estudio.

Al variar  $i$  y  $j$  se tiene que cada  $h_{i,j}$  podrá contribuir 1, 2 o 4 veces en el cálculo del volumen  $V_{cal}$  según su posición en la cuadrícula. Considerando que los puntos  $A, B, C$  y  $D$  son los delimitantes de ésta, la *Ecuación 4* se puede reescribir como:

$$V_{cal} = \frac{A_B}{4} \times [h_A + h_B + h_C + h_D + 2 \times (h_{1,2} + h_{1,3} + \dots + h_{1,m}) + 4 \times (h_{2,2} + h_{2,3} + \dots + h_{n,m})]$$

Por otra parte, por tratarse de observaciones equilibradas se tiene que:

$$\sigma_{h_A} = \dots = \sigma_{h_{1,2}} = \dots = \sigma_{h_{n,m}} = \dots = \sigma_{CP}$$

Siendo  $\sigma_{CP}$  el error en la cota de un punto  $P$  genérico del terreno.

Entonces,

$$\sigma_{V_{cal}}^2 = \left(\frac{\delta V_{cal}}{\delta h_A}\right)^2 \times \sigma_{CP}^2 + \dots + \left(\frac{\delta V_{cal}}{\delta h_{1,2}}\right)^2 \times \sigma_{CP}^2 + \dots + \left(\frac{\delta V_{cal}}{\delta h_{n,m}}\right)^2 \times \sigma_{CP}^2$$

$$\sigma_{V_{cal}}^2 = \frac{A_B^2}{16} \times (\sigma_{CP}^2 + \dots + 4 \times \sigma_{CP}^2 + \dots + 16 \times \sigma_{CP}^2)$$

$$\sigma_{V_{cal}}^2 = \frac{A_B^2}{16} \times (4 \times \sigma_{CP}^2 + 4 \times J \times \sigma_{CP}^2 + 16 \times K \times \sigma_{CP}^2)$$

Donde:

$$J = 2m + 2n = 24;$$

$$K = m \times n = 32.$$



Por lo tanto,

$$\sigma_{V_{cal}}^2 = \frac{A^2}{4} \times Q \times \sigma_{CP}^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Siendo  $Q = 1 + J + 4 \times K = 153$ .

Utilizando la fórmula de Pre-análisis en la *Ecuación 1* se tiene que:

$$\sigma_{V_{cal}} = \frac{\sigma_{vol}}{\sqrt{2}}$$

Aplicando esto en la *Ecuación 5* se obtiene que:

$$\frac{\sigma_{vol}^2}{2} = \frac{A^2}{4} \times Q \times \sigma_{CP}^2 \Rightarrow \sigma_{CP}^2 = \frac{2 \times \sigma_{vol}^2}{A^2 \times Q} \Rightarrow \sigma_{CP} = \frac{\sqrt{2} \times \sigma_{vol}}{A \times \sqrt{Q}} = 1,2 \text{ cm}$$

Como resultado del Pre-análisis realizado para el relevamiento con GNSS, se concluye que será necesario **tomar puntos cada 30 m** (se realizará el recorrido sobre una malla en las zonas de poca pendiente, para facilitar la toma de datos) y se necesitará una **precisión de 1,2 cm en la cota de los puntos**.

### 5.3.2. Evaluación del instrumental GNSS

A partir de los resultados arrojados en el Pre-análisis, se comprobó que el instrumental GNSS utilizado cumplía los requisitos para realizar el relevamiento.

La Norma ISO 17123-8:2007<sup>5</sup> especifica los procedimientos de campo para determinar y evaluar la precisión de las mediciones efectuadas con Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) en modo cinemático en tiempo real (RTK, del inglés *Real Time Kinematic*). A continuación, se detalla el procedimiento a seguir según la publicación *Metrología y calibración de equipos en Información Geográfica*.

---

<sup>5</sup> Se puede obtener de <https://www.iso.org/>

El ensayo se realiza en 3 puntos fijos. En uno se sitúa la antena fija, y en los otros 2 se va estacionando la antena móvil. La distancia entre estos 2 puntos móviles será entre 2 a 20 metros (distancia “a”). La distancia entre el punto correspondiente a la antena fija y los otros 2 puntos es similar a la que exista en el trabajo a evaluar (distancia “b”).

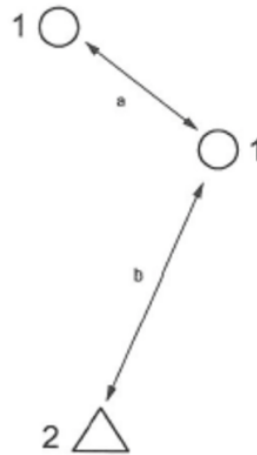


Figura 14 - Configuración de la antena fija (2) y la antena móvil (1)

La distancia reducida entre los puntos móviles, así como su desnivel, se han de medir con otros métodos con precisión mejor que 3 mm, diferentes a RTK. En este caso se utilizó la Estación Total Leica TC 407<sup>6</sup> disponible en el Instituto, y se realizó una serie de medidas aplicando la regla de Bessel.

Esos valores se considerarán como valores nominales, utilizándose en el primer paso del procedimiento con el fin de chequear la presencia de errores groseros.

Una serie de medidas está formada por 5 conjuntos de medidas. Cada conjunto consiste en 2 medidas sucesivas de las coordenadas  $x$ ,  $y$ , y  $h$  en un sistema de coordenadas local, en los 2 puntos móviles.

---

<sup>6</sup> Ver especificaciones en los *Anexos*, página 143



Resumen del procedimiento (extraído de la publicación antes mencionada):

- Se realizan 3 series de medidas, estando separado el comienzo de cada una como mínimo 90 minutos.
- En primer lugar, las medidas individuales se comparan directamente con los valores nominales para detectar posibles errores groseros en las medidas. Para ello, se calcula, para cada uno de los 5 conjuntos de coordenadas, la distancia entre ellos y el desnivel correspondiente. Estos no deben exceder de  $2,5\sqrt{2s_{xy}}$  para la distancia y de  $2,5\sqrt{2s_h}$  para el desnivel.
- Si alguno supera esas tolerancias, es de suponer la presencia de algún error grosero, y ha de repetirse de nuevo el procedimiento.
- Seguidamente se calculan los promedios de las 15 coordenadas de  $x$ ,  $y$  y  $h$  correspondientes a las 5 medidas de las 3 series para los 2 puntos móviles.
- Posteriormente se calcula el residuo de cada medida individual y a partir de todos, las desviaciones típicas correspondientes para las coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $h$ :

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum r_x^2}{28}}$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum r_y^2}{28}}$$

$$s_h = \sqrt{\frac{\sum r_h^2}{28}}$$

- El resultado de los ensayos es la desviación típica de una posición horizontal  $(x, y)$  individual y la desviación típica de una altura individual:

$$S_{ISO-GNSS RTK xy} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$$

$$S_{ISO-GNSS RTK h} = s_h$$

El resultado de las mediciones se expresa a continuación:

---



	Punto	CVI / CVD	X (m)	Y (m)	Z (m)
<b>SERIE 1</b>	A	CVI	<b>80,534</b>	<b>121,278</b>	<b>8,767</b>
	A	CVD	<b>80,534</b>	<b>121,278</b>	<b>8,769</b>
	B	CVI	<b>78,762</b>	<b>108,202</b>	<b>8,960</b>
	B	CVD	<b>78,762</b>	<b>108,203</b>	<b>8,961</b>
<b>SERIE 2</b>	A	CVI	<b>80,537</b>	<b>121,279</b>	<b>8,766</b>
	A	CVD	<b>80,538</b>	<b>121,280</b>	<b>8,766</b>
	B	CVI	<b>78,762</b>	<b>108,203</b>	<b>8,960</b>
	B	CVD	<b>78,763</b>	<b>108,203</b>	<b>8,959</b>
<b>SERIE 3</b>	A	CVI	<b>80,535</b>	<b>121,278</b>	<b>8,768</b>
	A	CVD	<b>80,536</b>	<b>121,279</b>	<b>8,768</b>
	B	CVI	<b>78,762</b>	<b>108,202</b>	<b>8,962</b>
	B	CVD	<b>78,762</b>	<b>108,203</b>	<b>8,960</b>

Tabla 1 - Mediciones realizadas con Estación Total

<b>SERIE I</b>				
	Punto	X (m)	Y (m)	h (m)
<b>SERIE 1</b>	A	<b>61,871</b>	<b>215,909</b>	<b>32,708</b>
	B	<b>58,406</b>	<b>203,175</b>	<b>32,902</b>
<b>SERIE 2</b>	A	<b>61,869</b>	<b>215,912</b>	<b>32,705</b>
	B	<b>58,402</b>	<b>203,178</b>	<b>32,907</b>
<b>SERIE 3</b>	A	<b>61,870</b>	<b>215,910</b>	<b>32,700</b>
	B	<b>58,398</b>	<b>203,179</b>	<b>32,909</b>
<b>SERIE 4</b>	A	<b>61,868</b>	<b>215,914</b>	<b>32,698</b>
	B	<b>58,396</b>	<b>203,181</b>	<b>32,912</b>
<b>SERIE 5</b>	A	<b>61,870</b>	<b>215,903</b>	<b>32,708</b>
	B	<b>58,393</b>	<b>203,180</b>	<b>32,907</b>

<b>SERIE II</b>				
	Punto	X (m)	Y (m)	h (m)
<b>SERIE 1</b>	A	<b>61,860</b>	<b>215,918</b>	<b>32,723</b>
	B	<b>58,413</b>	<b>203,179</b>	<b>32,926</b>
<b>SERIE 2</b>	A	<b>61,864</b>	<b>215,906</b>	<b>32,723</b>
	B	<b>58,410</b>	<b>203,177</b>	<b>32,929</b>
<b>SERIE 3</b>	A	<b>61,866</b>	<b>215,906</b>	<b>32,725</b>
	B	<b>58,418</b>	<b>203,174</b>	<b>32,929</b>
<b>SERIE 4</b>	A	<b>61,866</b>	<b>215,904</b>	<b>32,728</b>
	B	<b>58,412</b>	<b>203,174</b>	<b>32,927</b>
<b>SERIE 5</b>	A	<b>61,865</b>	<b>215,902</b>	<b>32,721</b>
	B	<b>58,411</b>	<b>203,177</b>	<b>32,916</b>

<b>SERIE III</b>				
	Punto	X (m)	Y (m)	h (m)
<b>SERIE 1</b>	A	<b>61,873</b>	<b>215,908</b>	<b>32,704</b>
	B	<b>58,414</b>	<b>203,170</b>	<b>32,911</b>
<b>SERIE 2</b>	A	<b>61,870</b>	<b>215,909</b>	<b>32,716</b>
	B	<b>58,422</b>	<b>203,172</b>	<b>32,892</b>
<b>SERIE 3</b>	A	<b>61,875</b>	<b>215,903</b>	<b>32,709</b>
	B	<b>58,425</b>	<b>203,166</b>	<b>32,892</b>
<b>SERIE 4</b>	A	<b>61,872</b>	<b>215,900</b>	<b>32,711</b>
	B	<b>58,413</b>	<b>203,170</b>	<b>32,907</b>
<b>SERIE 5</b>	A	<b>61,870</b>	<b>215,905</b>	<b>32,704</b>
	B	<b>58,413</b>	<b>203,174</b>	<b>32,926</b>

Tabla 2 - Mediciones realizadas con GNSS

CVI: Circulo Vertical Graduado a la izquierda  
CVD: Circulo Vertical Graduado a la derecha



Se realizaron los cálculos correspondientes tal como se explicó anteriormente, los cuales arrojaron los siguientes resultados:

$$S_{ISO-GNSS RTK xy} = 0,008 m$$

$$S_{ISO-GNSS RTK h} = 0,011 m$$

Se obtuvo como conclusión una **desviación típica de una altura individual de 1,1 cm**, ésta se encuentra en el orden de la precisión requerida según el Pre-análisis (1,2 cm). Por lo tanto, se puede afirmar que el instrumental GNSS que se tiene a disposición, **cumple los requisitos** para realizar el relevamiento.

### 5.3.3. Evaluación de la calidad posicional en un MDE

En esta etapa se evaluó la calidad posicional en un MDE para corroborar que la metodología utilizada a la hora del relevamiento con GNSS es adecuada.

El principal inconveniente de los MDE es que los mismos están conformados por puntos que no son fácilmente identificables en el terreno, sobre todo los que tienen estructura de malla.

Esto implica utilizar métodos de interpolación, para lo cual existen múltiples posibilidades, dando resultados distintos cada uno de ellos.

La solución proviene por utilizar el método de interpolación más elemental y que mejor se ajuste a la realidad del terreno.

Como se expresa en el libro *Evaluación de las componentes de la calidad de la información geográfica*, la principal condición es que los puntos de apoyo se tomen sobre superficies de terreno consideradas como planos (que tengan pendiente constante) y estos planos deben tener un tamaño de al menos 2 veces el tamaño de la celda del MDE. De esta forma el método de interpolación lineal es válido.

En campo se debe (según el libro mencionado anteriormente):

- Buscar el plano de pendiente constante. La proyección horizontal de esta superficie debe ser equivalente a un cuadrilátero de lado el doble del paso de malla.
- Levantar cuatro puntos con una metodología adecuada formando un cuadrilátero de aproximadamente el lado del paso de malla.
- Se toman las coordenadas de los puntos relevados y se interpola la

altura a partir del modelo para cada punto.

- Se calcula la altura del punto del MDE que queda incluido entre los puntos relevados.
- Se calculan las medidas de exactitud posicional. En este caso, interesa calcular la primera.

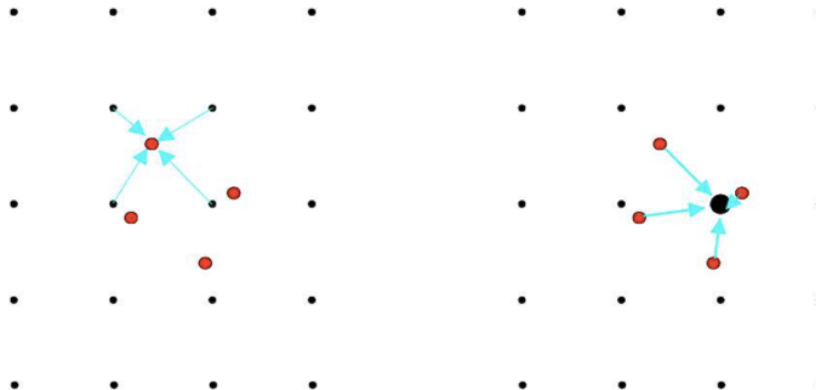


Figura 15 - Ejemplo de interpolación

Medidas (extraídas del mismo libro):

- *Error medio cuadrático absoluto en altitud, con interpolación sobre el MDE:* Se obtendrá de las diferencias entre las altitudes medidas y las correspondientes interpoladas del MDE.
- *Error medio cuadrático absoluto en altitud, con interpolación sobre puntos del terreno:* Se obtendrá de las diferencias entre las altitudes del MDE y las correspondientes interpoladas a partir de las medidas de campo.
- *Error medio cuadrático relativo en altitud con interpolación sobre el MDE:* Se calculará comparando desniveles entre las altitudes derivadas de las medidas de campo y los desniveles correspondientes obtenidos a partir de las interpolaciones del MDE.
- *Error medio cuadrático relativo en altitud con interpolación sobre los puntos del terreno:* Se calculará comparando desniveles obtenidos de las altitudes del MDE con desniveles obtenidos a partir de las interpolaciones de las medidas de campo.





El estudio se realizó en una parte llana de las *Canteras del Parque Rodó* ya que es una zona similar a la de trabajo y cercana a la Facultad de Ingeniería. Se simularon las condiciones de trabajo a utilizar posteriormente en la cantera, creando una malla con celdas de lado 60 m aproximadamente, que fue lo que permitía la zona.

Los puntos se midieron con sistema GNSS, aplicando el método diferencial en tiempo real. Se utilizó como base una estación colocada a unos 200 metros de la zona de estudio. Se usó el sistema de coordenadas WGS84, y la proyección fue UTM 21S<sup>7</sup>.

Se midieron un total de 50 puntos, de los cuales 30 se usaron para el procesamiento y generación del MDE, y los restantes 20 para la comparación. Luego de realizado el relevamiento, se generó el TIN con el software *TopoStudio*, ya que será el utilizado para generar el TIN de la cantera. Dicho software genera la red de triángulos para generar las curvas de nivel. Sin embargo, no permite al usuario consultar el valor de elevación de cualquier punto de la superficie el, por lo que se utilizó el software *ArcMap* para realizar dicha consulta.

En el software *ArcMap* se carga el TIN, y se lo convierte en un modelo ráster. A partir de este, se extrae el valor de elevación de los puntos a evaluar utilizando la función *Extract Value to Point*.

Esta función genera un nuevo conjunto de datos geográficos en formato shapefile, cuya tabla de atributos contiene dos columnas, una columna con la cota de cada punto medido con GNSS, y otra con el valor extraído en el modelo ráster.

En la siguiente tabla se encuentran las cotas de los 20 puntos, medidas y obtenidas a partir del MDE:

---

<sup>7</sup> A efectos del Proyecto se considera nulo el efecto producto del factor de escala por utilizar UTM



Punto	Z (m) terreno	Z (m) MDE	Diferencia (m)
1	15,306	15,268	0,038
2	15,549	15,469	0,080
3	15,710	15,739	0,029
4	15,917	15,906	0,011
5	15,634	15,648	0,014
6	15,576	15,532	0,044
7	15,740	15,805	0,065
8	15,715	15,688	0,027
9	15,418	15,429	0,011
10	15,157	15,189	0,032
11	15,104	15,118	0,014
12	15,412	15,404	0,008
13	15,667	15,588	0,079
14	15,447	15,440	0,007
15	15,307	15,325	0,018
16	15,296	15,283	0,013
17	15,300	15,344	0,044
18	15,454	15,399	0,055
19	15,383	15,293	0,090
20	14,965	15,001	0,036

Tabla 3 - Cotas de los puntos en el terreno y en el MDE

Por último, como se dijo anteriormente, se calcula el **error medio cuadrático en altitud con interpolación sobre el MDE**, esto arroja un resultado del orden de **4,5 cm**.



## 5.4. Relevamiento planialtimétrico con UAV

### 5.4.1. Plan de vuelo

#### 5.4.1.1. Introducción

Este apartado se realizó en base a la publicación *Apuntes de Fotogrametría III*.

La misión del vuelo fotogramétrico tiene por objeto:

- Sobrevolar la zona a una altitud que debe calcularse en función de la escala deseada y de la distancia principal de la cámara.
- Cubrir con sus imágenes una determinada zona, y para ello es preciso que cada fotograma tenga una zona común con las contiguas, "zona de recubrimiento".

Para que puedan cumplirse estos objetivos, el UAV deberá volar a una altitud constante, siguiendo una ruta predeterminada y a una velocidad constante, para poder realizar capturas de imágenes con intervalos regulares, que se corresponden a recorridos iguales.

A partir de los datos obtenidos previamente en el *Pre-análisis*, se considera que para tener coherencia entre los distintos MDTs generados se necesitará trabajar con un tamaño de píxel de alrededor de 1,2 cm.

El tamaño de píxel en las imágenes será la variable conocida, y en función de este dato, se irá variando la altura de vuelo, teniendo como factores determinantes también, el tiempo de vuelo total, y los solapes longitudinal y transversal de las fotos.

#### 5.4.1.2. Acerca del software

El plan de vuelo se realizó con el software GeoPilot, el cual se utilizó por la razón de que es un software libre, de uso relativamente sencillo y aplicable a distintos UAVs.

El GeoPilot es un software cartográfico creado por la empresa C-Astral para planificar las misiones de vuelo. Esta, es una empresa aeroespacial, proveedora de soluciones, con sede en Ajdovscina, Eslovenia.

Han estado en el ámbito aeroespacial desde 1999 y son los creadores del primer Vehículo Aéreo No Tripulado en ese país, realizando el primer vuelo en el año 2005.

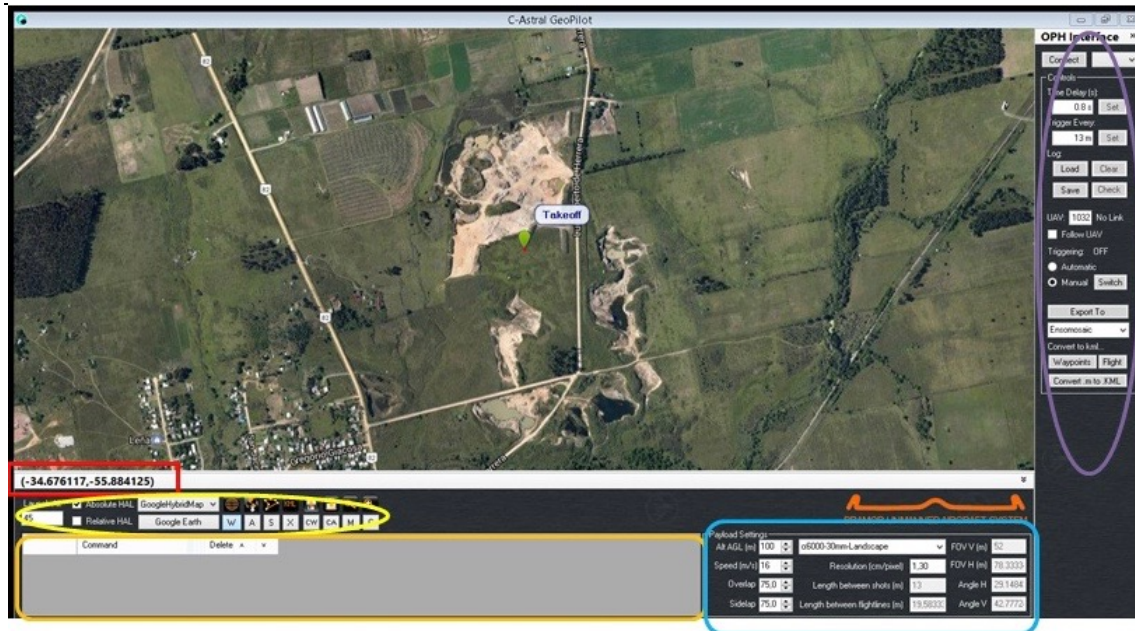


Figura 16 - Interfaz del Software C-Astral GeoPilot

El programa trabaja con una interfaz gráfica de usuario sencilla que consiste en un mapa base (existe la opción de que este mapa base sea el de las imágenes de Google Earth), una barra de tareas, una barra de notificaciones, una lista de “Waypoints” (concepto explicado más adelante), la configuración de la cámara y la “OPH interface” (*Ortophoto Interface*).

En la *Figura 16* se muestran la barra de notificaciones (en color rojo), la barra de tareas (en color amarillo), la lista de “Waypoints” (en color naranja), la configuración de la cámara (en azul) y la interfaz de la ortofoto (en violeta).

Este software tiene como ventaja que se puede importar archivos kml. Estos ficheros contienen información geográfica, que puede ser exportada desde Google Earth, en el cual se pueden situar en un mapa distintos lugares que estén relacionados o incluso delimitar el área de interés donde se quiere trabajar.



### 5.4.1.3. Elaboración del plan de vuelo

Para poder realizar el plan de vuelo, el software solicita que el usuario indique ciertas características del vuelo:

- *Área de vuelo y punto de despegue*: se selecciona en el mapa los vértices del área de interés a partir del comando *Enter Area Draw Mode*. Luego, se indica en el mapa el punto de despegue del UAV con el comando *Set Takeoff*.
- *Líneas de vuelo*: para trazar las líneas de vuelo existen dos opciones, una manual y otra automática. Ambas soluciones se basan en la selección de “Waypoints”, puntos de referencia que indican cambios de dirección o de rumbo. Mientras que, en la manual, el usuario selecciona en pantalla dichos puntos (*Enter Waypoint Draw Mode*), en la automática es el propio software quien los selecciona. Esto último se realiza a través del comando *Create Area Grid*.
- *Solape transversal y longitudinal*: en la barra de configuración de la cámara se selecciona los porcentajes de solapamiento que se requieren. *Overlap* para el solape longitudinal y *Sidelap* para el solape transversal.
- *Altura de vuelo*: en la barra de configuración de la cámara se puede seleccionar la altura, en metros, elegida (*Alt AGL (m)*).
- *Resolución (pixel / cm)*: esta variable varía en función de la altura de vuelo. El usuario puede fijar la resolución (*Resolution (pixel / cm)*) y automáticamente el software ajustará dicha altura.

Luego de realizar dichos pasos, la barra de notificaciones indica los siguientes datos de interés:

- Distancia aproximada recorrida en el vuelo.
- Duración aproximada del vuelo.
- Número aproximado de imágenes tomadas en el vuelo.
- Tiempo entre toma de imágenes.
- Área cubierta.



#### 5.4.1.4. Criterios tenidos en cuenta

Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El área de vuelo, considerada en la planificación, debe ser mayor que el área de interés, para asegurarse de tener mayor cantidad de imágenes en los bordes.
- El plan de vuelo sirve como estimativo del tiempo de vuelo y las alturas, a priori, que se podrían utilizar. Al momento de realizar el vuelo esto puede variar por el sentido y velocidad del viento, teniendo que hacer un plan alternativo.
- Hay que tener en cuenta elementos en el terreno que puedan llegar a limitar la altura de vuelo y la zona de aterrizaje y/o despegue, por eso es importante visitar previamente la zona a relevar.

#### 5.4.1.5. Resultados

Luego de configurar los parámetros del plan de vuelo y ajustar detalles, se obtuvieron los siguientes resultados, expresados en la barra de notificaciones, como se dijo anteriormente:

- *Distancia aproximada recorrida en el vuelo: 5754 m*
- *Duración aproximada del vuelo: 5 minutos 59 segundos*
- *Número aproximado de imágenes tomadas en el vuelo: 384*
- *Área cubierta: 7 Hás*

En la *Figura 17* se muestra el mapa base con las líneas de vuelo y la barra de configuración de la cámara, con las distintas variables ajustadas.

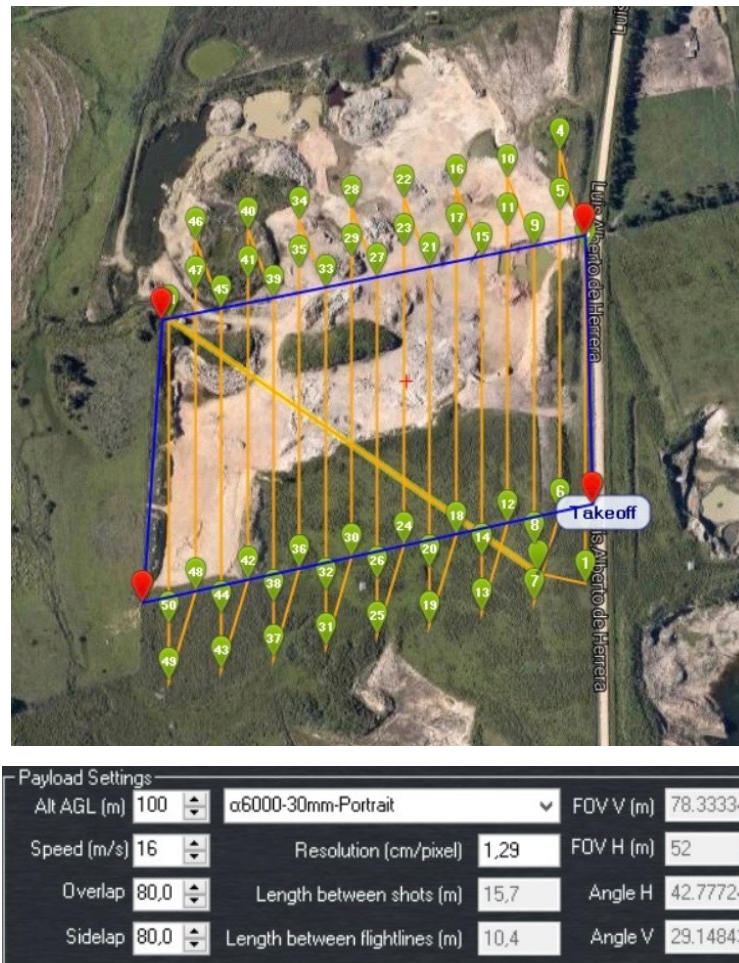


Figura 17 - Mapa base y configuración de la cámara

### 5.4.2. Calibración de la cámara

Actualmente, existe una gran variedad de cámaras digitales no métricas (sus características ópticas son desconocidas) que son utilizadas con fines fotogramétricos. Estas cámaras poseen buena calidad radiométrica, pero no así, calidad geométrica. Es por esto, que se debe realizar, previo al relevamiento fotogramétrico, la calibración correspondiente de la misma.

En lo que concierne a este proyecto, el vuelo se hizo a través de la empresa UAV Agrimensura, la cual realizó la calibración de la cámara Sony α6000 a la hora de adquirir el dron y para algún otro caso puntual, ya que el propio software de procesamiento de las imágenes (*Pix4D*) reconoce la cámara y determina los parámetros automáticamente.

Para realizar la calibración, en su determinado momento, se utilizó el programa “Camera Calibration Software” de la compañía Topcon. Como resultado se obtiene un certificado de calibración de la cámara, el cual contiene los parámetros de orientación interna de la misma<sup>8</sup>:

- *Distancia focal calibrada*: La distancia focal es la distancia medida a lo largo del eje óptico desde el nodo posterior del lente al plano imagen de mejor definición. La distancia focal que se obtiene en el proceso de calibración es la denominada distancia focal calibrada, que puede diferir de la indicada por el fabricante.

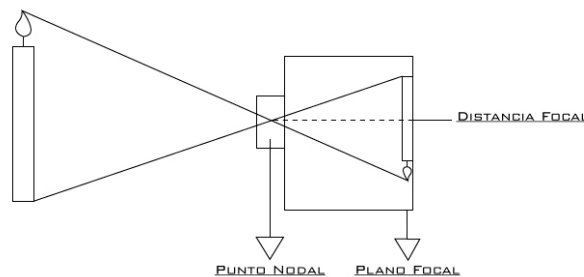


Figura 18 – Distancia focal

- *Coordenadas del punto principal*: Para el caso de las cámaras analógicas, el punto principal es el punto determinado por la proyección ortogonal del centro de proyección sobre el plano del negativo. Las coordenadas de este punto son  $x, y$ , que generalmente difieren del centro geométrico del negativo. Para el caso de la cámara digital, en lugar del plano de negativo hay un grupo de sensores, y el resultado de la ubicación del punto principal será la posición de un pixel.
- *Distorsiones geométricas*: Todos los objetivos fotográficos convencionales producen, en mayor o menor medida, distorsiones geométricas como son la distorsión radial y la tangencial.
  - *Distorsión radial*: Es un tipo de aberración que origina que las líneas rectas aparezcan como curvas en la fotografía, debido a la desalineación que sufren los rayos al atravesar las distintas lentes. Los componentes simétricos de la distorsión radial ocurren a lo largo de las líneas radiales con centro en el punto principal de mejor simetría.

<sup>8</sup> No se pudo obtener el certificado de calibración, lo cual no afecta a los intereses del Proyecto



- *Distorsión tangencial*: Se debe a las imperfecciones en la construcción y posicionamiento del conjunto de lentes, que produce la no coincidencia de los centros de curvatura de la lente con el eje óptico. En las lentes modernas, el efecto de distorsión tangencial es pequeño comparado con la distorsión radial.

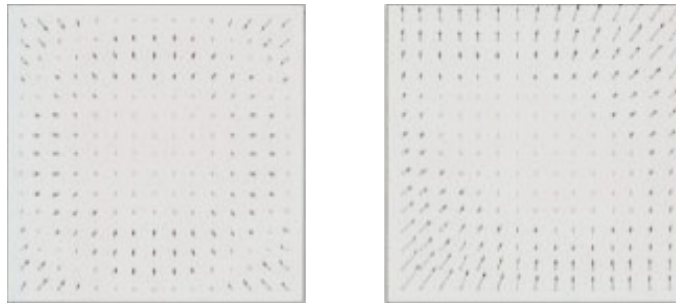


Figura 19 – Distorsión radial (izquierda) y tangencial (derecha)

### 5.4.3. Selección de puntos de apoyo

#### 5.4.3.1. Control terrestre

En la fase de orientación absoluta se necesita conocer las coordenadas terrestres de una serie de puntos del fotograma, para poder ajustar la escala del modelo estereoscópico y realizar la nivelación de éste, estos puntos se los conoce como puntos de apoyo (también conocidos como puntos de control).

El número mínimo de puntos para poder efectuar esta operación es de tres, dos puntos en X, Y, Z (planimétrico - altimétrico) para poder llevar a cabo el ajuste de la escala del modelo y un tercero en Z (altimétrico) de manera que sumados a los dos anteriores, hacen un total de tres puntos de coordenadas altimétricas conocidas, para poder efectuar la nivelación del modelo.

La determinación de las coordenadas planimétricas (control horizontal) y altimétricas (control vertical) de estos puntos se conoce con el nombre de “apoyo de campo”. La determinación de los puntos de apoyo puede realizarse:

- Utilizando procedimientos clásicos de la topografía, pudiéndose dividir los trabajos a realizar en dos fases:

1. Obtención de una red básica por medio de triangulaciones, trilateraciones, intersecciones o poligonales de precisión.  
Esta red básica irá enlazada a la red geodésica para permitir conocer las coordenadas absolutas.
  2. Red de apoyo fotogramétrico, constituida por puntos determinados por mediciones que se apoyan en la red anterior.
- Utilización de GNSS. Estos instrumentos de medición agilizan mucho la toma de datos en campo, ya que no están condicionados a las observaciones clásicas de los instrumentos topográficos.

#### 5.4.3.2. Cantidad y distribución de los puntos de apoyo fotogramétricos

Anteriormente se ha hecho mención del número mínimo teórico de puntos de apoyo en un par, pudiéndose añadir otros para tener un control del modelo. De la forma que menciona el libro *Apuntes de Fotogrametría III*, se puede adoptar la distribución donde aparecen conjuntamente cuatro puntos con coordenadas X, Y, Z (planimétrico - altimétrico) teniendo, dos puntos de control para la puesta en escala del modelo, y un quinto punto de coordenada Z (altimétrica) que daría, unido a los cuatro anteriores un total de cinco puntos altimétricos, resultando dos de control, permitiendo de este modo verificar los basculamientos (movimiento de giro sobre un eje vertical) del modelo y las deformaciones de la imagen, por medio del punto central.

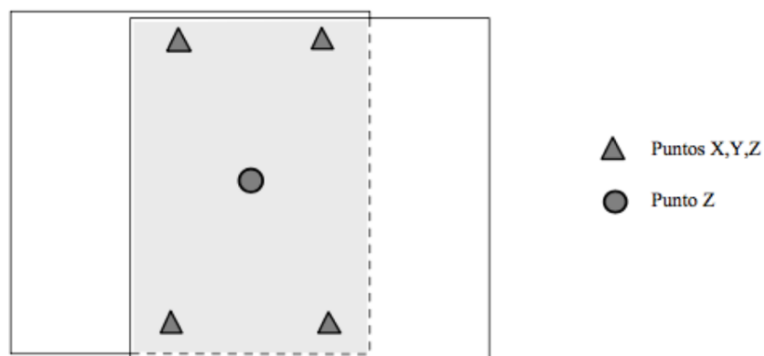


Figura 20 – Distribución de los puntos de control terrestre



La distribución de los puntos de apoyo en las esquinas del modelo, viene condicionada por el hecho de que estos deben servir de apoyo para la pasada superior e inferior, e igualmente para los fotogramas antecedente y precedente, con el fin de obtener el mínimo de puntos precisos de control terrestre.

Dado un bloque fotogramétrico, según la fotogrametría clásica, la cantidad de puntos de apoyo necesarios para poder realizar la orientación absoluta es enorme y, por lo tanto, inviable para la realidad profesional. A modo de ejemplo, dadas 100 imágenes, se precisarían 5 puntos por par estereoscópico, aproximadamente unos 500 puntos de apoyo.

Por esta razón, tal como presenta el libro estudiado, es que se utiliza el método de aerotriangulación. Este método tiene por objeto obtener las coordenadas de diversos puntos del terreno mediante los procedimientos de la fotogrametría. Fue concebida para efectuar los levantamientos topográficos por medio de la fotografía, reduciendo al mínimo los trabajos a realizar en campo. No obstante, necesita apoyarse sobre puntos de posición conocida en el terreno y que tendrán que determinarse en campo por métodos geodésicos y topográficos. Con el uso del GNSS cinemático en el dron para proveer de coordenadas a la cámara en el momento de cada exposición, en teoría se puede eliminar lo necesario para el control terrestre, aunque, en la práctica, una pequeña cantidad puntos de apoyo para el control terrestre se usa todavía para fortalecer la solución.

Como resultado de la misión fotográfica con apoyo aéreo cinemático, se obtienen las coordenadas absolutas de los centros de proyección de los fotogramas. Entonces se tiene un bloque de fotogramas para aerotriangular con un punto de apoyo por cada imagen, o sea, un bloque completamente controlado. En estas circunstancias, sólo se necesitarían cuatro puntos de control en los extremos del bloque, que se utilizarían en el cálculo para el cambio de datum y la corrección de errores sistemáticos.

Según la bibliografía consultada, es recomendable tomar al menos un punto en el interior del bloque, para tener un mejor ajuste planimétrico. Por lo tanto, se considera tomar 5 puntos de apoyo para el ajuste total del modelo.

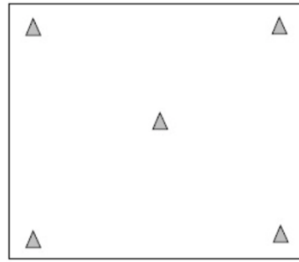


Figura 21 – Distribución de puntos de apoyo en el bloque fotogramétrico

#### 5.4.3.3. Elección de los puntos de apoyo fotogramétricos

Se realiza de forma aproximada en gabinete, donde con ayuda de la cartografía existente, se van examinando los entornos donde pueden elegirse en campo.

La elección de los puntos de apoyo debe responder a los siguientes criterios planteados en el libro *Apuntes de Fotogrametría III*:

- El detalle planimétrico deberá ser perfectamente identificable en todas las imágenes.
- Los puntos se elegirán dentro de la zona marcada en gabinete, con la finalidad de que cumplan los requisitos para la realización de la orientación absoluta del modelo.
- Preferentemente serán un detalle artificial y estable.
- Los puntos altimétricos serán convenientemente escogidos sobre partes del terreno de muy débil pendiente (lo más horizontal posible), evitando en lo posible los detalles que se presten a una mala puntería estereoscópica (playas brillantes, arenas, etc.).
- La distribución geométrica de los puntos de apoyo en el bloque, de forma tal de que no queden zonas sin puntos (preferentemente al menos un punto en cada vértice del bloque).

En este caso, se colocaron 20 puntos de apoyo con la idea de realizar el estudio variando la cantidad de puntos a la hora de procesar los datos, que se explicará más adelante. La distribución de estos puntos se muestra en la *Figura 22*.



Figura 22 – Distribución de los puntos de apoyo

#### 5.4.4. Señalización de los puntos de apoyo

La señalización consiste en la materialización en campo de una serie de señales, previo a la realización del vuelo, distribuidas según una densidad y forma, para poderlas utilizar como puntos de apoyo fotogramétricos.

La forma de estas señales adoptada más generalmente es la cuadrada, en las que el material utilizado es de aluminio, contrachapado o cartón. Las dimensiones de estas señales variarán con la escala de la fotografía<sup>9</sup>:

- Para escalas pequeñas ( $\approx 1:18000$ ) 75 x 75 cm
- Para escalas medias ( $\approx 1:7500$ ) 30 x 30 cm
- Para escalas grandes ( $\approx 1:3000$ ) 15 x 15 cm

<sup>9</sup> Valores obtenidos del libro *Apuntes de Fotogrametría III*

Dado que la cámara que tiene incorporado el dron tiene una distancia focal de 30 mm, la escala será:

$$\text{Escala} = \text{altura de vuelo} / \text{distancia focal}$$
$$\text{Escala} = 1:3333$$

Según la clasificación anterior, el tamaño de la marca corresponde al de una escala entre media y grande, por esto, para asegurarse de ver correctamente las señales, se decidió utilizar marcas de 30 x 30 cm.

Hay muchas formas de realizar la marca para los puntos de control, pueden ser en forma de cruz, circular, en forma de damero, etc. También existen distintas formas de materializarlas, con pintura, papel, bolsas de plástico pintadas, etc. A la hora de realizar este proyecto se contará con cuadrantes en negro y blanco, al igual que la primera marca de la *Figura 23*, hechos con cartulina.

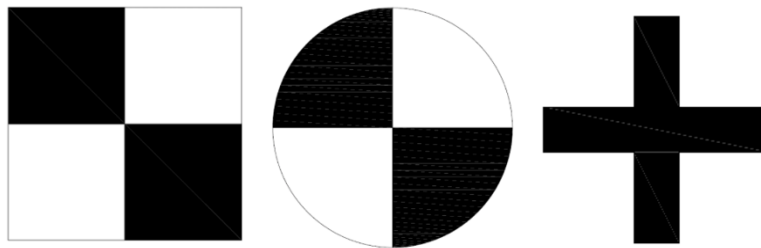


Figura 23 – Distintas formas de señalar los puntos de apoyo

Los prestadores de servicio fotogramétrico, en general, usan unas marcas estándar de 1,20 x 1,20 m para sus vuelos. Esto se debe a que usan un tipo de marca especial, de contraste de blanco con negro. Entonces, al momento de identificar el punto de control en gabinete, identifican la diferencia de color entre los píxeles, pasando a ser independiente del tamaño del píxel, siempre y cuando su píxel pueda visualizar puntos menores a la marca estándar de ellos (1,20 x 1,20 m).

Por lo tanto, se entiende que, si una marca 15 x 15 cm se visualiza correctamente, una marca de 30 x 30 cm o de 1 x 1 m en las imágenes facilitará su posterior identificación.



#### 5.4.5. Control de calidad del relevamiento planialtimétrico con UAV

Cada vez es más común el requerimiento de controles de calidad por parte de los usuarios de servicios. En el caso de los vuelos fotogramétricos, es importante tener un control de calidad adecuado, para verificar que un proceso cumple con las especificaciones que le fueron impuestas, además de poder expresar la certeza del producto obtenido.

Teniendo en cuenta el objetivo de este proyecto, es importante tener un control de calidad del modelo digital de terreno, creado a partir de dicho relevamiento planialtimétrico.

Durante la planificación del vuelo se seleccionó un conjunto de puntos de apoyo, relevados mediante tecnología GNSS, con el fin de obtener una orientación absoluta del modelo, es decir, para ajustar el MDT. Por lo tanto, en estos puntos, las coordenadas medidas coinciden con las obtenidas en el modelo.

Entonces, para determinar la diferencia entre el MDT respecto a estos puntos (como una discretización de la realidad), estos últimos no deben ser tenidos en cuenta para el control de calidad. Para lograr esto, se pre-señalaron un total de 10 puntos de control, distribuidos según la *Figura 24*, diferentes a los puntos de apoyo fotogramétricos.



Figura 24 – Distribución de los puntos de control de calidad

La utilización de 10 puntos de control de calidad, se justifica por el hecho de que se generarán tres MDT distintos, variando la cantidad de puntos utilizados para realizar el procesamiento (se utilizarán 5, 10 y 20 puntos respectivamente). Por lo tanto, no se justifica considerar una cantidad mayor a 20 puntos para realizar el control de calidad, y es interesante estudiar un caso con menor cantidad de estos puntos de control que los utilizados para generar el modelo.





## 6. RELEVAMIENTO

### 6.1. Introducción

El objetivo de esta etapa es realizar el relevamiento de la cantera utilizando las dos tecnologías mencionadas anteriormente (GNSS y UAV). Dichas tareas se realizaron el día 5 de abril de 2017.

Como se expresó previamente, es importante que los datos sean obtenidos en simultáneo ya que, al trabajar sobre una cantera en explotación, el volumen de la misma podría variar, y los resultados no serían comparables.

A pesar de esto, al momento de realizar el relevamiento no se estaba extrayendo material de la cantera, por lo que se pudo trabajar de forma tranquila, sin tener que tomar ciertas precauciones respecto a este tema.

El levantamiento fotogramétrico se hizo a través de la empresa *UAV Agrimensura*, más precisamente por el Ing. Agrim. Patricio Birriel, la cual cuenta con un dron de ala fija, C-Astral Bramor<sup>10</sup>.

A su vez, las tareas topográficas se realizaron con el sistema GNSS Trimble R8<sup>10</sup>, facilitado por el Ing. Agrim. Juan Ignacio Beyhaut.

### 6.2. Relevamiento fotogramétrico con UAV

#### 6.2.1. Pre-señalización y mensura de los puntos de apoyo y de control de calidad

Previo al vuelo, se pre-señalaron los puntos de apoyo y de control de calidad según la ubicación aproximada que muestran la *Figura 22* y la *Figura 24*. Para esto, se utilizaron cuadrantes en negro y blanco hechos con cartulina, de tamaño 30 x 30 cm, fijados al suelo en sus vértices con clavos de techo.

A su vez, se realizó el relevamiento de los mismos con sistema GNSS utilizando el método diferencial RTK. Lo ideal hubiese sido que se midieran al mismo tiempo que se iban colocando, pero por un tema de minimizar los

---

<sup>10</sup> Especificaciones del instrumental en los *Anexos*, página 145

tiempos de espera del encargado del vuelo, el cual ya se encontraba en el predio, y para no tener que instalar la base en más de una ocasión (ya que se emplearía para realizar el levantamiento topográfico de la cantera), se postergó para luego de finalizado el vuelo.

Esto trajo como inconveniente que, a la hora de relevar los puntos, una de las marcas se moviera a causa del viento, por lo que se descartó. Se relevaron entonces, 29 de las 30 marcas colocadas (20 puntos de apoyo y 9 puntos de control de calidad).

Debería tomarse la precaución de fijar de mejor manera las señales o colocar señales adicionales para evitar este tipo de problemas.



Figura 25 – Señalización y relevamiento de los puntos de control y de apoyo

A continuación, la *Tabla 4* muestra las coordenadas planialtimétricas de cada punto relevado, referidas al sistema de coordenadas WGS84 / Proyección UTM zona 21S.



Punto	X (m)	Y (m)	Z (m)	Tipo de punto
1	600864,202	6162017,614	50,564	CP
2	600894,557	6162026,899	50,193	GCP
3	600915,077	6161994,514	51,051	GCP
4	600929,018	6162032,837	50,397	GCP
5	600927,416	6162071,520	53,157	GCP
6	600970,415	6162077,122	56,544	GCP
7	600961,625	6162002,444	66,063	GCP
8	600966,021	6161937,693	62,052	GCP
9	600932,269	6161939,613	62,725	CP
10	600883,764	6161942,402	61,638	CP
11	600853,019	6161941,118	57,970	GCP
12	600835,529	6161969,595	56,569	GCP
13	600805,776	6161958,456	56,590	CP
14	600782,512	6161931,036	55,239	GCP
15	600768,461	6161886,740	55,975	GCP
16	600850,987	6161909,451	61,436	CP
17	600732,290	6161959,474	51,803	GCP
18	600695,019	6161942,141	52,021	CP
19	600722,076	6161885,453	51,684	CP
20	600706,400	6161845,547	49,252	GCP
21	600678,141	6161889,581	48,917	GCP
22	600670,933	6161819,191	47,590	GCP
23	600713,176	6161815,404	50,930	GCP
24	600695,371	6162013,512	50,986	GCP
25	600734,361	6162001,718	54,758	GCP
26	600791,684	6162038,340	51,348	GCP
27	600841,771	6162045,911	50,369	CP
28	600792,999	6161990,852	60,740	CP
29	600822,412	6161997,132	61,418	GCP

Tabla 4 - Coordenadas planialtimétricas de los puntos de apoyo (GCP) y de control de calidad (CP)

## 6.2.2. Condiciones para la toma de fotografías aéreas

Según el texto *Apuntes de Fotogrametría III*, la toma de fotografías aéreas se realizará cuando la altitud del sol sea óptima, es decir, en aquel espacio de tiempo en el cual, los rayos solares presenten una inclinación tal que la sombra arrojada por los accidentes sea mínima, por ello las limitaciones serán mayores en terreno accidentado.

No existe un único criterio para considerar la altitud solar mínima aceptable en el transcurso del año, pero suele adoptarse una altura mínima de  $30^\circ$  del sol sobre el horizonte y en regiones poco accidentadas puede llegarse a los  $20^\circ$ .

Los vuelos se realizarán con cielo despejado y cuando el terreno a fotografiar no tenga nieve, nieblas o brumas, que dificulten la claridad de los fotogramas.

### 6.2.3. Vuelo

Como se mencionó, el vuelo estuvo a cargo del Ing. Agrim. Patricio Birriel utilizando un UAV del tipo de ala fija C-Astral Bramor.

A pesar de haber realizado el plan de vuelo con anticipación, éste debe realizarse nuevamente momentos antes del relevamiento.

Planificar el vuelo de antemano sirvió para tener una idea de características del vuelo tales como el tiempo del mismo o la cantidad de fotografías necesarias para cubrir la zona de estudio. Sin embargo, el lugar de despegue y aterrizaje no coincidió con el proyectado, por lo que fue necesario ejecutar nuevamente esta etapa en el lugar.

Encontrar un lugar adecuado para el despegue y aterrizaje del dron es una tarea que requiere de experiencia y se debe proceder de forma cautelosa para no causar futuros inconvenientes (sobre todo posibles accidentes o roturas del instrumental).



Figura 26 – UAV situado sobre la catapulta

En este caso, no fue un problema encontrar el lugar indicado. Frente a la cantera existe una superficie extensa de campo, en la cual solo se tuvo que tener la precaución de estar lo suficientemente alejado de árboles y una línea eléctrica situada sobre la alineación del predio.

El despegue y aterrizaje debe realizarse siempre en contra del viento.



Figura 27 – Zona de despegue y aterrizaje

Luego de decidir la zona de despegue y aterrizaje, se estudiaron las condiciones climáticas (cobertura de nubes, velocidad del viento, etc.). El día se encontraba soleado, con alguna presencia de nubes. Se colocó un anemómetro (medidor de velocidad del viento) que arrojó una velocidad máxima del viento en tierra de 4,4 m/s y una velocidad promedio de 2,7 m/s.

Es importante mencionar que realizando el vuelo se registraron vientos de hasta 9,7 m/s a 100 m de altura. Como se expone en las especificaciones, la velocidad máxima del viento a altitud del vuelo es 12 m/s.



Figura 28 – Anemómetro (medidor de velocidad del viento)

Antes de despegar al dron, se deben seguir ciertos procedimientos para lo cual el Ingeniero ideó una “checklist” de pasos a seguir que se adjunta a continuación.

#### Checklist:

- Desplegar catapulta.
- Chequear el nivelado de la catapulta.
- No armar las gomas de la catapulta.
- Ensamblar el avión.
- Conectar el cable de la antena del ala.
- Colocar la cinta aislante en la junta de las alas.
- Conectar la batería del Bramor.
- Chequear ajuste de la cámara.
- Nivelar el fuselaje del Bramor.
- Encender la computadora.
- Conectar el cable CGS de la computadora a la estación base.
- Encender la estación base.
- Abrir el Cockpilot Virtual.
- Instalar el paracaídas.
- Cerrar la escotilla del Bramor.
- Configurar y cargar la misión (Take Off & Landing, P, R, puntos).

- Encender el Geopilot.
- Marcar cota cero, indicar GNSS Home, consultar sensores.
- Colocar la catapulta en dirección del viento, comprobar los seguros.
- Armar la catapulta (máximo 40 segundos).
- Colocar el Bramor en la catapulta.
- Colocar las hélices del motor alineadas.
- Presionar despegar.
- Mover alerones del dron.
- Tirar de la liga de la catapulta.

El vuelo se realizó con normalidad, siendo monitoreado en todo momento desde la computadora. Sin embargo, una vez aterrizado el dron, se intentó descargar las imágenes y el resultado obtenido fue una sola foto.

Esto fue debido a que la empresa previamente había actualizado, aparentemente de manera errónea, el firmware para la toma automática de las fotos cuando el dron se encontrara sobre la zona de estudio.

La solución fue repetir el vuelo, esta vez activando la cámara de forma manual en el momento que el dron pasara sobre el primer checkpoint y desactivándola justo después que pasara por el último checkpoint.

Esto trajo como inconveniente que se obtuvieran fotos por fuera de la zona de estudio, cuando el UAV realizaba el giro entre líneas de vuelo.



Figura 29 – Preparativos para el despegue del UAV



A continuación, se expone el resultado obtenido luego del relevamiento fotogramétrico:

Características del vuelo:

- Altura de vuelo promedio: 106,78 m
- Altura de vuelo máxima: 114 m
- Altura de vuelo mínima: 99 m
- Número de líneas de vuelo: 14
- Duración del vuelo: 15 minutos
- Frecuencia promedio de imágenes: 1,03 segundos
- Distancia recorrida: 11144 m
- Distancia promedio entre imágenes: 12,78 m
- Velocidad promedio: 12,38 m/s

Características del producto:

- Número de fotos: 872
- Formato de las imágenes: JPG
- Peso de cada imagen: 10,1 MB
- Peso del relevamiento: 8,66 GB

En comparación con el plan de vuelo realizado en los *Estudios Previos*, los resultados fueron prácticamente el doble tanto en distancia recorrida, duración del vuelo y número de imágenes tomadas.

Esto se justifica por el hecho de que la dirección del vuelo efectuado fue perpendicular a la del planificado, y la distancia y el tiempo que requiere para hacer los giros es mayor. A su vez, al no tomar las fotografías de forma automática, se cuenta con una mayor cantidad de éstas que lo expresado en el plan de vuelo.

Característica	Plan de Vuelo	Resultado
Distancia recorrida	<b>5754 m</b>	<b>11144 m</b>
Duración del vuelo	<b>6 minutos</b>	<b>15 minutos</b>
Número de fotos	<b>384</b>	<b>872</b>

Tabla 5 – Comparación entre plan de vuelo y resultados luego del vuelo





## 6.3. Relevamiento topográfico con GNSS

### 6.3.1. Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS)

El *Sistema Global de Navegación Satelital* (GNSS) es un sistema de posicionamiento basado en la medición de la distancia a un mínimo de cuatro satélites en simultáneo, que además transmiten sus posiciones estimadas. Las distancias son medidas comparando la señal recibida desde el satélite con una réplica generada por el receptor. La diferencia de fase entre la señal recibida y la generada localmente es proporcional al tiempo de propagación (distancia satélite - receptor).

Como los receptores generan la señal local usando relojes de cuarzo, la diferencia de fase absorbe también sus inestabilidades. Observando un mínimo de cuatro satélites bien distribuidos en el cielo, el receptor puede calcular cuatro incógnitas: tres para la posición del receptor y una para la corrección al reloj local.

El principio del posicionamiento satelital se basa en relacionar tres componentes:

- Una cantidad conocida, que es la posición del satélite ( $X_S, Y_S, Z_S$ ).
- Una cantidad mensurable, que es la distancia satélite - receptor ( $\rho$ ).
- Una cantidad desconocida, que es la posición del receptor ( $X_R, Y_R, Z_R$ )

$$\rho = \sqrt{(X_S - X_R)^2 + (Y_S - Y_R)^2 + (Z_S - Z_R)^2}$$

El objetivo de la medición es obtener la posición de nuestro receptor en el mismo sistema de referencia en el que se dan las coordenadas de los satélites.

El posicionamiento puntual o absoluto consiste en determinar la posición de un punto próximo a la superficie terrestre utilizando un receptor y la medición de la pseudodistancia usando el código que contienen las ondas portadoras de la señal GNSS.

Para determinar la posición del receptor basta con determinar las pseudodistancias a 4 satélites en el mismo instante  $t$  de tiempo.



El método diferencial consiste en el procesamiento de ya no las observaciones de un solo receptor, sino de diferencias de observaciones simultáneas, realizadas por al menos dos estaciones a los mismos satélites.

Se calculan las coordenadas de puntos respecto de al menos una estación de referencia que a priori debe tener coordenadas conocidas.

La situación deseable es que el cálculo diferencial no se encuentre afectado por errores sistemáticos apreciables. En este caso, la exactitud de las coordenadas calculadas estará dada por la de las coordenadas de la estación de referencia. La precisión de las mismas en cambio estará determinada por el método diferencial en sí y por las condiciones en las que se lo utiliza.

### 6.3.2. Relevamiento

El relevamiento topográfico se realizó una vez finalizado el vuelo. Como se dijo, se hizo con el equipo GNSS Trimble R8.

En esta instancia, el relevamiento consistió en la obtención de coordenadas de puntos notables del terreno, con el principal objetivo de conocer sus respectivas cotas.

Dichos puntos corresponden a líneas de quiebre del terreno, es decir, donde se producen cambios en la pendiente del mismo. A su vez, en zonas de poca pendiente, se aseguró de tomar puntos a una distancia no mayor a 30 m, tal como se concluyó en el *Pre-análisis*.

El levantamiento se realizó aplicando el método diferencial en tiempo real (DGNSS/RTK), utilizando como base una estación colocada en la zona de estudio. Se utilizó el sistema de coordenadas WGS84 y la proyección usada fue UTM 21S.

Se usó esta proyección por ser una proyección universal, conocida, y utilizada comúnmente y, a su vez, para facilitar la carga de datos en el software de procesamiento fotogramétrico, ya que esta proyección está seleccionada por defecto.

La gran dificultad que se encontró a la hora de aplicar este método fue el levantamiento de puntos sobre los bordes superiores, el terreno natural no excavado y la cima de los acopios.

La combinación de los dos primeros hacía que la tarea, además de ser dificultosa, tuviera un cierto grado de peligrosidad.

---

En algunas zonas, la cobertura vegetal era bastante alta y densa, lo que no permitía observar por donde se caminaba (más de una vez produjo tropezones y alguna caída), además de impedir el acceso al borde de la cantera.

Esto, sumado a que la altura de los taludes variaba entre unos 4 m y 12 m, suponía un gran riesgo.

En cuanto a los acopios, la dificultad radica en el acceso a la cima ya que, por lo general, consiste de material suelto y las paredes laterales son demasiado verticales.



Figura 30 – Base colocada y relevamiento con GNSS

El mojón observado durante la primera visita no fue relevado ya que de antemano se decidió realizar el procesamiento a partir de una cota arbitraria. Además, no se tuvo acceso a la monografía del mismo.

Como resultado del levantamiento topográfico se puede decir que se midió durante unas 6 horas, logrando relevar un total de 699 puntos.

Es importante mencionar que los resultados del relevamiento fueron obtenidos en tiempo real. La ventaja de estos es que no requieren procesamiento por parte del usuario y están disponibles al momento del relevamiento.

Otra alternativa podría haber sido relevar en post-proceso, lo cual insume mayor tiempo a la hora de relevar cada punto y tiempo extra en gabinete para el ajuste de estos.



## 7. PROCESAMIENTO

### 7.1. Introducción

El objetivo de esta etapa se centra en detallar el procesamiento realizado de los datos obtenidos luego del relevamiento de la cantera.

Por un lado, se realizó el relevamiento fotogramétrico con UAV a partir del cual se obtienen las fotos capturadas por el dron y las coordenadas (medidas con sistema GNSS) de los puntos de apoyo utilizados para el ajuste.

Por otro, se hizo el levantamiento topográfico con sistema GNSS en el cual se consiguen las coordenadas de puntos notables del terreno.

Para cada caso se debe proceder de forma diferente, utilizando el software conveniente y teniendo distintas consideraciones.

### 7.2. Procesamiento de datos UAV

Para procesar el relevamiento fotogramétrico, se decidió utilizar el software *Pix4D*. Este programa es propiedad de Pix4D S.A., empresa que se encuentra ubicada en Lausana, Suiza.

Es un software de procesamiento de imágenes, que permite a través de éstas, crear nubes de puntos, ortomosaicos digitales, Modelos Digitales de Superficie (MDS), curvas de nivel, realizar cálculos de volumetría, etc.

Existen muchas herramientas de este estilo y *Pix4D*, en particular, es un software propietario. La razón por la cual se decidió a usar este software y no otro radica en que existe una versión de prueba, de duración 15 días, que habilita la posibilidad de utilizar al máximo el potencial del mismo. Sin embargo, si se quiere, se puede adquirir la licencia, para la cual varía el costo según el tiempo de la misma (un mes, un año o tiempo ilimitado).

### 7.2.1. Descripción metodológica de la herramienta en el marco del proyecto

El dron captura imágenes con cierto grado de solapamiento (variable según los requerimientos del trabajo), *Pix4D* identifica puntos clave que se encuentran en las distintas imágenes y relaciona en forma lógica las fotografías. Luego, a partir del conocimiento de la posición de la cámara, logra generar modelos tridimensionales con gran precisión.

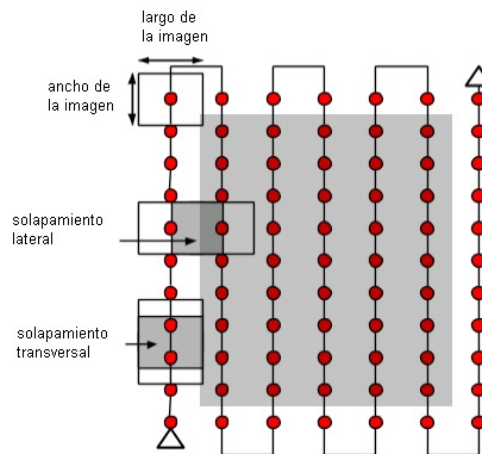


Figura 31 – Solapamiento de imágenes

Lo primero que se debe hacer en el software es la carga de los datos obtenidos con el dron. A partir de eso, existen 3 procesos a seguir (denominación extraída del software):

- *Procesamiento inicial*: se realiza un ajuste relativo de las estaciones de foto, y se genera un modelo relativo.
- *Nube de puntos y malla*: se realiza un ajuste absoluto del modelo, dependiendo si el proyecto contiene o no puntos de control, además de ajustarlo a algún modelo geoidal, en caso de que se haya aplicado alguno. Se genera la nube de puntos y la malla de triángulos (éstos son únicamente para visualizar y trabajar dentro del software).
- *MDS, ortomosaico, índices*: el software genera los entregables que se requieran y permite exportarlos para trabajar en otros softwares (el modelo digital de superficie, el ortomosaico georeferenciado, la nube de puntos en formato LAS). Adicionalmente a esto, permite realizar el cálculo de volumen desde el modelo digital de terreno.

Es de importancia destacar, que el software siempre permite realizar los 2 primeros pasos. Sin embargo, para efectuar el último paso, una vez vencido el plazo de la licencia (o los 15 días de la versión de prueba), se debe obtener una licencia paga.

A continuación, se detallan los pasos seguidos para el procesamiento del vuelo en el software *Pix4D*.

## 7.2.2. Procedimiento

### 7.2.2.1. Carga de datos

- Crear un nuevo proyecto asignando nombre y ubicación del archivo.

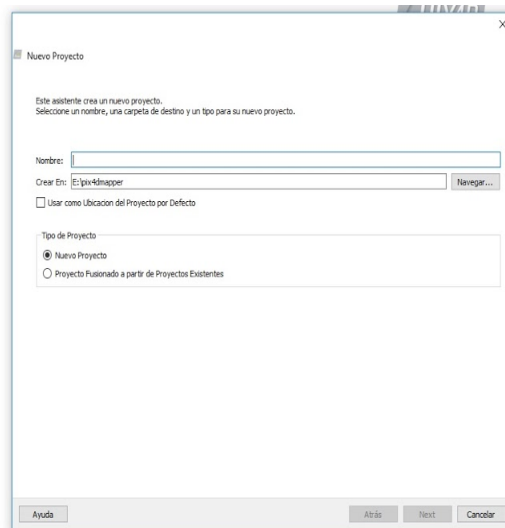


Figura 32 – Nuevo proyecto

- Cargar la totalidad de las imágenes involucradas en el vuelo, seleccionando la carpeta donde se encuentran ubicadas.

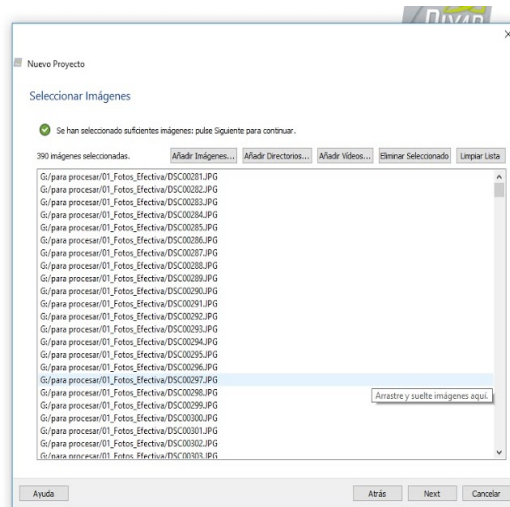


Figura 33 – Carga de imágenes

- Cargar el archivo con los datos inerciales de vuelo (archivo en formato .csv), que vincula cada imagen con el lugar espacial en el que fue capturado.
  - Verificar que el Sistema de Coordenadas que está seleccionado por defecto sea el correcto. De lo contrario, seleccionar *Editar* y escoger el sistema adecuado.
  - En *Geolocalización y Orientación* seleccionar *Desde Fichero* y buscar el archivo con los datos inerciales.

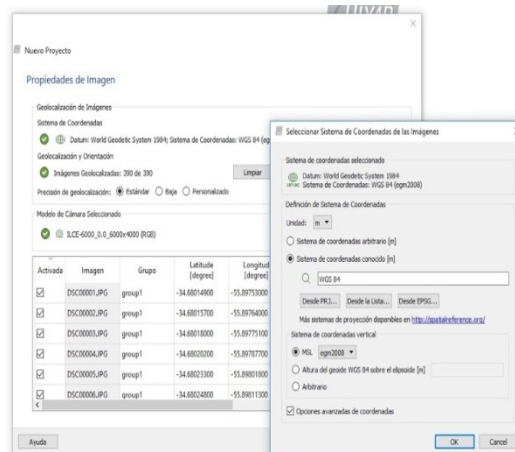


Figura 34 – Propiedades de las imágenes



- En la ventana *Seleccionar el Sistema de Coordenadas de Salida* seleccionar el sistema de coordenadas de los puntos de apoyo, si es que el proyecto los tiene.
  - Si se le aplica un modelo geoidal, seleccionar el mismo en la casilla *Opciones Avanzadas de Coordenadas*.

La cámara fotográfica que se encuentra presente en el UAV, tiene un sistema automático que hace que ésta se prenda y tome fotografías sólo dentro de la zona de estudio. Mientras el dron está realizando la maniobra de giro para entrar en la siguiente línea de vuelo, se apaga y deja de tomar fotografías.

Sin embargo, el día del relevamiento fotogramétrico, el encargado de realizarlo, comentó, que en los días previos se había actualizado el firmware de la cámara, y que podría traer problemas en la automatización explicada.

Luego de realizado el vuelo, se chequearon las imágenes obtenidas, y efectivamente se encontraron inconvenientes; sólo se había tomado la primera foto. La solución fue realizar el vuelo nuevamente, pero esta vez con la cámara en modo manual. Esto quiere decir que el operador debe tomar la decisión sobre dónde comenzar y terminar de tomar fotografías. Para evitar percances, se tomaron fotografías durante todo el vuelo (incluido en las maniobras de giro entre líneas de vuelo).

Por esta razón, la cantidad de imágenes fueron 872, de las cuales, luego de una depuración, se utilizaron 390 para el procesamiento (únicamente las que se encontraban sobre la zona de estudio). Se podría haber procesado utilizando la totalidad de las imágenes, pero enlentecía innecesariamente todo el proceso de trabajo, y daba lugar a posibles errores en la generación del modelo.

Un aspecto a destacar luego de esta depuración es que la cantidad de imágenes resultantes se asemeja a la cantidad arrojada a la hora de realizar el plan de vuelo (384 fotos).



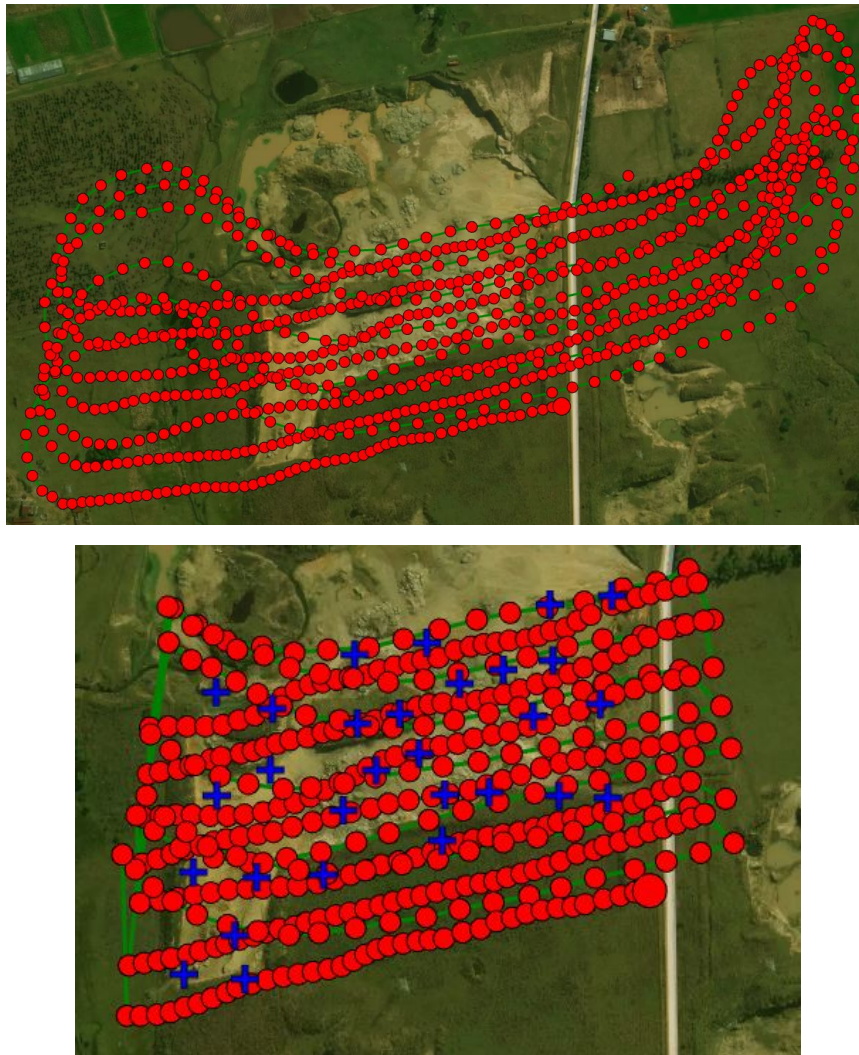


Figura 35 – Arriba, totalidad de imágenes tomadas por el dron (872). Abajo, imágenes luego de la depuración (390)

#### 7.2.2.2. Procesamiento con GCP (Puntos de apoyo)

- Marcar la opción 1. *Procesamiento Inicial*.
  - En *Opciones de Procesamiento* seleccionar en la solapa de *Calibración, Método de Calibración > Alternativo*.
- Seleccionar *Inicio* para comenzar el procesamiento.
  - Una vez finalizado el mismo, el software muestra un reporte de calidad (*Quality Report*), en el cual se indican los valores del ajuste. Antes de continuar, verificar que los 5 ítems del *Quality Check* estén OK.

- Images.
  - Dataset.
  - Camera Optimization.
  - Matching.
  - *Georeferencing*: en el procedimiento inicial, al no estar marcados aún los puntos de control, este ítem mostrará error.
- Cargar e identificar los GCP en la pestaña *Proyecto > Gestor GCP/MTP*.

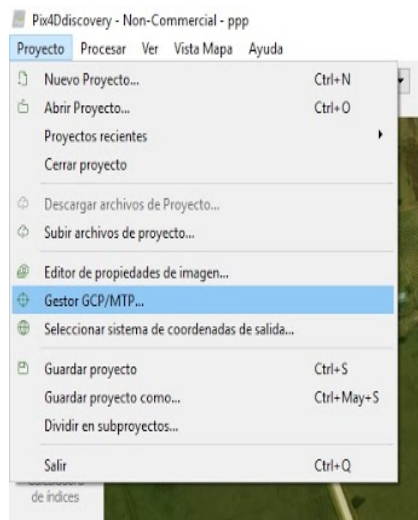


Figura 36 – Carga de GCP (1)

- Sistema de coordenadas.
  - Sistema Global: *Editar > Sistema de coordenadas > WGS 84 / UTM zone 21S*.
    - ✓ Para editar o seleccionar el geoide, ir a *Opciones Avanzadas*.
  - Sistema Local: Seleccionar el archivo prj en *Importar puntos de apoyo*.

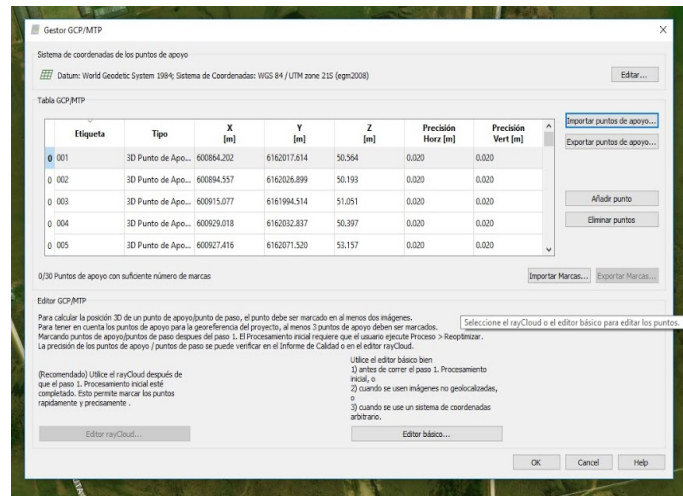


Figura 37 – Carga de GCP (2)

- Identificar el punto de control en todas las imágenes en que se lo pueda visualizar. Una vez marcado el punto en las imágenes, seleccionar *Aplicar* para que el software registre el punto.

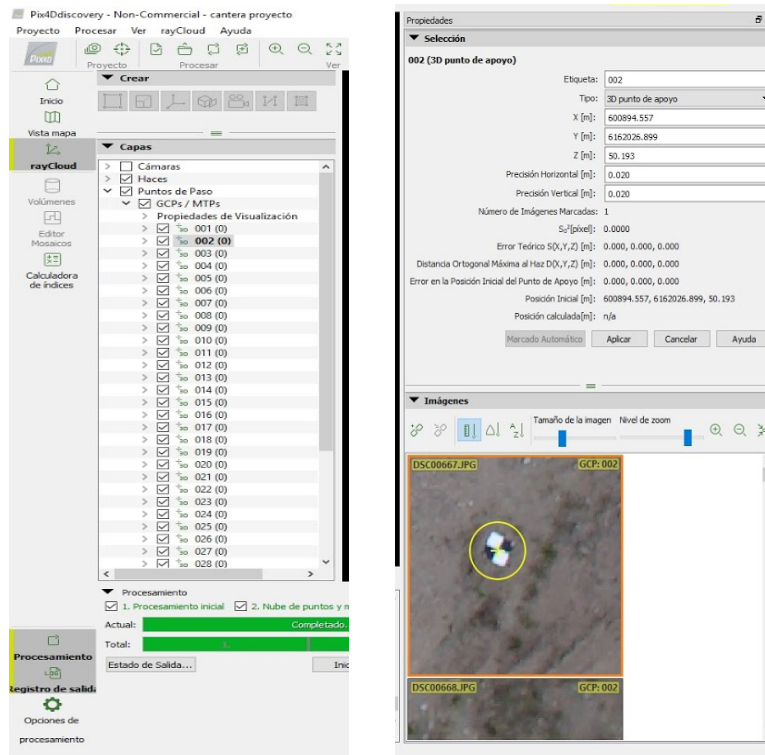


Figura 38 – Selección de GCP

- Al momento de identificar el punto de control, se puede especificar en el software la calidad del punto, ya sea *GCP 3D*, *GCP 2D*, *Punto de Control*, etc. Los puntos que sean utilizados para el control de calidad, se los identifica por igual, y se le debe cambiar únicamente esta cualidad.
- Seleccionar *Procesar > Reoptimizar*. Seleccionar la opción 2. *Nube de Puntos y Malla* y 3. *MDS, ortomosaico, índices*.

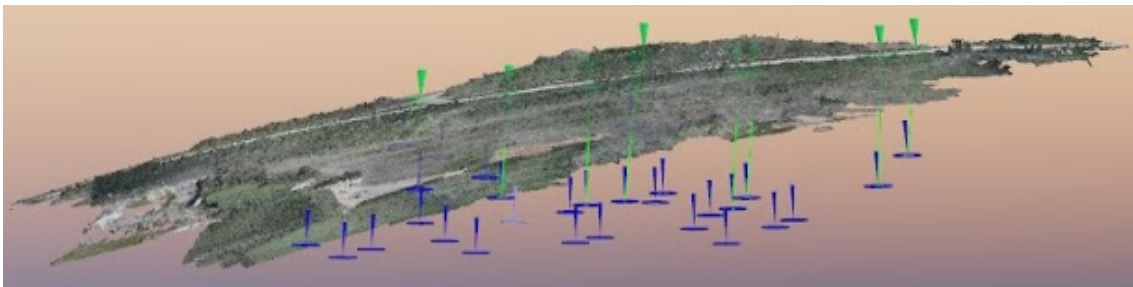


Figura 39 – Vectores de GCP teóricos

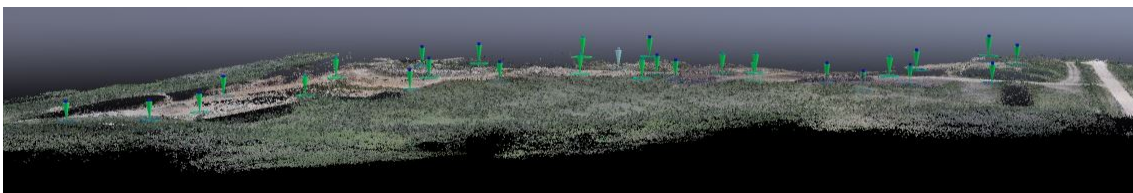


Figura 40 – Vectores de GCP teóricos luego de la reoptimización (1)

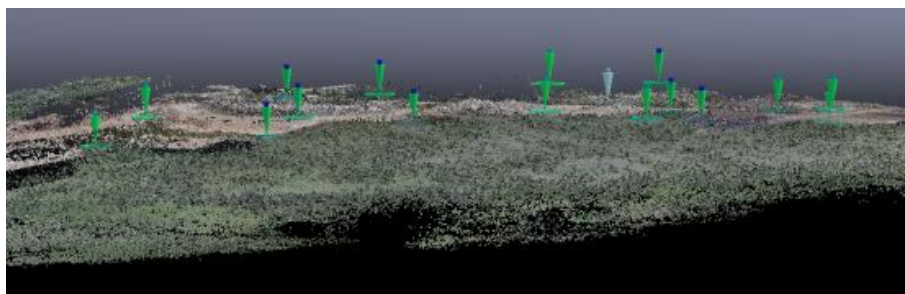


Figura 41 – Vectores de GCP teóricos luego de la reoptimización (2)



### Opciones Exportables

- Si se quiere exportar la nube de puntos, seleccionar la opción *LAS* en *Nube de Puntos y Malla* dentro del apartado *Opciones de Procesamiento*. Este archivo posee una alta densidad de puntos.
- Si se quiere exportar los archivos TIFF de ortomosaico y MDS, seleccionar la opción *MDS y Ortomosaico*.  
En caso de querer visualizar el Ortomosaico en Google Earth, seleccionar la opción *Teselas de Google Maps y KML*.
- *Resultados adicionales*: Si lo que se desea es generar una nube de puntos menos densa, seleccionar la opción *LAS* e indicar, a continuación, la distancia (en cm) entre los puntos.

#### **7.2.2.3. Cálculo de volumen**

Según los objetivos planteados oportunamente en el marco de este proyecto, lo que se quiere lograr a través de esta herramienta, es el cálculo de volumen de la cantera respecto a una superficie de referencia.

Para poder calcular el volumen, es necesario tener procesado el vuelo, ya que éste se determina a partir de la nube de puntos densificada.

Del lado izquierdo de la pantalla del software existe un icono, llamado *Volúmenes* que lleva a una nueva solapa del trabajo en la que aparece la nube de puntos del proyecto realizado.

Para definir la superficie en la que se quiere calcular el volumen, se recorre la nube de puntos y se seleccionan los vértices del polígono.

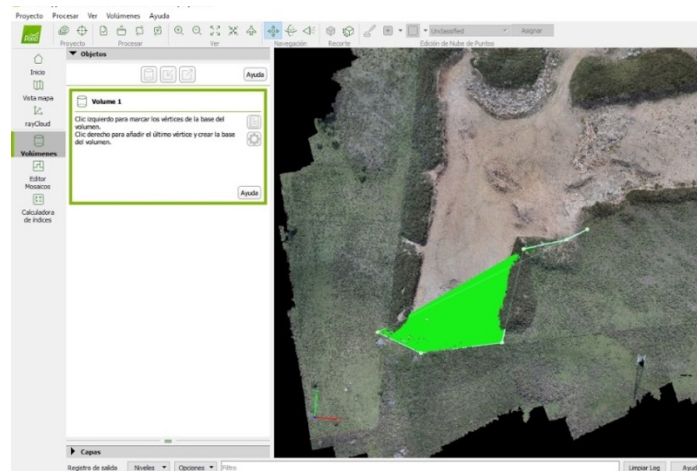


Figura 42 – Selección de vértices del área de interés

Se pueden calcular distintos tipos de volúmenes (se debe elegir en *Opciones de Volumen*), los cuales pueden ser:

- Según el plano de cota promedio de la nube de puntos.
- El plano de cota mínima.
- El plano de cota máxima.
- Una superficie proyecto.
- Un plano de altitud personalizada.

En este trabajo, se decidió utilizar un plano de Cota = 53 m, valor que se aproxima a la cota promedio de la nube de puntos. De esta manera, se puede obtener un valor considerable del volumen.

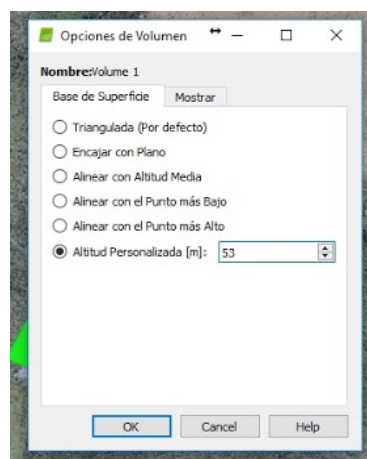


Figura 43 – Opciones de cálculo de volumen

Luego del cálculo, el software arroja el volumen existente por debajo del plano de referencia (volumen a rellenar), y por encima del mismo plano. El volumen hallado entre la superficie de la cantera y el plano de referencia, es el que interesa evaluar a los efectos del proyecto).

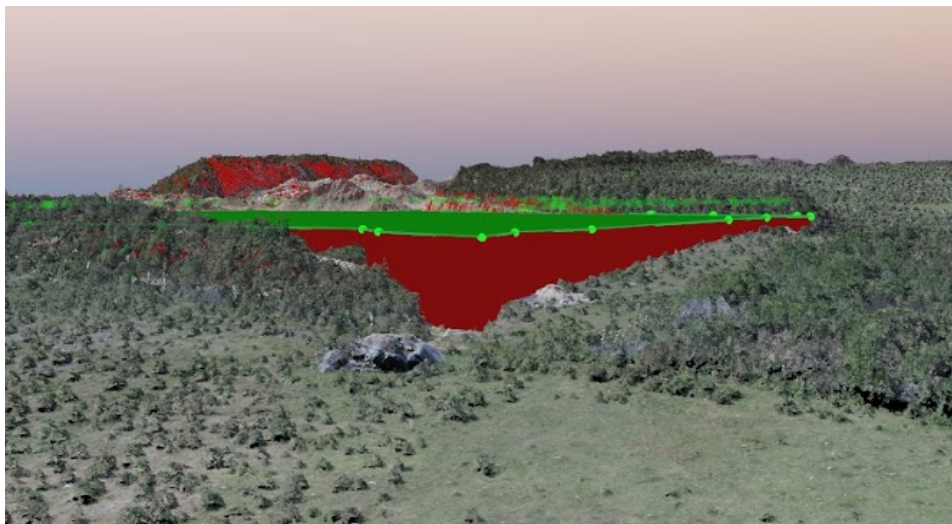


Figura 44 – Vista horizontal del MDT<sup>11</sup>

### Fundamento del cálculo de volumen

Como no todos los softwares funcionan bajo el mismo algoritmo de resolución, es importante saber cómo es que realiza el cálculo para poder evaluar posibles errores que se puedan llegar a cometer en el procesamiento.

Se delimita la superficie de la base del volumen que se quiere calcular, a la cual se le aplica la triangulación de Delaunay entre sus vértices.

El propio *Pix4D* proyecta una grilla en la mencionada base, con un espaciado igual al tamaño del GSD (*Ground Sampling Distance*, tamaño de píxel proyectado en el terreno).

---

<sup>11</sup> En verde, el plano de cota constante. En rojo, el volumen a rellenar

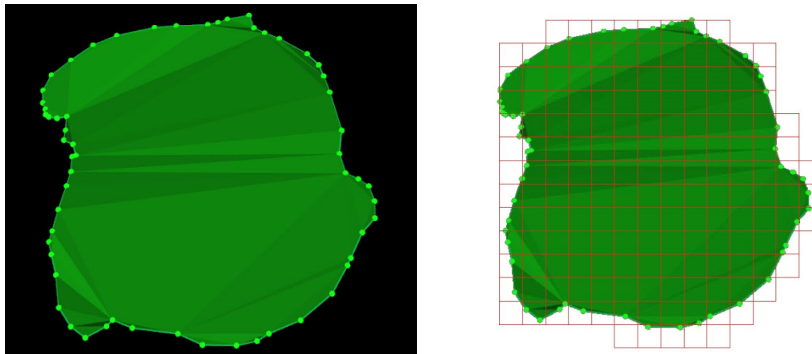


Figura 45 – Delimitación de la superficie y grilla

Para cada celda  $i$  de la grilla, el volumen  $V_i$  es dado por:

$$V_i = L_i \times W_i \times H_i$$

Donde:

$L_i$ , largo de la celda.

$W_i$ , ancho de la celda.

$H_i$ , altura de la celda.

Se estima que el ancho y el largo de la celda son iguales, entonces  $L_i = W_i = GSD$ . La altura  $H_i$  está dada por:

$$H_i = Z_{T_i} - Z_B$$

Donde:

$Z_{T_i}$ , altitud del terreno de cada celda en el centro de la celda.

$Z_{B_i}$ , altitud de la base de cada celda en el centro de la celda.

Entonces:

$$V_i = GSD \times GSD \times (Z_{T_i} - Z_B)$$



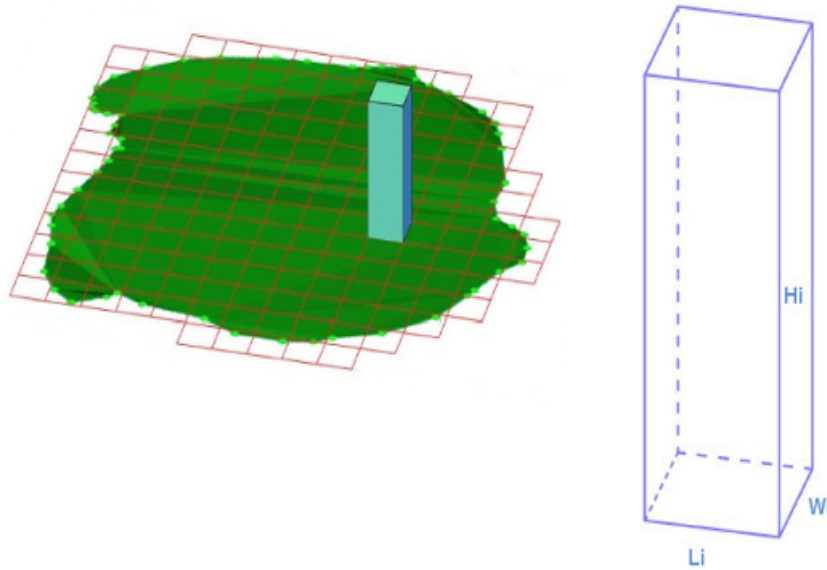


Figura 46 – Volumen de cada celda

*Pix4D* calcula dos volúmenes:

1. El volumen de desmonte ( $V_d$ ) entre la base y el terreno, cuando el terreno está por arriba de la base:

$$V_d = V_{d_1} + V_{d_2} + \dots + V_{d_n}$$

Donde  $V_{d_i}$  es el volumen de desmonte para la celda  $i$ .

2. El volumen de terraplén ( $V_t$ ) entre la base y el terreno, cuando el Terreno está por debajo de la Base:

$$V_t = V_{t_1} + V_{t_2} + \dots + V_{t_n}$$

Donde  $V_{t_i}$  es el volumen de terraplén para la celda  $i$ .

Entonces, el volumen total es la sumatoria entre estos dos:

$$V_{Total} = V_d + V_t$$

### Cálculo del error del volumen

*Pix4D* estima un error en el cálculo del volumen. Para calcularlo primero tiene que calcular el error en el cálculo del volumen de cada celda.

La altitud ( $Z$ ) de un punto 3D es computado con una precisión de 1 a 3 veces el tamaño del GSD.

El promedio del error para cada punto 3D es 1,5 veces más grande que el GSD.

Cada celda de la base del volumen que se quiere calcular, tiene un ancho y una base de tamaño igual al GSD. El error en la dirección  $X$  y en la dirección  $Y$  está estimado como cero (0).

El error para una celda es dado por:

- Error en la dirección  $X$  (Largo) = 0 cm.
- Error en la dirección  $Y$  (Ancho) = 0 cm.
- Error en la dirección  $Z$  (Altura) =  $1,5 \times GSD$ .

El error del volumen por cada celda es dado por:

$$E_i = L_i \times W_i \times Z_{ei} = GSD \times GSD \times 1,5 \times GSD = 1,5 \times GSD^3$$

Donde:

$E_i$ , error del volumen en una celda.

$L_i$ , largo de la celda.

$W_i$ , ancho de la celda.

$Z_{ei}$ , error en la dirección  $Z$  de la celda.

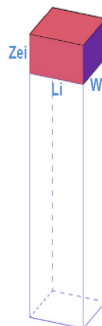


Figura 47 – Error del volumen en la celda



Una vez conocido el error en cada celda, el error de desmonte, terraplén y el error total, se calcula sumando todos los errores de cada celda:

$$\text{Error Volumen Desmonte} = E_{d_1} + E_{d_2} + \dots + E_{d_n}$$

$$\text{Error Volumen Terraplén} = E_{t_1} + E_{t_2} + \dots + E_{t_n}$$

Donde:

$E_{d_i}$ , error de volumen de desmonte para cada celda  $i$ . Si la celda tiene volumen de terraplén, el error de volumen de desmonte es cero.

$E_{t_i}$ , error de volumen de terraplén para cada celda  $i$ . Si la celda tiene volumen de desmonte, el error de volumen de terraplén es cero.

El error total del volumen será la sumatoria del error del volumen de terraplén y el error del volumen de desmonte.

### 7.3. Procesamiento de datos GNSS

Para realizar el procesamiento de los datos GNSS, se utilizó un software específico, el elegido fue *TopoStudio*.

Este software tiene la gran ventaja, de haber sido creado por Ingenieros Agrimensores Uruguayos para Ingenieros Agrimensores Uruguayos, por lo tanto, resulta una herramienta de uso sencillo y práctico para este proyecto, además de confiable. Es un software propietario, pero para estudiantes se puede conseguir una licencia gratuita de uso por un año, renovable cada año, hasta conseguir el título de grado. Todo esto inclinó la elección por este software.

#### 7.3.1. Procedimiento

En primera instancia, hay que realizar la carga de datos al software. Para esto se le carga un archivo csv (Archivo Delimitado por Comas), que tiene los datos de los puntos GNSS relevados. Esta carga de datos se realiza mediante el comando *PCO*. Se especifica la ruta del archivo y se carga en el software.

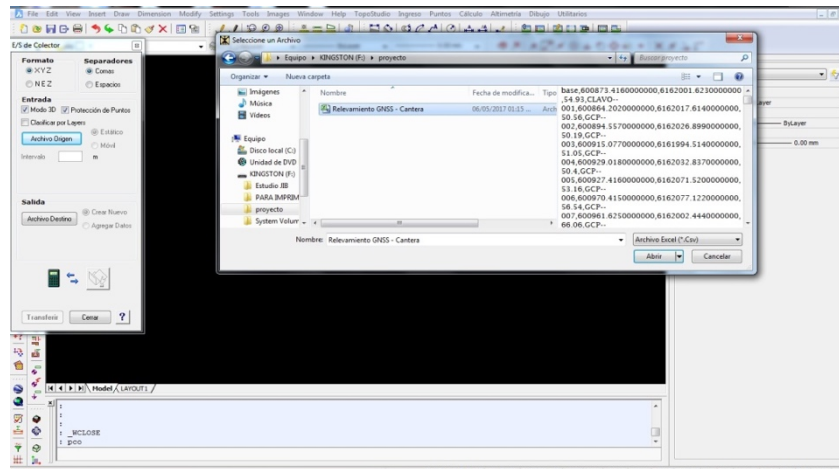


Figura 48 – Carga de datos GNSS

Una vez que se tiene todos los datos en el proyecto, se comienza por definir las líneas de quiebre (o “Breaklines”), las cuales se generan con una polilínea de acuerdo a las decisiones que se tomaron al momento del relevamiento. Dichas polilíneas serán trazadas por los puntos relevados con el comando *PL*.

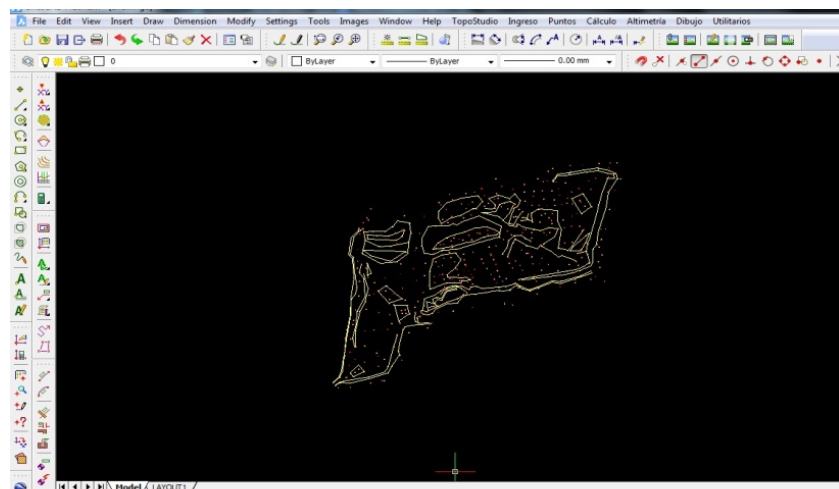


Figura 49 – Líneas de quiebre o “Breaklines”

Luego, usando el comando *CVN* se comienza el proceso de generación del MDT.

Con este comando el software abre una ventana en la que se debe indicar:

- La frontera, generada previamente con el comando *PL*.
- Líneas de quiebre, seleccionando las polilíneas ya creadas.

Realizados estos dos pasos, se selecciona el botón *TIN* para generar la red de triángulos y posteriormente, las curvas de nivel. Para lograr esto se requiere “setear” previamente el intervalo de las curvas y el suavizado de éstas.

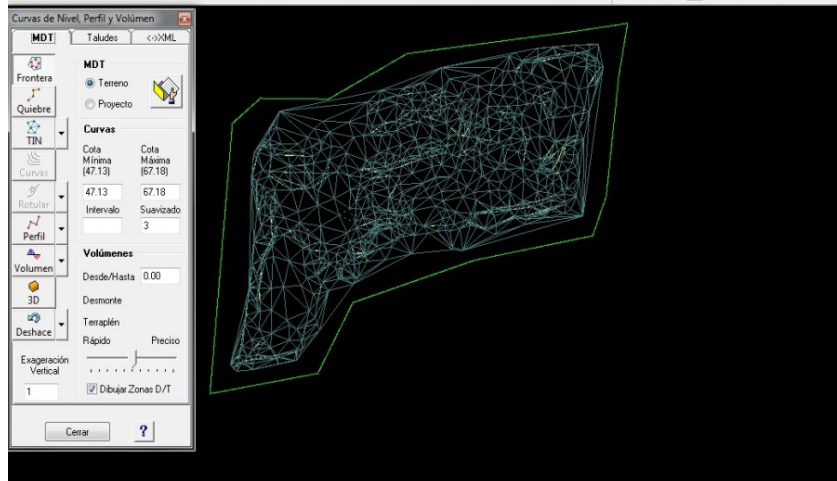


Figura 50 – Red de triángulos generada a partir del software

Hay que mencionar que el software no le permite al usuario seguir avanzando en el procesamiento si no sigue los pasos en el orden que se explicó. Por lo tanto, es indispensable no omitir ninguno de éstos.

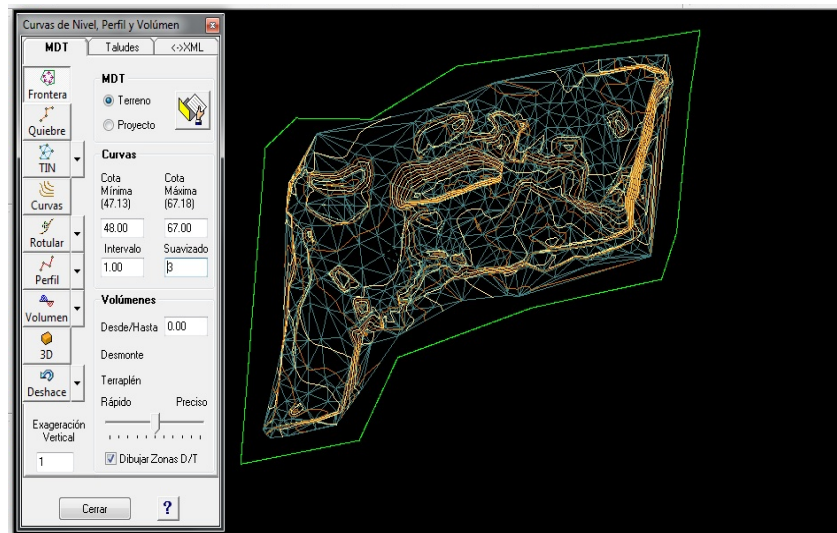


Figura 51 – Curvas de nivel generadas por el software

Luego de generadas las curvas de nivel, se desbloquea la opción de cálculo de volúmenes, el cual se puede calcular de dos formas, según un plano proyectado o según una superficie proyectada. Para este proyecto se utilizará, según un plano proyectado.

Realizado este último paso, el software arrojará dos resultados:

- Volumen de terraplén (Volumen por debajo del plano proyectado).
- Volumen de desmonte (Volumen por encima del plano proyectado).

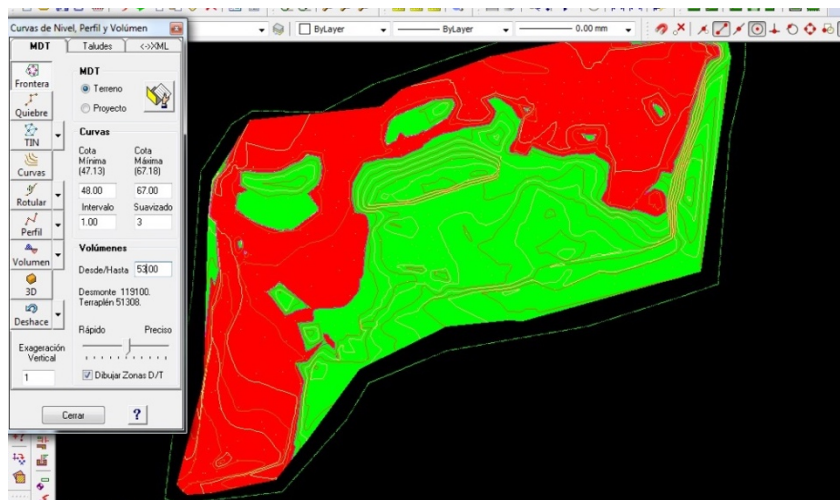


Figura 52 – Cálculo de volumen realizado por el software

## 8. RESULTADOS

### 8.1. Introducción

El objetivo de esta etapa es mostrar los resultados obtenidos luego del procesamiento de los datos, tanto para el relevamiento fotogramétrico como para el relevamiento topográfico.

El gran resultado obtenido para cada etapa fue el volumen de terraplén calculado, es decir, el volumen entre la superficie de referencia (plano de cota 53 m) y la superficie de la cantera. Este producto será la base de una posterior comparación y análisis.

A su vez, para el relevamiento fotogramétrico se expresarán, de forma resumida, algunos resultados importantes arrojados en el reporte de calidad del procesamiento y un ejemplo de plano de curvas de nivel (utilizando 20 GCPs), adjuntos en los *Anexos* del proyecto; mientras que los datos GNSS obtenidos en el levantamiento topográfico serán utilizados para generar los planos de curvas de nivel, agregados también en los *Anexos*.

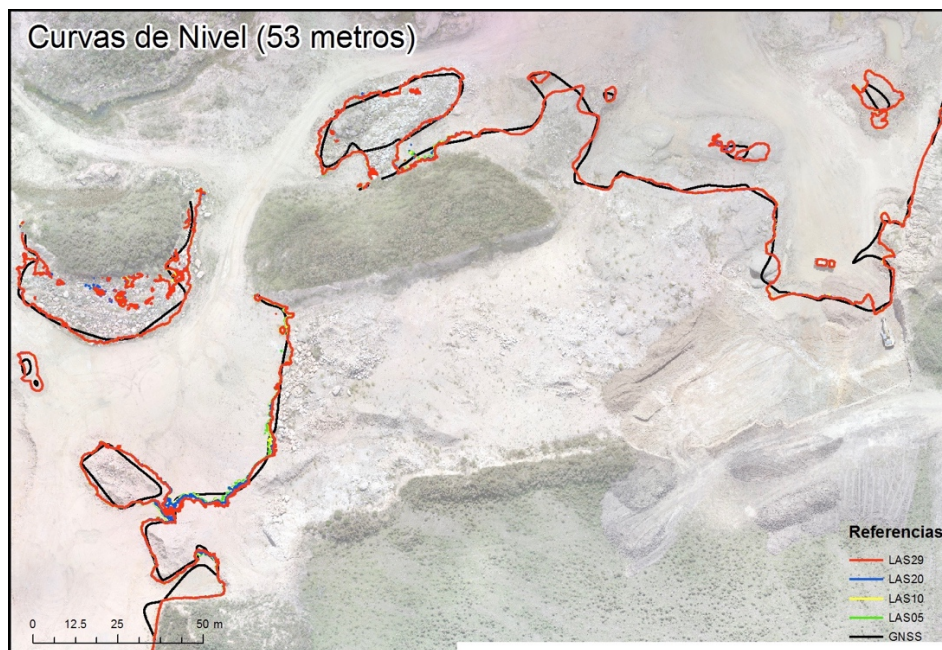


Figura 53 – Curvas de nivel de cota 53 m obtenidas con GNSS y UAV (1)

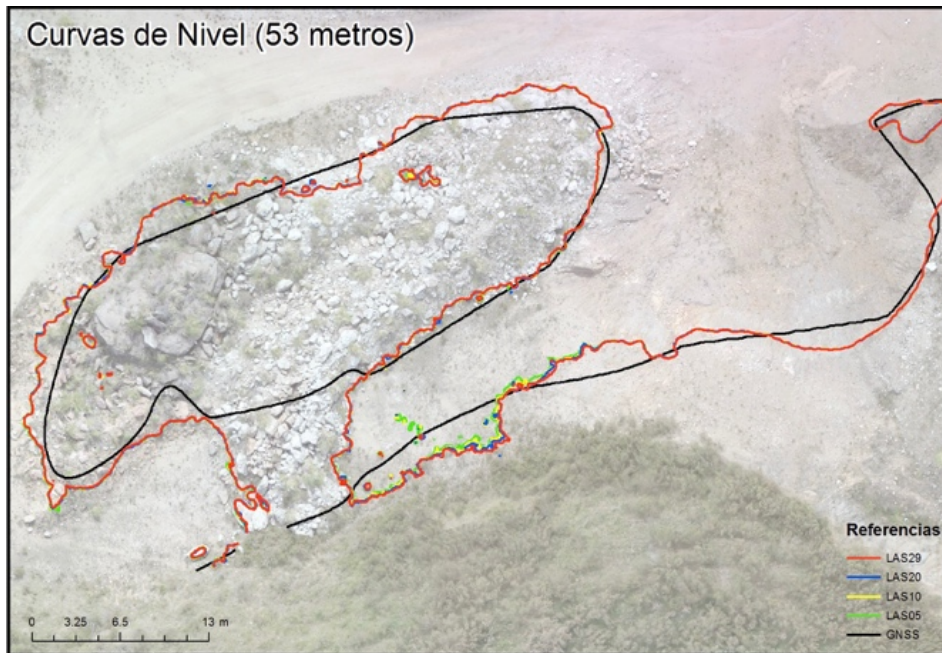


Figura 54 – Curvas de nivel de cota 53 m obtenidas con GNSS y UAV (2)

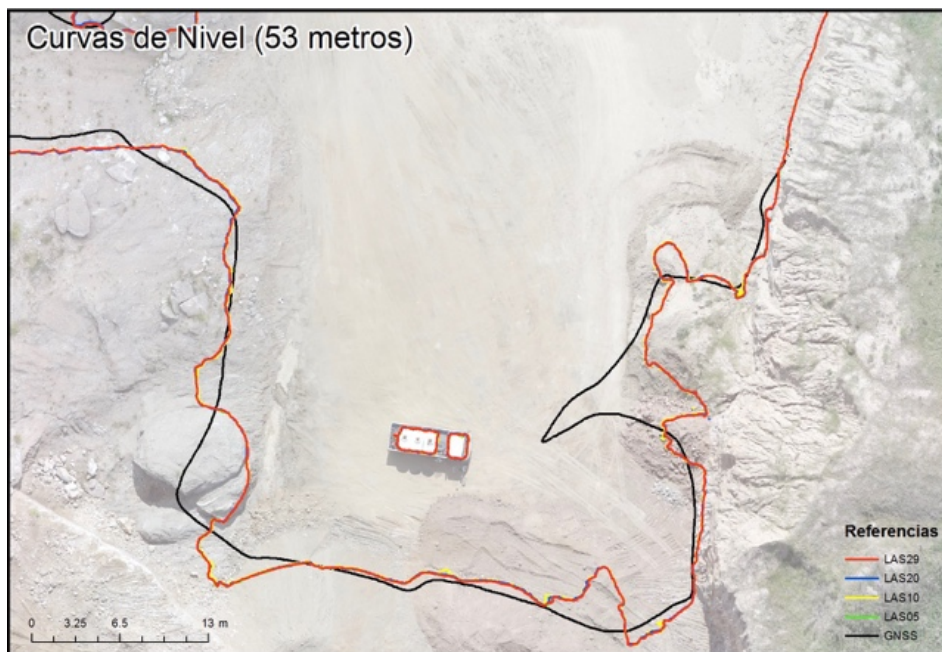


Figura 55 – Curvas de nivel de cota 53 m obtenidas con GNSS y UAV (3)





## 8.2. Resultados del procesamiento de datos UAV

Se decidió realizar el cálculo de volumen en distintos tipos de modelos digitales de terreno, partiendo desde el mismo relevamiento, pero variando la cantidad de puntos de apoyo utilizados.

Se generaron en total cinco modelos digitales de terreno (sin utilizar puntos de apoyo, con 5 puntos de apoyo, con 10 puntos de apoyo, con 20 puntos de apoyo y con 29 puntos de apoyo).

Exceptuando el modelo generado sin puntos de apoyo, y el generado con 29 puntos de apoyo, los otros 3, tienen adicionalmente 9 puntos utilizados para el control de calidad. Estos puntos, son los mismos para los 3 modelos, de forma tal de poder hacer comparables los resultados obtenidos.

### 8.2.1. Resultados con 20 puntos de apoyo

En este procesamiento se utilizaron la totalidad de los puntos pre señalizados. En un principio se planteó utilizar 30 puntos, pero en el campo una de las marcas se movió por el viento y quedó inutilizable. Por lo tanto, se utilizaron 20 puntos pre señalizados como puntos de apoyo y 9 puntos pre señalizados como puntos de control de calidad.

Al finalizar el procesamiento con el *Pix4D*, éste genera un reporte de calidad que tiene información de todo tipo (tiempo de procesamiento, la optimización de la cámara, la precisión en los puntos de apoyo, etc.).

A continuación, se muestran y se explican algunos de los principales ítems del reporte, claves para este proyecto. El informe completo se adjunta en los *Anexos*.



Figura 56 – Puntos utilizados como puntos de apoyo (en rojo) y de control de calidad (en amarillo) para el procesamiento con 20 puntos de apoyo

### 8.2.1.1. Resumen

Project	cantera proyecto 20
Processed	2017-05-02 14:52:58
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_0.0_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.51 cm / 0.59 in
Area Covered	0.1486 km <sup>2</sup> / 14.86 ha / 0.0574 sq. mi. / 36.7388 acres

Figura 57 – Resumen del procesamiento con 20 puntos de apoyo

En el resumen del proyecto se especifica:

- *Project*: nombre con el que fue guardado.
- *Processed*: fecha en que fue procesado.
- *Camera Model Name(s)*: modelo de la cámara.
- *Average Ground Sampling Distance (GSD)*: tamaño promedio de píxel en el terreno.
- *Area Covered*: área cubierta por el vuelo.

### 8.2.1.2. Quality Check

Images	median of 81751 keypoints per image	
Dataset	390 out of 390 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	52.9% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 24724.1 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 20 GCPs (20 3D), mean RMS error = 0.016 m	

Figura 58 – Valores de ajuste para el procesamiento con 20 puntos de apoyo

Los ítems mostrados en el *Quality Check* son:

- *Images*: es la mediana de puntos clave por imagen. Los puntos clave son puntos característicos que pueden detectarse en las imágenes. El “tic” se encuentra de color verde, lo que significa que se han extraído más de 10000 puntos clave por imagen.
- *Dataset*: es el número de imágenes activas que se han calibrado, es decir, el número de imágenes que se han utilizado para la reconstrucción del modelo. Al ser verde la marca, representa que el 100 % de las fotos se han calibrado.
- *Camera Optimization*: es el porcentaje de diferencia entre la longitud focal inicial y optimizada. Este punto mostró una alerta de color rojo, por lo que el porcentaje explicado es más del 20 %. Se consultó esta observación con el ingeniero encargado de realizar el vuelo, y mencionó que es un tema de los parámetros de la cámara que, al no estar cargados en el software, genera una discrepancia con los datos iniciales, pero que no afectan al procesamiento, porque se utilizan los parámetros optimizados.
- *Matching*: es la mediana de coincidencias por imagen calibrada. El “tic” verde indica que se han calculado más de 1000 coincidencias por imagen calibrada.
- *Georeferencing*: aquí se muestra si el proyecto está georeferenciado o no. Si se usan GCP, se muestra el número, el tipo y la media del error RMS en (X, Y, Z). La marca está de color verde, lo que significa que el proyecto está georeferenciado y que el error en los GCP es menor de 2 veces el promedio del GSD.

### 8.2.1.3. Posición de imágenes y GCPs iniciales y computados

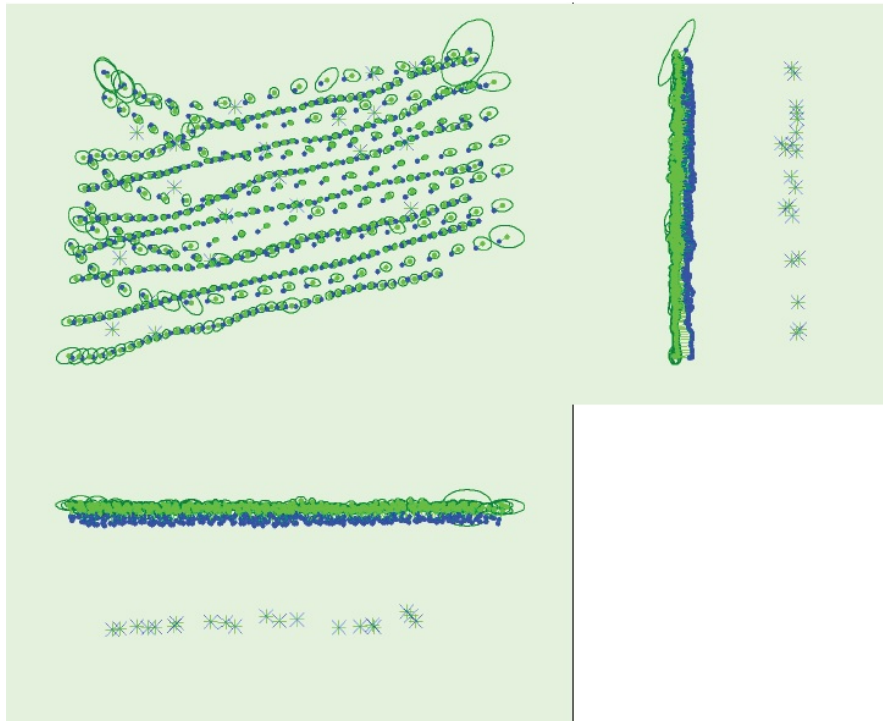


Figura 59 – Diferencia de posiciones de las imágenes y GCPs para el procesamiento con 20 puntos de apoyo

La *Figura 59* muestra el desplazamiento entre las posiciones iniciales y computadas de las imágenes (puntos azules y verdes respectivamente), así como el desplazamiento entre las posiciones iniciales de los GCP y sus posiciones calculadas (cruces azules y verdes) en la vista superior (plano  $XY$ ), en la vista frontal (plano  $XZ$ ), y en la vista lateral (plano  $YZ$ ).

Las elipses de color verde oscuro indican la incertidumbre de la posición absoluta del resultado del ajuste del bloque del haz (elipse ampliada en 50 veces).

#### 8.2.1.4. Puntos de apoyo y puntos de control utilizados

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
002 (3D)	0.020/0.020	0.013	0.023	-0.014	1.126	18 / 18
003 (3D)	0.020/0.020	0.006	-0.009	-0.001	1.617	24 / 24
004 (3D)	0.020/0.020	-0.027	0.006	-0.015	1.043	18 / 18
005 (3D)	0.020/0.020	-0.026	0.018	0.029	0.501	9 / 9
006 (3D)	0.020/0.020	-0.019	0.007	-0.010	1.124	15 / 15
007 (3D)	0.020/0.020	-0.007	-0.001	-0.013	0.866	16 / 16
008 (3D)	0.020/0.020	-0.004	-0.057	0.019	0.805	21 / 21
011 (3D)	0.020/0.020	0.004	-0.036	0.005	0.788	22 / 22
012 (3D)	0.020/0.020	0.007	-0.009	0.014	0.745	23 / 23
014 (3D)	0.020/0.020	0.006	-0.008	0.008	1.306	19 / 19
015 (3D)	0.020/0.020	-0.004	-0.011	-0.003	0.811	27 / 27
017 (3D)	0.020/0.020	0.002	0.003	-0.013	1.180	18 / 18
020 (3D)	0.020/0.020	0.000	-0.019	-0.019	1.136	27 / 27
021 (3D)	0.020/0.020	0.031	-0.007	0.018	1.293	21 / 21
022 (3D)	0.020/0.020	0.007	0.004	-0.003	0.565	19 / 19
023 (3D)	0.020/0.020	-0.008	0.001	0.008	0.663	18 / 18
024 (3D)	0.020/0.020	0.010	0.017	0.020	0.647	11 / 11
025 (3D)	0.020/0.020	0.004	0.023	-0.006	0.907	18 / 18
026 (3D)	0.020/0.020	0.003	0.036	0.018	0.955	11 / 11
029 (3D)	0.020/0.020	0.008	0.022	-0.030	1.282	21 / 21
<b>Mean [m]</b>		0.000290	0.000161	0.000582		
<b>Sigma [m]</b>		0.013029	0.020929	0.015307		
<b>RMS Error [m]</b>		0.013032	0.020930	0.015318		

Figura 60 – Puntos de apoyo utilizados para el procesamiento con 20 puntos de apoyo

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
001	0.0200/0.0200	0.0040	0.0200	0.0258	0.8861	20 / 20
009	0.0200/0.0200	-0.0045	-0.0484	0.0518	1.5317	18 / 18
010	0.0200/0.0200	0.0052	-0.0299	0.0345	1.0179	17 / 17
013	0.0200/0.0200	0.0062	-0.0111	0.0054	1.0248	21 / 21
016	0.0200/0.0200	-0.0100	-0.0485	0.0347	1.5224	17 / 17
018	0.0200/0.0200	0.0273	-0.0009	-0.0117	1.0138	27 / 27
019	0.0200/0.0200	0.0170	-0.0227	-0.0142	1.3748	24 / 24
027	0.0200/0.0200	0.0215	0.0208	0.0151	0.9846	12 / 12
028	0.0200/0.0200	-0.0075	0.0359	-0.0072	1.0652	23 / 23
<b>Mean [m]</b>		0.006574	-0.009416	0.014905		
<b>Sigma [m]</b>		0.012310	0.028976	0.022070		
<b>RMS Error [m]</b>		0.013955	0.030468	0.026632		

Figura 61 – Puntos de control utilizados para el procesamiento con 20 puntos de apoyo



La información brindada en las tablas es:

- *GCP / Check Point Name*: nombre del punto de apoyo (GCP) o punto de control (Check Point) según corresponda. El tipo de punto puede ser en 2 dimensiones (2D) o en 3 dimensiones (3D). En este proyecto, todos han sido utilizados como 3D.
- *Accuracy XY/Z (m)*: precisión XY y Z del GCP / Check Point que ha sido dada por el usuario en dirección XY y Z respectivamente. Esta precisión, fue dejada por defecto. En los estudios previos se obtuvo una precisión de 0,013 m en la toma del punto GNSS. Sin embargo, la tarea de marcar la ubicación del punto en cada imagen en el software es realizada por el usuario, con una precisión peor que la mencionada.
- *Error X (m) / Error Y (m) / Error Z (m)*: diferencia entre la posición calculada del punto GCP / Check Point 3D y la posición original del mismo.
- *Projection Error (Pixel)*: distancia media, en las imágenes, donde se ha marcado el punto GCP / Check Point y donde se ha re-proyectado.
- *Verified / Marked*: número de imágenes en las que se ha marcado el punto GCP / Check Point y que se tienen en cuenta para la reconstrucción, y número de imágenes en las que sólo se ha marcado el GCP / Check Point sin tenerse en cuenta para la reconstrucción.
- *Mean (m)*: error medio en cada dirección (X, Y, Z).
- *Sigma (m)*: desviación estándar del error en cada dirección (X, Y, Z).
- *RMS Error (m)*: error cuadrático medio en cada dirección (X, Y, Z).

Hay que destacar que, el error cuadrático medio en la dirección Z de los puntos utilizados para el ajuste del modelo está en el orden de lo planteado en los *Estudios Previos* realizados para el Sistema GNSS (1,2 cm). Por lo tanto, se puede inferir que el modelo digital de terreno confeccionado a partir del relevamiento UAV, es comparable en este sentido con el modelo digital de terreno confeccionado con el relevamiento GNSS.

### 8.2.1.5. Nube de puntos

Number of Generated Tiles	3
Number of 3D Densified Points	55640629
Average Density(per m <sup>3</sup> )	578.89

Figura 62 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento con 20 puntos de apoyo

El resultado de la nube de puntos expresa:

- *Number of Generated Tiles*: número de archivos generados para la nube de puntos densificada. El software divide la nube de puntos para que el archivo sea menos “pesado” al momento de trabajar en otro software.
- *Number of 3D Densified Points*: número total de puntos densificados en 3D obtenidos en el proyecto.
- *Average Density (per m<sup>3</sup>)*: número medio de puntos densificados 3D obtenidos en el proyecto por metro cúbico.

### 8.2.1.6. Volumen calculado

Una vez finalizado el procesamiento del relevamiento fotogramétrico, y habiendo exportado la nube de puntos, se puede realizar el cálculo de volumen (detallado en la etapa anterior).

El resultado fue:

Área 3D del terreno	<b>57757,89 m<sup>2</sup></b>
Volumen terraplén	<b>49622,84 +/- 540,35 m<sup>3</sup></b>

Tabla 6 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento con 20 puntos de apoyo

## 8.2.2. Resultados con 10 puntos de apoyo

Tanto para este, como para los siguientes casos, la información ofrecida por el reporte de calidad es la misma que en el caso anterior. Por lo tanto, no se repetirá la explicación de cada resultado y se limitará a presentarlo.



Figura 63 – Puntos utilizados como puntos de apoyo (en rojo) y de control de calidad (en amarillo) para el procesamiento con 10 puntos de apoyo

### 8.2.2.1. Resumen

Project	cantera proyecto 10
Processed	2017-05-14 12:29:54
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_0.0_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.51 cm / 0.59 in
Area Covered	0.1491 km <sup>2</sup> / 14.9133 ha / 0.0576 sq. mi. / 36.8706 acres

Figura 64 – Resumen del procesamiento con 10 puntos de apoyo



### 8.2.2.2. Quality Check

🔍 Images	median of 81751 keypoints per image	✔️
🔍 Dataset	390 out of 390 images calibrated (100%), all images enabled	✔️
🔍 Camera Optimization	52.61% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	⚠️
🔍 Matching	median of 31371.1 matches per calibrated image	✔️
🔍 Georeferencing	yes, 10 GCPs (10 3D), mean RMS error = 0.016 m	✔️

Figura 65 – Valores de ajuste para el procesamiento con 10 puntos de apoyo

### 8.2.2.3. Posición de imágenes y GCPs iniciales y computados

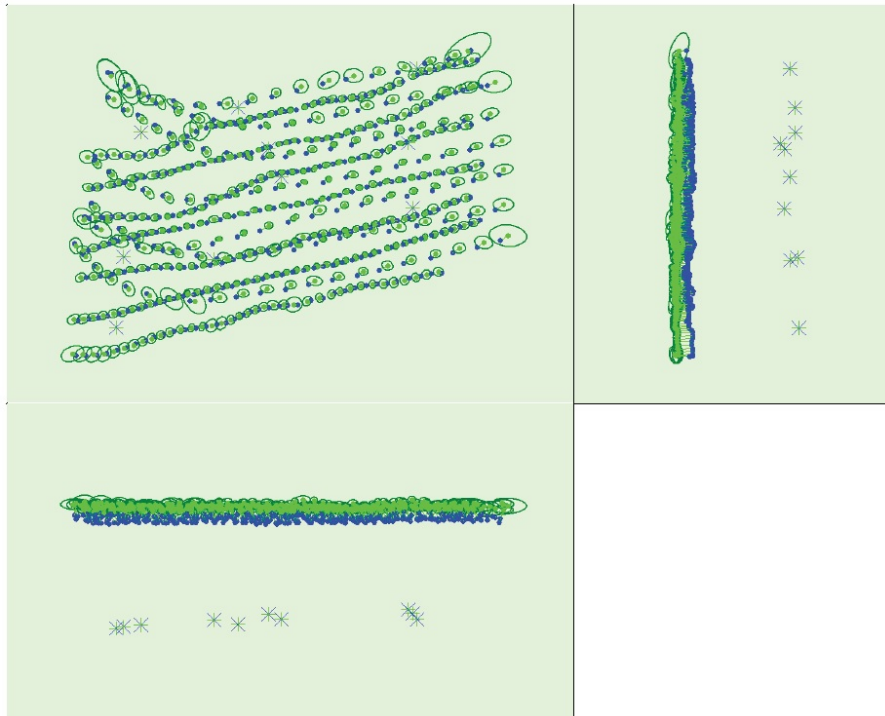


Figura 66 – Diferencia de posiciones de las imágenes y GCPs para el procesamiento con 10 puntos de apoyo

#### 8.2.2.4. Puntos de apoyo y puntos de control utilizados

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
006 (3D)	0.020/ 0.020	-0.030	0.018	-0.007	1.119	15 / 15
008 (3D)	0.020/ 0.020	-0.004	-0.046	0.010	0.870	21 / 21
012 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	-0.005	0.010	0.757	23 / 23
015 (3D)	0.020/ 0.020	-0.003	-0.014	-0.003	0.835	27 / 27
021 (3D)	0.020/ 0.020	0.027	-0.013	0.009	1.222	21 / 21
022 (3D)	0.020/ 0.020	-0.004	-0.007	-0.006	0.604	19 / 19
024 (3D)	0.020/ 0.020	0.011	0.018	0.012	0.639	11 / 11
026 (3D)	0.020/ 0.020	0.002	0.031	0.017	0.984	11 / 11
029 (3D)	0.020/ 0.020	0.003	0.025	-0.032	1.349	21 / 21
007 (3D)	0.020/ 0.020	-0.004	-0.003	-0.004	1.323	17 / 17
<b>Mean [m]</b>		0.000208	0.000232	0.000530		
<b>Sigma [m]</b>		0.013520	0.022004	0.013564		
<b>RMS Error [m]</b>		0.013522	0.022006	0.013574		

Figura 67 – Puntos de apoyo utilizados para el procesamiento con 10 puntos de apoyo

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
001	0.0200/0.0200	-0.0075	0.0244	0.0059	0.9202	20 / 20
009	0.0200/0.0200	-0.0054	-0.0387	0.0521	1.4028	18 / 18
010	0.0200/0.0200	0.0026	-0.0197	0.0402	0.9848	17 / 17
013	0.0200/0.0200	0.0047	-0.0088	0.0020	1.0138	21 / 21
016	0.0200/0.0200	-0.0097	-0.0426	0.0599	1.3774	17 / 17
018	0.0200/0.0200	0.0273	-0.0032	-0.0182	1.0128	27 / 27
019	0.0200/0.0200	0.0167	-0.0298	-0.0250	1.3687	24 / 24
027	0.0200/0.0200	0.0084	0.0186	0.0101	1.0250	12 / 12
028	0.0200/0.0200	-0.0096	0.0373	-0.0143	1.0207	23 / 23
<b>Mean [m]</b>		0.003043	-0.006953	0.012529		
<b>Sigma [m]</b>		0.012079	0.027018	0.029454		
<b>RMS Error [m]</b>		0.012456	0.027898	0.032008		

Figura 68 – Puntos de control utilizados para el procesamiento con 10 puntos de apoyo

#### 8.2.2.5. Nube de puntos

Number of Generated Tiles	3
Number of 3D Densified Points	55774093
Average Density (per m <sup>3</sup> )	578.6

Figura 69 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento con 10 puntos de apoyo

### 8.2.2.6. Volumen calculado

Área 3D del terreno	<b>57275,35 m<sup>2</sup></b>
Volumen terraplén	<b>49320,30 +/- 539,78 m<sup>3</sup></b>

Tabla 7 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento con 10 puntos de apoyo

### 8.2.3. Resultados con 5 puntos de apoyo



Figura 70 – Puntos utilizados como puntos de apoyo (en rojo) y de control de calidad (en amarillo) para el procesamiento con 5 puntos de apoyo

#### 8.2.3.1. Resumen

Project	cantera proyecto 5
Processed	2017-05-11 08:37:13
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_0.0_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.51 cm / 0.59 in
Area Covered	0.1564 km <sup>2</sup> / 15.6383 ha / 0.0604 sq. mi. / 38.6631 acres

Figura 71 – Resumen del procesamiento con 5 puntos de apoyo

### 8.2.3.2. Quality Check

🔍 Images	median of 81751 keypoints per image	✔️
🔍 Dataset	390 out of 390 images calibrated (100%), all images enabled	✔️
🔍 Camera Optimization	54.76% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	⚠️
🔍 Matching	median of 36570.2 matches per calibrated image	✔️
🔍 Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.016 m	✔️

Figura 72 – Valores de ajuste para el procesamiento con 5 puntos de apoyo

### 8.2.3.3. Posición de imágenes y GCPs iniciales y computados

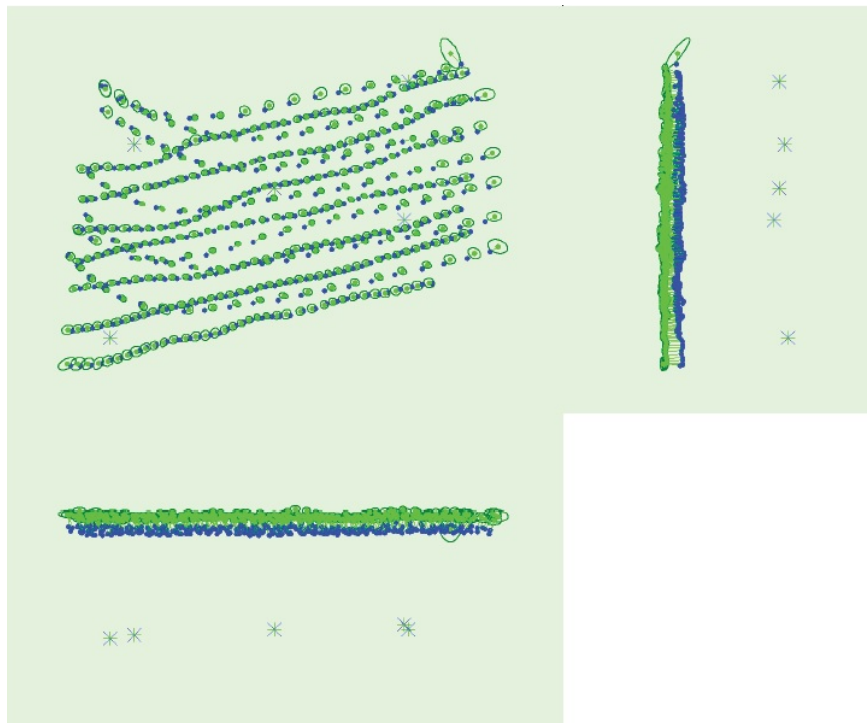


Figura 73 – Diferencia de posiciones de las imágenes y GCPs para el procesamiento con 5 puntos de apoyo

#### 8.2.3.4. Puntos de apoyo y puntos de control utilizados

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
006 (3D)	0.020/ 0.020	-0.012	0.021	-0.003	1.075	15 / 15
012 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	-0.002	-0.022	0.938	23 / 23
022 (3D)	0.020/ 0.020	0.027	-0.002	0.006	0.631	19 / 19
024 (3D)	0.020/ 0.020	-0.008	0.024	0.009	0.750	11 / 11
008 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	-0.043	0.008	1.020	20 / 20
<b>Mean [m]</b>		0.000714	-0.000632	-0.000554		
<b>Sigma [m]</b>		0.013739	0.023864	0.011775		
<b>RMS Error [m]</b>		0.013758	0.023873	0.011788		

Figura 74 – Puntos de apoyo utilizados para el procesamiento con 5 puntos de apoyo

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
001	0.0200/0.0200	-0.0060	0.0401	0.0476	0.7912	20 / 20
009	0.0200/0.0200	-0.0120	-0.0307	0.0323	1.2678	18 / 18
010	0.0200/0.0200	-0.0105	-0.0058	-0.0353	1.9056	17 / 17
013	0.0200/0.0200	0.0035	-0.0040	-0.0500	1.0189	21 / 21
016	0.0200/0.0200	-0.0151	-0.0390	-0.0098	1.0329	17 / 17
018	0.0200/0.0200	0.0342	0.0007	-0.0304	1.2965	27 / 27
019	0.0200/0.0200	0.0336	-0.0117	-0.0667	1.3510	24 / 24
027	0.0200/0.0200	0.0088	0.0378	0.0375	1.1253	12 / 12
028	0.0200/0.0200	-0.0122	0.0279	-0.1095	0.9339	23 / 23
<b>Mean [m]</b>		0.002697	0.001689	-0.020480		
<b>Sigma [m]</b>		0.018220	0.026753	0.049610		
<b>RMS Error [m]</b>		0.018419	0.026806	0.053671		

Figura 75 – Puntos de control utilizados para el procesamiento con 5 puntos de apoyo

#### 8.2.3.5. Nube de puntos

Number of Generated Tiles	3
Number of 3D Densified Points	56501432
Average Density (per m <sup>3</sup> )	588.89

Figura 76 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento con 5 puntos de apoyo

#### 8.2.3.6. Volumen calculado

Área 3D del terreno	<b>57586,75 m<sup>2</sup></b>
Volumen terraplén	<b>49316,64 +/- 537,22 m<sup>3</sup></b>

Tabla 8 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento con 5 puntos de apoyo

## 8.2.4. Resultados con 29 puntos de apoyo



Figura 77 – Puntos utilizados como puntos de apoyo (en rojo) para el procesamiento con 29 puntos de apoyo

### 8.2.4.1. Resumen

Project	cantera proyecto 29
Processed	2017-05-13 13:51:25
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_0.0_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.51 cm / 0.59 in
Area Covered	0.1548 km <sup>2</sup> / 15.4813 ha / 0.0598 sq. mi. / 38.275 acres
Time for Initial Processing (without report)	02h:40m:52s

Figura 78 – Resumen del procesamiento con 29 puntos de apoyo

### 8.2.4.2. Quality Check

🔍 Images	median of 81751 keypoints per image	✅
🔍 Dataset	390 out of 390 images calibrated (100%), all images enabled	✅
🔍 Camera Optimization	54.76% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	⚠️
🔍 Matching	median of 34306.3 matches per calibrated image	✅
🔍 Georeferencing	yes, 29 GCPs (29 3D), mean RMS error = 0.021 m	✅

Figura 79 – Valores de ajuste para el procesamiento con 29 puntos de apoyo

### 8.2.4.3. Posición de imágenes y GCPs iniciales y computados

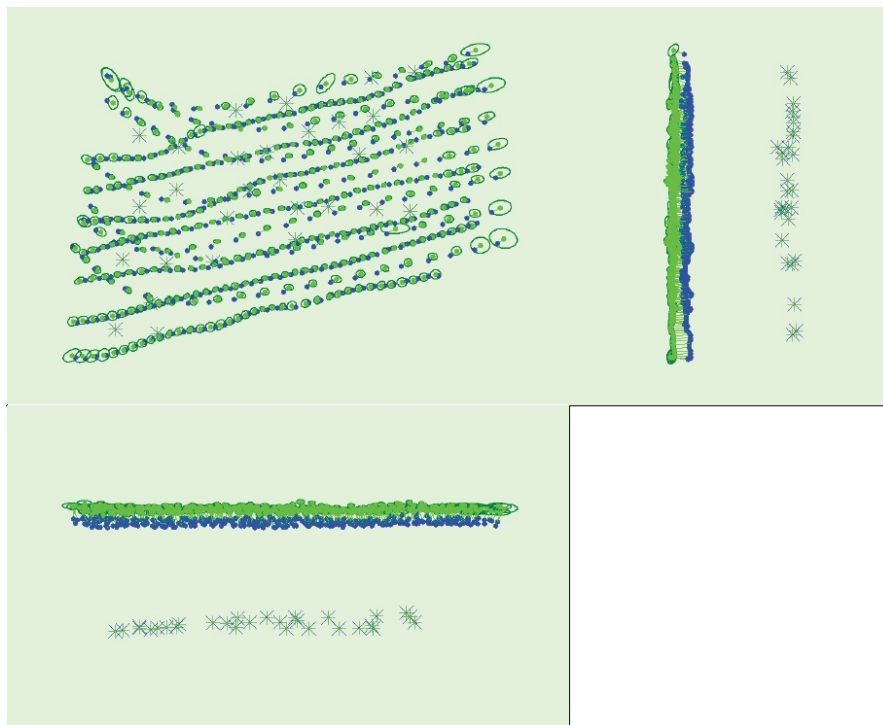


Figura 80 – Diferencia de posiciones de las imágenes y GCPs para el procesamiento con 29 puntos de apoyo

#### 8.2.4.4. Puntos de apoyo y puntos de control utilizados

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
001 (3D)	0.020/0.020	-0.003	0.026	0.031	0.848	20 / 20
002 (3D)	0.020/0.020	0.006	0.033	-0.025	1.244	18 / 18
003 (3D)	0.020/0.020	-0.002	-0.010	-0.000	1.549	24 / 24
004 (3D)	0.020/0.020	-0.023	0.009	-0.011	0.986	18 / 18
005 (3D)	0.020/0.020	-0.027	0.014	0.019	0.629	9 / 9
006 (3D)	0.020/0.020	-0.021	0.009	0.002	1.112	15 / 15
007 (3D)	0.020/0.020	-0.017	0.000	-0.057	1.094	16 / 16
008 (3D)	0.020/0.020	-0.003	-0.048	0.021	1.023	21 / 21
009 (3D)	0.020/0.020	-0.009	-0.038	0.022	1.276	18 / 18
010 (3D)	0.020/0.020	-0.003	-0.012	-0.046	2.078	17 / 17
011 (3D)	0.020/0.020	-0.002	-0.033	-0.003	0.770	22 / 22
012 (3D)	0.020/0.020	0.001	-0.006	0.009	0.787	23 / 23
013 (3D)	0.020/0.020	0.004	-0.008	0.004	1.011	21 / 21
014 (3D)	0.020/0.020	0.009	-0.007	0.011	1.362	19 / 19
015 (3D)	0.020/0.020	0.006	-0.010	-0.009	0.860	27 / 27
016 (3D)	0.020/0.020	-0.010	-0.048	0.013	1.037	17 / 17
017 (3D)	0.020/0.020	0.008	0.011	0.015	1.344	18 / 18
018 (3D)	0.020/0.020	0.023	0.007	-0.005	1.225	27 / 27
019 (3D)	0.020/0.020	0.018	-0.010	-0.005	1.348	24 / 24
020 (3D)	0.020/0.020	0.006	-0.015	-0.015	1.133	27 / 27
021 (3D)	0.020/0.020	0.035	0.002	0.016	1.399	21 / 21
022 (3D)	0.020/0.020	0.016	0.003	0.006	0.632	19 / 19
023 (3D)	0.020/0.020	0.001	-0.011	0.004	0.583	18 / 18
024 (3D)	0.020/0.020	-0.009	0.027	0.033	0.759	11 / 11
025 (3D)	0.020/0.020	-0.004	0.024	-0.015	0.826	18 / 18
026 (3D)	0.020/0.020	0.012	0.037	0.052	0.978	11 / 11
027 (3D)	0.020/0.020	0.017	0.023	0.017	1.174	12 / 12
028 (3D)	0.020/0.020	-0.011	0.028	-0.042	1.163	23 / 23
029 (3D)	0.020/0.020	-0.002	0.018	-0.078	1.187	21 / 21
<b>Mean [m]</b>		0.000539	0.000455	-0.001275		
<b>Sigma [m]</b>		0.013689	0.022500	0.027374		
<b>RMS Error [m]</b>		0.013699	0.022504	0.027403		

Figura 81 – Puntos de apoyo utilizados para el procesamiento con 29 puntos de apoyo

#### 8.2.4.5. Nube de puntos

Number of Generated Tiles	3
Number of 3D Densified Points	56550445
Average Density (per m <sup>3</sup> )	584.14

Figura 82 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento con 29 puntos de apoyo



#### 8.2.4.6. Volumen calculado

Área 3D del terreno	<b>57588,80 m<sup>2</sup></b>
Volumen terraplén	<b>49856,55 +/- 541,33 m<sup>3</sup></b>

Tabla 9 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento con 29 puntos de apoyo

### 8.2.5. Resultados sin puntos de apoyo

#### 8.2.5.1. Resumen

Project	cantera proyecto sin gcp
Processed	2017-05-19 21:02:45
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_0.0_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.5 cm / 0.59 in
Area Covered	undefined

Figura 83 – Resumen del procesamiento sin puntos de apoyo

#### 8.2.5.2. Quality Check

Images	median of 81751 keypoints per image	
Dataset	390 out of 390 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	50.68% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 24774.7 matches per calibrated image	
Georeferencing	no, no 3D GCP	

Figura 84 – Valores de ajuste para el procesamiento sin puntos de apoyo

### 8.2.5.3. Posición de imágenes iniciales y computadas

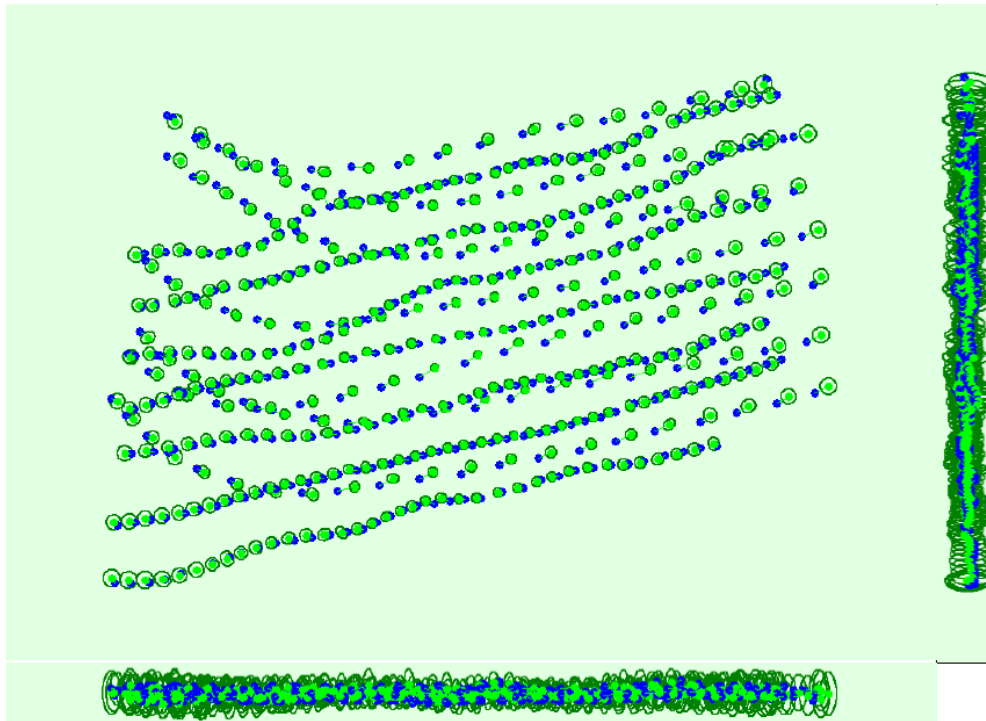


Figura 85 – Diferencia de posiciones de las imágenes para el procesamiento sin puntos de apoyo

### 8.2.5.4. Nube de puntos

Number of Generated Tiles	3
Number of 3D Densified Points	55411986
Average Density (per m <sup>3</sup> )	592.42

Figura 86 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento sin puntos de apoyo

### 8.2.5.5. Volumen calculado

Área 3D del terreno	<b>60304,64 m<sup>2</sup></b>
Volumen terraplén	<b>347058,28 +/- 958,67 m<sup>3</sup></b>

Tabla 10 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento sin puntos de apoyo

### 8.2.6. Observaciones

Se observa una acertada elección del tamaño y forma de la señalización de los puntos de control. Se ven con gran nitidez en las imágenes, tanto en zonas donde la cantera estaba explotada, como en zonas cubiertas por vegetación. El color blanco permite localizar la marca fácilmente, mientras que el contraste con el color negro ayuda a detectar el centro de la misma.

### 8.3. Resultados del procesamiento de datos GNSS

Luego de procesado el relevamiento topográfico, se realizó el cálculo de volumen en el software *TopoStudio*, tal cual lo expresado en el capítulo *Procesamiento de datos GNSS*.

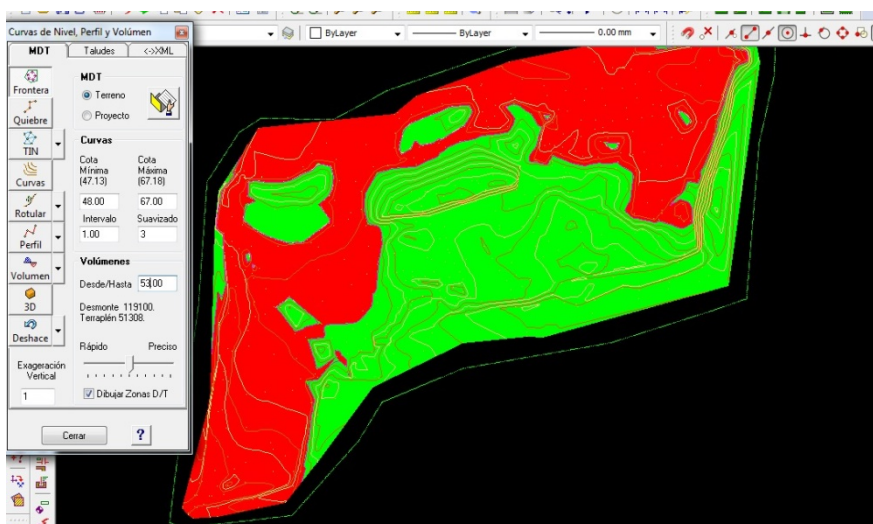


Figura 87 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento de datos GNSS

El total de volumen de terraplén fue:

Volumen terraplén	<b>51308 m<sup>3</sup></b>
-------------------	----------------------------

Tabla 11 - Volumen de terraplén calculado para el procesamiento de datos GNSS

## 9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego del extenso procesamiento de los datos relevados, es importante realizar una discusión apropiada de los resultados logrados.

El dato que más interesa para nuestro proyecto es el volumen de terraplén calculado para cada uno de los casos.

A modo de resumen, y para facilitar la búsqueda de los valores obtenidos, se realizó la siguiente tabla:

Proceso	Volumen (m <sup>3</sup> )	Diferencia de volumen respecto a GNSS (m <sup>3</sup> )	Diferencia de volumen respecto a GNSS (%)
GNSS	<b>51308,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,0%</b>
UAV (0 GCP)	<b>347058,28</b>	<b>295750,28</b>	<b>576,4%</b>
UAV (5 GCPs)	<b>49316,64</b>	<b>1991,36</b>	<b>3,9%</b>
UAV (10 GCPs)	<b>49320,30</b>	<b>1987,70</b>	<b>3,9%</b>
UAV (20 GCPs)	<b>49622,84</b>	<b>1685,16</b>	<b>3,3%</b>
UAV (29 GCPs)	<b>49856,55</b>	<b>1451,45</b>	<b>2,8%</b>

Tabla 12 – Comparación de los volúmenes calculados

Como se aprecia un gran apartamiento en el resultado del cálculo de volumen realizado sin puntos de apoyo, lo cual era algo previsible, se optó por eliminarlo de la comparación.

Los puntos de apoyo cumplen la función de geolocalizar con alta precisión el MDT. Por lo tanto, al carecer de éstos, el modelo se encuentra "flotando" en el espacio y, al momento de utilizar una cota específica para calcular el volumen, ocasiona valores muy distintos a los demás.

A partir de la *Tabla 12* se expresó la información de manera gráfica con el fin de visualizar los resultados de una mejor manera.

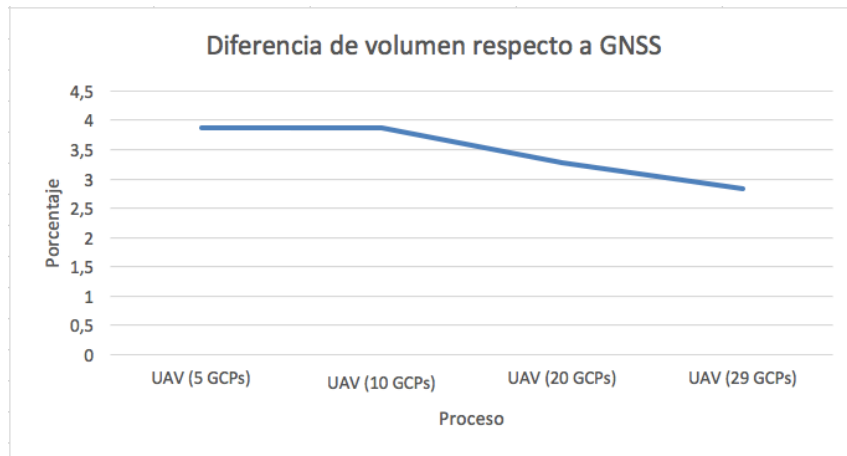


Figura 88 – Diferencia de volumen entre el resultado obtenido a partir de GNSS y los demás métodos

Los **volúmenes obtenidos** en el resto de los modelos generados a partir del vuelo con dron (utilizando GCPs) **difieren en el orden del 3 %** con respecto al generado a partir del sistema GNSS.

Además, se aprecia una **relación inversamente proporcional entre la diferencia de volumen y la cantidad de puntos de apoyo utilizados para generar el modelo**. Es decir, a medida que aumenta la cantidad de éstos, la diferencia de volumen respecto al modelo tomado como base, disminuye. Esta diferencia es similar para los modelos con 5 y 10 GCPs (con 10 GCPs es apenas menor), y disminuye linealmente a medida que se aumenta la cantidad de puntos de apoyo a 10 y 29, respectivamente.



## 10. ANÁLISIS DE DATOS CON ARCMAP

### 10.1. Introducción

Utilizar softwares diferentes para realizar el procesamiento de los datos aumenta la posibilidad de obtener resultados dispares, ya que entre uno y otro varía el algoritmo de resolución de cálculos, la superficie definida no es exactamente la misma, etc. Esta situación - hipotética - dificulta la comparación de resultados.

Con el objetivo de eliminar esta situación, se decidió utilizar un mismo software para procesar los datos obtenidos a partir del vuelo y del relevamiento con sistema GNSS, de modo de homogeneizar las variables mencionadas anteriormente.

En este caso, se utilizó el Software *ArcMap* 10.4, de la empresa ESRI, cuya sede se encuentra en California, EEUU.

Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

Se optó por este software por la versatilidad de usar datos de diversas fuentes.

Las comparaciones a realizar serán respecto al cálculo de volumen, las diferencias entre los modelos, las diferencias entre el valor de la cota de los puntos GNSS y su correspondiente en los modelos UAV, y la variación del plano de referencia en los distintos modelos para un mismo valor volumétrico.

### 10.2. Cálculo de volumen a partir de datos GNSS

Para poder realizar el cálculo del volumen de la cantera a partir de los datos GNSS, previamente se deben ejecutar algunas funciones en *ArcMap*.

Lo primero que hay que tener en cuenta, es que no se utilizaron los datos relevados en crudo, sino que se creó el MDT a partir de las curvas de nivel generadas en el *TopoStudio*. Esto fue hecho de esta manera, debido a que los puntos GNSS se relevaron considerando líneas de quiebre en el terreno, y en *ArcMap* no se encontró la función que tenga en cuenta dichas líneas.

---

De otro modo, se podría haber generado el modelo con los datos crudos sin inconvenientes.

Teniendo las curvas de nivel del terreno, se utiliza la función *Topo to Raster* para generar el modelo ráster de la cantera.

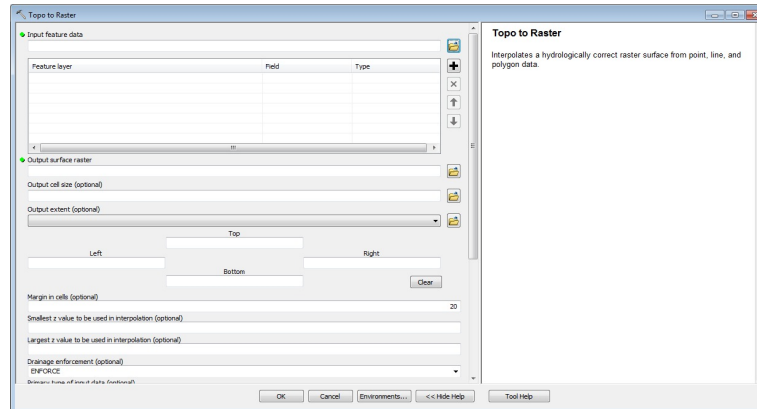


Figura 89 – Función *Topo to Raster*

En el cuadro de diálogo se debe especificar lo siguiente:

- *Input feature data*: se especifica las curvas de nivel obtenidas de *TopoStudio*. A estas hubo que efectuarle un proceso de asignación de la altura a partir de las etiquetas de las curvas.
- *Output surface ráster*: se define el lugar donde se desea almacenar el archivo generado.
- *Output cell size*: se especifica el tamaño del pixel de salida. Se eligió un pixel de 20 cm.

Luego se utiliza la función *Clip Data Management* y, a partir de un polígono del borde de la cantera creado previamente, se genera el modelo ráster GNSS, únicamente de la zona que interesa estudiar.

Este polígono fue creado en *TopoStudio* a partir de una imagen base y es el mismo que se utiliza para el procesamiento del relevamiento fotogramétrico, de modo de trabajar sobre áreas idénticas.

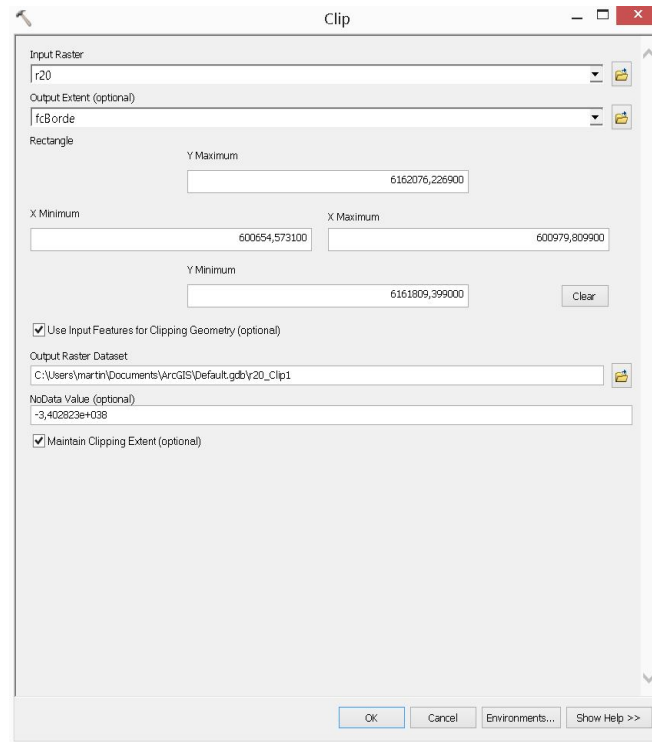


Figura 90 – Función *Clip Data Management*

En este caso se debe especificar:

- *Input Raster*: se indica a que ráster se le va a aplicar la función, corresponde a la salida de la herramienta *Topo to Raster*.
- *Output Extent*: Se especifica la superficie de corte.
- Se active la casilla *Use Input Features for Clipping Geometry*. Esto permite que el polígono definido en *TopoStudio* sea utilizado como entidad de corte para el ráster de salida.



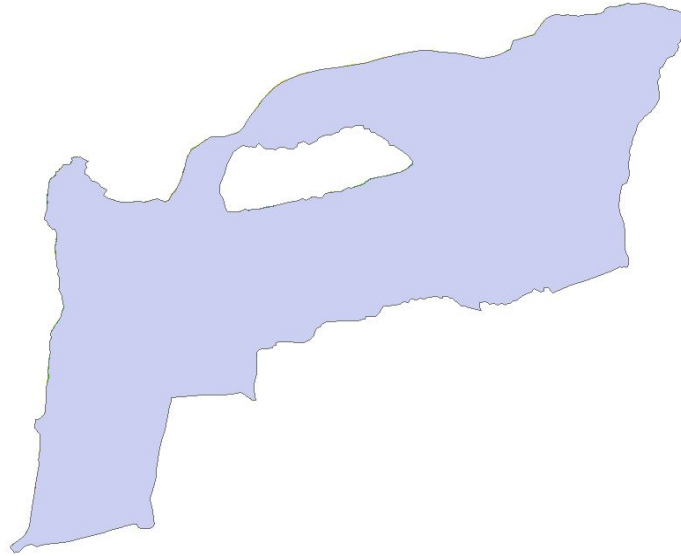


Figura 91 – Polígono de borde de cantera utilizado para generar todos los modelos ráster

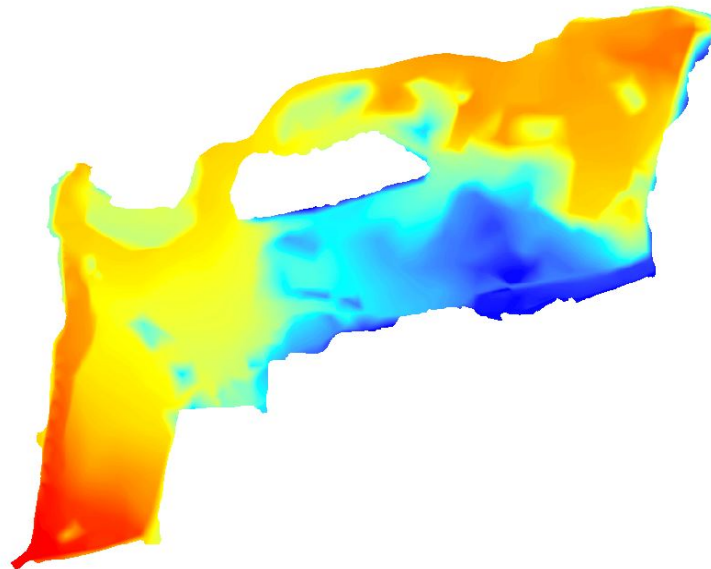


Figura 92 – Modelo ráster de elevación de la cantera a partir del relevamiento GNSS

Finalmente, utilizando el comando *Surface Volume*, se calcula el volumen.

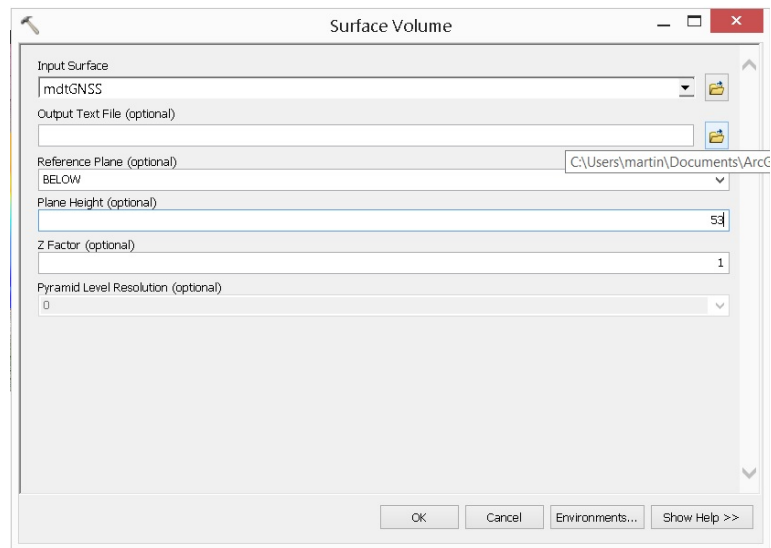


Figura 93 – Función *Surface Volume*

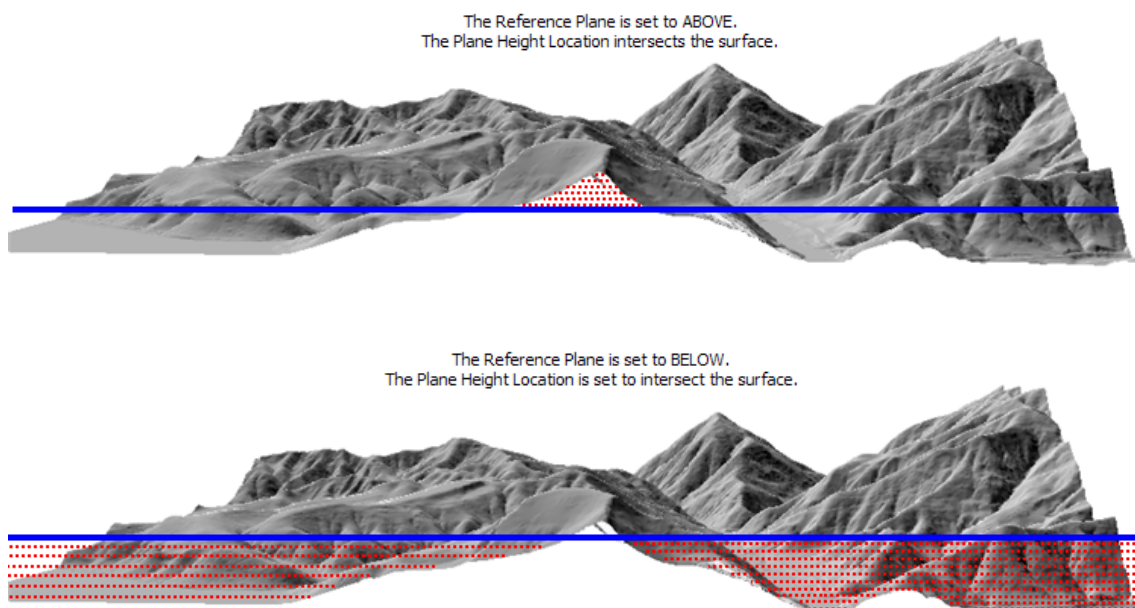


Figura 94 – Superficie comprendida por encima y por debajo del plano de referencia



Se debe especificar:

- *Input Surface*: la superficie del ráster, TIN o terreno que se va a procesar.
- *Output Text File*: un archivo de texto ASCII delimitado por comas que contiene los cálculos de área y volumen. Si el archivo ya existe, se incorporarán los nuevos resultados.
- *Reference Plane*: la dirección del plano de referencia para la que se van a calcular los resultados. Se utilizó la opción *BELOW*: los cálculos de volumen y área representarán la región de espacio entre la altura del plano especificada y las partes de la superficie que están por debajo del plano.
- *Plane Height*: el valor Z del plano que se utilizará para calcular el área y el volumen.
- *Z Factor*: el factor por el que se multiplicarán los valores Z. Esto se utiliza generalmente para convertir las unidades lineales Z para que coincidan con las unidades lineales XY. El valor predeterminado es 1, que no altera los valores de elevación. No se utilizó en el procesamiento.

### 10.3. Cálculo de volumen a partir de datos UAV

Al igual que para el cálculo del volumen a partir de los datos GNSS, el software no utiliza los datos crudos. En este caso, requiere el archivo LAS creado por el software *Pix4D* para generar el dataset LAS.

El Dataset LAS de ESRI es un archivo autónomo que reside en una carpeta y hace referencia a datos en formato LAS junto con entidades de restricción de superficies opcionales que definen las características de la superficie. Se puede generar rápidamente usando la herramienta *Create Dataset LAS* o el menú contextual de una carpeta en ArcCatalog.

Al seleccionar menú contextual, se abre el cuadro de diálogo *LAS Dataset Properties*; en dicho cuadro se seleccionan los archivos LAS que serán agregados al dataset LAS. Se debe seleccionar la pestaña *Surface Constraints* para agregar datos de restricción de superficie adicionales al dataset LAS.

También se puede quitar los archivos LAS o restricciones de superficie desde el dataset LAS usando la ventana *LAS Dataset Properties*.

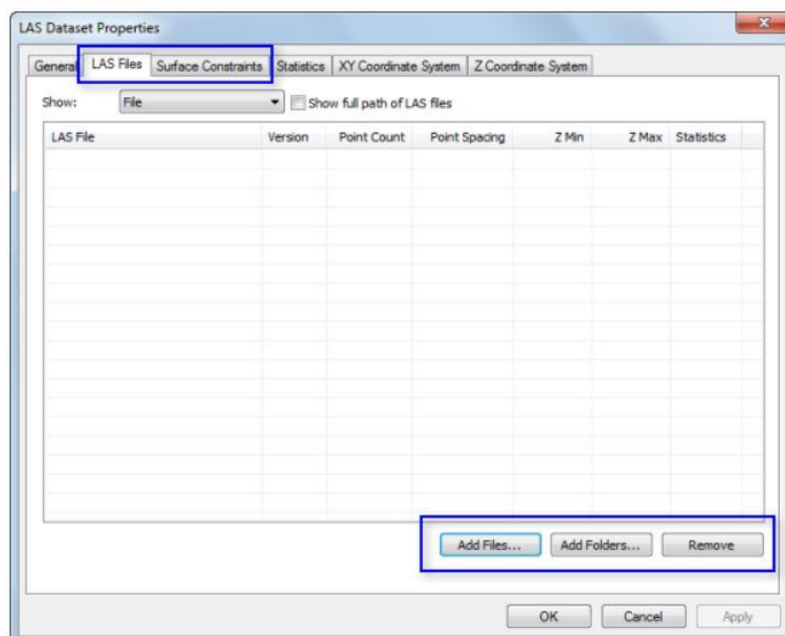


Figura 95 – *LAS Dataset Properties*

Luego, se genera el MDT a partir de la nube de puntos, utilizando la función *LAS Dataset to Raster*; esta herramienta permite crear un ráster utilizando valores de elevación, intensidad o RGB almacenados en la nube de puntos a los que hace referencia el dataset LAS.

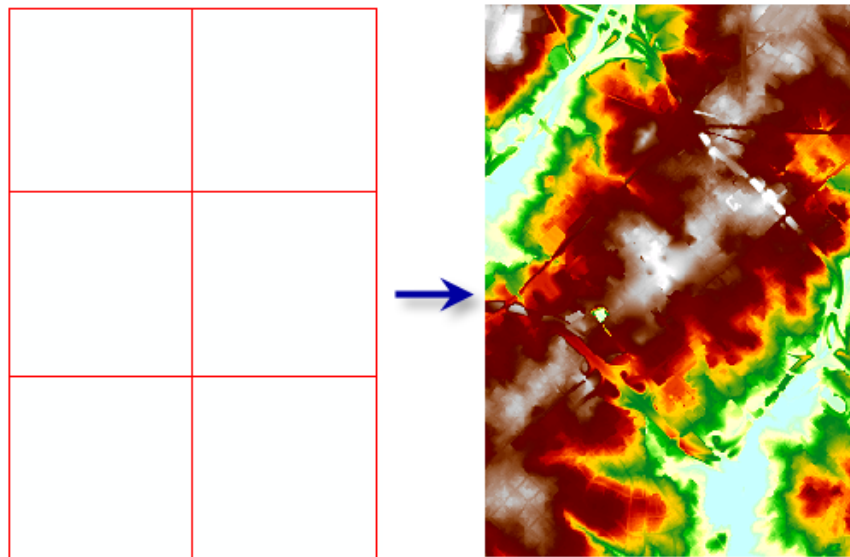


Figura 96 – Conversión de archivo LAS Dataset a modelo ráster. A la derecha, el LAS Dataset de entrada. A la izquierda, el ráster de salida

En la ventana de diálogo se debe especificar:

- *Input LAS Dataset*: El dataset LAS que se va a procesar.
- *Output Raster*: ubicación y nombre del ráster de salida.
- *Value Field*: los datos de la nube de puntos que se utilizarán para generar la salida de ráster. En este caso se utilizó la opción *ELEVATION*.
- *Sampling Value*: se especifica el tamaño de pixel deseado. En este caso es 20 cm.
- *Interpolation Type*: Técnica de interpolación que se usará para determinar los valores de celda del ráster de salida. Se utilizan las opciones *AVERAGE* (promedios) y *LINEAR* (interpolación lineal).
- *Environment Settings > Snap Raster*: se selecciona para que la grilla sea coincidente con la grilla original.

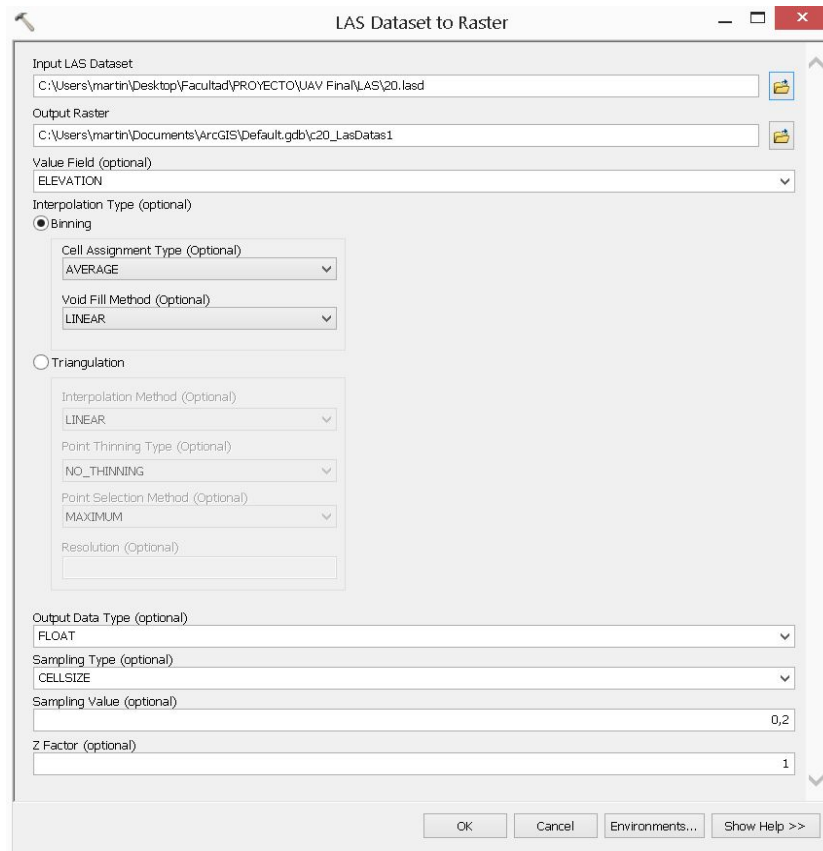


Figura 97 – Función LAS Dataset to Raster

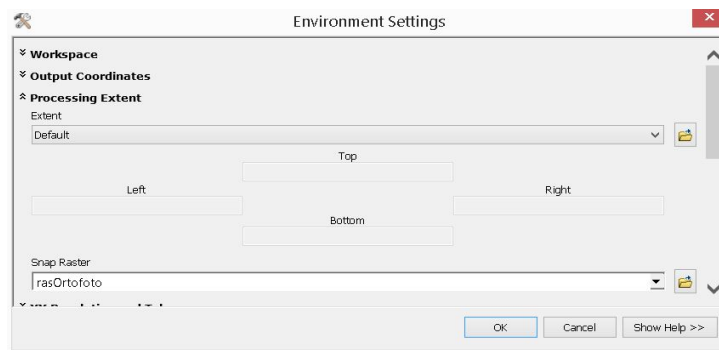


Figura 98 – Environment Settings

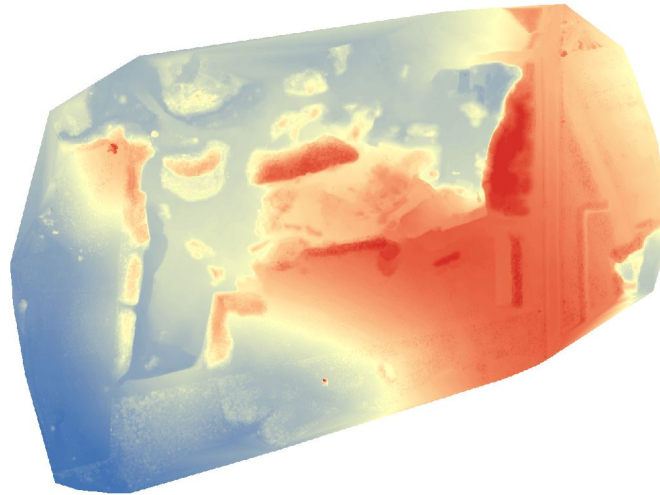


Figura 99 – Modelo ráster generado a partir del archivo LAS

Al igual que en el caso del modelo ráster GNSS, se utiliza la función *Clip Data Management*, se selecciona el polígono que delimita la cantera, mencionado previamente, y se genera el modelo *rasterLAS* del área de interés. Esto se repite para cada uno de los archivos LAS generados en el *Pix4D*, creados variando la cantidad de puntos de apoyo.

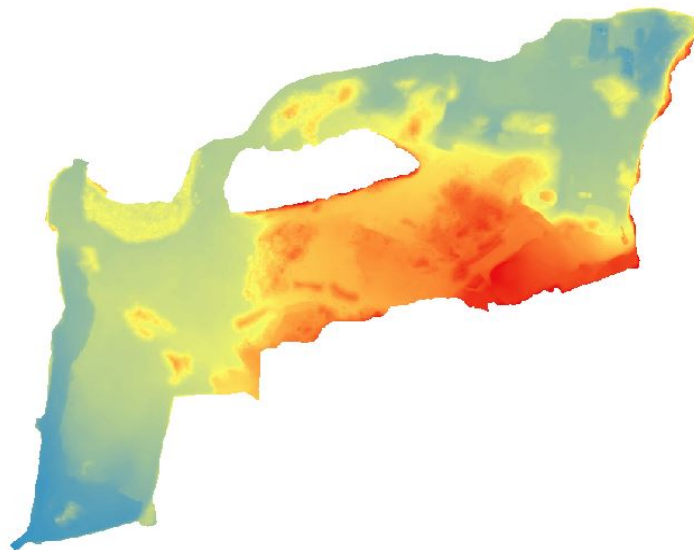


Figura 100 – Modelo ráster de elevación de la cantera a partir del archivo LAS

Para finalizar, se utiliza la misma función *Surface Volume*, explicada anteriormente, para calcular el volumen de todos los modelos ráster creados.

---

## 10.4. Resultados y análisis

### 10.4.1. Cálculo de volumen

La *Tabla 13* muestra los resultados obtenidos en cuanto al volumen de terraplén calculado en *ArcMap* para todos los casos (GNSS y UAV con 5, 10, 20 y 29 GCPs).

Proceso	Volumen (m <sup>3</sup> )	Diferencia de volumen respecto a GNSS (m <sup>3</sup> )	Diferencia de volumen respecto a GNSS (%)
GNSS	<b>40989,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,0%</b>
UAV (5 GCPs)	<b>41844,90</b>	<b>855,90</b>	<b>2,1%</b>
UAV (10 GCPs)	<b>41758,41</b>	<b>769,41</b>	<b>1,9%</b>
UAV (20 GCPs)	<b>42078,16</b>	<b>1089,16</b>	<b>2,7%</b>
UAV (29 GCPs)	<b>42314,30</b>	<b>1325,30</b>	<b>3,2%</b>

Tabla 13 - Resultados del cálculo de volumen utilizando el software *ArcMap*

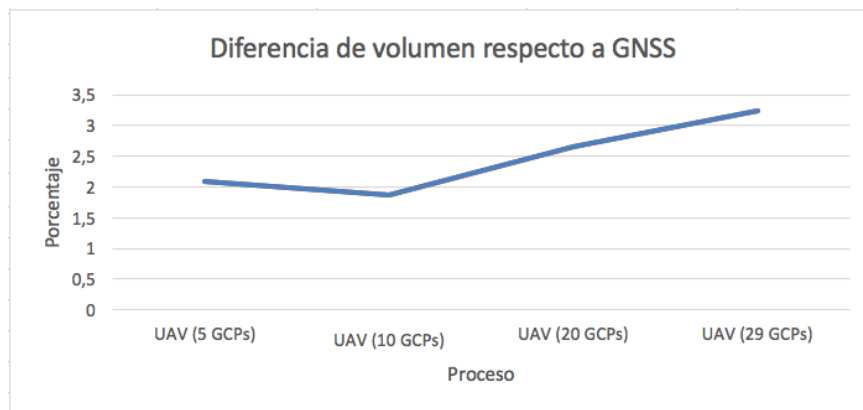


Figura 101 – Diferencia de volumen entre el resultado obtenido a partir de GNSS y los demás métodos utilizando el software *ArcMap*

A simple vista, se aprecia que la diferencia en el volumen calculado con datos UAV respecto al calculado con el modelo GNSS disminuye conforme se reduce la cantidad de puntos de apoyo utilizados para generar el modelo.

Se observa que el apartamiento porcentual se encuentra en el mismo orden que la que arroja el estudio utilizando dos softwares diferentes, lo cual es un dato importante. En ambos casos **esta diferencia se encuentra por debajo del 5 %** planteado inicialmente.



#### 10.4.2. Diferencias entre los modelos

Una de las ventajas de trabajar con los Rasters es que *ArcMap* permite realizar una resta entre ellos, de manera de poder visualizar dónde están las mayores diferencias entre los modelos de elevación.

Para esto, se utiliza el comando *Raster Calculator*, en la cual se puede obtener la diferencia de un ráster respecto a otro. Esta función arroja como resultado un nuevo ráster con las diferencias entre ellos.

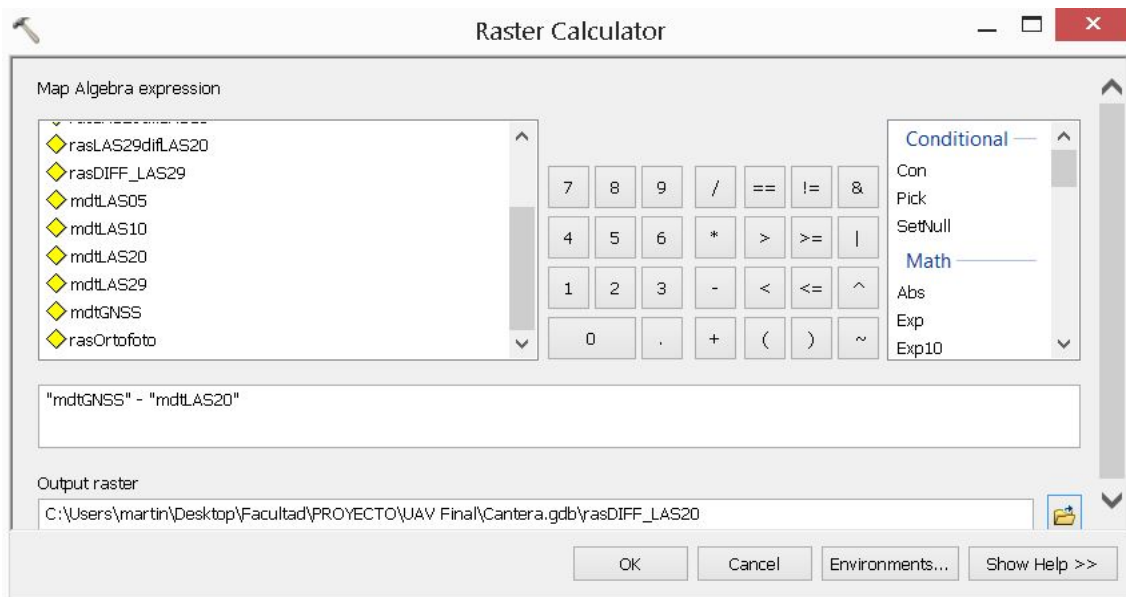


Figura 102 – Función *Raster Calculator*

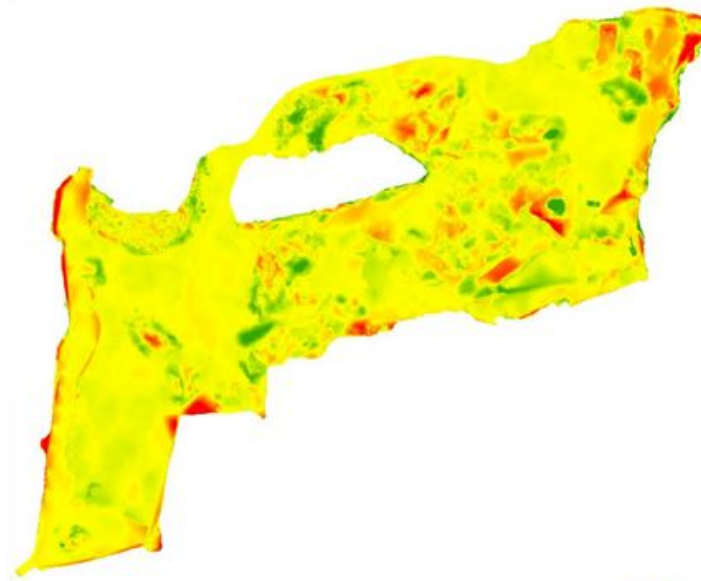


Figura 103 – Ráster diferencia MDT GNSS - MDT UAV (5 GCP)

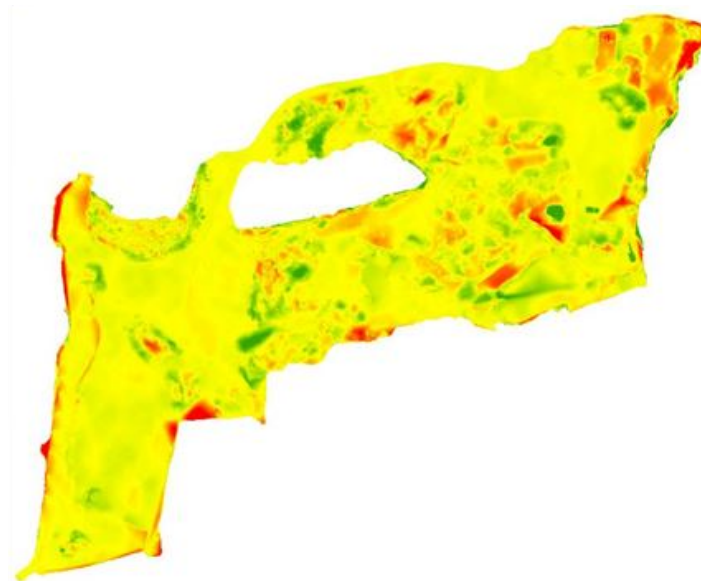


Figura 104 – Ráster diferencia MDT GNSS - MDT UAV (10 GCP)

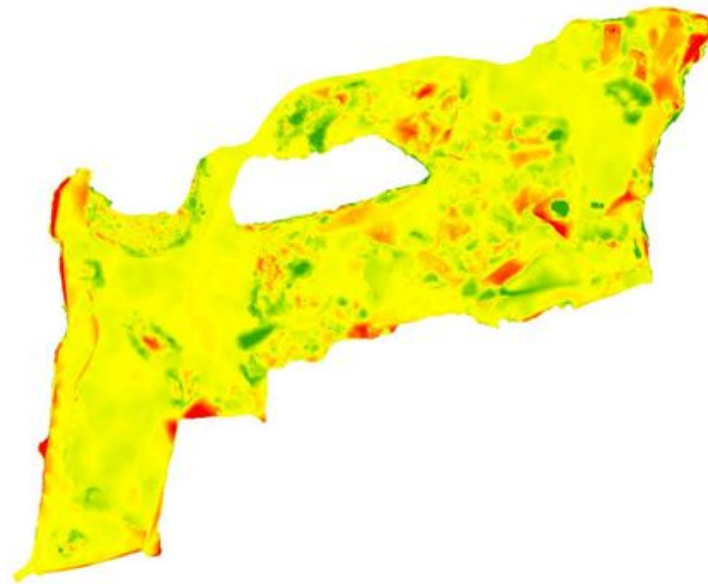


Figura 105 – Ráster diferencia MDT GNSS - MDT UAV (20 GCP)

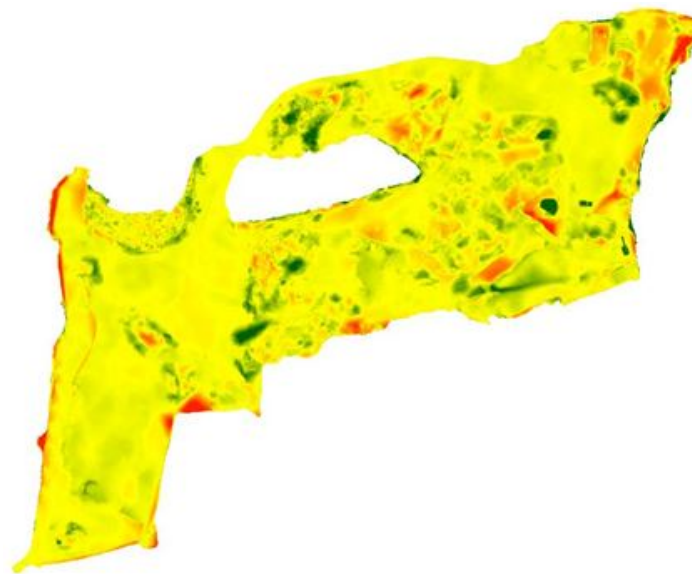


Figura 106 – Ráster diferencia MDT GNSS - MDT UAV (29 GCP)

Las *Figuras 103 a 106* muestran que **las mayores diferencias se dan en los bordes de la cantera**, pero además existen variaciones debido a elementos como rocas grandes (no tomadas en cuenta durante el relevamiento GNSS) y una retroexcavadora que se encontraba en el lugar.

---

Hay que tener en cuenta que, en este tipo de trabajos, utilizando la tecnología GNSS, se tiende a tomar los puntos críticos de la superficie excavada, omitiendo ciertos acopios de material y rocas mientras que, en el relevamiento fotogramétrico, se ven en las imágenes.

Lo mismo sucede con la maquinaria que se encontraba en el lugar, ya que no es parte de la topografía, pero es inevitable que salga en las imágenes tomadas por el dron.

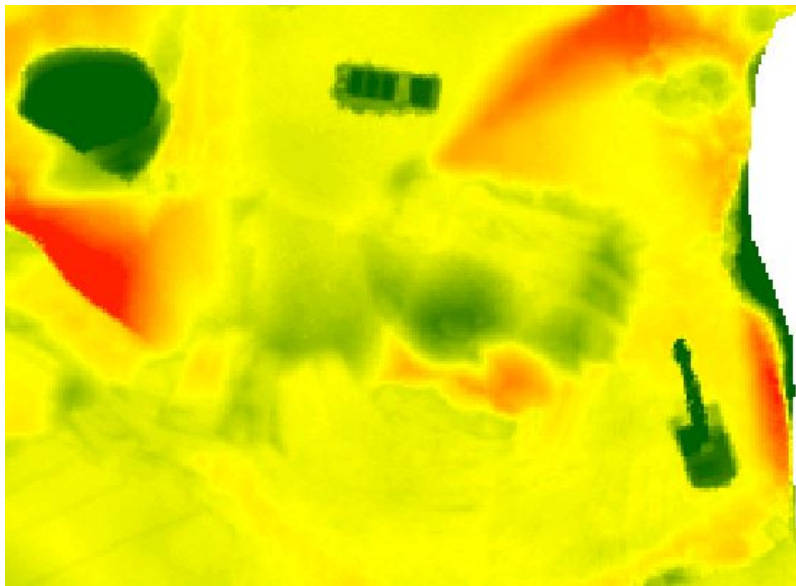


Figura 107 – Arriba: Raster diferencia. Abajo: Ortomosaico

### 10.4.3. Diferencias puntuales entre los modelos

También se puede observar qué diferencias existen entre los MDT generados en el proceso fotogramétrico y los puntos GNSS que se tomaron para obtener el MDT, es decir, se pueden representar visualmente y analizar numéricamente las diferencias entre el valor de elevación en los píxeles de los MDT generados por datos UAV que coinciden con los puntos relevados con GNSS.

Se deben seguir los siguientes pasos en *ArcMap*; al momento del relevamiento topográfico, se tomaron datos por fuera de la superficie de interés (que fuera generada en *TopoStudio* y presentada anteriormente), de modo de poder obtener una mejor interpolación. Estos datos no deben ser utilizados, ya que en los MDT utilizados a posteriori no se tiene información en dichos sectores.

Se utiliza la función *Clip* donde se especifica:

- *Input Features*: se indican los puntos relevados con GNSS.
- *Clip Features*: se establece el borde de cantera, que fue utilizado en todo el proceso.
- *Output Features Class*: se indica el lugar donde se guardará el nuevo shape.

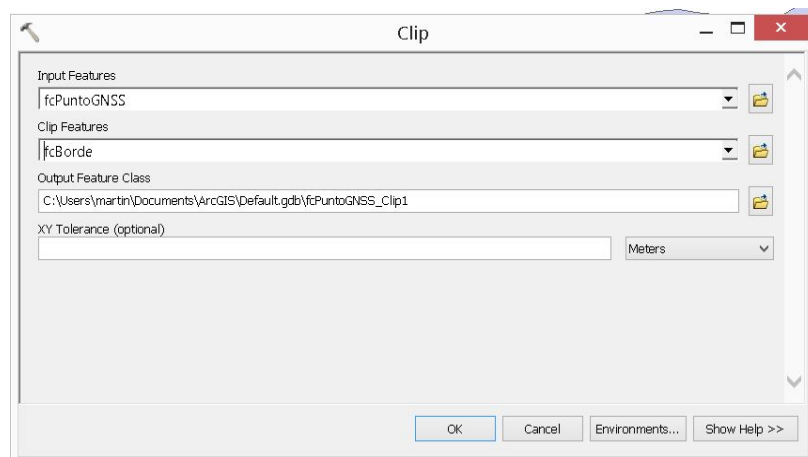


Figura 108 – Función Clip

Luego de obtener los puntos que pertenecen al interior del borde de cantera, se extraerán los valores de elevación en dichos puntos en cada MDT. Se utiliza la función *Extract Values to Points* que genera un shape de puntos, cuya tabla de

atributos tiene el valor de cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster.

En la ventana de diálogo se indica:

- *Input point features*: se selecciona los puntos donde extraer el valor del ráster.
- *Input ráster*: se especifica el ráster del cual se quiere tomar la información.
- *Output point features*: se indica la ubicación donde se quiere almacenar el nuevo shape.

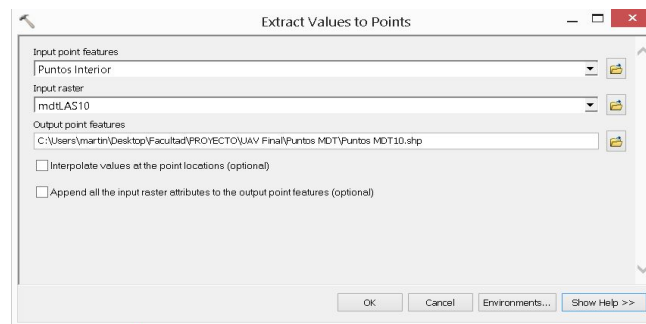


Figura 109 – Function Extract Values to Points

Table				
Puntos MDT10				
FID	Shape *	NUMERO	COTA	RASTERVALU
0	Point ZM	base	54,93	54,879238
1	Point ZM	001	50,56	50,566132
2	Point ZM	002	50,19	50,267334
3	Point ZM	003	51,05	51,186298
4	Point ZM	004	50,4	50,458332
5	Point ZM	010	61,64	61,602421
6	Point ZM	011	57,97	57,9585
7	Point ZM	012	56,57	56,5555
8	Point ZM	013	56,59	56,585461
9	Point ZM	014	55,24	55,255001
10	Point ZM	015	55,98	55,981312
11	Point ZM	017	51,8	51,820538
12	Point ZM	018	52,02	52,045784
13	Point ZM	019	51,68	51,729099
14	Point ZM	020	49,25	49,260357
15	Point ZM	021	48,92	48,844715
16	Point ZM	022	47,59	47,567799
17	Point ZM	023	51,95	51,888897

Figura 110 – Tabla de atributos

Se genera una nueva columna en la tabla de atributos, llamada "DiffCota", utilizando la calculadora de campos, que indique la diferencia entre los valores de cota mencionados.



Figura 111 – Field Calculator

Las diferencias de cota fueron graficadas para cada caso y clasificadas con distintos colores según intervalos de valores. A continuación, se expresan dichos resultados.

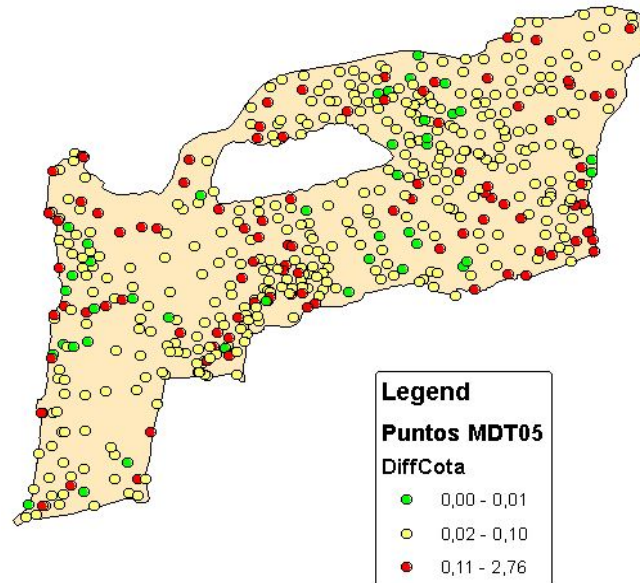


Figura 112 – Diferencia en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 5 GCPs

#### Resultados:

- Total de puntos: 516
- Diferencia promedio: 0,100 m
- Máxima diferencia: 2,75 m
- Cantidad de puntos con diferencia entre 0 m y 0,01 m: 65 (13 %)
- Cantidad de puntos con diferencia entre 0 m y 0,1 m: 417 (81 %)
- Error cuadrático medio: 0,077 m

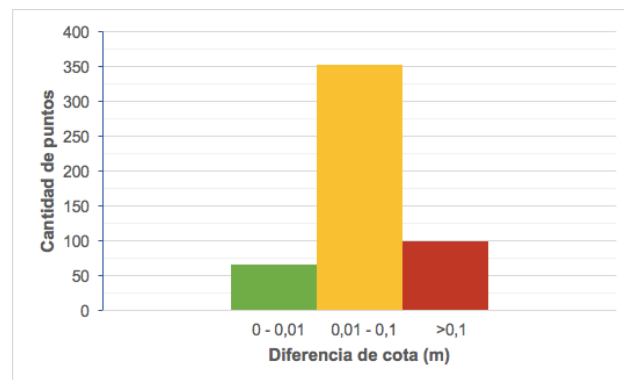


Figura 113 – Histograma para las diferencias en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 5 GCPs



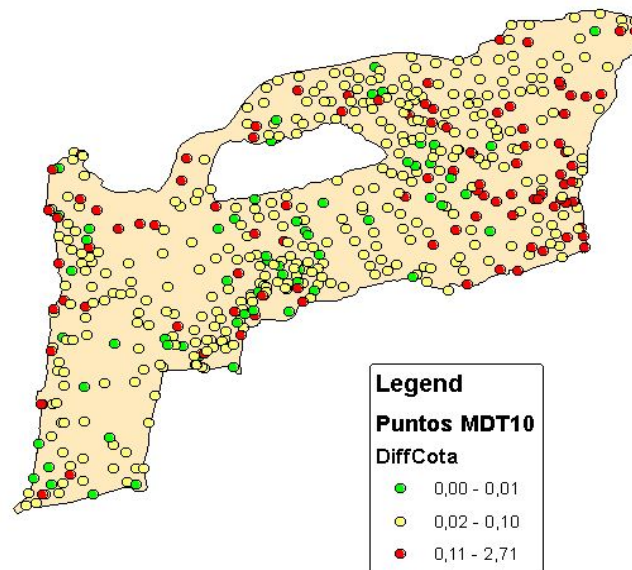


Figura 114 – Diferencia en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 10 GCPs

#### Resultados:

- Total de puntos: 516
- Diferencia promedio: 0,090 m
- Máxima diferencia: 2,71 m
- Cantidad de puntos con diferencia entre 0 m y 0,01 m: 83 (16 %)
- Cantidad de puntos con diferencia entre 0 m y 0,1 m: 426 (83 %)
- Error cuadrático medio: 0,076 m

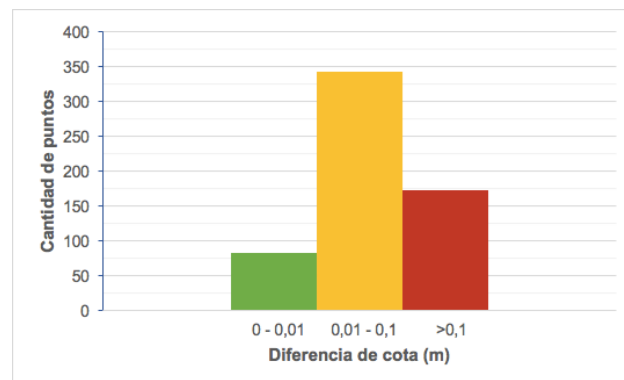


Figura 115 – Histograma para las diferencias en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 10 GCPs

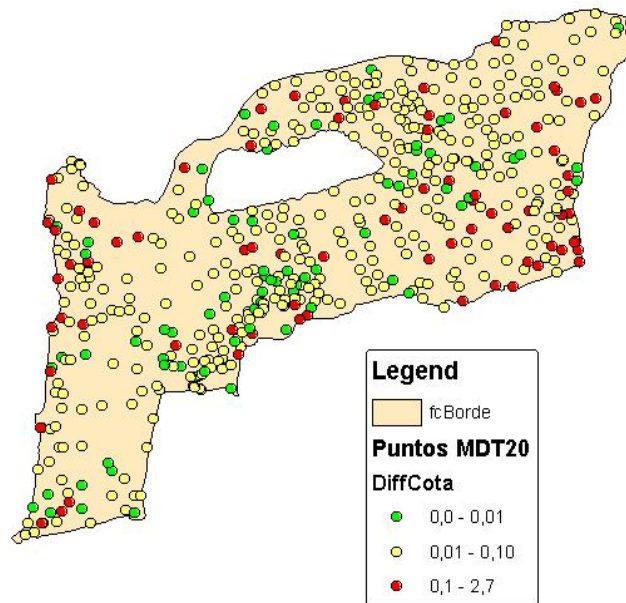


Figura 116 – Diferencia en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 20 GCPs

#### Resultados:

- Total de puntos: 516
- Diferencia promedio: 0,090 m
- Máxima diferencia: 2,73 m
- Cantidad de puntos con diferencia entre 0 m y 0,01 m: 107 (21 %)
- Cantidad de puntos con diferencia entre 0 m y 0,1 m: 444 (86 %)
- Error cuadrático medio: 0,073 m

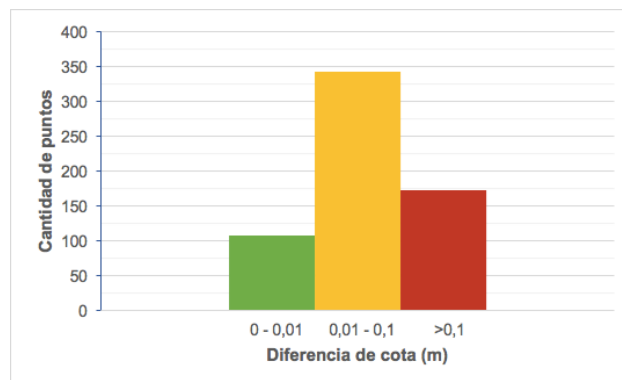


Figura 117 – Histograma para las diferencias en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 20 GCPs

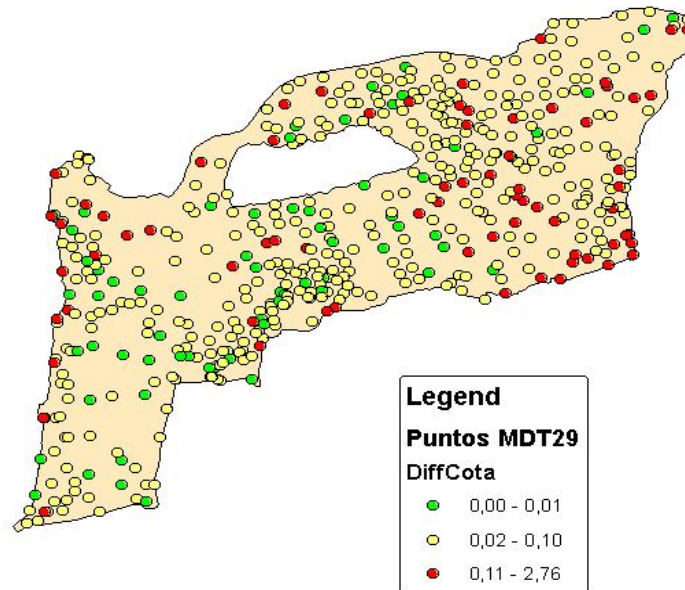


Figura 118 – Diferencia en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 29 GCPs

#### Resultados:

- Total de puntos: 516
- Diferencia promedio: 0,091 m
- Máxima diferencia: 2,76 m
- Cantidad de puntos con diferencia entre 0 m y 0,01 m: 94 (18 %)
- Cantidad de puntos con diferencia entre 0 m y 0,1 m: 445 (86 %)
- Error cuadrático medio: 0,075 m

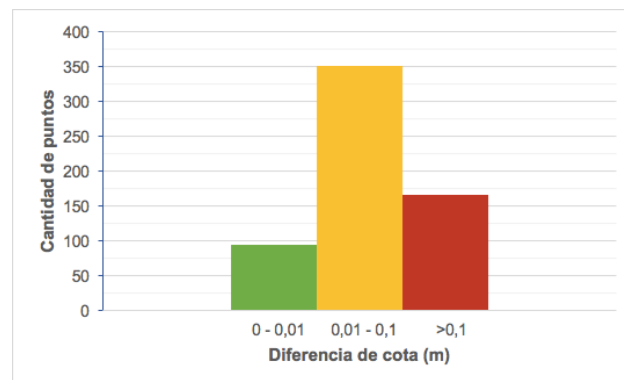


Figura 119 – Histograma para las diferencias en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 29 GCPs

Tomando los valores puntuales, no se visualiza una gran diferencia entre los distintos modelos. Y, al contrario del resultado del cálculo volumétrico donde el valor se aparta del valor obtenido con el modelo GNSS cuando se utilizan más GCPs, este análisis indicaría que a medida que se aumenta la cantidad de puntos de control, el modelo UAV se ajusta mejor al modelo GNSS.

Como muestran las *Figuras 120 a 122*, a medida que se aumenta el número de GCPs, excepto el caso de 29, la diferencia promedio de cota entre los puntos disminuye, al igual que el error cuadrático medio, y se incrementa el número de puntos dentro de los intervalos de diferencia de cota establecidos.

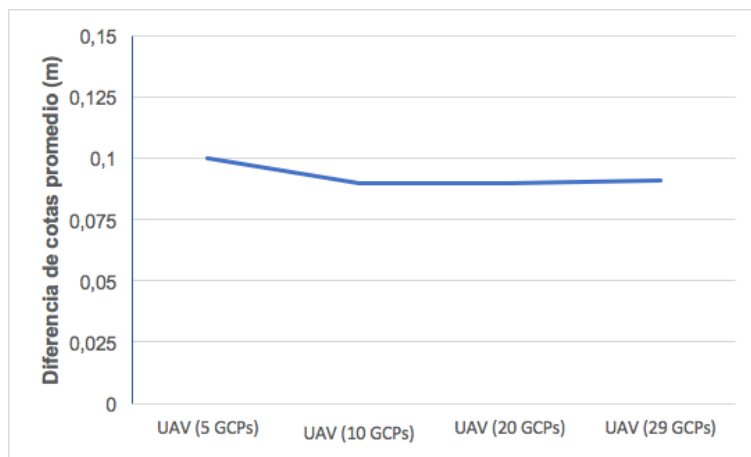


Figura 120 – Variación de la diferencia de cotas promedio

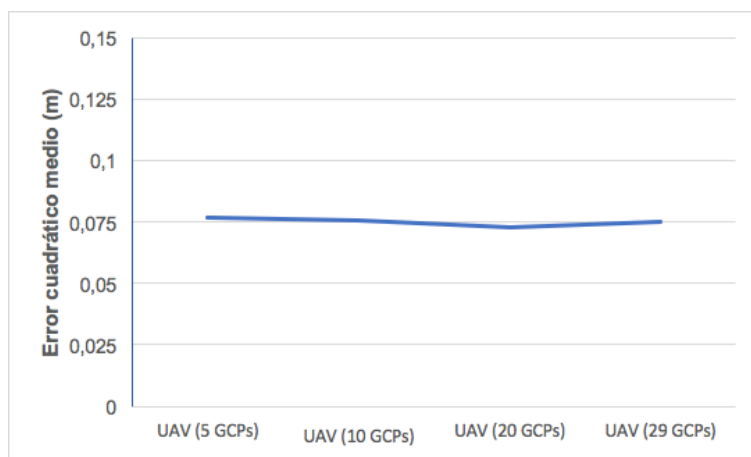


Figura 121 – Variación del error cuadrático medio

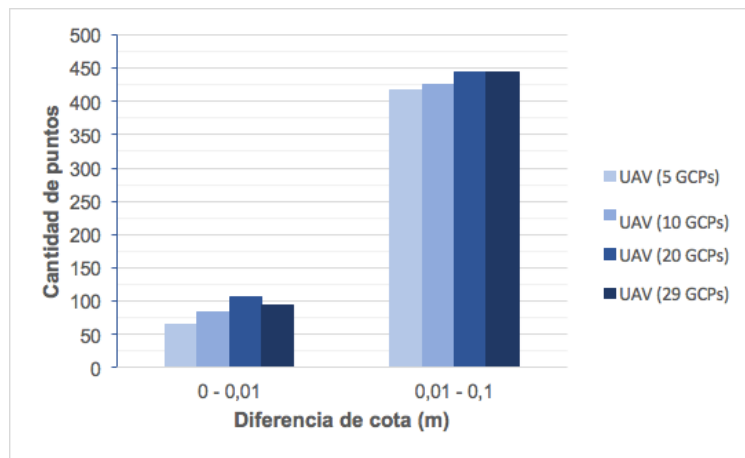


Figura 122 – Variación del número de puntos dentro de los intervalos establecidos

#### 10.4.4. Variación del plano de referencia en los distintos modelos para un volumen fijo

Al principio, el análisis se realizó en base al cálculo de volumen de terraplén fijando como superficie de referencia el plano de cota 53 metros, observando qué diferencias existían en el volumen para cada MDT generado. Como se mencionó anteriormente, estas diferencias se encuentran por debajo del 5 %.

En esta instancia, se planteó realizar el análisis de manera inversa. Esto es, fijando el volumen, analizar cuánto varía la cota del plano de referencia. Con estas comparaciones se intenta mostrar los resultados desde otra perspectiva, para lograr una mejor comprensión de los mismos.

Primero se fijó un volumen de terraplén igual a  $40000 \text{ m}^3$ , que es aproximadamente lo que arrojó el cálculo anterior, y se corrió un algoritmo de resolución en *ArcMap*<sup>12</sup>, obteniendo los resultados que se encuentran en la *Tabla 14*.

<sup>12</sup> Adjunto en los Anexos, página 166

```
C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\usr\UAV_Final\Py>c:\Python27\ArcGIS10.3\python.exe 1.py
48;190874.0
58;-164941.0
53.0;12966.0
55.5;-75988.0
54.25;-31511.0
53.625;-9272.0
53.3125;1847.0
53.46875;-3712.0
53.390625;-932.0
53.3515625;457.0
53.37109375;-238.0
53.361328125;109.0
53.3662109375;-64.0
53.3637695312;23.0
53.3649902344;-21.0
53.3643798828;1.0
Resultado: 53.365m
```

Figura 123 – Ejemplo de ejecución del algoritmo

Proceso	Cota (m)
GNSS	<b>52,95</b>
UAV (5 GCP)	<b>52,91</b>
UAV (10 GCPs)	<b>52,91</b>
UAV (20 GCPs)	<b>52,90</b>
UAV (29 GCPs)	<b>52,89</b>

Tabla 14 – Cotas del plano de referencia para un volumen de terraplén igual a 40000 m<sup>3</sup>

Se aprecia que **la mayor diferencia es de unos 6 cm en la cota (0,1 %)** que, si se lo compara con la realidad, es un valor menor a la profundidad de las huellas de una retroexcavadora.

A su vez, se realizó el análisis fijando un volumen tal, que iguale el volumen de terraplén con el volumen de desmonte (es decir, se busca la cota del plano de referencia que iguale el volumen por debajo y por encima del mismo). Al igual que el comparativo anterior, se corrió un algoritmo en *ArcMap*<sup>13</sup> y se obtuvieron los resultados de la *Tabla 15*.

<sup>13</sup> Adjunto en los Anexos, página 167



Proceso	Cota (m)
GNSS	<b>53,36</b>
UAV (5 GCP)	<b>53,37</b>
UAV (10 GCPs)	<b>53,36</b>
UAV (20 GCPs)	<b>53,34</b>
UAV (29 GCPs)	<b>53,34</b>

Tabla 15 – Cotas del plano de referencia para volúmenes de terraplén y volúmenes de desmonte iguales

En este caso se obtuvieron **diferencias en la cota del plano de referencia entre los modelos por debajo de los 6 cm**, resultados que acompaña la comparación anterior.

#### 10.4.5. Comparación de perfiles transversales

Una de las exigencias requeridas por DINAMIGE a la hora de presentar planos de labores es que se indiquen cortes transversales en el mismo. Por lo tanto, es pertinente mostrar cómo se comporta un par de perfiles generados a partir de las tecnologías GNSS y UAV.

Se confeccionó un plano de perfiles transversales que compara el modelo generado con GNSS y el modelo UAV procesado con 20 puntos de apoyo, adjunto en los Anexos<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> Ver página 155



## 11. CONCLUSIONES

A continuación, se detallan las conclusiones obtenidas al finalizar las tareas del proyecto, en las cuales se comprueban o refutan las premisas mencionadas en la hipótesis inicial.

También en ellas se reflejan aportes y posibles líneas de estudios posteriores que contribuyen al desarrollo del conocimiento.

### 11.1. Conclusión de resultados obtenidos

Como primer resultado, al momento de comparar el volumen calculado a partir del relevamiento GNSS y el relevamiento UAV (variando la cantidad de puntos de apoyo), la diferencia se encuentra, en todos los casos, por debajo del 5 %.

Se tuvo una entrevista con las autoridades de DINAMIGE en la que se mencionó que, dependiendo del tipo de cantera, se considera aceptable una diferencia entre el 5 % y el 10 % del volumen calculado. Entonces, se concluye que el resultado obtenido es más que aceptable dentro de la hipótesis inicial, y de los requerimientos de la autoridad a cargo del control del mismo.

Además, no se aprecia una notoria diferencia en el volumen calculado, si se varía la cantidad de puntos de control para el procesamiento de los datos obtenidos a partir del dron.

Utilizando el software *ArcMap*, se comparó la diferencia entre la cota de los puntos relevados con GNSS y su correspondiente en los distintos modelos generados con datos UAV. Se obtuvo como mínimo un 80 % de los puntos con diferencia de cota menor a 10 cm y un mínimo de 16 % de los puntos con diferencia de cota menor a 1 cm.

Si se tiene en cuenta que, para este tipo de suelo, al medir los puntos con GNSS el bastón puede enterrarse alrededor de 2 cm, este resultado es razonable.

Se confirma la hipótesis inicial de que el sistema GNSS maneja mejores precisiones puntuales que el UAV, resultado que no modifica en mayor medida la diferencia de volumen.







A su vez, el error cuadrático medio en la dirección Z de los puntos utilizados para el ajuste del modelo, así como para el control de calidad del mismo, está en el orden de lo planteado en los estudios previos realizados para el Sistema GNSS (1,2 cm). Por lo tanto, se concluye que el modelo digital de terreno confeccionado a partir del relevamiento UAV, es comparable en este sentido con el modelo digital de terreno confeccionado con el relevamiento GNSS.

También fue objeto de estudio la diferencia en la cota del plano de referencia para lograr un mismo volumen para todos los métodos utilizados. Las diferencias del resultado obtenido para el relevamiento UAV estuvieron en el entorno de los 4 cm a 6 cm respecto al relevamiento GNSS.

Teniendo en cuenta las huellas que puede dejar cualquier tipo de maquinaria, o las rocas que se encuentran en la superficie de la cantera, y no son tomadas en cuenta en los levantamientos con GNSS, se concluye que la diferencia obtenida es aceptable.

Otro resultado de interés para el proyecto es la definición de los elementos que se modelan. Se comprobó la hipótesis inicial, en la que se establece que el relevamiento con UAV, al trabajar con una mayor cantidad de puntos, logra definir mejor la superficie.

Se modelan las curvas y las pendientes de los taludes del borde de cantera de una forma más representativa de la realidad, aunque también se relevan rocas de distintos tamaños, así como cobertura vegetal o vehículos que se encuentren en la zona de estudio y dificultan el posterior procesamiento.

Las mayores diferencias entre los modelos generados con el UAV y el modelo generado con los puntos GNSS, se encuentran en los bordes de la cantera y en la escombrera que se encuentra en el centro de la misma, debido a la cobertura vegetal que cubre la superficie. Es importante la manipulación que se debe realizar de la nube de puntos para obtener resultados no erróneos.

La delimitación del área de trabajo tuvo un papel importante a la hora de realizar las comparaciones ya que se logró quitar las zonas de cobertura vegetal de mayor altura, de modo de eliminar errores groseros en éstas. A su vez, la definición de un área de estudio común a todos los modelos para realizar el cálculo de volumen permitió trabajar con una misma superficie y homogeneizar el error debido a la delimitación de la misma.



## 11.2. Conclusión de tiempos requeridos (relevamiento)

Como era de esperarse, el tiempo requerido por el relevamiento realizado con el UAV fue menor que con el Sistema GNSS.

El relevamiento topográfico con UAV consistió en dos etapas:

- Colocación y relevamiento de 30 puntos pre señalizados y foto identificables (1 hora).
- Preparación del equipamiento y vuelo (2 horas).

Hay que considerar que el vuelo con el dron, duró sólo 15 minutos. Sin embargo, existen otros aspectos que insumen tiempo, cómo encontrar un lugar adecuado para el despegue y aterrizaje del dron (al no haber sido efectuadas estas maniobras en el predio de la cantera, se debió pedir autorización al propietario del terreno lindero), o realizar la preparación del instrumental, el armado de la catapulta, etc.

Otro elemento a tener en cuenta, es que este trabajo se realiza de forma cómoda y distendida, ya que luego de despegar el dron, se lo puede controlar sentado dentro de un vehículo y a cubierto de las inclemencias del clima.

En contrapartida, el relevamiento con Sistema GNSS, supuso un total de 6 horas, las cuales fueron de trabajo bajo el sol, y que implica un gran esfuerzo físico al recorrer toda la zona de estudio caminando, subiendo los taludes, y con riesgo de caerse o golpearse.

## 11.3. Conclusión de tiempos requeridos (procesamiento)

Al momento de realizar el procesamiento, el resultado es opuesto a la comparación anterior.

El procesamiento de los datos GNSS insumió el total de una jornada laboral (8 horas aproximadamente) en lo que se incluye, la generación del MDT, la generación de las curvas de nivel, el cálculo de volumetría y la confección de planos.



Mientras tanto, el procesamiento de uno de los MDT y el cálculo de volumetría a partir del vuelo con UAV, insumió un total aproximado de 18 horas.

Hay que tener en cuenta, que la mayoría del tiempo (unas 12 horas) el software está procesando “sólo”, sin dedicación de tiempo por parte del personal a cargo.

Tanto el relevamiento como el procesamiento de datos con GNSS, está menos automatizado que el mismo trabajo con UAV.

En los dos métodos es importante poder analizar lo que se está haciendo, y saber identificar los posibles errores a cometer. Con sistema GNSS, una zona no relevada, un “breakline” mal definido; con UAV, un error en el sistema de coordenadas, un punto mal identificado, etc.

#### 11.4. Conclusión de costos

Según la información brindada por empresas de venta y alquiler de instrumental de topografía en Uruguay, los costos aproximados al momento de realizado este proyecto de grado son<sup>15</sup>:

- Alquiler de GNSS (Base + Móvil): U\$S 160 / día + IVA
- Alquiler GNSS (Base o Móvil): U\$S 110 / día + IVA
- Alquiler UAV (1 vuelo): U\$S 700 + IVA
- Alquiler UAV (Vuelo Extra): U\$S 100 + IVA
- Venta de instrumental GNSS (Solo Móvil): Desde U\$S 10000 + IVA
- Venta de instrumental UAV: desde U\$S 25000 + IVA
- Software *TopoStudio*: U\$S 1300
- Software de Procesamiento *Pix4D*: U\$S 8500

Está claro que será una decisión del profesional actuante qué costos le convendrá asumir, dado su volumen de trabajo en este sector. El enfoque se realizará desde la perspectiva de un egresado con experiencia menor a 5 años, y sin equipamiento en sus haberes. Dado este panorama, es altamente recomendable el alquiler del instrumental.

---

<sup>15</sup> Fecha de consulta: 28 de junio de 2017



Siguiendo con este enfoque, y con la recomendación del alquiler del instrumental, se detallarán los distintos costos en cada relevamiento. Hay que tener en cuenta, que el software *Pix4D* tiene una licencia gratuita de 15 días, y existen softwares de diseño 3D libres, aunque de no muy buena calidad.

#### Relevamiento UAV:

- U\$S 700 + IVA por el vuelo realizado.
- U\$S 160 + IVA por el apoyo del instrumental GNSS.
- Licencia gratuita por 15 días del software *Pix4D*.

**Total: U\$S 860 + IVA** (Sin tener en cuenta gastos de locomoción, impresiones, etc.)

#### Relevamiento GNSS:

- U\$S 160 + IVA por el alquiler del instrumental GNSS.
- Software de diseño 3D libre.

**Total: U\$S 160 + IVA** (Sin tener en cuenta gastos de locomoción, impresiones, etc.)

En todos los aspectos, los costos que implica el relevamiento con UAV son mayores y, como se vio anteriormente, los tiempos de relevamiento y procesamiento no varían demasiado (20 hs UAV y 14 hs GNSS). Entonces, queda claro que la relación tiempos-costos es mayor al realizar un relevamiento con UAV e inclina, en este sentido, la elección del uso de tecnología GNSS para este caso particular.

Otro factor que inclina la balanza hacia el uso de la tecnología GNSS, es que los requerimientos de hardware para el procesamiento son menores. Por ejemplo, en principio se intentó realizar el procesamiento fotogramétrico con una computadora básica (8 GB de memoria RAM), y no contó con suficientes recursos.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, gran parte del tiempo de procesamiento fotogramétrico es automático, lo que permite al profesional realizar otras tareas en simultáneo.



## 11.5. Conclusión de seguridad

Toda actividad conlleva riesgos a la integridad física. Particularmente, dadas las actividades realizadas por los ingenieros agrimensores y sus ayudantes, estos riesgos suelen ser mayores.

El estar realizando tareas topográficas dentro de una cantera, genera estar expuesto a riesgos asociados a:

- Caídas de personas a distinto nivel, o al mismo nivel.
- Pisadas sobre objetos.
- Caídas de objetos por desplomes o derrumbamientos.
- Exposiciones a temperaturas extremas, polvo, ruido y vibraciones.
- Incendios.
- Sobreesfuerzos.
- Golpes / cortes por objetos o herramientas.

El relevamiento con Sistema GNSS, obliga al topógrafo a estar transitando la totalidad de la superficie de la cantera, se precisa relevar los bordes de talud y subir a los acopios. Si a esta actividad, se le adiciona el cansancio de estar relevando durante 6 o 7 horas, el riesgo de caídas y/o tropezones aumenta.

El uso del UAV, en cambio, implica un menor contacto con la cantera, y en menor tiempo. El mayor contacto se produce en la recorrida por la zona para la colocación de las señales de los puntos de apoyo y calidad, para luego realizar el vuelo fotogramétrico.

Para el rubro de la construcción, el empleador debe abonar un seguro de riesgo laboral de sus empleados, que viene incluido dentro de los aportes a BPS (Banco de Previsión Social). Para la industria extractiva, se debe pagar un seguro por riesgo laboral extra al BSE (Banco de Seguros del Estado), que tiene un costo de un 3 % (anual) del salario percibido por el empleado.

Si se supone que los riesgos del operador del dron se comparan con los de un administrativo, para el cual el costo del seguro mencionado anteriormente es de un 0,9 % (anual), queda claro que la posibilidad de accidentes laborales aumenta al realizar el relevamiento topográfico con GNSS.

---



A pesar de que el costo del riesgo laboral se puede cuantificar en relación al costo de sus seguros, la realidad indica que la integridad física de las personas es muy difícil de cuantificar. Esto implica que, mientras existan tecnologías que permitan disminuir estos riesgos, se deben tener en cuenta y se debe avanzar por ese camino.

## 11.6. Conclusión de valor agregado

El UAV genera cierto valor agregado, por encima del relevamiento con sistema GNSS, que puede ser de utilidad como insumo en otros rubros de minería. A partir de esta tecnología se puede generar un ortomosaico de la superficie relevada y videos del modelo tridimensional a partir de la nube de puntos. A su vez, la ortofoto puede ser visualizada en Google Earth, herramienta conocida y utilizada de manera cotidiana.

El ortomosaico y los videos permiten al usuario de los servicios topográficos visualizar de mejor manera los relevamientos realizados (topografía de la cantera, altura de taludes, zonas de acopios, zonas inundadas, etc.) y sacar conclusiones para llevar a cabo distintas estrategias y posibles tomas de decisiones.

Todo esto hace que, a pesar de que el costo del uso del UAV es mayor, también permite un mayor valor agregado. Por esto, en este sentido, la relación costo-beneficio será evaluada dependiendo del interés del cliente, ya que el aprovechamiento de los distintos insumos extra que aporta esta tecnología dependerá de cada situación.

A continuación, se detalla una lista de subproductos capaces de ser generados por ambas tecnologías:

- Sistema GNSS:
  - Cálculo de volumen
  - Plano de curvas de nivel
  - Perfiles



- Tecnología UAV:
  - Cálculo de volumen
  - Curvas de nivel
  - Nube de puntos
  - Perfiles
  - Modelos hidrológicos
  - Acumulación de flujos
  - Mapa de pendientes
  - Ortomosaico
  - Video 3D

## 11.7. Conclusión general y aspectos a mejorar

A partir de los resultados obtenidos se infiere que, para el cometido del proyecto, se pueden utilizar indistintamente ambas tecnologías. Sin embargo, una combinación de ambas generaría la mejor definición posible del modelo.

En cuanto a la relación costo-beneficio, no se puede cuantificar. Como se dijo anteriormente, ésta depende del interés del cliente y del valor agregado que esté dispuesto a ofrecer el prestador de servicios. Queda claro que el costo monetario que insume realizar el relevamiento fotogramétrico con UAV es mayor, pero a su vez, el tiempo de relevamiento es menor y es más seguro, el procesamiento está mayormente automatizado, y el mismo genera insumos extra que resultan beneficiosos para los clientes.

El uso del UAV se encuentra restringido por parte de la DINACIA para ciertas áreas, este tema dificultó la elección de la cantera de estudio, y hace entender, que no se puede realizar en cualquier lugar sin autorización previa.

En los *Anexos* se adjunta un mapa de Uruguay con las zonas restringidas para realizar vuelos de este tipo<sup>16</sup>, ya sea por centros poblados, aeropuertos, entre otros.

Este proyecto puede servir como puntapié inicial para futuras investigaciones que aporten a ampliar el conocimiento sobre el tema. Algunas de estas pueden ser trabajar con drones no topográficos, investigar sobre el uso del UAV sin puntos de apoyo, estudiar cómo varía el resultado al procesar los datos UAV

---

<sup>16</sup> Ver página 142



con distintos GCPs sin variar la cantidad de los mismos, realizar vuelos a mayor altura, realizar una comparación a partir de relevamientos separados en el tiempo, trabajar con un mayor tamaño de píxel.

Como experiencia general, este proyecto fue desarrollado de manera satisfactoria, obteniéndose resultados conformes a los objetivos planteados. Sin embargo, se tuvieron grandes inconvenientes iniciales respecto a la elección de la cantera (debido a los impedimentos dispuestos en la normativa que rige en el uso de la tecnología UAV), y la coordinación para llevar a cabo el relevamiento en la misma.

A su vez, se pueden destacar algunos aspectos a mejorar. Por ejemplo, realizar una mejor planificación de vuelo, llevando desde gabinete más de una alternativa que tengan en cuenta las variables climáticas (dirección del viento) y los distintos elementos presentes en el lugar que impidan las maniobras de aterrizaje.

Otro aspecto a mejorar es, en cuanto al procesamiento de los datos, realizar una mayor manipulación de la nube de puntos, eliminando objetos que no pertenecen a la superficie de la cantera, o disminuyendo la cantidad de puntos para obtener curvas de nivel más suavizadas. También se puede buscar algún otro software capaz de discriminar de manera sistematizada aquellas zonas cubiertas por vegetación y elementos del terreno.

El proyecto de grado está concebido como un trabajo final del proceso formativo del estudiante terciario, en cuya elaboración se aplican conocimientos teóricos y metodológicos adquiridos durante la educación universitaria. Y como tal, su desarrollo ha sido realizado de forma satisfactoria.

Este trabajo permitió combinar lo aprendido durante el dictado de varias materias pertenecientes a distintas áreas de la carrera. Se consideran de gran aporte los conocimientos adquiridos en el área de Teoría de Errores, Topografía, Sistemas de Información Geográfica, Captura de Datos, Control de Calidad y hasta el área de Legal.

A su vez, se logró enfrentar un desafío propio de la actividad profesional y ampliar el conocimiento en ciertos aspectos como el uso de UAV, los relevamientos topográficos con sistema GNSS y la manipulación de distintos softwares de procesamiento de datos.

---





## TABLA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Figura 1 – Vista aérea de las Canteras del Parque Rodó.....	6
Figura 2 – Vista aérea de las Canteras Montevideo S.A. y su proximidad al Aeropuerto Internacional de Carrasco .....	8
Figura 3 – Vista aérea de la cantera Tomeo y su proximidad al Aeropuerto de Melilla .....	9
Figura 4 – Ubicación de la cantera Cañada Grande S.R.L. ....	10
Figura 5 – Vista aérea de la cantera Cañada Grande S.R.L.....	11
Figura 6 – Zona de estudio .....	12
Figura 7 – Taludes Este y Noreste de la cantera .....	12
Figura 8 – Piso de la cantera .....	13
Figura 9 – Talud Sureste y línea de alta tensión.....	13
Figura 10 – Error en el volumen a causa de las irregularidades del terreno.....	15
Figura 11 – Cuadrícula de cuadrante de lado $l$ .....	17
Figura 12 – Volumen del terreno.....	17
Figura 13 – Prismoide de base $AB$ .....	17
Figura 14 – Configuración de la antena fija (2) y la antena móvil (1).....	20
Figura 15 – Ejemplo de interpolación.....	24
Figura 16 – Interfaz del Software C-Astral GeoPilot .....	28
Figura 17 – Mapa base y configuración de la cámara .....	31
Figura 18 – Distancia focal.....	32
Figura 19 – Distorsión radial (izquierda) y tangencial (derecha).....	33
Figura 20 – Distribución de los puntos de control terrestre .....	34
Figura 21 – Distribución de puntos de apoyo en el bloque fotogramétrico .....	36
Figura 22 – Distribución de los puntos de apoyo .....	37
Figura 23 – Distintas formas de señalar los puntos de apoyo.....	38
Figura 24 – Distribución de los puntos de control de calidad.....	40
Figura 25 – Señalización y relevamiento de los puntos de control y de apoyo.....	42
Figura 26 – UAV situado sobre la catapulta.....	44
Figura 27 – Zona de despegue y aterrizaje.....	45

---



Figura 28 – Anemómetro (medidor de velocidad del viento).....	46
Figura 29 – Preparativos para el despegue del UAV .....	47
Figura 30 – Base colocada y relevamiento con GNSS .....	51
Figura 31 – Solapamiento de imágenes.....	53
Figura 32 – Nuevo proyecto .....	54
Figura 33 – Carga de imágenes .....	55
Figura 34 – Propiedades de las imágenes .....	55
Figura 35 – Arriba, totalidad de imágenes tomadas por el dron (872). Abajo, imágenes luego de la depuración (390).....	57
Figura 36 – Carga de GCP (1) .....	58
Figura 37 – Carga de GCP (2) .....	59
Figura 38 – Selección de GCP .....	59
Figura 39 – Vectores de GCP teóricos.....	60
Figura 40 – Vectores de GCP teóricos luego de la reoptimización (1) .....	60
Figura 41 – Vectores de GCP teóricos luego de la reoptimización (2) .....	60
Figura 42 – Selección de vértices del área de interés .....	62
Figura 43 – Opciones de cálculo de volumen .....	62
Figura 44 – Vista horizontal del MDT .....	63
Figura 45 – Delimitación de la superficie y grilla .....	64
Figura 46 – Volumen de cada celda.....	65
Figura 47 – Error del volumen en la celda .....	66
Figura 48 – Carga de datos GNSS .....	68
Figura 49 – Líneas de quiebre o “Breaklines” .....	68
Figura 50 – Red de triángulos generada a partir del software .....	69
Figura 51 – Curvas de nivel generadas por el software.....	69
Figura 52 – Cálculo de volumen realizado por el software .....	70
Figura 53 – Curvas de nivel de cota 53 m obtenidas con GNSS y UAV (1) .....	71
Figura 54 – Curvas de nivel de cota 53 m obtenidas con GNSS y UAV (2) .....	72
Figura 55 – Curvas de nivel de cota 53 m obtenidas con GNSS y UAV (3) .....	72
Figura 56 – Puntos utilizados como puntos de apoyo (en rojo) y de control de calidad (en amarillo) para el procesamiento con 20 puntos de apoyo.....	74



Figura 57 – Resumen del procesamiento con 20 puntos de apoyo .....	74
Figura 58 – Valores de ajuste para el procesamiento con 20 puntos de apoyo	75
Figura 59 – Diferencia de posiciones de las imágenes y GCPs para el procesamiento con 20 puntos de apoyo .....	76
Figura 60 – Puntos de apoyo utilizados para el procesamiento con 20 puntos de apoyo .....	77
Figura 61 – Puntos de control utilizados para el procesamiento con 20 puntos de apoyo .....	77
Figura 62 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento con 20 puntos de apoyo.....	79
Figura 63 – Puntos utilizados como puntos de apoyo (en rojo) y de control de calidad (en amarillo) para el procesamiento con 10 puntos de apoyo.....	80
Figura 64 – Resumen del procesamiento con 10 puntos de apoyo .....	80
Figura 65 – Valores de ajuste para el procesamiento con 10 puntos de apoyo	81
Figura 66 – Diferencia de posiciones de las imágenes y GCPs para el procesamiento con 10 puntos de apoyo .....	81
Figura 67 – Puntos de apoyo utilizados para el procesamiento con 10 puntos de apoyo .....	82
Figura 68 – Puntos de control utilizados para el procesamiento con 10 puntos de apoyo .....	82
Figura 69 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento con 10 puntos de apoyo.....	82
Figura 70 – Puntos utilizados como puntos de apoyo (en rojo) y de control de calidad (en amarillo) para el procesamiento con 5 puntos de apoyo.....	83
Figura 71 – Resumen del procesamiento con 5 puntos de apoyo .....	83
Figura 72 – Valores de ajuste para el procesamiento con 5 puntos de apoyo .	84
Figura 73 – Diferencia de posiciones de las imágenes y GCPs para el procesamiento con 5 puntos de apoyo .....	84
Figura 74 – Puntos de apoyo utilizados para el procesamiento con 5 puntos de apoyo .....	85
Figura 75 – Puntos de control utilizados para el procesamiento con 5 puntos de apoyo .....	85
Figura 76 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento con 5 puntos de apoyo.....	85
Figura 77 – Puntos utilizados como puntos de apoyo (en rojo) para el	



procesamiento con 29 puntos de apoyo .....	86
Figura 78 – Resumen del procesamiento con 29 puntos de apoyo .....	86
Figura 79 – Valores de ajuste para el procesamiento con 29 puntos de apoyo	87
Figura 80 – Diferencia de posiciones de las imágenes y GCPs para el procesamiento con 29 puntos de apoyo .....	87
Figura 81 – Puntos de apoyo utilizados para el procesamiento con 29 puntos de apoyo .....	88
Figura 82 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento con 29 puntos de apoyo.....	88
Figura 83 – Resumen del procesamiento sin puntos de apoyo .....	89
Figura 84 – Valores de ajuste para el procesamiento sin puntos de apoyo.....	89
Figura 85 – Diferencia de posiciones de las imágenes para el procesamiento sin puntos de apoyo .....	90
Figura 86 – Resultados de la nube de puntos para el procesamiento sin puntos de apoyo .....	90
Figura 87 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento de datos GNSS .....	91
Figura 88 – Diferencia de volumen entre el resultado obtenido a partir de GNSS y los demás métodos .....	93
Figura 89 – Función <i>Topo to Raster</i> .....	95
Figura 90 – Función <i>Clip Data Management</i> .....	96
Figura 91 – Polígono de borde de cantera utilizado para generar todos los modelos ráster .....	97
Figura 92 – Modelo ráster de elevación de la cantera a partir del relevamiento GNSS .....	97
Figura 93 – Función <i>Surface Volume</i> .....	98
Figura 94 – Superficie comprendida por encima y por debajo del plano de referencia .....	98
Figura 95 – <i>LAS Dataset Properties</i> .....	100
Figura 96 – Conversión de archivo LAS Dataset a modelo ráster. A la derecha, el LAS Dataset de entrada. A la izquierda, el raster de salida.....	101
Figura 97 – Función <i>LAS Dataset to Raster</i> .....	102
Figura 98 – <i>Environment Settings</i> .....	102
Figura 99 – Modelo ráster generado a partir del archivo LAS.....	103

---



Figura 100 – Modelo ráster de elevación de la cantera a partir del archivo LAS .....	103
Figura 101 – Diferencia de volumen entre el resultado obtenido a partir de GNSS y los demás métodos utilizando el software <i>ArcMap</i> .....	104
Figura 102 – Función <i>Raster Calculator</i> .....	105
Figura 103 – Ráster diferencia MDT GNSS - MDT UAV (5 GCP) .....	106
Figura 104 – Ráster diferencia MDT GNSS - MDT UAV (10 GCP) .....	106
Figura 105 – Ráster diferencia MDT GNSS - MDT UAV (20 GCP) .....	107
Figura 106 – Ráster diferencia MDT GNSS - MDT UAV (29 GCP) .....	107
Figura 107 – Arriba: Raster diferencia. Abajo: Ortomosaico .....	108
Figura 108 – Función Clip .....	109
Figura 109 – Function Extract Values to Points .....	110
Figura 110 – Tabla de atributos .....	110
Figura 111 – Field Calculator .....	111
Figura 112 – Diferencia en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 5 GCPs ...	112
Figura 113 – Histograma para las diferencias en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 5 GCPs.....	112
Figura 114 – Diferencia en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 10 GCPs .	113
Figura 115 – Histograma para las diferencias en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 10 GCPs.....	113
Figura 116 – Diferencia en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 20 GCPs .	114
Figura 117 – Histograma para las diferencias en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 20 GCPs.....	114
Figura 118 – Diferencia en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 29 GCPs .	115
Figura 119 – Histograma para las diferencias en el valor de la cota de los puntos medidos con GNSS y su correspondiente en el modelo ráster UAV generado con 29 GCPs.....	115
Figura 120 – Variación de la diferencia de cotas promedio .....	116



Figura 121 – Variación del error cuadrático medio .....	116
Figura 122 – Variación del número de puntos dentro de los intervalos establecidos .....	117
Figura 123 – Ejemplo de ejecución del algoritmo .....	118
Tabla 1 – Mediciones realizadas con Estación Total .....	22
Tabla 2 – Mediciones realizadas con GNSS .....	22
Tabla 3 – Cotas de los puntos en el terreno y en el MDE .....	26
Tabla 4 – Coordenadas planialtimétricas de los puntos de apoyo (GCP) y de control de calidad (CP).....	43
Tabla 5 – Comparación entre plan de vuelo y resultados luego del vuelo .....	48
Tabla 6 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento con 20 puntos de apoyo .....	79
Tabla 7 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento con 10 puntos de apoyo .....	83
Tabla 8 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento con 5 puntos de apoyo .....	85
Tabla 9 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento con 29 puntos de apoyo .....	89
Tabla 10 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento sin puntos de apoyo .....	90
Tabla 12 – Volumen de terraplén calculado para el procesamiento de datos GNSS .....	91
Tabla 11 – Comparación de los volúmenes calculados .....	92
Tabla 13 – Resultados del cálculo de volumen utilizando el software <i>ArcMap</i> .....	104
Tabla 14 – Cotas del plano de referencia para un volumen de terraplén igual a 40000 m <sup>3</sup> .....	118
Tabla 15 – Cotas del plano de referencia para volúmenes de terraplén y volúmenes de desmonte iguales.....	119

---



## GLOSARIO

*Concesión.* – “Acción de otorgar una administración a particulares o empresas el derecho para explotar alguno de sus bienes o servicios durante un tiempo determinado”.<sup>17</sup>

*Curvas de nivel.* – “Se denomina Curva de nivel la línea que une en el plano los puntos de igual cota”.<sup>18</sup>

*Derecho de exploración.* – “Es el derecho a realizar en un área determinada todas las labores necesarias, con exclusión de toda otra persona, tendientes a la comprobación de la existencia del yacimiento, al reconocimiento de sus características, a la determinación del volumen, calidad y ley del mineral y a su evaluación económica”.<sup>19</sup>

*Derecho de explotación.* – “Es el derecho a explotar, con exclusión de toda otra persona, en un área determinada, una o más sustancias minerales y disponer de los productos extraídos o separados del yacimiento”.<sup>18</sup>

*Derecho de prospección.* – “Es el derecho a realizar en un área determinada todas las labores de búsqueda de una o más sustancias minerales, con exclusión de toda otra persona”.<sup>18</sup>

*DINACIA.* – Dirección Nacional de Aviación Civil e Infraestructura Aeronáutica.

*DINAMIGE.* – Dirección Nacional de Minería y Geología.

*GNSS.* – Global Navigation Satellite System (en español, Sistema Global de Navegación por Satélite).

*GSD.* – Ground Sample Distance

*Interpolación.* – “Calcular el valor aproximado de una magnitud en un intervalo cuando se conocen algunos de los valores que toma a uno y otro lado de dicho intervalo”.<sup>20</sup>

*MDT.* – Modelo Digital de Terreno. “Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”.<sup>21</sup>

---

<sup>17</sup> Oxford Dictionaries (<https://es.oxforddictionaries.com>)

<sup>18</sup> Domínguez, F. *Topografía General y Aplicada*

<sup>19</sup> Art. 10 del Código de Minería - Ley N° 15242 de 8 de enero de 1982

<sup>20</sup> Diccionario de la lengua española (<http://dle.rae.es>)

<sup>21</sup> Felícísimo, A. M. *Modelos Digitales de Terreno: Introducción y aplicación en las ciencias ambientales*



**MDE.** – Modelo Digital de Elevación. “Se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno”.<sup>22</sup>

**Ortoproyección.** – “Método fotogramétrico de obtener fotomapas precisos, corregidos de las deformaciones producidas en la imagen fotográfica por el relieve y la inclinación de la fotografía, mediante la rectificación diferencial de la fotografía original”.<sup>23</sup>

**Ráster.** – “Consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información. Los rústeres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados”.<sup>24</sup>

**Regla de Bessel.** – Es un método utilizado en Topografía para eliminar posibles errores sistemáticos de la Estación Total. Consiste en visar dos veces el mismo punto, primero con el anteojo normal (Círculo Vertical Graduado a la izquierda), y luego con el anteojo invertido (Círculo Vertical Graduado a la derecha), previa vuelta de campana del anteojo y giro de 180° del instrumento.<sup>25</sup>

**Solapamiento de imágenes.** – “Zona común de terreno obtenida en dos fotogramas consecutivos”.<sup>26</sup>

**TIN.** – Red Irregular de Triángulos. “Las TIN son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos).<sup>27</sup>

**Triangulación de Delaunay.** – “La triangulación de Delaunay garantiza que ningún vértice esté en el interior de los círculos circunscritos de los triángulos de la red. Si se cumple el criterio de Delaunay en todo el TIN, se maximiza el ángulo interior mínimo de todos los triángulos. De este modo, se evitan en la medida de lo posible los triángulos largos y estrechos”.<sup>28</sup>

**UAV.** – Unmanned Aerial Vehicle (en español, Vehículo Aéreo No Tripulado).

**UdelaR.** – Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

---

<sup>22</sup> Felicísimo, A. M. *Modelos Digitales de Terreno: Introducción y aplicación en las ciencias ambientales*

<sup>23</sup> Pérez Álvarez, J. A. *Apuntes de Fotogrametría III*

<sup>24</sup> ArcGIS. ¿Qué son los datos ráster? (<http://desktop.arcgis.com>)

<sup>25</sup> Domínguez, F. *Topografía general y aplicada*

<sup>26</sup> Santamaría Peña, J.; Sanz Méndez, T. *Fundamentos de Fotogrametría*

<sup>27</sup> ArcGIS. ¿Qué es una superficie TIN? (<http://desktop.arcgis.com>)

<sup>28</sup> ArcGIS. *Principios de la triangulación TIN en ArcGIS* (<http://desktop.arcgis.com>)





## ANEXOS

### Resolución 291/014 de 1º de setiembre de 2014 de la DINACIA

DIRECCIÓN NACIONAL DE AVIACIÓN CIVIL E INFRAESTRUCTURA  
AERONÁUTICA

#### RESOLUCIÓN 291 - 2014

Aeropuerto Internacional de Carrasco “Gral. Cesáreo L. Berisso”, 29 AGO 2014

**VISTO:** Que el avance de la tecnología ha dado lugar a la proliferación en el uso por parte de la población general de un conjunto heterogéneo de dispositivos aéreos operados a distancia para la realización actividades recreativas y/o comerciales bajo las más diversas denominaciones tales como “drones”, UAV, etc.

**RESULTANDO: I)** Que el uso indiscriminado de dichos dispositivos puede llegar a comprometer la seguridad de la actividad aeronáutica en nuestro país.

**II)** Que compete a la Dirección Nacional de Aviación Civil e Infraestructura Aeronáutica garantizar los niveles adecuados de Seguridad Operacional en la República Oriental del Uruguay.

**III)** Que las actividades aéreas de carácter comercial o las que implican el uso de dispositivos de filmación, fotográfico u otro tipo de sensores se encuentran especialmente reguladas en nuestro país.

**CONSIDERANDO: I)** Que la Organización de Aviación Civil Internacional tiene previsto emitir normas y métodos recomendados (SARPS) para este tipo de actividad a partir del año 2018.

**II)** Que a nivel regional el LAR 91 Operación de Aeronaves, re ere única y concretamente a “Aeronave pilotada a distancia (RPA)”, realizando referencias a los mismos en los Apéndices K y M respecto de los requisitos para utilizar estas aeronaves, no estando contemplados otros tipos de dispositivos.

**III)** Que al tratarse de una tecnología nueva, en nuestro país no existe la experiencia ni antecedentes suficientes que permitan una regulación detallada de dicha actividad.

---



**IV)** Que por tanto es necesario establecer un ordenamiento básico para esta actividad que garantice niveles aceptables de Seguridad Operacional en el territorio nacional, así también como un adecuado cumplimiento de la normativa vigente sobre aspectos administrativos, técnicos y comerciales que la misma involucra.

**ATENCIÓN:** A lo expuesto y a lo dispuesto en el Art. 122 de la ley 14305, Art. 4 de la ley 18619 y en los Decretos 39/977 y 314/994 y RAU 91.

## **EL DIRECTOR NACIONAL DE AVIACIÓN CIVIL E INFRAESTRUCTURA AERONÁUTICA**

### **RESUELVE:**

1. Los Dispositivos Aéreos Operados a Distancia, cualquiera sea su denominación comercial o común se clasifican en:

a. **Dispositivos Aéreos Operados a Distancia - Menores**, de hasta 25 kg de peso de lanzamiento.

b. **Dispositivos Aéreos Operados a Distancia - Medianos**, de más de 25 kg de peso de lanzamiento y hasta 260 kg de peso vacío inclusive.

c. **Dispositivos Aéreos Operados a Distancia - Mayores**, o Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS), de más de 260 kg de peso vacío.

2. Para todos los dispositivos se prohíbe salvo autorización expresa de la Autoridad Aeronáutica:

a. el transporte de pasajeros.

b. las operaciones internacionales.

c. el vuelo en áreas prohibidas o restringidas.

d. el vuelo sobre áreas pobladas o concentraciones de personas.

e. el vuelo en zonas de tráfico de aeropuertos y aeródromos.

3. **Dispositivos Aéreos Operados a Distancia - Menores**, dedicados exclusivamente al deporte o la recreación



a. No requieren:

- i. Registro.
- ii. Certificado de Aeronavegabilidad.
- iii. Licencia, autorización o permiso para el operador.

b. No podrán operar:

i. En espacios aéreos controlados o en la zona de tráfico de aeródromos, salvo autorización otorgada por la autoridad ATM (Control de Tránsito Aéreo).

ii. Por encima de 120 m AGL.

c. La operación se realizará en todos los casos en condiciones VMC y en línea directa de vista.

**4. Dispositivos Aéreos Operados a Distancia - Medianos** dedicados exclusivamente al deporte o la recreación:

a. Deberán inscribirse en un registro técnico a ser llevado por la Dirección de Seguridad Operacional.

b. No se les asignará matrícula, sino un número correlativo iniciando por el 1 (uno) el que deberá lucir visible en los laterales y en la superficie superior e inferior del dispositivo.

c. No se extenderá Certificado de Aeronavegabilidad.

d. Para su operación no se requerirá Licencia Aeronáutica. En su lugar el Departamento de Personal Aeronáutico otorgará un “Permiso de Operador de Dispositivo Aéreo Operado a Distancia” una vez que el interesado, mediante un examen teórico-práctico demuestre ante la DINACIA:

i. Conocimientos básicos de Normativa Aeronáutica, incluyendo, por lo menos la A.I.P. Uruguay y la presente Resolución,

ii. Pericia de vuelo; y

iii. Resolución de situaciones de emergencia.



e. Podrán operar únicamente en condiciones VMC, no pudiendo hacerlo en espacios aéreos controlados o en zona de tráfico de aeródromos, ni por encima de 120 m. AGL, salvo autorización otorgada por la autoridad ATM (Control de Tránsito Aéreo) y de acuerdo a las coordinaciones y procedimientos que se establezcan para el caso concreto

5. Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS) de más de 260 kg de peso vacío, dedicados exclusivamente al deporte o la recreación.

a. Son aeronaves y deberán dar cumplimiento a la normativa nacional aplicable, además de lo expresamente previsto en la presente Resolución.

b. Para su operación se deberá poseer licencia aeronáutica, además del “Permiso de Operador de Dispositivo Aéreo Operado a Distancia” el que será extendido una vez que el titular de una licencia aeronáutica y mediante un examen práctico, demuestre ante la DINACIA:

i. Pericia de vuelo; y

ii. Resolución de situaciones de emergencia.

c. Podrá operar en aquellos espacios aéreos que le permita su equipamiento de a bordo, únicamente en condiciones VMC y siempre que el operador tenga enlace radial efectivo con la autoridad ATM (Control de Tránsito Aéreo).

6. Dispositivos Aéreos Operados a Distancia Menores, Medianos y Sistema de Aeronaves Pilotada a Distancia (RPAS) utilizados en actividades remuneradas.

a. La utilización de Dispositivos Aéreos Operados a Distancia Menores, Medianos o de Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS), en actividades remuneradas de cualquier tipo se consideran incluidas en lo dispuesto en el Art. 122 “Trabajos Aéreos” del Código Aeronáutico Uruguayo, debiéndose dar cumplimiento a los Decretos Nros 39/977 de 31 de enero de 1977 y 314/994 de 5 de julio de 1994.

b. El interesado deberá contar con seguro de responsabilidad civil o seguro aeronáutico en el caso que se trate de aeronaves.



c. En este tipo de operación, incluso cuando la misma se realice únicamente con Dispositivos Aéreos Operados a Distancia - Menores, los operadores deberán contar con el “Permiso de Operador de Dispositivo Aéreo Operado a Distancia”; sin perjuicio de la correspondiente licencia aeronáutica para el caso de Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS).

d. Hasta tanto se establezca la reglamentación definitiva y los procesos de certificación correspondientes, la Dirección de Seguridad Operacional determinará para cada caso concreto, las condiciones específicas de operación que garanticen niveles aceptables de Seguridad Operacional, las que serán debidamente notificadas al interesado previo al efectivo inicio de las actividades.

7. El incumplimiento de lo dispuesto en la presente Resolución dará lugar a la intervención de la Junta de Infracciones y a la eventual aplicación de las sanciones administrativas aeronáuticas correspondientes.

8. Remítase copia de la presente al Director General de Aviación Civil, Dirección de Seguridad Operacional, Dirección de Transporte Aéreo Comercial para su conocimiento, cumplimiento y notificación en las áreas pertinentes.

9. Remítase copia de la presente al Director General de Infraestructura Aeronáutica para su conocimiento y notificación a las áreas involucradas.

10. Remítase copia de la presente a la Junta de Infracciones y a la Asesoría de Normas Técnico-Aeronáuticas.

11. Cúrsese comunicación de la presente a la Junta Nacional de Aviación Civil.

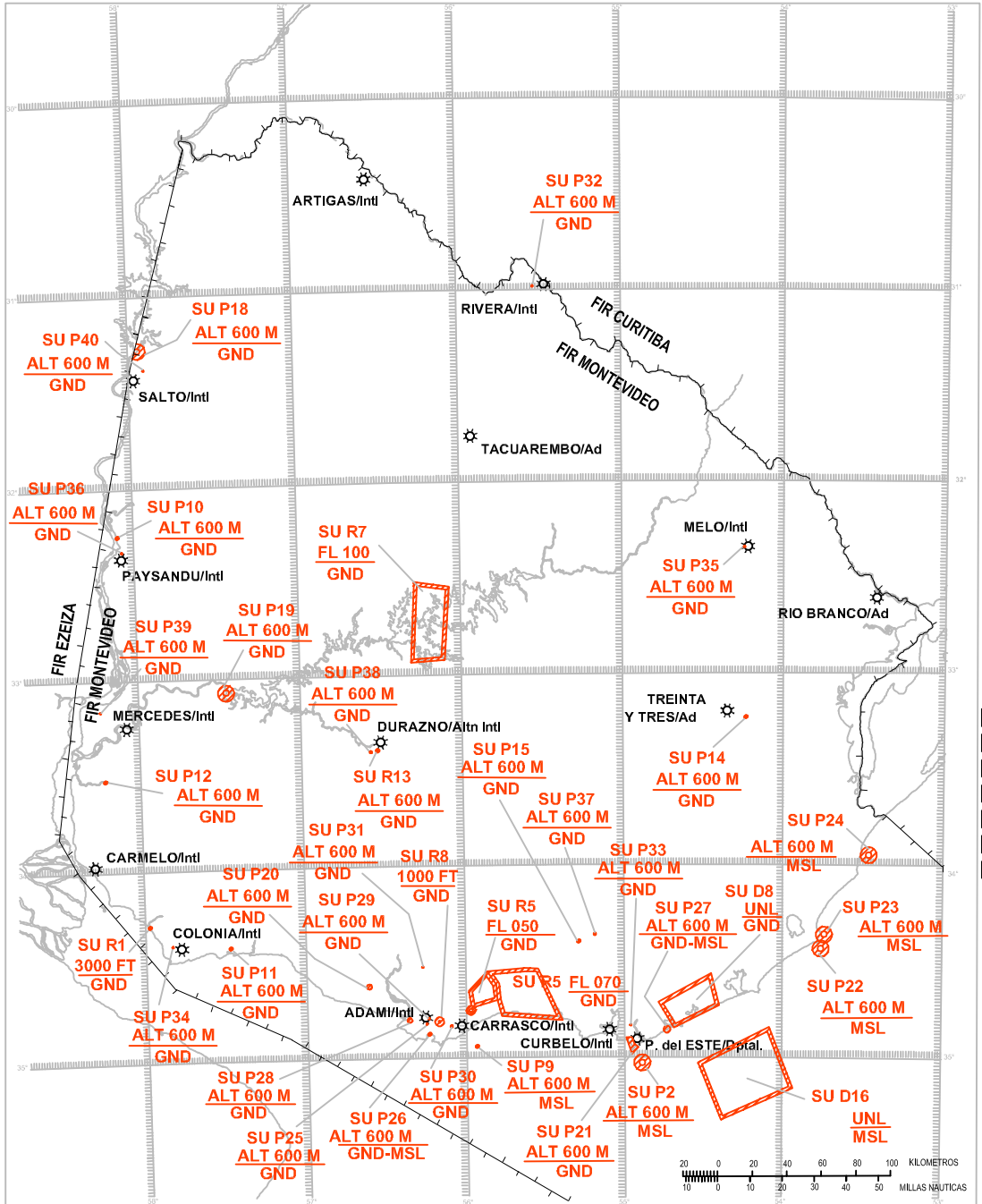
12. Por Secretaría Reguladora de Trámites efectúese la publicación de la presente en el Diario Oficial.

13. Publíquese en el sitio web oficial [www.dinacia.gub.uy](http://www.dinacia.gub.uy).

14. Cumplido archívese.

**EL DIRECTOR NACIONAL DE AVIACION CIVIL E INFRAESTRUCTURA  
AERONAUTICA; BRIGADIER GENERAL (AV.); ANTONIO ALARCON.**

### ZONAS PROHIBIDAS, RESTRINGIDAS Y PELIGROSAS - CARTA INDICE





## Especificaciones del instrumental utilizado

### Especificaciones técnicas Estación Total Leica TC 407

#### Medición de ángulos (Hz, V)

*Método:* absoluto, continuo

*Resolución de pantalla:* 0,01 mil

*Desviación típica:* 7" (2 mgon)

#### Anteojos

*Aumento:* 30x

*Campo visual:* 1°36'

*Distancia mínima de enfoque:* 1,7 m

*Retículo:* iluminado

#### Compensador

*Sistema:* compensador electrónico de dos ejes

*Precisión de estabilización:* 2"

#### Medición de distancias con prisma (IR)

*Alcance de medición con prisma GPR1:* 3500 m

*Medición con dianas reflectantes (60 mm x 60 mm):* 250 m

*Desviación típica (preciso/rápido/tracking):* 2 mm + 2 ppm / 5mm + 2 ppm / 5 mm + 2 ppm

*Tiempo para una medición (preciso/rápido/tracking):* tip. 2,4 s / 0,8 s / < 0,15 s

#### PinPoint medición de distancias sin prisma (RL)

*Alcance (condiciones atmosféricas medias):*

- PinPoint R400 ("power"): > 400 m (90 % reflexivo)
- PinPoint R1000 ("ultra"): > 1000 m (90 % reflexivo)
- Láser al prisma circular GPR: 7500 m

*Desviación típica:*

- 0-500 m: 2 mm + 2 ppm
- > 500 m: 4 mm + 2 ppm



*Tiempo por medición (normal/tracking):* tip. 3-6 s, máx. 12 s

*Tamaño del punto láser a 100 m:* 12 mm x 40 mm

### **Comunicación**

*Almacenamiento interno de datos:* 12500 mediciones o 18000 puntos fijos

*Interfaz:* RS232

*Formatos de datos:* GSI / IDEX / ASCII / dxf / Formatos de libre definición

### **Operación**

*Pantalla:* gráfica de 160 x 280 pixeles. Alfanumérica 8 líneas x 31 caracteres

### **Plomada láser**

*Tipo:* punto láser, luminosidad ajustable en pasos

*Precisión:* 1,5 mm a 1,5 m de altura del instrumento

### **Condiciones ambientales**

*Intervalo de temperaturas (en funcionamiento):* - 20° C a + 50° C

*Humedad:* 95 %, sin condensación

### **Peso**

*Peso incluyendo batería y base nivelante (con GDF 111):* 5,2 kg





## Especificaciones técnicas UAV C-Astral Bramor

### Fuselaje

*Envergadura:* 230 cm

*Longitud del vehículo:* 96 cm

*Longitud del módulo central:* 67 cm

*Motor:* Brushless

*Energía de a bordo:* 4S LiPo 5 Ah / 10 Ah

*Peso de despegue:* 3,7 kg

### Vuelo

*Velocidad de crucero:* 16 m/s

*Velocidad horizontal máxima:* 22 m/s

*Resistencia:* hasta 100 minutos

*RF Comando y control:* 868 MHz o 900 MHz

*Alcance del comando y control:* hasta 60 km

*Despegue:* autónomo con catapulta

*Navegación:* autónomo / serie de Waypoints

*Aterrizaje:* autónomo con paracaídas

*Acciones de fallo críticas:* selecciones pre-programadas

### Información sobre el sensor

*Resolución de la cámara DSLR:* 24,3 Megapíxel

*Almacenamiento:* tarjeta de memoria Sony 32 GB

*Telemetría de precisión integrada:* valores separados del espacio

*Tipo de lente:* 30 mm F2.8 o 19 mm F2.8

*Distancia de vuelo total:* 100 km

*Solape mínimo:* 35 % X y 35 % Y

*Disparador de fotos:* basado en distancia o tiempo

*Cobertura:* hasta 10 km<sup>2</sup>

*Altitud de vuelo:* 80 m – 300 m



## Limitaciones UAV C-Astral Bramor

### Velocidades

*Velocidad constante mínima: 13 m/s*

*Mejor velocidad de resistencia: 15 m/s*

*Velocidad de crucero diseñada: 16 m/s*

*Velocidad máxima demostrada para el despliegue de paracaídas: 19 m/s*

*Velocidad no excedida: 22 m/s*

### Clima

*Velocidad del viento en tierra: Máx. 5 m/s*

*Velocidad del viento a altitud de vuelo para un vuelo de ortofoto de calidad:  
Máx. 3 m/s*

*Velocidad del viento a altitud de vuelo: Máx. 12 m/s*

*Temperatura mínima del aire: -10,0°C*

*Temperatura mínima del sensor: 0°C*

*Temperatura máxima del aire: +45°C*

*Humedad: 5 % - 95 %*

*Visibilidad: 1 km*

*Cobertura de nubes: 0/8 (NSC) – 8/8 (OVC), prohibido volar a través de nubes*

*Condiciones climáticas y medioambientales prohibidas: niebla, lluvia, nieve,  
barro, agua*

### Limitaciones operacionales

*Altitud de vuelo máxima: 4500 m*

*Altitud de vuelo mínima: 45 m (altura sobre despegue)*

*Tiempo de vuelo (para Bramor Ortophoto & Gimbal): desde el amanecer hasta  
que oscurezca*

*Autonomía de vuelo: hasta 100 min*

*Zona de despegue requerida: 20 m x 50 m*

*Superficie mínima sugerida para aterrizaje en paracaídas: 100 m x 100 m*



## Especificaciones Sistema GNSS Trimble R8

### Especificaciones de funcionamiento

Avanzados chips Trimble Maxwell 6 GNSS topográficos personalizados con 440 canales.

Medidas de fase de portadora GNSS de muy bajo nivel de ruido y una precisión de  $< 1$  mm en un ancho de banda de 1 Hz.

Señales de satélite que se rastrean simultáneamente:

- GPS: L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5
- GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3
- SBAS: L1C/A, L5 (para satélites SBAS compatibles con L5)
- Galileo: E1, E5A, E5B
- BeiDou (COMPASS): B1, B2
- SBAS: QZSS, WAAS, EGNOS, GAGAN

### Rendimiento de Posicionamiento

#### Posicionamiento GNSS de código diferencial

- *Horizontal*: 0,25 m + 1 ppm RMS
- *Vertical*: 0,50 m + 1 ppm RMS

### Medición Estática GNSS

#### Estática de alta precisión

- *Horizontal*: 3 mm + 0,1 ppm RMS
- *Vertical*: 3,5 mm + 0,4 ppm RMS

#### Estática y Estática Rápida

- *Horizontal*: 3 mm + 0,5 ppm RMS
- *Vertical*: 5 mm + 0,5 ppm RMS

### Medición GNSS Cinemática con Posprocesamiento (PPK)

- *Horizontal*: 8 mm + 1 ppm RMS
- *Vertical*: 15 mm + 1 ppm RMS



## Medición Cinemática en Tiempo Real

### Línea base individual < 30 km

- *Horizontal:* 8 mm + 1 ppm RMS
- *Vertical:* 15 mm + 1 ppm RMS

## RED RTK

*Horizontal:* 8mm + 0,5 ppm RMS

*Vertical:* 15 mm + 0,5 ppm RMS

*Tiempo de inicialización:* Típico < 8 segundos

*Confiabilidad de la inicialización:* Típica > 99,9 %

## Hardware

### Físicas

*Dimensiones (Ancho Alto):* 19 cm × 10,4 cm, incluyendo los conectores

*Peso:* 1,52 kg con batería interna, radio interna con antena UHF

3,81 kg (los componentes anteriores más el jalón, el controlador y el soporte)

*Temperatura:* De funcionamiento: - 40 °C a +65 °C

De almacenamiento: - 40°C a +75 °C

*Humedad:* 100 %, con condensación

### Eléctricas

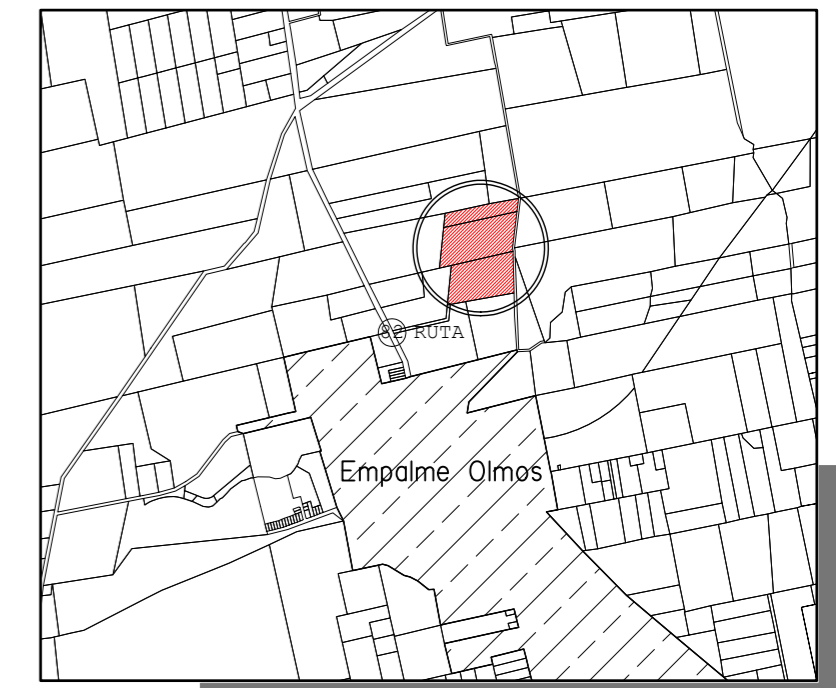
Entrada de alimentación externa de 11 a 28 V

Batería de ion litio de 7,4 V y 2,6 Ah recargable y desmontable.

Tiempos de funcionamiento con la batería interna:

- *Opción de sólo recepción de 450MHz:* 5,0 horas
- *Opción de recepción / transmisión de 450MHz (0,5W):* 2,5 horas
- *Opción de recepción móvil:* 4,7 horas

**CROQUIS DE UBICACION**



**REFERENCIAS**

	Alambrado
	Limite Padron
	+55.86 Nivel del Terreno
	Movimiento de Suelo: Terraplen
	Movimiento de Suelo: Desmonte

**CALCULO DE VOLUMEN**

Visita Cantera 05-04-2017  
 - Terraplen: 51308 m<sup>3</sup>.-  
 - Desmonte: 119100 m<sup>3</sup>.-  
 - Cota Plano de Referencia: 53.00 m.-

PADRON Nº 54871

PADRON Nº 55430

CAMINO LUIS ALBERTO DE HERRERA  
 Pavimento Bases/Ro (Ancho 17m)

220.85

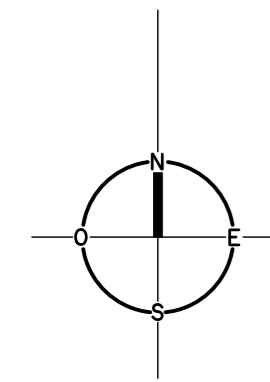
PADRON Nº 28115

210.00

358.04

PADRON Nº 55431

PADRON Nº 55432

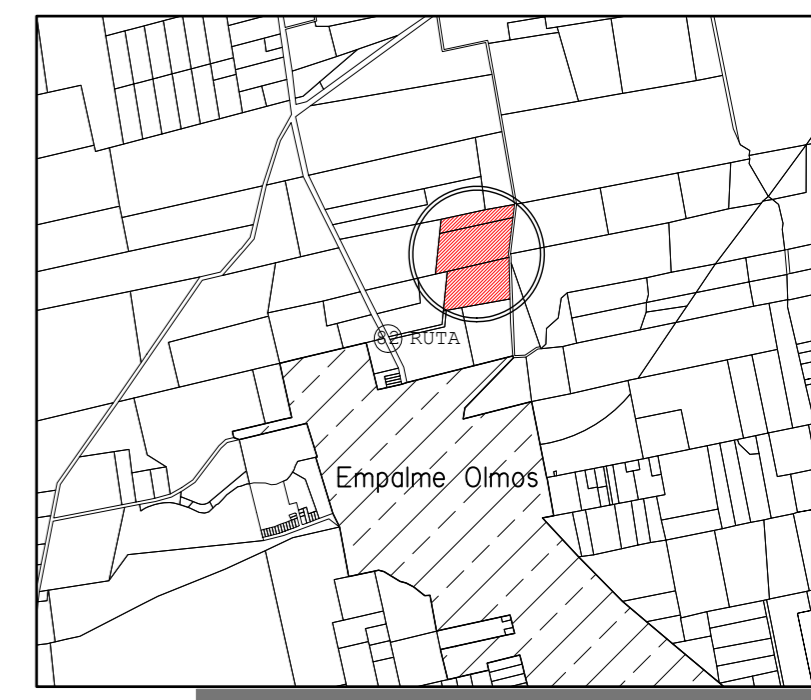


ESCALA 1:1000



<b>RELEVAMIENTO PLANIALTIMETRICO</b>		Escala 1:1000	
PADRONES	54871; 55430 y 6562	AREA TOTAL	Hás m <sup>2</sup>
Sección Catastral	7	Relevada	5 0632
Lamina Catastral	J-28-D		
Cuadrícula	B3		
Departamento	Canelones		
CANTERA		CAÑADA GRANDE SRL	
		Fecha Abril de 2017	
		SEBASTIAN GORDIENKO - MARTIN WAINSTEIN TUTOR: LUIS CALDERON	

**CROQUIS DE UBICACION**



**REFERENCIAS**

	Alabrado
	Limite Padron
	+55.00 Nivel del Terreno
	55.50 Curva de Nivel

**CALCULO DE VOLUMEN**  
 Visita Cantera 05-04-2017  
 - Terraplen: 51308 m<sup>3</sup>-  
 - Desmonte: 119100 m<sup>3</sup>-  
 - Cota Plano de Referencia: 53.00 m.-

**PADRON N° 54871**

**PADRON N° 55430**

**CAMINO LUIS ALBERTO DE HERRERA**  
 Pavimento Bases/Ro (Ancho 17m)

220.85

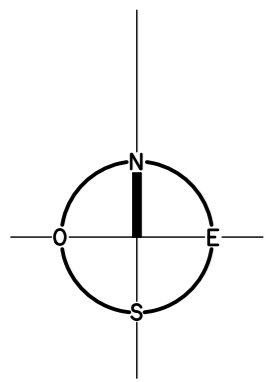
PADRON N° 28115

210.00

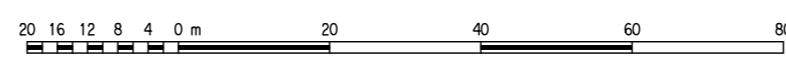
PADRON N° 55432

PADRON N° 55431

358.04

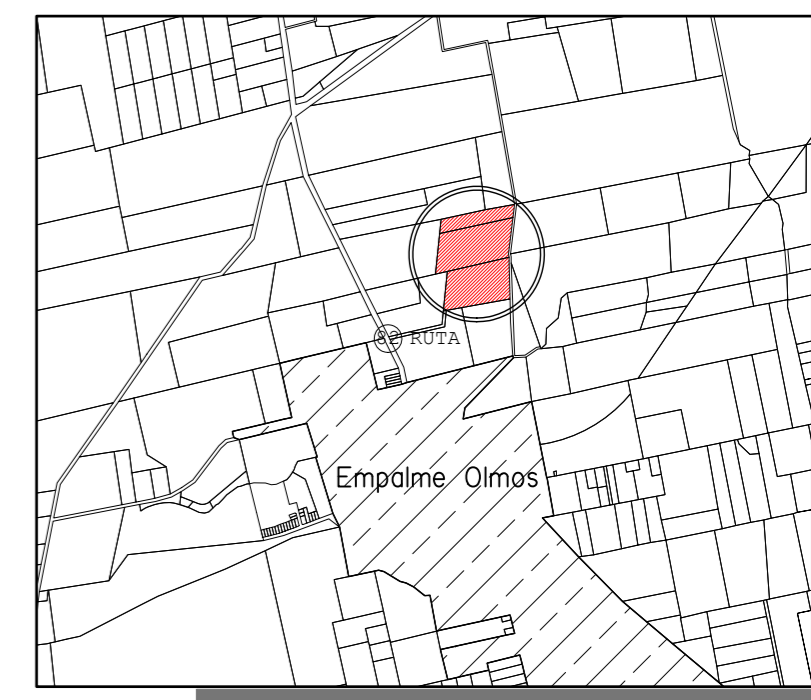


ESCALA 1:1000



<b>RELEVAMIENTO PLANIALTIMETRICO</b>		Escala 1:1000	
PADRONES	54871; 55430 y 6562	AREA TOTAL	Hás m²
Sección Catastral	7	Relevada	5 0632
Lamina Catastral	J-28-D		
Cuadrícula	B3		
Departamento	Canelones		
<b>CANTERA</b>		Fecha Abril de 2017	
CAÑADA GRANDE SRL			
		SEBASTIAN GORDIENKO - MARTIN WAINSTEIN TUTOR: LUIS CALDERON	

**CROQUIS DE UBICACION**



**REFERENCIAS**

	Alambrado
	Limite Padron
	Nivel del Terreno
	Curva de Nivel

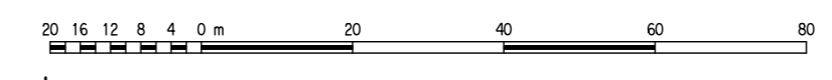
**CALCULO DE VOLUMEN**  
 Visita Cantera 05-04-2017  
 - Terraplen: 51308 m<sup>3</sup>.-  
 - Desmonte: 119100 m<sup>3</sup>.-  
 - Cota Plano de Referencia: 53.00 m.-

**PADRON N° 54871**

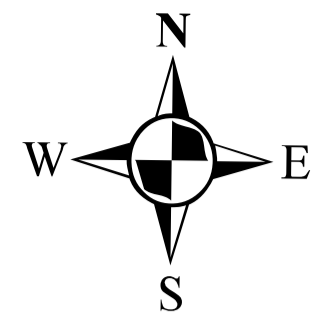
**PADRON N° 55430**



ESCALA 1:1000



<b>RELEVAMIENTO PLANIALTIMETRICO</b>		Escala 1:1000	
PADRONES	54871; 55430 y 6562	AREA TOTAL	Hás m <sup>2</sup>
Sección Catastral	7	Relevada	5 0632
Lamina Catastral	J-28-D		
Cuadrícula	B3		
Departamento	Canelones		
CANTERA		CAÑADA GRANDE SRL	
		Fecha Abril de 2017	
		SEBASTIAN GORDIENKO - MARTIN WAINSTEIN TUTOR: LUIS CALDERON	



**CROQUIS DE UBICACION**



PADRON N° 54871

PADRON N° 55430

CAMINO LUIS ALBERTO DE HERRERA  
Pavimento Balasto (Ancho 17.00m)

**REFERENCIAS**

- - - - Limite Padrón
- + + + + Alabrado
- MDTLAS20**
- <VALUE>**
- Terraplen
- Desmonte

**CALCULO DE VOLUMEN**

Visita Cantera 05-04-2017  
 - Terraplén: 49622.84 m<sup>3</sup>  
 - Cota Plano de Referencia: 53m

PADRON N° 39658

PADRON N° 28115

210.00

220.85

358.04

PADRON N° 55431

PADRON N° 55432

**RELEVAMIENTO PLANIALTIMETRICO**

**ESCALA 1:1000**

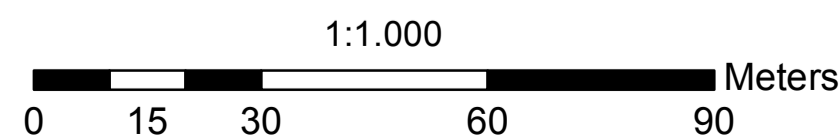
PADRONES: 54871 - 55430 - 6562  
 Sección Catastral: 7  
 Lamina Catastral: J-28-D  
 Cuadrícula: B3  
 Departamento: Canelones

AREA TOTAL	Hás	m <sup>2</sup>
Relevada	5	0632

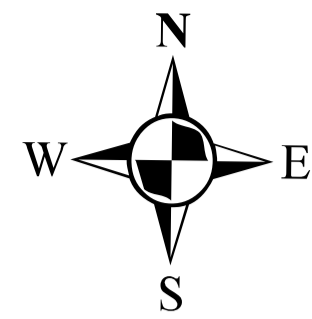
**CANTERA**

**"CAÑADA GRANDE SRL"**

Sebastian Gordienko  
 Martin Wainstein  
 Tutor: Luis Calderón







PADRON N° 54871

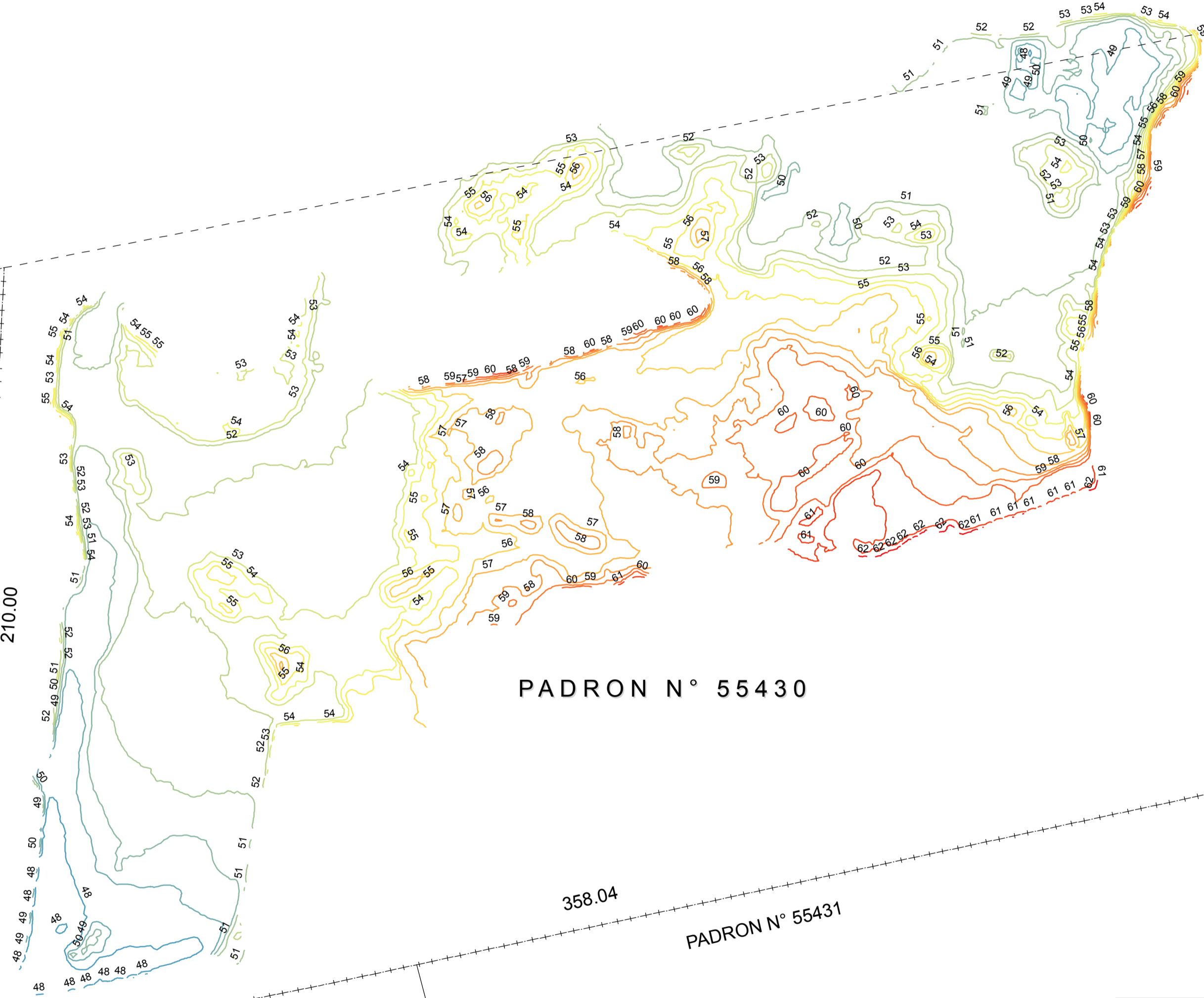
**CROQUIS DE UBICACION**



PADRON N° 39658

PADRON N° 28115

210.00



PADRON N° 55430

PADRON N° 55431

PADRON N° 55432

358.04

220.85

**CAMINO LUIS ALBERTO DE HERRERA**

Pavimento Balasto (Ancho 17.00m)

**REFERENCIAS**

----- Limite Padrón

+++++ Alambrado

**Curvas de Nivel**

- 47
- 48
- 49
- 50
- 51
- 52
- 53
- 54
- 55
- 56
- 57
- 58
- 59
- 60
- 61
- 62

**CALCULO DE VOLUMEN**

Visita Cantera 05-04-2017

- Terraplén: 49622.84 m<sup>3</sup>

- Cota Plano de Referencia: 53m

**RELEVAMIENTO PLANIALTIMETRICO**

**ESCALA 1:1000**

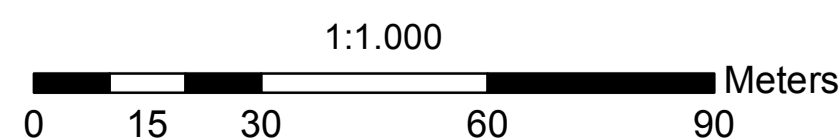
PADRONES: 54871 - 55430 - 6562  
 Sección Catastral: 7  
 Lamina Catastral: J-28-D  
 Cuadrícula: B3  
 Departamento: Canelones

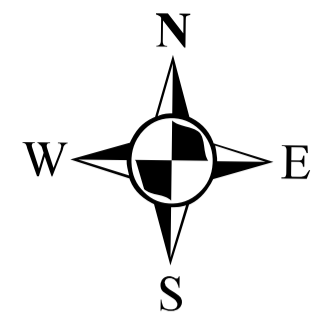
AREA TOTAL	Hás	m <sup>2</sup>
	Relevada	5 0632

**CANTERA**

**"CAÑADA GRANDE SRL"**

Sebastian Gordienko  
 Martin Wainstein  
 Tutor: Luis Calderón

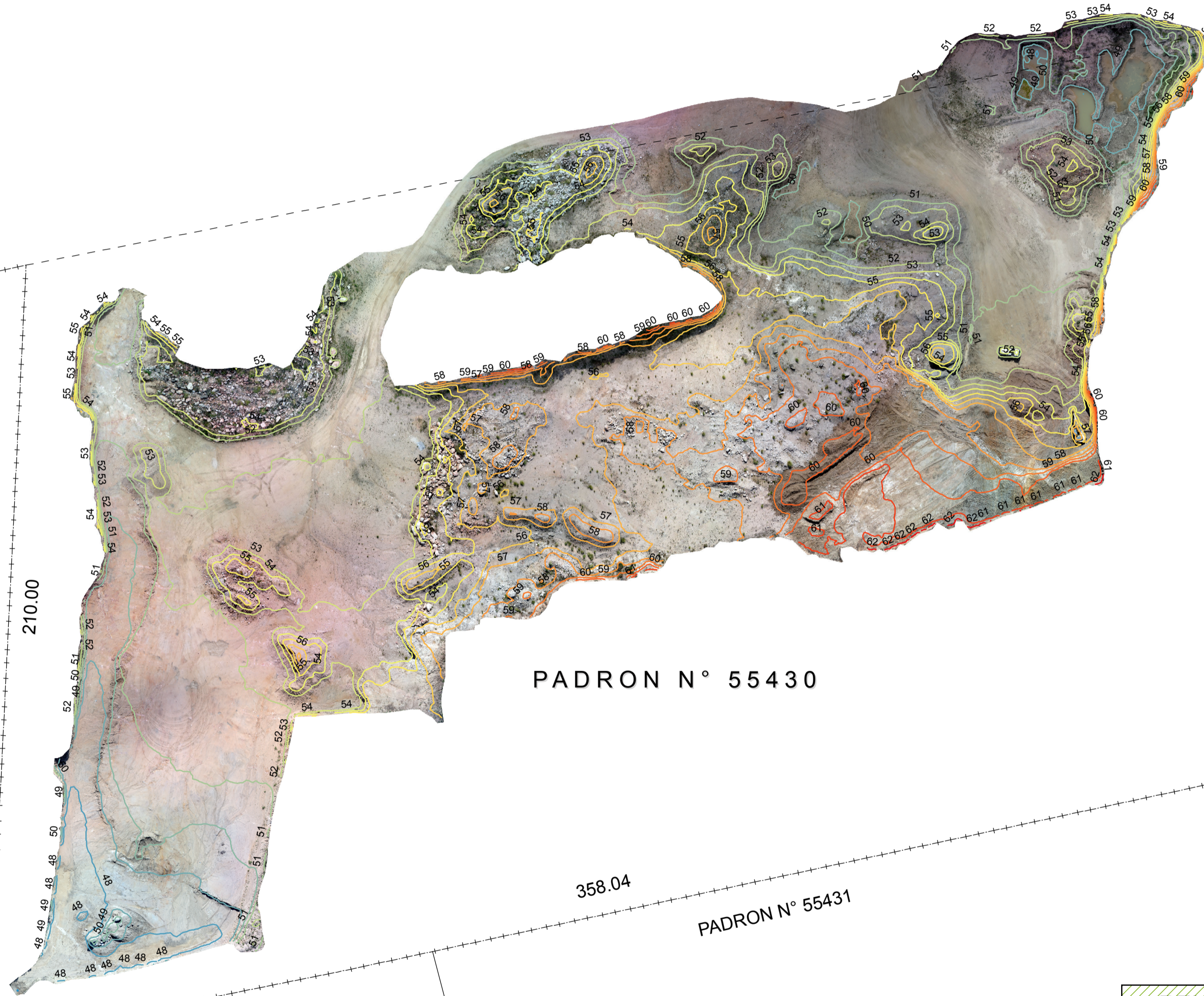




**CROQUIS DE UBICACION**



PADRON N° 54871



PADRON N° 39658

PADRON N° 28115

210.00

PADRON N° 55430

358.04

PADRON N° 55431

220.85

CAMINO LUIS ALBERTO DE HERRERA

Pavimento Balasto (Ancho 17.00m)

**REFERENCIAS**

--- Limite Padrón

++++ Alambrado

**Curvas de Nivel**

- 47
- 48
- 49
- 50
- 51
- 52
- 53
- 54
- 55
- 56
- 57
- 58
- 59
- 60
- 61
- 62

**CALCULO DE VOLUMEN**

Visita Cantera 05-04-2017

- Terraplén: 49622.84 m<sup>3</sup>

- Cota Plano de Referencia: 53m

**RELEVAMIENTO PLANIALTIMETRICO**

**ESCALA 1:1000**

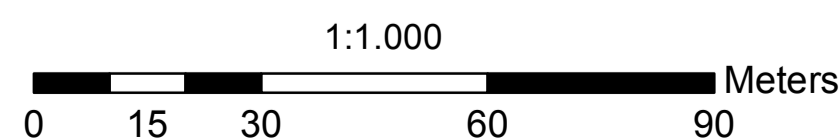
PADRONES: 54871 - 55430 - 6562  
 Sección Catastral: 7  
 Lamina Catastral: J-28-D  
 Cuadrícula: B3  
 Departamento: Canelones

AREA TOTAL	Hás	m <sup>2</sup>
	Relevada	5 0632

**CANTERA**

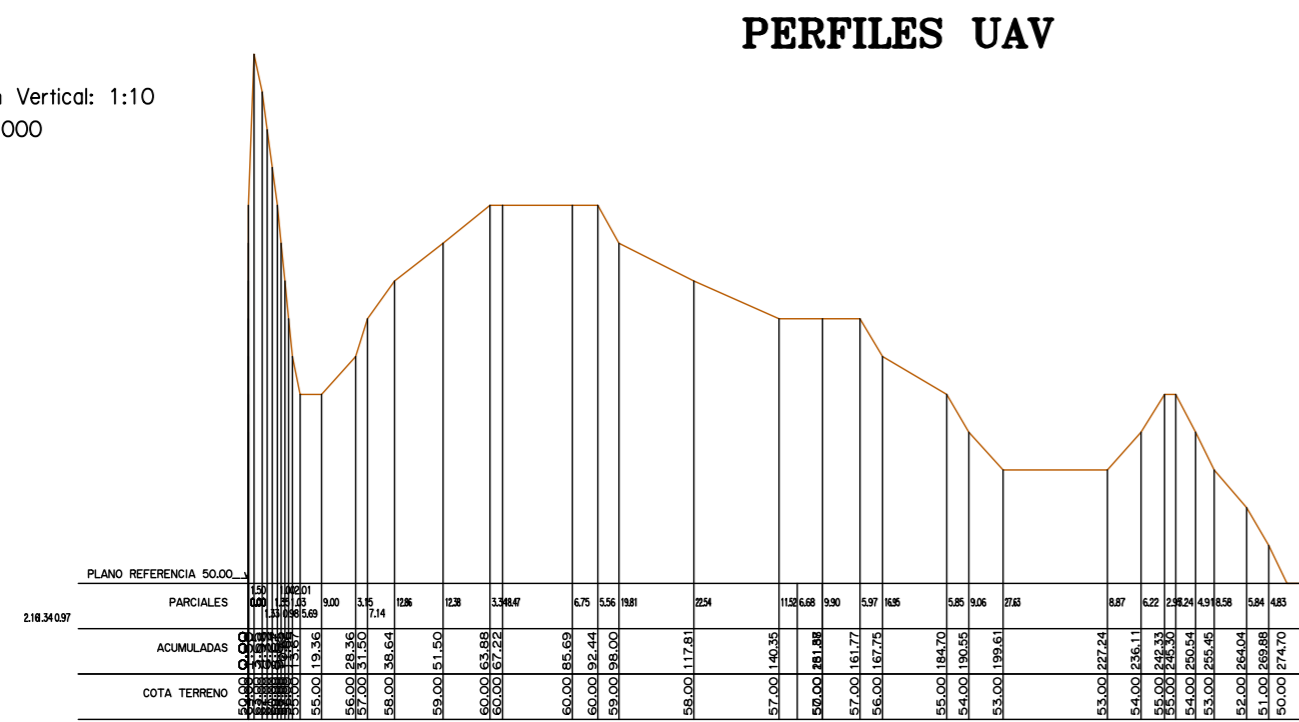
**"CAÑADA GRANDE SRL"**

Sebastian Gordienko  
 Martin Wainstein  
 Tutor: Luis Calderón



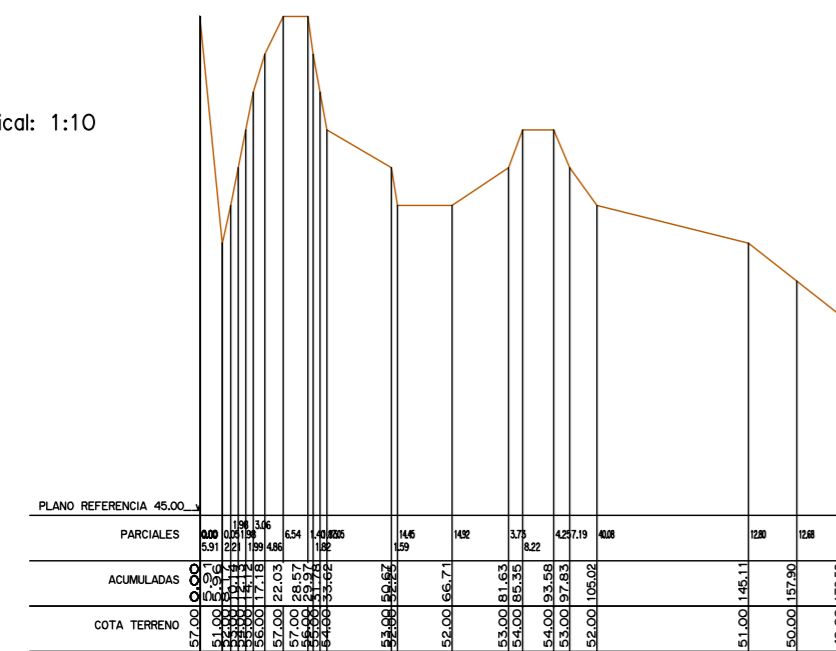
PERFIL A

Exageracion Vertical: 1:10  
Escala: 1:1000  
AB



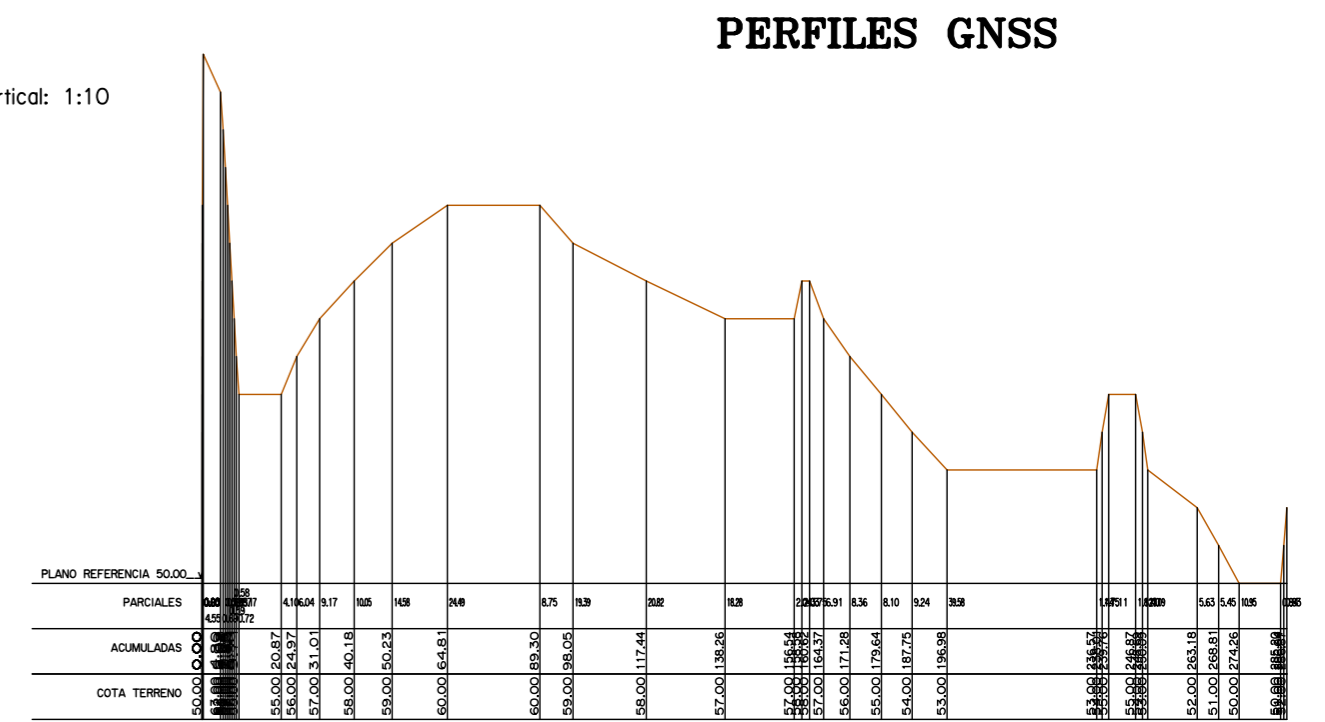
PERFIL B

Exageracion Vertical: 1:10  
Escala: 1:1000  
AB



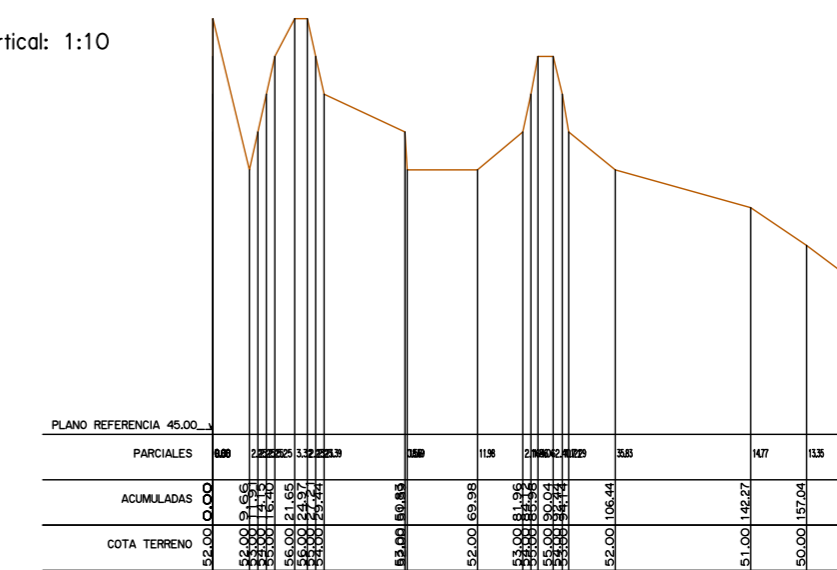
PERFIL A

Exageracion Vertical: 1:10  
Escala: 1:1000  
AB

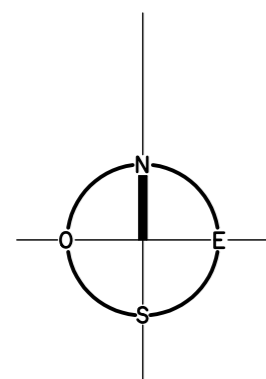


PERFIL B

Exageracion Vertical: 1:10  
Escala: 1:1000  
AB




**UBIACION DE PERFILES  
IMAGEN UAV**



ESCALA 1:2000



<b>RELEVAMIENTO PLANIALTIMETRICO</b>				Escala	1:2000	
<b>PADRONES</b>	54871; 55430 y 6562	<b>AREA TOTAL</b>	Hás	m <sup>2</sup>	Fecha	Abril de 2017
Sección Catastral	7	Relevada	5	0632		
Lamina Catastral	J-28-D				SEBASTIAN GORDIENKO - MARTIN WAINSTEIN	
Cuadrícula	B3				TUTOR: LUIS CALDERON	
Departamento	Canelones	<b>CANTERA</b>	CAÑADA GRANDE SRL			



## Informe de calidad para procesamiento con 20 puntos de apoyo

### Quality Report

Generated with Pix4Dmapper Pro version 3.2.7 Preview

 **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	cantera proyecto 20
Processed	2017-05-02 14:52:58
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_0.0_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.51 cm / 0.59 in
Area Covered	0.1486 km <sup>2</sup> / 14.86 ha / 0.0574 sq. mi. / 36.7388 acres

### Quality Check

 <b>Images</b>	median of 81751 keypoints per image	
 <b>Dataset</b>	390 out of 390 images calibrated (100%), all images enabled	
 <b>Camera Optimization</b>	52.9% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 <b>Matching</b>	median of 24724.1 matches per calibrated image	
 <b>Georeferencing</b>	yes, 20 GCPs (20 3D), mean RMS error = 0.016 m	

## Preview

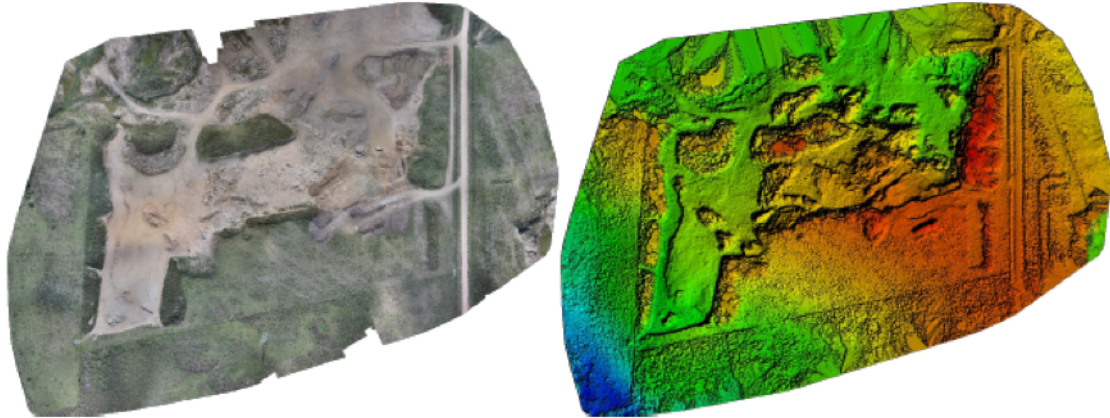


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

## Calibration Details

Number of Calibrated Images	390 out of 390
Number of Geolocated Images	390 out of 390

## Initial Image Positions

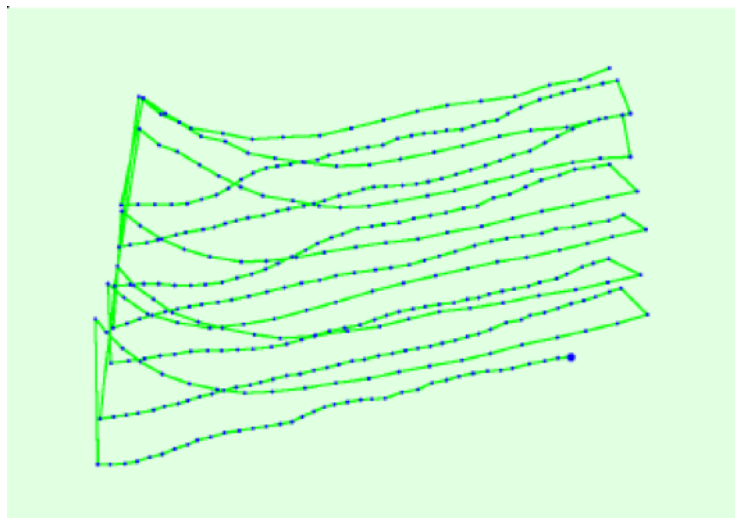
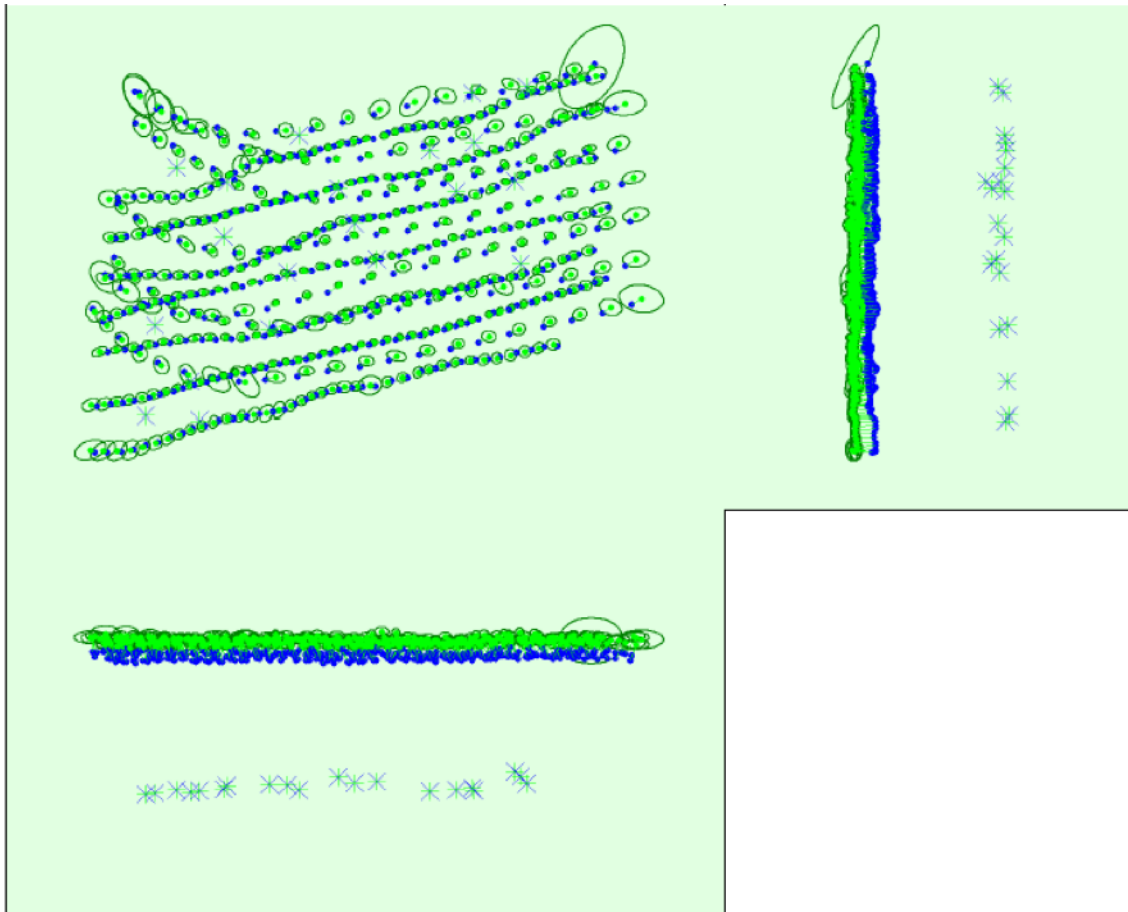


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

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



Uncertainty ellipses 50x 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.

### Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.101	0.086	0.074	0.042	0.050	0.012
Sigma	0.047	0.049	0.018	0.022	0.027	0.012

## Overlap

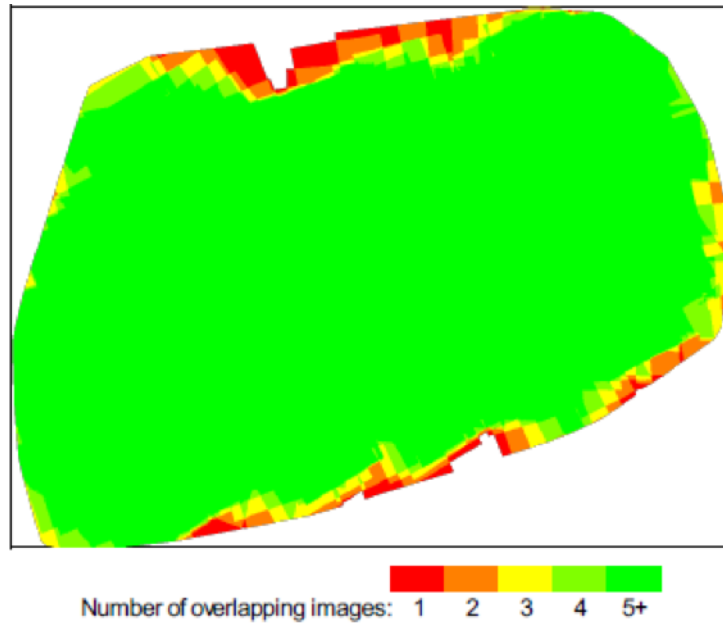


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint 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	9613475
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3517151
Mean Reprojection Error [pixels]	0.257

## Internal Camera Parameters

ILCE-6000\_0.0\_6000x4000 (RGB). Sensor Dimensions: 36.000 [mm] x 24.000 [mm]

EXIF ID: ILCE-6000\_0.0\_6000x4000



	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	5000.000 [pixel] 30.000 [mm]	3000.000 [pixel] 18.000 [mm]	2000.000 [pixel] 12.000 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	7645.124 [pixel] 45.871 [mm]	2995.041 [pixel] 17.970 [mm]	1980.716 [pixel] 11.884 [mm]	-0.143	0.313	-0.047	0.000	0.000
Uncertainties (Sigma)	4.480 [pixel] 0.027 [mm]	1.091 [pixel] 0.007 [mm]	0.980 [pixel] 0.006 [mm]	0.001	0.012	0.039	0.000	0.000

	<p>The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.</p>
--	--

## 2D Keypoints Table

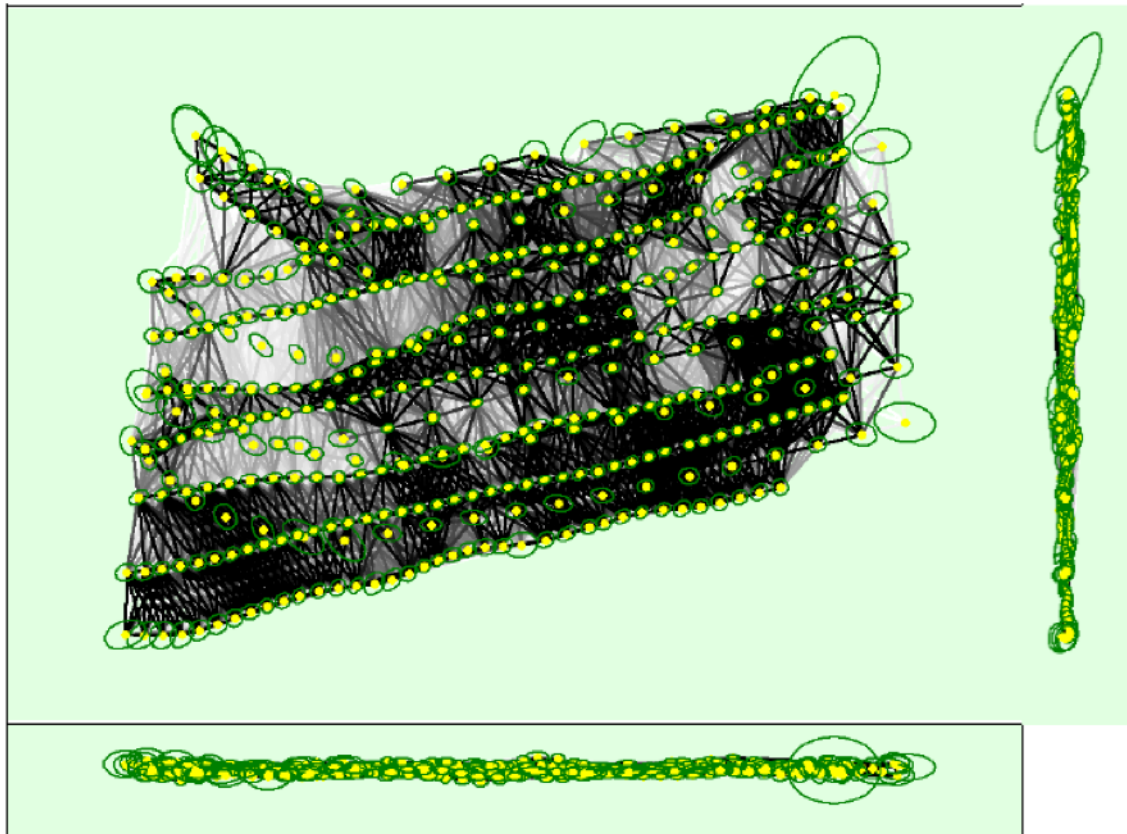
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	81751	24724
Min	30376	1435
Max	92322	50585
Mean	76090	24650

## 3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	2388905
In 3 Images	564765
In 4 Images	238460
In 5 Images	125762
In 6 Images	72003
In 7 Images	44297
In 8 Images	28449
In 9 Images	18493
In 10 Images	12331
In 11 Images	8450
In 12 Images	5416
In 13 Images	3660
In 14 Images	2468
In 15 Images	1632
In 16 Images	981
In 17 Images	607
In 18 Images	300
In 19 Images	129
In 20 Images	39
In 21 Images	4



## 2D Keypoint Matches



Uncertainty ellipses 50x magnified



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	0.104	0.088	0.053	0.050	0.064	0.017
Sigma	0.044	0.048	0.028	0.024	0.028	0.012



## Geolocation Details

### Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
002 (3D)	0.020/0.020	0.013	0.023	-0.014	1.126	18 / 18
003 (3D)	0.020/0.020	0.006	-0.009	-0.001	1.617	24 / 24
004 (3D)	0.020/0.020	-0.027	0.006	-0.015	1.043	18 / 18
005 (3D)	0.020/0.020	-0.026	0.018	0.029	0.501	9 / 9
006 (3D)	0.020/0.020	-0.019	0.007	-0.010	1.124	15 / 15
007 (3D)	0.020/0.020	-0.007	-0.001	-0.013	0.866	16 / 16
008 (3D)	0.020/0.020	-0.004	-0.057	0.019	0.805	21 / 21
011 (3D)	0.020/0.020	0.004	-0.036	0.005	0.788	22 / 22
012 (3D)	0.020/0.020	0.007	-0.009	0.014	0.745	23 / 23
014 (3D)	0.020/0.020	0.006	-0.008	0.008	1.306	19 / 19
015 (3D)	0.020/0.020	-0.004	-0.011	-0.003	0.811	27 / 27
017 (3D)	0.020/0.020	0.002	0.003	-0.013	1.180	18 / 18
020 (3D)	0.020/0.020	0.000	-0.019	-0.019	1.136	27 / 27
021 (3D)	0.020/0.020	0.031	-0.007	0.018	1.293	21 / 21
022 (3D)	0.020/0.020	0.007	0.004	-0.003	0.565	19 / 19
023 (3D)	0.020/0.020	-0.008	0.001	0.008	0.663	18 / 18
024 (3D)	0.020/0.020	0.010	0.017	0.020	0.647	11 / 11
025 (3D)	0.020/0.020	0.004	0.023	-0.006	0.907	18 / 18
026 (3D)	0.020/0.020	0.003	0.036	0.018	0.955	11 / 11
029 (3D)	0.020/0.020	0.008	0.022	-0.030	1.282	21 / 21
<b>Mean [m]</b>		0.000290	0.000161	0.000582		
<b>Sigma [m]</b>		0.013029	0.020929	0.015307		
<b>RMS Error [m]</b>		0.013032	0.020930	0.015318		

0 out of 9 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
001	0.0200/0.0200	0.0040	0.0200	0.0258	0.8861	20 / 20
009	0.0200/0.0200	-0.0045	-0.0484	0.0518	1.5317	18 / 18
010	0.0200/0.0200	0.0052	-0.0299	0.0345	1.0179	17 / 17
013	0.0200/0.0200	0.0062	-0.0111	0.0054	1.0248	21 / 21
016	0.0200/0.0200	-0.0100	-0.0485	0.0347	1.5224	17 / 17
018	0.0200/0.0200	0.0273	-0.0009	-0.0117	1.0138	27 / 27
019	0.0200/0.0200	0.0170	-0.0227	-0.0142	1.3748	24 / 24
027	0.0200/0.0200	0.0215	0.0208	0.0151	0.9846	12 / 12
028	0.0200/0.0200	-0.0075	0.0359	-0.0072	1.0652	23 / 23
<b>Mean [m]</b>		0.006574	-0.009416	0.014905		
<b>Sigma [m]</b>		0.012310	0.028976	0.022070		
<b>RMS Error [m]</b>		0.013955	0.030468	0.026632		

Localization 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[%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	5.90	0.00	0.00
-9.00	-6.00	15.64	0.00	0.00
-6.00	-3.00	10.77	15.64	4.87
-3.00	0.00	1.28	21.03	41.03
0.00	3.00	21.79	58.97	52.05
3.00	6.00	43.59	4.36	2.05
6.00	9.00	1.03	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
<b>Mean [m]</b>		1.268290	-0.257812	-11.591334
<b>Sigma [m]</b>		5.134172	2.128733	1.488947
<b>RMS Error [m]</b>		5.288504	2.144288	11.686573

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]	1.268290	-0.257812	-11.591334

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]	66.15	99.49	100.00
[-2.00, 2.00]	97.95	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
<b>Mean of Geolocation Accuracy [m]</b>	5.000000	5.000000	10.000000
<b>Sigma of Geolocation Accuracy [m]</b>	0.000000	0.000000	0.000000

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

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	11.472
Phi	10.110
Kappa	140.307

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) i7-5820K CPU @ 3.30GHz RAM: 32GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 970 (Driver: 21.21.13.7270)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

### Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS84 (egm2008)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS84 / UTMzone 21S (egm2008)
Output Coordinate System	WGS84 / UTMzone 21S (egm2008)

### Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Alternative Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes Bundle Adjustment: Classic

## 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
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Densification	01h:43m:12s
Time for 3D Textured Mesh Generation	27m:19s



## Results

Number of Generated Tiles	3
Number of 3D Densified Points	55640629
Average Density (per m <sup>3</sup> )	578.89

## DSM, Ortomosaico and Index Details

### Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (1.52 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: no
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	38m:23s
Time for Orthomosaic Generation	01h:35m:25s



## Algoritmos

### Cota de referencia para volumen igual a 40000 m<sup>3</sup>

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# Importar modulo
import arcpy

def sign(x):
    if x > 0:
        return 1.
    elif x < 0:
        return -1.
    elif x == 0:
        return 0.
    else:
        return x

def NuevaCota(pListaCota, pListaDif):
    vCantidad = len(pListaCota)
    if vCantidad == 1:
        return pListaCota[0] + 10
    else:
        vUltimaCota = pListaCota[len(pListaCota)-1]
        vUltimaDif = pListaDif[len(pListaDif)-1]
        for auxPos in range(len(pListaCota)-1, -1, -1):
            auxCota = pListaCota[auxPos]
            auxDif = pListaDif[auxPos]
            if sign(vUltimaDif) != sign(auxDif):
                return (vUltimaCota+auxCota)*0.5

# Variables:
rasMDT = ".\Cantera.gdb\mdtLAS05"

# Proceso
vDif = 500000
vListaCota = []
vListaDif = []
vCota = 48

while abs(vDif) > 10:
    # Calculo el volumen por debajo
    vSall = arcpy.SurfaceVolume_3d(rasMDT, "", "BELOW", vCota, "1", "0")
    vPartes1 = vSall.getMessages().split('Volume=')
    vValorArriba = float(vPartes1[1].split('.')[0])
    # La diferencia de volumen
    vDif = (vValorArriba - 40000)
    # Guardo en las listas
    vListaCota.append(vCota)
    vListaDif.append(vDif)
    # Renglon
    vRenglon = str(vCota) + ";" + str(vDif)
    print vRenglon
    # Siguiente cota
    vCota = NuevaCota(vListaCota, vListaDif)

vCota = round(vCota, 3)
print "Resultado: " + str(vCota) + "m"
```

---



## Cota de referencia para volumen de terraplén igual al de desmonte

```
# -*- coding: utf-8 -*-  
  
# Importar modulo  
import arcpy  
  
def sign(x):  
    if x > 0:  
        return 1.  
    elif x < 0:  
        return -1.  
    elif x == 0:  
        return 0.  
    else:  
        return x  
  
def NuevaCota(pListaCota, pListaDif):  
    vCantidad = len(pListaCota)  
    if vCantidad == 1:  
        return pListaCota[0] + 6  
    else:  
        vUltimaCota = pListaCota[len(pListaCota)-1]  
        vUltimaDif = pListaDif[len(pListaDif)-1]  
        for auxPos in range(len(pListaCota)-1, -1, -1):  
            auxCota = pListaCota[auxPos]  
            auxDif = pListaDif[auxPos]  
            if sign(vUltimaDif) != sign(auxDif):  
                return (vUltimaCota+auxCota)*0.5  
  
# Variables:  
rasMDT = ".\Cantera.gdb\mdtGNSS"  
  
# Proceso  
vDif = 500000  
vListaCota = []  
vListaDif = []  
vCota = 50  
  
while abs(vDif) > 10:  
    # Calculo el volumen por debajo  
    vSall = arcpy.SurfaceVolume_3d(rasMDT, "", "BELOW", vCota, "1", "0")  
    vPartes1 = vSall.getMessages().split('Volume=')  
    vValorArriba = float(vPartes1[1].split('.')[0])  
    # Calculo el volumen por arriba  
    vSall = arcpy.SurfaceVolume_3d(rasMDT, "", "ABOVE", vCota, "1", "0")  
    vPartes1 = vSall.getMessages().split('Volume=')  
    vValorAbajo = float(vPartes1[1].split('.')[0])  
    # La diferencia de volumen  
    vDif = (vValorAbajo - vValorArriba)  
    # Guardo en las listas  
    vListaCota.append(vCota)  
    vListaDif.append(vDif)  
    # Renglon  
    vRenglon = str(vCota) + ";" + str(vDif) + '\n'  
    print vRenglon  
    # Siguiete cota  
    vCota = NuevaCota(vListaCota, vListaDif)  
  
vCota = round(vCota, 3)  
print "Resultado: " + str(vCota) + "m"
```

---



## BIBLIOGRAFÍA

Ariza, F. J.; García, J. L. (2009-2010). *Evaluación de las componentes de la calidad de la información geográfica*. Universidad de Jaén, España.

Blanco, D.; Yelicich, R. (s.f.). *Estudio previo para un relevamiento planialtimétrico*. Departamento de Geodesia, Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, UdelaR.

C-Astral Aerospace Ltd. (21 de julio de 2015). *C-Astral GeoPilot User Manual v1.6*. Ajdovscina, Eslovenia.

C-Astral Aerospace Ltd. (19 de agosto de 2014). *UAS Bramor User Manual v1.406*. Ajdovscina, Eslovenia.

Canteras Montevideo S.A. (s.f.). [Información general de la empresa]. Recuperado de <http://www.canterasmontevideo.com>. Consulta: 20 de setiembre de 2016.

Cañada Grande S.R.L. (julio de 2015). *Informe de Desempeño Ambiental (2015)*. Empalme Olmos, Canelones, Uruguay.

Domínguez, F. (1986). *Topografía General y Aplicada*. Editorial Dossat, Madrid, España.

Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos digitales del terreno: Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales*. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>

García Balboa, J. L.; Reinoso Gordo, J. F.; Ruiz Armenteros, A. M. (2011-2013). *Metrología y calibración de equipos en Información Geográfica*. Universidad de Jaén, España.

*Guía para la elaboración del trabajo de grado*. (s.f.). Programa de Periodismo y Opinión Pública, Escuela de Ciencias Humanas, Universidad del Rosario. Recuperado de <http://www.urosario.edu.co>





Huerta, E.; Mangiaterra, A.; Noguera, G. (2005). *GPS: Posicionamiento satelital*. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

Kapern. [Sistema Trimble R8 GNSS]. Recuperado de [http://www.kpn.com.uy/PDFs/Hoja de datos TrimbleR8GNSS.pdf](http://www.kpn.com.uy/PDFs/Hoja_de_datos_TrimbleR8GNSS.pdf). Consulta: 19 de mayo de 2017

Ley N° 15242 – Código de Minería. Diario Oficial de la República Oriental del Uruguay, Montevideo, Uruguay, 8 de enero de 1982.

Ministerio de Educación – Ecuador. (2013). *Guía para la implementación del Proyecto de Grado en instituciones educativas que ofertan Bachillerato Técnico*. Recuperado de <http://educacion.gob.ec>

Norma ISO 17123-8:2007. Setiembre de 2007.

Organización Iberoamericana de Seguridad Social. *Prevención de riesgos en canteras*. Recuperado de <http://www.oiss.org/estrategia/Prevencion-de-riesgos-en-canteras.html>. Consulta: 19 de julio de 2017

Pampinella, V.; Pérez, M. (2014). *Control posicional de un relevamiento fotográfico con UAV*. Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Pérez Álvarez, J. A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría III*. Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida.

Pix4D. [Pix4D Support]. Recuperado de <https://support.pix4d.com>. Consulta: mayo / junio de 2017.

Resolución 291/014 de DINACIA. Diario Oficial de la República Oriental del Uruguay, Montevideo, Uruguay, 1° de setiembre de 2014.

Software Tacuabé. (s.f.). *TopoStudio. Software para Agrimensura y Topografía*. Manual del usuario – Versión 11.04.16. Montevideo, Uruguay.