



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Aplicación del uso de RPA'S (drones) en la explotación de canteras y explotaciones a cielo abierto

Trabajo realizado por:
Fernando Pérez Cruz

Dirigido:
Javier Sánchez Espeso
Ignacio García Utrilla

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, septiembre de 2019

TRABAJO FIN DE MASTER

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OPORTUNIDAD DE PROYECTO.....	7
3. NORMATIVA.....	8
4. ESTADO DEL ARTE.....	9
4.1. METODOLOGÍAS USADAS ACTUALMENTE.....	9
4.1.1. Métodos topográficos clásicos.....	9
4.1.2. Laser escáner.....	10
4.1.3. Fotogrametría.....	11
4.1.4. GPS – método cinemático.....	13
4.2. PARTICULARIDADES DE LEVANTAMIENTOS EN CANTERAS.....	14
4.3. TECNOLOGÍA EN EL MERCADO.....	14
4.4. RETOS Y OPORTUNIDADES.....	16
5. METODOLOGÍA.....	17
5.1. LOCALIZACIÓN.....	17
5.2. CLIMATOLOGÍA.....	19
5.3. TRABAJOS PREVIOS – PLANIFICACIÓN.....	20
5.4. TOMA DE DATOS.....	24
5.5. FLUJO DE TRABAJO.....	27
5.6. PROCESADO.....	28
6. MATERIAL UTILIZADO.....	37
6.1. DIANAS.....	37
6.2. GPS.....	38
6.3. RPA'S.....	39
7. RESULTADOS.....	40
7.1. ORIENTACIÓN ABSOLUTA DE LOS MODELOS.....	40
7.2. NUBE DE PUNTOS.....	55
7.3. PERFILES.....	65
7.4. CONCLUSIONES.....	75
8. COSTES.....	78
8.1. TOPOGRAFÍA CLÁSICA.....	78
8.1.1. METODOLOGÍA CLÁSICA.....	78
8.1.2. GPS.....	79
8.2. FOTOGRAMETRÍA CLÁSICA.....	79
8.3. LEVANTAMIENTO CON RPA'S O DRONES.....	80

9. BIBLIOGRAFÍA	81
10. ANEJO: PLANOS	82

Tabla de imágenes

Ilustración 1 - Estación total.....	10
Ilustración 2 - Laser escáner.....	11
Ilustración 3 – Ortofoto resultado de la cantera.....	12
Ilustración 4 - Equipo GPS	13
Ilustración 5 - Localización 1	18
Ilustración 6 - Localización 2	18
Ilustración 7 – Distribución inicial	20
Ilustración 8 - Dianas puntos de apoyo.....	21
Ilustración 9 - Dianas puntos de control	21
Ilustración 10 - Visor GNSS estación Torrelavega	24
Ilustración 11 - Nube de puntos.....	26
Ilustración 12 - Trayectoria C1	29
Ilustración 13 - Trayectoria C2	30
Ilustración 14 - Trayectoria Ob1.....	31
Ilustración 15 - Fase1 Exp1.....	32
Ilustración 16 - Fase 1 Exp2.....	33
Ilustración 17 - Fase1 Exp3.....	33
Ilustración 18 - Fase 1 Total	34
Ilustración 19 - Exp1	35
Ilustración 20 - Exp2.....	36
Ilustración 21 - Total.....	36
Ilustración 22 - Diana apoyo.....	38
Ilustración 23 - Diana control	38
Ilustración 24 - Resultados Pix4D 1	40
Ilustración 25 - Resultados Pix4D 2	41
Ilustración 26 - Exp1C1.....	45
Ilustración 27 - Exp1C2.....	45
Ilustración 28- Exp1C1C2.....	46
Ilustración 29 - ExpC1C2OB1.....	47
Ilustración 30 - Exp2C1.....	48
Ilustración 31 - Exp2C2.....	49
Ilustración 32 - Exp2C1C2.....	50
Ilustración 33 – Exp2C1C2OB1	51
Ilustración 34 - TotalC1	51
Ilustración 35 - TotalC2	52
Ilustración 36 -TotalC1C2	53
Ilustración 37 - TotalC1C2OB1	53
Ilustración 38 - Nube de puntos C1.....	55
Ilustración 39 -Detalle 1 Nube de puntos C1	56
Ilustración 40 - Detalle 2 Nube de puntos C1	56
Ilustración 41 - Nube de puntos C2.....	57
Ilustración 42 - Detalle 1 Nube de puntos C2	57
Ilustración 43 - Detalle 2 Nube de puntos C2	58
Ilustración 44 - Nube de puntos C1C2.....	59
Ilustración 45 - Detalle Nube de puntos C1C2	60
Ilustración 46 - Nube de puntos C1C2OB1.....	61
Ilustración 47 - Detalle oblicuo	62

Ilustración 48 - Contraste C1C2 Y C1C2OB1	63
Ilustración 49 - Contraste Exp1 y Total	64
Ilustración 50 - Contraste Exp2 y Total	65
Ilustración 51 - Bruto nube de puntos en AutoCAD	66
Ilustración 52 - Superficie TIN	67
Ilustración 53 - Superficie TIN + ortofoto.....	67
Ilustración 54 - Nube de puntos + TIN.....	68
Ilustración 55 - TIN + alineaciones	69
Ilustración 56 - Perfil 2 Editado	70
Ilustración 57 - Perfil 2 Original.....	71
Ilustración 58 - Detalle perfil.....	71
Ilustración 59 - Detalle perfiles (vuelos).....	73
Ilustración 60 - Detalle perfil vuelo C2	74
Ilustración 61 - MDT 1	76
Ilustración 62 - MDT 2	76
Ilustración 63 - MDT 3	77
Ilustración 64 - MDT 4	77

1. INTRODUCCIÓN

Los drones son unas de las invenciones más útiles e interesantes de los últimos tiempos, con una amplísima capacidad de aplicación en numerosos sectores. La capacidad de usos de un dron está en constante descubrimiento, cada día salen nuevas aplicaciones, mejoras de metodologías, nuevas formas de trabajo en nuevos sectores.

Hay una serie de procesos históricos y figuras relevantes que poco a poco han ido dando forma a lo que hoy conocemos como dron o UAV (unmanned aerial vehicle) dando cabida en el mundo a una tecnología potente a desarrollar en el sector civil.

La idea de un avión sin tripulante es antigua, se llevan utilizando durante muchas décadas, siendo originario su uso militar. Uno de los primeros usos de los que se tiene registro fue realizado por los austriacos en julio de 1849 después de que se pusieran en marcha alrededor de doscientos globos aerostáticos no tripulados montados con bombas en la ciudad de Venecia. Transcurridas dos décadas después de la Guerra Civil en EEUU, los globos aerostáticos se usaban para misiones de reconocimiento, dando paso años después a la creación de una serie de aeronaves a vapor, aviones sin piloto que fueron trasladados con éxito a lo largo del río Potomac, cerca de Washington DC.

Ahora bien, la práctica de la vigilancia aérea surgió con la Guerra Hispano-Americana de 1898, cuando los militares de EE.UU. equiparon una cámara a una cometa, dando lugar a una de las primeras fotografías de reconocimiento aéreo.

Durante la Primera Guerra Mundial, se hizo masiva la implantación de la vigilancia aérea. Los militares utilizaban estas cometas para obtener fotografías aéreas y seguir los movimientos del enemigo formando mapas de situación, un primer acercamiento al análisis del territorio, una referencia cartográfica en imágenes. Muchos de los avances tecnológicos como pudo ser el GPS en su momento, brindaron sus inicios en las manos de las fuerzas militares en exclusiva, para luego ir ofreciéndose al mercado de los ciudadanos. La evolución de los UAV por parte militar en aspectos de combate se colapsó durante décadas debido a la poca necesidad que había de ellos como consecuencia del éxito y los desarrollos en el campo de los misiles.

No obstante, las aeronaves no tripuladas o drones, artefactos que se llevan usando por los ejércitos de los países desde el siglo XIX, tanto para estrategia e información como para el puro enfrentamiento bélico y que tras tanta evolución tecnológica, hoy en día se ha desplazado en un uso cotidiano para un ciudadano. Afortunadamente la tecnología ha seguido su propia influencia evolutiva y a pesar de que la guerra fue el motivo de su éxito y desarrollo, no es el único uso que podemos dar a los drones ya que existen un sin fin de buenas y positivas aplicaciones para investigación, conservación, creación audiovisual, salvamento, ingeniería, rescate y búsqueda de víctimas entre otras muchas.

Dentro del ámbito de la ingeniería, sus inicios fueron iniciados en la vigilancia, como puede ser inspecciones visuales de estructuras, taludes peligrosos para ver a pie, revisión de tramos de carretera. En la ingeniería civil, la introducción de esta herramienta de trabajo empezó aportando simplemente información visual, toma de imágenes y videos sobre las zonas de trabajos, como una herramienta más, para ir desarrollándose y potenciándose sus capacidades para aportar más metodologías y ayudas en los trabajos de campo.

La capacidad de los RPA'S de portar cámaras ha hecho que la ingeniería se vuelque en el desarrollo de este producto con fines topográficos, ya que podría llegar a tener las ventajas de un vuelo fotogramétrico en una escala totalmente manejable y portable para los operadores. Las primeras pruebas realizadas sobre levantamientos topográficos han sido resueltas en áreas sencillas, creando modelos de digitales del terreno muy buenos, el siguiente paso en la escala evolutiva es enfrentarse a trabajos más complicados donde el relieve sea accidentado, haciendo endurecer las labores de medición, como puede ser una cantera.

Es por tanto, que esta nueva tecnología nos brinda la oportunidad del uso de otras metodologías de trabajo, como es el caso de este proyecto, en el que usaremos la modelización digital del terreno.

El termino digital terrain model tiene aparentemente su origen en el laboratorio de fotogrametría del instituto de Massachusetts en la década de los años 50. En el trabajo pionero de Miller y Laflamme en 1958 se establecen ya los primeros principios del uso de los modelos digitales para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares. La definición del MDT que se mencionan en sus trabajos es una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas (X,Y,Z) conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario. Puede observarse el uso del término MDT como sinónimo de MDE, así como el escaso énfasis en el aspecto de la georreferenciación.

El objeto de su trabajo fue acelerar el diseño de carreteras mediante el tratamiento digital de datos del terreno adquiridos por fotogrametría, planteándose una serie de algoritmos para la obtención de pendientes, áreas, etc. El problema del número de datos se planteó de forma crítica, dada la escasa capacidad de almacenamiento de los ordenadores en esa época y se propuso el uso de ecuaciones polinómicas para almacenar segmentos de los perfiles topográficos. Esta técnica no ha sido abandonada en la actualidad, aunque se han propuesto versiones algo más sofisticadas (Walton 1989)

Los programas de uso más general para el tratamiento MDT tuvieron que esperar algunos años más y habitualmente, surgieron en un contexto SIG que incorporaban la información topográfica para el manejo de cartografía digital en términos más generales. Probablemente el trabajo de mayor importancia fue desarrollado por el Havard Laboraty for Computer Graphics and Spatial Analiysis que en 1967 orientó el SYMAP, conjunto de programas de manejo de cartografía digital que incorporaba entre otros, logaritmos de interpolación que permitían la generación de mapas de isolíneas a partir de puntos de altitud distribuidos irregularmente. SYMAP constituyó una de las primeras demostraciones de la posibilidad de manejo de la información espacial por medios informáticos.

Posteriormente surgieron programas como el SYMVU, destinado a generar simulaciones 3D de los datos precedente SYMAP o el GRID, que manejaba información en formato matricial y en general, un número considerable de aplicaciones con bases muy diferente.

Puede observarse el uso del término digital elevation model, DEM" eliminando la ambigüedad del digital terrain model DTM" de los trabajos previos. Los programas de manejo de modelos digitales están en pleno desarrollo intentando aun resolver satisfactoriamente problemas básicos. Entre ellos puede citarse la estructuración idónea de los datos, buscando un compromiso entre el tamaño y la facilidad de operación, la

compatibilización de diferentes estructuras entre sí, la búsqueda de algoritmos eficientes para generar nueva información y el intercambio de esta entre sistemas diferentes.

En la actualidad las técnicas destinadas a la creación de MDT por fotogrametría están enfocadas en herramientas de visión por computadora como es SFM Y MVS, basándose en el reconocimiento de puntos significativos de las imágenes tomadas previamente, para obtener puntos homólogos y una vez reconocidos los algoritmos generar una imagen tridimensional.

2. OPORTUNIDAD DE PROYECTO

Una vez contemplada la historia y la evolución de los drones o RPA'S (Remotely Piloted Aircraft), solo queda por descubrir y potenciar todas las posibilidades de actuación en la vida diaria, trabajo, investigación, etc., de estos dispositivos.

La ingeniería civil puede obtener unos grandísimos avances con ayuda de esta tecnología, que como hemos podido ver no es completamente nueva, pero si emergente en su utilización fuera del ámbito militar. El campo de trabajo en ingeniería civil suele ser de gran extensión, más si cabe, si nos especializamos en el estudio de la topografía.

La ejecución de un estudio topográfico para una modelización de elevaciones del terreno se basaba en un equipo de personas, que realizaban una toma de datos de forma puntual, confeccionando una poligonal de puntos cuyos parámetros se determinan uno a uno.

Sin embargo, se podría pensar en hacerlo de una forma masiva, una obtención de datos de toda la superficie, con la capacidad de trasladar el equipo de forma remota a los lugares que se desea, todo ello controlado por tan solo un operario y dependiendo de la tipología de equipo a usar, un observador. Los beneficios que podrían sacar partido de esta mejora:

- Mayor accesibilidad
- Menor exposición de riesgos
- Nuevos puntos de vista y métodos de cálculo
- Una nueva metodología de contraste de información.

Esta tecnología no tiene por qué dejar en un segundo plano o descatalogar la ya más que reconocida y precisa metodología actual, debería de verse como un apoyo, un complemento de mejora o una herramienta de análisis para contrastar datos y resultados. Siendo a su vez, un camino en la búsqueda de la optimización de la modelización del terreno, queriendo ser la resolución puntera para los años venideros, conforme los avances tecnológicos mejoren las presentes propuestas de metodologías, con mejores especificaciones técnicas y algoritmos.

3. NORMATIVA

El pasado 29 de diciembre de 2017 se publicaba en el Boletín Oficial del Estado (BOE) el nuevo marco normativo que regulará la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto en España. Esta nueva normativa entraba en vigor al día siguiente de ser publicada en el BOE, el 30 de diciembre de 2017 (Real Decreto Real Decreto 1036/2017).

Se trata de una nueva normativa que introduce nuevos escenarios en los que se hasta la fecha no era posible realizar: vuelos en ciudad, vuelos nocturnos, vuelos en espacio aéreo controlado, vuelos más allá del alcance visual para aeronaves de más de 2 kg y vuelos de alcance visual aumentado.

La Agencia Estatal de Seguridad Aérea, también conocida por el acrónimo AESA, es una agencia estatal encargada de la seguridad de la aviación civil en el ámbito territorial de España. Su fundación data del año 2008, a raíz de la promulgación del Real Decreto 184/2008.

La normativa actual de drones solamente obliga a sacarse la licencia de piloto a las personas que vayan a desempeñar una actividad profesional con drones profesionales. Estas personas tendrán que acreditar unos conocimientos teóricos y prácticos, además de un certificado médico de clase LAPL (para drones de < 25KG) o de Clase II (para drones >25KG). Para poder ofrecer servicios profesionales con drones debes de cumplir los siguientes requisitos:

- Estar dado de alta como operador en la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA).
- Tener un seguro de responsabilidad civil.
- Tener el título de piloto de drones.
- Tener certificado médico en vigor.

Los sobrevuelos en zonas urbanas y sobre aglomeración de personas deberán de cumplir los siguientes requisitos:

- La masa máxima al despegue de la aeronave no puede exceder de los 10 kg.
- La operación se debe de realizar dentro del alcance visual del piloto (VLOS).
- La zona a volar deberá de estar acordonada por la autoridad competente, o en otro caso, mantener una distancia horizontal mínima de 50 metros con edificios u otro tipo de estructuras además de mantener una distancia de 50 metros con personas ajenas a la operación.
- La aeronave deberá de tener instalado un sistema de limitación de energía del impacto (paracaídas, airbag...)
- Se deberá de contar con la autorización por parte de AESA a través de la realización de un estudio de seguridad aeronáutica.

Los vuelos nocturnos estarán permitidos, pero se requerirá de la autorización expresa de AESA a través de la presentación de un estudio de seguridad específico. Además, la aeronave deberá incorporar dispositivos que garanticen su visibilidad (luces, pintura...). La Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) dispondrá de hasta 6 meses para responder a la solicitud.

Los vuelos fuera del alcance visual del piloto (BVLOS) con aeronaves con MTOW>2 Kg estarán permitidos siempre y cuando la aeronave cuente con sistemas que permitan detectar y evitar a otros usuarios del espacio aéreo y sean aprobados por AESA. Además, la aeronave deberá de tener instalado un dispositivo de visión orientado hacia delante y se deberá de contar con la autorización por parte de AESA basada en un estudio aeronáutico de seguridad.

Los vuelos dentro del alcance visual aumentado (EVLOS) estarán permitidos a través de la figura de los observadores intermedios siempre y cuando se garantice en todo momento la visión directa de la aeronave. Además, los observadores intermedios deberán de estar en continua comunicación con el piloto a través de radio y deberán de acreditar, al menos, los conocimientos teóricos de un piloto remoto.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. METODOLOGÍAS USADAS ACTUALMENTE

La cubicación de una cantera abierta es una tarea necesaria a realizar de forma periódica, como mínimo una vez por año, para poder así hacer balance y analizar los volúmenes de materiales trabajados y la reserva de materiales que se tiene, ya sea en acopios o en material bruto.

Se trata de un proceso manual que involucra a un equipo de trabajo, dependiendo de la metodología a usar, de mayor o menor número de personas. Precisa un tiempo de trabajo previo a la medición de datos, de ajustes y puesta en marcha de los equipos de medidas.

Las principales metodologías usadas para un levantamiento topográfico en una cantera abierta hasta la actualidad son:

- Métodos topográficos clásicos.
- Laser escáner
- Fotogrametría
- GPS.

4.1.1. Métodos topográficos clásicos

En los métodos topográficos clásicos el uso de una herramienta como es la estación total otorga sobre el trabajo a realizar exactitud, como por ejemplo en la construcción de carreteras, viaductos, grandes edificaciones, canales de agua, etc.

En todas las citadas construcciones, como es lógico, la precisión es una necesidad en el correcto funcionamiento de la obra. Las dos funciones esenciales para las que se usaría la estación total son las siguientes:

- Levantamiento topográfico: Modelización de la realidad.
- Replanteo topográfico: Representación en la realidad de fenómenos existentes en el modelo de una obra



Ilustración 1 - Estación total

Su desarrollo exige:

- Materialización del sistema de referencia en base a la zona de trabajo
- Metodología a usar: Radiación
- Procesado de la información

4.1.2. Laser escáner

El láser escáner es un dispositivo de toma de datos masivos, nos reproduce una nube de puntos tridimensional, a partir de la medición de distancias y ángulos, mediante un rayo de luz láser.

Se podría decir que se asemeja a una estación topográfica sin prisma, que realiza abundantes observaciones sobre las áreas previamente seleccionadas. Como añadido, los últimos modelos de estas herramientas cuenta con la incorporación de cámaras fotográficas, que registran la información del rango visible, lo que aporta una información infinita del objeto.

A priori la idea de laser escáner es lo más cercano a la metodología de vuelos de dron en cuanto a la toma de datos en conjunto, automatización y producto final en forma de nube de puntos. Un posible inconveniente que presenta esta metodología es que va montado sobre un trípode en la mayoría de los casos, siendo su utilización más limitada en grandes superficies dado que su alcance máximo son 100 metros. En canteras muy amplias serían necesarios el uso de varios dispositivos y/o jornadas.



Ilustración 2 - Laser escáner

Su uso exige:

- Materialización del sistema de referencia, mediante la colocación de dianas para georreferenciar los escáneres.
- Revisión de los escaneados.
- Unión y limpieza
- Clasificación y procesado de las nubes de puntos.

4.1.3. Fotogrametría

La palabra fotogrametría significa la métrica de lo escrito con la luz, en esencia es la ciencia que utiliza la fotografía para hacer medidas. Su aplicación es extensiva a numerosas áreas del conocimiento de la ingeniería y fuera de ella. Se trata de una técnica cuyo objetivo es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera usando para ello medidas hechas sobre varias fotografías.

Una fotografía es una imagen permanente de un determinado objeto, lo que lleva a que esta metodología ofrezca una serie de ventajas:

- Se obtiene representaciones completas de los objetos, información objetiva y el registro es instantáneo
- Facilidad en la manipulación y conservación del material obtenido.
- Posibilidad de tratar objetos en movimientos y digitalizar los resultados.
- El proceso de toma de información no perturba el objeto a estudiar.
- Gran rendimiento cuando se trata de grandes extensiones de superficies.
- Único procedimiento por el que obtener ortofotos.

Hasta el día de hoy en el que el uso de drones aún no está implantado en la fotogrametría convencional los inconvenientes más comunes son:

- Coste asociado al uso de aviones para la toma de imágenes.
- Disponibilidad
- Obstaculización de la cobertura vegetal sobre la superficie.



Ilustración 3 – Ortofoto resultado de la cantera

Su uso supone:

- Planificación previa del vuelo y realización.
- Apoyo fotogramétrico
- Orientación y explotación de los modelos.

La fotogrametría es una técnica muy usada en ingeniería, pero en las canteras debido a su coste y plazos al ser superficies generalmente pequeñas no es la técnica apropiada para la resolución de estos trabajos.

4.1.4. GPS – método cinemático

El GPS es un sistema basado en satélites artificiales, el sistema GPS determina la posición de un objeto en planimetría con una gran precisión y rapidez. En el ámbito de la ingeniería la precisión a la que se puede alcanzar con esta metodología ronda los milímetros, usando metodologías de estático rápido con intervalos de observación suficientemente largos, hasta precisiones de centímetro en levantamientos.



Ilustración 4 - Equipo GPS

El uso de un sistema GPS frente a otras metodologías topográficas ofrece numerosas ventajas:

- No requiere visibilidad entre puntos de medición.
- Puede ser usado en cualquier franja horaria siempre y cuando no se produzca sombra en los satélites y sean visibles al menos cuatro.
- Es más sencilla de usar que una estación.
- Resultados de precisión geodésica.

Algunas de sus dependencias más notables son:

- Sólo es óptimo su uso en exteriores, necesita visibilidad con los satélites de forma constante, así como su geometría.
- Cerca de objetos altos como árboles o edificios, pueden llegar a bloquear la señal del GPS.
- Necesidad de dos equipos fase de GPS o existencia de una red activa en la zona de trabajo.

La técnica de levantamiento cinemático involucra un Móvil que se mueve y cuya posición puede ser calculada en relación con la Referencia.

En nuestro caso al existir la Red Geodésica Activa de estaciones GNSS de la comunidad de Cantabria, disponemos del posicionamiento en tiempo real de forma inmediata en nuestro receptor GPS.

4.2. PARTICULARIDADES DE LEVANTAMIENTOS EN CANTERAS

Las metodologías usadas hasta el momento brindan una información topográfica precisa, junto con una toma de datos parcialmente manual en algunas ocasiones.

Es preciso antes de comenzar las mediciones estacionar los equipos y asegurarse que su colocación es correcta en el rango de acción que se va a ejecutar. Esta labor conlleva un tiempo el cual conviene realizar de forma minuciosa, sin precipitaciones, puesto que el valor de los resultados recae en haberlo hecho correctamente. En el caso del uso de una metodología GPS, contar con el establecimiento de una red activa, agiliza notablemente estos trabajos previos.

Un levantamiento topográfico en una cantera implica el cese de la actividad de producción por un tiempo prolongado mientras se trabaja en el levantamiento topográfico, tanto en sus procesos previos de estacionamiento de equipo como una vez iniciada las mediciones.

Suponiendo el caso en el que sea razonable la elección de una metodología cuyo proceso sea propiamente manual o no automatizado, implica llevar consigo un equipo de trabajo, repercutiendo en que habrá un número de personas ajenas a la empresa transitando libremente por el lugar. Los movimientos de un grupo de personas ajenas a la empresa entre maquinaria pesada, incrementa la posibilidad de un accidente.

Por lo tanto, es habitual cesar las actividades de maquinaria pesada y de la planta de áridos, mientras se realiza el estudio.

Dadas estas circunstancias, gran parte de las canteras abiertas, esperan a fechas finales de año como las festividades, para realizar la cubicación de su materia prima, ya que no pueden permitirse más ocasiones a lo largo del año, en las que interrumpir por completo la actividad de la cantera para analizar los volúmenes de explotación, ya que para ellos esa inactividad son pérdidas no recuperables.

4.3. TECNOLOGÍA EN EL MERCADO

El mercado en un ápice de mejora de operatividad y productividad en la toma de datos reales de las superficies, busca conseguir una forma más rápida y más automatizada que las herramientas disponibles para la topografía actual. Por las capacidades de desarrollo que otorga, como la introducción de drones, se está apostando por el desarrollo de la fotogrametría en la topografía.

La escala de trabajo en fotogrametría aérea es muy grande, su uso es preferente en superficies muy amplias, debido al coste que conlleva el uso de esta técnica. En la ingeniería civil se han dado casos reales de uso fotogramétrico en situaciones de trabajo que abarcan canteras o pequeñas edificaciones, pero no es usual.

Desde que hace unos años los UAVs, o también denominados drones están siendo el paso evolutivo que unifica por un lado los trabajos aéreos donde el uso de un avión no sería recomendable y por otro lado haciendo más accesible la medición en datos donde un operario humano le sería muy costoso o peligroso.

Los drones están dando cabida a un espacio de trabajo que anteriormente era inaccesible o donde podrían ser optimizados sus tiempos y costos, demostrando su potencial en la toma de imágenes de alta calidad desde el aire, dando la capacidad de crear productos para cartografía y topografía. Los drones permiten capturar los datos correspondientes al relieve y composición del terreno de forma rápida y exhaustiva, permitiendo la cobertura de extensiones significativas en tiempos de trabajo mucho menores que los empleados por los medios convencionales, facilitando además la toma de datos en lugares que por su orografía o sus características serían difícilmente accesibles al operario humano.

Las ventajas que aporta los RPA'S como metodología en los levantamientos topográficos se podrían resumir en:

- Comodidad en la captura, para el operario ya no es necesario realizar puntos en acopios de material, ascendiendo a las cotas más altas, recorrer taludes para poder representarlo, mejorando también la seguridad en la integridad física de la persona.
- La eficiencia, es una toma de datos masiva, podemos conseguir millones de puntos a color, la superficie queda mejor representada consiguiendo mejores modelos MDT más representativos de la realidad.
- Nace la posibilidad de poder realizar un documento con una evolución histórica, y así poder comparar visualmente la cantidad de material existente.
- Mejora de tiempos, se consigue reducir el tiempo de procesado radicalmente, disminuyendo los costes. Por otro lado, esta metodología incrementa con creces el tiempo de edición en gabinete. El cómputo global de tiempo es favorable.

Sin embargo y a pesar de las ventajas de operación y productividad que los drones ofrecen frente a los medios convencionales de fotogrametría, los productos generados por estos presentan una desventaja significativa en lo que se refiere a la precisión y exactitud de sus resultados. Mientras que los medios convencionales permiten la captura de puntos sobre el terreno con una precisión que alcanza niveles de error centimétricos, con equipos al alcance de la mayoría de las empresas, los productos obtenidos por técnicas de fotogrametría aérea pueden presentar errores cercanos a los tres o cinco centímetros.

A pesar de esta diferencia en la exactitud de los resultados, hay factores a tener en cuenta, como considerar la diferencia en los niveles de exactitud que requieren según qué tipo de trabajos. Si bien hay obras civiles que precisan de una exactitud cercana al milímetro, son muchas las aplicaciones que toleran unos niveles de precisión considerablemente menores. Un ejemplo de ello sería el cubicaje de una cantera de millones de metros cúbicos excavados, en cuya medición un error del orden de centímetros sería prácticamente despreciable, frente a la medición de una superficie pequeña como una plaza, donde errores con el mismo valor son más acusados.

Para terminar otros aspectos a considerar que presentan los drones en los levantamientos topográficos son:

- Las distancias de vuelo están limitadas por normativa, siendo 500 metros para un vuelo BVLOS de drones con peso entre 2 a 25 kg, pero para masas inferiores a 2 kg debería siempre volar al alcance de tu vista. Este aspecto puede ser un gran inconveniente en canteras con grandes desniveles o de gran extensión que impida poder hacer un vuelo directo por todo el recinto.
- La altura máxima en el territorio español está limitada a 120 metros.
- Reducida duración de la batería, probablemente la desventaja más importante y el aspecto por el que gira toda la planificación de vuelo. Es el componente que más se está investigando en la actualidad para dotarle más tiempo de vuelo a la aeronave.

4.4. RETOS Y OPORTUNIDADES

Con los resultados y experiencias en la amplia variación de disciplinas donde han sido satisfactorios el uso de drones, esta nueva tecnología está en auge e implantándose en infinidad de nuevos sectores.

De tal manera no es difícil encontrar un software específico en el tratamiento de imágenes georreferenciadas tanto en planimetría como en altimetría. Los softwares necesarios para el post-proceso de imágenes, en su mayoría tienen un carácter privativo. Estos softwares no tienen un uso demasiado complejo dado que están enfocados en un flujo de trabajo rápido, con un volcado de datos para el desarrollo de la modelización y así obtener unos resultados con los que derivar en curvas de nivel, nube de puntos, clasificación de superficies, con lo que poder sacar un mayor partido a la información.

Con cada volcado de datos el volumen de imágenes y la cantidad de información que aportan cada una de estas imágenes, es un factor clave en el funcionamiento de los softwares, haciendo un cuello de botella en el flujo de trabajo, cuando comienza el procesado de imágenes.

La aportación del equipo aéreo debe ser profesional, con la incorporación de una cámara dotada de GPS que otorgará a las imágenes de geoposicionamiento, un soporte de calidad y estabilizadores tanto de vuelo como de cámara que permitan obtener la mejor calidad de imagen.

Entrando en un aspecto fotográfico el mayor número de megapíxeles ayudará a una mejor interpretación de los objetos por el incremento de tamaño de la imagen. La aportación de un sensor de cámara en torno a 18-25 megapíxeles es más que suficiente para obtener resultados de calidad. Por supuesto el objetivo deberá ser de una distancia focal cercana a los 50 mm, para así poder captar el mayor número de referencias que emparejar con cada fotografía. Lo que realmente será el punto de inflexión en los resultados de las imágenes, será el sensor de la cámara y su capacidad para equilibrar los cambios de luz que pueda resultar entre los diferentes vuelos de un solo día, por variaciones climatológicas.

Tradicionalmente en la fotogrametría aérea la dirección de la toma de fotos es fija cenital, esto provoca estados de sombras en zonas de gran verticalidad como son

acantilados o cortes en el terreno, ya que en la fotografía solo existe el área que se ve, no tiene en cuenta las formas que están tapadas por las ocultaciones. Sin embargo, con los drones además del estabilizador de imagen de tres ejes que suelen equipar, tienen un brazo rotativo que permite disponer la lente en la dirección que se desea. Esta capacidad de orientar la cámara paralela al suelo puede darnos imágenes de referencia en taludes o cortes verticales, lugares donde no habría información representativa por las ocultaciones.

Las capacidades que otorga un dispositivo teledirigido, que puede ser automatizado con diferentes trazadas de vuelos, aporta llegar donde antes no se podía, resolver las dificultades técnicas que impedían un trabajo más seguro y rápido.

Un reto ante el que nos encontramos es la mejora de los MDT en las zonas verticales, como son en nuestro proyecto los taludes. Para ello se quiere experimentar con una nueva técnica, realizando trayectorias libres del vuelo de la aeronave con la dirección del ángulo de la cámara inclinada. De esta forma se pretende analizar cómo se da la mejor situación para la creación de un MDT, con dos posibles metodologías, el uso individual de esta técnica de cámara inclinada sobre los taludes verticales más problemáticos o el uso combinado de fotogrametría clásica con cámaras cenitales junto con la toma de imágenes con cámara inclinada.

Además, determinaremos que capacidad tiene el uso de drones para la realización de levantamientos topográficos y creación de modelos digitales del terreno frente a la metodología usada hasta el momento.

5. METODOLOGÍA

5.1. LOCALIZACIÓN

Nuestro caso práctico es el de un levantamiento topográfico por medio de aeronaves por control remoto en una cantera abierta. La explotación minera por analizar es la cantera de Caranceja, de la empresa Hormisa, cuya localización está en Cantabria en el municipio que provee del mismo nombre a la propia cantera. El área de estudio aun siendo una cantera de dimensiones contenidas, es de una extensión grande para trabajos convencionales con dron, abarca alrededor de 60 hectáreas.

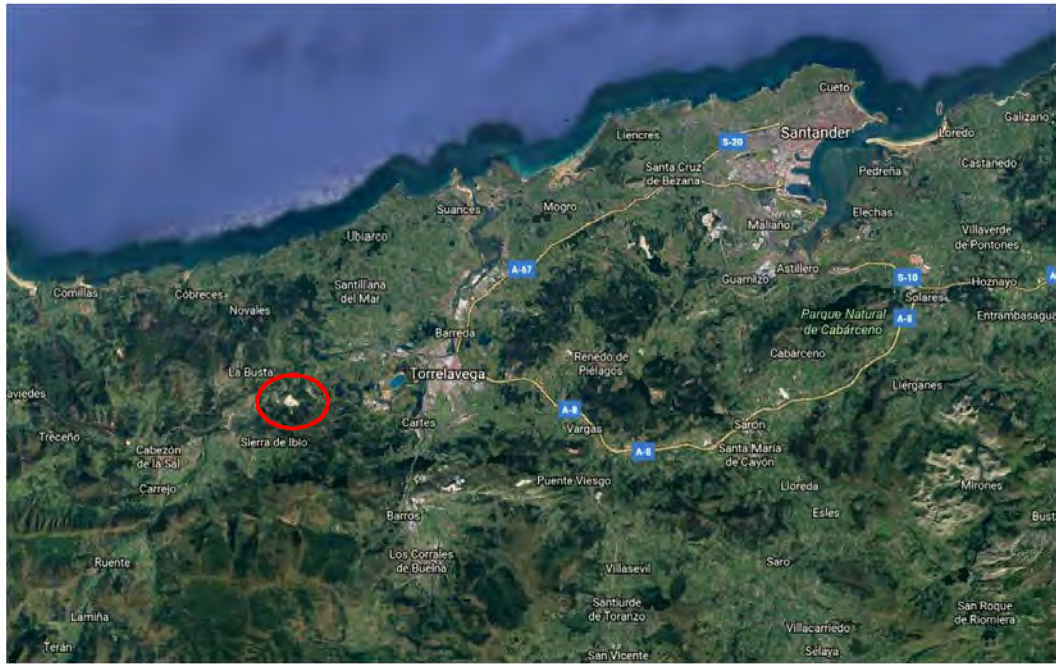


Ilustración 5 - Localización 1



Ilustración 6 - Localización 2

5.2. CLIMATOLOGÍA

La climatología en la comunidad de Cantabria es típicamente atlántica, templada y muy húmeda, las peores situaciones se dan cuando soplan los vientos del Oeste al Norte cargados de humedad debido a su origen marítimo. Estos, cuando se encuentran con la cordillera Cantábrica ascienden y se enfrían. De esta forma se originan nubes que se estancan contra la cordillera provocando lluvias más o menos persistentes.

Uno de los puntos clave a desempeñar en la planificación de una actividad ingenieril con la incorporación de tecnología de aeronaves no pilotadas en un entorno como es el de Cantabria, es la interpretación de los partes meteorológicos. Es fundamental la correcta lectura de los partes meteorológicos, tanto de lluvias como de rachas de vientos, puesto que esta tecnología con la que se trabaja es muy susceptible a estos aspectos y se restringen los vuelos si se sobrepasan ciertos parámetros.

Otro parámetro climatológico de gran importancia es el índice KP, siendo un índice geomagnético de tipo cuasi-logarítmico que indica la perturbación del campo geomagnético a nivel local, tomando como referencia la curva de variación diaria de un día en calma del observatorio geomagnético en el que se mide, durante intervalos de tres horas. Las tormentas geomagnéticas son perturbaciones del campo magnético de la Tierra, que duran desde varias horas hasta incluso algunos días.

A nivel de planificación en una escala de 0 (calma) a 9 (tormenta principal) cualquier valor por debajo de 3 o 4 generalmente es segura para volar. Es importante entender que este índice KP no es un pronóstico o un indicador de las condiciones actuales, se muestra siempre el valor de KP que se observó durante un período determinado.

Los efectos que pueden desencadenar una tormenta solar sobre un RPA'S puede ser:

- Desconexión total del GPS
- Puede darse la pérdida de imagen y datos técnicos de vuelo

Un último factor climático, es la posición y altura de sol. Una entrada de luz con orientaciones indeseadas puede hacer que las imágenes tomadas por la aeronave sean poco útiles debido a la presencia de sombras a lo largo de toda la composición.

En una buena planificación se debe de iniciar el estudio con la identificación del momento temporal del día, con el fin de evitar la entrada de luz solar con una orientación indeseada, produciendo extensas sombras proyectadas sobre los objetos, edificios o vegetación de la superficie. El momento idóneo para realizar nuestro vuelo equivale al tiempo en el que el sol se encuentra en la perpendicular a nuestra zona de trabajo.

Se ha de tener en cuenta también que la posición del sol durante todo el trabajo no varíe demasiado a lo largo del recorrido de las trayectorias, haciendo que las sombras sean diferentes para una misma zona en diferentes momentos. De la misma forma pasa con la incidencia del sol sobre la superficie, no es conveniente que haya imágenes muy sobrepuestas y otras subexpuestas.

Es recomendable ir analizando los partes climatológicos e índices, acompañando su evolución con cierta previsión, para tener todo ya preparado y planificado a la espera de una ventana de buenos parámetros atmosféricos.

5.3. TRABAJOS PREVIOS – PLANIFICACIÓN

En la tarea primaria de planificación, los primeros pasos son de reconocimiento del entorno de estudio y trabajar bajo planos o imágenes que representen el estado actual de la cantera con la mejor exactitud posible. Al tratarse de una cantera a cielo abierto, es necesario datos lo más actuales posibles, no nos sirve de nada tener un plano o una ortofoto de la cantera de hace dos años, puesto la actividad principal de la cantera son las voladuras para la obtención de materia prima y su relieve está en constante cambio, los bancos y taludes han podido cambiar su posición drásticamente o incluso llegar a desaparecer.

Una vez en posesión de la mejor base cartográfica del entorno de trabajo, hay que determinar los puntos de apoyo y control geográficos que se van a representar en el terreno. Los drones son una herramienta muy potente, capaz de ser muy autosuficientes en la obtención de datos, pero siempre se sigue necesitando una base de apoyos con los que poder dotar de la métrica y sistema de coordenadas requeridas a las imágenes.

El área de estudio quedará delimitada por un perímetro exterior de puntos que serán indiscutiblemente base de referencia de nuestros datos. En el interior de esta área que engloba por completo la cantera, se dispondrán de más puntos de apoyo con intención de densificar junto con puntos de chequeo o control, estos puntos de control no tomarán en ningún momento parte del cálculo final tan solo como validación y calibración de la metodología.

En este proyecto, la distinción de puntos se basará en la nomenclatura de dígitos de tres cifras, definiendo las centenas que comienzan por 4 (como puede ser 401 402) como puntos de apoyo. Por otro lado, los números cuyas centenas comiencen por 3 (como 301, 302) serán los definidos como puntos de control, sin valor de cálculo:

- 401 – 418: Puntos de apoyo
- 301 – 314: Puntos de control



Ilustración 7 – Distribución inicial

La materialización de estos puntos de apoyo y control en el campo se harán mediante dianas rectangulares de 40x40 cm. La codificación de las dianas además empleará un esquema de colores:

- Negras y amarillas: Puntos de apoyo



Ilustración 8 - Dianas puntos de apoyo

- Blancas y rojas / Negras y blancas: Puntos de control.



Ilustración 9 - Dianas puntos de control

Se ha experimentado con distintos colores y es posible que en futuras propuestas sufran modificaciones, acorde a un mejor contraste con el escenario presente, haciéndose así más visible y mejorando su localización en las imágenes.

El esquema que se debe hacer sobre los puntos de apoyo en la superficie del terreno no tienen por qué ser preciso, puesto que más adelante en la zona de campo, es muy posible que estas localizaciones sean alteradas y no concuerden con lo que teníamos en plano, ya sea por la inaccesibilidad del punto en cuestión o sea peligroso colocar esa diana en donde potencialmente era un buen lugar.

Para determinar una posición idónea de una diana se debe de tener en cuenta unos requisitos:

- A poder ser un claro de vegetación o una zona bien visible sin sombras para que las imágenes del dron sean claras sobre la diana
- Si es posible, que exista un objeto característico o representativo que a la hora de la búsqueda y reconocimiento de las dianas en las imágenes sea sencillo encontrar la zona cercana a la diana.
- La superficie debe ser lo más horizontal posible para garantizar que se visualice desde todos los puntos aéreos de toma de imágenes.
- Por último, documentar con la toma de una imagen con una cámara compacta en el momento de colocar la diana para disponer de una referencia más de la diana, tanto para su selección en las imágenes como para su posterior recuperación tras los vuelos del RPA'S.

Se debe hacer un proyecto de vuelo, tal y como se desarrollaría en un estudio de vuelo fotogramétrico siendo de las fases más delicadas a proceder ya que es inútil pretender un buen resultado con un vuelo inadecuado. Se ha de considerar una serie de aspectos no solo geométricos, sino también relativos a las características fotográficas.

- Recubrimiento de las fotografías: Longitudinal y transversal. El solape es el porcentaje que tienen las fotografías consecutivas en común. Para poder crear un modelo tridimensional es necesario que haya solapes, los valores típicos son 80% longitudinal por 65% transversal. A mayor solape mayor número de pasadas. Se debe tener muy presente mantener un equilibrio entre el solape y la duración del vuelo dado que la autonomía de la aeronave es muy limitante.

$$D = d \cdot (1 - SL)$$

Distancia entre pasadas

$$a = d \cdot [1 + (1 - SL) \cdot (n - 1)]$$

Relación entre anchura y número de pasadas

D = distancia entre pasadas

d = huella de la imagen

SL =superposición lateral

a = ancho del terreno

n = número de pasadas

- Escala de las imágenes: La altura de vuelo establecida, será máxima permitida por la normativa vigente, que son 120 metros.

$$\frac{d}{H} = \frac{SW}{F}$$

Huella horizontal

SW = anchura del sensor
 F = distancia focal
 H = altura del vuelo
 d = huella horizontal de la imagen

- Cadencia: Intervalo de tiempo entre dos disparos consecutivos, el número de fotografías durante el trayecto no incrementa la duración del vuelo, pero si el intervalo entre capturas.

$$T = b \cdot (1 - OL) / v$$

Tiempo entre capturas

T = tiempo entre capturas
 OL= superposición longitudinal
 v = velocidad
 b = huella vertical de la imagen

- Velocidad del vuelo: En nuestro caso 8.1 m/s
- Nitidez fijando una velocidad de obturación rápida pero consecuente con la velocidad establecida del vuelo.
- Distancia de muestreo, define cual es la medida de un pixel de la fotografía en el terreno. Dependiendo de este factor la fotografía tendrá mejor o peor calidad. Dependiendo del sensor de la cámara será necesario ajustar la altura del vuelo.

La dificultad logística que hay que resolver en la planificación, es tanto la longitud de cada pasada como el número de pasadas o separación entre trazadas de un mismo sentido, ya que esta distancia influirá en varios factores:

- Cantidad de baterías disponibles
- Altura de posicionamiento
- Velocidad del vuelo

Una densificación de pasadas hará que el dron necesite estar más tiempo en el aire, con lo que necesitará un aporte extra de energía. Hay que tener en cuenta que la duración máxima de las baterías de los drones en la actualidad es de unos 20 min a velocidad constante sin movimientos bruscos, teniendo en cuenta que se programa para que el dron retorne al punto de salida cuando su batería se aproxime al 20% para evitar posibles imprevistos, da un margen de maniobra muy limitado, haciendo que este sea una de las grandes limitaciones que ocasiona la tecnología actual.

De forma similar ocurre con la altura del vuelo, la necesidad de tomar altura para realizar los solapes de las imágenes y abarcar la superficie debe ser controlada, asumiendo el tiempo necesario del dron para posicionarse a la altura requerida y comenzar las mediciones y lo que necesita para poder regresar a la zona de despegue con suficiente energía.

En todas estas combinaciones permanece constante la variable de la velocidad del vuelo, que siempre sigue la misma pauta, a mayor velocidad mayor consumo de energía acortando la duración del tiempo de vuelo.

En definitiva, hay que manejar principalmente: el área que hay que cubrir y con qué densidad se necesita, contando con ello con el tamaño de la fotografía, espacio de almacenamiento (tarjetas de memoria), distancia focal y con ello ajustar los parámetros de altura, velocidad y separación del mallado.

5.4. TOMA DE DATOS.

Las dos actividades principales en la toma de datos, a partir de los cuales se creará el modelo digital del terreno son:

- Apoyo
- Vuelo fotogramétrico.

La metodología además de las imágenes generadas por los RPA'S, necesita de un apoyo terrestre. En nuestro caso el método a usar para dar valores a las dianas es mediante posicionamiento GPS cinemático en tiempo real (RTK) usando la red activa de Cantabria, tomando como referencia la estación ubicada en Torrelavega, como se refleja en un gráfico de apoyo que se muestra a continuación.



Ilustración 10 - Visor GNSS estación Torrelavega

Se ha enfocado al uso del GPS por la simplicidad y practicidad del aparato, pudiendo portarlo una única persona y realizar todo el posicionamiento de forma autónoma mientras otra parte del equipo realiza otras labores de calibración de drones y preparación. El equipo de GPS cuenta con el jalón, el propio GPS y un dispositivo con acceso a la red, en nuestro caso un teléfono móvil. Es un equipo liviano y fácil de uso para poder transportar el propio equipo junto a las dianas e ir realizando los apoyos por toda la superficie requerida.

Una vez realizado todo el apoyo con las dianas por la superficie a modelizar, nos centraremos en el vuelo fotogramétrico, coordinando las actividades para optimizar los tiempos de ejecución.

El RPA`S puede ser pilotado de forma manual, pero no es el objeto de este proyecto, lo que buscamos es una traza limpia, constante y homogénea de toma de imágenes para garantizar el mejor solape de las fotografías posible. El método más simplificado y que mejores resultados están dando para cubrir el área de estudio es planteando una cuadrícula con vuelos cruzados.

En un principio, se podría optar por realizar tan solo un vuelo en una dirección, sin embargo, la practica nos revelará los inconvenientes que presenta realizar un único vuelo en una dirección en un entorno con grandes taludes y paredes verticales que pueden producirse sombras y ocultaciones muy acusadas haciendo ineficiente la información obtenida.

La cuadrícula la subdividiremos en dos trayectorias enfrentadas perpendicularmente. Iniciaremos las primeras pasadas sobre la cuadrícula, realizando las trazadas programadas previamente en un orden establecido para así poder ordenar las imágenes de mejor forma. Durante este proceso es conveniente ir realizando una copia simultanea del almacenamiento de las imágenes o en cada cambio de batería un back up de archivos como respaldo de seguridad.

En las operaciones de vuelo, dada las características de aeronave que disponemos (inferior a 2 Kg.) tal como indica la normativa no sería necesario, el contacto continuo de visión al aparato por dos operadores de drones. De ser necesario uno de los operadores actuaría como piloto y otro como observador intermedio que garantice en todo momento la visión directa, además de mantener la comunicación por radio o telefónica. A pesar de no ser necesario por las características de nuestra aeronave es una buena práctica a nivel de precaución hacerlo si es posible.

Al concluir con la cuadrícula, se pasó a intentar otro tipo de vuelo a la hora de captar las fotografías, tomando una variable más en las pertinentes combinaciones, el ángulo de la cámara. La tecnología de las aeronaves no tripuladas permite variar el ángulo con el que se toman las fotografías. En principio esto puede ser el factor clave para resolver la problemática que acusa a la fotogrametría, con las zonas de ocultaciones provocadas por relieves muy verticales, estos pueden llegar a producir un estado sin información en todo aquello que la dirección cenital de la cámara impida su visión. Los huecos que se crean en las superficies generadas no es más que zonas donde no puede ser representado por falta de información, no puede representar aquello que la cámara no ha sido capaz de captar.

Con la capacidad de poder variar el ángulo de la cámara más allá de la posición horizontal, hace que sea interesante repasar las zonas de taludes verticales, que son las zonas propicias a que se produzcan sombras de información, con un cambio en la posición cenital habitual, y así obtener imágenes e información del perfil de los taludes. Esta maniobra teóricamente debería beneficiar en la resolución del modelo, en nuestro caso repasaremos los dos taludes centrales con unas pasadas de vuelo libre, con una dirección de 15° sobre la vertical.



Ilustración 11 - Nube de puntos

Finalmente indicar que por muy bien que se tenga planeado todo siempre hay lugar a imprevistos, algunos de los incidentes que se produjeron en nuestro caso a la hora de ejecutar el trabajo fueron:

- Pérdidas de conectividad provocadas por la proximidad de torres de alta tensión, torres que no se había tenido en cuenta y su altura era muy próxima a la prefijada de la aeronave.
- Inaccessibilidad a la colocación de todos los puntos de control para el apoyo, algunos casos por excesiva vegetación, otros por peligrosidad de los taludes verticales y en otros casos eran zonas del perímetro exterior del área de estudio limítrofes de la parcelación de la cantera y no teníamos permisos de los dueños de esas parcelas.
- Descargas de batería por una mala conexión durante su carga, la adquisición de una batería extra en el equipo con su carga completa subsanó este error.
- Pérdida de materiales con la no recuperación de dianas, tras la fase de vuelos.
- Insuficiencia de batería en el GPS

A pesar de la organización siempre hay que ser previsor por posibles imprevistos y llevar material extra de recambio, tales como:

- Segundo punto de acceso móvil a internet
- Recambio de baterías de todos los equipos electrónicos al 100% de su capacidad de almacenaje.
- Varios sistemas de almacenaje de fotos para poder ir haciendo copias de seguridad
- Mayor número de dianas de repuesto.

- Segundo operario de RPA'S para mantener el contacto visual desde distintas zonas.

5.5. FLUJO DE TRABAJO

A continuación, se describirá cuáles son los pasos a seguir, una vez ejecutado el vuelo y dispuestos en gabinete.

Tras la descarga de las imágenes procedentes del dron, se vuelcan sobre un software para que analice los metadatos que incorporan las imágenes.

A su vez se debe incorporar al programa los puntos de apoyo y control tomados por el GPS que han sido captados por la red activa de Cantabria:

- Un punto de apoyo es un punto de coordenadas XYZ, conocidas que se utiliza para hacer una orientación externa.
- El punto de control es un punto con coordenadas XYZ, conocidas que se utiliza para hacer un control de error del modelo generado.

Ahora bien, para la orientación de las imágenes se deben de compaginar las fotografías y los puntos de control, así como los de apoyo.

Las fotografías se someten a un proceso de orientación interna. La buena visibilidad de las dianas en el campo hace que este proceso de orientación sea más sencillo, identificando imágenes y dianas de forma más rápida.

Mediante los puntos de apoyo se realizan la orientación externa y con la incorporación de los puntos de control es como se contabiliza el error.

- La orientación externa se obtiene con la posición y orientación de la cámara en el instante en la que se tomó la imagen respecto al sistema de coordenadas del proyecto. Dada nuestra localización las coordenadas del proyecto son ETRS89–UTM en zona 30N con la altimetría del nivel medio del mar en Alicante.
- La orientación interna trata de reconstruir los haces de rayos homólogos en la cámara fotográfica que originó esas imágenes, dado que la luz cuando pasa por el objetivo atraviesa las lentes que deforman la imagen.

Una vez aparecen los primeros resultados, se debe buscar errores que estén fuera de lo normal, a pesar de que los informes que arroja el programa los den por válidos. Con el fin de mejorar la orientación todo lo posible, es conveniente identificar todos los puntos homólogos que sean visibles para que los algoritmos SIFT y SFM puedan identificarlos en distintas imágenes y representarlos en el espacio.

El algoritmo SIFT tiene el cometido de detectar las características y puntos de interés en las imágenes analizando la información de su entorno, con la existencia de bordes o texturas. Una vez encontrados los puntos de interés de las imágenes, pasa a asignar a cada punto de interés una orientación de modo que garantice la invarianza respecto a la rotación de las imágenes.

Una vez finalizado el sistema de extracción de características SIFT, donde a cada imagen se la ha otorgado un escala y rotación de los puntos de interés, estos se identifican automáticamente en todas las imágenes. El algoritmo SFM lleva un ajuste simultaneo de las cámaras, donde tratará de encajarlas en función de los puntos de

interés que sean homólogos. Seguidamente se proyectan los haces de los puntos homólogos, en el momento que tres haces se cortan en el espacio, queda definido como punto. Con este proceso se genera una nube de puntos, con la que generar el resto de los subproductos.

Resuelta la orientación y generada la nube de puntos se debe de proceder a clasificar, para poder hacer uso de ella. Sin clasificar la nube de puntos no aporta ninguna información que pueda usarse.

5.6. PROCESADO.

Tras el trabajo en campo se pasaría al procesado de las imágenes mediante el uso de software específico, lo que en la fotogrametría tradicional se denominaría restitución.

Para el procesado, el software empleado ha sido Pix4D dedicado específicamente al desarrollo de software para imágenes de drones. Dentro de sus subproductos para una modelización del terreno, la herramienta seleccionada será Pix4DMapper. Esta herramienta es capaz de analizar imágenes isotérmicas, multiespectrales, imágenes en 360° y por supuesto da cabida a imágenes de origen de vuelos de dron, pudiendo crear, modelos digitales, nube de puntos a color, curvas de nivel, ortofotos e incluso videos.

Con el bruto de los resultados obtenidos por Pix4D, se pasarán a realizar análisis y contrastes de diferentes situaciones y combinaciones. Estos son los softwares utilizados para contrastar la información:

- Argis: Usaremos esta herramienta para crear modelos digitales a partir de la Nube de puntos de Pix4D y comparar ficheros rasters.
- Lastools o Pix4D: Clasificación de la nube de puntos por categorías
- Autocad: Definición de los perfiles de los taludes y formación del TIN.

En una primera etapa de iniciación del procesado, comenzamos con la orientación tanto externa como interna de las imágenes, para el que software sea capaz de analizarlas como conjunto. Esta fase es una etapa iterativa en la que tras finalizar la orientación global se ha de revisar el producto generado y realizar un recalibrado de las cámaras si fuese necesario, tantas veces como sean oportunas para reducir la incertidumbre de la nube de puntos que se obtendrá durante el paso final del programa.

Ahora bien, pasamos al estudio de las trayectorias según los distintos vuelos fotogramétricos de los que disponemos ya calibrados. Tenemos presentes tres trazas de vuelos diferentes, dos de ellas perpendiculares entre sí y una tercera más cuya dirección gozó de mayor libertad dada la observación de la necesidad de más información de imágenes de los taludes más abruptos, que por lógica tendrán más zonas de ocultaciones y sombras.

Estas trayectorias de vuelos se combinarán planteando distintos casos, siendo su nomenclatura:

- C1: Trayectoria que barre en dirección Norte-Sur aproximadamente, paralela a los bancos de roca que están siendo explotados en la actualidad, iniciándose en la entrada de la cantera junto a la carretera de la autovía, tiene una dirección paralela a la autovía, con la cámara en disposición cenital.

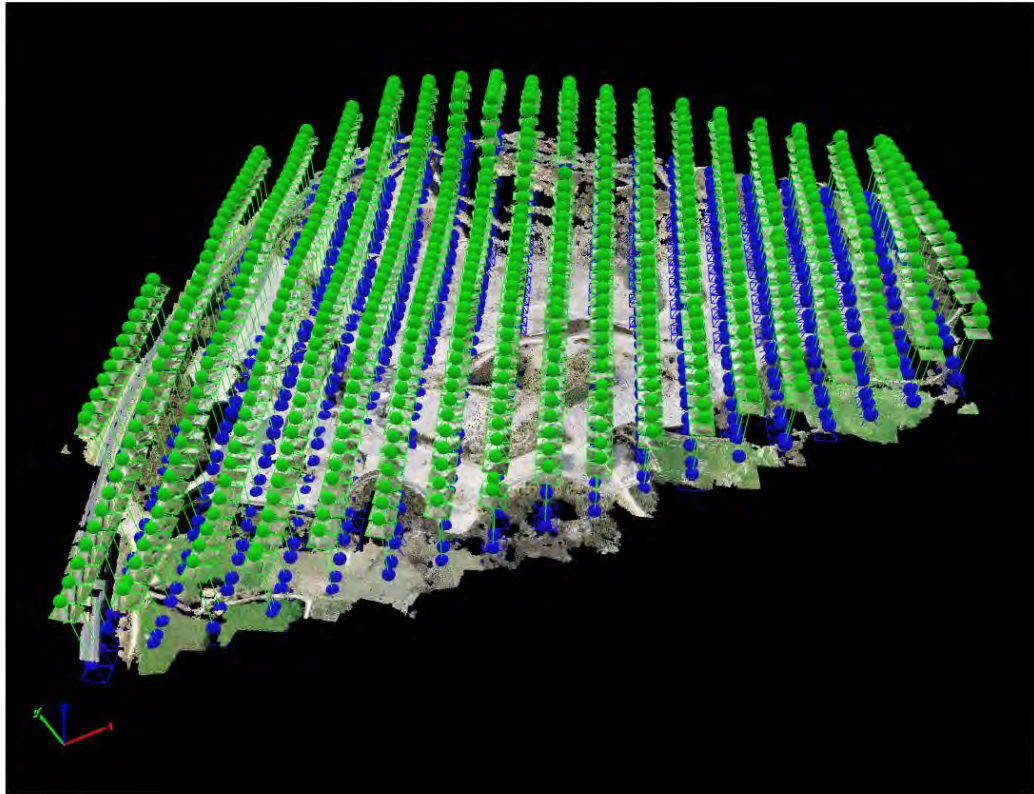


Ilustración 12 - Trayectoria C1

- C2: Trayectoria perpendicular a C1 que busca la línea paralela de los taludes más grandes de la cantera que esta enfrentados, iniciándose de igual manera en la entrada de la cantera junto a la autovía, (en este caso seria perpendicular a la autovía)) cámara en disposición cenital.

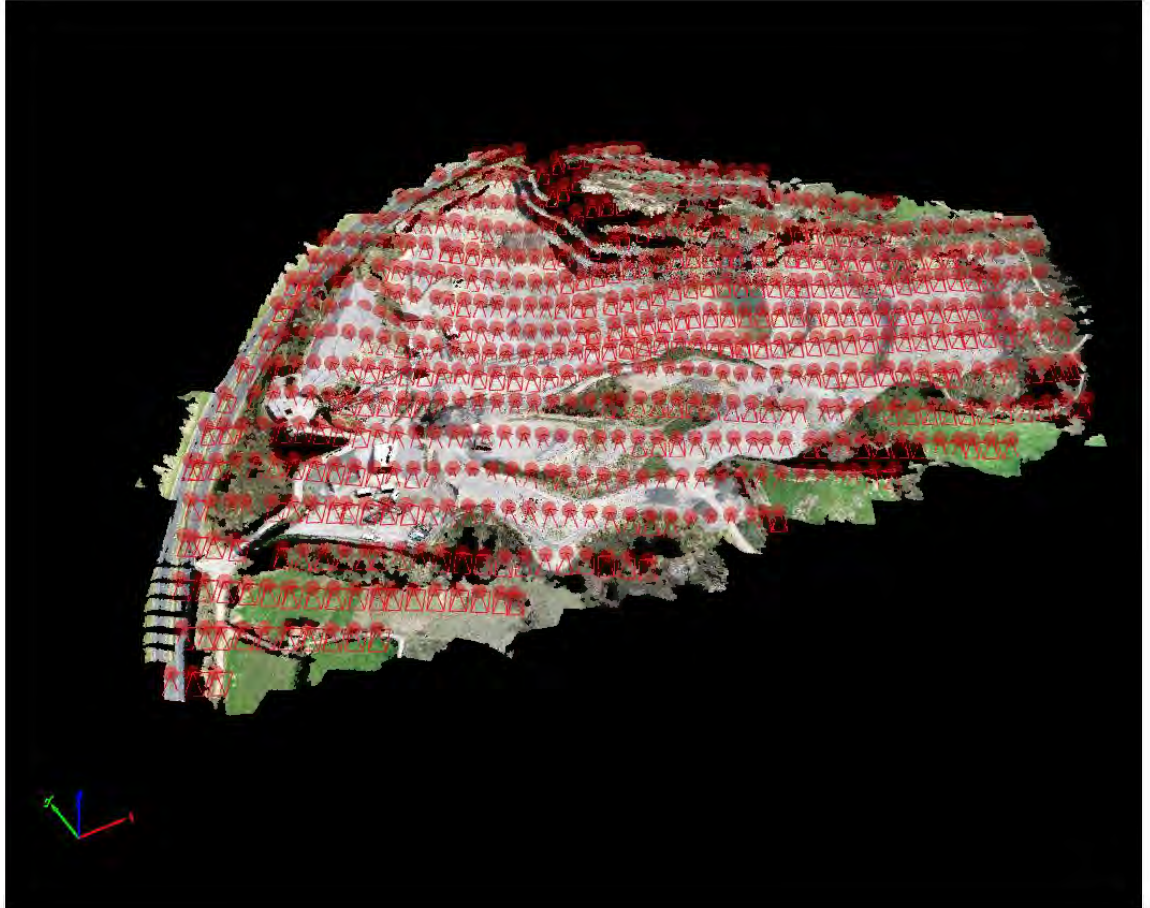


Ilustración 13 - Trayectoria C2

- OB1: Trayectoria en semejanza a la simbología de infinito barriendo de forma manual, con cámara en una posición oblicua entorno a los 15°

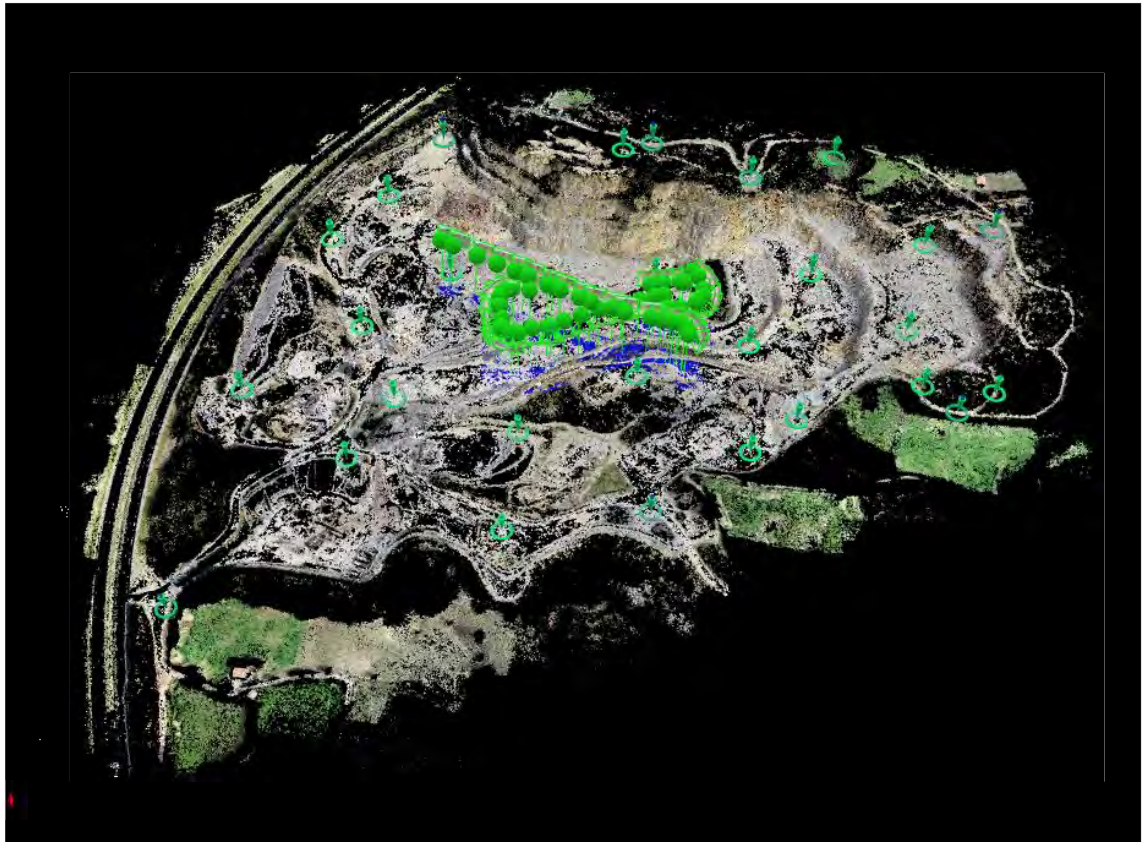


Ilustración 14 - Trayectoria Ob1

Se analizarán todas las posibles combinaciones de las distintas trayectorias de vuelo, es decir, se realizarían experimentos con las seis combinaciones de trayectorias posibles, individuales y conjuntas, añadiendo además distintas configuraciones de apoyos.

Las seis combinaciones que se puedan diseñar en cada caso fueron:

- C1
- C2
- C1+OB1
- C2+OB2
- C1+C2
- C1+C2+OB1

Las distintas combinaciones de imágenes serán procesadas para las distintas configuraciones de apoyo. Tal y como es la búsqueda infinita en la ingeniería de mejorar recursos, optimizar y tender a la mínima energía, se propuso analizar cuatro posibles estados de apoyos cada uno de ellos con menos puntos de apoyo (cambiando puntos de apoyo por control en el software) y así identificar cual sería el apoyo mínimo a realizar, para llegar a finalizar con un resultado óptimo, tal y como sería un apoyo densificado.

Así pues, dispondremos de dos escenarios completamente opuestos, uno con sólo 6 apoyos exteriores y otro con todos los apoyos realizados, los 16. Entre los dos escenarios extremos, dispondremos dos intermedios, uno de ellos con el apoyo periférico con 11 puntos y el último con los mismos apoyos y alguno por el centro densificando.

Un listado detallado de los experimentos en los apoyos:

- Exp1: 6 puntos de apoyo, solo exteriores.

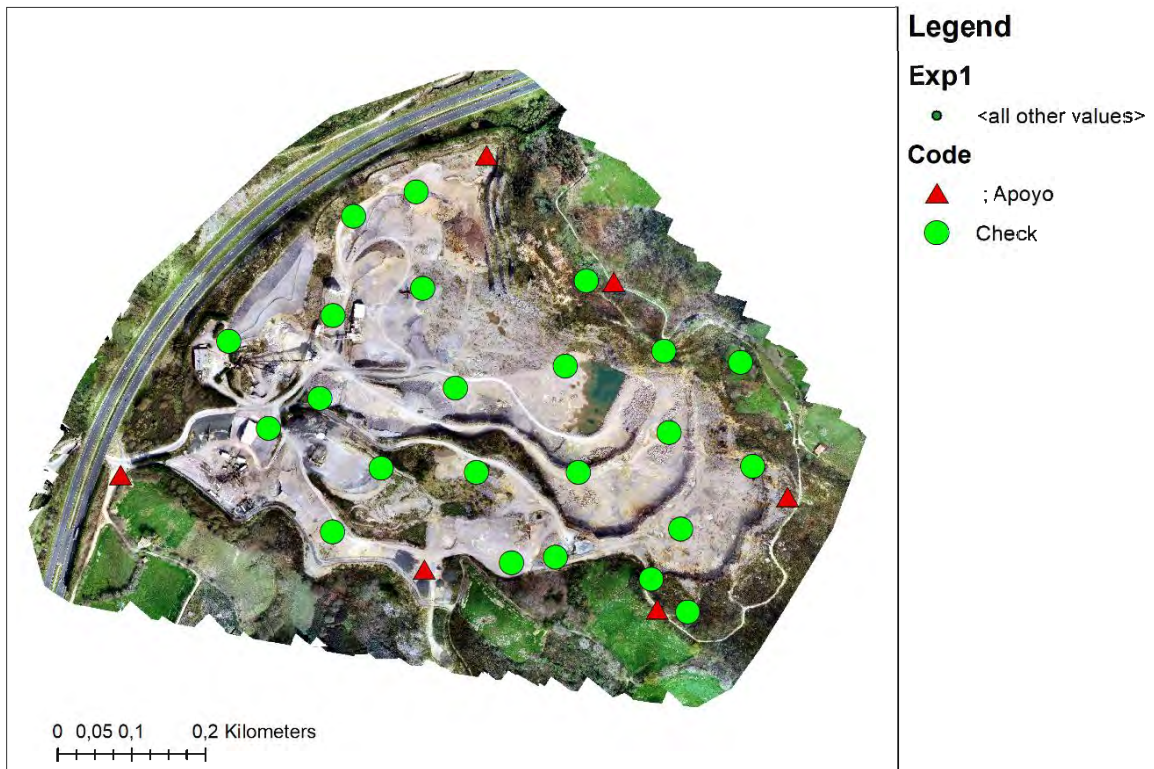
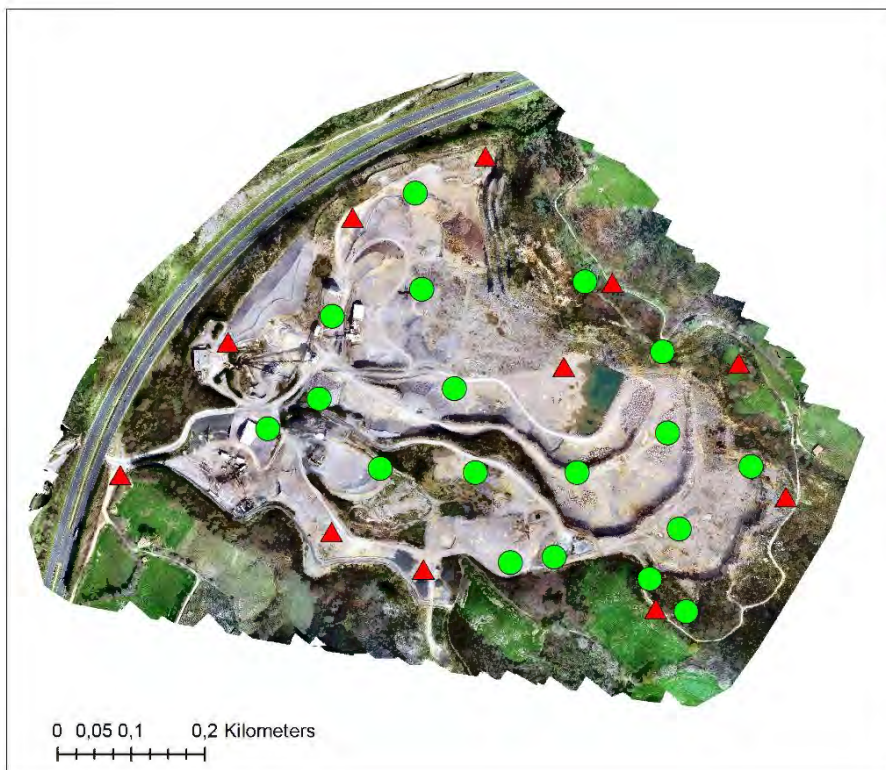


Ilustración 15 - Fase1 Exp1

- Exp2: 11 puntos de apoyo, todos los periféricos.



Legend

Exp2

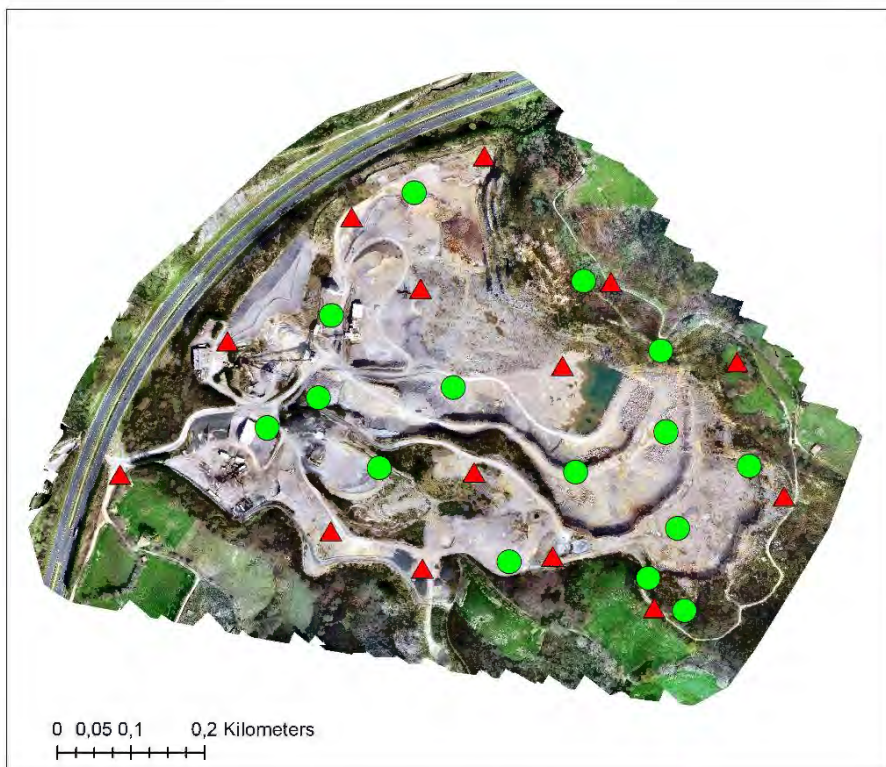
- <all other values>

Code

- ▲ Apoyo
- Check

Ilustración 16 - Fase 1 Exp2

- Exp3: 14 puntos de apoyo, todos lo periféricos más puntos interiores centrados.



Legend

Exp3

- <all other values>

Code

- ▲ Apoyo
- Check

Ilustración 17 - Fase1 Exp3

- Total: 16 puntos de apoyo, todos los existentes.

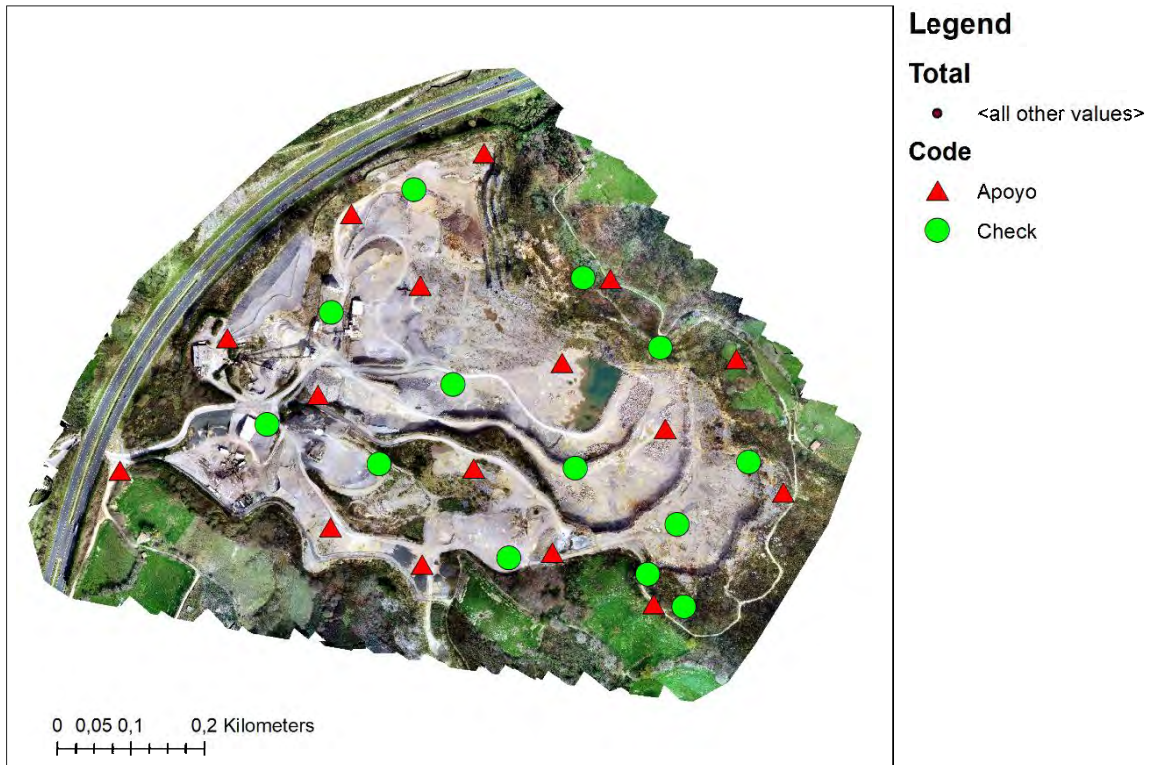


Ilustración 18 - Fase 1 Total

Con todas las combinaciones presentadas se puede dar comienzo a la fase 1 del procesado, usaremos las seis combinaciones de trayectorias en cada uno de los experimentos, haciendo un cómputo total de veintiséis casos a analizar.

El proceso se inicia con el marcado de los puntos apoyo y chequeo o control, donde se han de identificar las dianas en las imágenes, es aconsejable definir las dianas en todas las imágenes que aparezcan, para así mejorar la calibración del sistema y reducir los errores.

Tras el análisis de esta primera fase se obtienen unas primeras valoraciones, que han de analizarse individualmente. Las combinaciones C1+OB1 y C2+OB1, arrojaban resultados muy parejos a C1 y C2, la introducción de OB1 junto con una de las trayectorias no mejoraba cuantitativamente los resultados de la nube de puntos en ninguno de los cuatro escenarios de experimentos.

En esta fase inicial se descubre un problema que resalta en las combinaciones en las que se introduce el caso OB1. La nube de puntos incorpora un conjunto de puntos fuera de lugar, en una zona espacial inusual, esta agrupación es debido al un excesivo ángulo en la dirección de la cámara. Hay ciertas imágenes que captan el cielo por este exceso de ángulo y los puntos que están apareciendo de forma inusual, son puntos que intentan representar el cielo captado por las imágenes. Esta interacción se podría haber enmascarado más adelante en la edición de la nube de puntos o con un diseño de vuelo diferente. En el resto de las combinaciones generaron nubes de puntos sin incidencias.

Por lo tanto, en las fases sucesivas se definirían tan solo 4 posibles combinaciones excluyendo, las anteriores citadas:

- C1
- C2
- C1+C2
- C1+C2+OB1

En relación al planteamiento de los distintos enfoques en el apoyo, los resultados estadísticos realizados sobre los errores que arroja el programa tras su procesado nos indican que el Exp3 y el total son sumamente cercanos, no disponen de grandes diferencias para contrastar, en la siguiente fase de análisis se prescinde de este experimento para reducir los casos de apoyos en tan solo tres de ellos.

- Exp1: 6 puntos de apoyo, solo exteriores

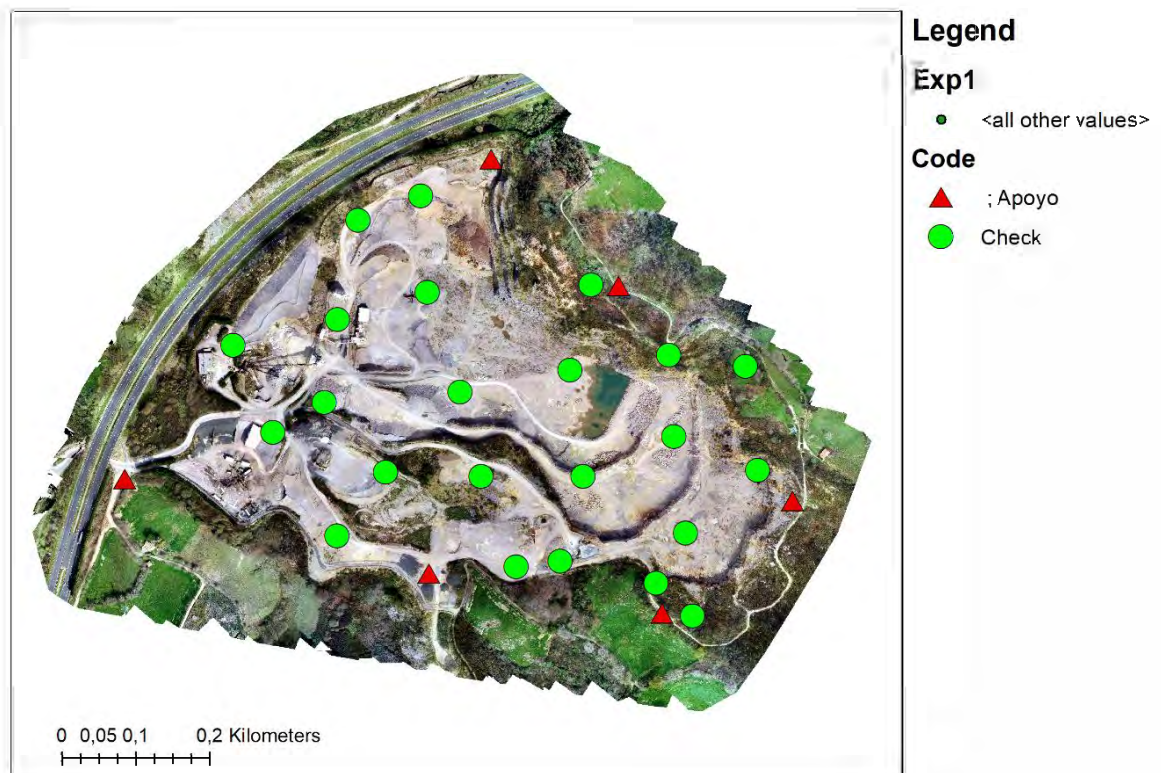


Ilustración 19 - Exp1

- Exp2: 10 puntos de apoyo, exterior y diagonal central.

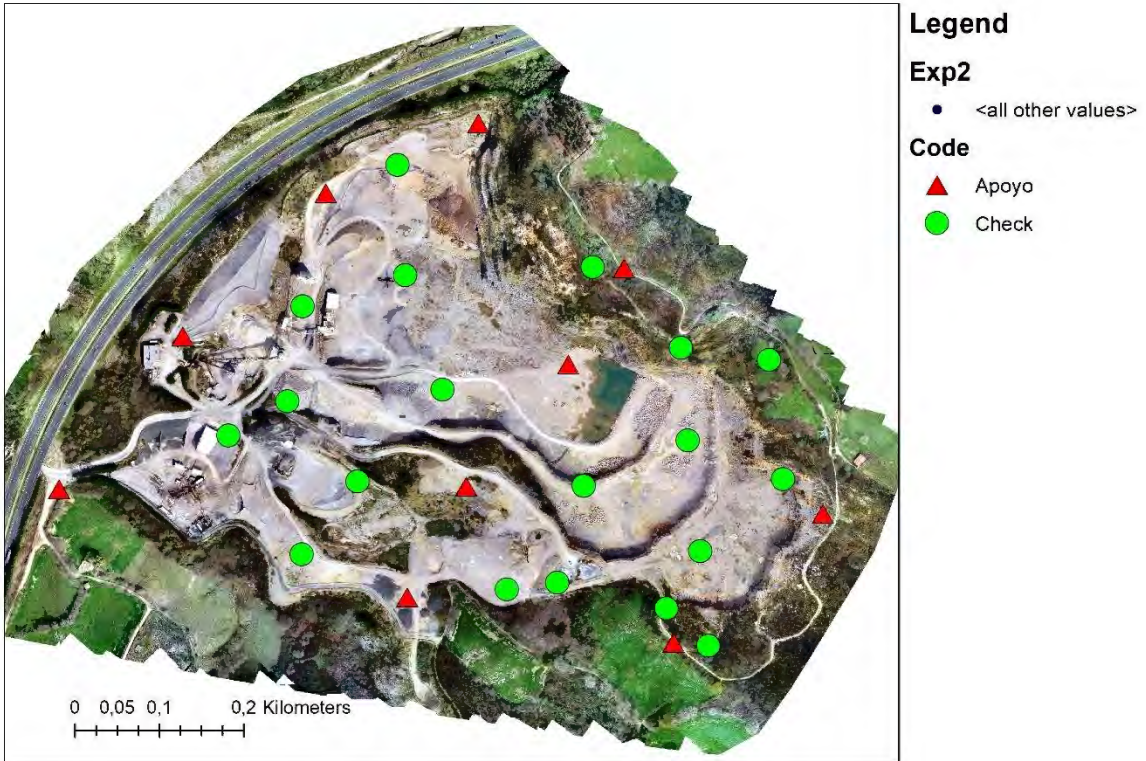


Ilustración 20 - Exp2

- Total: 16 puntos de apoyo, todos los existentes.

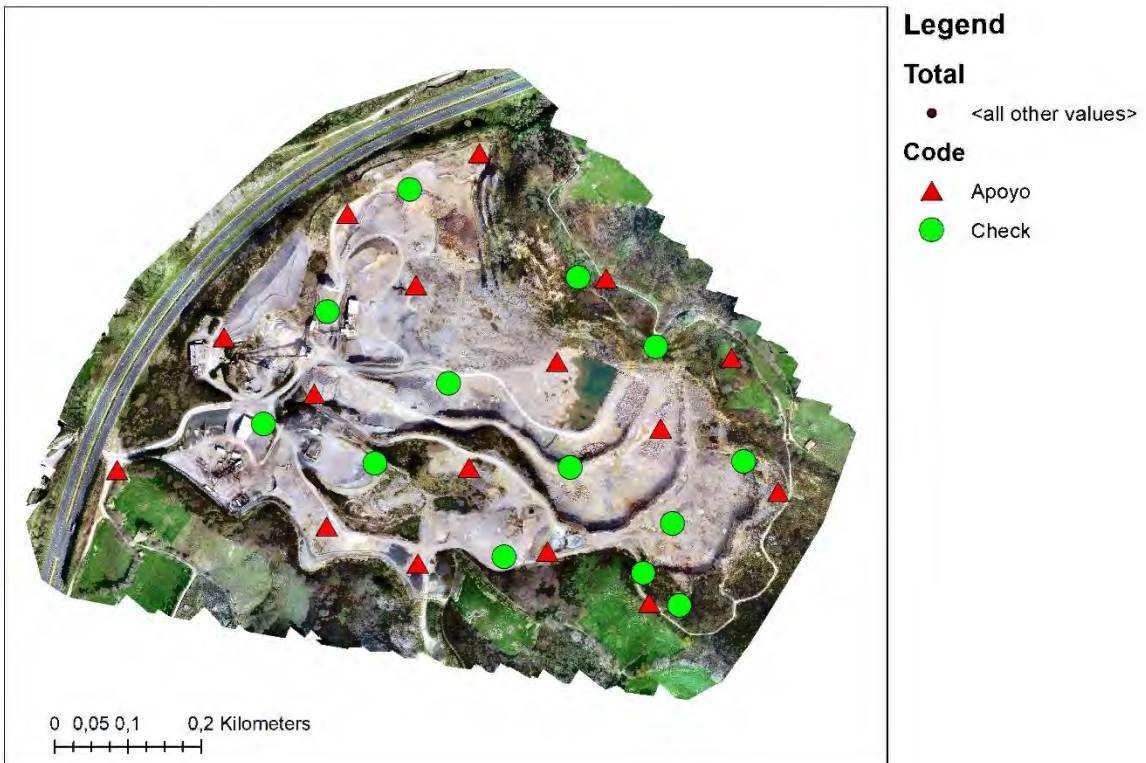


Ilustración 21 - Total

De los tres escenarios que nos quedan, con sus 4 combinaciones, generamos la densificación de la nube de puntos que es uno de los subproductos que analizaremos concienzudamente, mediante el uso de Argis y AutoCad con intención de determinar qué resultado es el más satisfactorio.

Para poder emplear las nubes de puntos es preciso realizar una clasificación de la nube de puntos, categorizando los puntos de forma automática, según a que tipología pertenecen:

- Vegetación
- Edificios
- Terreno
- Carreteras
- Objetos Humanos

Para nuestro proyecto nos deberemos centrar en que la nube de puntos este lo mejor posible identificada en las categorías de terreno y carreteras siendo las dos tipologías que nos incumben.

De no ser correcta la clasificación obtenida de forma automática, dispondremos de dos herramientas para su edición, por un lado, el propio software dispone de una herramienta propia para la edición manual de la nube de puntos y por otro lado, se podría extraer el fichero de la nube de puntos y tratarse mediante un programa externo de edición de nube de puntos. Para este proyecto se optó por mantenerse en el propio programa y hacer uso de sus herramientas de edición.

Una característica esencial de la metodología fotogramétrico es la capacidad de crear ortofotos con los datos que se les facilita, de modo que en la fase final del programa con las imágenes y el MDT podemos llegar a sacar una ortofoto de la cantera. La ortofoto nos servirá para diferentes acciones más adelante, como ayuda en la creación de superficies para controlar la zona de edición y envoltura real del MDT.

6. MATERIAL UTILIZADO

6.1. DIANAS

Las dianas empleadas serán de un formato cuadrado de 40 x 40 cm, usando un material duro y ligero para poder transportarlo con facilidad, pero a la vez tener algo de peso para que no se mueva por acciones del viento.

La gama cromática de las dianas será, paneles de cuadros negros y amarillos para puntos de apoyo y para los puntos de control blancos y rojos, en este proyecto.

APOYO	CONTROL
401	301
402	302
403	303
404	304
405	305
407	306
408	307
409	308
410	309
411	310
412	312
413	313
414	
416	
417	
418	



Ilustración 22 - Diana apoyo



Ilustración 23 - Diana control

6.2. GPS

El uso de esta metodología en esta localización es muy favorable debido a la red activa disponible para el posicionamiento del GPS, lo que hace que tan solo necesitemos un equipo para poder realizar las mediciones. La medición GPS se realizará en tiempo real respaldada por la estación más cercana que tenemos que es la de Torrelavega.

Los componentes que realmente se han de proporcionar para iniciar la actividad de apoyo GPS son:

- Acceso a red internet
- Receptor GNSS, con capacidad de observación de fase
- Jalón

Características del GPS usados son los siguientes:

- Marca: Leica
- Modelo: SmartRover RX1200
- Constelaciones: GPS+GLONASS
- Portadoras: L1+L2
- Precisión: Horizontal 10mm+1ppm / Vertical 20mm+1ppm

6.3. RPA'S

El equipo específico para uso topográfico en la ingeniería civil, podría parecer un dron comercializado por cualquiera de las marcas punteras del sector como puede ser Dji, Yuneec , Parrot, Matrice , pero no más lejos de la realidad, exteriormente pueden ser uno de los modelos que incorporan estas compañías para su uso recreativo, pero las características de motores y sobre todo de la cámara que albergan en su interior, son totalmente diferentes. En la mayoría de los casos, lo que se adquiere con la compra de un producto de este tipo es la aeronave con su estabilizador de imagen, GPS y con la montura para incorporar la cámara que tu desees, pudiendo montar de la calidad que tú quieras como puede ser compacta, DLSR, infrarrojos, nocturna, hay todo tipo de posibilidades según la demanda.

En nuestro caso en particular el equipo usado es un Phantom 3 Pro. A continuación, se detalla algunas de sus características más relevantes para tener en cuenta para su elección, como pueden ser accesorios, tecnología incorporada, calidad de imagen, capacidad de almacenaje de imágenes, batería, peso y dimensiones para su transporte, etc.

Aeronave:

- Peso: 1280 g.
- Tamaño diagonal: 400 mm
- Velocidad máxima. 16m/s
- Altura máxima: 6 km / Por normativa 120m.
- Duración máxima de vuelo: 23 minutos
- Grado de inclinación: -90° a +30° sobre la horizontal
- Estabilización: 3 ejes

Cámara por defecto:

- Sensor: 12 Mpx
- Lente: 35 mm, focal f/2.8, FOV 94°
- Velocidad del obturador: 1/8000
- ISO: 100-3200 video y 100-1600 foto
- Compatibilidad de almacenamiento: 64 GB clase 10

7. RESULTADOS

7.1. ORIENTACIÓN ABSOLUTA DE LOS MODELOS

Para cada combinación, a continuación se procede a presentar los errores producidos por cada análisis, donde se expone una pequeña previsualización del modelo digital del terreno, los detalles de calibración utilizados, posicionamiento de puntos y cámaras, así como los errores planimétricos y altimétricos de los puntos de apoyo y control.

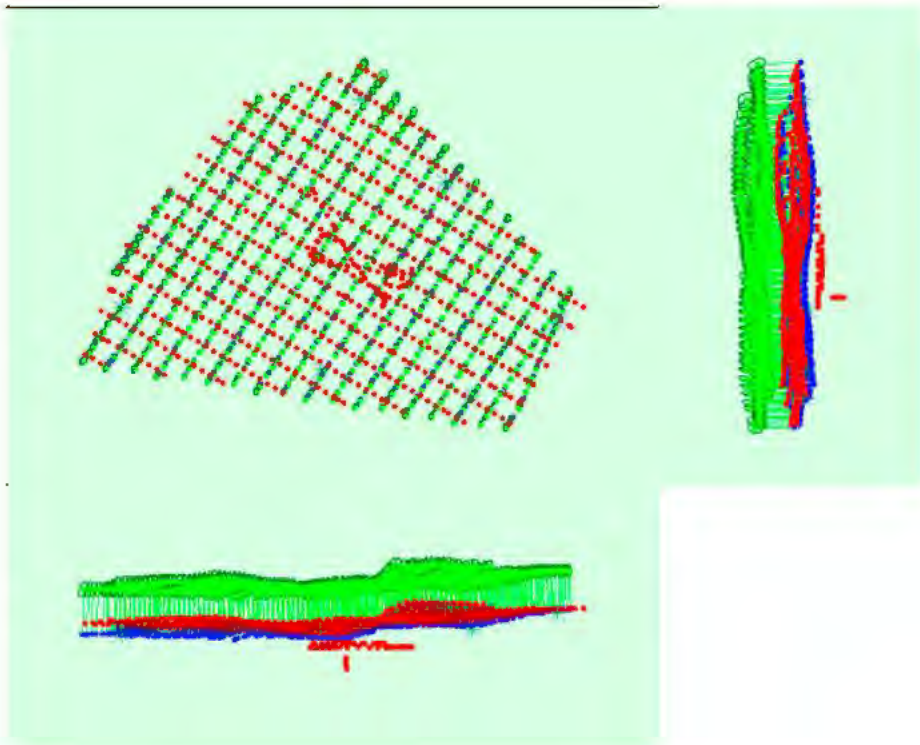


Ilustración 24 - Resultados Pix4D 1

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
401 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	-0.002	-0.004	0.625	11 / 11
402 (3D)	0.020/ 0.020	0.007	-0.002	0.004	0.596	13 / 13
407 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	-0.002	0.002	0.308	14 / 14
410 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	0.008	-0.002	0.596	14 / 14
411 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	-0.002	-0.001	0.235	14 / 14
418 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	-0.000	0.000	0.490	11 / 11
Mean [m]		0.000026	-0.000109	-0.000250		
Sigma [m]		0.003101	0.003586	0.002559		
RMS Error [m]		0.003101	0.003587	0.002571		

0 out of 23 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
301		-0.0153	0.0179	-0.0333	0.5362	15 / 15
302		-0.0045	-0.0092	-0.0449	0.7097	24 / 24
303		0.0115	0.0016	-0.0511	0.5581	22 / 22
304		0.0061	0.0160	-0.0695	0.4574	14 / 14
305		-0.0097	-0.0267	0.0096	0.5654	13 / 13
306		0.0239	-0.0159	-0.0604	0.9096	16 / 16
307		0.0062	-0.0009	-0.0438	0.4069	15 / 15
308		0.0073	-0.0260	0.0093	0.5016	9 / 9
309		-0.0079	-0.0087	-0.1371	0.4268	19 / 19
310		0.0035	-0.0004	-0.0989	0.7438	12 / 12
312		-0.0148	-0.0100	-0.1052	0.4577	10 / 10
313		-0.0250	-0.0083	-0.1969	0.5263	15 / 15
314		-0.0238	0.0308	-0.1339	0.7320	14 / 14
403		-0.0014	-0.0471	-0.0088	0.3454	8 / 8
404		-0.0006	-0.0166	-0.0622	0.6225	28 / 28
405		0.0166	-0.0004	-0.0732	0.4459	15 / 15
408		-0.0054	-0.0361	-0.0648	0.6468	35 / 35
409		0.0115	0.0117	-0.0738	0.6626	10 / 10
412		-0.0154	-0.0248	-0.1708	0.4814	15 / 15
413		-0.0064	0.0055	-0.1322	0.7442	11 / 11
414		-0.0186	0.0092	-0.0251	0.5426	15 / 15
416		-0.0424	-0.0140	-0.1165	0.5454	14 / 14
417		-0.0167	-0.0059	-0.2086	0.4759	8 / 8
Mean [m]		-0.005270	-0.006888	-0.082260		
Sigma [m]		0.014981	0.017813	0.059098		
RMS Error [m]		0.015881	0.019099	0.101288		

Ilustración 25 - Resultados Pix4D 2

Con estos errores se ha pretendido hacer una comparativa entre los tres posibles experimentos, basándose en un principio, que el modelo más robusto, la que mantendrá los errores más bajos, es aquella que incluye todos los puntos de apoyo, es decir, el experimento llamado Total.

El análisis de los resultados se realizarán de forma:

- Estadística
- Gráfica

La estadística nos va revelar de forma fiel que es lo que está ocurriendo con los errores y de esta manera cuantificar y comparar experimentos con criterio. Los parámetros que se muestran en los estadísticos se basarán en:

- Error medio: Nos dará una aproximación del promedio de la tendencial central de los errores.
- Desviación estándar: Una desviación estándar refleja mejor la agrupación de los datos, es mas fiel que la media aritmética. Teniendo el dato de media aritmética si la desviación estandar es similar, quiere decir que los datos estan reunidos en una pequeña agrupación, no son muy amplios.
- Rango: El rango de valores entre el valor mínimo y el máximo, para entender mejor el conjunto de valores de la desviacion tipica.

Exp1: Unidades en metros – (6 puntos de apoyo; 23 puntos de control)

Exp1C1	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,01	0,01	0,08	-0,57	0,02	0,02	0,06	0,07	0,08	0,22
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,48	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01

Exp1C2	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	-0,01	0,00	0,00	-0,60	0,02	0,02	0,09	0,09	0,07	0,35
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,55	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01

Exp1C1C2	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,08	-0,68	0,01	0,02	0,09	0,05	0,05	0,32
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,62	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

Exp1C1C2OB1	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,09	-0,68	0,01	0,02	0,08	0,05	0,05	0,31
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,62	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

El experimento 1 es el que arroja los errores más altos en los puntos de control, como podemos observar en todas las combinaciones de trayectorias, además de tener una desviación en Z en torno a 8 centímetros el rango de datos que engloba estas mediciones tiene una amplitud de hasta 35 centímetros, siendo el caso más desfavorable el de C2.

La diferencia entre los puntos de control y los de apoyos son enormes, mientras los puntos de control aportan un error entorno a los 30 cm, los puntos de apoyos dan medidas validas de máximo 2 centímetros, estas diferencias de errores inducen que este experimento no sea el correcto.

Exp2: Unidades en metros – (10 puntos de apoyo; 19 puntos de control)

Exp2C1	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,02	-0,60	0,01	0,02	0,02	0,04	0,07	0,09
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,52	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02

Exp2C2	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	-0,01	0,02	-0,62	0,02	0,02	0,03	0,08	0,05	0,11
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,59	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,03

Exp2C1C2	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,02	-0,71	0,01	0,01	0,03	0,05	0,04	0,11
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,65	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06

Exp2C1C2OB1	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,02	-796,56	0,01	0,01	0,03	0,05	0,04	0,10
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,64	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,06

El experimento 2 es una mejora significativa, la desviación se ha reducido hasta lograr máximos de 3 centímetros tan solo y la oscilación de datos por los que se desarrolla este experimento se ve contenida a 11 centímetros en los puntos de control. Al igual que en el anterior experimento el caso de la trayectoria C2 es la que introduce los valores más altos.

Sin embargo a diferencia con el anterior experimento, este presenta valores más cercanos entre los puntos de control y los de apoyo. Con estos valores si podría darse el caso de ser un modelo válido para su utilización.

Total: Unidades en metros – (16 puntos de apoyo; 13 puntos de control)

TotalC1	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,01	-0,55	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,50	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,02

TotalC2	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,01	-0,55	0,02	0,02	0,03	0,08	0,05	0,10
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,55	0,01	0,01	0,01	0,04	0,05	0,03

TotalC1C2	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,01	-0,69	0,01	0,01	0,03	0,05	0,03	0,10
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-0,65	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04	0,05

TotalC1C2OB1	Ex	Ey	Ez	Epixel	Desviación Ex	Desviación Ey	Desviación Ez	Rango Ex	Rango Ey	Rango Ez
Check	0,00	0,00	0,01	-0,69	0,01	0,01	0,03	0,05	0,03	0,09
Apoyo	0,00	0,00	0,00	-92,28	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05

El experimento Total siendo el más completo con mejor calidad, desvela unos valores muy cercanos al experimentos dos, pero con mejora en la calidad de los resultados, los valores extremos de desviación típica y rango son 3 centímetros y 10 centímetros, respectivamente.

Se trata de un escenario mucho más realista, los valores de apoyo y control son prácticamente coincidentes, que es verdadero fin de estos ajustes. Estamos ante el experimento que mejor resultados está dando.

Tal como se describen en los estadísticos podemos sacar ciertas conclusiones:

- De los vuelos simples C1 y C2, es este segundo el que proporciona más errores al modelo y arrastrará peores resultados a la integración final, esto puede deberse a que C2 el número de pasadas es menor pero de una mayor distancia que en C1, debido a su sentido de avance y geometría de la cantera. Así pues lo recomendable es realizar la trayectorias del dron en sentido perpendicular a la dirección longitudinal más extensa del polígono de estudio, haciendo un mayor número de pasadas de menor distancia.
- En las combinaciones de dos o tres trayectorias, los resultados son muy parecidos, dando una pequeña mejora en el que engloba las tres trazas. Estos resultados desemboca en dos supuestos:
 - Por un lado, el vuelo oblicuo tiene una cobertura muy baja y la mejora que obtenemos es poco apreciable respecto a lo que podría magnificarse de aumentar la muestra de datos.
 - Por otro lado, el tiempo empleado para la realización del vuelo oblicuo no es consecuente con el esfuerzo y los beneficios obtenidos.

A continuación, se procede a la representación espacial de los residuos. Podremos ver que configuración es la que introduce mayor error a los modelos, interpretar a partir de que distancia entre apoyos comienza la agrupación de los errores, cómo se modifican los errores según se colocan los puntos de apoyo en sus cercanías y como contribuyen.

Se pretende dar respuesta a la cuestión, de cuál sería el apoyo mínimo necesario para poder sacar adelante un estudio, teniendo en cuenta que se busca optimizar los tiempos de ejecución y así mismo abaratar costes lo máximo posible.

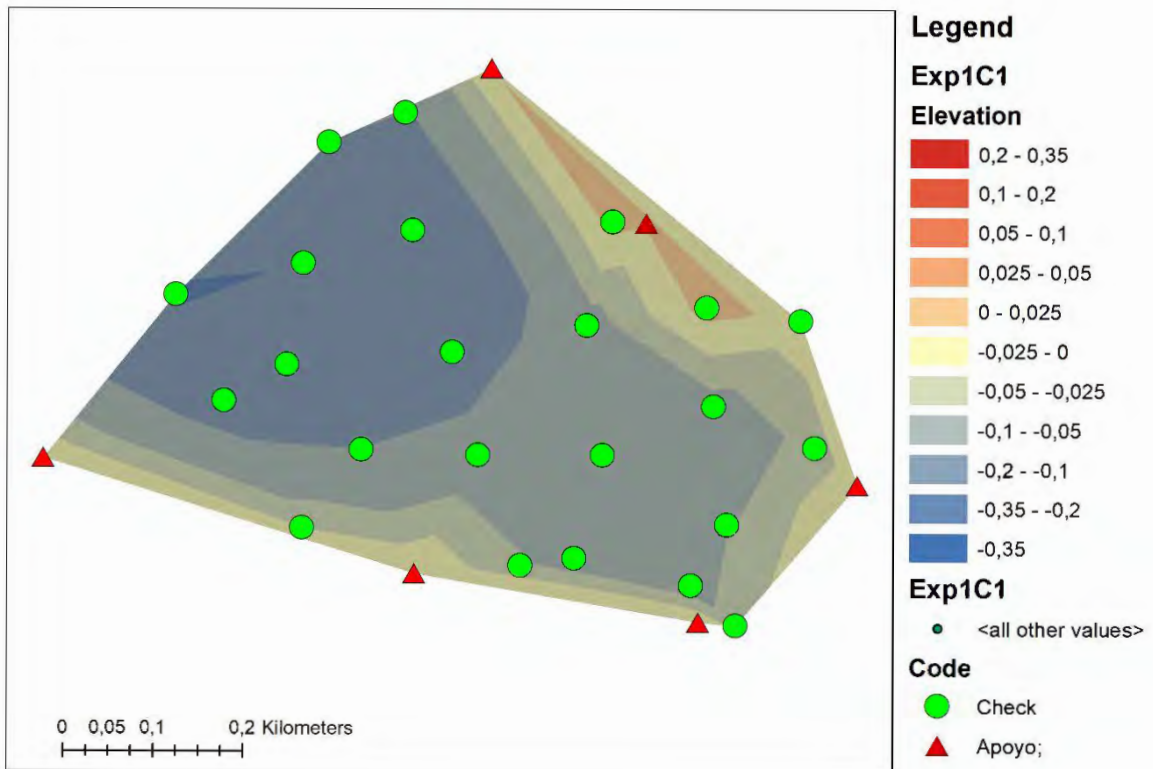


Ilustración 26 - Exp1C1

Residuos importantes en C1, con una tendencia clara tipicamente negativos, los máximos residuos se localizan en la zona central donde hay la mayor distancia entre puntos de apoyo del recinto.

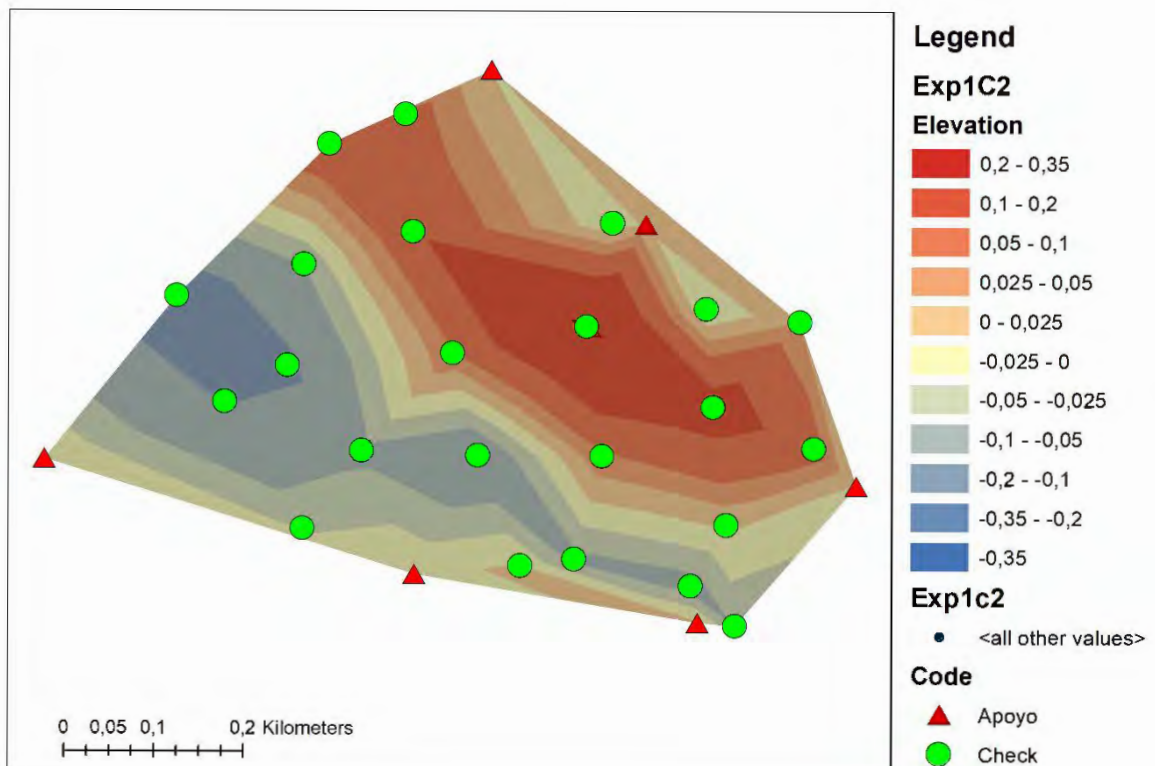


Ilustración 27 - Exp1C2

Se siguen dando residuos importantes en C2 con una tendencia a valores cercanos a 2.5 cm abarcando sentido positivo y negativo. A diferencia del anterior caso podemos ver que el sentido de los residuos cambia, para expandirse a lo largo de la dirección de las pasadas.

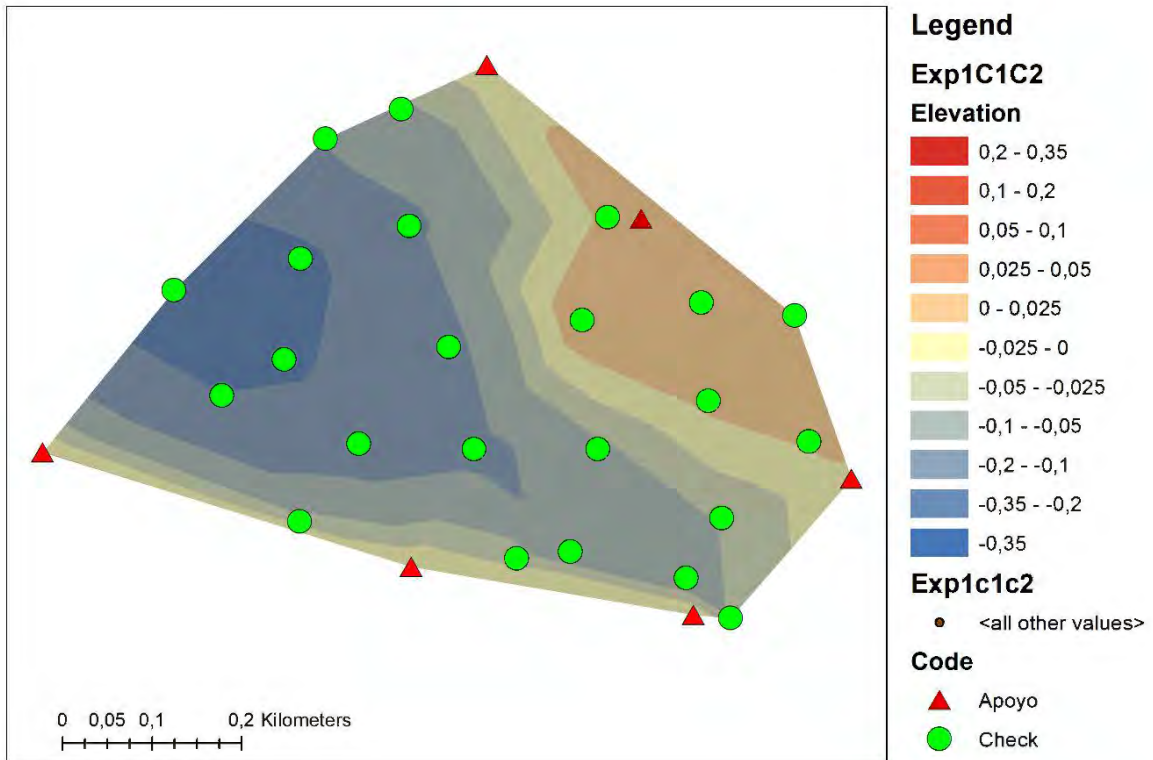


Ilustración 28- Exp1C1C2

La combinación de C1 + C2 introduce una leve disminución en los residuos, según la distribución se puede interpretar una mayor influencia del vuelo C1 en los resultados. Se puede ver que sigue habiendo una tendencia imperando los residuos negativos sobre los positivos.

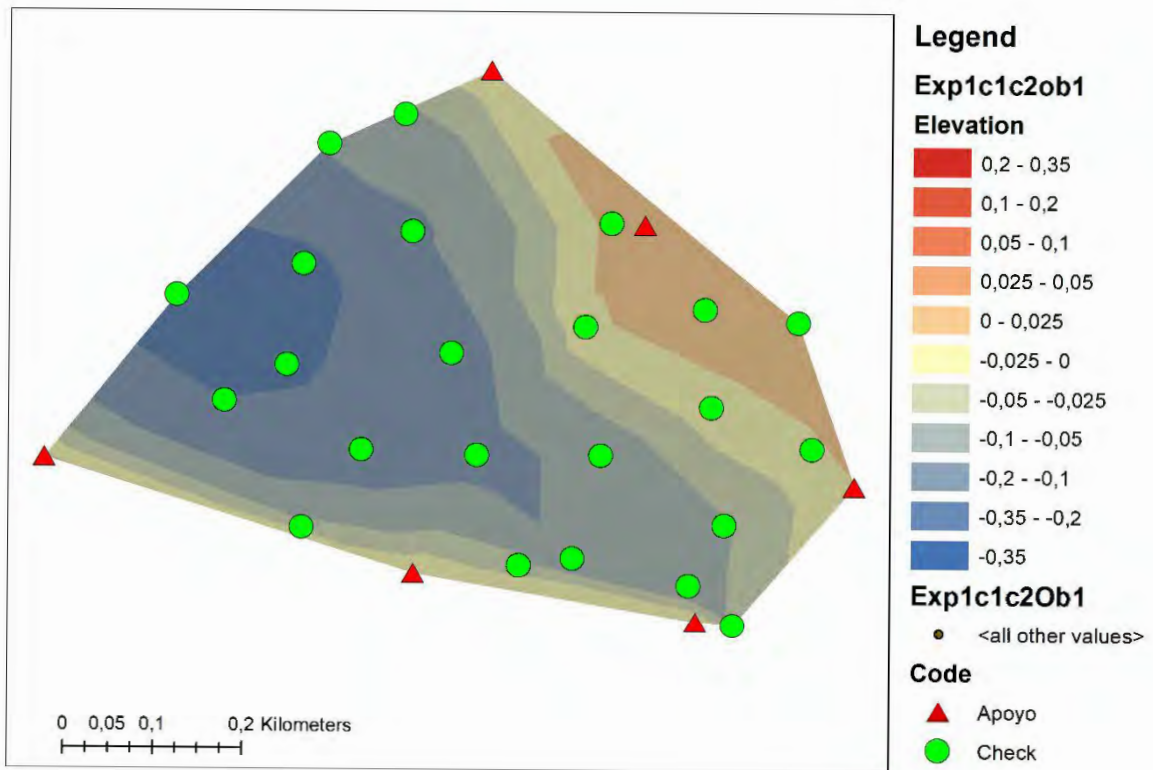


Ilustración 29 - ExpC1C2OB1

La suma de todas las trayectorias refleja una distribución muy parecida a la de C1 + C2, no hay diferencias significativas respecto al caso anterior.

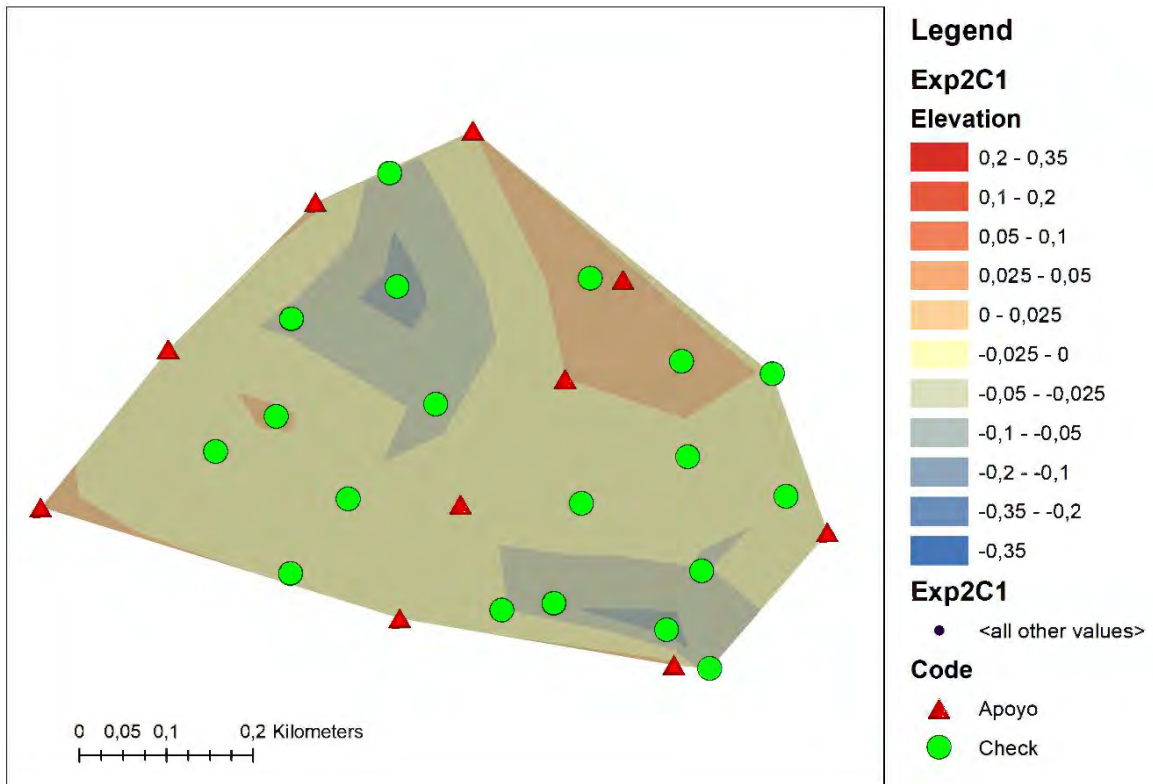


Ilustración 30 - Exp2C1

La incorporación de puntos de apoyo en todo el perímetro y en el interior de la zona central, hace que la distribución sea más homogénea, con una tendencia de residuos cercanos al cero.

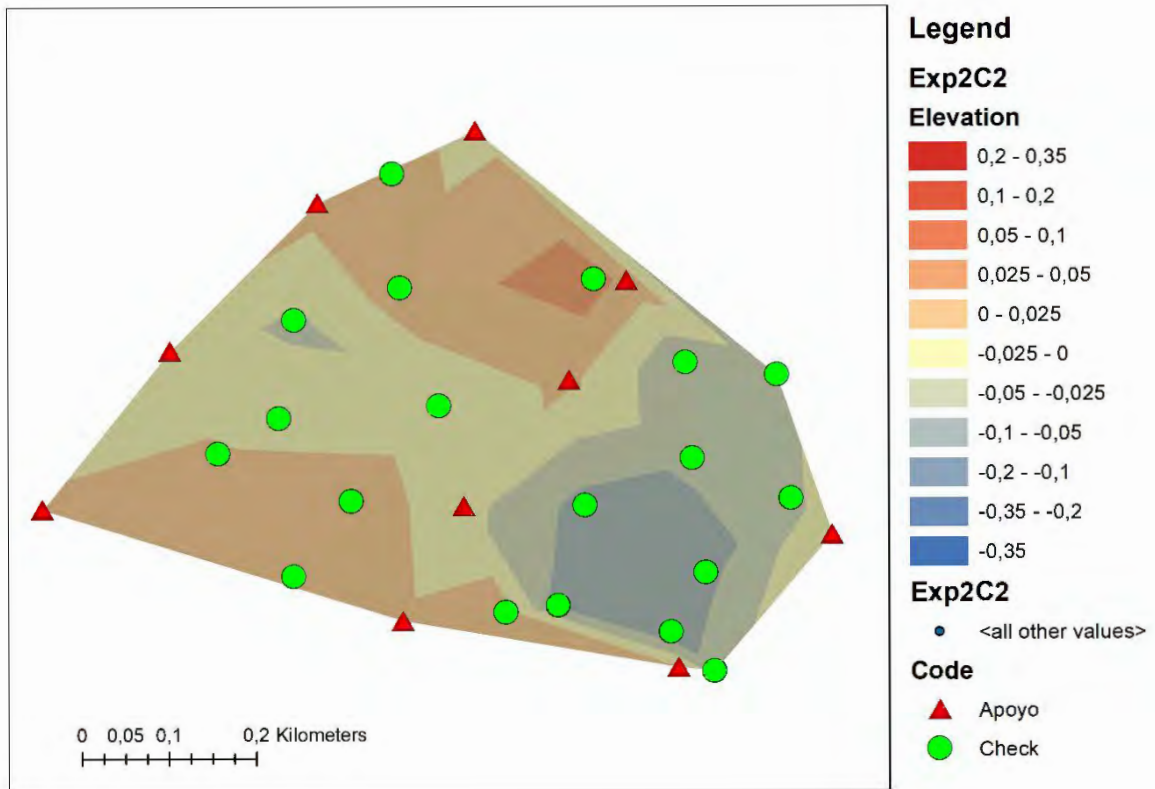


Ilustración 31 - Exp2C2

En C2 la mejora es similar al caso anterior la introducción de más puntos de apoyos, sobre todo los del interior de la zona central hace que la distribución sea mucho más homogénea que en el experimento 1.

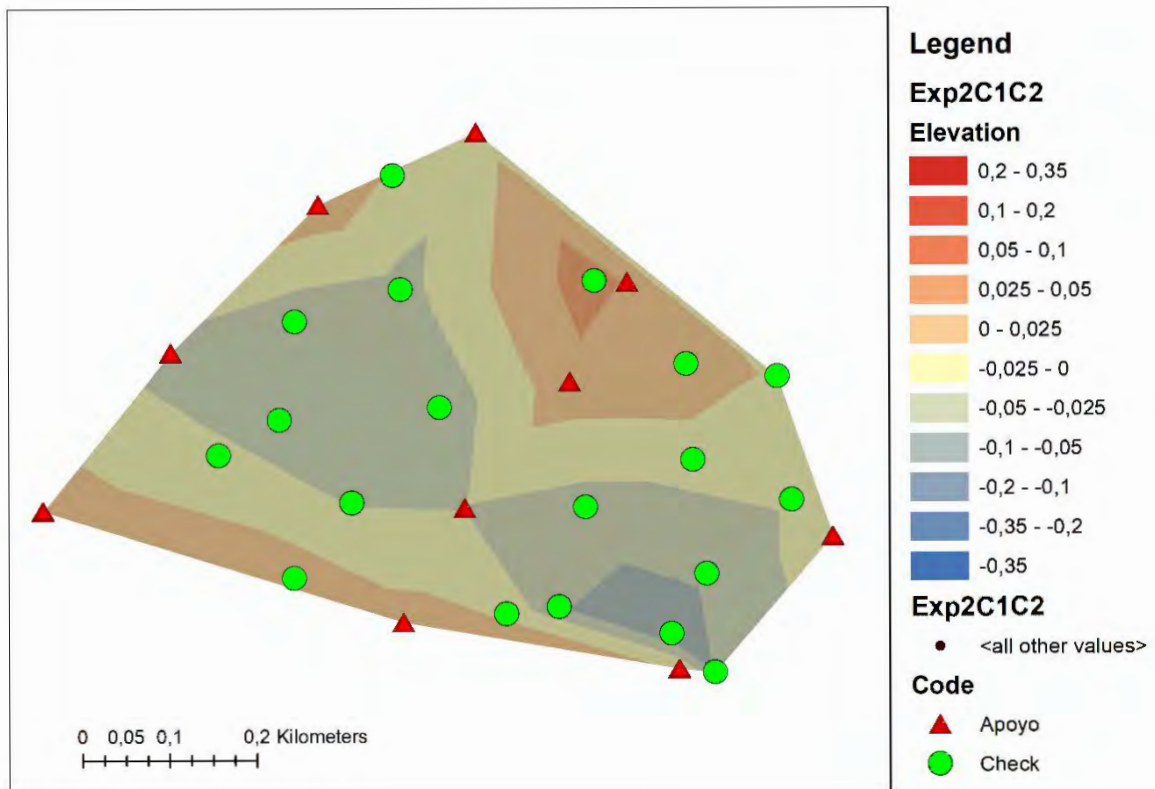


Ilustración 32 - Exp2C1C2

En la suma de las trayectorias se contempla una distribución muy regular con tendencia residuos de valores muy proximos al cero. Se pueden observar una division entre izquierda y derecha de los valores negativos siendo la izquierda de origen C1 y derecha inferior por C2.

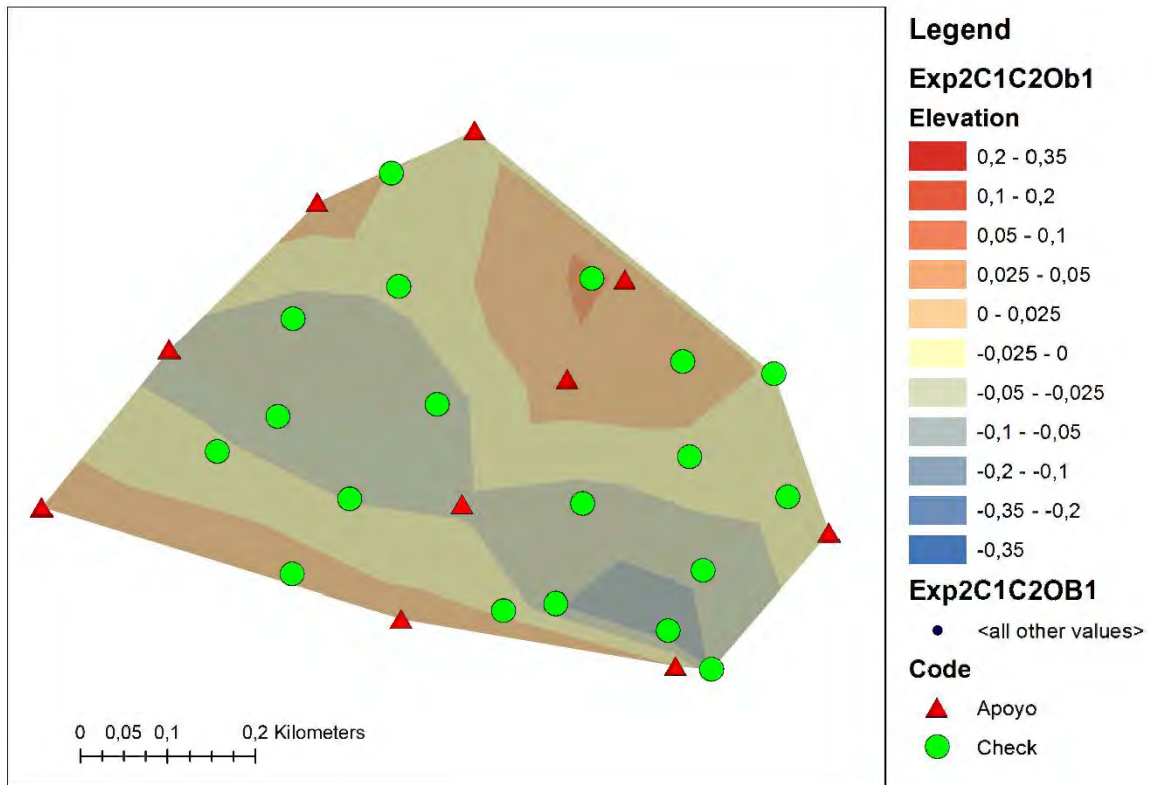


Ilustración 33 – Exp2C1C2OB1

Resultado igual que en el caso anterior, de la misma forma que interpretamos en el experimento 1. Se puede apreciar en detalle, una disminución de residuos sobre los taludes tratados con el vuelo oblicuo, como aspecto de mejora.

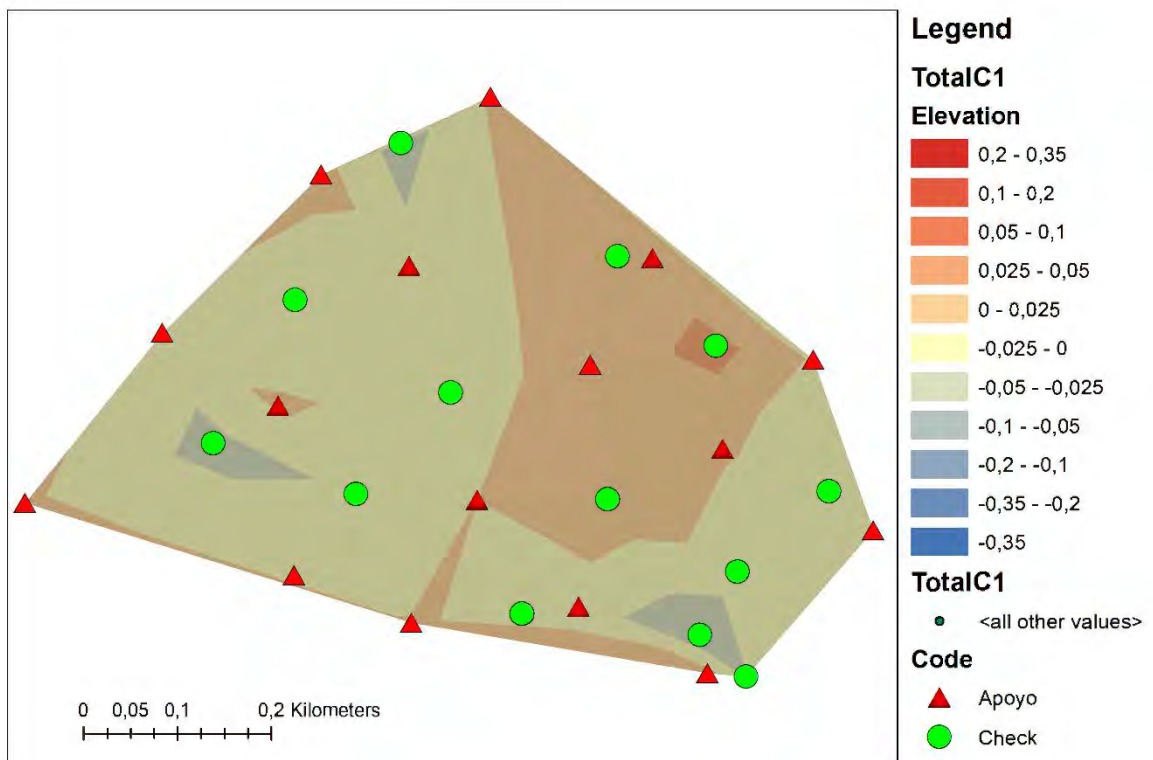


Ilustración 34 - TotalC1

Para el desarrollo de este último escenario, los resultados que nos ofrecen son residuos mínimos, donde los errores no muestran sistematismos significativos.

A tener en cuenta respecto al experimento 1 donde los residuos negativos cubrían con superioridad el recinto, podemos observar que para el experimento total, con el completo de apoyos de la superficie, la distribución incorpora muy pocos residuos negativos, proliferando los intermedios.

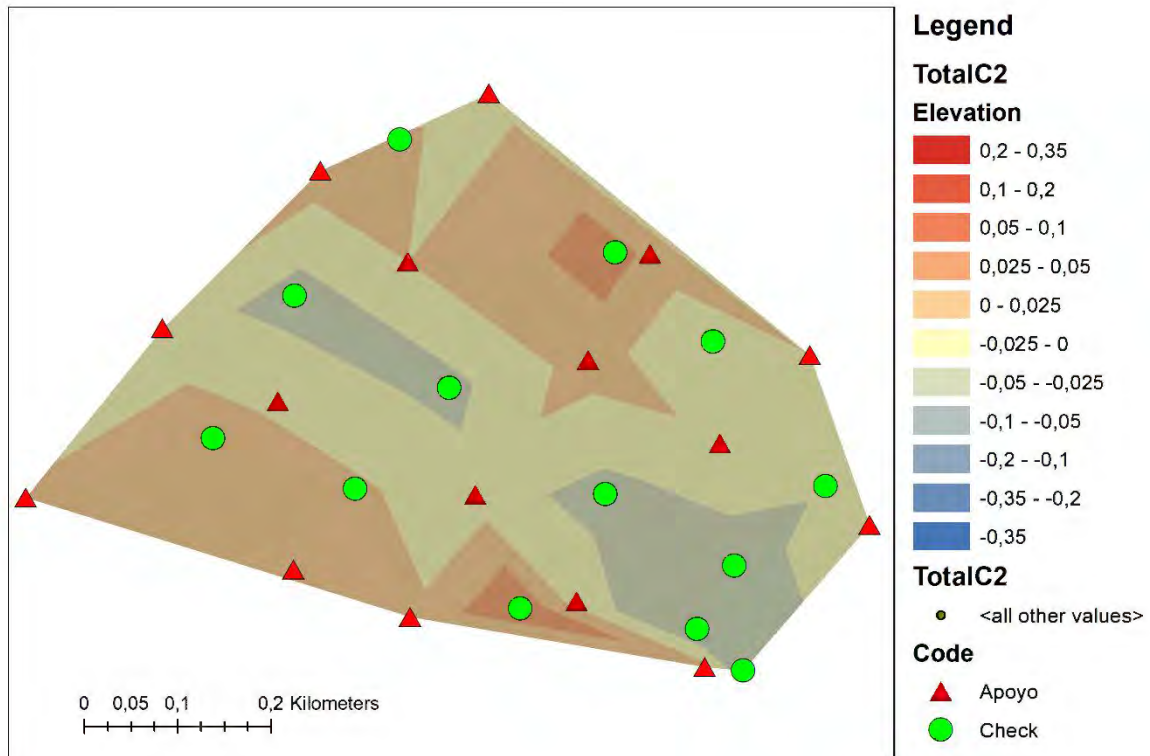


Ilustración 35 - TotalC2

En C2 se puede contemplar cierto sistematismo, influencia de la dirección de las pasadas, manteniendo las trazas “horizontales” de sus residuos.

La claridad de los colores denomina una reducción, representativa de la mejora de los apoyos sobre el campo.

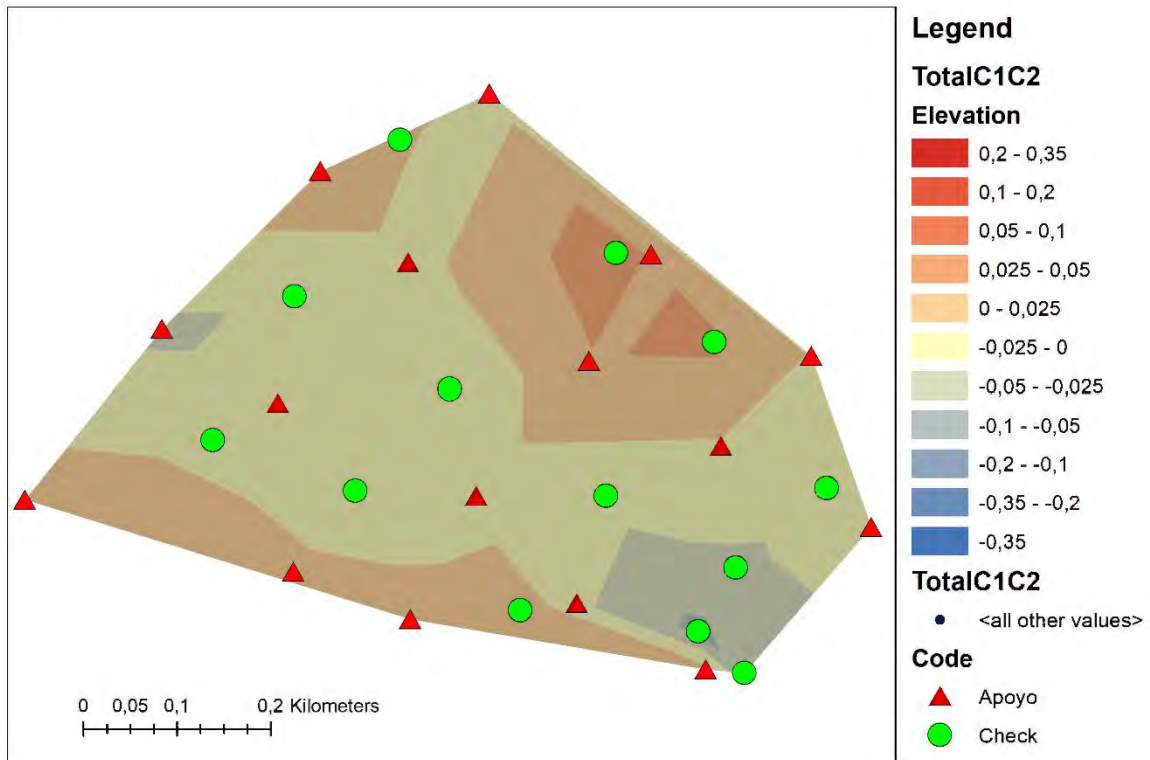


Ilustración 36 -TotalC1C2

Es aquí con la unión de ambas trayectorias simples y con el conjunto total de los apoyos donde se llega a apreciar la tendencia hacia los colores mas suaves de una forma muy homogénea.

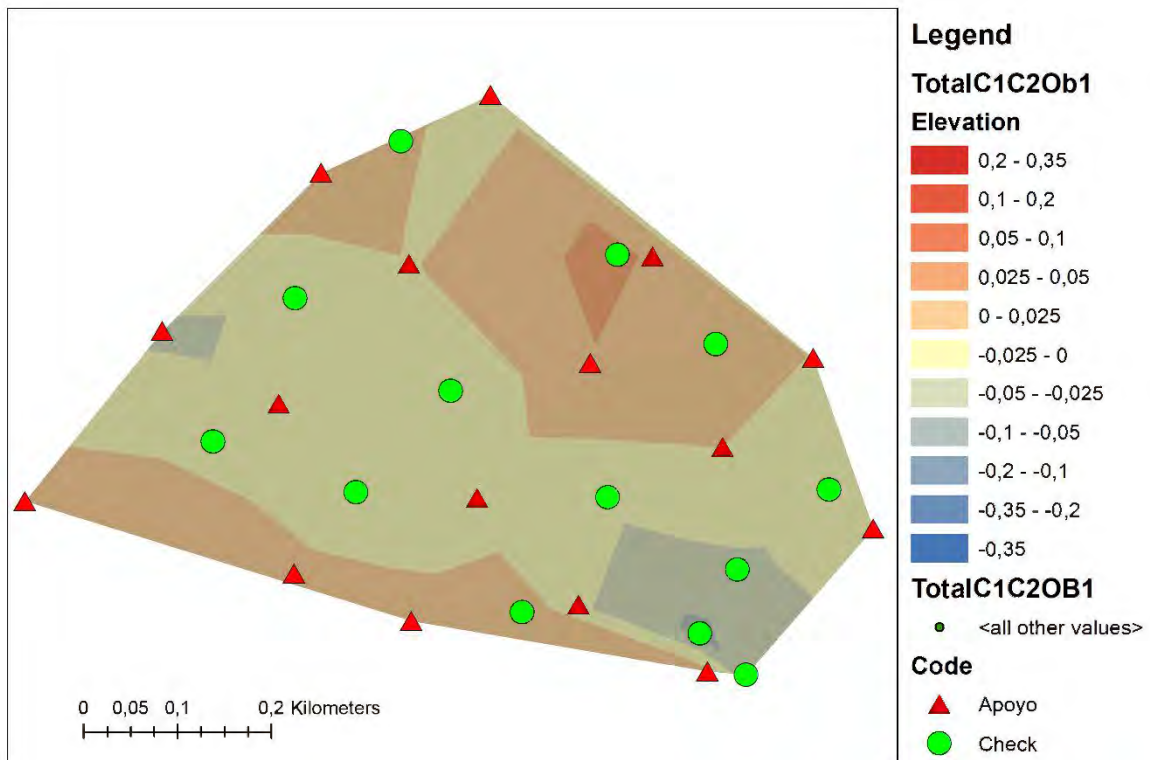


Ilustración 37 - TotalC1C2Ob1

Finalmente siguiendo la progresión en este experimento llegamos a las mismas conclusiones que en los anteriores con la combinación de las tres trayectorias unificadas.

A nivel de experimentos destacar que la creencia inicial de que el experimento denominado total debería ser el que menos errores introduciría en el modelo es cierta, sin embargo las diferencias en comparación con el experimento 2 son insignificantes, siendo el experimento 2 un resultado satisfactorio ante todo.

Por lo cual, podemos decir que un apoyo mínimo en los extremos con tan solo 6 apoyos no es una buena opción, los puntos de control han dado residuos de errores muy altos comparandolos con los obtenidos por los puntos de apoyo, las discrepancias eran muy altas. Lo que si podemos sacar de conclusión es que con el control de la zona perimetral del área de trabajo y controlando la zona central mejora notablemente los errores que abarcan al modelo.

La mejora relacionado con la incorporación del perímetro exterior y la zona intermedia del centro es muy clara, frente a un apoyo mínimo en los extremos y podría llegar a darse por buena, los resultados son satisfactorios, sin embargo, los residuos que hemos obtenido con la incorporación de una desinfección de apoyos (experimento total) revela que el resultado óptimo esperado se da con ese caso.

Las conclusiones que obtenemos evaluando los datos graficos:

- C1 arroja mejores resultados que C2.
- El experimento 2 y el Total, dan resultados bastante parecidos.
- En las combinaciones del Experimento 1 se puede apreciar como se localizan los errores en las ubicaciones donde las distancias entre puntos de apoyos, son mayor longitud.
- En el experimento 2 al introducir el perímetro como apoyo, la zona izquierda reduce de forma considerable el valor del error, al igual que en la zona central donde ahora si hay puntos de apoyo.
- El apoyo mínimo que es el experimento 1, con apoyos solo en los extremos no es bueno, pero es muy mejorable tan solo con marcar el perímetro y controlar la zona central, los resultados son mucho mejores.

El mejor caso para realizar un modelo debe ser un sistema densificado de apoyos como hemos interpretado en el experimento total, donde nos han revelado los resultados más óptimos.

En el caso de no poder realizar una densificación exhaustiva, como hemos podido ver en el experimento 2, lo conveniente sería marcar por completo el perímetro de la zona de estudio e intentar controlar la zonas intermedias mediante apoyos centrales haciendo que los puntos interpolados no sean muy lejanos entre si.

7.2. NUBE DE PUNTOS

Una vez ejecutada la orientación absoluta de los modelos, se procede a la densificación del modelo, el producto resultado llevado a cabo por el software Pix4d es una inmensa nube de puntos, englobando un conjunto de alrededor de 78 millones de puntos. En cada proceso combinatorio se ha obtenido una nube de puntos particular para cada caso.

El paso lógico es el de analizar cada nube de puntos individualmente sin editarla para así detectar posibles diferencias entre los modelos, se podrían dar zonas sin información donde no debiera, superposición de puntos, mal interpretación de coordenadas y elevaciones que hacen que el modelo sea incorrecto.

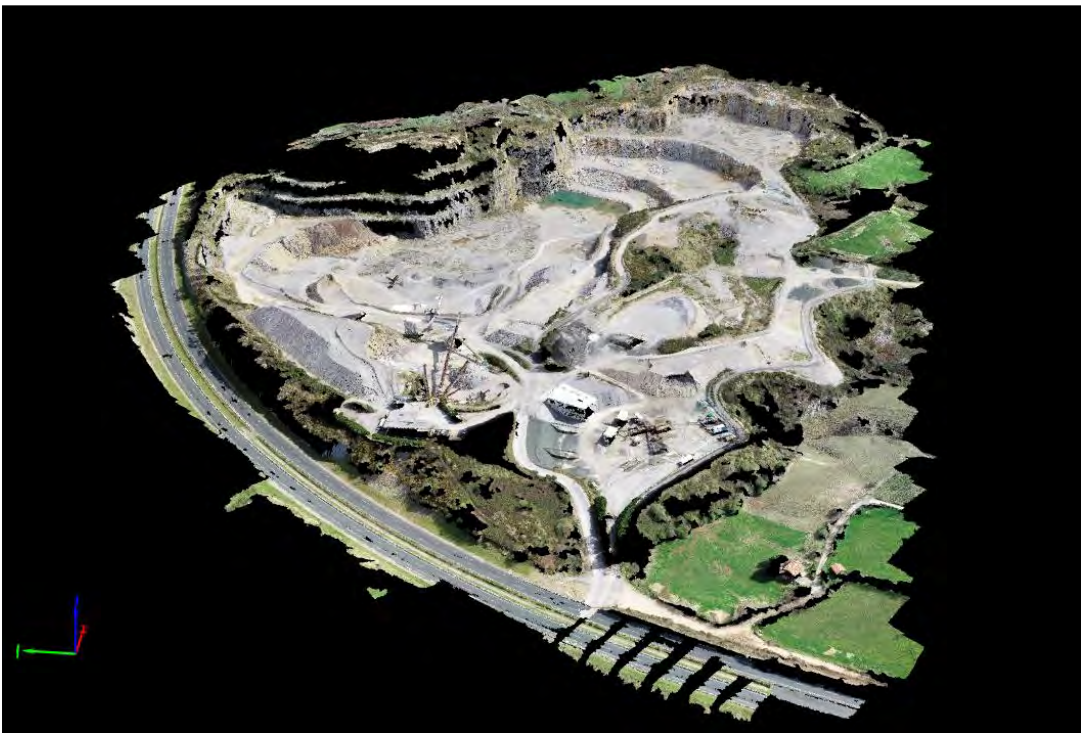


Ilustración 38 - Nube de puntos C1

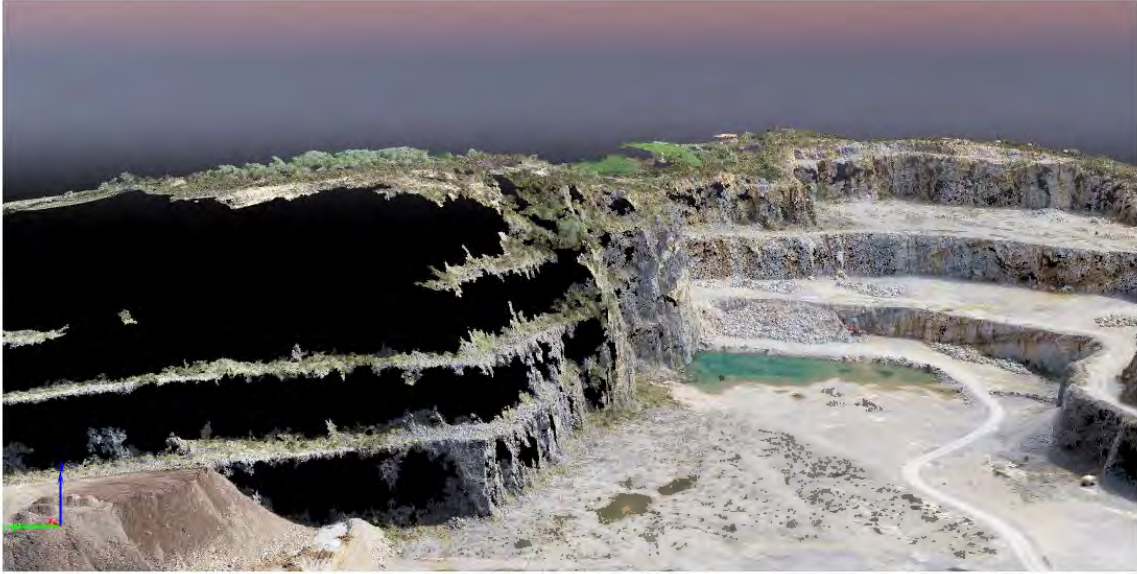


Ilustración 39 -Detalle 1 Nube de puntos C1

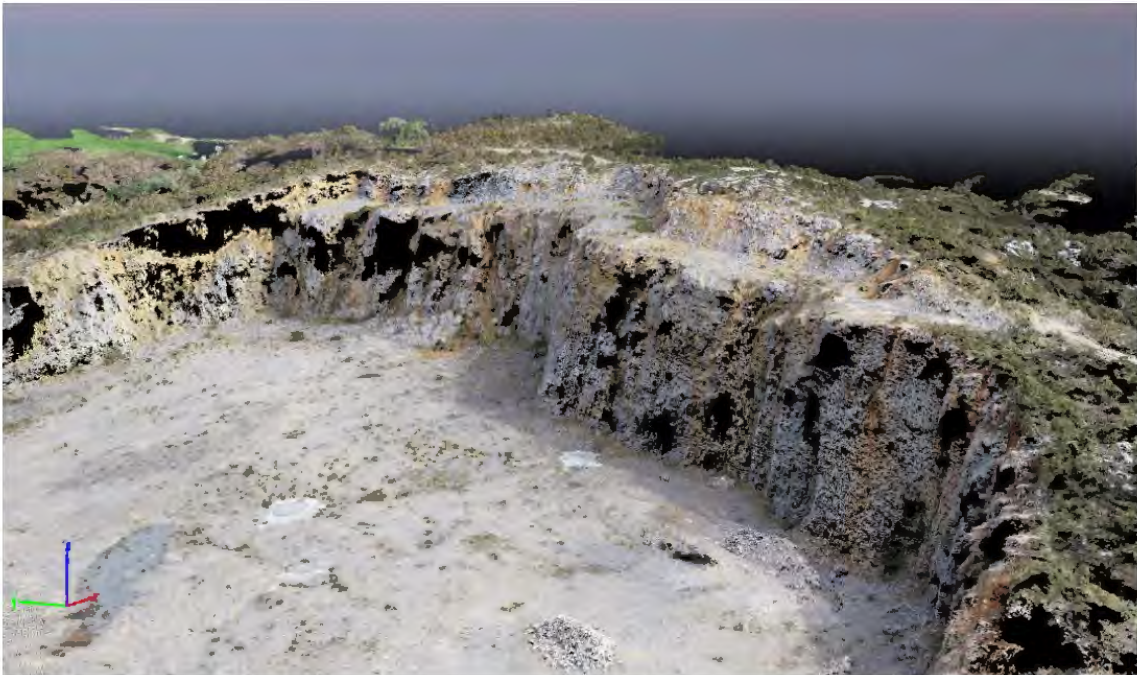


Ilustración 40 - Detalle 2 Nube de puntos C1

Apreciando la nube de puntos resuelta tras el vuelo C1, en cualquiera de sus experimentos, podemos determinar que al tratarse de un vuelo en una única dirección resalta rápidamente la falta de información que tiene el modelo. Esta falta de información es producida por las ocultaciones que ocasiona el propio terreno, el problema se da en zonas con paredes muy verticales donde las fotografías verticales no son capaces de diferenciar todos los puntos de la vertical para darles a cada uno de ellos una Z y se ocasionan las sombras que no es más que falta de información.

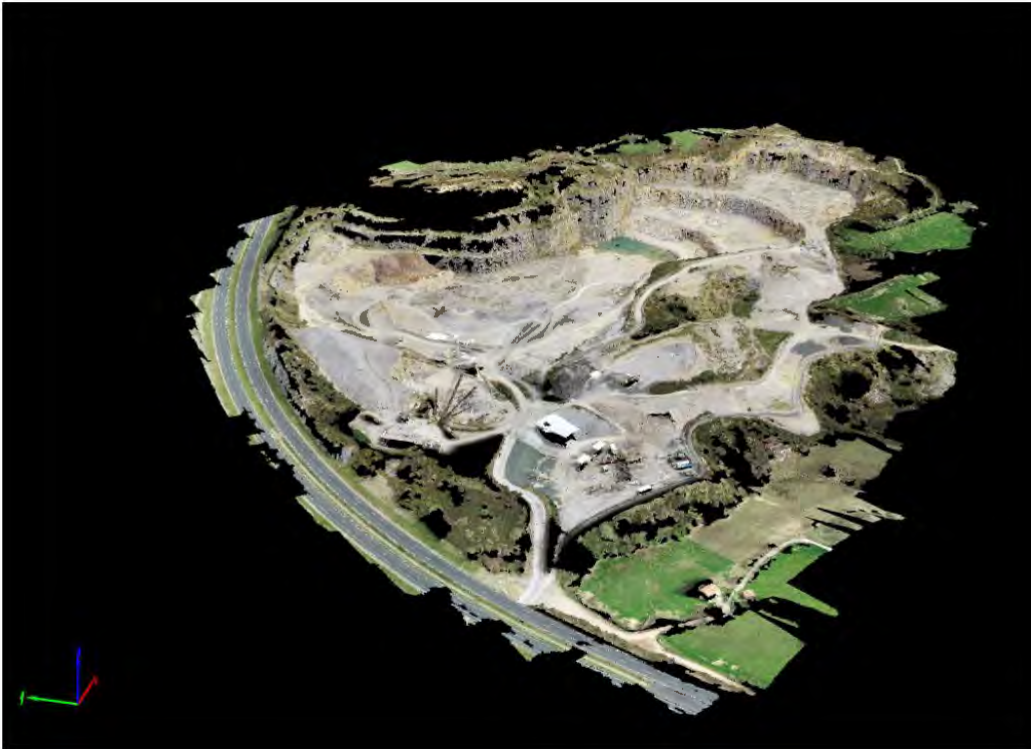


Ilustración 41 - Nube de puntos C2

Del mismo modo que ocurre con el vuelo en C1, ahora en la trayectoria C2 también serán representativas las sombras en las nubes de puntos. Cabe enfatizar que estos detalles no han de ser catalogados como errores sino como falta de información.

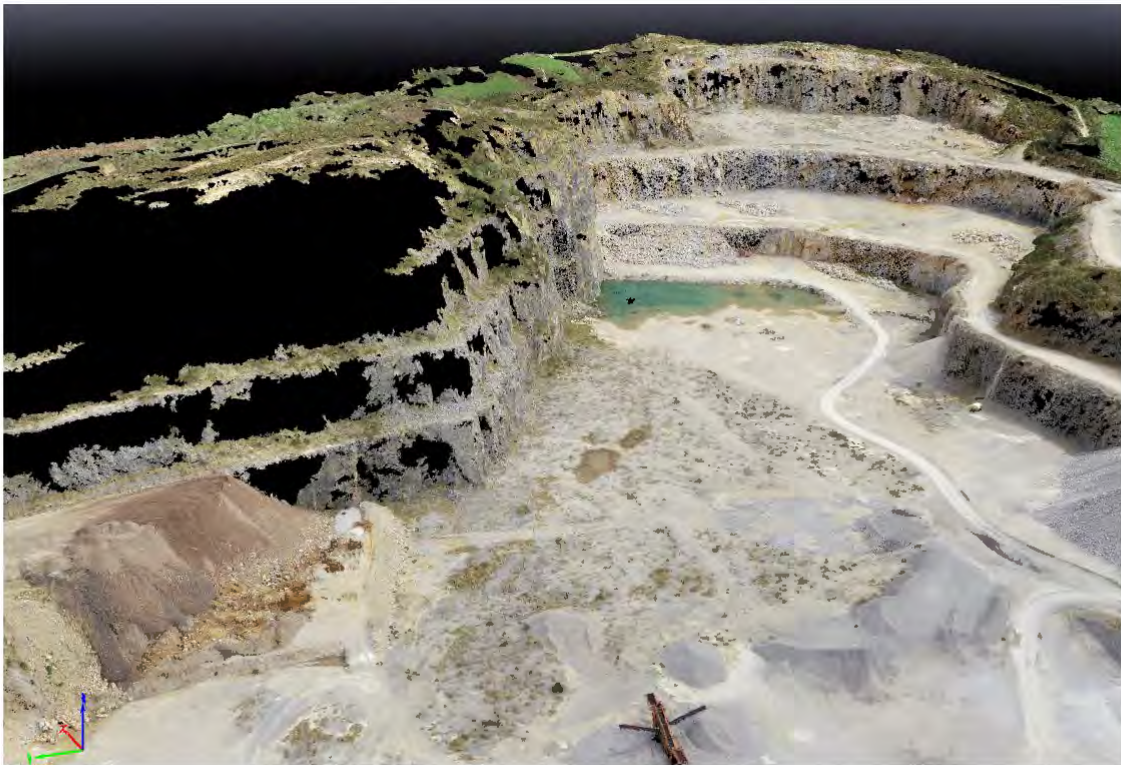


Ilustración 42 - Detalle 1 Nube de puntos C2

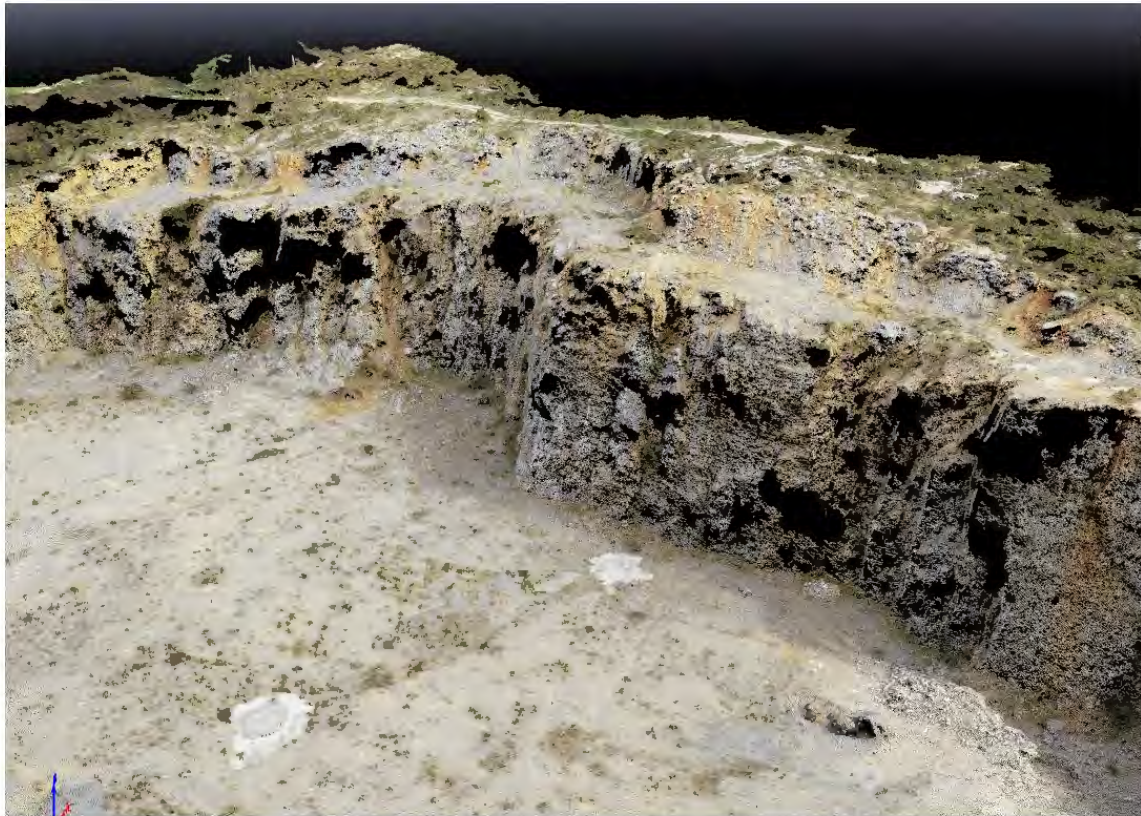


Ilustración 43 - Detalle 2 Nube de puntos C2

Los fallos que vemos en los modelos se localizan en los taludes verticales, podemos apreciar que dependiendo de la dirección del vuelo los hay una influencia en los tipos de sombras que se originan, no son iguales. Con ello podemos llegar a pesar de que según la dirección del talud los errores que cometa el modelo serán influenciados según la trayectoria que lleve la aeronave.

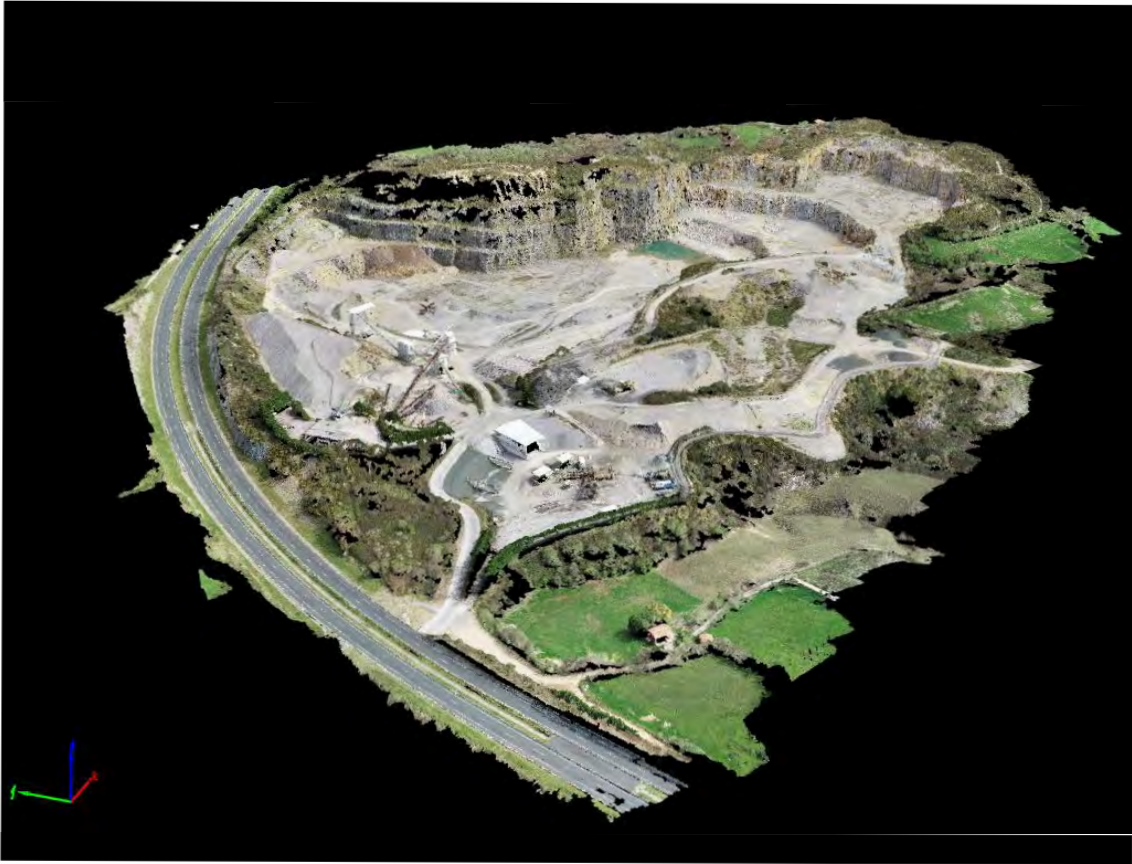


Ilustración 44 - Nube de puntos C1C2

Las sombras que hay en C1 y C2 son diferentes, pueden tener alguna zona en común en la que no se pueda dar ningún dato, pero al tratarse de vuelos prácticamente perpendiculares entre sí, la cámara ha captado imágenes desde diferentes perspectivas y distancias de las mismas zonas pudiendo representar espacios que no aparecían desde otro punto de vista. Las trayectorias de los vuelos son sensiblemente paralelas a los pies de los taludes, con el fin de mejorar la captación de detalles, dada la geometría de la cantera los vuelos entre si son casi perpendiculares.

Sabiendo que en vuelos en una única dirección con taludes verticales como los presentes en la cantera podrían dar este tipo de entresijos, dio lugar al planteamiento de fusionar las dos pasadas perpendiculares entre sí, con la intención de combinar ambas trayectorias y eliminar las sombras en la mayor parte de los sitios posibles.



Ilustración 45 - Detalle Nube de puntos C1C2

La combinación de C1+C2 en un principio es la que otorgará los menores residuos para generar el modelo como resultado final, sin embargo, en esta combinación de vuelos cruzados simples aún sigue habiendo grandes zonas, como anteriormente en los taludes más altos, donde hay falta de información. Como partida en la búsqueda de una mejora en este aspecto, se había decidido previamente, realizar algún vuelo de trayectoria libre en las zonas más propensas a estos resultados, pero con el añadido de establecer un ángulo en la toma de imágenes diferente a la cenital, más horizontal, para así tomar imágenes más directas al frente del talud, intentando subsanar el problema de la verticalidad de las imágenes en estas zonas.

La resolución de la combinación C1+C2 aporta un muy buen modelo, dando lugar a unos resultados muy aceptables en los experimentos 2 y total.



Ilustración 46 - Nube de puntos C1C2OB1

La aportación de la trayectoria oblicua no deja claro si se trata de un buen resultado o no, debido a que la cantidad de fotografías establecidas para este caso son escasas, por lo que la mejoría que vemos en la nube puntos es mínima, compararemos directamente los modelos digitales del terreno entre ellos para poder contemplar diferencias significativas. En oposición a esta mejora cabe destacar que una incorrecta colocación del ángulo de visión de la cámara hace entorpecer el flujo de trabajo y la clasificación de puntos en el trazado oblicuo, teniendo que editar y corregir los puntos captado por cielo de las imágenes.



Ilustración 47 - Detalle oblicuo

El objetivo principal de la introducción de la trayectoria oblicua es la de determinar si este tipo de metodología mejora la respuesta de los modelos en la zona de taludes verticales.

En los modelos digitales de terreno los perfiles de los taludes son los puntos críticos a tener en cuenta al modelizar. Las herramientas que se tienen para la ejecución de este tipo de metodología, no resuelve bien en estas zonas. Con el fin de dar solución a este problema, se planteó realizar una trayectoria en la que la cámara fotográfica estuviese en una dirección oblicua, sobre los frentes de taludes que podrían acarrear más problemas.

El fin de esta pequeña investigación sobre las trayectorias con ángulo oblicuo recae en determinar en caso de ser favorable, cuál de estas dos situaciones sería conveniente el uso de esta metodología de trayectorias:

- Uso de trayectoria libre oblicua únicamente, eliminando la toma de imágenes de forma convencional en las zonas de taludes verticales.
- Uso combinado de trayectoria oblicua junto con toma de imágenes cenital convencional en la zona de taludes verticales.

Sólo con el contraste de la nube de puntos transformadas en modelos digitales del terreno entre C1+C2 y C1+C2+OB1 se podrá apreciar correctamente cuanto de mejor es una nube de puntos sobre otra.

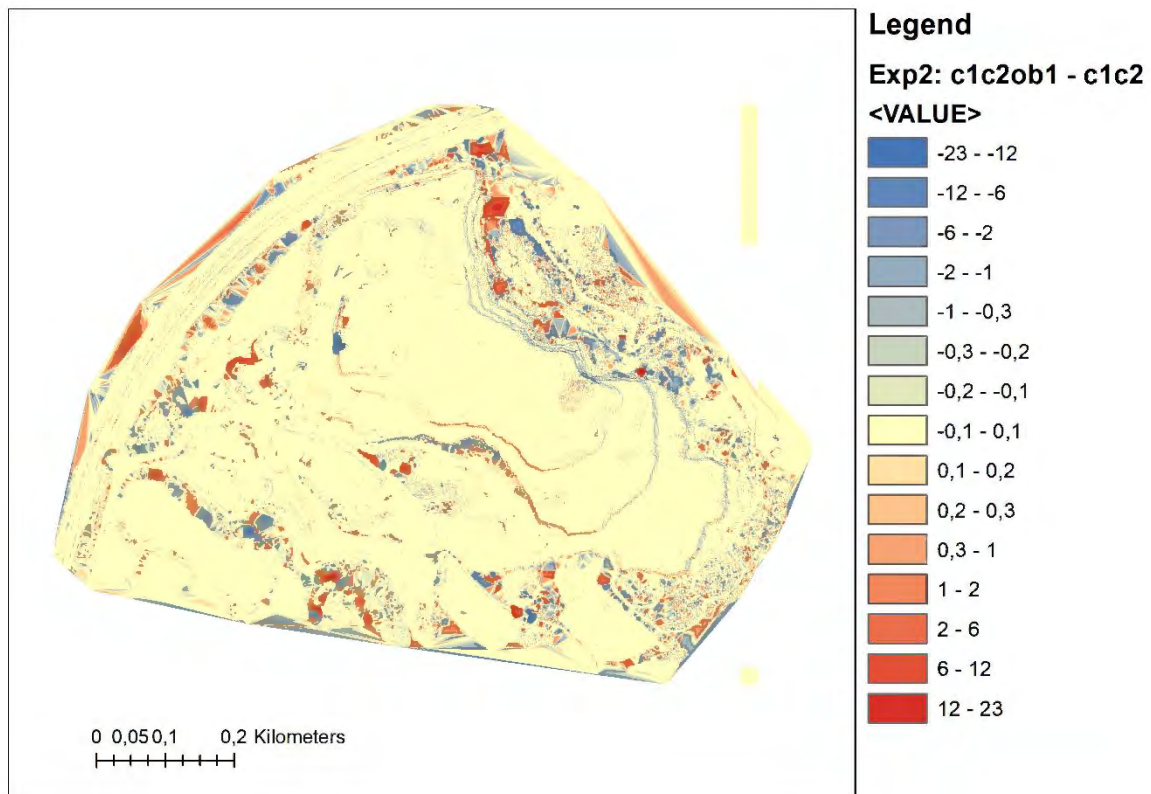


Ilustración 48 - Contraste C1C2 Y C1C2OB1

Como se puede apreciar en el contraste de MDT entre C1+C2 y C1+C2+OB, ambos modelos en las zonas donde no están los taludes son idénticas, son las áreas donde mejor responde la creación de MDT.

A la hora de contrastar estos casos, toda la zona que no sea donde ha tenido incidencia la trayectoria oblicua debería ser igual, puesto que las imágenes de esa trayectoria solo enfocan a los taludes enfrentados. Como se puede apreciar, esta afirmación no es correcta por lo que nos lleva a pensar en que ha podido haber un problema en la clasificación de puntos de alguna de las nubes de puntos o en la edición de las superficies, generando discrepancias donde no las debería haber.

Como ya reflejaron los resultados en el control descriptivo de los apoyos, la trayectoria oblicua dada la situación ante la que nos encontramos, no es efectiva para usarla como combinación junto con la toma de imágenes cenitales, ni mucho menos para el uso como alternativa a la metodología convencional de fotografía cenital. Es necesario hacer hincapié que estos resultados son en base a la situación específica en la que nos encontramos, no sería cierta la extrapolación a cualquier vuelo oblicuo sobre taludes de canteras u otras superficies donde podrían ser favorables los resultados.

Para su correcta interpretación habría que contrastar este tipo de experimento de vuelos oblicuos con otros casos. Para futuras investigaciones de vuelos oblicuos, la experiencia nos da unas pautas a seguir, con la que se cree que mejoraríamos los resultados notablemente:

- Mayor muestra de imágenes
- No hacer una trayectoria libre, planificar una trayectoria según el frente del talud
- Ajustar el ángulo de la cámara para no tomar imágenes del cielo.

De modo que la traza de vuelo que nos indica la trayectoria más favorable para la modelización sería la combinación de vuelos cruzados C1 + C2.

A continuación, se dispondrá la comparativa entre modelos de distribución de apoyos, oponiendo el experimento uno y dos sobre el total, que como en un principio se dijo debería ser el más completo y el cual lo tomamos de referencia, para así comparar uniformemente las diferencias en los apoyos.

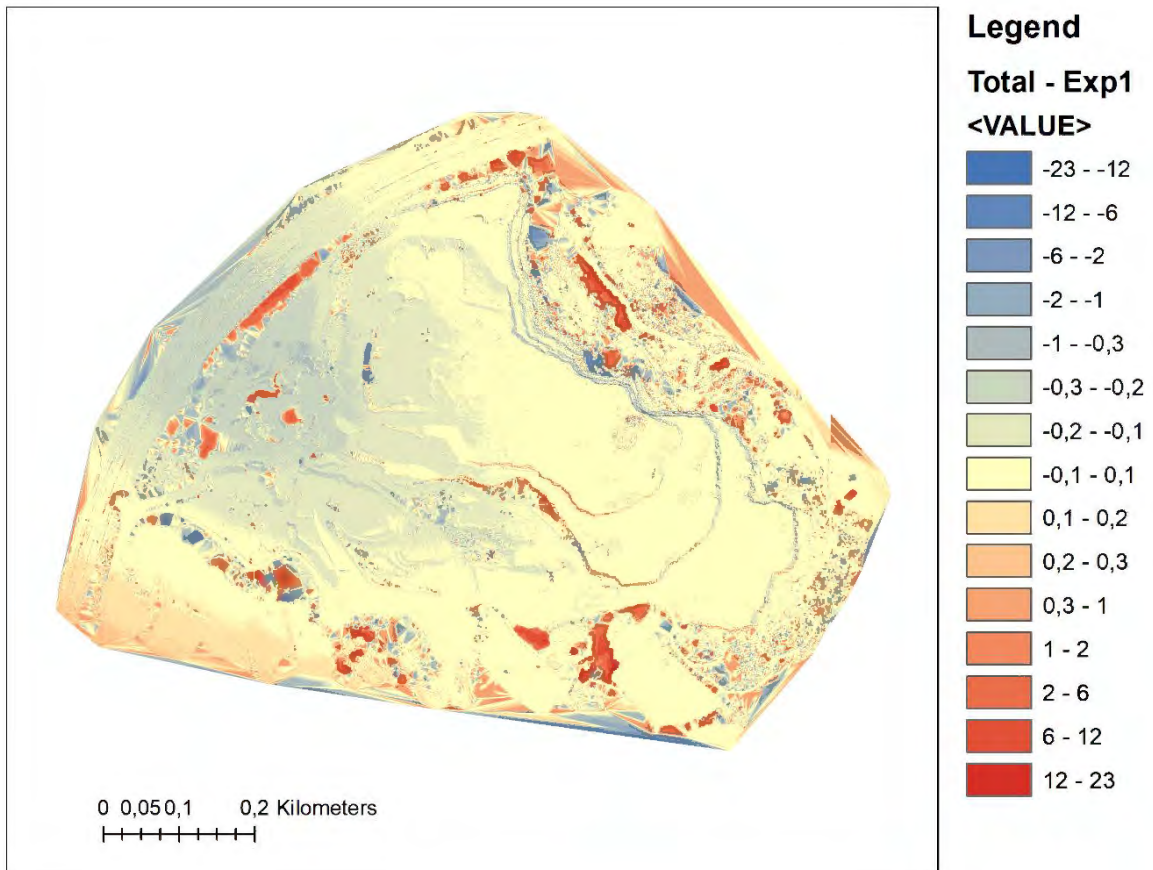


Ilustración 49 - Contraste Exp1 y Total

La comparativa revela una discrepancia de residuos negativos, por influencia del experimento 1 en zonas donde no debería haber tal diferencia de valores, ya que son zonas relativamente planas que tendrían que ser idénticas.

El apoyo mínimo de 6 puntos realizado en el experimento 1 concluye siendo una ineficiente opción a la hora de realizar un MDT, como habíamos podido percibir anteriormente.

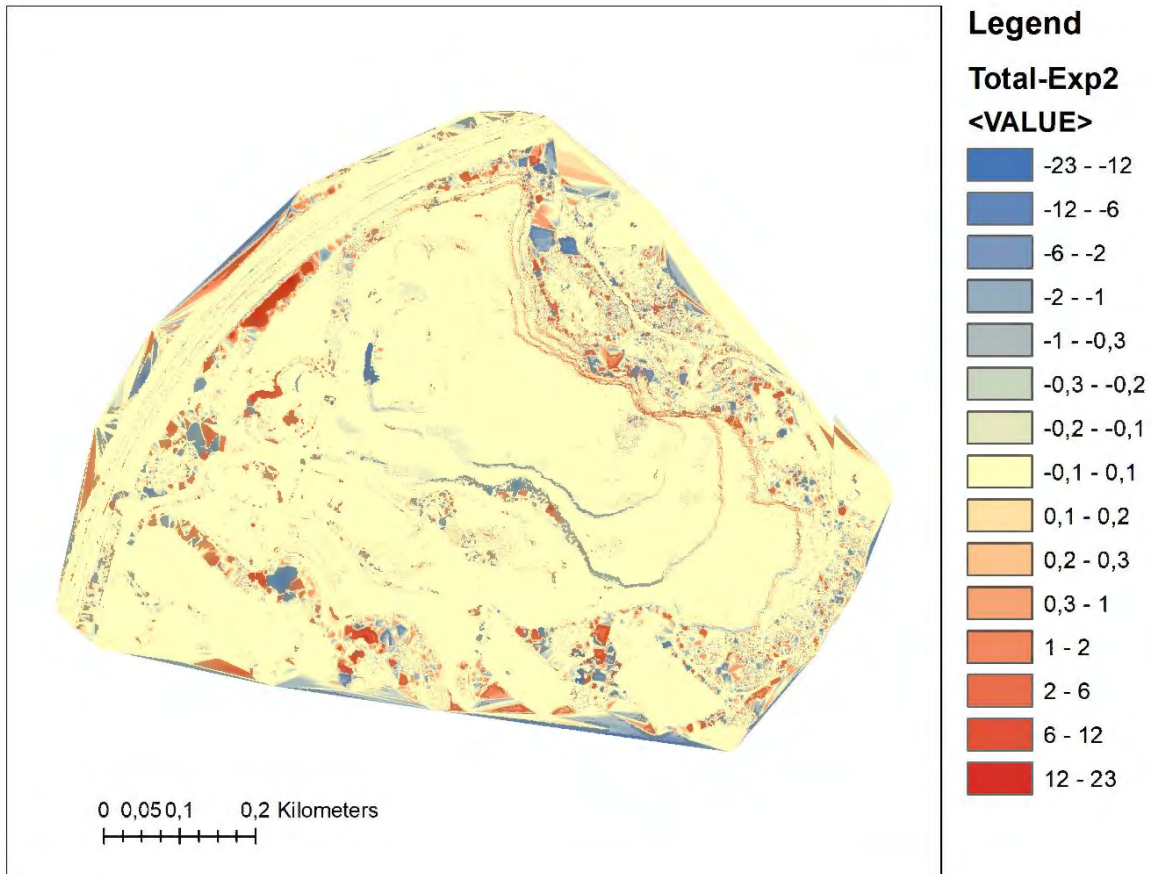


Ilustración 50 - Contraste Exp2 y Total

Como ya se había descrito con los estadísticos, el contraste entre el experimento dos y el total son muy parejos, podemos percibir una tendencia de colores claros por toda la superficie plana de la cantera, lo refleja una similitud exacta de ambos modelos.

Los taludes ofrecen residuos de mayor valor sobre todo en la zona de los taludes enfrentados, esto desemboca en un claro resultado a favor del experimento total con toda la densificación de puntos de apoyos.

7.3. PERFILES

En una cantera a la hora de realizar una cubicación se busca tener perfectamente controlado la línea del perfil de los taludes. Como hemos podido comprobar en apartados anteriores los modelos digitales del terreno (MDT) no son nada preciosos a la hora de interpretar los perfiles de los taludes.

Para poder alcanzar un grado de control sobre los taludes, convencionalmente usaríamos una estación total y realizar las mediciones in situ. Por el contrario, en esta actividad que se nos acontece usaremos nuestra propia nube de puntos, que hemos obtenido con anterioridad y la usaremos como herramienta en la obtención de perfiles longitudinales como resultado final.

El bruto de la nube de puntos obtenida puede acarrear ciertos errores producidos en la automatización de la clasificación de puntos, por ello suele ser necesario realizar una edición de esta clasificación antes de usar la nube de puntos. Una vez asegurados de que la clasificación de puntos es correcta, tomamos el producto de las nubes de puntos y lo introducimos en el software con el que quieras obtener la triangulación del terreno y los perfiles, que en nuestro caso usaremos el Civil AutoCAD.



Ilustración 51 - Bruto nube de puntos en AutoCAD

Primero de todo se trata de crear una superficie de terreno con el archivo LAS de la nube de puntos. La superficie buscamos que sea creada en formato TIN, que es una red de triángulos irregulares. Las TIN son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos.

La elección de una superficie TIN se basa en que los nodos se pueden colocar irregularmente sobre una superficie, las TIN pueden tener una resolución más alta en las áreas donde la superficie es muy variable o cuando se desea obtener un nivel de detalle superior y una resolución más baja en zonas menos variables. Las TIN se suelen utilizar para el modelado de alta precisión de áreas más pequeñas, como en aplicaciones de ingeniería, donde resultan útiles porque permiten realizar cálculos de área planimétrica, área de superficie y volumen.

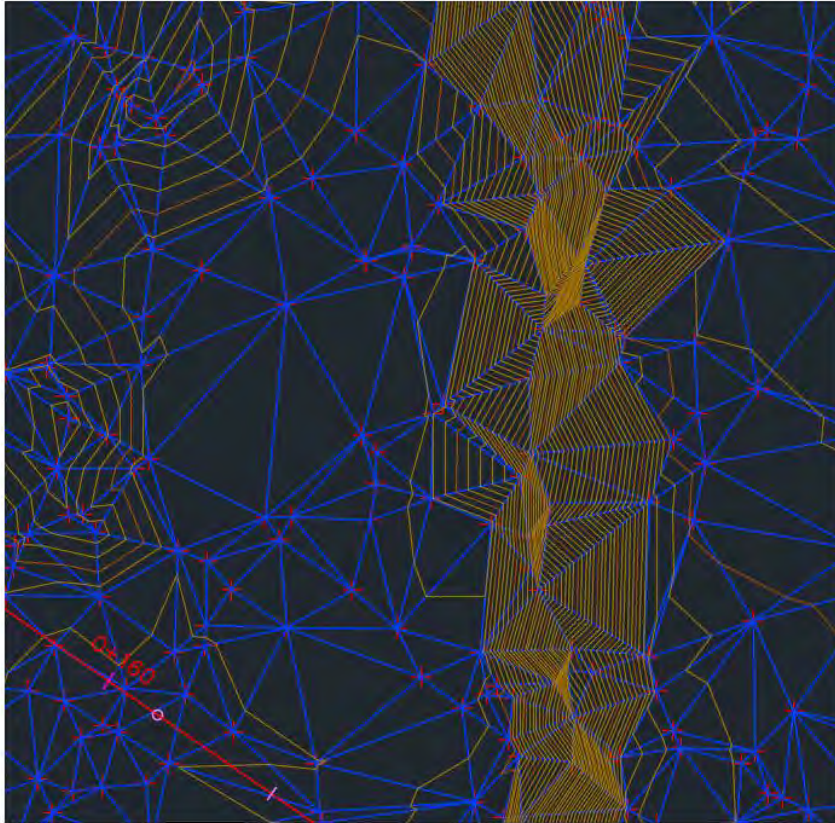


Ilustración 52 - Superficie TIN

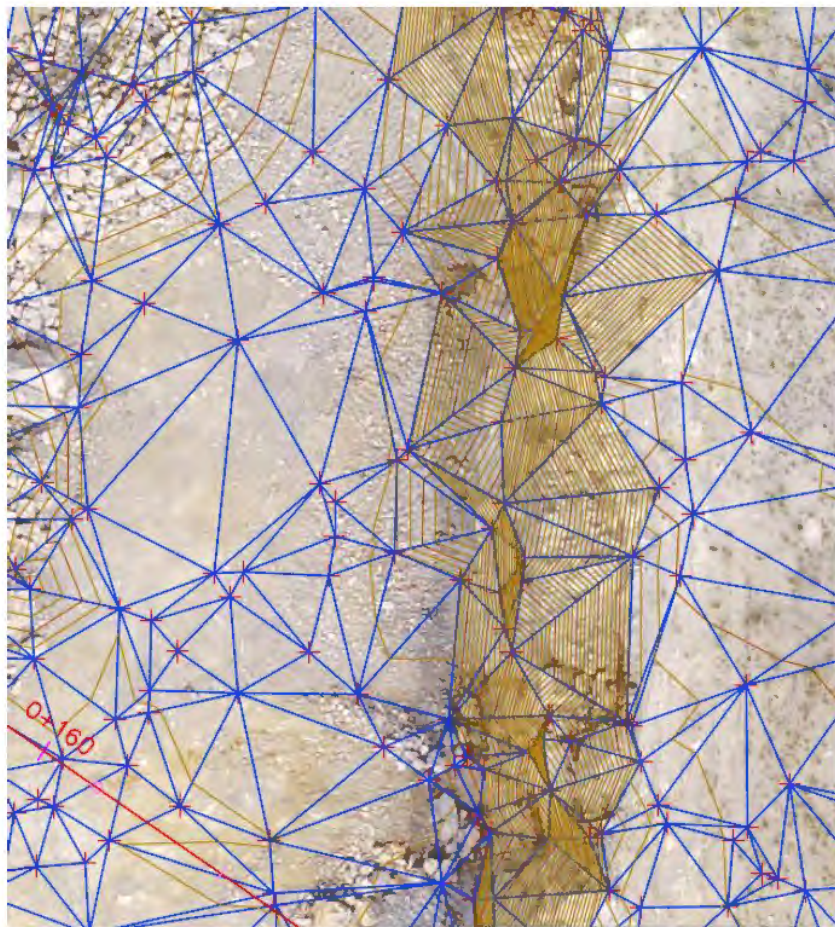


Ilustración 53 - Superficie TIN + ortofoto

Ahora bien, como en otros procedimientos automáticos, la labor del ingeniero es verificar que la superficie creada automáticamente está correctamente realizada, deberá ser examinada mediante el análisis de una serie de aspectos:

- Con la superposición de la ortofoto determinar si la red del TIN está bien resuelta y analizar las curvas de nivel, valorando si su posición es correcta en la superficie real.
- Se crearán perfiles para determinar su similitud con la realidad.
- Los perfiles creados serán contrastados con distintas situaciones:
 - Diferencias entre distintos escenarios de apoyos
 - Diferencias entre trayectorias de vuelos
- La definición del talud se examinará en las zonas críticas:
 - Inicio
 - Talud
 - Final

Se ha decidido centrar los estudios de perfiles longitudinales sobre los taludes con bancos más extensos, dejando sin analizar los dos taludes enfrentados por estos motivos:

- Centralizar los esfuerzos en una única área para obtener el mejor detalle posible.
- Los taludes enfrentados presentaban alta vegetación y podrían dar lugar a situaciones particulares que condujesen a malas interpretaciones.
- El frente de talud de bancos extensos está actualmente en activo con voladuras, el resto de los taludes están inactivos o en desuso, no aportan una utilidad funcional el perfil de sus taludes en la explotación activa de la cantera.

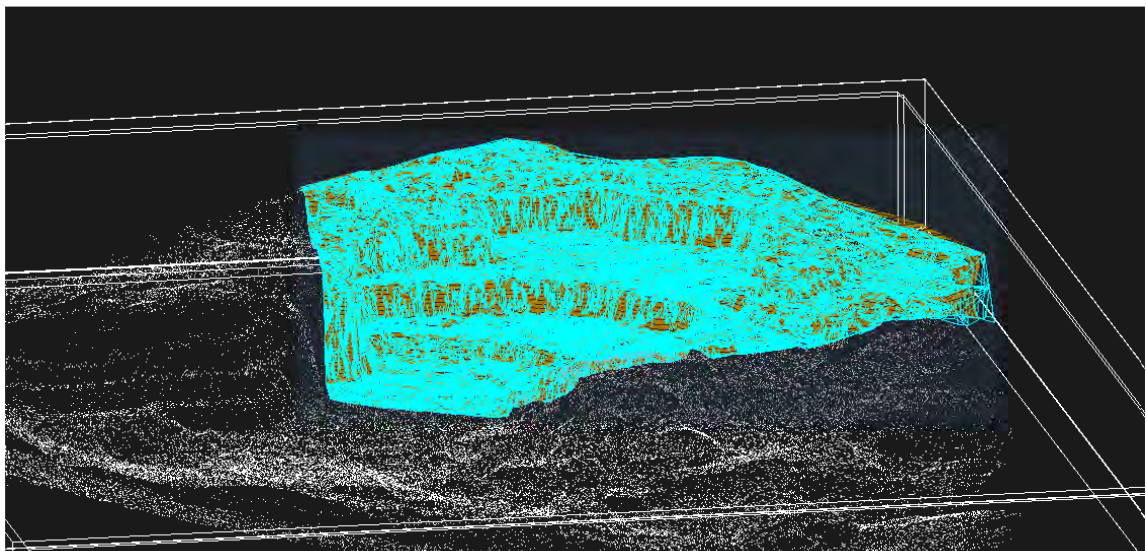


Ilustración 54 - Nube de puntos + TIN

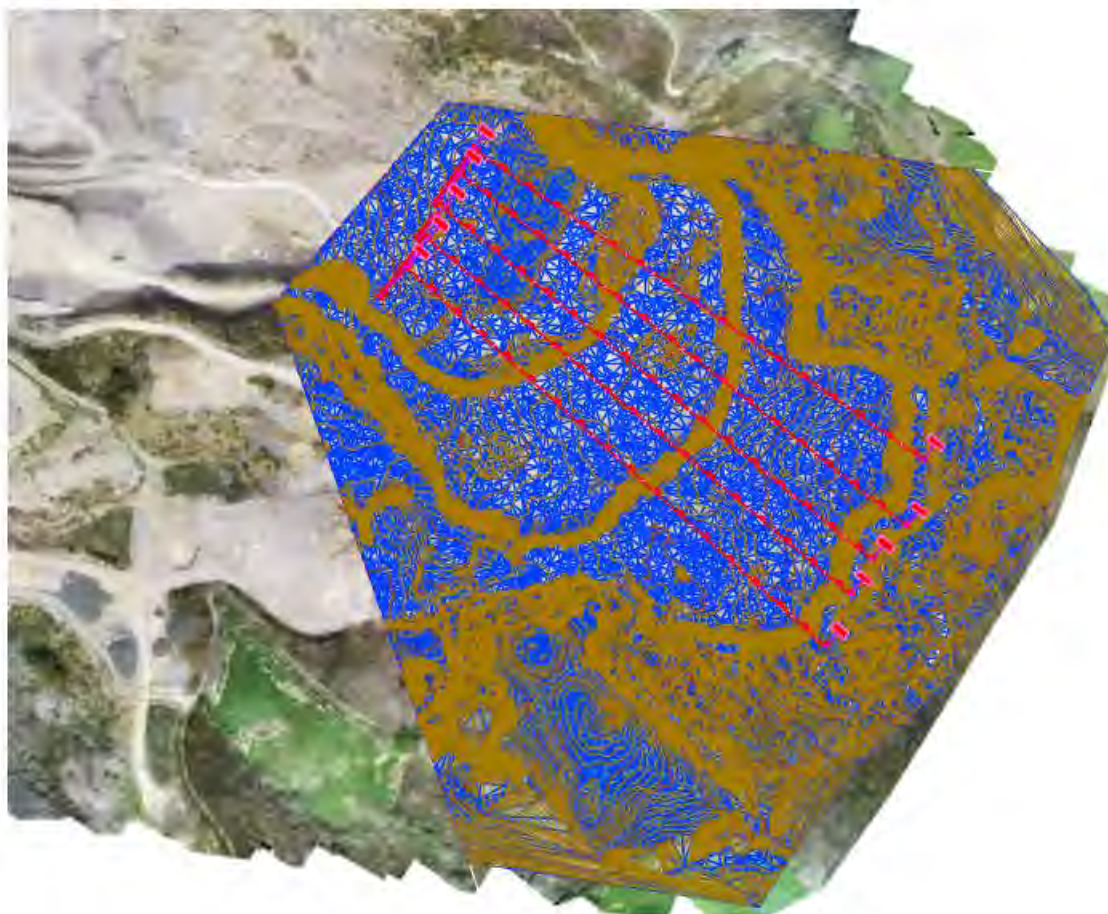


Ilustración 55 - TIN + alineaciones

Se propone cinco perfiles longitudinales que definen las tres paredes de los taludes de ese frente de explotación.

En los mismos perfiles se pretende contrastar las nubes de puntos obtenidos en posteriori:

- De los tres experimentos realizados, determinar qué configuración de puntos de control es más eficiente. De modo que compararemos un mismo perfil en los experimentos 1,3 y total, analizando sus discrepancias para cada vuelo.
- De las trayectorias realizadas, identificar el vuelo que arroja mejores resultados contrastando en un mismo experimento todas las trayectorias realizadas. De este análisis podremos identificar qué proyecto de vuelo es el que refleja mejor los puntos críticos del talud, los quiebros y las bases, debido a que en las trayectorias una de ellas mantiene una línea paralela a la línea de quiebro del talud, mientras que la otra es perpendicular a esta última.

Como se ha descrito, comenzamos con el análisis de las distintas configuraciones de control para definir los perfiles longitudinales. Para ello compararemos las superficies creadas a partir de la nube de puntos C1 + C2 puesto como ya hemos visto los resultados que ofrece esta combinación es muy robusta y la usaremos como base de los análisis.

Los perfiles mantendrán esta leyenda de colores:

- Línea roja: Experimento 1
- Línea naranja: Experimento 2
- Línea verde: Experimento Total

Se adjuntan los perfiles longitudinales en el anejo final del proyecto.

Después de identificar cada perfil longitudinal individualmente, teniendo en cuenta que la descripción de los perfiles es de una sola combinación de vuelos, viene determinada según las distintas configuraciones de control establecidas, marcando ciertas tendencias:

- La línea roja equivalente al experimento 1, dispone de picos más acusados describiendo perfiles más abruptos con saltos agudos donde el resto de las líneas no las crea.

Algunos ejemplos de problemas se ven en zonas donde se reflejan pequeños acopios, como puede ser en la segunda terraza del perfil 5, el experimento 1 no detecta los acopios, no contempla dicha elevación cuando el resto sí.

Para evitar posibles errores frutos de una mala edición manual de las superficies, zonas conflictivas como pudiesen ser el caso anteriormente citado, se han comparado con el bruto de los TIN sin edición para comprobar dichas faltas y así descartar las posibles diferencias introducidas durante la edición de la superficie.

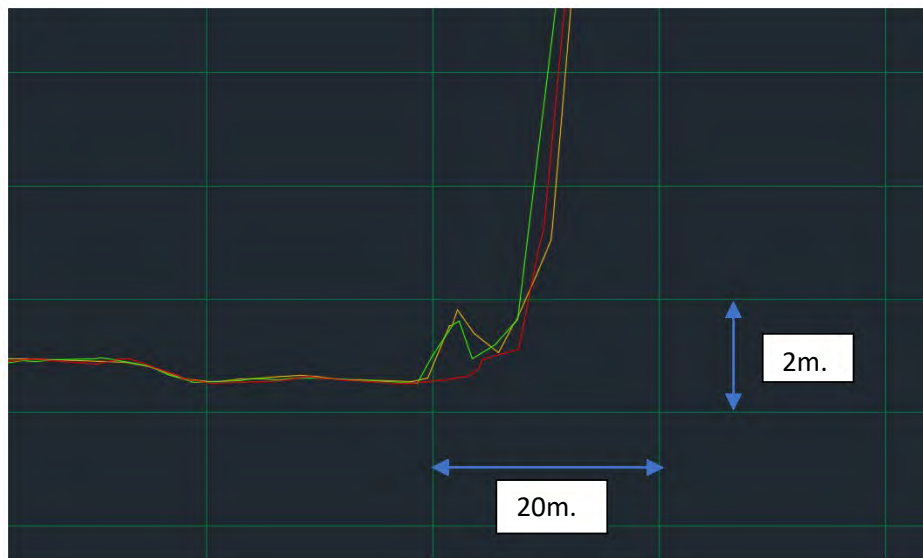


Ilustración 56 - Perfil 2 Editado

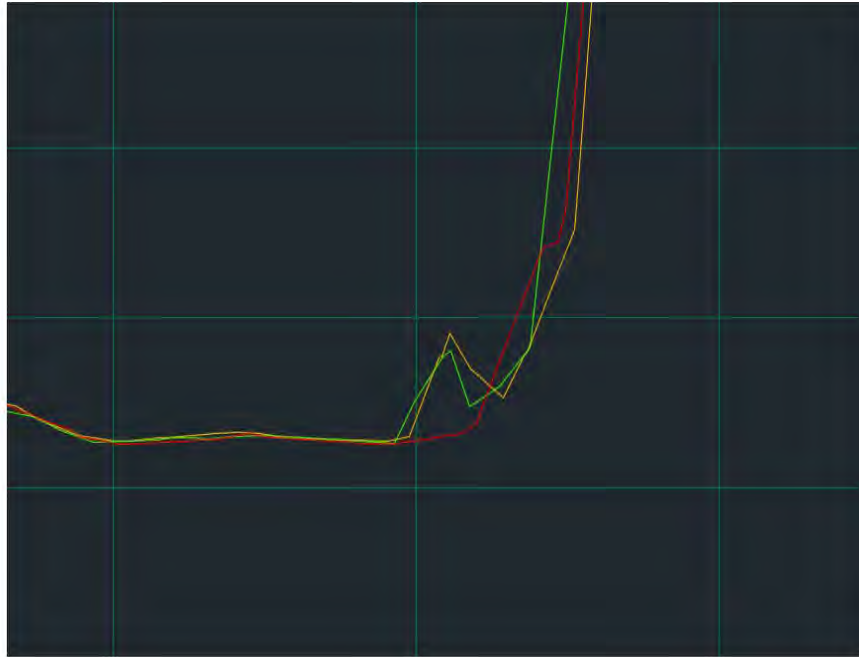


Ilustración 57 - Perfil 2 Original

- La línea naranja debería aportar una mejora consecuente al experimento 2. Un mayor control de la superficie incrementando el número de apoyos, connota un mejor detalle de los acopios, paredes de taludes más realistas. Sin embargo, en la práctica podemos ver que la mejora se aprecia en detalles como los acopios o algunos puntos de quiebros del talud, pero resulta no ser tan notorio como en pruebas anteriores la semejanza entre el experimento 2 y el total. Donde el experimento dos, mejora sustancialmente frente al experimento 1 es en la definición de la pared del talud entre puntos de quiebros.



Ilustración 58 - Detalle perfil

- La línea verde, referencia del experimento total, nos describe lo que a priori es el mejor de los modelos, con el podemos ver mejor ejecutado los quiebros delimitantes de los taludes. Realmente en estas comparativas sí que el uso de todos los apoyos aporta una información de calidad superior a la que llegaríamos a obtener en el caso de realizar la configuración de los apoyos de otros experimentos de menos envergadura.

La conclusión en relación a la configuración del apoyo necesario, el análisis entre los tres casos propuestos indica que más adecuado, responde a la configuración de apoyos denso como el del experimento total, la información devuelta debido a este sistema mejora con creces a las demás siendo perfiles más continuos, homogéneos y más realistas.

A la hora de contrastar las trayectorias de los vuelos, usaremos la superficie expuesta en el experimento 2 ya que como hemos podido contemplar hasta el momento es un buen modelo de referencia y nos aporta datos más que suficientes y de calidad para poder justificar una decisión final.

En esta prueba enfrentaremos los vuelos C1, C2 y C1 + C2, descartando la inclusión del oblicuo por los motivos que se han descrito en los apartados anteriores, de forma que la leyenda que se usará a continuación será:

- Línea roja: Vuelo C1
- Línea naranja: Vuelo C2
- Línea verde: Vuelo C1 + C2

Tras el estudio de los vuelos plasmados en los perfiles, tomando como óptimo y punto de partida el vuelo de C1 + C2, es decir la línea verde, se pueden sacar ciertas conclusiones:

- El vuelo C2 presenta las mayores discrepancias frente a los otros dos perfiles. Se trata de la toma de imágenes en perpendicular al talud y esto puede ser el motivo de esa insuficiencia calidad.



Ilustración 59 - Detalle perfiles (vuelos)

- El vuelo C1 en oposición al C2, describe mucho mejor la verticalidad y los puntos de quiebro del talud, en la gran mayoría de las zonas es la línea roja la que se confunde con la verde de la unión de los dos vuelos, dando a entender que la calidad de los datos predomina en lo aportado por la trayectoria C1. La trayectoria C1 está trazada sensiblemente paralela a la línea de los taludes de forma intencionada. Buscando obtener la respuesta a la cuestión, sobre qué dirección de vuelo es más favorable para alcanzar el detalle de los perfiles de los taludes.

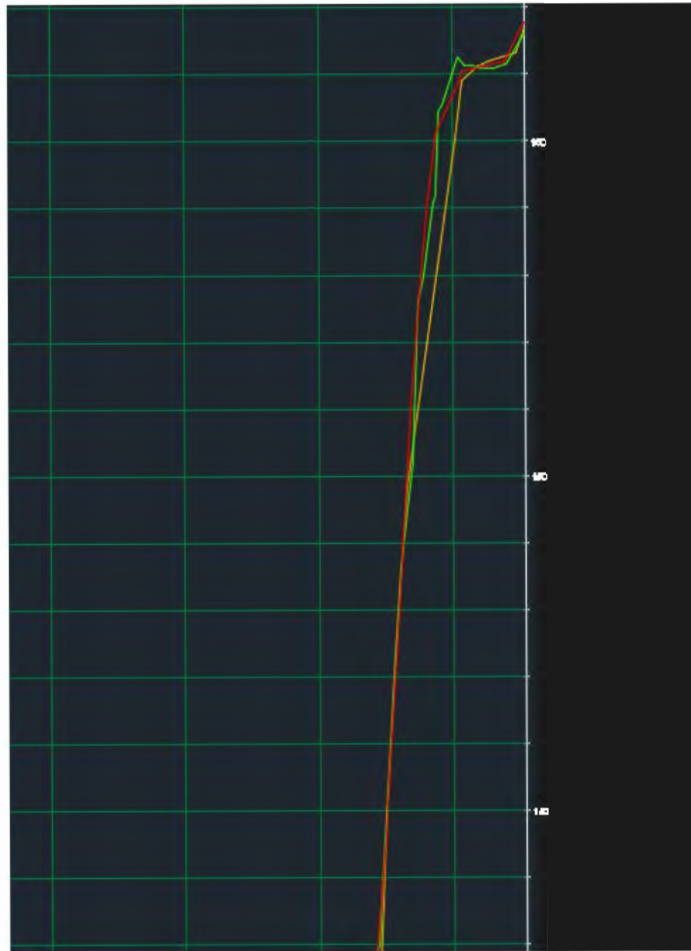


Ilustración 60 - Detalle perfil vuelo C2

- El vuelo C1 + C2 es que presenta los mejores resultados, situación que resulta evidente puesto que aporta los detalles de las dos trayectorias, independientemente de la línea de talud a la que se enfrente, haciendo que todos lo acopios, bloques de rocas sueltas y paredes estén perfectamente definidos.

Como contestación a este apartado se llega a la conclusión de que con un vuelo paralelo al frente del talud de estudio, se obtienen resultados mucho mejores que en cualquier otra dirección, como es en este caso el vuelo C1, siendo suficiente para mantener una calidad en los resultados finales.

A pesar de ello la combinación de vuelos cruzados supera, los resultados alcanzados por un único vuelo por bien hecho que este y paralelo a la línea del talud, más cuando está siendo respaldado por apartados anteriores donde las combinaciones C1+ C2 son mucho más eficiente que los vuelos individualizados.

Por lo tanto, se recomienda a la hora de programar un vuelo, es francamente importante trazar uno de los vuelos paralelo a la línea de frente a estudiar, para así sacar los mejores detalles posibles.

7.4. CONCLUSIONES

En los diferentes apartados de los resultados se ha podido identificar los aspectos más relevantes según el objetivo de cada apartado, ya podían ser disposición de puntos de control, perfiles o creación de superficies en base a la nube de puntos.

Con toda esta información con la que se ha ido justificando una serie de conclusiones, se podrán proponer unas pautas de buenas prácticas para así llegar a plantear la mejor metodología posible.

Este resultado final se basará en la optimización del sistema, busca resultados de calidad, pero con el requerimiento adicional de minimizar tiempo y esfuerzo que supondrá una reducción de costes también.

Dicho esto, la experiencia de los distintos casos efectuados dicta:

- Respecto a la configuración del apoyo, lo más recomendable es realizar un apoyo densificado, los puntos de apoyo deben controlar perfectamente toda la periferia de la zona de trabajo. Para la densificación central como mínimo se debe poder controlar perfectamente la zona intermedia entre los extremos del polígono de estudio, todo apoyo añadido que se introduzca sobre la superficie mejorará el modelo.
- En referencia a las trayectorias de los vuelos, se concluye que el mejor de los casos se da en la combinación de dos trayectorias cruzadas. Las trayectorias deben de tener unas direcciones establecidas, no son arbitrarias; estas direcciones debe de tender a ser paralelas a los taludes que van a tomar información, debido a que el nivel de detalle obtenido en vuelos paralelos a las líneas del borde de los taludes es muy superior a las de otras direcciones de vuelo.
- Por último y respecto a la resolución de los problemas de datos en taludes verticales, el muestreo de imágenes oblicuas ha de ser muy superior al efectuado en este trabajo. Como añadido tras los datos recopilados, se recomienda la programación de una trayectoria planificada paralela al talud deseado, esto permitirá una mejor definición de los datos, junto con una inclinación de la cámara algo inferior a la que nosotros utilizamos y cerciorarse de introducir mínimamente el cielo en la toma de las imágenes.



Ilustración 61 - MDT 1



Ilustración 62 - MDT 2



Ilustración 63 - MDT 3



Ilustración 64 - MDT 4

8. COSTES

Otro objetivo importante del análisis de esta metodología, es determinar si esta nueva forma de trabajo es capaz de implantarse definitivamente en los trabajos cotidianos topográficos. Para llevar a cabo esta conclusión, es necesario realizar un estudio de costes, con la correspondiente comparativa frente a los sistemas utilizados hasta el momento.

De ser un producto fructífero a nivel de compatibilidad de trabajo y obtención de resultados, es necesario tener el coste acotado de este procedimiento, ya que sería improductivo desarrollar una nueva herramienta de trabajo incapaz de hacer frente a las metodologías tradicionales por tener unos costes desorbitados.

A modo orientativo a continuación, se procederá a unas simulaciones de nuestro entorno de trabajo, de alrededor de 40 hectáreas de superficie.

8.1. TOPOGRAFÍA CLÁSICA.

8.1.1. METODOLOGÍA CLÁSICA

Radiación:

- Radiación: 100 Puntos/Ha (1 punto por metro cuadrado)
- Área: 40 Ha
- Puntos totales: $100 \times 40 = 4000$ puntos
- Rendimiento: 540 Puntos/día
- N.º de jornadas: $4000/540 = 7.40$
- Coste Radiación: $480\text{€/jornada} \times 7.4 = 3552\text{€}$

Poligonal:

- Longitud poligonal (cerrada): 2.6 Km
- Rendimiento: 2 km/día
- N.º de jornadas: $2.6\text{km}/2 = 1.3$ días
- Coste Poligonal: $480\text{€/jornada} \times 1.3 = 624 \text{€}$

Coste total:

- Coste total = $3552 \text{€} + 624 \text{€} = 4176 \text{€}$

8.1.2. GPS

Radiación:

- Radiación: 100 Puntos/Ha (1 punto por metro cuadrado)
- Área: 40 Ha
- Puntos totales: $100 \times 40 = 4000$ puntos
- Rendimiento: 1000 Puntos/día
- N.º de jornadas: $4000/1000 = 4$ días
- Coste Radiación: $510€/jornada \times 4 = 2040€$

Perfiles transversales:

- Rendimiento Perfiles transversales: 1 km/día
- N.º jornadas: $2.6\text{km}/1 = 2.6$ días
- Coste perfiles: $510€/jornada \times 2.6 = 1326 €$

Coste total

- Coste total = $2040 € + 1326 = 3366 €$

8.2. FOTOGRAMETRÍA CLÁSICA

Se podría decir que el antecedente o la idea precursora a la evolución actual, como dato de partida el coste mínimo de un vuelo independiente en Cantabria es de 3000 €.

- Escala: 1/1000
- Superficie = 40 Ha
- Coste vuelo: 3000 €
- Restitución fotogramétrica: $60€/Ha \times 40 = 2400 €$
- Revisión de campo: $2400 \times 0.20 = 480 €$ (20% restitución)
- Apoyo: $\frac{1}{2}$ campo = $480/2 = 240€$
- Edición: $2400 \times 0.15 = 360€$ (15% restitución)
- Apoyo: media jornada de GPS = 510€
- Coste total: $3000€ + 2400€ + 480€ + 240€ + 360€ + 510€ = 6990 €$

8.3. LEVANTAMIENTO CON RPA'S O DRONES

En un levantamiento realizado por drones, el procedimiento es más simplificado. Se marcarán puntos de control para ayudarnos a orientar nuestro modelo digital de superficie a un sistema de coordenadas que nos permita alcanzar su correcta georreferenciación, seguidamente se ejecutará el vuelo.

Puntos de control:

- N°. de vuelos: 3 de 20 min cada uno
- Coste Piloto: 180€/hora * 2 = 360
- Apoyo GPS: Media jornada de campo 240€
- Coste planificación: 70€/hora * 2 = 140 €
- Coste edición: 70€/hora * 24 = 1680€

Coste total:

- Coste total: 450€+210€+1680€ = 2420€

Los costes asociados a un proyecto de levantamiento mediante RPA'S, contando que no se dispone de piloto ni de aeronave son mucho más baratos que en cualquiera de los otros casos convencionales, por lo que sí se puede considerar como alternativa real.

9. BIBLIOGRAFÍA

Libros:

- Lerma García, José Luis. 2002. Fotogrametría moderna: analítica y digital Editorial de la UPV, D. L. Valencia
- Ferrer Torío, Rafael. 1986. Fotogrametría. Cantabria: Universidad de Cantabria,1986.
- Object recognition from local scale-invariant features, 1999
- Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, 2004
- Ferrer Torio, R; Piña Patón, B. Topografía aplicada a la Ingeniería Civil. Servicio publicaciones ETSI Caminos, Canales y Puertos, Santander.
- Chueca Pazos, M., Herráez Boquera, J.; Berné Valero, J.L.: "Tratado de Topografía". Ed. Paraninfo. Madrid. 1.996.
- Leick, Alfred: "GPS Satellite Surveying". Editorial John Wiley & Sons. Nueva York. 1.995.
- P.W. Wolf y B.A. Dewitt (2000). Elements of Photogrammetry, with application in GIS. Mc Graw Hill. Londres.
- Petrie, B.; Kennie, T.J.: "Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering". Editor Whittles Publishing. Londres. 1.990
- Longley,P.A. Goodchild,M.G y otros. Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications, volume 1. John Wiley & Sons, New York. 1999

Páginas Web:

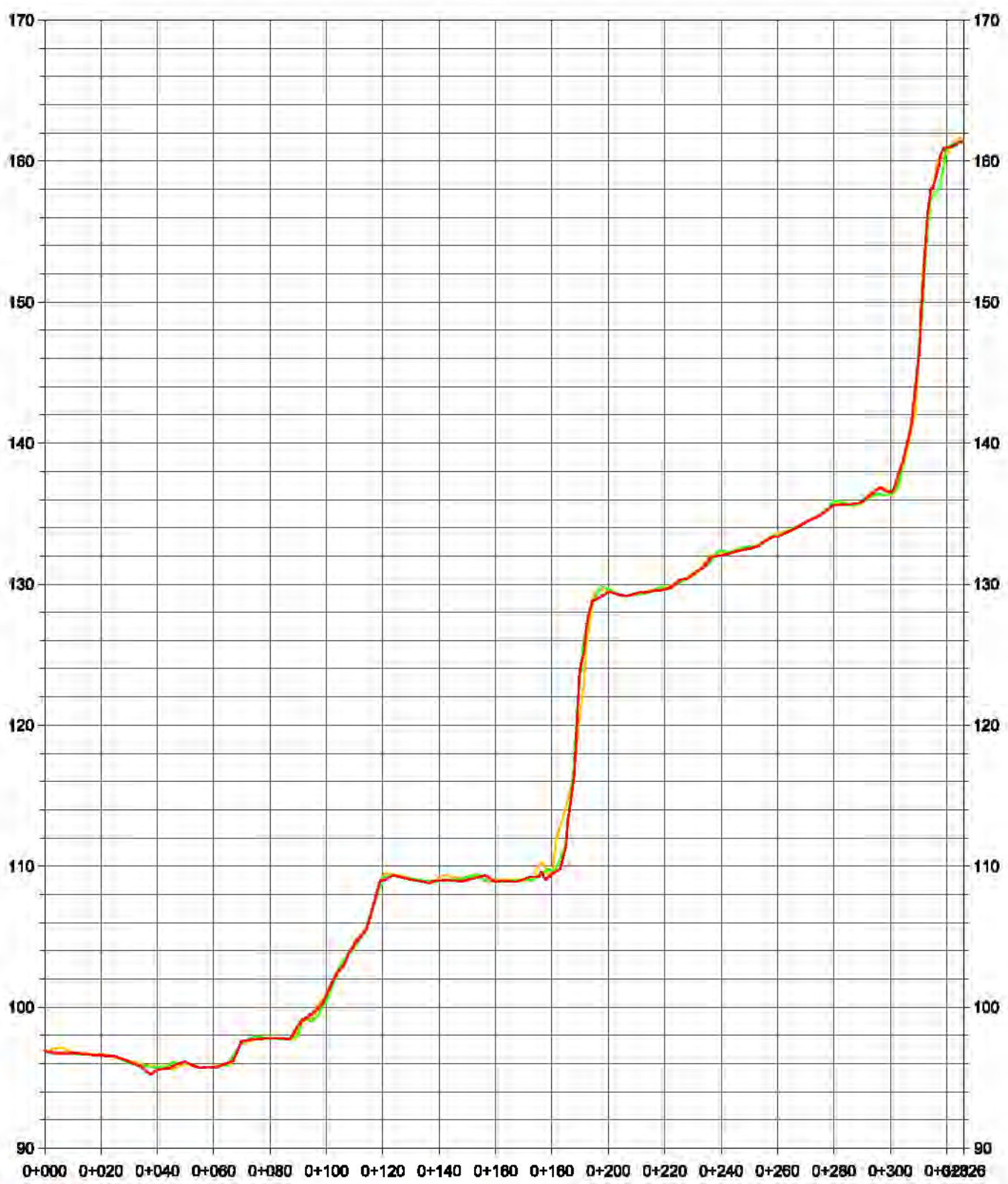
- <http://www.locis.es/1/>
- <https://geoinnova.org/>
- <https://www.aerial-insights.co/blog/>
- <https://www.aedron.com/>
- <https://geocaptiva.com/>
- <https://dronitec.es/>
- <http://desktop.arcgis.com/>
- <https://support.pix4d.com/>
- <https://www.territoriodecantabria.es/>
- <http://www.ign.es/>
- <https://www.spaceweatherlive.com/>
- <https://es.wikipedia.org/>
- <https://www.recdron.com/>

10. ANEJO: PLANOS

Perfil Longitudinal: Alineación_1

LEYENDA

- Exp.1
- Exp.2
- Total



Título:
Aplicaciones del uso de
RPA'S en la explotación
de canteras



Nº PLANO:
01

ESCALA V/H:
1/1000

NOMBRE DEL PLANO: PERFIL LONGITUDINAL

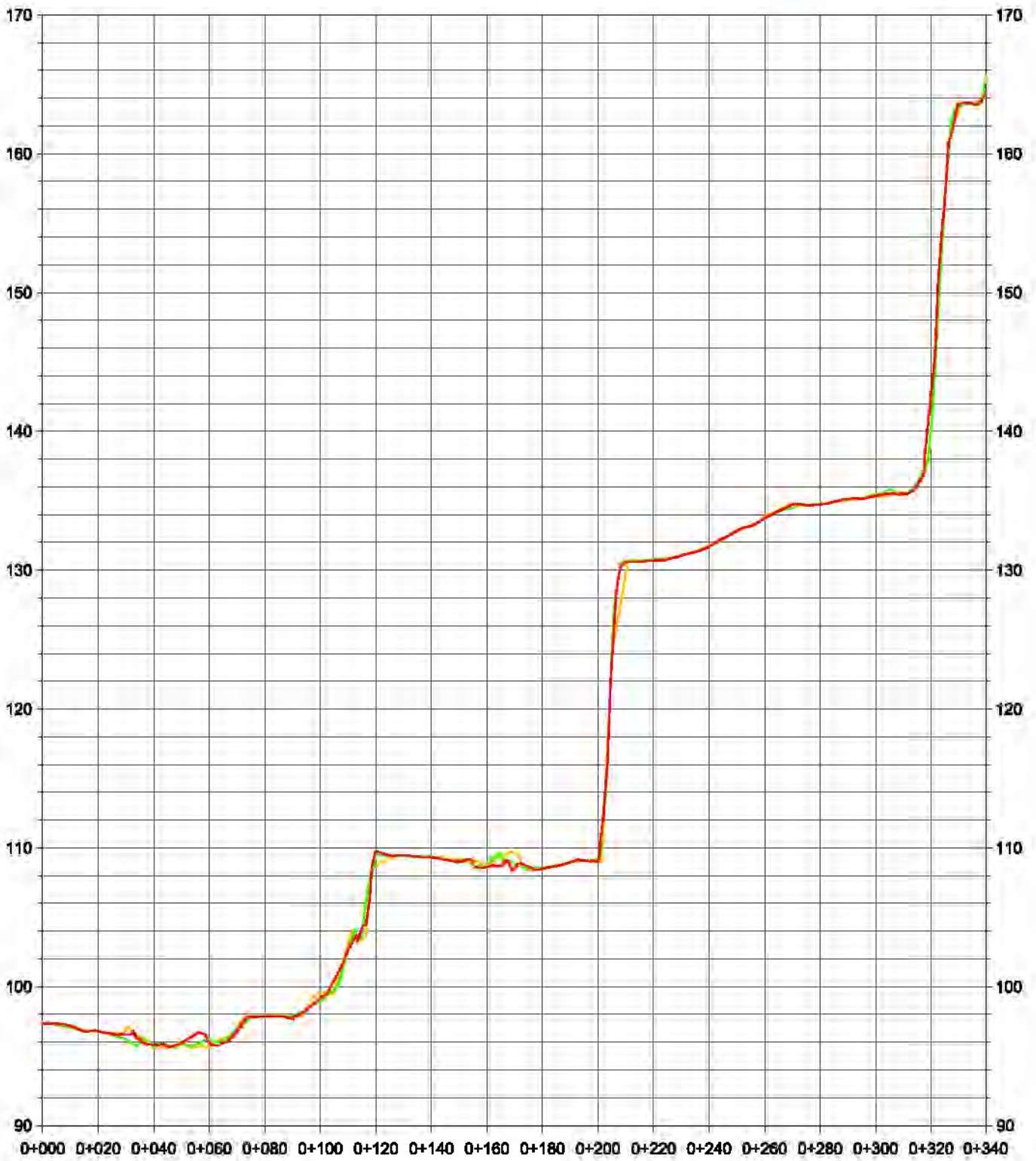
CASO: VUELO C1+C2
DISTINTAS CONFIGURACIONES DE APOYO

AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA:
SEPTIEMBRE 2019

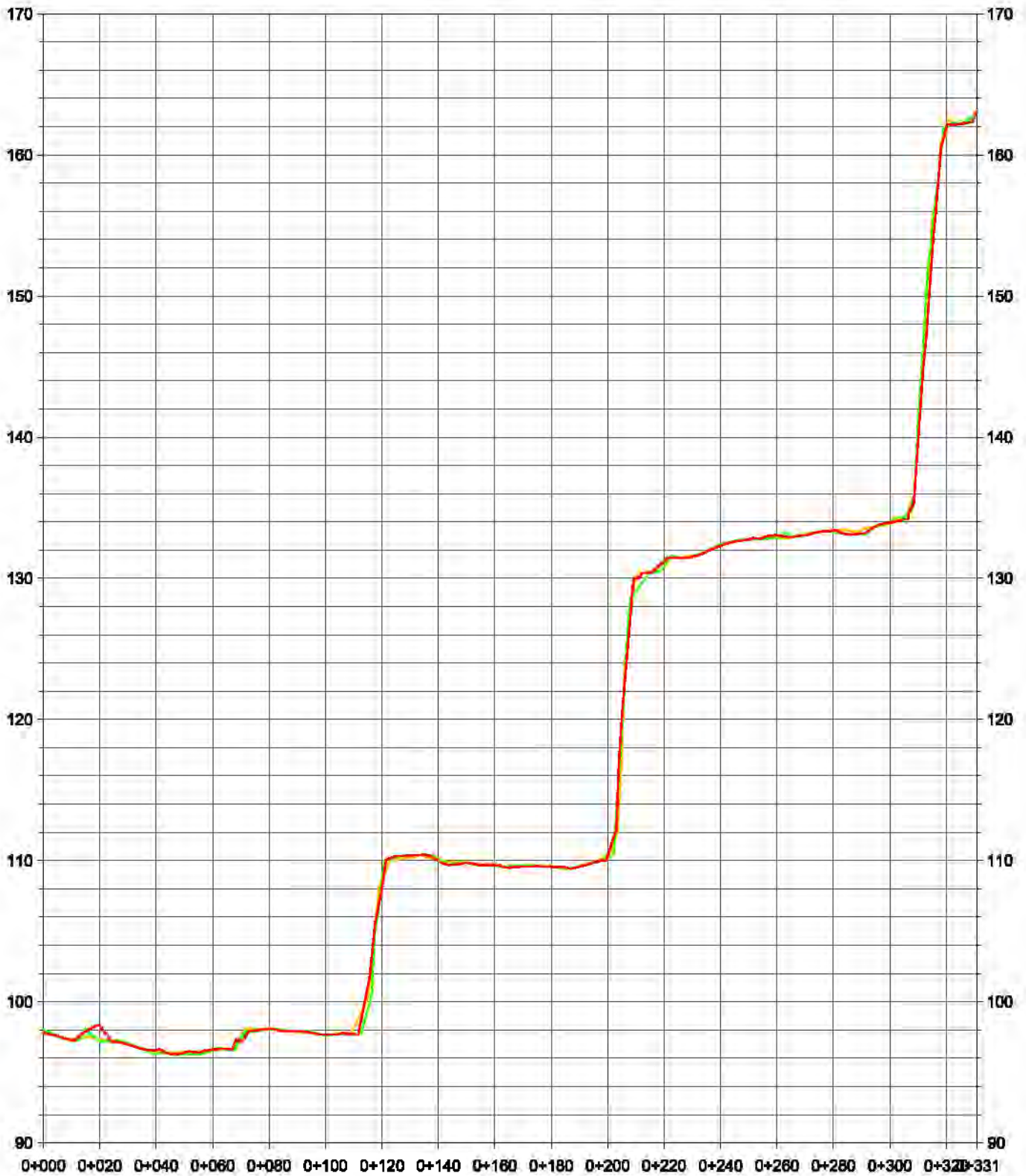
Perfil Longitudinal: Alineación_2

LEYENDA	
—	Exp.1
—	Exp.2
—	Total



Perfil Longitudinal: Alineación_3

LEYENDA	
—	Exp.1
—	Exp.2
—	Total



Título:
**Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras**



Nº PLANO
03
 ESCALA V/H
 1/100 / 1/2000

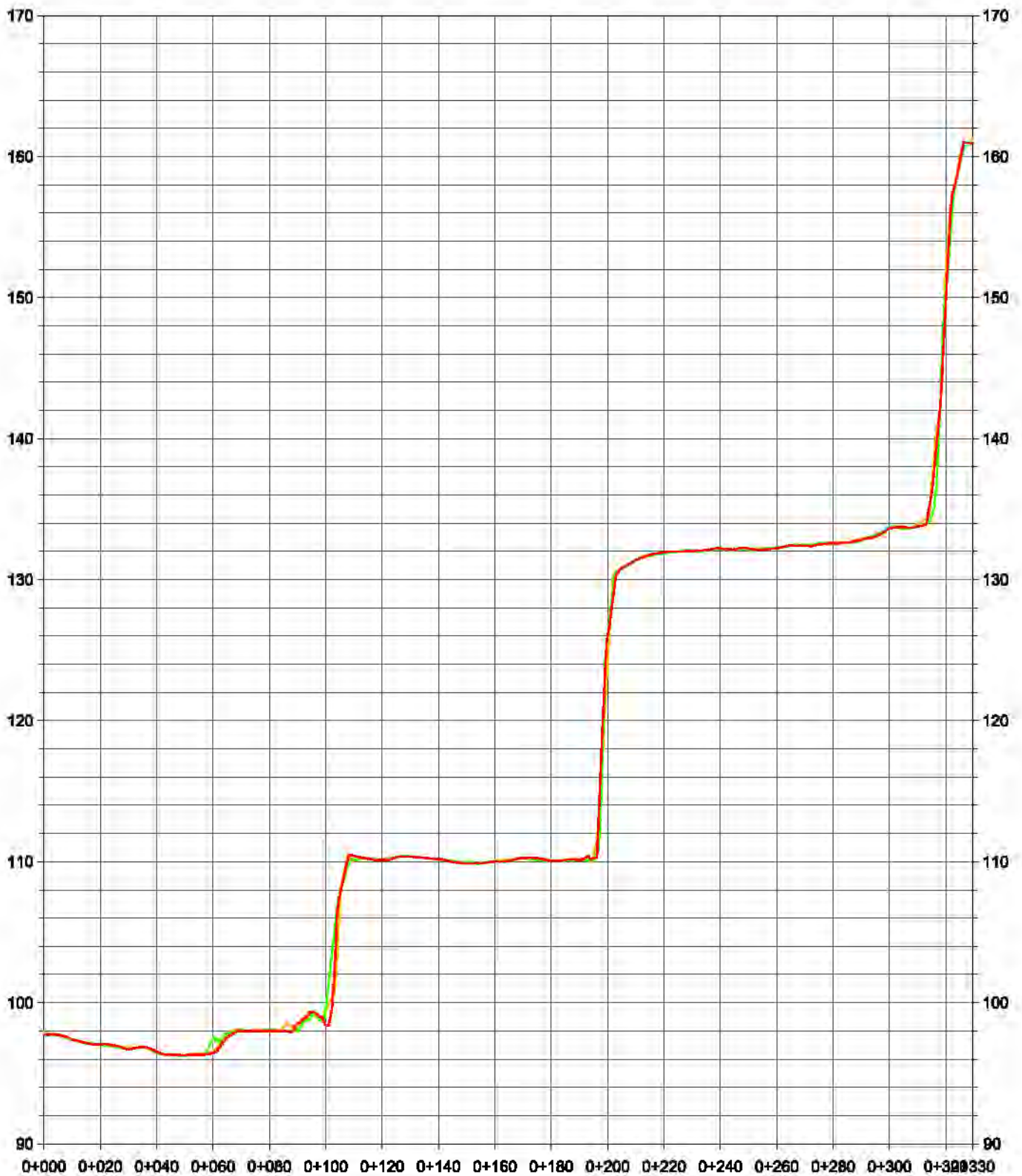
NOMBRE DEL PLANO
PERFIL LONGITUDINAL
 CASO
**VUELO C1+C2
 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE APOYO**
 AUTOR:
FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA
SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_4

LEYENDA

- Exp.1
- Exp.2
- Total



Título:
Aplicaciones del uso de RPA'S en la explotación de canteras



Nº PLANO:
04

ESCALA V/H:
1/2000

NOMBRE DEL PLANO: **PERFIL LONGITUDINAL**

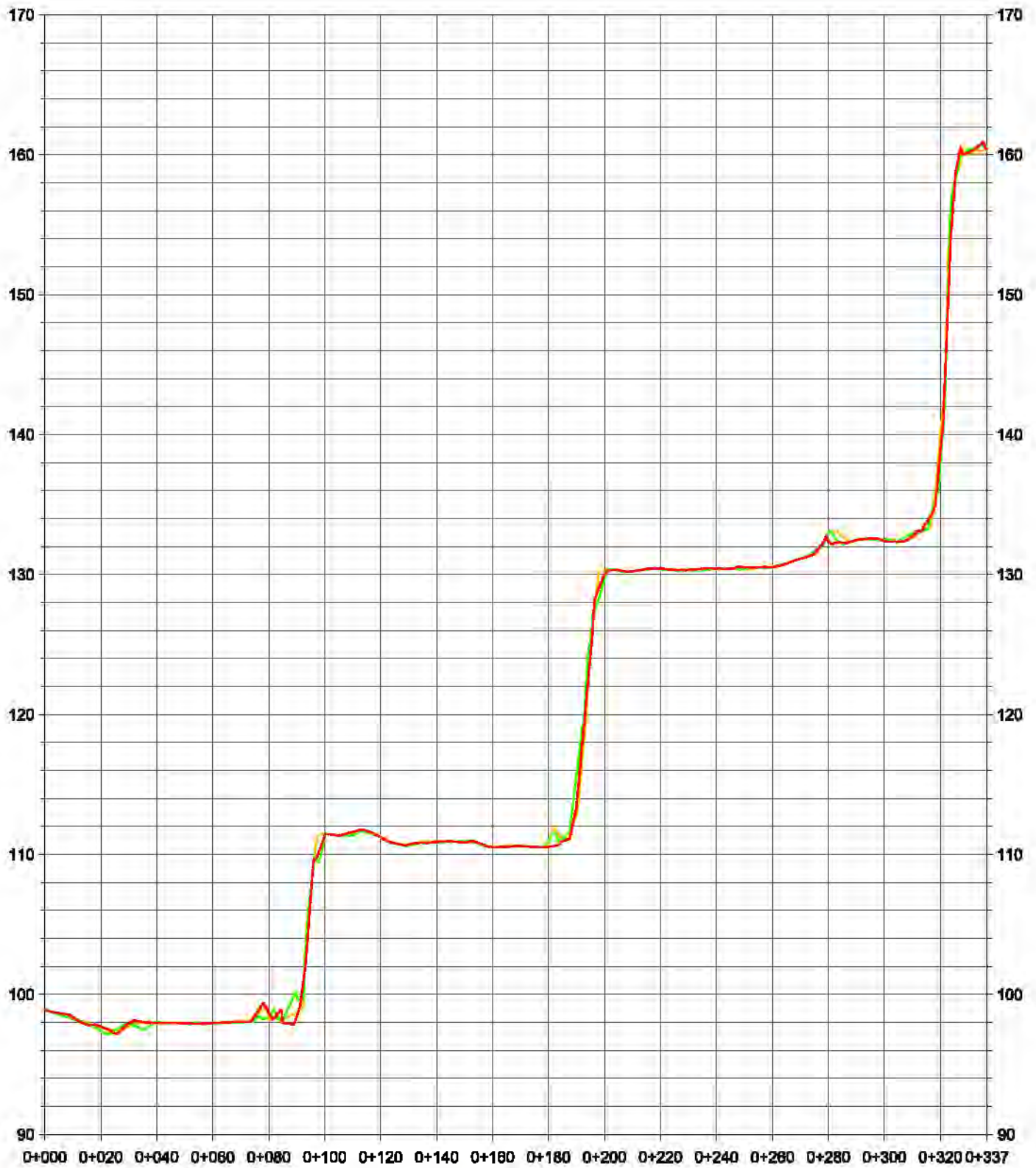
CARGO: **VUELO C1+C2 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE APOYO**

AUTORE: **FERNANDO PÉREZ CRUZ**

FECHA:
SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_5

LEYENDA	
—	Exp.1
—	Exp.2
—	Total



Título:
**Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras**



Nº PLANO:
05
 ESCALA V/M:
 1/1000

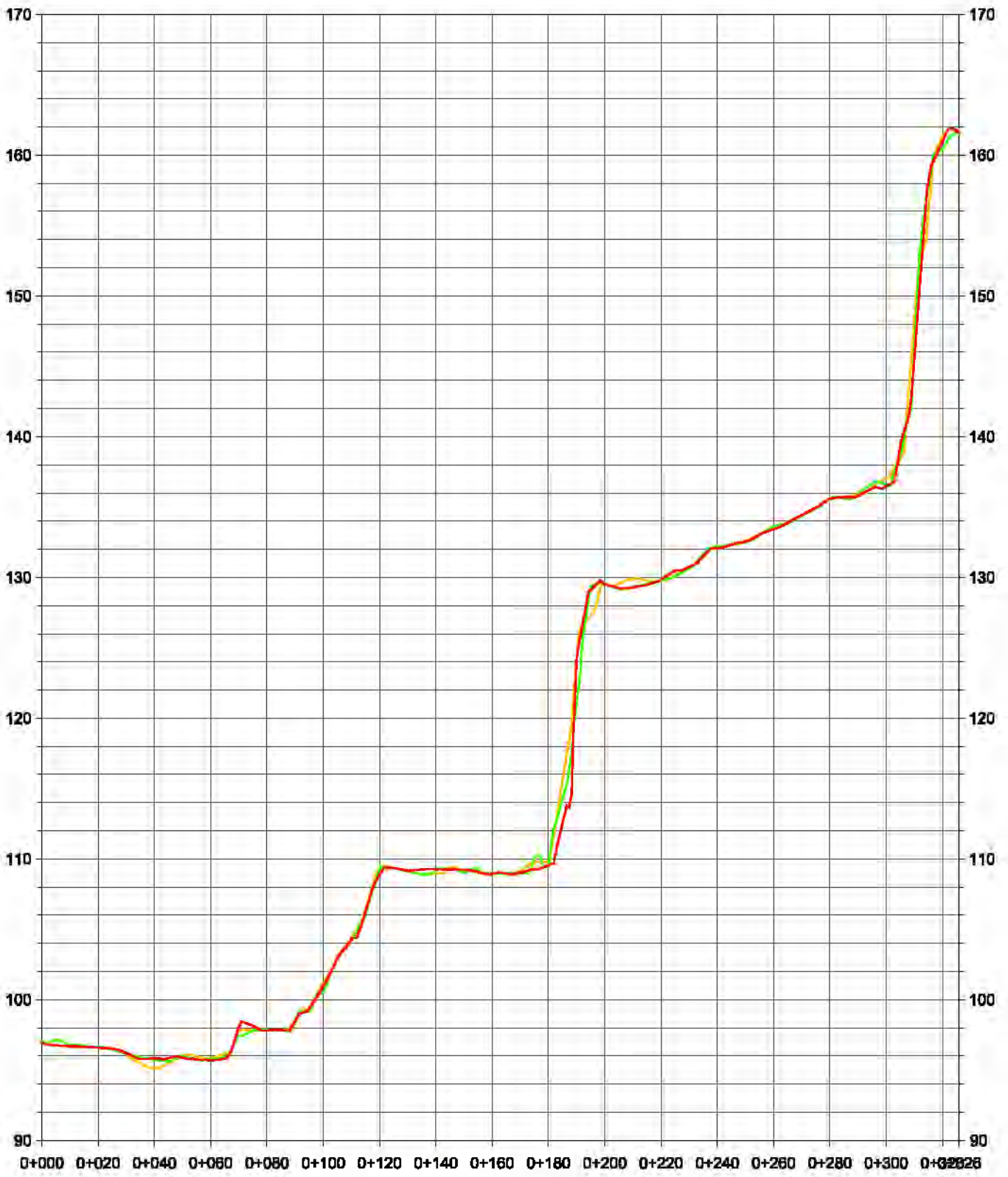
nombre del plano: **PERFIL LONGITUDINAL**
 caso: **VUELO 01+02 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE APOYO**
 autor: **FERNANDO PÉREZ CRUZ**

fecha:
SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_1

LEYENDA

- C1
- C2
- C1C2



Título:
 Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras



Nº PLANO:
 06

ESCALA V/M:
 1/1000

NOMBRE DEL PLANO: PERFIL LONGITUDINAL

CARGO: CONFIGURACIÓN APOYO EXP2
 DISTINTOS VUELOS

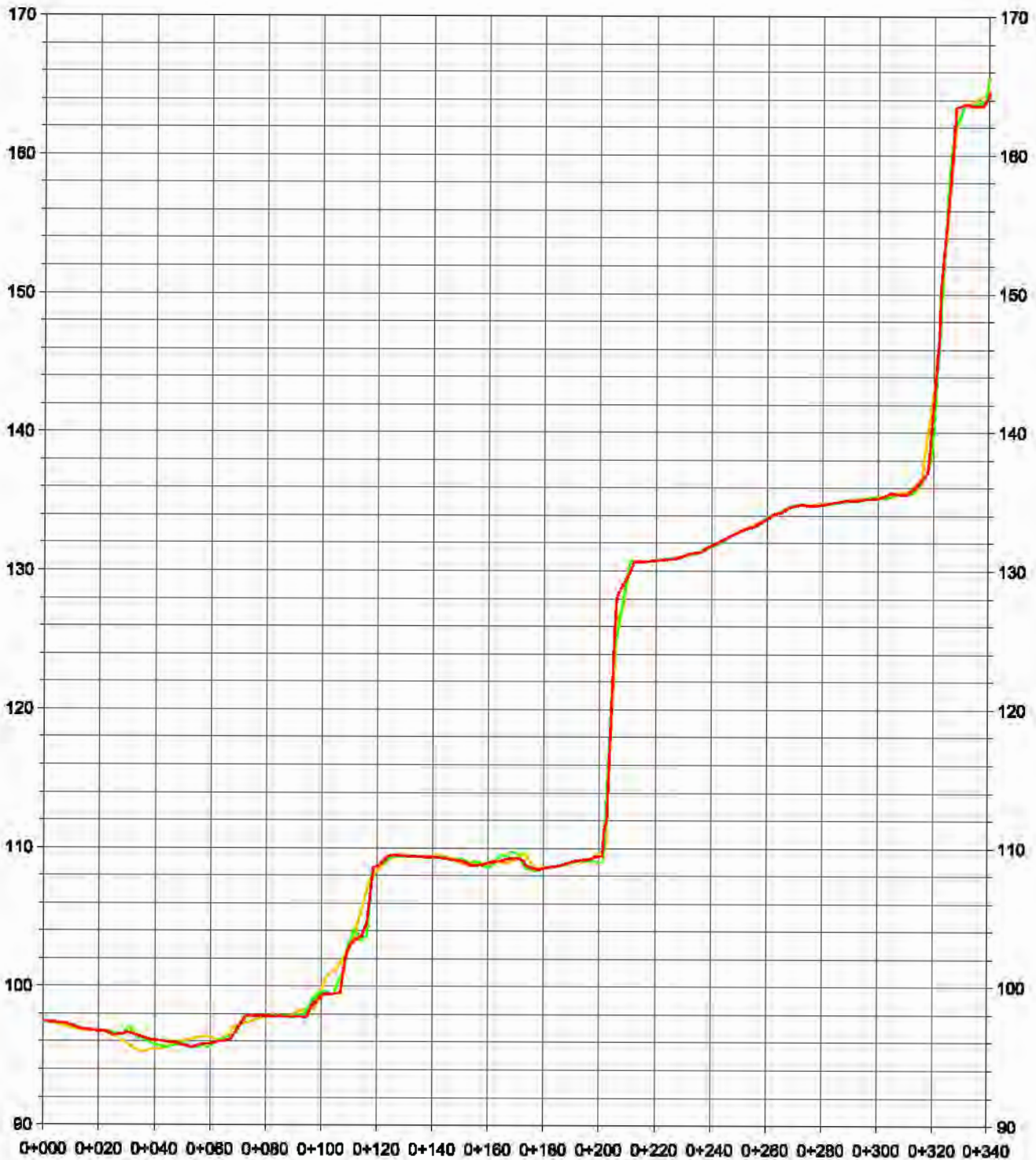
AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA:
 SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_2

LEYENDA

- C1
- C2
- C1C2



Título:
 Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras



Nº PLANO:
 07

ESCALA V/H:
 1/1000

NOMBRE DEL PLANO: PERFIL LONGITUDINAL

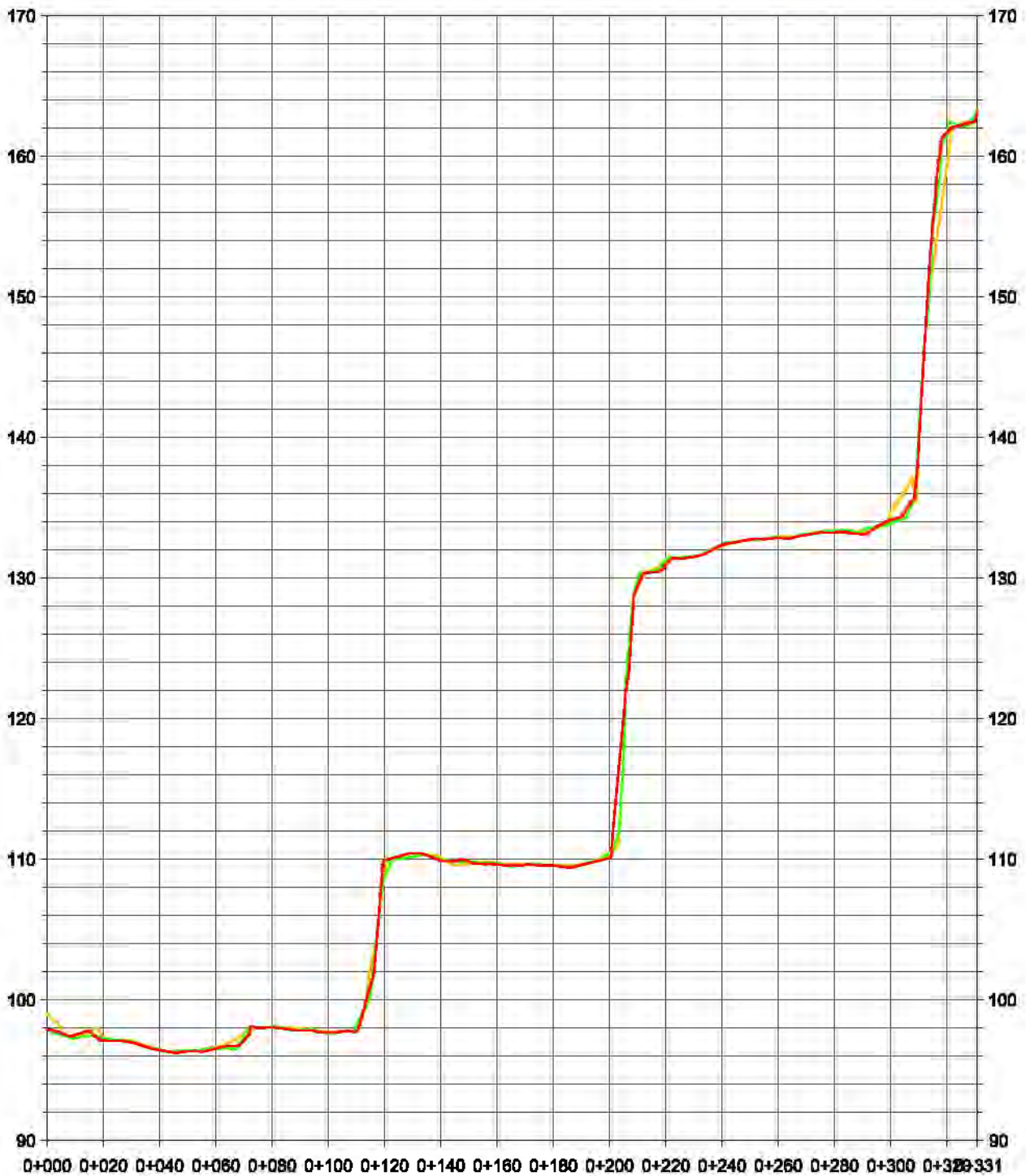
CARBO: CONFIGURACIÓN APOYO EXP2
 DISTINTOS VUELOS

AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA:
 SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_3

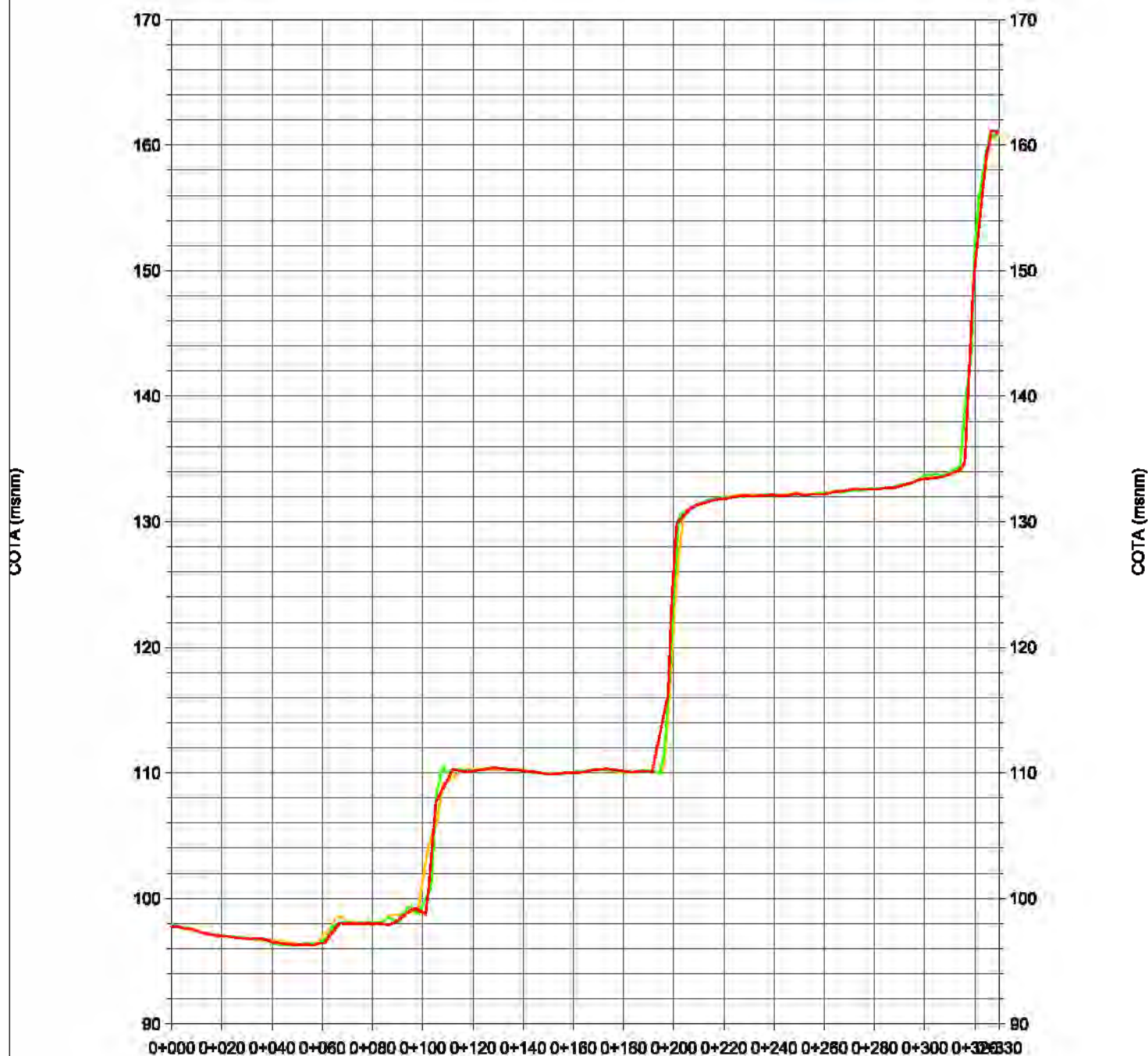
LEYENDA	
—	C1
—	C2
—	C1C2



Perfil Longitudinal: Alineación_4

LEYENDA

- C1
- C2
- C1C2



Título:
Aplicaciones del uso de RPA'S en la explotación de canteras



Nº PLANO:
09

ESCALA V/H:
1/100

NOMBRE DEL PLANO: PERFIL LONGITUDINAL

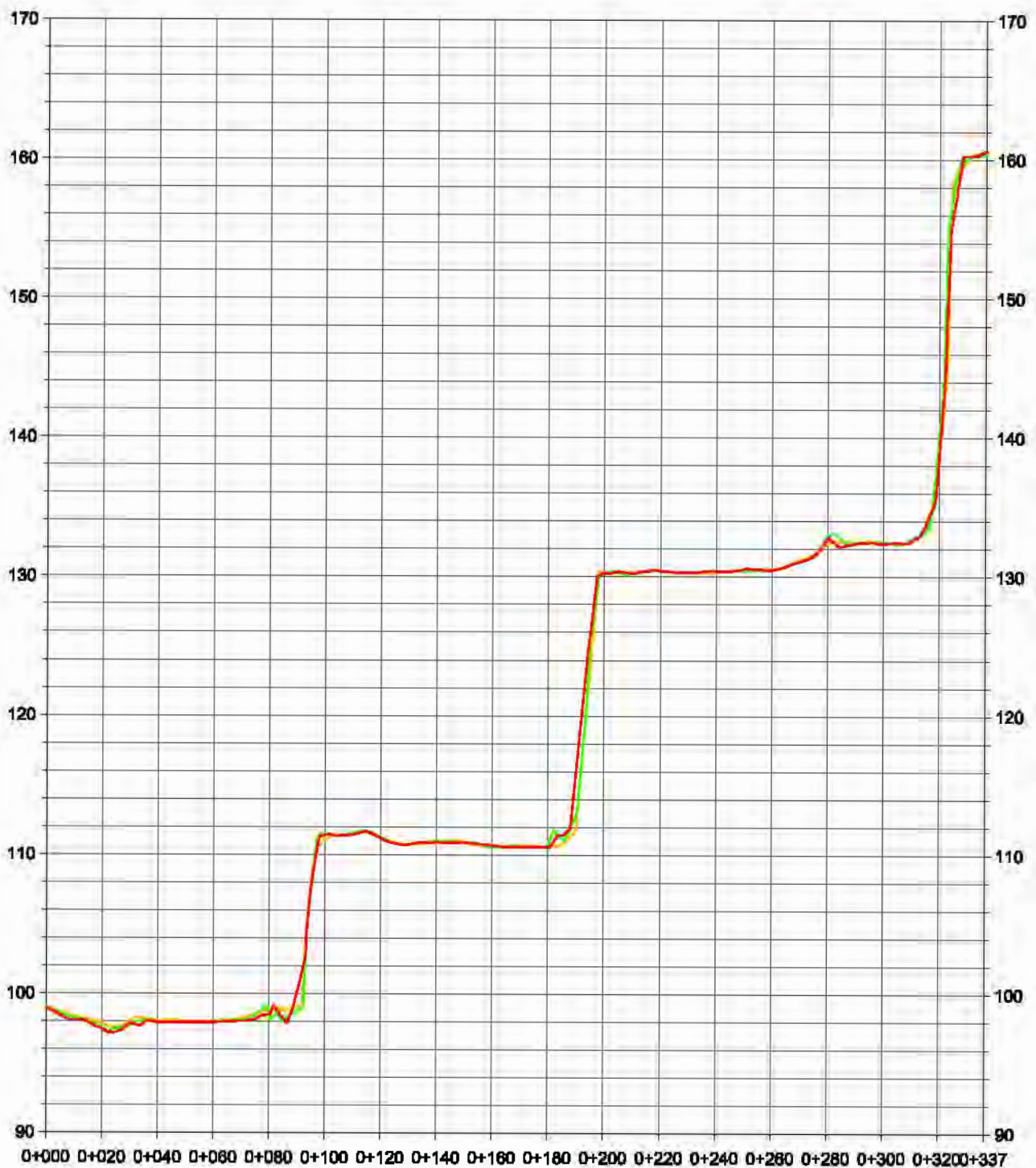
CARGO: CONFIGURACIÓN APOYO EXP2 DISTINTOS VUELOS

AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA: SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_5

LEYENDA	
—	C1
—	C2
—	C1C2



Título:
**Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras**



Nº PLANO:
10
 ESCALA V/M:
 1/1000

NOMBRE DEL PLANO: **PERFIL LONGITUDINAL**
 CARBO: **CONFIGURACIÓN APOYO EXP2
 DISTINTOS VUELOS**
 AUTOR: **FERNANDO PÉREZ CRUZ**

FECHA:
SEPTIEMBRE 2019

Aplicación del uso de RPA'S en la explotación de canteras

Titulación: Máster en Ingeniería de Caminos Canales y Puertos

Directores: Ignacio García Utrilla, Javier Sánchez Espeso

Autor: Fernando Pérez Cruz

Palabras clave: RPA'S, Dron, Topografía, Fotogrametría, Modelo Digital del Terreno.

Resumen:

Dentro de la ingeniería civil el uso de herramientas para el desarrollo de los trabajos ha estado en constante evolución y desarrollo. Además del uso de ordenadores para mejorar la labor computacional de cálculos, ha habido un gran avance en el desarrollo de técnicas y herramientas en la captación de datos en campo.

El estudio de este proyecto se realizará sobre una cantera abierta, con las peculiaridades que ofrece este entorno a la hora de modelizar un relieve tan abrupto como son los taludes verticales de las explotaciones mineras.

Durante este proyecto nos centraremos en el uso de RPA'S o también llamados drones, como nueva herramienta dentro de la metodología convencional de vuelos fotogramétricos para la obtención de un levantamiento topográfico.

En el estado del arte se describen las metodologías usadas hasta el momento para realizar una modelización digital del terreno sobre la cantera, con sus ventajas e inconvenientes. Se analiza también los retos y oportunidades que ocasiona esta tecnología.

A continuación, se detalla los pasos realizados para el análisis de este procedimiento incluyendo flujos de trabajo y resultados por fases.

Para este estudio, se enfocará de diferentes perspectivas, primero se analizarán distintos escenarios en la disposición de apoyos de control con la intención de determinar qué apoyo mínimo es necesario para obtener buenos resultados, segundo se estudiarán distintas trayectorias de vuelo para evaluar qué dirección de vuelo es el que deposita mejor información para los resultados finales.

El fin de este proyecto es determinar la funcionalidad o validez de esta nueva herramienta de trabajo frente a metodologías usadas hasta este momento, teniendo en cuenta su rapidez de trabajo, efectividad en los resultados y costes asociados al desarrollo de la actividad.

Con los resultados que se obtengan se podrán realizar unas pautas a la planificación de estudios de próximos levantamientos topográficos en canteras abiertas.

Application of the use of RPA'S in quarry

Degree: Master's Degree in Civil Engineering

Directors: Ignacio García Utrilla, Javier Sánchez Espeso

Author: Fernando Pérez Cruz

Keywords: RPA'S, Dron, Topography, Photogrammetry, Digital Terrain Model.

Abstract:

Within the civil engineering the usage of tools for the development of the works has been in constant evolution and development. In addition to the use of computers in order to improve the computational work of calculations, there has been a great advance in the development of techniques and tools in the capturing of field data.

The study of this project will be carried out on an open quarry, with the peculiarities that this environment offers when modelling a relief as abrupt as the vertical slopes of the mining exploitations.

During this project we will focus on the use of RPA`S also known as drones, as a new tool within the conventional methodology of photogrammetric flights to obtain a topographic survey.

The state of the art describes the methodologies used so far to perform a digital modelling of the terrain on the quarry, with its advantages and disadvantages. The challenges and opportunities caused by this technology are also analysed.

Next, the steps carried out for the analysis of this procedure are detailed, including workflows and results by phases.

For this study, we will focus on different perspectives, first we will analyse different scenarios in the disposition of control supports with the intention of determining what minimum support is necessary to obtain good results, second we will study different flight trajectories to evaluate which flight direction is the one that deposits the best information for the final results.

The purpose of this project is to determine the functionality or validity of this new working tool against methodologies used until now, considering their speed of work, effectiveness in the results and costs associated with the development of the activity.

With the results obtained, it will be possible to carry out guidelines for the planning of future topographic surveys in open quarries.



Título:
Aplicaciones del uso de
RPA'S en la explotación
de canteras

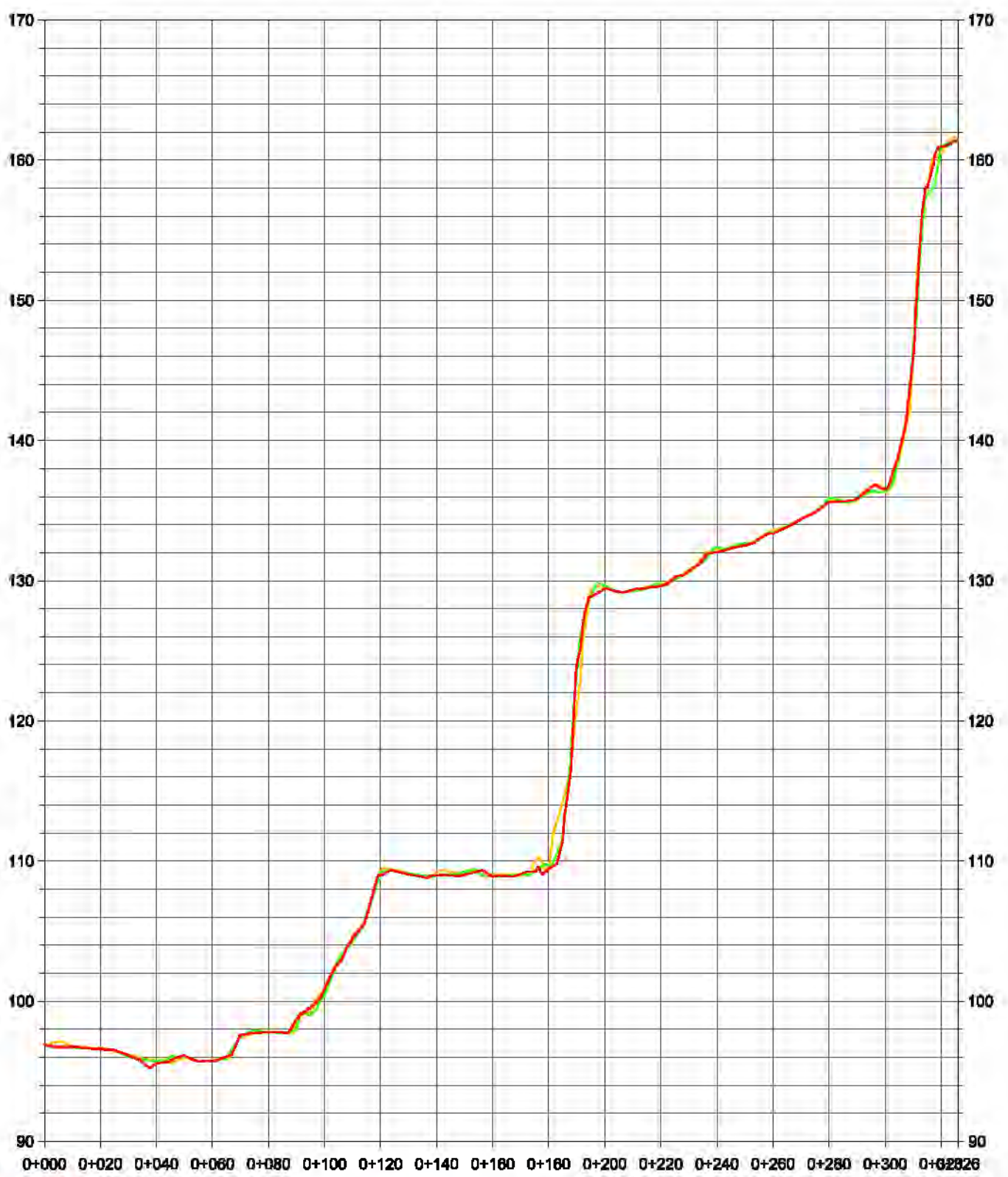


Nº PLANO 00	NOMBRE DEL PLANO: UBICACIÓN Y EMPLAZAMIENTO	FECHA: SEPTIEMBRE 2019
ESCALA 1 10000	AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ	

Perfil Longitudinal: Alineación_1

LEYENDA

- Exp.1
- Exp.2
- Total



Título:
Aplicaciones del uso de RPA'S en la explotación de canteras



Nº PLANO:
01

ESCALA V/H:
1/1000

NOMBRE DEL PLANO: PERFIL LONGITUDINAL

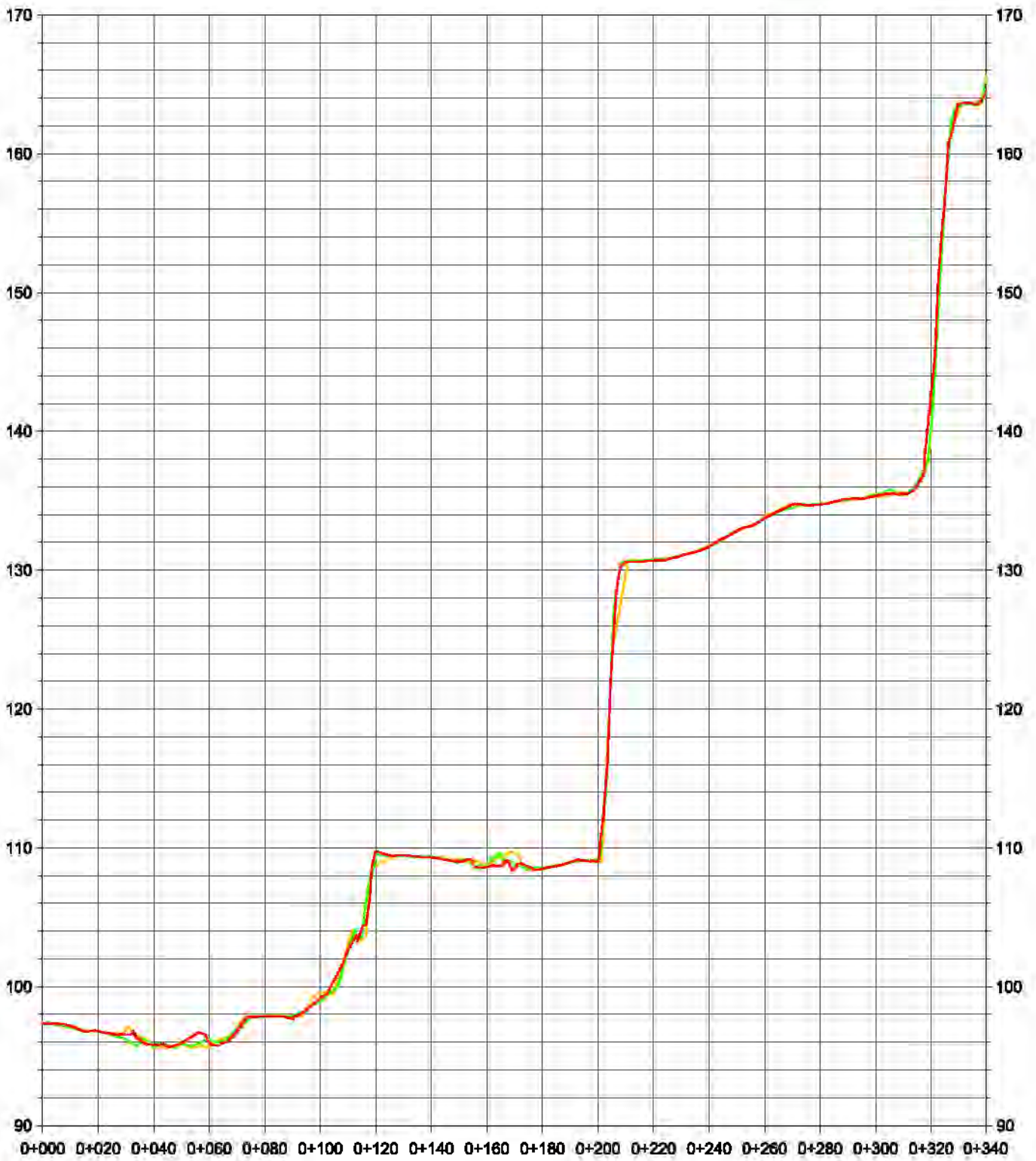
CASO: VUELO C1+C2 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE APOYO

AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA: SEPTIEMBRE 2019

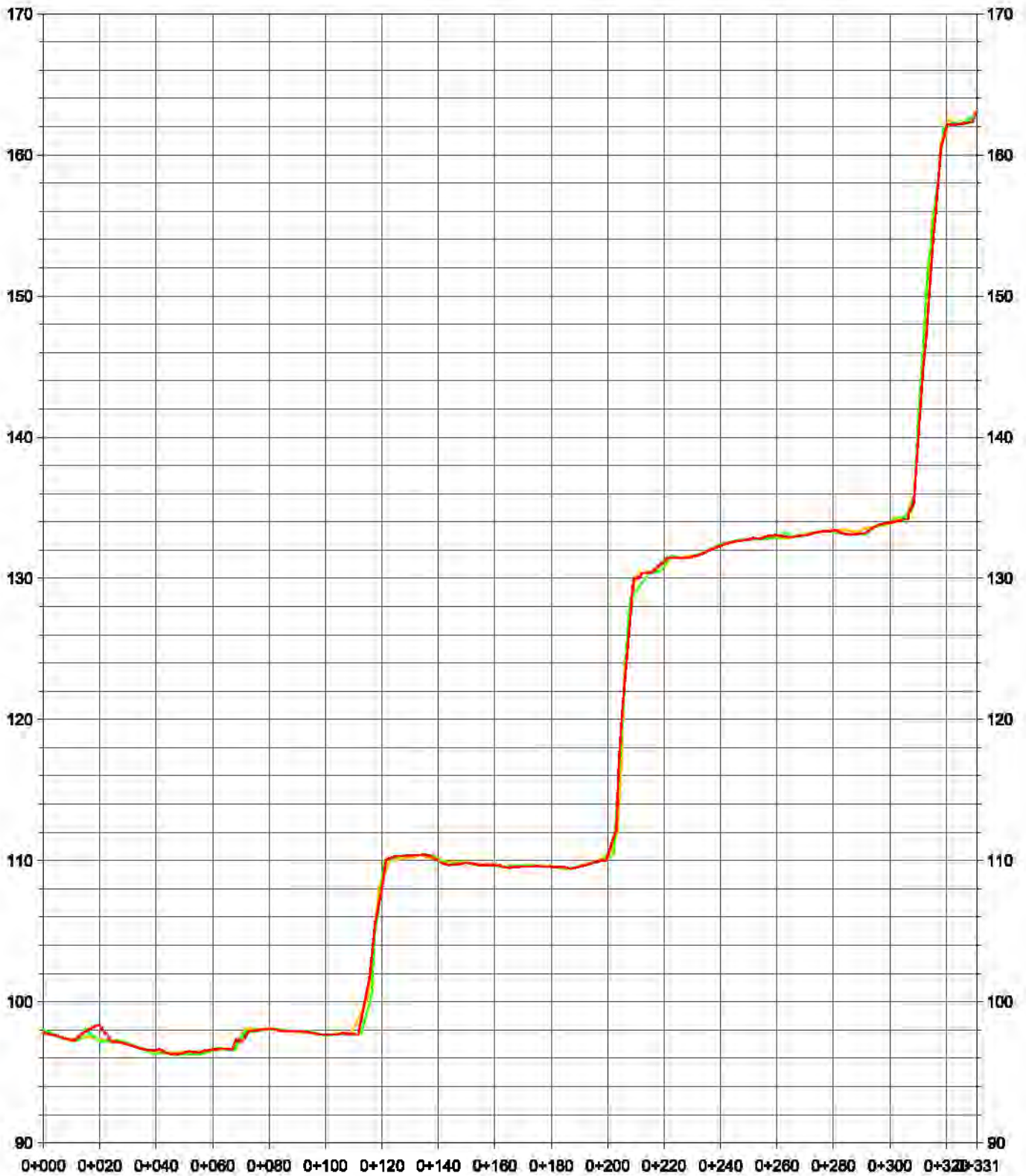
Perfil Longitudinal: Alineación_2

LEYENDA	
—	Exp.1
—	Exp.2
—	Total



Perfil Longitudinal: Alineación_3

LEYENDA	
—	Exp.1
—	Exp.2
—	Total



Título:
**Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras**



Nº PLANO
03
 ESCALA V/H
 1/100 / 1/2000

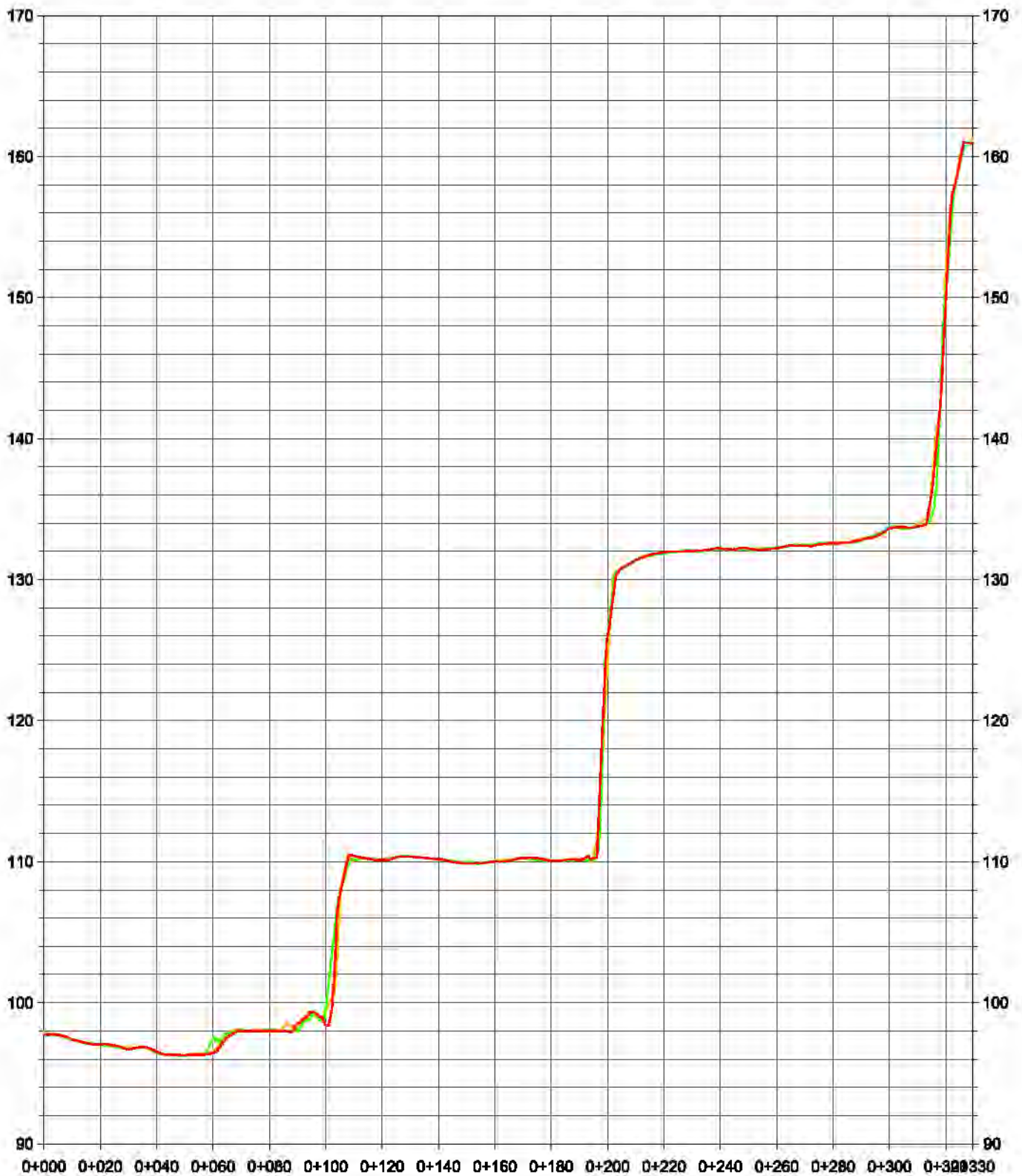
NOMBRE DEL PLANO
PERFIL LONGITUDINAL
 CASO
**VUELO C1+C2
 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE APOYO**
 AUTOR:
FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA
SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_4

LEYENDA

- Exp.1
- Exp.2
- Total



Título:
**Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras**



Nº PLANO:
04

ESCALA V/H:
 1/2000

NOMBRE DEL PLANO: **PERFIL LONGITUDINAL**

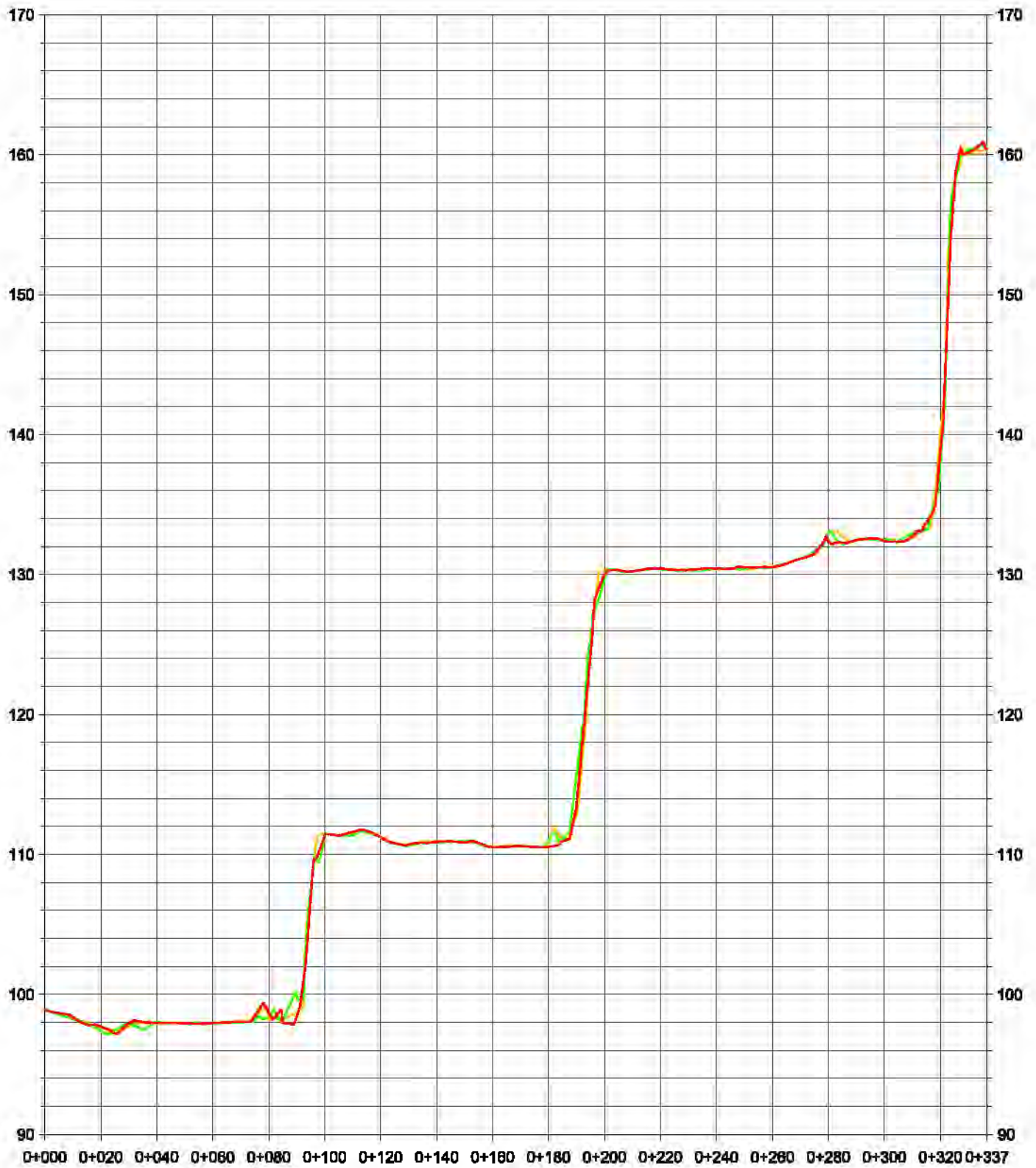
CARGO: **VUELO C1+C2
 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE APOYO**

AUTORE: **FERNANDO PÉREZ CRUZ**

FECHA:
SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_5

LEYENDA	
—	Exp.1
—	Exp.2
—	Total

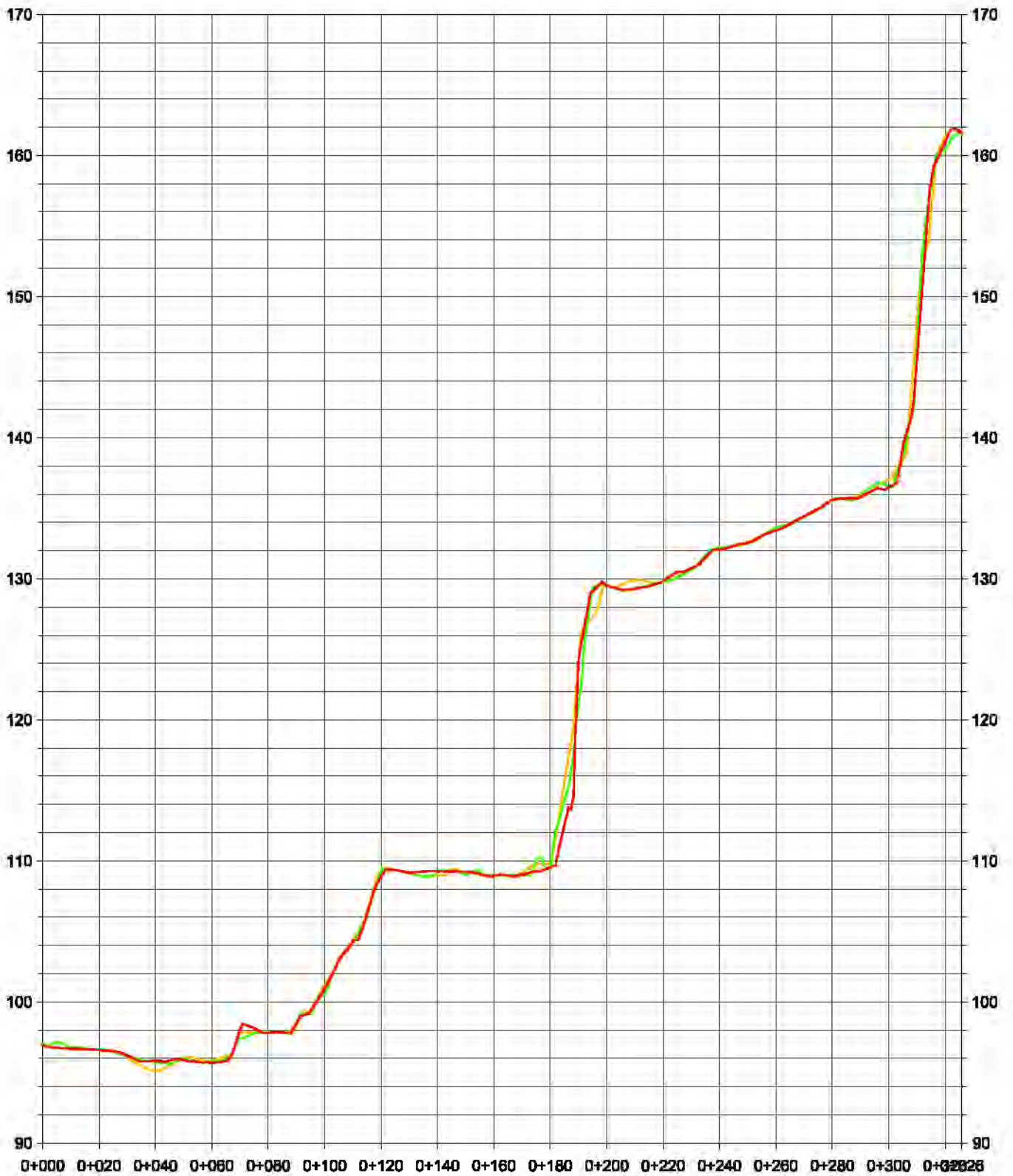


	Título: Aplicaciones del uso de RPA'S en la explotación de canteras		Nº PLANO: 05	NOMBRE DEL PLANO: PERFIL LONGITUDINAL	FECHA: SEPTIEMBRE 2019
			ESCALA V/H: 1/1000	CAD: VUELO G1+G2 DISTINTAS CONFIGURACIONES DE APOYO	AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ

Perfil Longitudinal: Alineación_1

LEYENDA

- C1
- C2
- C1C2



Título:
**Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras**



Nº PLANO
06
 ESCALA V/M
400 / 1000

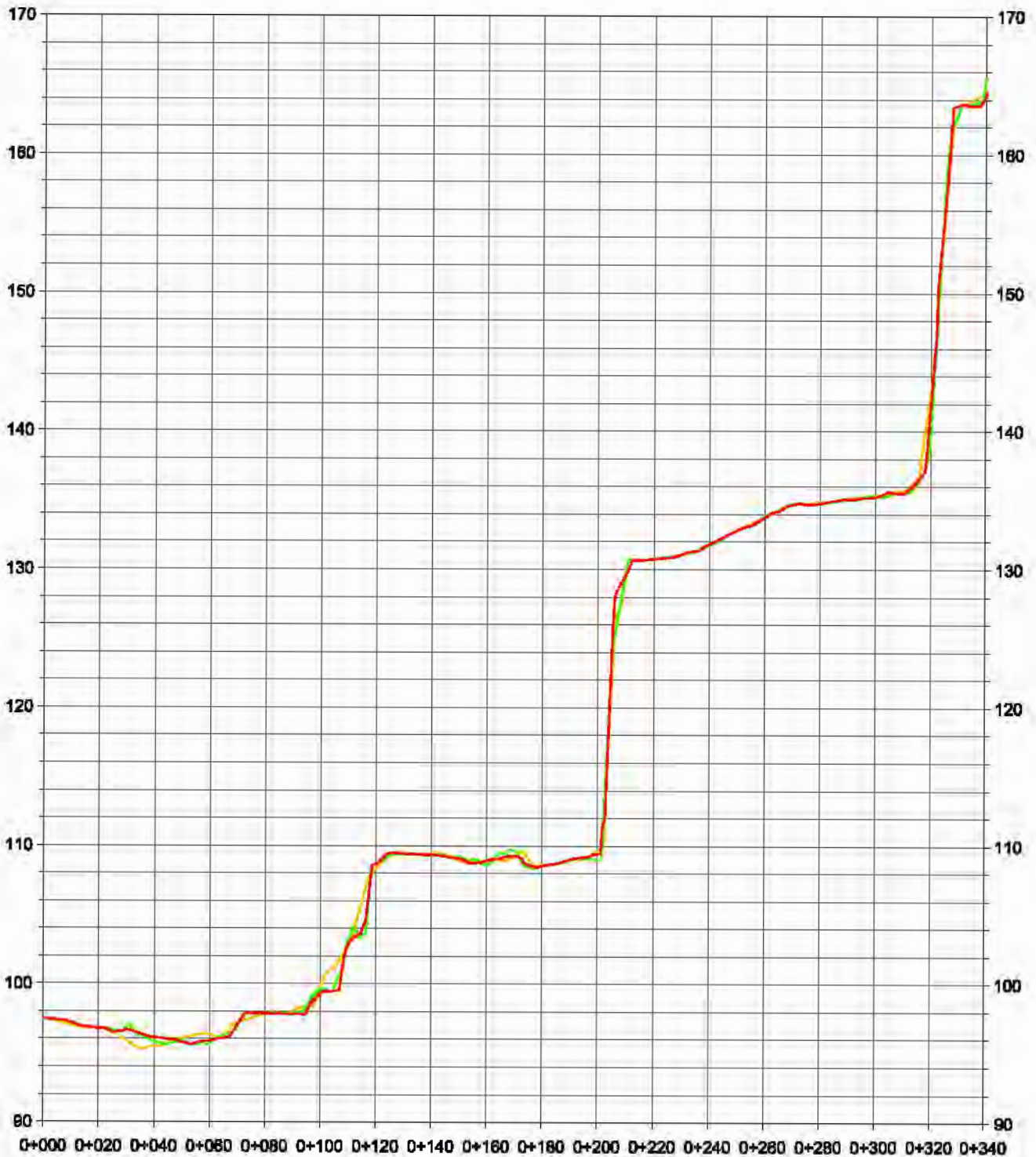
NOMBRE DEL PLANO: **PERFIL LONGITUDINAL**
 CARGO: **CONFIGURACIÓN APOYO EXP2
 DISTINTOS VUELOS**
 AUTOR: **FERNANDO PÉREZ CRUZ**

FECHA:
SEPTIEMBRE 2019

Perfil Longitudinal: Alineación_2

LEYENDA

- C1
- C2
- C1C2



Título:
Aplicaciones del uso de
RPA'S en la explotación
de canteras



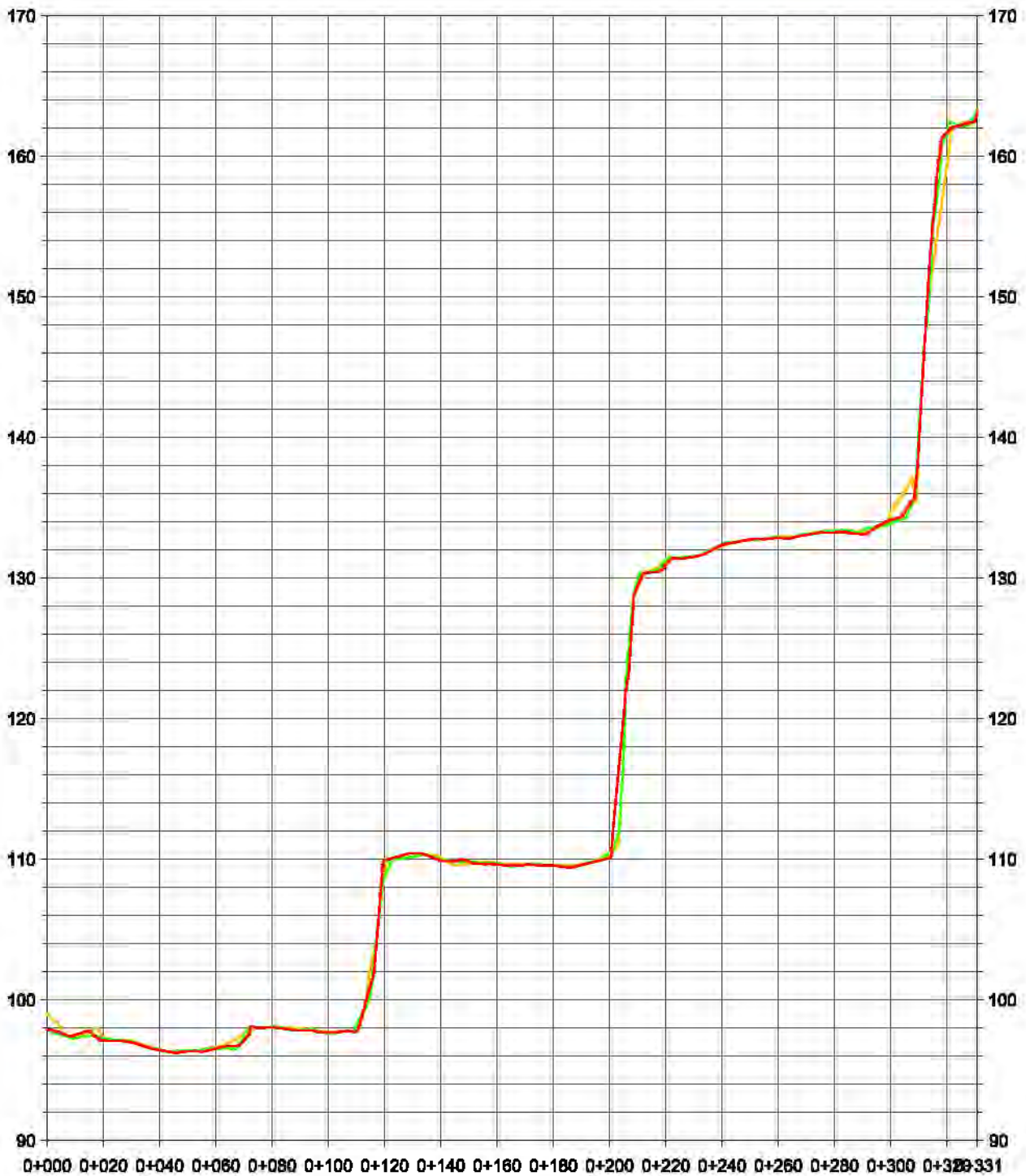
Nº PLANO:
07
ESCALA V/M:
1/5000

NOMBRE DEL PLANO: PERFIL LONGITUDINAL
CARBO: CONFIGURACIÓN APOYO EXP2
DISTINTOS VUELOS
AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA:
SEPTIEMBRE 2019

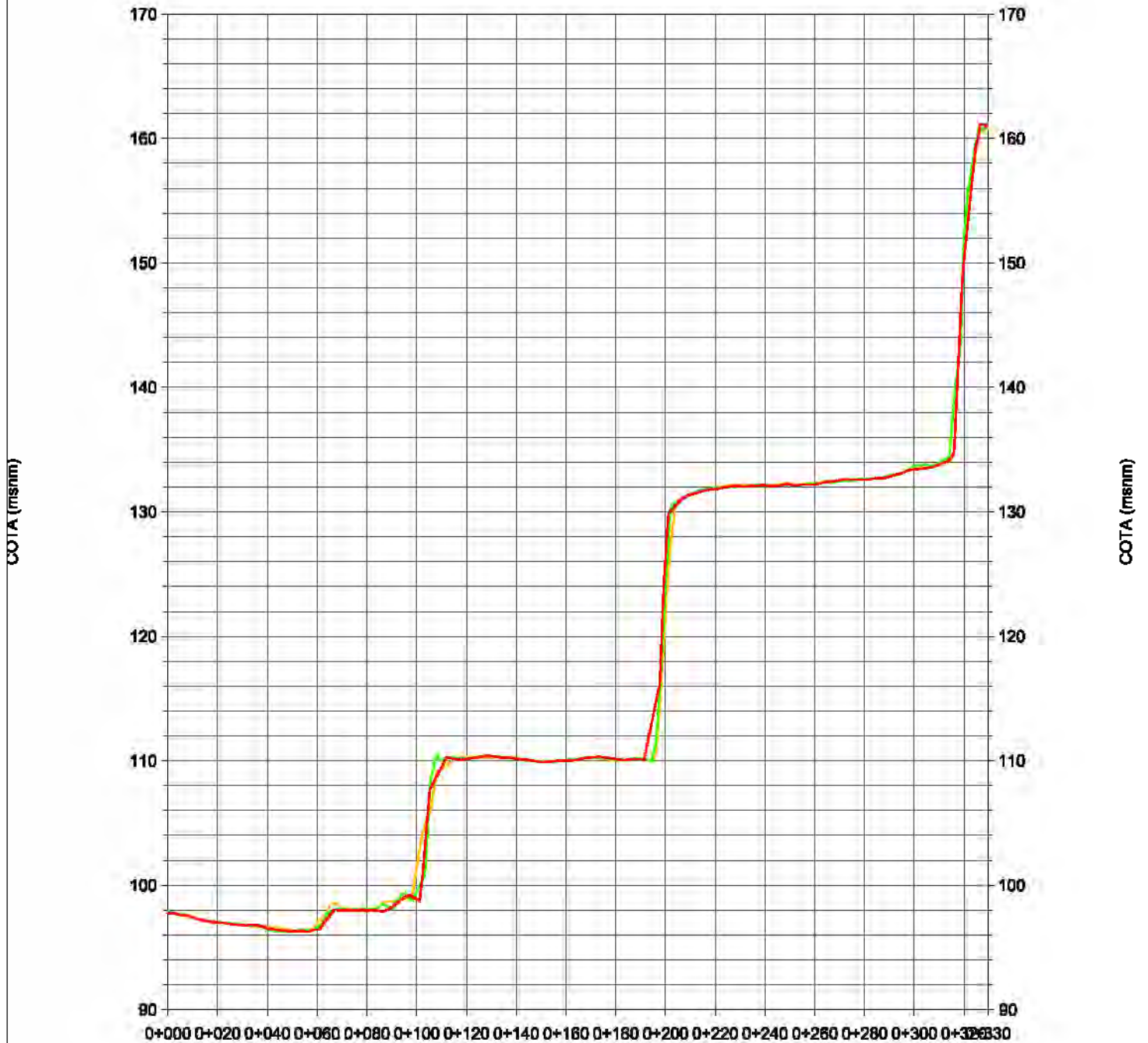
Perfil Longitudinal: Alineación_3

LEYENDA	
—	C1
—	C2
—	C1C2



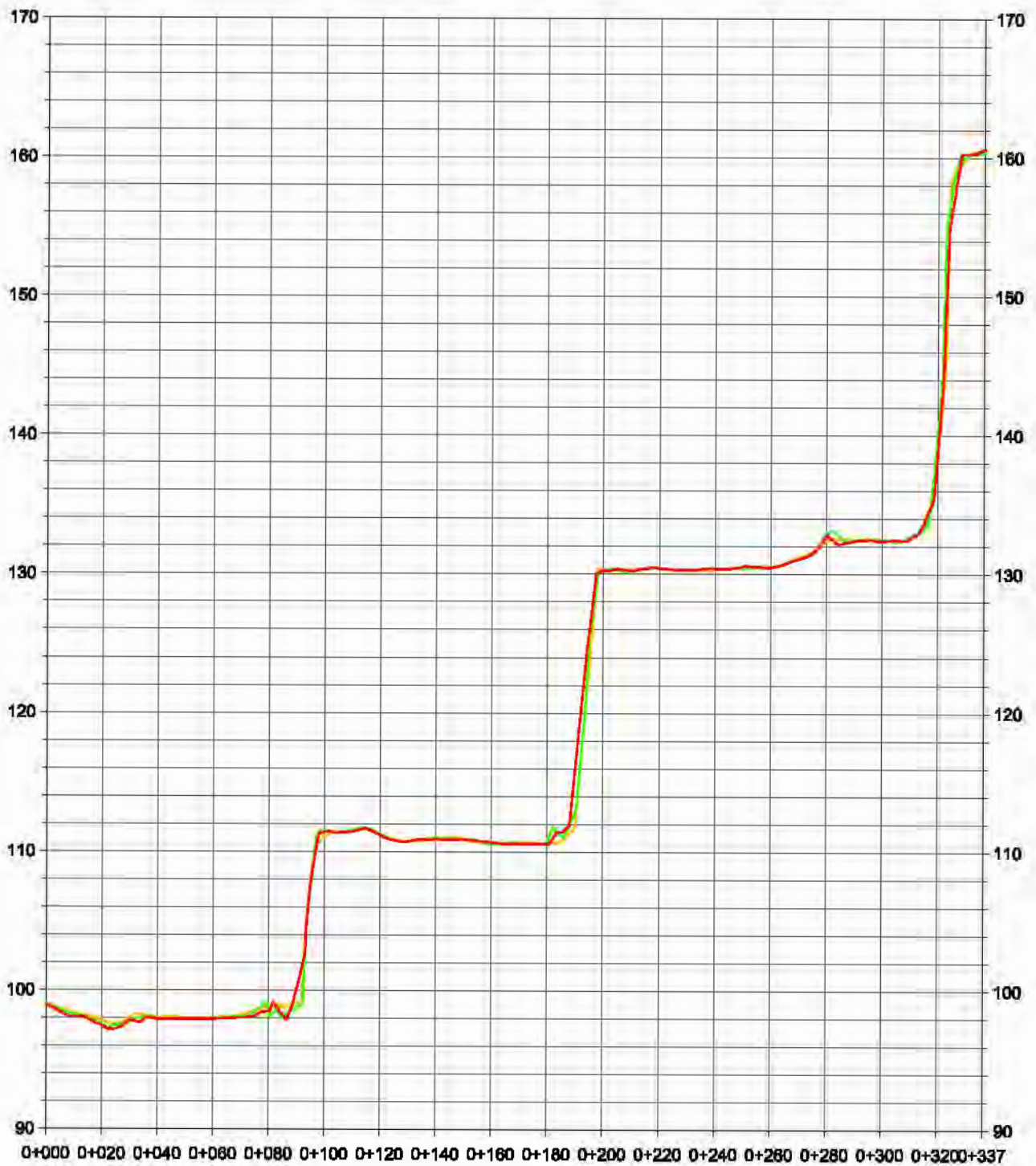
Perfil Longitudinal: Alineación_4

LEYENDA	
—	C1
—	C2
—	C1C2



Perfil Longitudinal: Alineación_5

LEYENDA	
—	C1
—	C2
—	C1C2



Título:
**Aplicaciones del uso de
 RPA'S en la explotación
 de canteras**



Nº PLANO:
10
 ESCALA V/M:
 1/1000

NOMBRE DEL PLANO: **PERFIL LONGITUDINAL**
 CARBO: **CONFIGURACIÓN APOYO EXP2
 DISTINTOS VUELDOS**
 AUTOR:
FERNANDO PÉREZ CRUZ

FECHA:
SEPTIEMBRE 2019



Título:
Aplicaciones del uso de
RPA'S en la explotación
de canteras



Nº PLANO 11	NOMBRE DEL PLANO: ALINEACIONES	FECHA: SEPTIEMBRE 2019
	CASO: PLANTA DE PERFILES	
ESCALA 2000	AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ	



Título:
Aplicaciones del
uso de RPA'S en
la explotación de
canteras



Nº PLANO 12	NOMBRE DEL PLANO: ORTOFOTO	FECHA: SEPTIEMBRE 2019
ESCALA 1/2000	AUTOR: FERNANDO PÉREZ CRUZ	